

The Rust Programming Language

日本語版

著：Steve Klabnik、Carol Nichols、貢献：Rust コミュニティ

このテキストのこの版では Rust 1.58（2022 年 1 月 13 日リリース）かそれ以降が使われていることを前提にしています。Rust をインストールしたりアップデートしたりするには第 1 章の「インストール」節を読んでください。

HTML 版は <https://doc.rust-lang.org/stable/book/> で公開されています。オフラインのときは、`rustup` でインストールした Rust を使って `rustup docs --book` で開けます。

訳注：日本語の HTML 版は <https://doc.rust-jp.rs/book-ja/> で公開されています。`rustup` を使ってオフラインで読むことはできません。

また、コミュニティによるいくつかの翻訳版もあります。

このテキストの（英語版の）ペーパーバック版と電子書籍版は No Starch 出版から発売されています。

まえがき

すぐにはわかりにくいかもしれませんが、Rust プログラミング言語は、エンパワメント (empowerment) を根本原理としています: どんな種類のコードを現在書いているにせよ、Rust は幅広い領域で以前よりも遠くへ到達し、自信を持ってプログラムを組む力を与え (empower) ます。

一例を挙げると、メモリ管理やデータ表現、並行性などの低レベルな詳細を扱う「システムレベル」のプログラミングがあります。伝統的にこの分野は難解で、年月をかけてやっかいな落とし穴を回避する術を習得した選ばれし者にだけ可能と見なされています。そのように鍛錬を積んだ者でさえ注意が必要で、さもないと書いたコードがクラッキングの糸口になったりクラッシュやデータ破損を引き起こしかねないのです。

この難しさを取り除くために、Rust は、古い落とし穴を排除し、その過程で使いやすく役に立つ洗練された一連のツールを提供します。低レベルな制御に「下がる」必要があるプログラマは、お決まりのクラッシュやセキュリティホールをリスクを負わず、気まぐれなツールチェーンのデリケートな部分を学ぶ必要なく Rust で同じことができます。さらにいいことに、Rust は、スピードとメモリ使用の観点で効率的な信頼性の高いコードへと自然に導くよう設計されています。

既に低レベルコードに取り組んでいるプログラマは、Rust を使用してさらなる高みを目指せます。例えば、Rust で並列性を導入することは、比較的リスクです: コンパイラが伝統的なミスを検出してくれるのです。そして、クラッシュや脆弱性の糸口を誤って導入しないという自信を持ってコードの大胆な最適化に取り組めるのです。

ですが、Rust は低レベルなシステムプログラミングに限定されているわけではありません。十分に表現力豊かでエルゴノミックなので、コマンドラインアプリや Web サーバ、その他様々な楽しいコードを書けます。この本の後半に両者の単純な例が見つかるでしょう。Rust を使うことで 1 つの領域から他の領域へと使い回せる技術を身につけられます; ウェブアプリを書いて Rust を学び、それからその同じ技術をラズベリーパイを対象に適用できるのです。

この本は、ユーザに力を与え (empower) る Rust のポテンシャルを全て含んでいます。あなたの Rust の知識のみをレベルアップさせるだけでなく、プログラマとしての全般的な能力や自信をもレベルアップさせる手助けを意図した親しみやすくわかりやすいテキストです。さあ、飛び込んで学ぶ準備をしてください。Rust コミュニティへようこそ!

- ニコラス・マツサキス (Nicholas Matsakis) とアaron・チューロン (Aaron Turon)

はじめに

注釈: この本のこの版は、本として利用可能な **The Rust Programming Language** と、No Starch Press の ebook 形式と同じです。

The Rust Programming Language へようこそ。Rust に関する入門書です。

Rust プログラミング言語は、高速で信頼できるソフトウェアを書く手助けをしてくれます。高レベルのエルゴノミクス (訳注: ergonomics とは、人間工学的という意味。砕いて言えば、人間に優しいということ) と低レベルの制御は、しばしばプログラミング言語の設計においてトレードオフの関係になります; Rust は、その衝突に挑戦しています。バランスのとれた強力な技術の許容量と素晴らしい開発者経験を通して、Rust は伝統的にそれらの制御と紐付いていた困難全てなしに低レベルの詳細 (メモリ使用など) を制御する選択肢を与えてくれます。

Rust は誰のためのものなの

Rust は、様々な理由により多くの人にとって理想的です。いくつか最も重要なグループを見ていきましょう。

開発者チーム

Rust は、いろんなレベルのシステムプログラミングの知識を持つ開発者の巨大なチームとコラボするのに生産的なツールであると証明してきています。低レベルコードは様々な種類の微細なバグを抱える傾向があり、そのようなバグは他の言語だと広範なテストと、経験豊富な開発者による注意深いコードレビューによってのみ捕捉されるものです。Rust においては、コンパイラが並行性のバグも含めたこのようなとらえどころのないバグのあるコードをコンパイルするのを拒むことで、門番の役割を担います。コンパイラとともに取り組むことで、チームはバグを追いかけるよりもプログラムのロジックに集中することに、時間を費やせるのです。

Rust はまた、現代的な開発ツールをシステムプログラミング世界に導入します。

- Cargo は、付属の依存関係管理ツール兼ビルドツールで、依存関係の追加、コンパイル、管理を容易にし、Rust のエコシステム全体で一貫性を持たせます。
- Rustfmt は開発者の間で一貫したコーディングスタイルを保証します。

- Rust 言語サーバーは、IDE(統合開発環境) との統合により、コード補完やインラインエラーメッセージに対応しています。

これらのツールや Rust のエコシステムの他のツールを使用することで、開発者はシステムレベルのコードを書きながら生産性を高めることができます。

学生

Rust は、学生やシステムの概念を学ぶことに興味のある方向けです。Rust を使用して、多くの人が OS 開発などの話題を学んできました。コミュニティはとても暖かく、喜んで学生の質問に答えてくれます。この本のような努力を通じて、Rust チームはシステムの概念を多くの人、特にプログラミング初心者にとってアクセス可能にしたいと考えています。

企業

数百の企業が、大企業、中小企業を問わず、様々なタスクにプロダクションで Rust を使用しています。そのタスクには、コマンドラインツール、Web サービス、DevOps ツール、組み込みデバイス、オーディオとビデオの解析および変換、暗号通貨、生物情報学、サーチエンジン、IoT アプリケーション、機械学習、Firefox ウェブブラウザの主要部分さえ含まれます。

オープンソース開発者

Rust は、Rust プログラミング言語やコミュニティ、開発者ツール、ライブラリを開発したい方向けです。あなたが Rust 言語に貢献されることを心よりお待ちしております。

スピードと安定性に価値を見出す方

Rust は、スピードと安定性を言語に渴望する方向けです。ここでいうスピードとは、Rust で作れるプログラムのスピードとソースコードを書くスピードのことです。Rust コンパイラのチェックにより、機能の追加とリファクタリングを通して安定性を保証してくれます。これはこのようなチェックがない言語の脆いレガシーコードとは対照的で、その場合開発者はしばしば、変更するのを恐れてしまいます。ゼロコスト抽象化を志向し、手で書いたコードと同等の速度を誇る低レベルコードにコンパイルされる高レベル機能により、Rust は安全なコードを高速なコードにもしようと努力しています。

Rust 言語は他の多くのユーザのサポートも望んでいます; ここで名前を出した方は、ただの最大の出資者の一部です。総合すると、Rust の最大の野望は、プログラマが数十年間受け入れてきた代償を、安全性と生産性、スピードとエルゴノミクスを提供することで排除することです。Rust を試してみて、その選択が自分に合っているか確かめてください。

この本は誰のためのものなの

この本は、あなたが他のプログラミング言語でコードを書いたことがあることを想定していますが、具体的にどの言語かという想定はしません。私たちは、幅広い分野のプログラミング背景からの人にとってこの資料を広くアクセスできるようにしようとしてきました。プログラミングとはなんなのかやそれについて考える方法について多くを語るつもりはありません。もし、完全なプログラミング初心者であれば、プログラミング入門を特に行う本を読むことでよりよく役に立つでしょう。

この本の使い方

一般的に、この本は、順番に読み進めていくことを前提にしています。後の章は、前の章の概念の上に成り立ち、前の章では、ある話題にさほど深入りしない可能性があります; 典型的に後ほどの章で同じ話題を再度しています。

この本には 2 種類の章があるとわかるでしょう: 概念の章とプロジェクトの章です。概念の章では、Rust の一面を学ぶでしょう。プロジェクトの章では、それまでに学んだことを適用して一緒に小さなプログラムを構築します。2、12、20 章がプロジェクトの章です。つまり、残りは概念の章です。

第 1 章は Rust のインストール方法、“Hello, world!” プログラムの書き方、Rust のパッケージマネージャ兼、ビルドツールの Cargo の使用方法を説明します。第 2 章は、Rust 言語への実践的な導入です。ここでは概念をざっくりと講義し、後ほどの章で追加の詳細を提供します。今すぐ Rust の世界に飛び込みたいなら、第 2 章こそがそのためのものです。第 3 章は他のプログラミング言語の機能に似た Rust の機能を講義していますが、最初その 3 章すら飛ばして、まっすぐに第 4 章に向かい、Rust の所有権システムについて学びたいという可能性があります。しかしながら、あなたが次に進む前に全ての詳細を学ぶことを好む特別に几帳面な学習者なら、第 2 章を飛ばして真っ先に第 3 章に行き、学んだ詳細を適用するプロジェクトに取り組みたくなった時に第 2 章に戻りたくなる可能性があります。

第 5 章は、構造体とメソッドについて議論し、第 6 章は `enum`、`match` 式、`if let` 制御フロー構文を講義します。構造体と `enum` を使用して Rust において独自の型を作成します。

第 7 章では、Rust のモジュールシステムと自分のコードとその公開された API(Application Programming Interface) を体系化するプライバシー規則について学びます。第 8 章では、ベクタ、文字列、ハッシュマップなどの標準ライブラリが提供する一般的なコレクションデータ構造の一部を議論します。第 9 章では、Rust のエラー処理哲学とテクニックを探究します。

第 10 章ではジェネリクス、トレイト、ライフタイムについて深入りし、これらは複数の型に適用されるコードを定義する力をくれます。第 11 章は、完全にテストに関してで、Rust の安全性保証があってさえ、プログラムのロジックが正しいことを保証するために、必要になります。第 12 章では、ファイル内のテキストを検索する `grep` コマンドラインツールの一部の機能を自身で構築します。このために、以前の章で議論した多くの概念を使用します。

第 13 章はクロージャとイテレータを探究します。これらは、関数型プログラミング言語由来の Rust の機能です。第 14 章では、Cargo をより詳しく調査し、他人と自分のライブラリを共有する最善の策について語ります。第 15 章では、標準ライブラリが提供するスマートポインタとその機能を可能にするトレイトを議論します。

第 16 章では、並行プログラミングの異なるモデルを見ていき、Rust が恐れなしに複数のスレッドでプログラムする手助けをする方法を語ります。第 17 章では、馴染み深い可能性のあるオブジェクト指向プログラミングの原則と Rust のイディオムがどう比較されるかに目を向けます。

第 18 章は、パターンとパターンマッチングのリファレンスであり、これらは Rust プログラムを通して、考えを表現する強力な方法になります。第 19 章は、unsafe Rust やマクロ、ライフタイム、トレイト、型、関数、クロージャの詳細を含む、興味のある高度な話題のスモークガスボード (訳注：日本というバイキングのこと) を含みます。

第 20 章では、低レベルなマルチスレッドの Web サーバを実装するプロジェクトを完成させます！

最後に、言語についての有用な情報をよりリファレンスのような形式で含む付録があります。付録 A は Rust のキーワードを講義し、付録 B は、Rust の演算子と記号、付録 C は、標準ライブラリが提供する導出可能なトレイト、付録 D はいくつか便利な開発ツールを講義し、付録 E では Rust のエディションについて説明します。

この本を読む間違った方法なんてありません：飛ばしたければ、どうぞご自由に！ 混乱したら、前の章に戻らなければならない可能性もあります。ですが、自分に合った方法でどうぞ。

Rust を学ぶ過程で重要な部分は、コンパイラが表示するエラーメッセージを読む方法を学ぶことです：それは動くコードへと導いてくれます。そのため、各場面でコンパイラが表示するエラーメッセージとともに、コンパイルできない例を多く提供します。適当に例を選んで走らせたなら、コンパイルできないかもしれないことを知ってください！ 周りのテキストを読んで実行しようとしている例がエラーになることを意図しているのか確認することをお勧めします。フェリスもコードが動作するとは意図されていないコードを見分けるのを手助けしてくれます：

Ferris	Meaning
Image File doesn't exist	このコードはコンパイルできません！
Image File doesn't exist	このコードはパニックします！
Image File doesn't exist	このコードはアンセーフなコードを含みます。
Image File doesn't exist	このコードは求められている振る舞いをしません。

ほとんどの場合、コンパイルできないあらゆるコードの正しいバージョンへと導きます。

ソースコード

この本が生成されるソースファイルは、**GitHub** で見つかります。

訳注: 日本語版はこちらです。

目次

The Rust Programming Language 日本語版	i
まえがき	ii
はじめに	iii
Rust は誰のためのものなの	iii
この本は誰のためのものなの	v
この本の使い方	v
ソースコード	vii
第 1 章 事始め	1
1.1 インストール	1
1.2 Hello, World!	4
1.3 Hello, Cargo!	8
1.4 まとめ	12
第 2 章 数当てゲームのプログラミング	13
2.1 新規プロジェクトの立ち上げ	13
2.2 予想を処理する	14
2.3 秘密の数字を生成する	19
2.4 予想と秘密の数字を比較する	23
2.5 ループで複数回の予想を可能にする	26
2.6 まとめ	29
第 3 章 一般的なプログラミングの概念	30
3.1 変数と可変性	30
3.2 データ型	34

目次	ix
3.3 関数	40
3.4 コメント	45
3.5 制御フロー	46
3.6 まとめ	52
第 4 章 所有権を理解する	53
4.1 所有権とは?	53
4.2 参照と借用	65
4.3 スライス型	72
4.4 まとめ	77
第 5 章 構造体を使用して関係のあるデータを構造化する	79
5.1 構造体を定義し、インスタンス化する	79
5.2 構造体を使ったプログラム例	85
5.3 メソッド記法	90
5.4 まとめ	95
第 6 章 Enum とパターンマッチング	96
6.1 Enum を定義する	96
6.2 match 制御フロー演算子	103
6.3 if let で簡潔な制御フロー	109
6.4 まとめ	111
第 7 章 肥大化していくプロジェクトをパッケージ、クレート、モジュールを利用して管理する	112
7.1 パッケージとクレート	113
7.2 モジュールを定義して、スコープとプライバシーを制御する	114
7.3 モジュールツリーの要素を示すためのパス	116
7.4 use キーワードでパスをスコープに持ち込む	121
7.5 モジュールを複数のファイルに分割する	126
7.6 まとめ	128
第 8 章 一般的なコレクション	129
8.1 ベクタで値のリストを保持する	129
8.2 文字列で UTF-8 でエンコードされたテキストを保持する	134
8.3 キーとそれに紐づいた値をハッシュマップに格納する	142
8.4 まとめ	148
第 9 章 エラー処理	149
9.1 panic! で回復不能なエラー	149

9.2	Result で回復可能なエラー	153
9.3	panic! すべきかするまいか	162
9.4	まとめ	166
第 10 章	ジェネリック型、トレイト、ライフタイム	168
10.1	関数を抽出することで重複を取り除く	168
10.2	ジェネリックなデータ型	171
10.3	トレイト: 共通の振る舞いを定義する	180
10.4	ライフタイムで参照を検証する	188
10.5	ジェネリックな型引数、トレイト境界、ライフタイムを一度に	199
10.6	まとめ	199
第 11 章	自動テストを書く	201
11.1	テストの記述法	202
11.2	テスト関数の構成	202
11.3	テストの実行のされ方を制御する	211
11.4	テストの体系化	217
11.5	まとめ	223
第 12 章	入出力プロジェクト: コマンドラインプログラムを構築する	224
12.1	コマンドライン引数を受け付ける	225
12.2	ファイルを読み込む	228
12.3	リファクタリングしてモジュール性とエラー処理を向上させる	230
12.4	テスト駆動開発でライブラリの機能を開発する	243
12.5	環境変数を取り扱う	249
12.6	標準出力ではなく標準エラーにエラーメッセージを書き込む	255
12.7	まとめ	257
第 13 章	関数型言語の機能: イテレータとクロージャ	258
13.1	クロージャ: 環境をキャプチャできる匿名関数	258
13.2	一連の要素をイテレータで処理する	274
13.3	他のイテレータを生成するメソッド	277
13.4	入出力プロジェクトを改善する	283
13.5	パフォーマンス比較: ループ VS イテレータ	287
13.6	まとめ	289
第 14 章	Cargo と Crates.io についてより詳しく	290
14.1	リリースプロファイルでビルドをカスタマイズする	290
14.2	Crates.io にクレートを公開する	292

14.3	Cargo のワークスペース	303
14.4	cargo install で Crates.io からバイナリをインストールする	309
14.5	独自のコマンドで Cargo を拡張する	310
14.6	まとめ	310
第 15 章	スマートポインタ	311
15.1	ヒープのデータを指す Box<T>を使用する	312
15.2	Deref トレイトでスマートポインタを普通の参照のように扱う	319
15.3	Drop トレイトで片付け時にコードを走らせる	326
15.4	Rc<T>は、参照カウント方式のスマートポインタ	329
15.5	RefCell<T>と内部可変性パターン	334
15.6	循環参照は、メモリをリークすることもある	343
15.7	まとめ	352
第 16 章	恐れるな！ 並行性	353
16.1	スレッドを使用してコードを同時に走らせる	354
16.2	メッセージ受け渡しを使ってスレッド間でデータを転送する	361
16.3	状態共有並行性	368
16.4	Sync と Send トレイトで拡張可能な並行性	377
16.5	まとめ	378
第 17 章	Rust のオブジェクト指向プログラミング機能	379
17.1	オブジェクト指向言語の特徴	379
17.2	トレイトオブジェクトで異なる型の値を許容する	383
17.3	オブジェクト指向デザインパターンを実装する	391
17.4	まとめ	404
第 18 章	パターンとマッチング	406
18.1	パターンが使用されることのある箇所全部	406
18.2	論駁可能性: パターンが合致しないかどうか	412
18.3	パターン記法	414
18.4	まとめ	431
第 19 章	高度な機能	432
19.1	Unsafe Rust	432
19.2	高度なトレイト	442
19.3	高度な型	455
19.4	高度な関数とクロージャ	461
19.5	マクロ	464

19.6	まとめ	473
第 20 章	最後のプロジェクト: マルチスレッドの Web サーバを構築する	475
20.1	シングルスレッドの Web サーバを構築する	476
20.2	シングルスレッドサーバをマルチスレッド化する	487
20.3	正常なシャットダウンと片付け	510
20.4	まとめ	521
付録		522
付録 A:	キーワード	522
付録 B:	演算子と記号	525
付録 C:	導出可能なトレイト	531
付録 D -	便利な開発ツール	534
付録 E:	エディション	538
付録 F:	本の翻訳	539
付録 G:	Rust の作られ方と “Nightly Rust”	540

第 1 章

事始め

Rust の旅を始めましょう！ 学ぶべきことはたくさんありますが、いかなる旅もどこかから始まります。この章では、以下のことを説明します：

- Rust を Linux、macOS、Windows にインストールする
- Hello, world! と表示するプログラムを書く
- cargo という Rust のパッケージマネージャ兼ビルドシステムを使用する

1.1 インストール

最初の手順は、Rust をインストールすることです。Rust は、Rust のバージョンと関連するツールを管理する、rustup というコマンドラインツールを使用してダウンロードします。ダウンロードには、インターネットへの接続が必要になります。

注釈: なんらかの理由で rustup を使用したくない場合、Rust インストールページで、他の選択肢をご覧ください。

訳注：日本語版の Rust インストールページはこちらです。

以下の手順で最新の安定版の Rust コンパイラをインストールします。Rust は安定性 (stability) を保証しているので、現在この本の例でコンパイルできるものは、新しいバージョンになってもコンパイルでき続けることが保証されます。出力は、バージョンによって多少異なる可能性があります。Rust は頻繁にエラーメッセージと警告を改善しているからです。言い換えると、どんな新しいバージョンでもこの手順に従ってインストールした安定版なら、この本の内容で想定通りに動くはずです。

1.1.1 コマンドラインの記法

この章及び、本を通して、端末で使用するなんらかのコマンドを示すことがあります。読者が入力すべき行は、全て \$ で始まります。ただし、読者が \$ 文字を入力する必要はありません；これは各コマンドの開始を示しているだけです。\$ で始まらない行は、典型的には直前のコマンドの出力を示します。また、PowerShell 限定の例には、\$ ではなく、> を使用します。

1.1.2 Linux と macOS に rustup をインストールする

Linux か macOS を使用しているなら、端末（ターミナル）を開き、以下のコマンドを入力してください：

```
$ curl --proto '=https' --tlsv1.2 https://sh.rustup.rs -sSf | sh
```

このコマンドはスクリプトをダウンロードし、rustup ツールのインストールを開始し、Rust の最新の安定版をインストールします。パスワードを求められる可能性があります。インストールがうまく行けば、以下の行が出現するでしょう：

```
Rust is installed now. Great!
```

これに加えて、なんらかのリンカが必要になるでしょう。既にインストールされている可能性は高いものの、Rust プログラムをコンパイルしようとした時、リンカが実行できないというエラーが出たら、システムにリンカがインストールされていないということなので、手動でインストールする必要があるでしょう。C コンパイラは通常正しいリンカとセットになっています。自分のプラットフォームのドキュメンテーションを見て C コンパイラのインストール方法を確認してください。一般的な Rust パッケージの中には、C コードに依存し、C コンパイラが必要になるものもあります。ですので、C コンパイラは今のうちにインストールしておく価値があるかもしれません。

1.1.3 Windows で rustup をインストールする

Windows では、<https://www.rust-lang.org/tools/install> に行き、手順に従って Rust をインストールしてください。インストールの途中で、Visual Studio 2013 以降用の C++ ビルドツールも必要になるという旨のメッセージが出るでしょう。ビルドツールを取得する最も簡単な方法は、Visual Studio 2019 用のビルドツールをインストールすることです。どのワークロード (workloads) をインストールするかと質問されたときは、“C++ build tools” が選択されており、Windows 10 SDK と英語の言語パック (English language pack) が含まれていることを確かめてください。

訳注：Windows の言語を日本語にしている場合は言語パックのところで「日本語」が選択されており、そのままの設定でインストールしても基本的に問題ないはずです。しかし、サード

パーティーのツールやライブラリの中には英語の言語パックを必要とするものがあるため、「日本語」に加えて「英語」も選択することをお勧めします。

これ以降、**cmd.exe** と PowerShell の両方で動くコマンドを使用します。特段の違いがあったら、どちらを使用すべきか説明します。

1.1.4 更新及びアンインストール

rustup 経由で Rust をインストールしたなら、最新版へ更新するのは簡単です。シェルから以下の更新スクリプトを実行してください:

```
$ rustup update
```

Rust と rustup をアンインストールするには、シェルから以下のアンインストールスクリプトを実行してください:

```
$ rustup self uninstall
```

1.1.5 トラブルシューティング

Rust が正常にインストールされているか確かめるには、シェルを開いて以下の行を入力してください:

```
$ rustc --version
```

バージョンナンバー、コミットハッシュ、最新の安定版がリリースされたコミット日時が以下のフォーマットで表示されるのを目撃するはずです。

```
rustc x.y.z (abcabcabc yyyy-mm-dd)
```

この情報が見られたなら、Rust のインストールに成功しています！ この情報が出ず、Windows を使っているなら、Rust が %PATH% システム環境変数にあることを確認してください。これらが全て正常であるのに、それでも Rust がうまく動かないなら、助力を得られる場所はたくさんあります。最も簡単なのが Rust の公式 Discord の#beginners チャンネルです。そのアドレスで、助けてくれる他の Rustacean (Rust ユーザが自分たちのことを呼ぶ、冗談めいたニックネーム) たちとチャットできます。他にも、素晴らしいリソースとしてユーザ・フォーラムと Stack Overflow が挙げられます。

訳注 1: Rustacean について、知らないかもしれない補足です。公式 Twitter 曰く、Rustacean は crustaceans (甲殻類) から来ているそうです。そのため、Rust のマスコットは (非公式らしいですが) カニ。上の会話で C の欠点を削ぎ落としているから c を省いてるの？ みたいなことを聞いていますが、違うそうです。検索したら、堅牢性が高いから甲殻類という意見も

ありますが、真偽は不明です。明日使えるかもしれないトリビアでした。

訳注 2：上にある公式 **Discord** は英語話者のコミュニティです。日本語話者のためのコミュニティが **slack** にあり、こちらでも **Rustacean** たちが活発に議論をしています。公式 **Discord** 同様、初心者向けの **#beginners** チャンネルが存在するので、気軽に質問してみてください。

1.1.6 ローカルのドキュメンテーション

インストールされた **Rust** には、ローカルに複製されたドキュメンテーションのコピーが含まれているので、これをオフラインで閲覧することができます。ブラウザでローカルのドキュメンテーションを開くには、`rustup doc` を実行してください。

標準ライブラリにより提供される型や関数があるのかや、それをどう使えば良いのかがよくわからないときは、いつでも **API** のドキュメンテーションを検索してみてください！

1.2 Hello, World!

Rust をインストールしたので、最初の **Rust** プログラムを書きましょう。新しい言語を学ぶ際に、**Hello, world!** というテキストを画面に出力する小さなプログラムを書くことは伝統的なことなので、ここでも同じようにしましょう！

注釈: この本は、コマンドラインに基礎的な馴染みがあることを前提にしています。**Rust** は、編集やツール、どこにコードがあるかについて特定の要求をしないので、コマンドラインではなく **IDE** を使用することを好むのなら、どうぞご自由にお気に入りの **IDE** を使用してください。今では、多くの **IDE** がなんらかの形で **Rust** をサポートしています; 詳しくは、**IDE** のドキュメンテーションをご覧ください。最近、**Rust** チームは優れた **IDE** サポートを有効にすることに注力し、その前線で急激に成果があがっています！

1.2.1 プロジェクトのディレクトリを作成する

Rust コードを格納するディレクトリを作ることから始めましょう。**Rust** にとって、コードがどこにあるかは問題ではありませんが、この本の練習とプロジェクトのために、ホームディレクトリに **projects** ディレクトリを作成してプロジェクトを全てそこに保管することを推奨します。

端末を開いて以下のコマンドを入力し、**projects** ディレクトリと、**projects** ディレクトリ内に **Hello, world!** プロジェクトのディレクトリを作成してください。

Linux と macOS なら、こう入力してください:

```
$ mkdir ~/projects
$ cd ~/projects
$ mkdir hello_world
```



```
$ cd hello_world
```

Windows の cmd なら、こう:

```
> mkdir "%USERPROFILE%\projects"
> cd /d "%USERPROFILE%\projects"
> mkdir hello_world
> cd hello_world
```

Windows の PowerShell なら、こう:

```
> mkdir $env:USERPROFILE\projects
> cd $env:USERPROFILE\projects
> mkdir hello_world
> cd hello_world
```

1.2.2 Rust プログラムを書いて走らせる

次にソースファイルを作り、**main.rs** というファイル名にしてください。Rust のファイルは常に**.rs** という拡張子で終わります。ファイル名に 2 単語以上使っているなら、アンダースコアで区切ってください。例えば、**helloworld.rs** ではなく、**hello_world.rs** を使用してください。

さて、作ったばかりの **main.rs** ファイルを開き、リスト 1-1 のコードを入力してください。

ファイル名: main.rs

```
fn main() {
    // 世界よ、こんにちは
    println!("Hello, world!");
}
```

リスト 1-1: Hello, world! と出力するプログラム

ファイルを保存し、端末ウィンドウに戻ってください。Linux か macOS なら、以下のコマンドを打ってファイルをコンパイルし、実行してください:

```
$ rustc main.rs
$ ./main
Hello, world!
```

Windows なら、./main の代わりに .\main.exe と打ちます:

```
> rustc main.rs
> .\main.exe
Hello, world!
```

OS に関わらず、Hello, world! という文字列が端末に出力されるはずです。この出力が見れないな

ら、「トラブルシューティング」節に立ち戻って、助けを得る方法を参照してください。

Hello, world! が確かに出力されたら、おめでとうございます！ 正式に Rust プログラムを書きました。Rust プログラマになったのです！ ようこそ！

1.2.3 Rust プログラムの解剖

Hello, world! プログラムでいま何が起こったのか詳しく確認しましょう。こちらがパズルの最初のピースです：

```
fn main() {  
  
}
```

これらの行で Rust で関数を定義しています。main 関数は特別です：常に全ての実行可能な Rust プログラムで走る最初のコードになります。1 行目は、引数がなく、何も返さない main という関数を宣言しています。引数があるなら、かっこ () の内部に入ります。

また、関数の本体が波括弧 ({ }) に包まれていることにも注目してください。Rust では、全ての関数本体の周りにこれらが必要になります。スペースを 1 つあけて、開き波括弧を関数宣言と同じ行に配置するのがいいスタイルです。

複数の Rust プロジェクトに渡って標準的なスタイルにこだわりたいなら、rustfmt を使うことでコードを決まったスタイルに整形できるでしょう。Rust チームは、rustc のように標準的な Rust の配布にこのツールを含んでいるため、既にコンピューターにインストールされているはずです！ 詳細は、オンラインのドキュメンテーションを確認してください。

main 関数内には、こんなコードがあります：

```
println!("Hello, world!");
```

この行が、この小さなプログラムの全作業をしています：テキストを画面に出力するのです。ここで気付くべき重要な詳細が 4 つあります。まず、Rust のスタイルは、タブではなく、4 スペースでインデントするということです。

2 番目に println! は Rust のマクロを呼び出すということです。代わりに関数と呼んでいたら、println (! なし) と入力されているでしょう。Rust のマクロについて詳しくは、第 19 章で議論します。とりあえず、! を使用すると、普通の関数ではなくマクロを呼んでいるのだということを知っておくだけでいいでしょう。

3 番目に、"Hello, world!" 文字列が見えます。この文字列を引数として println! に渡し、この文字列が画面に表示されているのです。

4 番目にこの行をセミコロン (;) で終え、この式が終わり、次の式の準備ができていると示唆していることです。Rust コードのほとんどの行は、セミコロンで終わります。

1.2.4 コンパイルと実行は個別のステップ

新しく作成したプログラムをちょうど実行したので、その途中の手順を調査しましょう。

Rust プログラムを実行する前に、以下のように、`rustc` コマンドを入力し、ソースファイルの名前を渡すことで、Rust コンパイラを使用してコンパイルしなければなりません。

```
$ rustc main.rs
```

あなたに C や C++ の背景があるなら、これは `gcc` や `clang` と似ていると気付くでしょう。コンパイルに成功後、Rust はバイナリの実行可能ファイルを出力します。

Linux、macOS、Windows の PowerShell なら、シェルで以下のように `ls` コマンドを入力することで実行可能ファイルを見られます：

```
$ ls
main main.rs
```

Windows の CMD なら、以下のように入力するでしょう：

```
> dir /B %= the /B option says to only show the file names =%
      %= /B オプションは、ファイル名だけを表示することを宣言する =%
main.exe
main.pdb
main.rs
```

これは、**.rs** 拡張子のソースコードファイル、実行可能ファイル (Windows なら **main.exe**、他のプラットフォームでは、**main**)、そして、CMD を使用しているなら、**.pdb** 拡張子のデバッグ情報を含むファイルを表示します。ここから、**main** か **main.exe** を走らせます。このように：

```
$ ./main # or .\main.exe on Windows
      # または、Windows なら .\main.exe
```

main.rs が Hello, world! プログラムなら、この行は Hello, world! と端末に出力するでしょう。

Ruby や Python、JavaScript などの動的言語により造詣が深いなら、プログラムのコンパイルと実行を個別の手順で行うことに慣れていない可能性があります。Rust は **AOT コンパイル** (ahead-of-time; 訳注：予め) 言語です。つまり、プログラムをコンパイルし、実行可能ファイルを誰かにあげ、あげた人が Rust をインストールしていなくても実行できるわけです。誰かに **.rb**、**.py**、**.js** ファイルをあげたら、それぞれ Ruby、Python、JavaScript の処理系がインストールされている必要があります。ですが、そのような言語では、プログラムをコンパイルし実行するには、1 コマンドしか必要ないのです。全ては言語設計においてトレードオフなのです。

簡単なプログラムなら `rustc` でコンパイルするだけでも十分ですが、プロジェクトが肥大化してくると、オプションを全て管理し、自分のコードを簡単に共有したくなるでしょう。次は、Cargo ツールを紹介します。これは、現実世界の Rust プログラムを書く手助けをしてくれるでしょう。

1.3 Hello, Cargo!

Cargo は Rust のビルドシステム兼パッケージマネージャです。ほとんどの Rustacean はこのツールを使って Rust プロジェクトを管理しています。なぜなら、Cargo は多くの仕事、たとえばコードのビルド、コードが依存するライブラリのダウンロード、それらのライブラリのビルドなどを扱ってくれるからです。（コードが必要とするライブラリのことを**依存（dependencies）**と呼びます）

いままでに書いたようなごく単純な Rust プログラムには依存がありません。そのため「Hello, world!」プロジェクトを Cargo でビルドしても、Cargo 中のコードをビルドする部分しか使わないでしょう。より複雑な Rust プログラムを書くようになると依存を追加することになりますが、Cargo を使ってプロジェクトを開始したなら、依存の追加もずっと簡単になります。

Rust プロジェクトの大多数が Cargo を使用しているので、これ以降、この本では、あなたも Cargo を使用していると想定します。もし「インストール」節で紹介した公式のインストーラを使用したなら、Cargo は Rust と共にインストールされています。Rust を他の方法でインストールした場合は、以下のコマンドをターミナルに入れて、Cargo がインストールされているか確認してください。

```
$ cargo --version
```

バージョンナンバーが表示されたならインストールされています！ `command not found` などのエラーが表示された場合は、自分がインストールした方法についてのドキュメントを参照して、Cargo を個別にインストールする方法を調べてください。

1.3.1 Cargo でプロジェクトを作成する

Cargo を使って新しいプロジェクトを作成し、元の「Hello, world!」プロジェクトとの違いを見ていきましょう。**projects** ディレクトリ（または自分がコードを保存すると決めた場所）に戻ってください。それから、OS に関係なく、以下を実行してください。

```
$ cargo new hello_cargo
$ cd hello_cargo
```

最初のコマンドは **hello_cargo** という名の新しいディレクトリを作成します。プロジェクトを **hello_cargo** と名付けたので、Cargo はそれに関連するいくつかのファイルを同名のディレクトリに作成します。

hello_cargo ディレクトリに行き、ファイルの一覧を取得してください。Cargo が 2 つのファイルと 1 つのディレクトリを生成してくれたことがわかるでしょう。**Cargo.toml** ファイルと **src** ディレクトリがあり、**src** の中には **main.rs** ファイルがあります。

また、**.gitignore** ファイルと共に新しい Git リポジトリも初期化されています。もし、すでに存在する Git リポジトリの中で `cargo new` を実行したなら、Git 関連のファイルは作られません。`cargo new --vcs=git` とすることで、この振る舞いを変更できます。

補足：Git は一般的なバージョン管理システムです。cargo new コマンドに --vcs フラグを与えることで、別のバージョン管理システムを使用したり、何も使用しないようにもできます。利用可能なオプションを確認するには cargo new --help を実行します。

お気に入りのテキストエディタで **Cargo.toml** を開いてください。リスト 1-2 のコードのようになっているはずです。

ファイル名：Cargo.toml

```
[package]
name = "hello_cargo"
version = "0.1.0"
edition = "2021"

[dependencies]
```

リスト 1-2：cargo new で生成された **Cargo.toml** の内容

このファイルは TOML (**Tom's Obvious, Minimal Language**、トムの明確な最小限の言語) 形式で、Cargo の設定フォーマットです。

最初の行の [package] はセクションヘッダーで、それ以降の文がパッケージを設定することを示します。このファイルに情報を追加していく中で、他のセクションも追加していくことになります。

次の 3 行は Cargo がプログラムをコンパイルするのに必要となる設定情報を指定します。ここでは、名前、バージョン、使用する Rust のエディションを指定しています。edition キーについては付録 E で説明されています。

最後の行の [dependencies] は、プロジェクトの依存を列挙するためのセクションの始まりです。Rust ではコードのパッケージのことを**クレート**と呼びます。このプロジェクトでは他のクレートは必要ありませんが、第 2 章の最初のプロジェクトでは必要になるので、そのときにこの依存セクションを使用します。

では、**src/main.rs** を開いて見てみましょう。

ファイル名: src/main.rs

```
fn main() {
    println!("Hello, world!");
}
```

Cargo はリスト 1-1 で書いたような「Hello, world!」プログラムを生成してくれています。これまでのところ、以前のプロジェクトと Cargo が生成したプロジェクトの違いは、Cargo がコードを **src** ディレクトリに配置したことと、最上位のディレクトリに **Cargo.toml** 設定ファイルがあることです。

Cargo はソースファイルが **src** ディレクトリにあることを期待します。プロジェクトの最上位の

ディレクトリは、README ファイル、ライセンス情報、設定ファイル、その他のコードに関係しないものだけを置きます。**Cargo** を使うとプロジェクトを整理することができます。すべてのものに決まった場所があり、すべてがその場所にあるのです。

「Hello, world!」プロジェクトのように **Cargo** を使用しないプロジェクトを開始したときでも、**Cargo** を使用するプロジェクトへと変換できます。プロジェクトのコードを **src** ディレクトリに移動し、適切な **Cargo.toml** ファイルを作成すればいいのです。

1.3.2 Cargo プロジェクトをビルドし、実行する

では「Hello, world!」プログラムを **Cargo** でビルドして実行すると、何が違うのかを見てみましょう！ **hello_cargo** ディレクトリから以下のコマンドを入力して、プロジェクトをビルドします。

```
$ cargo build
   Compiling hello_cargo v0.1.0 (file:///projects/hello_cargo)
   Finished dev [unoptimized + debuginfo] target(s) in 2.85 secs
```

このコマンドは実行ファイルを現在のディレクトリではなく、**target/debug/hello_cargo** (Windows では **target/debug/hello_cargo.exe**) に作成します。以下のコマンドで実行ファイルを実行できます。

```
$ ./target/debug/hello_cargo # or .\target\debug\hello_cargo.exe on Windows
$                               # Windowsでは .\target\debug\hello_cargo.exe
Hello, world!
```

すべてがうまくいけば、ターミナルに Hello, world! と表示されるはずです。cargo build を初めて実行したとき、**Cargo** は最上位に **Cargo.lock** という新しいファイルを作成します。このファイルはプロジェクト内の依存関係の正確なバージョンを記録しています。このプロジェクトには依存がないので、このファイルの中は少しまばらです。このファイルは手動で変更する必要はありません。**Cargo** がその内容を管理してくれます。

先ほどは cargo build でプロジェクトをビルドし、./target/debug/hello_cargo で実行しました。cargo run を使うと、コードのコンパイルから、できた実行ファイルの実行までの全体を一つのコマンドで行えます。

```
$ cargo run
   Finished dev [unoptimized + debuginfo] target(s) in 0.0 secs
   Running `target/debug/hello_cargo`
Hello, world!
```

今回は **Cargo** が hello_cargo をコンパイルしていることを示す出力がないことに注目してください。**Cargo** はファイルが変更されていないことに気づいたので、単にバイナリを実行したのです。もしソースコードを変更していたら、**Cargo** は実行前にプロジェクトを再ビルドし、以下のような出力が表示されたことでしょう。

```
$ cargo run
Compiling hello_cargo v0.1.0 (file:///projects/hello_cargo)
Finished dev [unoptimized + debuginfo] target(s) in 0.33 secs
Running `target/debug/hello_cargo`
Hello, world!
```

Cargo は `cargo check` というコマンドも提供しています。このコマンドはコードがコンパイルできるか素早くチェックしますが、実行ファイルは生成しません。

```
$ cargo check
Checking hello_cargo v0.1.0 (file:///projects/hello_cargo)
Finished dev [unoptimized + debuginfo] target(s) in 0.32 secs
```

なぜ実行可能ファイルが欲しくないのでしょうか？ `cargo check` は実行ファイルを生成するステップを省くことができるので、多くの場合、`cargo build` よりもずっと高速です。もし、あなたがコードを書きながら継続的にチェックするのなら、`cargo check` を使えば、そのプロセスを高速化できます！ そのため多くの **Rustacean** はプログラムを書きながら定期的に `cargo check` を実行し、コンパイルできるか確かめます。そして、実行ファイルを使う準備ができたときに `cargo build` を走らせるのです。

ここまでで **Cargo** について学んだことをおさらいしておきましょう。

- `cargo new` を使ってプロジェクトを作成できる
- `cargo build` を使ってプロジェクトをビルドできる
- `cargo run` を使うとプロジェクトのビルドと実行を 1 ステップで行える
- `cargo check` を使うとバイナリを生成せずにプロジェクトをビルドして、エラーがないか確認できる
- **Cargo** は、ビルドの成果物をコードと同じディレクトリに保存するのではなく、**target/debug** ディレクトリに格納する

Cargo を使用するもう一つの利点は、どの OS で作業していてもコマンドが同じであることです。そのため、これ以降は **Linux** や **macOS** 向けの手順と、**Windows** 向けの手順を分けて説明することはありません。

1.3.3 リリースに向けたビルド

プロジェクトが最終的にリリースできるようになったら、`cargo build --release` を使い、最適化した状態でコンパイルできます。このコマンドは実行ファイルを、**target/debug** ではなく、**target/release** に作成します。最適化によって **Rust** コードの実行速度が上がりますが、それを有効にすることでプログラムのコンパイルにかかる時間が長くなります。このため二つの異なるプロファイルがあるのです。一つは開発用で、素早く頻繁に再ビルドしたいときのもの。もう一つはユーザに渡す最終的なプログラムをビルドするためのもので、繰り返し再ビルドすることではなく、可能な限り高速

に動作するようにします。コードの実行時間をベンチマークするなら、必ず `cargo build --release` を実行し、**target/release** の実行ファイルを使ってベンチマークを取ってください。

1.3.4 習慣としての Cargo

単純なプロジェクトでは、Cargo は単に `rustc` を使うことに対してあまり多くの価値を生みません。しかし、プログラムが複雑になるにつれて、その価値を証明することになるでしょう。複数のクレートからなる複雑なプロジェクトでは、Cargo にビルドを調整させるほうがずっと簡単です。

`hello_cargo` プロジェクトは単純ではありますが、Rust のキャリアを通じて使うことになる本物のツールの多くを使用しています。実際、既存のどんなプロジェクトで作業するときも、以下のコマンドを使えば、Git でコードをチェックアウトし、そのプロジェクトのディレクトリに移動し、ビルドすることができます。

```
$ git clone example.org/someproject
$ cd someproject
$ cargo build
```

Cargo の詳細については、ドキュメントを参照してください。

1.4 まとめ

既に Rust の旅の素晴らしいスタートを切っています！ この章では以下を行う方法について学びました。

- `rustup` で最新の安定版の Rust をインストールする
- 新しい Rust のバージョンに更新する
- ローカルにインストールされたドキュメントを開く
- 「Hello, world!」プログラムを書き、`rustc` を直接使って実行する
- Cargo における習慣に従った新しいプロジェクトを作成し、実行する

いまは、より中身のあるプログラムを構築し、Rust コードの読み書きに慣れるのに良いタイミングでしょう。そこで第 2 章では、数当てゲームプログラムを構築します。もし、一般的なプログラミングの概念が Rust でどう実現されるか学ぶことから始めたいのであれば、第 3 章を読んで、それから第 2 章に戻ってください。

第 2 章

数当てゲームのプログラミング

ハンズオン形式のプロジェクトと一緒に取り組むことで、Rust の世界に飛び込んでみましょう！この章では Rust の一般的な概念を、実際のプログラムでの使い方を示しながら紹介します。let、match、メソッド、関連関数、外部クレートの使いかたなどについて学びます！これらについての詳細は後続の章で取り上げますので、この章では基本的なところを練習します。

プログラミング初心者向けの定番問題である「数当てゲーム」を実装してみましょう。これは次のように動作します。プログラムは 1 から 100 までのランダムな整数を生成します。そして、プレイヤーに予想（した数字）を入力するように促します。予想が入力されると、プログラムはその予想が小さすぎるか大きすぎるかを表示します。予想が当たっているなら、お祝いのメッセージを表示し、ゲームを終了します。

2.1 新規プロジェクトの立ち上げ

新しいプロジェクトを立ち上げましょう。第 1 章で作成した **projects** ディレクトリに移動し、以下のように Cargo を使って新規プロジェクトを作成します。

```
$ cargo new guessing_game
$ cd guessing_game
```

最初のコマンド cargo new は、第 1 引数としてプロジェクト名 (guessing_game) を取ります。2 番目のコマンドは新規プロジェクトのディレクトリに移動します。

生成された **Cargo.toml** ファイルを見てみましょう。

ファイル名：Cargo.toml

```
{{#include ../listings/ch02-guessing-game-tutorial/no-listing-01-cargo-new/Cargo
.toml}}
```

第1章で見たように `cargo new` は「Hello, world!」プログラムを生成してくれます。`src/main.rs` ファイルをチェックしてみましょう。

ファイル名：`src/main.rs`

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch02-guessing-game-tutorial/no-listing-01-cargo-new/src/main.rs}}
```

さて、`cargo run` コマンドを使って、この「Hello, world!」プログラムのコンパイルと実行を一気に行いましょう。

```
{{#include ../listings/ch02-guessing-game-tutorial/no-listing-01-cargo-new/output.txt}}
```

このゲーム（の開発）では各イテレーションを素早くテストしてから、次のイテレーションに移ります。`run` コマンドは、今回のようにプロジェクトのイテレーションを素早く回したいときに便利です。

訳注：ここでのイテレーションは、アジャイルな開発手法で用いられている用語にあたります。イテレーションとは開発工程の「一回のサイクル」のことで、サイクルには、設計、実装、テスト、改善（リリース後の振り返り）が含まれます。アジャイル開発ではイテレーションを数週間の短いスパンで一通り回し、それを繰り返すことで開発を進めていきます。

この章では「実装」→「テスト」のごく短いサイクルを繰り返すことで、プログラムに少しずつ機能を追加していきます。

src/main.rs ファイルを開き直しましょう。このファイルにすべてのコードを書いていきます。

2.2 予想を処理する

数当てゲームプログラムの最初の部分は、ユーザに入力求め、その入力を処理し、期待した形式になっていることを確認することです。手始めに、プレーヤーが予想を入力できるようにしましょう。リスト 2-1 のコードを **src/main.rs** に入力してください。

ファイル名：`src/main.rs`

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch02-guessing-game-tutorial/listing-02-01/src/main.rs:all}}
```

リスト 2-1：ユーザに予想を入力してもらい、それを出力するコード

このコードには多くの情報が詰め込まれています。行ごとに見ていきましょう。ユーザ入力を受け付け、結果を出力するためには `io`（入出力）ライブラリをスコープに入れる必要があります。`io` ライブラリは、`std` と呼ばれる標準ライブラリに含まれています。

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch02-guessing-game-tutorial/listing-02-01/src/  
main.rs:io}}
```

Rust はデフォルトで、標準ライブラリで定義されているアイテムの中のいくつかを、すべてのプログラムのスコープに取り込みます。このセットは **prelude**（プレリユード）と呼ばれ、標準ライブラリのドキュメントでその中のすべてを見ることができます。

使いたい型が **prelude** にはない場合は、その型を `use` 文で明示的にスコープに入れる必要があります。`std::io` ライブラリを `use` すると、ユーザ入力を受け付ける機能など（入出力に関する）多くの便利な機能が利用できるようになります。

第1章で見た通り、`main` 関数がプログラムへのエントリーポイント（訳注：スタート地点）になります。

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch02-guessing-game-tutorial/listing-02-01/src/  
main.rs:main}}
```

`fn` 構文は関数を新しく宣言し、かっこの `()` は引数がないことを示し、波括弧の `{}` は関数の本体を開始します。

また、第1章で学んだように、`println!` は画面に文字列を表示するマクロです。

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch02-guessing-game-tutorial/listing-02-01/src/  
main.rs:print}}
```

このコードはゲームの内容などを示すプロンプトを表示し、ユーザに入力を求めています。

2.2.1 値を変数に保持する

次に、ユーザの入力を格納するための **変数** を作りましょう。こんな感じです。

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch02-guessing-game-tutorial/listing-02-01/src/  
main.rs:string}}
```

プログラムが少し興味深いものになってきました。この小さな行の中でいろいろなことが起きています。`let` 文を使って変数を作っています。別の例も見てください。

```
let apples = 5;
```

この行では `apples` という名前の新しい変数を作成し `5` という値に束縛しています。Rust では変数はデフォルトで不変（**immutable**）になります。この概念については第3章の「変数と可変性」の節で詳しく説明します。変数を可変（**mutable**）にするには、変数名の前に `mut` をつけます。

```
let apples = 5; // immutable
```

```
// 不変
let mut bananas = 5; // mutable
// 可変
```

注：// 構文は行末まで続くコメントを開始し、**Rust** はコメント内のすべて無視します。コメントについては第3章で詳しく説明します。

数当てゲームのプログラムに戻りましょう。ここまでの話で `let mut guess` が `guess` という名前の可変変数を導入することがわかったと思います。等号記号 (`=`) は **Rust** に、いまこの変数を何かに束縛したいことを伝えます。等号記号の右側には `guess` が束縛される値があります。これは `String::new` 関数を呼び出すことで得られた値で、この関数は `String` 型の新しいインスタンスを返します。`String` は標準ライブラリによって提供される文字列型で、サイズが拡張可能な、UTF-8 でエンコードされたテキスト片になります。

`::new` の行にある `::` 構文は `new` が `String` 型の関連関数であることを示しています。関連関数とは、ある型（ここでは `String`）に対して実装される関数のことです。この `new` 関数は新しい空の文字列を作成します。`new` 関数は多くの型に見られます。なぜなら、何らかの新しい値を作成する関数によくある名前だからです。

つまり `let mut guess = String::new();` という行は可変変数を作成し、その変数は現時点では新しい空の `String` のインスタンスに束縛されているわけです。ふう！

2.2.2 ユーザの入力を受け取る

プログラムの最初の行に `use std::io` と書いて、標準ライブラリの入出力機能を取り込んだことを思い出してください。ここで `io` モジュールの `stdin` 関数を呼び出して、ユーザ入力を処理できるようにしましょう。

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch02-guessing-game-tutorial/listing-02-01/src/
main.rs:read}}
```

もし、プログラムの最初に `use std::io` と書いて `io` ライブラリをインポートしていなかったとしても、`std::io::stdin` のように呼び出せば、この関数を利用できます。`stdin` 関数はターミナルの標準入力へのハンドルを表す型である `std::io::Stdin` のインスタンスを返します。

次の `.read_line(&mut guess)` 行は、標準入力ハンドルの `read_line` メソッドを呼び出し、ユーザからの入力を得ています。また、`read_line` の引数として `&mut guess` を渡し、ユーザ入力をどの文字列に格納するかを指示しています。`read_line` メソッドの仕事は、ユーザが標準入力に入力したものを文字列に（いまの内容を上書きせずに）追加することですので、文字列を引数として渡しているわけです。引数の文字列は、その内容をメソッドが変更できるように、可変である必要があります。

この `&` は、この引数が参照であることを示し、これによりコードの複数の部分が同じデータにアクセスしても、そのデータを何度もメモリにコピーしなくて済みます。参照は複雑な機能（訳注：一部

のプログラム言語では正しく使うのが難しい機能)ですが、**Rust** の大きな利点の一つは参照を安全かつ簡単に使用できることです。このプログラムを完成させるのに、そのような詳細を知る必要はないでしょう。とりあえず知っておいてほしいのは、変数のように参照もデフォルトで不変であることです。したがって、`&guess` ではなく `&mut guess` と書いて可変にする必要があります。(参照については第4章でより詳しく説明します)

2.2.3 Result 型で失敗の可能性を扱う

まだ、このコードの行は終わってません。これから説明するのはテキスト上は3行目になりますが、まだ一つの論理的な行の一部分に過ぎません。次の部分はこのメソッドです。

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch02-guessing-game-tutorial/listing-02-01/src/  
main.rs:expect}}
```

このコードは、こう書くこともできました。

```
io::stdin().read_line(&mut guess).expect("Failed to read line");
```

しかし、長い行は読みづらいので分割したほうがよいでしょう。`.method_name()` 構文でメソッドを呼び出すとき、長い行を改行と空白で分割するのが賢明なことがよくあります。それでは、この行(`expect()` メソッド) が何をするのか説明します。

前述したように、`read_line` メソッドは渡された文字列にユーザが入力したものを入れます。しかし、同時に値(この場合は `io::Result`) も返します。**Rust** の標準ライブラリには `Result` という名前の型がいくつかあります。汎用の `Result` と、`io::Result` といったサブモジュール用の特殊な型などです。これらの `Result` 型は**列挙型**になります。列挙型は **enum** と呼ばれ、取りうる値として決まった数の**列挙子**(variant)を持ちます。列挙型はよく `match` と一緒に使われます。これは条件式の一つで、評価時に、列挙型の値がどの列挙子であるかに基づいて異なるコードを実行できるという便利なものです。

enum については第6章で詳しく説明します。これらの `Result` 型の目的は、エラー処理に関わる情報を符号化(エンコード)することです。

`Result` の列挙子は `Ok` か `Err` です。`Ok` 列挙子は処理が成功したことを示し、`Ok` の中には正常に生成された値が入っています。`Err` 列挙子は処理が失敗したことを意味し、`Err` には処理が失敗した過程や理由についての情報が含まれています。

`Result` 型の値にも、他の型と同様にメソッドが定義されています。`io::Result` のインスタンスには `expect` メソッドがありますので、これを呼び出せます。この `io::Result` インスタンスが `Err` の場合、`expect` メソッドはプログラムをクラッシュさせ、引数として渡されたメッセージを表示します。`read_line` メソッドが `Err` を返したら、それはおそらく基礎となるオペレーティング・システムに起因するものでしょう。もしこの `io::Result` オブジェクトが `Ok` 値の場合、`expect` メソッドは `Ok` 列挙子が保持する戻り値を取り出して、その値だけを返してくれます。こうして私たちはその値を使

うことができるわけです。今回の場合、その値はユーザ入力バイト数になります。

もし `expect` メソッドを呼び出さなかったら、コンパイルはできるものの警告が出るでしょう。

```
{{#include ../listings/ch02-guessing-game-tutorial/no-listing-02-without-expect/output.txt}}
```

`Rust` は私たちが `read_line` から返された `Result` 値を使用していないことを警告し、これはプログラムがエラーの可能性に対処していないことを示します。

警告を抑制する正しい方法は実際にエラー処理を書くことです。しかし、現時点では問題が起きたときにこのプログラムをクラッシュさせたいだけなので、`expect` が使えるわけです。エラーからの回復については第9章で学びます。

2.2.4 println! マクロのプレースホルダーで値を表示する

閉じ波かっこを除けば、ここまでのコードで説明するのは残り1行だけです。

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch02-guessing-game-tutorial/listing-02-01/src/main.rs:print_guess}}
```

この行はユーザの入力を現在保持している文字列を表示します。一組の波括弧の `{}` はプレースホルダーです。`{}` は値を所定の場所に保持する小さなカニのはさみだと考えてください。波括弧をいくつか使えば複数の値を表示できます。最初の波括弧の組はフォーマット文字列のあとに並んだ最初の値に対応し、2組目は2番目の値、というように続いていきます。一回の `println!` の呼び出しで複数の値を表示するのなら次のようになります。

```
let x = 5;
let y = 10;

println!("x = {} and y = {}", x, y);
```

このコードは `x = 5 and y = 10` と表示するでしょう。

2.2.5 最初の部分をテストする

数当てゲームの最初の部分をテストしてみましょう。`cargo run` で走らせてください。

```
$ cargo run
Compiling guessing_game v0.1.0 (file:///projects/guessing_game)
Finished dev [unoptimized + debuginfo] target(s) in 6.44s
Running `target/debug/guessing_game`
Guess the number!
Please input your guess.
6
You guessed: 6
```

これで、キーボードからの入力を得て、それを表示するという、ゲームの最初の部分は完成になります。

2.3 秘密の数字を生成する

次にユーザが数当てに挑戦する秘密の数字を生成する必要があります。この数字を毎回変えることで何度やっても楽しいゲームになります。ゲームが難しくなりすぎないように 1 から 100 までの乱数を使用しましょう。Rust の標準ライブラリには、まだ乱数の機能は含まれていません。ですが、Rust の開発チームがこの機能を持つ rand クレートを提供してくれています。

2.3.1 クレートをを使用して機能を追加する

クレートは Rust ソースコードを集めたものであることを思い出してください。私たちがここまで作ってきたプロジェクトはバイナリクレートであり、これは実行可能ファイルになります。rand クレートはライブラリクレートです。他のプログラムで使用するためのコードが含まれており、単独で実行することはできません。

Cargo がその力を発揮するのは外部クレートと連携するときです。rand を使ったコードを書く前に、Cargo.toml ファイルを編集して rand クレートを依存関係に含める必要があります。そのファイルを開いて、Cargo が作ってくれた [dependencies] セクションヘッダの下に次の行を追加してください。バージョンナンバーを含め、ここに書かれている通り正確に rand を指定してください。そうしないと、このチュートリアルのコード例が動作しないかもしれません。

ファイル名：Cargo.toml

```
{{#include ../listings/ch02-guessing-game-tutorial/listing-02-02/Cargo.toml:9:}}
```

Cargo.toml ファイルでは、ヘッダに続くものはすべて、他のセクションが始まるまで続くセクションの一部になります。（訳注：Cargo.toml ファイル内には複数のセクションがあり、各セクションは [] で囲まれたヘッダ行から始まります）

[dependencies] はプロジェクトが依存する外部クレートと必要とするバージョンを Cargo に伝えます。今回は rand クレートを 0.8.3 というセマンティックバージョン指定子で指定します。Cargo はセマンティックバージョニング（SemVer と呼ばれることもあります）を理解しており、これはバージョンナンバーを記述するための標準です。0.8.3 という数字は実際には ^0.8.3 の省略記法で、0.8.3 以上 0.9.0 未満の任意のバージョンを意味します。Cargo はこれらのバージョンを、バージョン 0.8.3 と互換性のある公開 API を持つものとみなします。この仕様により、この章のコードが引き続きコンパイルできるようにしつつ、最新のパッチリリースを取得できるようになります。0.9.0 以降のバージョンは、以下の例で使用しているものと同じ API を持つことを保証しません。

さて、コードを一切変えずに、次のリスト 2-2 のようにプロジェクトをビルドしてみましょう。

```
$ cargo build
  Updating crates.io index
  (crates.io インデックスを更新しています)
  Downloaded rand v0.8.3
  (rand v0.8.3 をダウンロードしています)
  Downloaded libc v0.2.86
  Downloaded getrandom v0.2.2
  Downloaded cfg-if v1.0.0
  Downloaded ppv-lite86 v0.2.10
  Downloaded rand_chacha v0.3.0
  Downloaded rand_core v0.6.2
  Compiling rand_core v0.6.2
  (rand_core v0.6.2 をコンパイルしています)
  Compiling libc v0.2.86
  Compiling getrandom v0.2.2
  Compiling cfg-if v1.0.0
  Compiling ppv-lite86 v0.2.10
  Compiling rand_chacha v0.3.0
  Compiling rand v0.8.3
  Compiling guessing_game v0.1.0 (file:///projects/guessing_game)
  (guessing_game v0.1.0 をコンパイルしています)
  Finished dev [unoptimized + debuginfo] target(s) in 2.53s
```

リスト 2-2: rand クレートを依存として追加した後の cargo build コマンドの出力

もしかしたら異なるバージョンナンバー（とはいえ、SemVer のおかげですべてのコードに互換性があります）や、異なる行（オペレーティングシステムに依存します）が表示されるかもしれません。また、行の順序も違うかもしれません。

外部依存を持つようになると、Cargo はその依存関係が必要とするすべてについて最新のバージョンをレジストリから取得します。レジストリとは Crates.io のデータのコピーです。Crates.io は、Rust のエコシステムにいる人たちがオープンソースの Rust プロジェクトを投稿し、他の人が使えるようにする場所です。

レジストリの更新後、Cargo は [dependencies] セクションにリストアップされているクレートをチェックし、まだ取得していないものがあればダウンロードします。ここでは依存関係として rand だけを書きましたが、rand が動作するために依存している他のクレートも取り込まれています。クレートをダウンロードしたあと、Rust はそれらをコンパイルし、依存関係が利用できる状態でプロジェクトをコンパイルします。

何も変更せずにすぐに cargo build コマンドを再度実行すると、Finished の行以外は何も出力されません。Cargo はすでに依存関係をダウンロードしてコンパイル済みであることを認識しており、また、あなたが Cargo.toml ファイルを変更していないことも知っているからです。さらに、Cargo はあなたがコードを何も変更していないことも知っているので、再コンパイルもしません。何もすることがないので単に終了します。

src/main.rs ファイルを開いて些細な変更を加え、それを保存して再度ビルドすると 2 行しか表示されません。


```
$ cargo build
Compiling guessing_game v0.1.0 (file:///projects/guessing_game)
Finished dev [unoptimized + debuginfo] target(s) in 2.53 secs
```

これらの行は **Cargo** が **src/main.rs** ファイルへの小さな変更に対して、ビルドを更新していることを示しています。依存関係は変わっていないので、**Cargo** は既にダウンロードしてコンパイルしたものが再利用できることを知っています。

2.3.1.1 Cargo.lock ファイルで再現可能なビルドを確保する

Cargo はあなたや他の人があなたのコードをビルドするたびに、同じ生成物をリビルドできるようにするしくみを備えています。**Cargo** は何も指示されない限り、指定したバージョンの依存のみを使用します。たとえば来週 **rand** クレートのバージョン **0.8.4** が出て、そのバージョンには重要なバグ修正が含まれていますが、同時にあなたのコードを破壊するリグレッションも含まれているとします。これに対応するため、**Rust** は `cargo build` を最初に実行したときに **Cargo.lock** ファイルを作成します。(いまの **guessing_game** ディレクトリにもあるはずです)

プロジェクトを初めてビルドするとき、**Cargo** は条件に合うすべての依存関係のバージョンを計算し **Cargo.lock** ファイルに書き込みます。次にプロジェクトをビルドすると、**Cargo** は **Cargo.lock** ファイルが存在することを確認し、バージョンを把握するすべての作業を再び行う代わりに、そこで指定されているバージョンを使います。これにより再現性のあるビルドを自動的に行えます。言い換えれば、**Cargo.lock** ファイルのおかげで、あなたが明示的にアップグレードするまで、プロジェクトは **0.8.3** を使い続けます。

2.3.1.2 クレートを更新して新バージョンを取得する

クレートを本当にアップグレードしたくなったときのために、**Cargo** は `update` コマンドを提供します。このコマンドは **Cargo.lock** ファイルを無視して、**Cargo.toml** ファイル内の全ての指定に適合する最新バージョンを算出します。成功したら **Cargo** はそれらのバージョンを **Cargo.lock** ファイルに記録します。ただし、デフォルトで **Cargo** は **0.8.3** 以上、**0.9.0** 未満のバージョンのみを検索します。もし **rand** クレートの新しいバージョンとして **0.8.4** と **0.9.0** の二つがリリースされていたなら、`cargo update` を実行したときに以下のようなメッセージが表示されるでしょう。

```
$ cargo update
Updating crates.io index
(crates.io インデックスを更新しています)
Updating rand v0.8.3 -> v0.8.4
(rand クレートを v0.8.3 -> v0.8.4 に更新しています)
```

Cargo は **0.9.0** リリースを無視します。またそのとき、**Cargo.lock** ファイルが変更され、**rand** クレートの現在使用中のバージョンが **0.8.4** になったことにも気づくでしょう。そうではなく、**rand** のバージョン **0.9.0** か、**0.9.x** 系のどれかを使用するには、**Cargo.toml** ファイルを以下のように変更

する必要があります。

```
[dependencies]

rand = "0.9.0"
```

次に `cargo build` コマンドを実行したとき、**Cargo** は利用可能なクレートのレジストリを更新し、あなたが指定した新しいバージョンに従って `rand` の要件を再評価します。

Cargo とそのエコシステムについては、まだ伝えたいことが山ほどありますが、それらについては第14章で説明します。いまのところは、これだけ知っていれば十分です。**Cargo** はライブラリの再利用をとてとても簡単にしてくれるので、**Rustacean** が数多くのパッケージから構成された小さなプロジェクトを書くことが可能になっています。

2.3.2 乱数を生成する

`rand` クレートを使って予想する数字を生成しましょう。次のステップは **src/main.rs** ファイルをリスト 2-3 のように更新することです。

ファイル名：**src/main.rs**

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch02-guessing-game-tutorial/listing-02-03/src/
  main.rs:all}}
```

リスト 2-3：乱数を生成するコードの追加

まず `use rand::Rng` という行を追加します。`Rng` トレイトは乱数生成器が実装すべきメソッドを定義しており、それらのメソッドを使用するには、このトレイトがスコープ内になければなりません。トレイトについて詳しくは第10章で解説します。

次に、途中に2行を追加しています。最初の行では `rand::thread_rng` 関数を呼び出して、これから使う、ある特定の乱数生成器を取得しています。なお、この乱数生成器は現在のスレッドに固有で、オペレーティングシステムからシード値を得ています。そして、この乱数生成器の `gen_range` メソッドを呼び出しています。このメソッドは `use rand::Rng` 文でスコープに導入した `Rng` トレイトで定義されています。`gen_range` メソッドは範囲式を引数にとり、その範囲内の乱数を生成してくれます。ここで使っている範囲式の種類は `開始..終了` という形式で、下限値は含みますが上限値は含みません。そのため、1 から 100 までの数をリクエストするには `1..101` と指定する必要があります。あるいは、これと同等の `1..=100` という範囲を渡すこともできます。

注：クレートのどのトレイトを `use` するかや、どのメソッドや関数を呼び出すかを知るために、各クレートにはその使い方を説明したドキュメントが用意されています。**Cargo** のもう一つの素晴らしい機能は、`cargo doc --open` コマンドを走らせると、すべての依存クレートが提供するドキュメントをローカルでビルドして、ブラウザで開いてくれることです。たとえば `rand`

クレートの他の機能に興味があるなら、`cargo doc --open` コマンドを実行して、左側のサイドバーにある `rand` をクリックしてください。

コードに追加した 2 行目は秘密の数字を表示します。これはプログラムを開発している間のテストに便利ですが、最終版からは削除する予定です。プログラムが始まってすぐに答えが表示されたらゲームになりませんか！

試しにプログラムを何回か走らせてみてください。

```
$ cargo run
  Compiling guessing_game v0.1.0 (file:///projects/guessing_game)
  Finished dev [unoptimized + debuginfo] target(s) in 2.53s
  Running `target/debug/guessing_game`
Guess the number!
The secret number is: 7
Please input your guess.
4
You guessed: 4

$ cargo run
  Finished dev [unoptimized + debuginfo] target(s) in 0.02s
  Running `target/debug/guessing_game`
Guess the number!
The secret number is: 83
Please input your guess.
5
You guessed: 5
```

毎回異なる乱数を取得し、それらはすべて 1 から 100 の範囲内の数字になるはずです。よくやりました！

2.4 予想と秘密の数字を比較する

さて、ユーザ入力と乱数が揃ったので両者を比較してみましょう。このステップをリスト 2-4 に示します。これから説明するように、このコードはまだコンパイルできないことに注意してください。

ファイル名：`src/main.rs`

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch02-guessing-game-tutorial/listing-02-04/src/
  main.rs:here}}
```

リスト 2-4：二つの数値を比較したときに返される可能性のある値を処理する

まず `use` 文を追加して標準ライブラリから `std::cmp::Ordering` という型をスコープに導入しています。`Ordering` も `enum` の一つで `Less`、`Greater`、`Equal` という列挙子を持っています。これらは二つの値を比較したときに得られる 3 種類の結果です。

```
match guess.cmp(&secret_number) {  
    Ordering::Less => println!("Too small!"),  
    Ordering::Greater => println!("Too big!"),  
    Ordering::Equal => println!("You win!"),  
}
```

それから `Ordering` 型を使用する新しい 5 行をいちばん下に追加してしています。cmp メソッドは二つの値の比較を行い、比較できるものになら何に対しても呼び出せます。比較対象への参照をとり、ここでは `guess` と `secret_number` を比較しています。そして `use` 文でスコープに導入した `Ordering` 列挙型の列挙子を返します。ここでは `match` 式を使用しており、`guess` と `secret_number` の値に対して `cmp` を呼んだ結果返された `Ordering` の列挙子に基づき、次の動作を決定しています。

`match` 式は複数のアーム（腕）で構成されます。各アームはマッチさせるパターンと、`match` に与えられた値がそのアームのパターンにマッチしたときに実行されるコードで構成されます。`Rust` は `match` に与えられた値を受け取って、各アームのパターンを順に照合していきます。パターンと `match` 式は `Rust` の強力な機能で、コードが遭遇する可能性のあるさまざまな状況を表現し、それらすべてを確実に処理できるようにします。これらの機能については、それぞれ第 6 章と第 18 章で詳しく説明します。

ここで使われている `match` 式に対して、例を通して順に見ていきましょう。たとえばユーザが 50 と予想し、今回ランダムに生成された秘密の数字は 38 だったとしましょう。コードが 50 と 38 を比較すると、50 は 38 よりも大きいので `cmp` メソッドは `Ordering::Greater` を返します。`match` 式は `Ordering::Greater` の値を取得し、各アームのパターンを吟味し始めます。まず最初のアームのパターンである `Ordering::Less` を見て、`Ordering::Greater` の値と `Ordering::Less` がマッチしないことがわかります。そのため、このアームのコードは無視して、次のアームに移ります。次のアームのパターンは `Ordering::Greater` で、これは `Ordering::Greater` とマッチします！ このアームに関連するコードが実行され、画面に `Too big!` と表示されます。このシナリオでは最後のアームと照合する必要がないため `match` 式（の評価）は終了します。

ところがリスト 2-4 のコードはまだコンパイルできません。試してみましょう。

```
{{#include ../listings/ch02-guessing-game-tutorial/listing-02-04/output.txt}}
```

このエラーの核心は型の不一致があると述べていることです。`Rust` は強い静的型システムを持ちますが、型推論も備えています。`let guess = String::new()` と書いたとき、`Rust` は `guess` が `String` 型であるべきと推論したので、私たちはその型を書かずに済みました。一方で `secret_number` は数値型です。`Rust` のいくつかの数値型は 1 から 100 までの値を表現でき、それらの型には 32 ビット数値の `i32`、符号なしの 32 ビット数値の `u32`、64 ビット数値の `i64` などがあります。`Rust` のデフォルトは `i32` 型で、型情報をどこかに追加して `Rust` に異なる数値型だと推論させない限り `secret_number` の型はこれになります。エラーの原因は `Rust` が文字列と数値型を比較できないためです。

最終的にはプログラムが入力として読み込んだ `String` を実数型に変換し、秘密の数字と数値とし

て比較できるようにしたいわけです。そのためには main 関数の本体に次の行を追加します。

ファイル名：src/main.rs

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch02-guessing-game-tutorial/no-listing-03-convert-string-to-number/src/main.rs:here}}
```

その行とはこのことです。

```
let guess: u32 = guess.trim().parse().expect("Please type a number!");
```

guess という名前の変数を作成しています。しかし待ってください、このプログラムには既に guess という名前の変数がありませんでしたか？ たしかにあります、**Rust** では guess の前の値を新しい値で覆い隠す (shadow する) ことが許されているのです。シャドーイング (shadowing) は、guess_str と guess のような重複しない変数を二つ作る代わりに、guess という変数名を再利用させてくれるのです。これについては第3章で詳しく説明しますが、今のところ、この機能はある型から別の型に値を変換するときによく使われることを知っておいてください。

この新しい変数を guess.trim().parse() という式に束縛しています。式の中にある guess は、入力文字列として格納されたオリジナルの guess 変数を指しています。String インスタンスの trim メソッドは文字列の先頭と末尾の空白をすべて削除します。これは数値データのみを表現できる u32 型とこの文字列を比較するために (準備として) 行う必要があります。ユーザは予想を入力したあと read_line の処理を終えるために Enter キーを押す必要がありますが、これにより文字列に改行文字が追加されます。たとえばユーザが 5 と入力して Enter キーを押すと、guess は 5\n になります。この \n は「改行」を表しています。(Windows では Enter キーを押すとキャリッジリターンと改行が入り \r\n となります) trim メソッドは \n や \r\n を削除するので、その結果 5 だけになります。

文字列の parse メソッドは文字列をパース (解析) して何らかの数値にします。このメソッドは (文字列を) さまざまな数値型へとパースできるので、let guess: u32 として **Rust** に正確な数値型を伝える必要があります。guess の後にコロン (:) を付けることで変数の型に注釈をつけることを **Rust** に伝えています。**Rust** には組み込みの数値型がいくつかあります。ここにある u32 は符号なし 32 ビット整数で、小さな正の数を表すデフォルトの型に適しています。他の数値型については第3章で学びます。さらに、このサンプルプログラムでは、u32 という注釈と secret_number 変数との比較していることから、**Rust** は secret_number 変数も u32 型であるべきだと推論しています。つまり、いままでは二つの同じ型の値を比較することになるわけです！

parse メソッドは論理的に数値に変換できる文字にしか使えないので、よくエラーになります。たとえば文字列に A% が含まれていたら数値に変換する術はありません。解析に失敗する可能性があるため、parse メソッドは read_line メソッドと同様に Result 型を返します (「Result 型で失敗の可能性を扱う」で説明しました) 今回も expect メソッドを使用して Result 型を同じように扱います。parse メソッドが文字列から数値を作成できなかったために Result 型の Err 列挙子を返したら、expect の呼び出しはゲームをクラッシュさせ、私たちが与えたメッセージを表示します。parse が文

字列をうまく数値へ変換できたときは `Result` 型の `Ok` 列挙子を返し、`expect` は `Ok` 値から欲しい数値を返してくれます。

さあ、プログラムを走らせましょう！

```
$ cargo run
  Compiling guessing_game v0.1.0 (file:///projects/guessing_game)
  Finished dev [unoptimized + debuginfo] target(s) in 0.43s
  Running `target/debug/guessing_game`
Guess the number!
The secret number is: 58
Please input your guess.
76
You guessed: 76
Too big!
```

いい感じです！ 予想の前にスペースを追加したにもかかわらず、プログラムはちゃんとユーザが 76 と予想したことを理解しました。このプログラムを何回か走らせ、数字を正しく言い当てたり、大きすぎる数字や小さすぎる数字を予想したりといった、異なる種類の入力に対する動作の違いを検証してください。

現在、ゲームの大半は動作していますが、まだユーザは 1 回しか予想できません。ループを追加して、その部分を変更しましょう！

2.5 ループで複数回の予想を可能にする

`loop` キーワードは無限ループを作成します。ループを追加してユーザが数字を予想する機会を増やします。

ファイル名：`src/main.rs`

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch02-guessing-game-tutorial/no-listing-04-looping
/src/main.rs:here}}
```

見での通り予想入力のプロンプト以降をすべてループ内に移動しました。ループ内の行をさらに 4 つのスペースでインデントして、もう一度プログラムを実行してください。プログラムはいつまでも推測を求めるようになりましたが、実はこれが新たな問題を引き起こしています。これではユーザが（ゲームを）終了できません！

ユーザはキーボードショートカットの `ctrl-c` を使えば、いつでもプログラムを中断させられます。しかし「予想と秘密の数字を比較する」の `parse` で述べたように、この飽くなきモンスターから逃れる方法はもう一つあります。ユーザが数字以外の答えを入力すればプログラムはクラッシュします。それを利用して以下のようにすれば終了できます。

```
$ cargo run
  Compiling guessing_game v0.1.0 (file:///projects/guessing_game)
```

```
Finished dev [unoptimized + debuginfo] target(s) in 1.50s
Running `target/debug/guessing_game`
Guess the number!
The secret number is: 59
Please input your guess.
45
You guessed: 45
Too small!
Please input your guess.
60
You guessed: 60
Too big!
Please input your guess.
59
You guessed: 59
You win!
Please input your guess.
quit
thread 'main' panicked at 'Please type a number!: ParseIntError { kind:
  InvalidDigit }', src/main.rs:28:47
(スレッド 'main'は'数字を入力してください! : ParseIntError { kind: InvalidDigit
  }', src/libcore/result.rs:785でパニックしました)
note: run with `RUST_BACKTRACE=1` environment variable to display a backtrace
(注: `RUST_BACKTRACE=1`で走らせるとバックトレースを見れます)
```

quit と入力すればゲームが終了しますが、数字以外の入力でもそうなります。これは控えめに言っても最適ではありません。私たちは正しい数字が予想されたときにゲームが停止するようにしたいのです。

2.5.1 正しい予想をした後に終了する

break 文を追加して、ユーザが勝ったらゲームが終了するようにプログラムしましょう。

ファイル名: src/main.rs

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch02-guessing-game-tutorial/no-listing-05-
  quitting/src/main.rs:here}}
```

You win! の後に break の行を追記することで、ユーザが秘密の数字を正確に予想したときにプログラムがループを抜けるようになりました。ループは main 関数の最後の部分なので、ループを抜けることはプログラムを抜けることを意味します。

2.5.2 不正な入力を処理する

このゲームの動作をさらに洗練させるために、ユーザが数値以外を入力したときにプログラムをクラッシュさせるのではなく、数値以外を無視してユーザが数当てを続けられるようにしましょう。これはリスト 2-5 のように、String から u32 に guess を変換する行を変えることで実現できます。

ファイル名: `src/main.rs`

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch02-guessing-game-tutorial/listing-02-05/src/  
main.rs:here}}
```

リスト 2-5: 数値以外の予想を無視し、プログラムをクラッシュさせるのではなく、もう 1 回予想してもらう

`expect` の呼び出しから `match` 式に切り替えて、エラーによるクラッシュからエラー処理へと移行します。`parse` が `Result` 型を返すことと、`Result` が `Ok` と `Err` の列挙子を持つ列挙型であることを思い出してください。ここでは `match` 式を、`cmp` メソッドから返される `Ordering` を処理したときと同じように使っています。

もし `parse` メソッドが文字列から数値への変換に成功したなら、結果の数値を保持する `Ok` 値を返します。この `Ok` 値は最初のアームのパターンにマッチします。`match` 式は `parse` メソッドが生成して `Ok` 値に格納した `num` の値を返します。その数値は私たちが望んだように、これから作成する新しい `guess` 変数に収まります。

もし `parse` メソッドが文字列から数値への変換に失敗したなら、エラーに関する詳細な情報を含む `Err` 値を返します。この `Err` 値は最初の `match` アームの `Ok(num)` パターンにはマッチしませんが、2 番目のアームの `Err(_)` パターンにはマッチします。アンダースコアの `_` はすべての値を受け付けます。この例ではすべての `Err` 値に対して、その中にどんな情報があってもマッチさせたいと言っているのです。したがってプログラムは 2 番目のアームのコードである `continue` を実行します。これは `loop` の次の繰り返しの移り、別の予想を求めるようプログラムに指示します。つまり実質的にプログラムは `parse` メソッドが遭遇し得るエラーをすべて無視するようになります！

これでプログラム内のすべてが期待通りに動作するはずです。試してみましょう。

```
$ cargo run  
  Compiling guessing_game v0.1.0 (file:///projects/guessing_game)  
  Finished dev [unoptimized + debuginfo] target(s) in 4.45s  
  Running `target/debug/guessing_game`  
Guess the number!  
The secret number is: 61  
Please input your guess.  
10  
You guessed: 10  
Too small!  
Please input your guess.  
99  
You guessed: 99  
Too big!  
Please input your guess.  
foo  
Please input your guess.  
61  
You guessed: 61  
You win!
```


素晴らしい！最後にほんの少し手を加えれば数当てゲームは完成です。このプログラムはまだ秘密の数字を表示していることを思い出してください。テストには便利でしたが、これではゲームが台無しです。秘密の数字を表示している `println!` を削除しましょう。最終的なコードをリスト 2-6 に示します。

ファイル名：`src/main.rs`

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch02-guessing-game-tutorial/listing-02-06/src/  
main.rs}}
```

リスト 2-6：数当てゲームの完全なコード

2.6 まとめ

数当てゲームを無事に作り上げることができました。おめでとうございます！

このプロジェクトではハンズオンを通して、`let`、`match`、メソッド、関連関数、外部クレートの使いかたなど、多くの新しい Rust の概念に触れました。以降の章では、これらの概念についてより詳しく学びます。第 3 章では変数、データ型、関数など多くのプログラミング言語が持つ概念を取り上げ、Rust での使い方を説明します。第 4 章では Rust を他の言語とは異なるものに特徴づける、所有権について説明します。第 5 章では構造体とメソッドの構文について説明し、第 6 章では列挙型がどのように動くのかについて説明します。

第 3 章

一般的なプログラミングの概念

この章では、ほとんど全てのプログラミング言語で見られる概念を講義し、それらが **Rust** において、どう動作するかを見ていきます。多くのプログラミング言語は、その核心において、いろいろなものを共有しています。この章で提示する概念は、全て **Rust** に固有のものではありませんが、**Rust** の文脈で議論し、これらの概念を使用することにつながる仕様を説明します。

具体的には、変数、基本的な型、関数、コメント、そして制御フローについて学びます。これらの基礎は全ての **Rust** プログラムに存在するものであり、それらを早期に学ぶことにより、強力な基礎を築くことになるでしょう。

3.0.1 キーワード

Rust 言語にも他の言語同様、キーワードが存在し、これらは言語だけが使用できるようになっています。これらの単語は、変数や関数名には使えないことを弁えておいてください。ほとんどのキーワードは、特別な意味を持っており、自らの **Rust** プログラムにおいて、様々な作業をこなすために使用することができます; いくつかは、紐付けられた機能がないものの、将来 **Rust** に追加されるかもしれない機能用に予約されています。キーワードの一覧は、付録 A で確認できます。

3.1 変数と可変性

第 2 章で触れた通り、変数は標準で不変になります。これは、**Rust** が提供する安全性や簡便な並行性の利点を享受する形でコードを書くための選択の 1 つです。ところが、まだ変数を可変にするという選択肢も残されています。どのように、そしてなぜ **Rust** は不変性を推奨するのか、さらには、なぜそれとは違う道を選びたくなることがあるのか見ていきましょう。

変数が不変であると、値が一旦名前に束縛されたら、その値を変えることができません。これを具

体的に説明するために、**projects** ディレクトリに `cargo new --bin variables` コマンドを使って、**variables** という名前のプロジェクトを生成しましょう。

それから、新規作成した **variables** ディレクトリで、**src/main.rs** ファイルを開き、その中身を以下のコードに置き換えましょう。このコードはまだコンパイルできません：

ファイル名: `src/main.rs`

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch03-common-programming-concepts/no-listing-01-variables-are-immutable/src/main.rs}}
```

これを保存し、`cargo run` コマンドでプログラムを走らせてください。次の出力に示されているようなエラーメッセージを受け取るはずです：

```
{{#include ../listings/ch03-common-programming-concepts/no-listing-01-variables-are-immutable/output.txt}}
```

この例では、コンパイラがプログラムに潜むエラーを見つけ出す手助けをしてくれることが示されています。コンパイルエラーは、イライラすることもあるものですが、まだプログラムにしてほしいことを安全に行えていないだけということなのです；エラーが出るからといって、あなたがいいプログラムではないという意味ではありません！ 経験豊富な Rustacean でも、コンパイルエラーを出すことはあります。

このエラーは、エラーの原因が 不変変数 `x` に2回代入できない であると示しています。不変な `x` という変数に別の値を代入しようとしたからです。

以前に不変と指定された値を変えようとした時に、コンパイルエラーが出るのは重要なことです。なぜなら、この状況はまさしく、バグに繋がるからです。コードのある部分は、値が変わることはないという前提のもとに処理を行い、別の部分はその値を変更していたら、最初の部分が目論見通りに動いていない可能性があるのです。このようなバグは、発生してしまってからでは原因が追いかけてづらいものです。特に第2のコード片が、値を時々しか変えない場合、尚更です。

Rust では、値が不変であると宣言したら、本当に変わらないことをコンパイラが担保してくれます。つまり、コードを読み書きする際に、どこでどうやって値が変化しているかを追いかける必要がなくなります。故にコードを通して正しいことを確認するのが簡単になるのです。

しかし、可変性は時として非常に有益なこともあります。変数は、標準でのみ、不変です。つまり、第2章のように変数名の前に `mut` キーワードを付けることで、可変にできるわけです。この値が変化できるようにするとともに、`mut` により、未来の読者に対してコードの別の部分がこの変数の値を変える可能性を示すことで、その意図を汲み取ることができるのです。

例として、**src/main.rs** ファイルを以下のように書き換えてください：

ファイル名: `src/main.rs`

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch03-common-programming-concepts/no-listing-02-adding-mut/src/main.rs}}
```

今、このプログラムを走らせると、以下のような出力が得られます:

```
{{#include ../listings/ch03-common-programming-concepts/no-listing-02-adding-mut/output.txt}}
```

`mut` キーワードが使われると、`x` が束縛している値を 5 から 6 に変更できます。変数を可変にする方が、不変変数だけがあるよりも書きやすくなるので、変数を可変にしたいこともあるでしょう。

考えるべきトレードオフはバグの予防以外にも、いくつかあります。例えば、大きなデータ構造を使う場合などです。インスタンスを可変にして変更できるようにする方が、いちいちインスタンスをコピーして新しくメモリ割り当てされたインスタンスを返すよりも速くなります。小規模なデータ構造なら、新規インスタンスを生成して、もっと関数型っぽいコードを書く方が通して考えやすくなるため、低パフォーマンスは、その簡潔性を得るのに足りうるペナルティになるかもしれません。

3.1.1 変数と定数 (constants) の違い

変数の値を変更できないようにするといえば、他の多くの言語も持っている別のプログラミング概念を思い浮かべるかもしれませんが: **定数**です。不変変数のように、定数は名前に束縛され、変更することが叶わない値のことですが、定数と変数の間にはいくつかの違いがあります。

まず、定数には `mut` キーワードは使えません: 定数は標準で不変であるだけでなく、常に不変なのです。

定数は `let` キーワードの代わりに、`const` キーワードで宣言し、値の型は**必ず**注釈しなければなりません。型と型注釈については次のセクション、「データ型」で講義しますので、その詳細について気にする必要はありません。ただ単に型は常に注釈しなければならないのだと思ってください。

定数はどんなスコープでも定義できます。グローバルスコープも含めてです。なので、いろんなところで使用される可能性のある値を定義するのに役に立ちます。

最後の違いは、定数は定数式にしかセットできないことです。関数呼び出し結果や、実行時に評価される値にはセットできません。

定数の名前が `MAX_POINTS` で、値が `100,000` にセットされた定数定義の例をご覧ください。(Rust の定数の命名規則は、全て大文字でアンダースコアで単語区切りすることです):

```
const MAX_POINTS: u32 = 100_000;
```

定数は、プログラムが走る期間、定義されたスコープ内でずっと有効です。従って、プログラムのいろんなところで使用される可能性のあるアプリケーション空間の値を定義するのに有益な選択肢になります。例えば、ゲームでプレイヤーが取得可能なポイントの最高値や、光速度などですね。

プログラム中で使用されるハードコードされた値に対して、定数として名前付けすることは、コードの将来的な管理者にとって値の意味を汲むのに役に立ちます。将来、ハードコードされた値を変える必要が出た時に、たった 1 箇所を変更するだけで済むようにもしてくれます。

3.1.2 シャドーイング

第2章の数当てゲームのチュートリアル、「予想と秘密の数字を比較する」節で見たように、前に定義した変数と同じ名前の変数を新しく宣言でき、新しい変数は、前の変数を覆い隠します。Rustacean はこれを最初の変数は、2番目の変数に覆い隠されたと言い、この変数を使用した際に、2番目の変数の値が現れるということです。以下のようにして、同じ変数名を用いて変数を覆い隠し、let キーワードの使用を繰り返します:

ファイル名: src/main.rs

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch03-common-programming-concepts/no-listing-03-shadowing/src/main.rs}}
```

このプログラムはまず、x を 5 という値に束縛します。それから let x = を繰り返すことで x を覆い隠し、元の値に 1 を加えることになるので、x の値は 6 になります。3 番目の let 文も x を覆い隠し、以前の値に 2 をかけることになるので、x の最終的な値は 12 になります。括弧を抜けるとシャドーイングは終了し、x の値は元の 6 に戻ります。このプログラムを走らせたなら、以下のように出力するでしょう:

```
{{#include ../listings/ch03-common-programming-concepts/no-listing-03-shadowing/output.txt}}
```

シャドーイングは、変数を mut にするのとは違います。なぜなら、let キーワードを使わずに、誤ってこの変数に再代入を試みようものなら、コンパイルエラーが出るからです。let を使うことで、値にちょっとした加工は行えますが、その加工が終わったら、変数是不変になるわけです。

mut と上書きのもう一つの違いは、再度 let キーワードを使用したら、実効的には新しい変数を生成していることになるので、値の型を変えつつ、同じ変数名を使いませることです。例えば、プログラムがユーザに何らかのテキストに対して空白文字を入力することで何個分のスペースを表示したかを尋ねますが、ただ、実際にはこの入力を数値として保持したいとしましょう:

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch03-common-programming-concepts/no-listing-04-shadowing-can-change-types/src/main.rs:here}}
```

この文法要素は、容認されます。というのも、最初の spaces 変数は文字列型であり、2 番目の spaces 変数は、たまたま最初の変数と同じ名前になったまっさらな変数のわけですが、数値型になるからです。故に、シャドーイングのおかげで、異なる名前を思いつく必要がなくなるわけです。spaces_str と spaces_num などですね; 代わりに、よりシンプルな spaces という名前を再利用できるわけです。一方で、この場合に mut を使おうとすると、以下に示した通りですが、コンパイルエラーになるわけです:

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch03-common-programming-concepts/no-listing-05-mut-cant-change-types/src/main.rs:here}}
```

変数の型を可変にすることは許されていないと言われているわけです:

```
{{#include ../listings/ch03-common-programming-concepts/no-listing-05-mut-cant-change-types/output.txt}}
```

さあ、変数が動作する方法を見てきたので、今度は変数を取りうるデータ型について見ていきましょう。

3.2 データ型

Rust における値は全て、何らかの**データ型**になり、コンパイラがどんなデータが指定されているか知れるので、そのデータの取り扱い方も把握できるというわけです。2 種のデータ型のサブセットを見ましょう: スカラー型と複合型です。

Rust は**静的型付き**言語であることを弁えておいてください。つまり、コンパイル時に全ての変数の型が判明している必要があるということです。コンパイラは通常、値と使用方法に基づいて、使用したい型を推論してくれます。複数の型が推論される可能性がある場合、例えば、第2章の「予想と秘密の数字を比較する」節で `parse` メソッドを使って `String` 型を数値型に変換した時のように、複数の型が可能な場合には、型注釈をつけなければいけません。以下のようにですね:

```
let guess: u32 = "42".parse().expect("Not a number!"); // 数字ではありません!
```

ここで型注釈を付けなければ、コンパイラは以下のエラーを表示し、これは可能性のある型のうち、どの型を使用したいのかを知るのに、コンパイラがプログラマからもっと情報を得る必要があることを意味します:

```
{{#include ../listings/ch03-common-programming-concepts/output-only-01-no-type-annotations/output.txt}}
```

他のデータ型についても、様々な型注釈を目にすることになるでしょう。

3.2.1 スカラー型

スカラー型は、単独の値を表します。Rust には主に 4 つのスカラー型があります: 整数、浮動小数点数、論理値、最後に文字です。他のプログラミング言語でも、これらの型を見かけたことはあるでしょう。Rust での動作方法に飛び込みましょう。

3.2.1.1 整数型

整数とは、小数部分のない数値のことです。第 2 章で一つの整数型を使用しましたね。u32 型です。この型定義は、紐付けられる値が、符号なし整数 (符号付き整数は u ではなく、i で始まります) になり、これは、32 ビット分のサイズを取ります。表 3-1 は、Rust の組み込み整数型を表示しています。符号付きと符号なし欄の各バリエント (例: i16) を使用して、整数値の型を宣言することができます。

表 3-1: Rust の整数型

大きさ	符号付き	符号なし
8-bit	i8	u8
16-bit	i16	u16
32-bit	i32	u32
64-bit	i64	u64
arch	isize	usize

各バリエントは、符号付きか符号なしかを選べ、明示的なサイズを持ちます。符号付きと符号なしは、数値が正負を持つかどうかを示します。つまり、数値が符号を持つ必要があるかどうか (符号付き)、または、絶対に正数にしかならず符号なしで表現できるかどうか (符号なし) です。これは、数値を紙に書き下すのと似ています: 符号が問題になるなら、数値はプラス記号、またはマイナス記号とともに表示されます; しかしながら、その数値が正数であると仮定することが安全なら、符号なしで表示できるわけです。符号付き数値は、2 の補数表現で保持されます (これが何なのか確信を持っていないのであれば、ネットで検索することができます。まあ要するに、この解説は、この本の範疇外というわけです)。

各符号付きバリエントは、 $-(2^{n-1})$ 以上 $2^{n-1} - 1$ 以下の数値を保持でき、ここで n はこのバリエントが使用するビット数です。以上から、i8 型は $-(2^7)$ から $2^7 - 1$ まで、つまり、-128 から 127 までを保持できます。符号なしバリエントは、0 以上 $2^n - 1$ 以下を保持できるので、u8 型は、0 から $2^8 - 1$ までの値、つまり、0 から 255 までを保持できることになります。

加えて、isize と usize 型は、プログラムが動作しているコンピュータの種類に依存します: 64 ビットアーキテクチャなら、64 ビットですし、32 ビットアーキテクチャなら、32 ビットになります。

整数リテラル (訳注: リテラルとは、見たままの値ということ) は、表 3-2 に示すどの形式でも記述することができます。バイトリテラルを除く数値リテラルは全て、型接尾辞 (例えば、57u8) と _ を見た目の区切り記号 (例えば、1_000) に付加することができます。

表 3-2: Rust の整数リテラル

数値リテラル	例
10 進数	98_222
16 進数	0xff
8 進数	0o77
2 進数	0b1111_0000
バイト (u8 だけ)	b'A'

では、どの整数型を使うべきかはどう把握すればいいのでしょうか？ もし確信が持てないのならば、**Rust** の基準型は一般的にいい選択肢になります。整数型の基準は `i32` 型です: 64 ビットシステム上でも、この型が普通最速になります。`isize` と `usize` を使う主な状況は、何らかのコレクションにアクセスすることです。

3.2.1.2 浮動小数点型

Rust にはさらに、**浮動小数点数**に対しても、2 種類の基本型があり、浮動小数点数とは数値に小数点がついたもののことです。**Rust** の浮動小数点型は、`f32` と `f64` で、それぞれ 32 ビットと 64 ビットサイズです。基準型は `f64` です。なぜなら、現代の CPU では、`f32` とほぼ同スピードにもかかわらず、より精度が高くなるからです。

実際に動作している浮動小数点数の例をご覧ください:

ファイル名: `src/main.rs`

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch03-common-programming-concepts/no-listing-06-floating-point/src/main.rs}}
```

浮動小数点数は、IEEE-754 規格に従って表現されています。`f32` が単精度浮動小数点数、`f64` が倍精度浮動小数点数です。

3.2.1.3 数値演算

Rust にも全数値型に期待されうる標準的な数学演算が用意されています: 足し算、引き算、掛け算、割り算、余りです。以下の例では、`let` 文での各演算の使用方法をご覧ください:

ファイル名: `src/main.rs`

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch03-common-programming-concepts/no-listing-07-numeric-operations/src/main.rs}}
```

これらの文の各式は、数学演算子を使用しており、一つの値に評価され、そして、変数に束縛されます。付録 B に **Rust** で使える演算子の一覧が載っています。

3.2.1.4 論理値型

他の多くの言語同様、**Rust** の論理値型も取りうる値は二つしかありません: `true` と `false` です。**Rust** の論理値型は、`bool` と指定されます。例です:

ファイル名: `src/main.rs`

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch03-common-programming-concepts/no-listing-08-boolean/src/main.rs}}
```

論理値を使う主な手段は、条件式です。例えば、`if` 式などですね。`if` 式の **Rust** での動作方法については、「制御フロー」節で講義します。

3.2.1.5 文字型

ここまで、数値型のみ扱ってきましたが、**Rust** には文字も用意されています。**Rust** の `char` 型は、言語の最も基本的なアルファベット型であり、以下のコードでその使用方法の一例を見ることができます。(`char` は、ダブルクォーテーションマークを使用する文字列に対して、シングルクォートで指定されることに注意してください。)

ファイル名: `src/main.rs`

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch03-common-programming-concepts/no-listing-09-char/src/main.rs}}
```

Rust の `char` 型は、ユニコードのスカラー値を表します。これはつまり、アスキーよりもずっとたくさんのもを表せるということです。アクセント文字; 中国語、日本語、韓国語文字; 絵文字; ゼロ幅スペースは、全て **Rust** では、有効な `char` 型になります。ユニコードスカラー値は、`U+0000` から `U+D7FF` までと `U+E000` から `U+10FFFF` までの範囲になります。ところが、「文字」は実はユニコードの概念ではないので、文字とは何かという人間としての直観は、**Rust** における `char` 値が何かとは合致しない可能性があります。この話題については、第 8 章の「文字列」で詳しく議論しましょう。

3.2.2 複合型

複合型により、複数の値を一つの型にまとめることができます。**Rust** には、2 種類の基本的な複合型があります: タプルと配列です。

3.2.2.1 タプル型

タプルは、複数の型の何らかの値を一つの複合型にまとめ上げる一般的な手段です。

タプルは、丸かっこの中にカンマ区切りの値リストを書くことで生成します。タプルの位置ごとに型があり、タプル内の値はそれぞれ全てが同じ型である必要はありません。今回の例では、型注釈を

あえて追加しました:

ファイル名: src/main.rs

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch03-common-programming-concepts/no-listing-10-tuples/src/main.rs}}
```

変数 `tup` は、タプル全体に束縛されています。なぜなら、タプルは、一つの複合要素と考えられるからです。タプルから個々の値を取り出すには、パターンマッチングを使用して分解することができます。以下のように:

ファイル名: src/main.rs

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch03-common-programming-concepts/no-listing-11-destructuring-tuples/src/main.rs}}
```

このプログラムは、まずタプルを生成し、それを変数 `tup` に束縛しています。それから `let` とパターンを使って `tup` 変数の中身を3つの個別の変数 (`x`、`y`、`z` ですね) に変換しています。この過程は、**分配**と呼ばれます。単独のタプルを破壊して三分割しているからです。最後に、プログラムは `y` 変数の値を出力し、`6.4` と表示されます。

パターンマッチングを通しての分配の他にも、アクセスしたい値の番号をピリオド(`.`)に続けて書くことで、タプルの要素に直接アクセスすることもできます。例です:

ファイル名: src/main.rs

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch03-common-programming-concepts/no-listing-12-tuple-indexing/src/main.rs}}
```

このプログラムは、新しいタプル `x` を作成し、添え字アクセスで各要素に対して新しい変数も作成しています。多くのプログラミング言語同様、タプルの最初の添え字は `0` です。

3.2.2.2 配列型

配列によっても、複数の値のコレクションを得ることができます。タプルと異なり、配列の全要素は、同じ型でなければなりません。**Rust** の配列は、他の言語と異なっています。**Rust** の配列は、固定長なのです: 一度宣言されたら、サイズを伸ばすことも縮めることもできません。

Rust では、配列に入れる要素は、角かっこ内にカンマ区切りリストとして記述します:

ファイル名: src/main.rs

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch03-common-programming-concepts/no-listing-13-arrays/src/main.rs}}
```

配列は、ヒープよりもスタック (スタックとヒープについては第4章で詳(つまび)らかに議論します) にデータのメモリを確保したい時、または、常に固定長の要素があることを確認したい時に有効です。ただ、配列は、ベクタ型ほど柔軟ではありません。ベクタは、標準ライブラリによって提供されている配列と似たようなコレクション型で、こちらは、サイズを伸縮させることができます。配列とベクタ型、どちらを使うべきか確信が持てない時は、おそらくベクタ型を使うべきです。第8章でベクタについて詳細に議論します。

ベクタ型よりも配列を使いたくなるかもしれない例は、1年の月の名前を扱うプログラムです。そのようなプログラムで、月を追加したり削除したりすることまずないので、配列を使用できます。常に12個要素があることもわかっていますからね:

```
let months = ["January", "February", "March", "April", "May", "June", "July",  
             "August", "September", "October", "November", "December"];
```

例えば次のように、配列の型は角かっこの中に要素の型とセミコロン、そして配列の要素数を与えます。

```
let a: [i32; 5] = [1, 2, 3, 4, 5];
```

ここでの `i32` は要素の型です。セミコロンのおとの `5` という数字は配列の要素が5つあることを表しています。

次のように、角かっこの中に初期値とセミコロン、そして配列の長さを与えることで、各要素に同じ値を持つように配列を初期化することができます。

```
let a = [3; 5];
```

この `a` という名前の配列は `3` という値が5つあるものです。これは `let a = [3, 3, 3, 3, 3];` と書くのと同じですが、より簡潔になります。

■配列の要素にアクセスする 配列は、スタック上に確保される一塊のメモリです。添え字によって、配列の要素にこのようにアクセスすることができます:

ファイル名: `src/main.rs`

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch03-common-programming-concepts/no-listing-14-  
array-indexing/src/main.rs}}
```

この例では、`first` という名前の変数には `1` という値が格納されます。配列の `[0]` 番目にある値が、それだからですね。`second` という名前の変数には、配列の `[1]` 番目の値 `2` が格納されます。

■配列要素への無効なアクセス 配列の終端を越えて要素にアクセスしようとしたら、どうなるのでしょうか? 先ほどの例を以下のように変えたとなると、コンパイルは通りますが、実行するとエラー

で終了します:

ファイル名: src/main.rs

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch03-common-programming-concepts/no-listing-15-  
invalid-array-access/src/main.rs}}
```

このコードはコンパイルされます。cargo run で走らせ、0, 1, 2, 3, または 4 をこのプログラムに入力すると配列の対応する値を出力します。もし配列の末尾を超えるような、例えば 10 などの数字を与えると、次のような出力が表示されます。

```
thread 'main' panicked at 'index out of bounds: the len is 5 but the index is  
10', src/main.rs:19:19  
スレッド'main'は'範囲外アクセス: 長さは5ですが、添え字は10でした', src/main.rs  
:19:19  
でパニックしました  
note: run with `RUST_BACKTRACE=1` environment variable to display a backtrace
```

コンパイルでは何もエラーが出なかったものの、プログラムは**実行時**エラーに陥り、正常終了しませんでした。要素に添え字アクセスを試みると、言語は、指定されたその添え字が配列長よりも小さいかを確認してくれます。添え字が配列長よりも大きければ、言語は**パニック**します。パニックとは、プログラムがエラーで終了したことを表す Rust 用語です。

これは、実際に稼働している Rust の安全機構の最初の例になります。低レベル言語の多くでは、この種のチェックは行われなため、間違った添え字を与えると、無効なメモリにアクセスできてしまいます。Rust では、メモリアクセスを許可し、処理を継続する代わりに即座にプログラムを終了することで、この種のエラーからプログラマを保護しています。Rust のエラー処理については、第9章でもっと議論します。

3.3 関数

関数は、Rust のコードにおいてよく見かける存在です。既に、言語において最も重要な関数のうちの一つを目撃していますね: そう、main 関数です。これは、多くのプログラムのエントリーポイント (訳注: プログラム実行時に最初に走る関数のこと) になります。fn キーワードもすでに見かけましたね。これによって新しい関数を宣言することができます。

Rust の関数と変数の命名規則は、**スネークケース** (訳注: some_variable のような命名規則) を使うのが慣例です。スネークケースとは、全文字を小文字にし、単語区切りにアンダースコアを使うことです。以下のプログラムで、サンプルの関数定義をご覧ください:

ファイル名: src/main.rs

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch03-common-programming-concepts/no-listing-16-  
functions/src/main.rs}}
```

Rust において関数定義は、`fn` キーワードで始まり、関数名の後に丸かっこの組が続きます。波かっこの組が、コンパイラに関数本体の開始と終了の位置を伝えます。

定義した関数は、名前に丸かっこの組を続けることで呼び出すことができます。`another_function` 関数がプログラム内で定義されているので、`main` 関数内から呼び出すことができます。ソースコード中で `another_function` を `main` 関数の後に定義していることに注目してください; 勿論、`main` 関数の前に定義することもできます。コンパイラは、関数がどこで定義されているかは気にしません。どこかで定義されていることのみ気にします。

functions という名前の新しいバイナリ生成プロジェクトを始めて、関数についてさらに深く探究していきましょう。`another_function` の例を **src/main.rs** ファイルに配置して、走らせてください。以下のような出力が得られるはずです:

```
{{#include ../listings/ch03-common-programming-concepts/no-listing-16-functions/output.txt}}
```

行出力は、`main` 関数内に書かれた順序で実行されています。最初に **"Hello, world"** メッセージが出て、それから `another_function` が呼ばれて、こちらのメッセージが出力されています。

3.3.1 関数の引数

関数は、引数を持つようにも定義できます。引数とは、関数シグニチャの一部になる特別な変数のことです。関数に引数があると、引数の位置に実際の値を与えることができます。技術的にはこの実際の値は**実引数**と呼ばれますが、普段の会話では、仮引数 ("**parameter**") と実引数 ("**argument**") を関数定義の変数と関数呼び出し時に渡す実際の値、両方の意味に区別なく使います (訳注: 日本語では、特別区別する意図がない限り、どちらも単に引数と呼ぶことが多いでしょう)。

以下の書き直した `another_function` では、Rust の仮引数がどのようなものかを示しています:

ファイル名: `src/main.rs`

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch03-common-programming-concepts/no-listing-17-functions-with-parameters/src/main.rs}}
```

このプログラムを走らせてみてください; 以下のような出力が得られるはずです:

```
{{#include ../listings/ch03-common-programming-concepts/no-listing-17-functions-with-parameters/output.txt}}
```

`another_function` の宣言には、`x` という名前の仮引数があります。`x` の型は、`i32` と指定されています。値 `5` が `another_function` に渡されると、`println!` マクロにより、フォーマット文字列中の `1` 組の波かっこの組があった位置に値 `5` が出力されます。

関数シグニチャにおいて、各仮引数の型を宣言しなければなりません。これは、Rust の設計において、意図的な判断です: 関数定義で型注釈が必要不可欠ということは、コンパイラがその意図するところを推し量るのに、プログラマがコードの他の箇所で使用する必要がないということを意味します。

関数に複数の仮引数を持たせたいときは、仮引数定義をカンマで区切ってください。こんな感じです:

ファイル名: src/main.rs

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch03-common-programming-concepts/no-listing-18-functions-with-multiple-parameters/src/main.rs}}
```

この例では、2 引数の関数を生成しています。そして、引数はどちらも `i32` 型です。それからこの関数は、仮引数の値を両方出力します。関数引数は、全てが同じ型である必要はありません。今回は、偶然同じになっただけです。

このコードを走らせてみましょう。今、**function** プロジェクトの **src/main.rs** ファイルに記載されているプログラムを先ほどの例と置き換えて、`cargo run` で走らせてください:

```
{{#include ../listings/ch03-common-programming-concepts/no-listing-18-functions-with-multiple-parameters/output.txt}}
```

`x` に対して値 5、`y` に対して値 6 を渡して関数を呼び出したので、この二つの文字列は、この値で出力されました。

3.3.2 関数本体は、文と式を含む

関数本体は、文が並び、最後に式を置くか文を置くという形で形成されます。現在までには、式で終わらない関数だけを見てきたわけですが、式が文の一部になっているものなら見かけましたね。Rust は、式指向言語なので、これは理解しておくべき重要な差異になります。他の言語にこの差異はありませんので、文と式がなんなのかと、その違いが関数本体にどんな影響を与えるかを見ていきましょう。

実のところ、もう文と式は使っています。**文**とは、なんらかの動作をして値を返さない命令です。**式**は結果値に評価されます。ちょっと例を眺めてみましょう。

`let` キーワードを使用して変数を生成し、値を代入することは文になります。リスト 3-1 で `let y = 6;` は文です。

ファイル名: src/main.rs

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch03-common-programming-concepts/listing-03-01/src/main.rs}}
```

リスト 3-1: 1 文を含む `main` 関数宣言

関数定義も文になります。つまり、先の例は全体としても文になるわけです。

文は値を返しません。故に、`let` 文を他の変数に代入することはできません。以下のコードではそれを試みていますが、エラーになります：

ファイル名: `src/main.rs`

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch03-common-programming-concepts/no-listing-19-statements-vs-expressions/src/main.rs}}
```

このプログラムを実行すると、以下のようなエラーが出るでしょう：

```
{{#include ../listings/ch03-common-programming-concepts/no-listing-19-statements-vs-expressions/output.txt}}
```

この `let y = 6` という文は値を返さないで、`x` に束縛するものがないわけです。これは、**C** や **Ruby** などの言語とは異なる動作です。**C** や **Ruby** では、代入は代入値を返します。これらの言語では、`x = y = 6` と書いて、`x` も `y` も値 `6` になるようにできるのですが、**Rust** においては、そうは問屋が卸さないわけです。

式は何かに評価され、これからあなたが書く **Rust** コードの多くを構成します。簡単な数学演算 (`5 + 6` など) を思い浮かべましょう。この例は、値 `11` に評価される式です。式は文の一部になりえます：リスト 3-1 において、`let y = 6` という文の `6` は値 `6` に評価される式です。関数呼び出しも式です。マクロ呼び出しも式です。新しいスコープを作る際に使用するブロック (`{ }`) も式です：

ファイル名: `src/main.rs`

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch03-common-programming-concepts/no-listing-20-blocks-are-expressions/src/main.rs}}
```

以下の式：

```
{  
    let x = 3;  
    x + 1  
}
```

は今回の場合、`4` に評価されるブロックです。その値が、`let` 文の一部として `y` に束縛されます。今まで見かけてきた行と異なり、文末にセミコロンがついていない `x + 1` の行に気をつけてください。式は終端にセミコロンを含みません。式の終端にセミコロンを付けたら、文に変えてしまいます。そして、文は値を返しません。次に関数の戻り値や式を見ていく際にこのことを肝に銘じておいてください。

3.3.3 戻り値のある関数

関数は、それを呼び出したコードに値を返すことができます。戻り値に名前を付けはしませんが、矢印 (→) の後に型を書いて確かに宣言します。**Rust** では、関数の戻り値は、関数本体ブロックの最後の式の値と同義です。return キーワードで関数から早期リターンし、値を指定することもできますが、多くの関数は最後の式を暗黙的に返します。こちらが、値を返す関数の例です：

ファイル名: src/main.rs

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch03-common-programming-concepts/no-listing-21-function-return-values/src/main.rs}}
```

five 関数内には、関数呼び出しもマクロ呼び出しも、let 文でさえ存在しません。数字の 5 が単独であるだけです。これは、**Rust** において、完璧に問題ない関数です。関数の戻り値型が → i32 と指定されていることにも注目してください。このコードを実行してみましょう；出力はこんな感じになるはずです：

```
{{#include ../listings/ch03-common-programming-concepts/no-listing-21-function-return-values/output.txt}}
```

five 内の 5 が関数の戻り値です。だから、戻り値型が i32 なのです。これについてもっと深く考察しましょう。重要な箇所は 2 つあります：まず、let x = five() という行は、関数の戻り値を使って変数を初期化していることを示しています。関数 five は 5 を返すので、この行は以下のように書くのと同義です：

```
let x = 5;
```

2 番目に、five 関数は仮引数をもたず、戻り値型を定義していますが、関数本体はセミコロンなしの 5 単独です。なぜなら、これが返したい値になる式だからです。

もう一つ別の例を見ましょう：

ファイル名: src/main.rs

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch03-common-programming-concepts/no-listing-22-function-parameter-and-return/src/main.rs}}
```

このコードを走らせると、The value of x is: 6 と出力されるでしょう。しかし、x + 1 を含む行の終端にセミコロンを付けて、式から文に変えたら、エラーになるでしょう：

ファイル名: src/main.rs


```
{{#rustdoc_include ../listings/ch03-common-programming-concepts/no-listing-23-statements-dont-return-values/src/main.rs}}
```

このコードを実行すると、以下のようにエラーが出ます:

```
{{#include ../listings/ch03-common-programming-concepts/no-listing-23-statements-dont-return-values/output.txt}}
```

メインのエラーメッセージである「型が合いません」でこのコードの根本的な問題が明らかになるでしょう。関数 `plus_one` の定義では、`i32` 型を返すと言っているのに、文は値に評価されないからです。このことは、`()`、つまり空のタプルとして表現されています。それゆえに、何も戻り値がなく、これが関数定義と矛盾するので、結果としてエラーになるわけです。この出力内で、コンパイラは問題を修正する手助けになりそうなメッセージも出していますね: セミコロンを削除するよう提言しています。そして、そうすれば、エラーは直るわけです。

3.4 コメント

全プログラマは、自分のコードがわかりやすくなるよう努めますが、時として追加の説明が許されることもあります。このような場合、プログラマは注釈または**コメント**をソースコードに残し、コメントをコンパイラは無視しますが、ソースコードを読む人間には有益なものと思えるでしょう。

こちらが単純なコメントです:

```
// hello, world
```

Rust では、コメントは 2 連スラッシュで始め、行の終わりまで続きます。コメントが複数行にまたがる場合、各行に `//` を含める必要があります。こんな感じに:

```
// So we're doing something complicated here, long enough that we need
// multiple lines of comments to do it! Whew! Hopefully, this comment will
// explain what's going on.
// ここで何か複雑なことをしていて、長すぎるから複数行のコメントが必要なんだ。
// ふう! 願わくば、このコメントで何が起きているか説明されていると嬉しい。
```

コメントは、コードが書かれた行の末尾にも配置することができます:

Filename: `src/main.rs`

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch03-common-programming-concepts/no-listing-24-comments-end-of-line/src/main.rs}}
```

しかし、こちらの形式のコメントの方が見かける機会が多いでしょう。注釈しようとしているコードの 1 行上に書く形式です:

ファイル名: src/main.rs

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch03-common-programming-concepts/no-listing-25-  
comments-above-line/src/main.rs}}
```

Rust には他の種類のコメント、ドキュメントコメントもあり、それについては第 14 章で議論します。

3.5 制御フロー

条件が真かどうかによってコードを走らせるかどうかを決定したり、条件が真の間繰り返しコードを走らせるか決定したりすることは、多くのプログラミング言語において、基本的な構成ブロックです。Rust コードの実行フローを制御する最も一般的な文法要素は、if 式とループです。

3.5.1 if 式

if 式によって、条件に依存して枝分かれをさせることができます。条件を与え、以下のように宣言します。「もし条件が合ったら、この一連のコードを実行しろ。条件に合わなければ、この一連のコードは実行するな」と。

projects ディレクトリに **branches** という名のプロジェクトを作って if 式について掘り下げていきましょう。**src/main.rs** ファイルに、以下のように入力してください:

ファイル名: src/main.rs

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch03-common-programming-concepts/no-listing-26-if  
-true/src/main.rs}}
```

if 式は全て、キーワードの if から始め、条件式を続けます。今回の場合、条件式は変数 `number` が 5 未満の値になっているかどうかをチェックします。条件が真の時に実行したい一連のコードを条件式の直後に波かっこで包んで配置します。if 式の条件式と紐付けられる一連のコードは、時として **アーム**と呼ばれることがあります。第 2 章の「予想と秘密の数字を比較する」の節で議論した `match` 式のアームと同じです。

オプションとして、`else` 式を含むこともでき(ここではそうしています)、これによりプログラムは、条件式が偽になった時に実行するコードを与えられることになります。仮に、`else` 式を与えずに条件式が偽になったら、プログラムは単に if ブロックを飛ばして次のコードを実行しにいきます。

このコードを走らせてみましょう; 以下のような出力を目の当たりにするはずです:

```
{{#include ../listings/ch03-common-programming-concepts/no-listing-26-if-true/  
output.txt}}
```

`number` の値を条件が `false` になるような値に変更してどうなるか確かめてみましょう:

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch03-common-programming-concepts/no-listing-27-if-  
-false/src/main.rs:here}}
```

再度プログラムを実行して、出力に注目してください:

```
{{#include ../listings/ch03-common-programming-concepts/no-listing-27-if-false/  
output.txt}}
```

このコード内の条件式は、`bool` 型でなければならないことにも触れる価値があります。条件式が、`bool` 型でない時は、エラーになります。例えば、試しに以下のコードを実行してみてください:

ファイル名: `src/main.rs`

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch03-common-programming-concepts/no-listing-28-if-  
-condition-must-be-bool/src/main.rs}}
```

今回、`if` の条件式は `3` という値に評価され、コンパイラがエラーを投げます:

```
{{#include ../listings/ch03-common-programming-concepts/no-listing-28-if-  
condition-must-be-bool/output.txt}}
```

このエラーは、コンパイラは `bool` 型を予期していたのに、整数だったことを示唆しています。**Ruby** や **JavaScript** などの言語とは異なり、**Rust** では、論理値以外の値が、自動的に論理値に変換されることはありません。明示し、必ず `if` には条件式として、論理値を与えなければなりません。例えば、数値が `0` 以外の時だけ `if` のコードを走らせたいなら、以下のように `if` 式を変更することができます:

ファイル名: `src/main.rs`

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch03-common-programming-concepts/no-listing-29-if-  
-not-equal-0/src/main.rs}}
```

このコードを実行したら、`number was something other than zero` と表示されるでしょう。

3.5.1.1 `else if` で複数の条件を扱う

`if` と `else` を組み合わせて `else if` 式にすることで複数の条件を持たせることもできます。例です:

ファイル名: `src/main.rs`

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch03-common-programming-concepts/no-listing-30-  
else-if/src/main.rs}}
```

このプログラムには、通り道が 4 つあります。実行後、以下のような出力を目の当たりにするはず
です:

```
{{#include ../listings/ch03-common-programming-concepts/no-listing-30-else-if/output.txt}}
```

このプログラムを実行すると、if 式が順番に吟味され、最初に条件が真になった本体が実行されます。6 は 2 で割り切れるものの、number is divisible by 2 や、else ブロックの number is not divisible by 4, 3, or 2 という出力はされないことに注目してください。それは、Rust が最初の真条件のブロックのみを実行し、条件に合ったものが見つかったら、残りはチェックすらしないからです。

else if 式を使いすぎると、コードがめっちゃくちゃになってしまうので、1 つ以上あるなら、コードをリファクタリングしたくなるかもしれません。これらのケースに有用な match と呼ばれる、強力な Rust の枝分かれ文法要素については第 6 章で解説します。

3.5.1.2 let 文内で if 式を使う

if は式なので、let 文の右辺に持ってくるができます。リスト 3-2 のようにですね。

ファイル名: src/main.rs

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch03-common-programming-concepts/listing-03-02/src/main.rs}}
```

リスト 3-2: if 式の結果を変数に代入する

この number 変数は、if 式の結果に基づいた値に束縛されます。このコードを走らせてどうなるか確かめてください:

```
{{#include ../listings/ch03-common-programming-concepts/listing-03-02/output.txt
}}
```

一連のコードは、そのうちの最後の式に評価され、数値はそれ単独でも式になることを思い出してください。今回の場合、この if 式全体の値は、どのブロックのコードが実行されるかに基づきます。これはつまり、if の各アームの結果になる可能性がある値は、同じ型でなければならないということになります; リスト 3-2 で、if アームも else アームも結果は、i32 の整数でした。以下の例のように、型が合わない時には、エラーになるでしょう:

ファイル名: src/main.rs

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch03-common-programming-concepts/no-listing-31-arms-must-return-same-type/src/main.rs}}
```

このコードをコンパイルしようとする、エラーになります。if と else アームは互換性のない値の型になり、コンパイラがプログラム内で問題の見つかった箇所をズバリ指摘してくれます:

```
{{#include ../listings/ch03-common-programming-concepts/no-listing-31-arms-must-  
return-same-type/output.txt}}
```

if ブロックの式は整数に評価され、else ブロックの式は文字列に評価されます。これでは動作しません。変数は単独の型でなければならないからです。コンパイラは、コンパイル時に number 変数の型を確実に把握する必要があるため、コンパイル時に number が使われている箇所全部で型が有効かどうか検査することができるのです。number の型が実行時にしか決まらないのであれば、コンパイラはそれを実行することができなくなってしまいます; どの変数に対しても、架空の複数の型があることを追いかける必要があるのであれば、コンパイラはより複雑になり、コードに対して行える保証が少なくなってしまうでしょう。

3.5.2 ループでの繰り返し

一連のコードを 1 回以上実行できると、しばしば役に立ちます。この作業用に、Rust にはいくつかのループが用意されています。ループは、本体内のコードを最後まで実行し、直後にまた最初から処理を開始します。ループを試してみるのに、**loops** という名の新プロジェクトを作りましょう。

Rust には 3 種類のループが存在します: loop と while と for です。それぞれ試してみましょう。

3.5.2.1 loop でコードを繰り返す

loop キーワードを使用すると、同じコードを何回も何回も永遠に、明示的にやめさせるまで実行します。

例として、**loops** ディレクトリの **src/main.rs** ファイルを以下のような感じに書き換えてください:

ファイル名: src/main.rs

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch03-common-programming-concepts/no-listing-32-  
loop/src/main.rs}}
```

このプログラムを実行すると、プログラムを手動で止めるまで、何度も何度も続けて again! と出力するでしょう。ほとんどの端末で **ctrl-c** というショートカットが使える、永久ループに囚われてしまったプログラムを終了させられます。試しにやってみましょう:

```
$ cargo run  
Compiling loops v0.1.0 (file:///projects/loops)  
Finished dev [unoptimized + debuginfo] target(s) in 0.29 secs  
Running `target/debug/loops`  
again!  
again!  
again!  
again!  
^Cagain!
```

^c という記号が出た場所が、**ctrl-c** を押した場所です。^c の後には **again!** と表示されたり、されなかったりします。ストップシグナルをコードが受け取った時にループのどこにいたかによります。

幸いなことに、**Rust** にはループを抜け出す別のより信頼できる手段があります。ループ内に **break** キーワードを配置することで、プログラムに実行を終了すべきタイミングを教えることができます。第2章の「正しい予想をした後に終了する」節の数当てゲーム内でこれをして、ユーザが予想を的中させ、ゲームに勝った時にプログラムを終了させたことを思い出してください。

数当てゲームで **continue** を使用しました。**continue** はループの中で残っているコードをスキップして次のループに移るためのものです。

ループ内にループがある場合、**break** と **continue** は最も内側のループに適用されます。**ループラベル**を使用することで、**break** や **continue** が適用されるループを指定することができます。以下に例を示します。

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch03-common-programming-concepts/no-listing-32-5-loop-labels/src/main.rs}}
```

外側のループには **'counting_up** というラベルがついていて、**0** から **2** まで数え上げます。内側のラベルのないループは **10** から **9** までカウントダウンします。最初のラベルの無い **break** は内側のループを終了させます。**break 'counting_up;** は外側のループを終了させます。このコードは以下のような出力をします。

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch03-common-programming-concepts/no-listing-32-5-loop-labels/output.txt}}
```

3.5.2.2 while で条件付きループ

プログラムにとってループ内で条件式を評価できると、有益なことがしばしばあります。条件が真の間、ループが走るわけです。条件が真でなくなった時にプログラムは **break** を呼び出し、ループを終了します。このタイプのループは、**loop**、**if**、**else**、**break** を組み合わせることで実装できます；お望みなら、プログラムで今、試してみるのもいいでしょう。

しかし、このパターンは頻出するので、**Rust** にはそれ用の文法要素が用意されていて、**while** ループと呼ばれます。リスト 3-3 は、**while** を使用しています：プログラムは 3 回ループし、それぞれカウントダウンします。それから、ループ後に別のメッセージを表示して終了します：

ファイル名: **src/main.rs**

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch03-common-programming-concepts/listing-03-03/src/main.rs}}
```

リスト 3-3: 条件が真の間、コードを走らせる **while** ループを使用する

この文法要素により、`loop`、`if`、`else`、`break` を使った時に必要になるネストがなくなり、より明確になります。条件が真の間、コードは実行されます; そうでなければ、ループを抜けます。

3.5.2.3 for でコレクションを覗き見る

`while` 要素を使って配列などのコレクションの要素を覗き見ることができます。例えば、リスト 3-4 を見ましょう。

ファイル名: `src/main.rs`

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch03-common-programming-concepts/listing-03-04/  
src/main.rs}}
```

リスト 3-4: `while` ループでコレクションの各要素を覗き見る

ここで、コードは配列の要素を順番にカウントアップして覗いています。番号 `0` から始まり、配列の最終番号に到達するまでループします (つまり、`index < 5` が真でなくなる時です)。このコードを走らせると、配列内の全要素が出力されます:

```
{{#include ../listings/ch03-common-programming-concepts/listing-03-04/output.txt  
}}
```

予想通り、配列の 5 つの要素が全てターミナルに出力されています。`index` 変数の値はどこかで 5 という値になるものの、配列から 6 番目の値を拾おうとする前にループは実行を終了します。

しかし、このアプローチは間違いが発生しやすいです; 添え字の長さが間違っていれば、プログラムはパニックしてしまいます。また遅いです。コンパイラが実行時にループの各回ごとに境界値チェックを行うようなコードを追加するからです。

より効率的な対立案として、`for` ループを使ってコレクションの各アイテムに対してコードを実行することができます。`for` ループはリスト 3-5 のこんな見た目です。

ファイル名: `src/main.rs`

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch03-common-programming-concepts/listing-03-05/  
src/main.rs}}
```

リスト 3-5: `for` ループを使ってコレクションの各要素を覗き見る

このコードを走らせたら、リスト 3-4 と同じ出力が得られるでしょう。より重要なのは、コードの安全性を向上させ、配列の終端を超えてアクセスしたり、終端に届く前にループを終えてアイテムを見逃してしまったりするバグの可能性を完全に排除したことです。

例えば、リスト 3-4 のコードで、`a` 配列からアイテムを 1 つ削除したのに、条件式を `while index < 4` にするのを忘れていたら、コードはパニックします。`for` ループを使っていれば、配列の要素数を

変えても、他のコードをいじることを覚えておく必要はなくなるわけです。

for ループのこの安全性と簡潔性により、**Rust** で使用頻度の最も高いループになっています。リスト 3-3 で while ループを使ったカウントダウンサンプルのように、一定の回数、同じコードを実行したいような状況であっても、多くの Rustacean は、for ループを使うでしょう。どうやってやるかといえば、Range 型を使うのです。Range 型は、標準ライブラリで提供される片方の数字から始まって、もう片方の数字未満の数値を順番に生成する型です。

for ループと、まだ話していない別のメソッド rev を使って範囲を逆順にしたカウントダウンはこうなります：

ファイル名: src/main.rs

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch03-common-programming-concepts/no-listing-34-  
for-range/src/main.rs}}
```

こちらのコードの方が少しいいでしょう？

3.6 まとめ

やりましたね！ 結構長い章でした：変数、スカラー値と複合データ型、関数、コメント、if 式、そして、ループについて学びました！ この章で議論した概念について経験を積みたいのであれば、以下のことをするプログラムを組んでみてください：

- 温度を華氏と摂氏で変換する。
- フィボナッチ数列の n 番目を生成する。
- クリスマスキャロルの定番、“The Twelve Days of Christmas” の歌詞を、曲の反復性を利用して出力する。

次に進む準備ができれば、他の言語にはあまり存在しない Rust の概念について話しましょう：所有権です。

第 4 章

所有権を理解する

所有権は Rust の最もユニークな機能であり、これのおかげでガベージコレクタなしで安全性担保を行うことができます。故に、Rust において、所有権がどう動作するのかを理解するのは重要です。この章では、所有権以外にも、関連する機能をいくつか話していきます: 借用、スライス、そして、コンパイラがデータをメモリにどう配置するかです。

4.1 所有権とは？

Rust の中心的な機能は、**所有権**です。この機能は、説明するのは簡単なのですが、言語の残りの機能全てにかかるほど深い裏の意味を含んでいるのです。

全てのプログラムは、実行中にコンピュータのメモリの使用方法を管理する必要があります。プログラムが動作するにつれて、定期的に使用されていないメモリを検索するガベージコレクションを持つ言語もありますが、他の言語では、プログラムが明示的にメモリを確保したり、解放したりしなければなりません。Rust では第 3 の選択肢を取っています: メモリは、コンパイラがコンパイル時にチェックする一定の規則とともに所有権システムを通じて管理されています。どの所有権機能も、実行中にプログラムの動作を遅くすることはありません。

所有権は多くのプログラマにとって新しい概念なので、慣れるまでに時間がかかります。嬉しいことに、Rust と、所有権システムの規則の経験を積むと、より自然に安全かつ効率的なコードを構築できるようになります。その調子でいきましょう！

所有権を理解した時、Rust を際立たせる機能の理解に対する強固な礎を得ることになるでしょう。この章では、非常に一般的なデータ構造に着目した例を取り扱うことで所有権を学んでいきます: 文字列です。

4.1.1 スタックとヒープ

多くのプログラミング言語において、スタックとヒープについて考える機会はそう多くないでしょう。しかし、Rust のようなシステムプログラミング言語においては、値がスタックに積まれるかヒープに置かれるかは、言語の振る舞いや、特定の決断を下す理由などに影響以上のものを与えるのです。この章の後半でスタックとヒープを交えて所有権の一部が解説されるので、ここでちょっと予行演習をしておきましょう。

スタックもヒープも、実行時にコードが使用できるメモリの一部になりますが、異なる手段で構成されています。スタックは、得た順番に値を並べ、逆の順で値を取り除いていきます。これは、**last in, first out**(訳注：あえて日本語にするなら、「最後に入れたものが最初に出てくる」といったところでしょうか) と呼ばれます。お皿の山を思い浮かべてください: お皿を追加する時には、山の一番上に置き、お皿が必要になったら、一番上から 1 枚を取り去りますよね。途中や一番下に追加したり、取り除いたりすることもできません。データを追加することは、**スタックに push する**といい、データを取り除くことは、**スタックから pop する**と表現します(訳注：日本語では単純に英語をそのまま活用してプッシュ、ポップと表現するでしょう)。データへのアクセス方法のおかげで、スタックは高速です: 新しいデータを置いたり、データを取得する場所を探す必要が絶対にないわけです。というのも、その場所は常に一番上だからですね。スタックを高速にする特性は他にもあり、それはスタック上のデータは全て既知の固定サイズでなければならないということです。

コンパイル時にサイズがわからなかったり、サイズが可変のデータについては、代わりにヒープに格納することができます。ヒープは、もっとごちゃごちゃしています: ヒープにデータを置く時、あるサイズのスペースを求めます。OS はヒープ上に十分な大きさの空の領域を見つけ、使用中にし、**ポインタ**を返します。ポインタとは、その場所へのアドレスです。この過程は、**ヒープに領域を確保する (allocating on the heap)** と呼ばれ、時としてそのフレーズを単に **allocate する**などと省略したりします。(訳注：こちらもこなれた日本語訳はないでしょう。allocate は「メモリを確保する」と訳したいところですが) スタックに値を積むことは、メモリ確保とは考えられません。ポインタは、既知の固定サイズなので、スタックに保管することができますが、実データが必要になったら、ポインタを追いかける必要があります。

レストランで席を確保することを考えましょう。入店したら、グループの人数を告げ、店員が全員座れる空いている席を探し、そこまで誘導します。もしグループの誰かが遅れて来るのなら、着いた席の場所を尋ねてあなたを発見することができます。

ヒープへのデータアクセスは、スタックのデータへのアクセスよりも低速です。ポインタを追って目的の場所に到達しなければならないからです。現代のプロセッサは、メモリをあちこち行き来しなければ、より速くなります。似た例えを続けましょう。レストランで多くのテーブルから注文を受ける給仕人を考えましょう。最も効率的なのは、次のテーブルに移らずに、一つのテーブルで全部の注文を受け付けてしまうことです。テーブル A で注文を受け、それか

らテーブル B の注文、さらにまた A、それからまた B と渡り歩くのは、かなり低速な過程になってしまうでしょう。同じ意味で、プロセッサは、データが隔離されている（ヒープではそうになっている可能性がある）よりも近くにある（スタックではこうなる）ほうが、仕事をうまくこなせるのです。ヒープに大きな領域を確保する行為も時間がかかることがあります。

コードが関数を呼び出すと、関数に渡された値（ヒープのデータへのポインタも含まれる可能性あり）と、関数のローカル変数がスタックに載ります。関数の実行が終了すると、それらの値はスタックから取り除かれます。

どの部分のコードがどのヒープ上のデータを使用しているか把握すること、ヒープ上の重複するデータを最小化すること、メモリ不足にならないようにヒープ上の未使用のデータを掃除することは全て、所有権が解決する問題です。一度所有権を理解したら、あまり頻繁にスタックとヒープに関して考える必要はなくなるでしょうが、ヒープデータを管理することが所有権の存在する理由だと知っていると、所有権が有りのままで動作する理由を説明するのに役立つこともあります。

4.1.2 所有権規則

まず、所有権のルールについて見ていきましょう。この規則を具体化する例を扱っていく間もこれらのルールを肝に銘じておいてください：

- Rust の各値は、**所有者**と呼ばれる変数と対応している。
- いかなる時も所有者は一つである。
- 所有者がスコープから外れたら、値は破棄される。

4.1.3 変数スコープ

第 2 章で、Rust プログラムの例はすでに見ています。もう基本的な記法は通り過ぎたので、`fn main() {` というコードはもう例に含みません。従って、例をなぞっているなら、これからの例は `main` 関数に手動で入れ込まなければいけなくなるでしょう。結果的に、例は少々簡潔になり、定型コードよりも具体的な詳細に集中しやすくなります。

所有権の最初の例として、何らかの変数の**スコープ**について見ていきましょう。スコープとは、要素が有効になるプログラム内の範囲のことです。以下のような変数があるとしましょう：

```
let s = "hello";
```

変数 `s` は、文字列リテラルを参照し、ここでは、文字列の値はプログラムのテキストとしてハードコードされています。この変数は、宣言された地点から、現在の**スコープ**の終わりまで有効になります。リスト 4-1 には、変数 `s` が有効な場所に関する注釈がコメントで付記されています。

```
{ // sは、ここでは有効ではない。まだ宣言されていない
  let s = "hello"; // sは、ここから有効になる

  // sで作業をする
} // このスコープは終わり。もうsは有効ではない
```

リスト 4-1: 変数と有効なスコープ

言い換えると、ここまでに重要な点は二つあります:

- `s` がスコープに入ると、有効になる
- スコープを抜けるまで、有効なまま

ここで、スコープと変数がある期間の関係は、他の言語に類似しています。さて、この理解のもとに、`String` 型を導入して構築していきましょう。

4.1.4 `String` 型

所有権の規則を具体化するには、第 3 章の「データ型」節で講義したものよりも、より複雑なデータ型が必要になります。以前講義した型は全てスタックに保管され、スコープが終わるとスタックから取り除かれますが、ヒープに確保されるデータ型を観察して、コンパイラがどうそのデータを掃除すべきタイミングを把握しているかを掘り下げていきたいと思います。

ここでは、例として `String` 型を使用し、`String` 型の所有権にまつわる部分に着目しましょう。また、この観点は、標準ライブラリや自分で生成する他の複雑なデータ型にも適用されます。`String` 型については、第 8 章でより深く議論します。

既に文字列リテラルは見かけましたね。文字列リテラルでは、文字列の値はプログラムにハードコードされます。文字列リテラルは便利ですが、テキストを使いたいかもしれない場面全てに最適なわけではありません。一因は、文字列リテラルが不変であることに起因します。別の原因は、コードを書く際に、全ての文字列値が判明するわけではないからです: 例えば、ユーザ入力を受け付け、それを保持したいとしたらどうでしょうか? このような場面用に、**Rust** には、2 種類目の文字列型、`String` 型があります。この型はヒープにメモリを確保するので、コンパイル時にはサイズが不明なテキストも保持することができるのです。`from` 関数を使用して、文字列リテラルから `String` 型を生成できます。以下のように:

```
let s = String::from("hello");
```

この二重コロンは、`string_from` などの名前を使うのではなく、`String` 型直下の `from` 関数を特定する働きをする演算子です。この記法について詳しくは、第 5 章の「メソッド記法」節と、第 7 章の「モジュール定義」でモジュールを使った名前空間分けについて話をするときに議論します。

この種の文字列は、可変化することができます:

```
let mut s = String::from("hello");

s.push_str(", world!"); // push_str()関数は、リテラルをStringに付け加える

println!("{}", s); // これは`hello, world!`と出力する
```

では、ここでの違いは何でしょうか？ なぜ、String 型は可変化できるのに、リテラルはできないのでしょうか？ 違いは、これら二つの型がメモリを扱う方法にあります。

4.1.5 メモリと確保

文字列リテラルの場合、中身はコンパイル時に判明しているので、テキストは最終的なバイナリファイルに直接ハードコードされます。このため、文字列リテラルは、高速で効率的になるのです。しかし、これらの特性は、その文字列リテラルの不変性にのみ端を発するものです。残念なことに、コンパイル時にサイズが不明だったり、プログラム実行に合わせてサイズが可変なテキスト片用に一塊のメモリをバイナリに確保しておくことは不可能です。

String 型では、可変かつ伸長可能なテキスト破片をサポートするために、コンパイル時には不明な量のメモリをヒープに確保して内容を保持します。つまり：

- メモリは、実行時に OS に要求される。
- String 型を使用し終わったら、OS にこのメモリを返還する方法が必要である。

この最初の部分は、既に行っています：String::from 関数を呼んだら、その実装が必要なメモリを要求するのです。これは、プログラミング言語において、極めて普遍的で。

しかしながら、2 番目の部分は異なります。ガベージコレクタ (GC) 付きの言語では、GC がこれ以上、使用されないメモリを検知して片付けるため、プログラマは、そのことを考慮する必要はありません。GC がいないなら、メモリがもう使用されないことを見計らって、明示的に返還するコードを呼び出すのは、プログラマの責任になります。ちょうど要求の際にしたようにですね。これを正確にすることは、歴史的にも難しいプログラミング問題の一つであり続けています。もし、忘れていたら、メモリを無駄にします。タイミングが早すぎたら、無効な変数を作ってしまいます。2 回解放してしまっても、バグになるわけです。allocate と free は完璧に 1 対 1 対応にしなければならないのです。

Rust は、異なる道を歩んでいます：ひとたび、メモリを所有している変数がスコープを抜けたら、メモリは自動的に返還されます。こちらの例は、リスト 4-1 のスコープ例を文字列リテラルから String 型を使うものに変更したバージョンになります：

```
{
    let s = String::from("hello"); // sはここから有効になる

    // sで作業をする
}                                     // このスコープはここでおしまい。sは
                                     // もう有効ではない
```

String 型が必要とするメモリを OS に返還することが自然な地点があります: s 変数がスコープを抜ける時です。変数がスコープを抜ける時、Rust は特別な関数呼んでくれます。この関数は、drop と呼ばれ、ここに String 型の書き手はメモリを返還するコードを配置することができます。Rust は、閉じ波括弧で自動的に drop 関数を呼び出します。

注釈: C++ では、要素の生存期間の終了地点でリソースを解放するこのパターンを時に、**RAII**(Resource Aquisition Is Initialization: リソースの獲得は、初期化である) と呼んだりします。Rust の drop 関数は、あなたが RAII パターンを使ったことがあれば、馴染み深いものでしょう。

このパターンは、Rust コードの書かれ方に甚大な影響をもたらします。現状は簡単そうに見えるかもしれませんが、ヒープ上に確保されたデータを複数の変数に使用させるようなもっと複雑な場面では、コードの振る舞いは、予期しないものになる可能性もあります。これから、そのような場面を掘り下げてみましょう。

4.1.5.1 変数とデータの相互作用法: ムーブ

Rust においては、複数の変数が同じデータに対して異なる手段で相互作用することができます。整数を使用したリスト 4-2 の例を見てみましょう。

```
let x = 5;  
let y = x;
```

リスト 4-2: 変数 x の整数値を y に代入する

もしかしたら、何をしているのか予想することができるでしょう: 「値 5 を x に束縛する; それから x の値をコピーして y に束縛する。」これで、二つの変数 (x と y) が存在し、両方、値は 5 になりました。これは確かに起こっている現象を説明しています。なぜなら、整数は既知の固定サイズの単純な値で、これら二つの 5 という値は、スタックに積まれるからです。

では、String バージョンを見ていきましょう:

```
let s1 = String::from("hello");  
let s2 = s1;
```

このコードは先ほどのコードに酷似していますので、動作方法も同じだと思い込んでしまうかもしれませんが: 要するに、2 行目で s1 の値をコピーし、s2 に束縛するということです。ところが、これは全く起こることを言い当てていません。

図 4-1 を見て、ボールの下で String に何が起きているかを確かめてください。String 型は、左側に示されているように、3 つの部品でできています: 文字列の中身を保持するメモリへのポインタと長さ、そして、許容量です。この種のデータは、スタックに保持されます。右側には、中身を保持し

たヒープ上のメモリがあります。



図 4-1: `s1` に束縛された "hello" という値を保持する String のメモリ上の表現

長さは、String 型の中身が現在使用しているメモリ量をバイトで表したものです。許容量は、String 型が OS から受け取った全メモリ量をバイトで表したものです。長さと許容量の違いは問題になることですが、この文脈では違うので、とりあえずは、許容量を無視しても構わないでしょう。

`s1` を `s2` に代入すると、String 型のデータがコピーされます。つまり、スタックにあるポインタ、長さ、許容量をコピーするということです。ポインタが指すヒープ上のデータはコピーしません。言い換えると、メモリ上のデータ表現は図 4-2 のようになるということです。

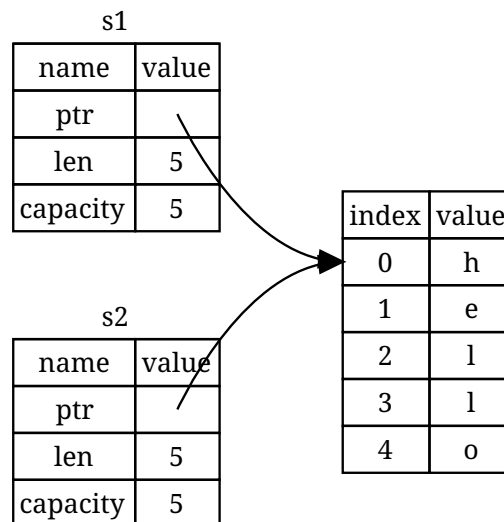


図 4-2: `s1` のポインタ、長さ、許容量のコピーを保持する変数 `s2` のメモリ上での表現

メモリ上の表現は、図 4-3 のようにはなりません。これは、Rust が代わりにヒープデータもコピーするという選択をしていた場合のメモリ表現ですね。Rust がこれをしていたら、ヒープ上のデータ

が大きい時に `s2 = s1` という処理の実行時性能がとて悪くなっていた可能性があるでしょう。



図 4-3: Rust がヒープデータもコピーしていた場合に `s2 = s1` という処理が行なった可能性のあること

先ほど、変数がスコープを抜けたら、Rust は自動的に `drop` 関数を呼び出し、その変数が使っていたヒープメモリを片付けると述べました。しかし、図 4-2 は、両方のデータポインタが同じ場所を指していることを示しています。これは問題です: `s2` と `s1` がスコープを抜けたら、両方とも同じメモリを解放しようとしてしまいます。これは**二重解放エラー**として知られ、以前触れたメモリ安全性上のバグの一つになります。メモリを 2 回解放することは、**memory corruption** (訳注: メモリの崩壊。意図せぬメモリの書き換え) につながり、セキュリティ上の脆弱性を生む可能性があります。

メモリ安全性を保証するために、Rust においてこの場面で起こることの詳細がもう一つあります。確保されたメモリをコピーしようとする代わりに、コンパイラは、`s1` が最早有効ではないと考え、故に `s1` がスコープを抜けた際に何も解放する必要がなくなるわけです。`s2` の生成後に `s1` を使用しようとしたら、どうなるかを確認してみましょう。動かないでしょう:

```
let s1 = String::from("hello");
let s2 = s1;

println!("{}", world!", s1);
```

コンパイラが無効化された参照は使用させてくれないので、以下のようなエラーが出るでしょう:


```

error[E0382]: use of moved value: `s1`
    (ムーブされた値の使用: `s1`)
--> src/main.rs:5:28
   |
3  |     let s2 = s1;
   |         -- value moved here
4  |
5  |     println!("{}", world!", s1);
   |                               ^^ value used here after move
   |                               (ムーブ後にここで使用されています)
   |
= note: move occurs because `s1` has type `std::string::String`, which does
not implement the `Copy` trait
    (注釈: ムーブが起きたのは、`s1`が`std::string::String`という
    `Copy`トレイトを実装していない型だからです)

```

他の言語を触っている間に”shallow copy”と”deep copy”という用語を耳にしたことがあるなら、データのコピーなしにポインタと長さ、許容量をコピーするという概念は、shallow copyのように思えるかもしれません。ですが、コンパイラは最初の変数をも無効化するので、shallow copyと呼ばれる代わりに、**ムーブ**として知られているわけです。この例では、s1はs2に**ムーブ**されたと表現するでしょう。以上より、実際に起きることを図4-4に示してみました。



図 4-4: s1 が無効化された後のメモリ表現

これにて一件落着です。s2 だけが有効なので、スコープを抜けたら、それだけがメモリを解放して、終わりになります。

付け加えると、これにより暗示される設計上の選択があります: Rust では、自動的にデータの”deep copy”が行われることは絶対にないわけです。それ故に、あらゆる**自動コピー**は、実行時性能の観点

で言うと、悪くないと考えてよいことになります。

4.1.5.2 変数とデータの相互作用法: クローン

仮に、スタック上のデータだけでなく、**本当に** String 型のヒープデータの **deep copy** が必要ならば、clone と呼ばれるよくあるメソッドを使うことができます。メソッド記法については第5章で議論しますが、メソッドは多くのプログラミング言語に見られる機能なので、以前に見かけたこともあるんじゃないでしょうか。

これは、clone メソッドの動作例です:

```
let s1 = String::from("hello");
let s2 = s1.clone();

println!("s1 = {}, s2 = {}", s1, s2);
```

これは問題なく動作し、図 4-3 で示した動作を明示的に生み出します。ここでは、ヒープデータが**実際に**コピーされています。

clone メソッドの呼び出しを見かけたら、何らかの任意のコードが実行され、その実行コストは高いと把握できます。何か違うことが起こっているなど見た目でわかるわけです。

4.1.5.3 スタックのみのデータ: コピー

まだ話題にしていない別の問題があります。この整数を使用したコードは、一部をリスト 4-2 で示しましたが、うまく動作する有効なものです:

```
let x = 5;
let y = x;

println!("x = {}, y = {}", x, y);
```

ですが、このコードは一見、今学んだことと矛盾しているように見えます: clone メソッドの呼び出しがないのに、x は有効で、y にムーブされませんでした。

その理由は、整数のようなコンパイル時に既知のサイズを持つ型は、スタック上にすっぽり保持されるので、実際の値をコピーするのも高速だからです。これは、変数 y を生成した後にも x を無効化したくなる理由がないことを意味します。換言すると、ここでは、**shallow copy** と **deep copy** の違いがないことになり、clone メソッドを呼び出しても、一般的な **shallow copy** 以上のことをしなくなり、そのまま放置しておけるということです。

Rust には Copy トレイトと呼ばれる特別な注釈があり、整数のようなスタックに保持される型に対して配置することができます(トレイトについては第10章でもっと詳しく話します)。型が Copy トレイトに適合していれば、代入後も古い変数が使用可能になります。コンパイラは、型やその一部でも Drop トレイトを実装している場合、Copy トレイトによる注釈をさせてくれません。型の値がスコープを外れた時に何か特別なことを起こす必要がある場合に、Copy 注釈を追加すると、コンパイル

エラーが出ます。型に Copy 注釈をつける方法について学ぶには、付録 C の「導出可能なトレイト」をご覧ください。

では、どの型が Copy なのでしょう？ ある型について、ドキュメントをチェックすればいいのですが、一般規則として、単純なスカラー値の集合は何でも Copy であり、メモリ確保が必要だったり、何らかの形態のリソースだったりするものは Copy ではありません。ここに Copy の型の一部を並べておきます。

- あらゆる整数型。u32 など。
- 論理値型である bool。true と false という値がある。
- あらゆる浮動小数点型、f64 など。
- 文字型である char。
- タプル。ただ、Copy の型だけを含む場合。例えば、(i32, i32) は Copy だが、(i32, String) は違う。

4.1.6 所有権と関数

意味論的に、関数に値を渡すことと、値を変数に代入することは似ています。関数に変数を渡すと、代入のようにムーブやコピーされます。リスト 4-3 は変数がスコープに入ったり、抜けたりする地点について注釈してある例です。

ファイル名: src/main.rs

```
fn main() {  
    let s = String::from("hello"); // sがスコープに入る  
  
    takes_ownership(s);             // sの値が関数にムーブされ...  
                                    // ... ここではもう有効ではない  
  
    let x = 5;                       // xがスコープに入る  
  
    makes_copy(x);                  // xも関数にムーブされるが、  
                                    // i32はCopyなので、この後にxを使っても  
                                    // 大丈夫  
  
} // ここでxがスコープを抜け、sもスコープを抜ける。ただし、sの値はムーブされてい  
  // るので、何も特別なことは起こらない。  
  
fn takes_ownership(some_string: String) { // some_stringがスコープに入る。  
    println!("{}", some_string);  
} // ここでsome_stringがスコープを抜け、`drop`が呼ばれる。後ろ盾してたメモリが解  
  // 放される。  
  
fn makes_copy(some_integer: i32) { // some_integerがスコープに入る
```

```
println!("{}", some_integer);
} // ここでsome_integerがスコープを抜ける。何も特別なことはない。
```

リスト 4-3: 所有権とスコープが注釈された関数群

`takes_ownership` の呼び出し後に `s` を呼び出そうとすると、コンパイラは、コンパイルエラーを投げるでしょう。これらの静的チェックにより、ミス犯さないでいられます。`s` や `x` を使用するコードを `main` に追加してみて、どこで使えて、そして、所有権規則により、どこで使えないかを確認してください。

4.1.7 戻り値とスコープ

値を返すことでも、所有権は移動します。リスト 4-4 は、リスト 4-3 と似た注釈のついた例です。

ファイル名: `src/main.rs`

```
fn main() {
    let s1 = gives_ownership();           // gives_ownershipは、戻り値をs1に
                                         // ムーブする

    let s2 = String::from("hello");      // s2がスコープに入る

    let s3 = takes_and_gives_back(s2);   // s2はtakes_and_gives_backにムーブされ
                                         // 戻り値もs3にムーブされる
} // ここで、s3はスコープを抜け、ドロップされる。s2もスコープを抜けるが、ムーブ
   // されているので、
   // 何も起きない。s1もスコープを抜け、ドロップされる。

fn gives_ownership() -> String {        // gives_ownershipは、戻り値を
                                         // 呼び出した関数にムーブする

    let some_string = String::from("hello"); // some_stringがスコープに入る

    some_string                           // some_stringが返され、呼び出し元
    関数に                                // ムーブされる

}

// takes_and_gives_backは、Stringを一つ受け取り、返す。
fn takes_and_gives_back(a_string: String) -> String { // a_stringがスコープに入る。

    a_string // a_stringが返され、呼び出し元関数にムーブされる

}
```

リスト 4-4: 戻り値の所有権を移動する

変数の所有権は、毎回同じパターンを辿っています: 別の変数に値を代入すると、ムーブされます。

ヒープにデータを含む変数がスコープを抜けると、データが別の変数に所有されるようムーブされていき、drop により片付けられるでしょう。

所有権を取り、またその所有権を戻す、ということを全ての関数でしていたら、ちょっとめんどくさいですね。関数に値は使わせるものの所有権を取らないようにさせるにはどうすべきでしょうか。返したいと思うかもしれない関数本体で発生したあらゆるデータとともに、再利用したかったら、渡されたものをまた返さなきゃいけないのは、非常に煩わしいことです。

タプルで、複数の値を返すことは可能です。リスト 4-5 のようにですね。

ファイル名: src/main.rs

```
fn main() {
    let s1 = String::from("hello");

    let (s2, len) = calculate_length(s1);

    // '{}' の長さは、{} です
    println!("The length of '{}' is {}.", s2, len);
}

fn calculate_length(s: String) -> (String, usize) {
    let length = s.len(); // len() メソッドは、String の長さを返します

    (s, length)
}
```

リスト 4-5: 引数の所有権を返す

でも、これでは、大袈裟すぎますし、ありふれているはずの概念に対して、作業量が多すぎます。私たちににとって幸運なことに、Rust にはこの概念に対する機能があり、**参照**と呼ばれます。

4.2 参照と借用

リスト 4-5 のタプルコードの問題は、String 型を呼び出し元の関数に戻さないと、calculate_length を呼び出した後に、String オブジェクトが使えなくなることであり、これは String オブジェクトが calculate_length にムーブされてしまうためでした。

ここで、値の所有権をもらう代わりに引数としてオブジェクトへの参照を取る calculate_length 関数を定義し、使う方法を見てみましょう：

ファイル名: src/main.rs

```
fn main() {
    let s1 = String::from("hello");

    let len = calculate_length(&s1);
}
```

```
// '{}'の長さは、{}です
println!("The length of '{}' is {}.", s1, len);
}

fn calculate_length(s: &String) -> usize {
    s.len()
}
```

まず、変数宣言と関数の戻り値にあったタプルコードは全てなくなったことに気付いてください。2 番目に、&s1 を calculate_length に渡し、その定義では、String 型ではなく、&String を受け取っていることに注目してください。

これらのアンド記号が参照であり、これのおかげで所有権をもらうことなく値を参照することができます。図 4-5 はその図解です。



図 4-5: String s1 を指す &String s の図表

注釈: & による参照の逆は、**参照外し**であり、参照外し演算子の `*` で達成できます。第 8 章で参照外し演算子の使用例を眺め、第 15 章で参照外しについて詳しく議論します。

この関数呼び出しについて、もっと詳しく見てみましょう:

```
# fn calculate_length(s: &String) -> usize {
#     s.len()
# }
let s1 = String::from("hello");

let len = calculate_length(&s1);
```

この &s1 という記法により、s1 の値を**参照する参照**を生成することができますが、これを所有することはありません。所有していないということは、指している値は、参照がスコープを抜けてもドロップ

プされないということです。

同様に、関数のシグニチャでも、&を使用して引数 `s` の型が参照であることを示しています。説明的な注釈を加えてみましょう：

```
fn calculate_length(s: &String) -> usize { // sはStringへの参照
    s.len()
} // ここで、sはスコープ外になる。けど、参照しているものの所有権を持っているわけではないので
// 何も起こらない
```

変数 `s` が有効なスコープは、あらゆる関数の引数のものと同じですが、所有権はないので、`s` がスコープを抜けても、参照が指しているものをドロップすることはありません。関数が実際の値の代わりに参照を引数に取ると、所有権をもらわないので、所有権を返す目的で値を返す必要はありません。

関数の引数に参照を取ること**を借用**と呼びます。現実生活のように、誰かが何かを所有していたら、それを借りることができます。用が済んだら、返さなきゃいけないわけです。

では、借用した何かを変更しようとしたら、どうなるのでしょうか？ リスト 4-6 のコードを試してください。ネタバレ注意: 動きません！

ファイル名: `src/main.rs`

```
fn main() {
    let s = String::from("hello");

    change(&s);
}

fn change(some_string: &String) {
    some_string.push_str(", world");
}
```

リスト 4-6: 借用した値を変更しようと試みる

これがエラーです：

```
error[E0596]: cannot borrow immutable borrowed content `*some_string` as mutable
(エラー： 不変な借用をした中身`*some_string`を可変で借用できません)
--> error.rs:8:5
  |
7 | fn change(some_string: &String) {
  |             ----- use `&mut String` here to make mutable
8 |     some_string.push_str(", world");
  |     ^^^^^^^^^^^^^^^ cannot borrow as mutable
```

変数が標準で不変なのと全く同様に、参照も不変なのです。参照している何かを変更することは叶わないわけです。


```
error: aborting due to previous error

For more information about this error, try `rustc --explain E0499`.
error: could not compile `ownership`

To learn more, run the command again with --verbose.
```

この制約は、可変性を許可するものの、それを非常に統制の取れた形で行えます。これは、新たな Rustacean にとっては、壁です。なぜなら、多くの言語では、いつでも好きな時に可変性できるからです。

この制約がある利点は、コンパイラがコンパイル時にデータ競合を防ぐことができる点です。データ競合とは、競合条件と類似していて、これら3つの振る舞いが起きる時に発生します：

- 2つ以上のポインタが同じデータに同時にアクセスする。
- 少なくとも一つのポインタがデータに書き込みを行っている。
- データへのアクセスを同期する機構が使用されていない。

データ競合は未定義の振る舞いを引き起こし、実行時に追いかけてやむを得ず特定し解決するのが難しい問題です。しかし、Rust は、データ競合が起こるコードをコンパイルさえしないので、この問題が発生しないようにしてくれるわけです。

いつものように、波かっこを使って新しいスコープを生成し、**同時並行**なものではなく、複数の可変な参照を作ることができます。

```
let mut s = String::from("hello");

{
    let r1 = &mut s;

} // r1はここでスコープを抜けるので、問題なく新しい参照を作ることができる

let r2 = &mut s;
```

可変と不変な参照を組み合わせることにしても、似たような規則が存在しています。このコードはエラーになります：

```
let mut s = String::from("hello");

let r1 = &s; // 問題なし
let r2 = &s; // 問題なし
let r3 = &mut s; // 大問題！
```

これがエラーです：

```
error[E0502]: cannot borrow `s` as mutable because it is also borrowed as
immutable
(エラー: `s` は不変で借用されているので、可変で借用できません)
```

```

--> borrow_thrice.rs:6:19
|
4 |     let r1 = &s; // no problem
|               - immutable borrow occurs here
5 |     let r2 = &s; // no problem
6 |     let r3 = &mut s; // BIG PROBLEM
|               ^ mutable borrow occurs here
7 | }
| - immutable borrow ends here

```

ふう！さらに不変な参照をしている間は、可変な参照をすることはできません。不変参照の使用者は、それ以降に値が突然変わるなんて予想してません！しかしながら、複数の不変参照をすることは可能です。データを読み込んでいるだけの人に、他人がデータを読み込むことに対して影響を与える能力はないからです。

これらのエラーは、時としてイライラするものではありませんが、Rust コンパイラがバグの可能性を早期に指摘してくれ（それも実行時ではなくコンパイル時に）、問題の発生箇所をズバリ示してくれるのだと覚えておいてください。そうして想定通りにデータが変わらない理由を追いかける必要がなくなります。

4.2.2 宙に浮いた参照

ポインタのある言語では、誤ってダングリングポインタを生成してしまいやすいです。ダングリングポインタとは、他人に渡されてしまった可能性のあるメモリを指すポインタのことであり、その箇所へのポインタを保持している間に、メモリを解放してしまうことで発生します。対照的に Rust では、コンパイラが、参照がダングリング参照に絶対ならないよう保証してくれます：つまり、何らかのデータへの参照があったら、コンパイラは参照がスコープを抜けるまで、データがスコープを抜けることがないように確認してくれるわけです。

ダングリング参照作りを試してみますが、コンパイラはこれをコンパイルエラーで阻止します：

ファイル名: src/main.rs

```

fn main() {
    let reference_to_nothing = dangle();
}

fn dangle() -> &String {
    let s = String::from("hello");

    &s
}

```

こちらがエラーです：

```
error[E0106]: missing lifetime specifier
```

```
(エラー: ライフタイム指定子がありません)
--> main.rs:5:16
|
5 | fn dangle() -> &String {
|               ^ expected lifetime parameter
= help: this function's return type contains a borrowed value, but there is no
value for it to be borrowed from
(助言: この関数の戻り値型は、借用した値を含んでいますが、借用される値がどこ
にもありません)
= help: consider giving it a 'static lifetime
('staticライフタイムを与えることを考慮してみてください)
```

このエラーメッセージは、まだ講義していない機能について触れています: **ライフタイム**です。ライフタイムについては第10章で詳しく議論しますが、ライフタイムに関する部分を無視すれば、このメッセージは、確かにこのコードが問題になる理由に関する鍵を握っています:

```
this function's return type contains a borrowed value, but there is no value
for it to be borrowed from.
```

dangle コードの各段階で一体何が起きているのかを詳しく見ていきましょう:

ファイル名: src/main.rs

```
fn dangle() -> &String { // dangleはStringへの参照を返す

    let s = String::from("hello"); // sは新しいString

    &s // String sへの参照を返す
} // ここで、sはスコープを抜け、ドロップされる。そのメモリは消される。
// 危険だ
```

s は、dangle 内で生成されているので、dangle のコードが終わったら、s は解放されてしまいますが、そこへの参照を返そうとしました。つまり、この参照は無効な String を指していると思われるのです。よくないことです! コンパイラは、これを阻止してくれるのです。

ここでの解決策は、String を直接返すことです:

```
fn no_dangle() -> String {
    let s = String::from("hello");

    s
}
```

これは何の問題もなく動きます。所有権はムーブされ、何も解放されることはありません。

4.2.3 参照の規則

参照について議論したことを再確認しましょう：

- 任意のタイミングで、一つの変参照か不変な参照いくつでものどちらかを行える。
- 参照は常に有効でなければならない。

次は、違う種類の参照を見ていきましょう：スライスです。

4.3 スライス型

所有権のない別のデータ型は、**スライス**です。スライスにより、コレクション全体ではなく、その内の一連の要素を参照することができます。

ちょっとしたプログラミングの問題を考えてみましょう：文字列を受け取って、その文字列中の最初の単語を返す関数を書いてください。関数が文字列中に空白を見つけられなかったら、文字列全体が一つの単語に違いないので、文字列全体が返されるべきです。

この関数のシグニチャについて考えてみましょう：

```
fn first_word(s: &String) -> ?
```

この関数、`first_word` は引数に `&String` をとります。所有権はいらないので、これで十分です。ですが、何を返すべきでしょうか？ 文字列の一部について語る方法が全くありません。しかし、単語の終端の添え字を返すことができますね。リスト 4-7 に示したように、その方法を試してみましょう。

ファイル名: `src/main.rs`

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch04-understanding-ownership/listing-04-07/src/main.rs:here}}
```

リスト 4-7: `String` 引数へのバイト数で表された添え字を返す `first_word` 関数

`String` の値を要素ごとに見て、空白かどうかを確かめる必要があるので、`as_bytes` メソッドを使って、`String` オブジェクトをバイト配列に変換しています。

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch04-understanding-ownership/listing-04-07/src/main.rs:as_bytes}}
```

次に、そのバイト配列に対して、`iter` メソッドを使用してイテレータを生成しています：

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch04-understanding-ownership/listing-04-07/src/main.rs:iter}}
```

イテレータについて詳しくは、第13章で議論します。今は、`iter` は、コレクション内の各要素を返すメソッドであること、`enumerate` が `iter` の結果をラップして、(結果をそのまま返す) 代わりにタブルの一部として各要素を返すことを知っておいてください。`enumerate` から返ってくるタブルの第1要素は、添え字であり、2番目の要素は、(コレクションの) 要素への参照になります。これは、手動で添え字を計算するよりも少しだけ便利です。

`enumerate` メソッドがタブルを返すので、**Rust** のあらゆる場所同様、パターンを使って、そのタブルを分配できます。従って、`for` ループ内で、タブルの添え字に対する `i` とタブルの1バイトに対応する `&item` を含むパターンを指定しています。`.iter().enumerate()` から要素への参照を取得するので、パターンに `&` を使っています。

`for` ループ内で、バイトリテラル表記を使用して空白を表すバイトを検索しています。空白が見つかったら、その位置を返します。それ以外の場合、`s.len()` を使って文字列の長さを返します。

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch04-understanding-ownership/listing-04-07/src/main.rs:inside_for}}
```

さて、文字列内の最初の単語の終端の添え字を見つけ出せるようになりましたが、問題があります。`usize` 型を単独で返していますが、これは `&String` の文脈でのみ意味を持つ数値です。言い換えると、`String` から切り離された値なので、将来的にも有効である保証がないのです。リスト4-7の `first_word` 関数を使用するリスト4-8のプログラムを考えてください。

ファイル名: `src/main.rs`

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch04-understanding-ownership/listing-04-08/src/main.rs:here}}
```

リスト4-8: `first_word` 関数の呼び出し結果を保持し、`String` の中身を変更する

このプログラムは何のエラーもなくコンパイルが通り、`word` を `s.clear()` の呼び出し後に使用しても、コンパイルが通ります。`word` は `s` の状態に全く関連づけられていないので、その中身はまだ値5のままです。その値5を変数 `s` に使用し、最初の単語を取り出そうとすることはできますが、これはバグでしょう。というのも、`s` の中身は、5を `word` に保存した後変わってしまったからです。

`word` 内の添え字が `s` に格納されたデータと同期されなくなるのを心配することは、面倒ですし間違いになりやすいです！ これらの添え字の管理は、`second_word` 関数を書いたら、さらに難しくなります。そのシグニチャは以下になるはずです：

```
fn second_word(s: &String) -> (usize, usize) {
```

今、私たちは開始と終端の添え字を追うようになりました。特定の状態のデータから計算されたが、その状態に全く紐付けられていない値がさらに増えました。いつの間にか変わってしまうので、同期を取る必要のある、関連性のない変数が3つになってしまいました。

運のいいことに、Rust にはこの問題への解決策が用意されています: 文字列スライスです。

4.3.1 文字列スライス

文字列スライスとは、String の一部への参照で、こんな見た目をしています:

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch04-understanding-ownership/no-listing-17-slice/
src/main.rs:here}}
```

これは、String 全体への参照を取ることに似ていますが、余計な `[0..5]` という部分が付いています。String 全体への参照ではなく、String の一部への参照です。

`[starting_index..ending_index]` と指定することで、角かっこに範囲を使い、スライスを生成できます。ここで、`starting_index` はスライスの最初の位置、`ending_index` はスライスの終端位置よりも、1 大きい値です。内部的には、スライスデータ構造は、開始地点とスライスの長さを保持しており、スライスの長さは `ending_index` から `starting_index` を引いたものに対応します。以上より、`let world = &s[6..11];` の場合には、`world` は `s` の添え字 6 のバイトへのポインタと 5 という長さを持つスライスになるでしょう。

図 4-6 は、これを図解しています。

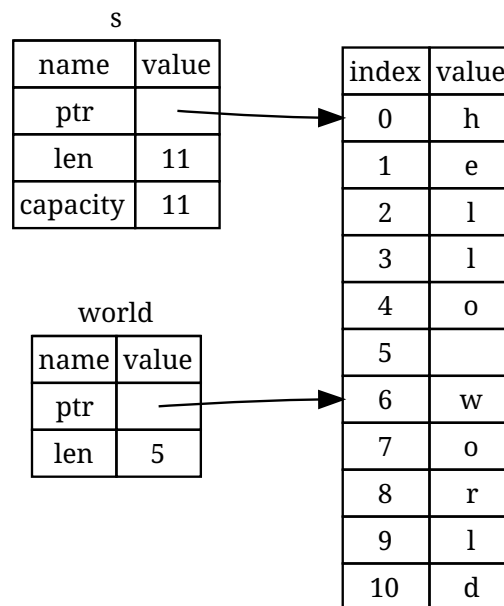


図 4-6: String オブジェクトの一部を参照する文字列スライス

Rust の `..` という範囲記法で、最初の番号 (ゼロ) から始めたければ、2 連ピリオドの前に値を書かなければいいです。換言すれば、これらは等価です:

```
let s = String::from("hello");

let slice = &s[0..2];
let slice = &s[..2];
```

同様の意味で、String の最後のバイトをスライスが含むのならば、末尾の数値を書かなければいいです。つまり、これらは等価になります:

```
let s = String::from("hello");

let len = s.len();

let slice = &s[3..len];
let slice = &s[3..];
```

さらに、両方の値を省略すると、文字列全体のスライスを得られます。故に、これらは等価です:

```
let s = String::from("hello");

let len = s.len();

let slice = &s[0..len];
let slice = &s[..];
```

注釈: 文字列スライスの範囲添え字は、有効な UTF-8 文字境界に置かなければなりません。マルチバイト文字の真ん中で文字列スライスを生成しようとしたら、エラーでプログラムは落ちるでしょう。この節では文字列スライスを導入することが目的なので、ASCII のみを想定しています; UTF-8 に関するより徹底した議論は、第8章の「文字列で UTF-8 エンコードされたテキストを格納する」節で行います。

これらの情報を念頭に、first_word を書き直してスライスを返すようにしましょう。文字列スライスを意味する型は、&str と記述します:

ファイル名: src/main.rs

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch04-understanding-ownership/no-listing-18-first-
word-slice/src/main.rs:here}}
```

リスト 4-7 で取った方法と同じように、最初の空白を探すことで単語の終端の添え字を取得しています。空白を発見したら、文字列の最初を開始地点、空白の添え字を終了地点として使用して文字列スライスを返しています。

これで、first_word を呼び出すと、元のデータに紐付けられた単独の値を得られるようになりました。この値は、スライスの開始地点への参照とスライス中の要素数から構成されています。

second_word 関数についても、スライスを返すことでうまくいくでしょう：

```
fn second_word(s: &String) -> &str {
```

これで、ずっと混乱しにくい素直な API になりました。なぜなら、String への参照が有効なままであることをコンパイラが、保証してくれるからです。最初の単語の終端添え字を得た時に、文字列を空っぽにして先ほどの添え字が無効になってしまったリスト 4-8 のプログラムのバグを覚えていますか？ そのコードは、論理的に正しくないのですが、即座にエラーにはなりませんでした。問題は後になってから発生し、それは空の文字列に対して、最初の単語の添え字を使用し続けようとした時でした。スライスならこんなバグはあり得ず、コードに問題があるなら、もっと迅速に判明します。スライスバージョンの first_word を使用すると、コンパイルエラーが発生します：

ファイル名: src/main.rs

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch04-understanding-ownership/no-listing-19-slice-error/src/main.rs:here}}
```

こちらがコンパイルエラーです：

```
{{#include ../listings/ch04-understanding-ownership/no-listing-19-slice-error/output.txt}}
```

借用規則から、何かへの不変な参照がある時、さらに可変な参照を得ることはできないことを思い出してください。clear は String を切り詰める必要があるので、可変な参照を得る必要があります。Rust はこれを認めないので、コンパイルが失敗します。Rust のおかげで API が使いやすくなるだけでなく、ある種のエラー全てを完全にコンパイル時に排除してくれるのです！

4.3.1.1 文字列リテラルはスライスである

文字列は、バイナリに埋め込まれると話したことを思い出してください。今やスライスのことを知ったので、文字列リテラルを正しく理解することができます。

```
let s = "Hello, world!";
```

ここでの s の型は、&str です：バイナリのその特定の位置を指すスライスです。これは、文字列が不変である理由にもなっています。要するに、&str は不変な参照なのです。

4.3.1.2 引数としての文字列スライス

リテラルや String 値のスライスを得ることができると知ると、first_word に対して、もう一つ改善点を見出すことができます。シグニチャです：

```
fn first_word(s: &String) -> &str {
```


もっと経験を積んだ Rustacean なら、代わりにリスト 4-9 のようなシグニチャを書くでしょう。というのも、こうすると、同じ関数を `&String` 値と `&str` 値両方に使えるようになるからです。

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch04-understanding-ownership/listing-04-09/src/  
main.rs:here}}
```

リスト 4-9: `s` 引数の型に文字列スライスを使用して `first_word` 関数を改善する

もし、文字列スライスがあるなら、それを直接渡せます。`String` があるなら、その `String` 全体のスライスを渡せます。`String` への参照の代わりに文字列スライスを取るよう関数を定義すると、何も機能を失うことなく API をより一般的で有益なものにできるのです。

Filename: `src/main.rs`

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch04-understanding-ownership/listing-04-09/src/  
main.rs:usage}}
```

4.3.2 他のスライス

文字列リテラルは、ご想像通り、文字列に特化したものです。ですが、もっと一般的なスライス型も存在します。この配列を考えてください:

```
let a = [1, 2, 3, 4, 5];
```

文字列の一部を参照したくなる可能性があるのと同様、配列の一部を参照したくなる可能性もあります。以下のようにすれば、参照することができます:

```
let a = [1, 2, 3, 4, 5];  
  
let slice = &a[1..3];
```

このスライスは、`&[i32]` という型になります。これも文字列スライスと同じように動作します。つまり、最初の要素への参照と長さを保持するのです。この種のスライスは、他のすべての種類のコレクションに対して使用することになるでしょう。それらのコレクションについて、詳しくは、第8章でベクタについて話すときに議論します。

4.4 まとめ

所有権、借用、スライスの概念は、Rust プログラムにおいて、コンパイル時にメモリ安全性を保証します。Rust 言語も他のシステムプログラミング言語と同じように、メモリの使用法について制御

させてくれるわけですが、データの所有者がスコープを抜けたときに、所有者に自動的にデータを片付けさせることは、この制御をするために、余計なコードを書いたりデバッグしたりする必要がないことを意味します。

所有権は、Rust の他のいろんな部分が動作する方法に影響を与えるので、これ以降もこれらの概念についてさらに語っていく予定です。第 5 章に移って、`struct` でデータをグループ化することについて見ていきましょう。

第 5 章

構造体を使用して関係のあるデータを構造化する

struct または、**構造体**は、意味のあるグループを形成する複数の関連した値をまとめ、名前付けできる独自のデータ型です。あなたがオブジェクト指向言語に造詣が深いなら、**struct** はオブジェクトのデータ属性みたいなものです。この章では、タプルと構造体を対照的に比較し、構造体の使用法をデモし、メソッドや関連関数を定義して、構造体のデータに紐付く振る舞いを指定する方法について議論します。構造体と **enum**(第 6 章で議論します) は、自分のプログラム領域で新しい型を定義し、Rust のコンパイル時型精査機能をフル活用する構成要素になります。

5.1 構造体を定義し、インスタンス化する

構造体は第 3 章で議論したタプルと似ています。タプル同様、構造体の一部を異なる型にできます。一方タプルとは違って、各データ片には名前をつけるので、値の意味が明確になります。この名前のおかげで、構造体はタプルに比して、より柔軟になるわけです：データの順番に頼って、インスタンスの値を指定したり、アクセスしたりする必要がないのです。

構造体の定義は、`struct` キーワードを入れ、構造体全体に名前を付けます。構造体名は、一つにグループ化されるデータ片の意義を表すものであるべきです。そして、波かっこ内に、データ片の名前と型を定義し、これは**フィールド**と呼ばれます。例えば、リスト 5-1 では、ユーザアカウントに関する情報を保持する構造体を示しています。

```
struct User {  
    username: String,  
    email: String,  
    sign_in_count: u64,  
    active: bool,  
}
```

リスト 5-1: User 構造体定義

構造体を定義した後に使用するには、各フィールドに対して具体的な値を指定して構造体の**インスタンス**を生成します。インスタンスは、構造体名を記述し、key: value ペアを含む波かっこを付け加えることで生成します。ここで、キーはフィールド名、値はそのフィールドに格納したいデータになります。フィールドは、構造体で宣言した通りの順番に指定する必要はありません。換言すると、構造体定義とは、型に対する一般的な雛形のようなものであり、インスタンスは、その雛形を特定のデータで埋め、その型の値を生成するわけです。例えば、リスト 5-2 で示されたように特定のユーザを宣言することができます。

```
# struct User {
#     username: String,
#     email: String,
#     sign_in_count: u64,
#     active: bool,
# }
#
let user1 = User {
    email: String::from("someone@example.com"),
    username: String::from("someusername123"),
    active: true,
    sign_in_count: 1,
};
```

リスト 5-2: User 構造体のインスタンスを生成する

構造体から特定の値を得るには、ドット記法が使えます。このユーザの E メールアドレスだけが欲しいなら、この値を使いたかった場所全部で `user1.email` が使えます。インスタンスが可変であれば、ドット記法を使い特定のフィールドに代入することで値を変更できます。リスト 5-3 では、可変な User インスタンスの email フィールド値を変更する方法を示しています。

```
# struct User {
#     username: String,
#     email: String,
#     sign_in_count: u64,
#     active: bool,
# }
#
let mut user1 = User {
    email: String::from("someone@example.com"),
    username: String::from("someusername123"),
    active: true,
    sign_in_count: 1,
};

user1.email = String::from("anotheremail@example.com");
```

リスト 5-3: ある User インスタンスの email フィールド値を変更する

インスタンス全体が可変でなければならないことに注意してください; Rust では、一部のフィールドのみを可変にすることはできないのです。また、あらゆる式同様、構造体の新規インスタンスを関数本体の最後の式として生成して、そのインスタンスを返すことを暗示できます。

リスト 5-4 は、与えられた email と username で User インスタンスを生成する build_user 関数を示しています。active フィールドには true 値が入り、sign_in_count には値 1 が入ります。

```
# struct User {
#     username: String,
#     email: String,
#     sign_in_count: u64,
#     active: bool,
# }
#
fn build_user(email: String, username: String) -> User {
    User {
        email: email,
        username: username,
        active: true,
        sign_in_count: 1,
    }
}
```

リスト 5-4: E メールとユーザ名を取り、User インスタンスを返す build_user 関数

構造体のフィールドと同じ名前を関数の引数にもつけることは筋が通っていますが、email と username というフィールド名と変数を繰り返さなきゃいけないのは、ちょっと面倒です。構造体にもっとフィールドがあれば、名前を繰り返すことはさらに煩わしくなるでしょう。幸運なことに、便利な省略記法があります！

5.1.1 フィールドと変数が同名の時にフィールド初期化省略記法を使う

仮引数名と構造体のフィールド名がリスト 5-4 では、全く一緒なので、フィールド初期化省略記法を使って build_user を書き換えても、振る舞いは全く同じにしつつ、リスト 5-5 に示したように email と username を繰り返さなくてもよくなります。

```
# struct User {
#     username: String,
#     email: String,
#     sign_in_count: u64,
#     active: bool,
# }
#
fn build_user(email: String, username: String) -> User {
    User {

```

```
        email,  
        username,  
        active: true,  
        sign_in_count: 1,  
    }  
}
```

リスト 5-5: email と username 引数が構造体のフィールドと同名なので、フィールド初期化省略法を使用する build_user 関数

ここで、email というフィールドを持つ User 構造体の新規インスタンスを生成しています。email フィールドを build_user 関数の email 引数の値にセットしたいわけです。email フィールドと email 引数は同じ名前なので、email: email と書くのではなく、email と書くだけで済むのです。

5.1.2 構造体更新記法で他のインスタンスからインスタンスを生成する

多くは前のインスタンスの値を使用しつつ、変更する箇所もある形で新しいインスタンスを生成できるとしばしば有用です。**構造体更新記法**でそうすることができます。

まず、リスト 5-6 では、更新記法なしで user2 に新しい User インスタンスを生成する方法を示しています。email と username には新しい値をセットしていますが、それ以外にはリスト 5-2 で生成した user1 の値を使用しています。

```
# struct User {  
#     username: String,  
#     email: String,  
#     sign_in_count: u64,  
#     active: bool,  
# }  
#  
# let user1 = User {  
#     email: String::from("someone@example.com"),  
#     username: String::from("someusername123"),  
#     active: true,  
#     sign_in_count: 1,  
# };  
#  
let user2 = User {  
    email: String::from("another@example.com"),  
    username: String::from("anotherusername567"),  
    active: user1.active,  
    sign_in_count: user1.sign_in_count,  
};
```

リスト 5-6: user1 の一部の値を使用しつつ、新しい User インスタンスを生成する

構造体更新記法を使用すると、リスト 5-7 に示したように、コード量を減らしつつ、同じ効果を達

成できます。..`..`という記法により、明示的にセットされていない残りのフィールドが、与えられたインスタンスのフィールドと同じ値になるように指定します。

```
# struct User {
#     username: String,
#     email: String,
#     sign_in_count: u64,
#     active: bool,
# }
#
# let user1 = User {
#     email: String::from("someone@example.com"),
#     username: String::from("someusername123"),
#     active: true,
#     sign_in_count: 1,
# };
#
let user2 = User {
    email: String::from("another@example.com"),
    username: String::from("anotherusername567"),
    ..user1
};
```

リスト 5-7: 構造体更新記法を使用して、新しい `User` インスタンス用の値に新しい `email` と `username` をセットしつつ、残りの値は、`user1` 変数のフィールド値を使う

リスト 5-7 のコードも、`email` と `username` については異なる値、`active` と `sign_in_count` フィールドについては、`user1` と同じ値になるインスタンスを `user2` に生成します。

5.1.3 異なる型を生成する名前付きフィールドのないタプル構造体を使用する

構造体名により追加の意味を含むものの、フィールドに紐づけられた名前がなく、むしろフィールドの型だけの**タプル構造体**と呼ばれる、タプルに似た構造体を定義することもできます。タプル構造体は、構造体名が提供する追加の意味は含むものの、フィールドに紐付けられた名前はありません; むしろ、フィールドの型だけが存在します。タプル構造体は、タプル全体に名前をつけ、そのタプルを他のタプルとは異なる型にしたい場合に有用ですが、普通の構造体のように各フィールド名を与えるのは、冗長、または余計になるでしょう。

タプル構造体を定義するには、`struct` キーワードの後に構造体名、さらにタプルに含まれる型を続けます。例えば、こちらは、`Color` と `Point` という 2 種類のタプル構造体の定義と用法です:

```
struct Color(i32, i32, i32);
struct Point(i32, i32, i32);

let black = Color(0, 0, 0);
let origin = Point(0, 0, 0);
```

`black` と `origin` の値は、違う型であることに注目してください。これらは、異なるタプル構造体のインスタンスだからですね。定義された各構造体は、構造体内のフィールドが同じ型であっても、それ自身が独自の型になります。例えば、`Color` 型を引数に取る関数は、`Point` を引数に取ることはできません。たとえ、両者の型が、3 つの `i32` 値からできていてもです。それ以外については、タプル構造体のインスタンスは、タプルと同じように振る舞います: 分配して個々の部品にしたり、`.` と添え字を使用して個々の値にアクセスするなどです。

5.1.4 フィールドのないユニット様 (よう) 構造体

また、一切フィールドのない構造体を定義することもできます! これらは、`()`、ユニット型と似たような振る舞いをすることから、**ユニット様構造体**と呼ばれます。ユニット様構造体は、ある型にトレイトを実装するけれども、型自体に保持させるデータは一切ない場面に有効になります。トレイトについては第 10 章で議論します。

5.1.5 構造体データの所有権

リスト 5-1 の `User` 構造体定義において、`&str` 文字列スライス型ではなく、所有権のある `String` 型を使用しました。これは意図的な選択です。というのも、この構造体のインスタンスには全データを所有してもらう必要があり、このデータは、構造体全体が有効な間はずっと有効である必要があるのです。

構造体に、他の何かに所有されたデータへの参照を保持させることもできますが、そうするには**ライフタイム**という第 10 章で議論する `Rust` の機能を使用しなければなりません。ライフタイムのおかげで構造体に参照されたデータが、構造体自体が有効な間、ずっと有効であることを保証してくれるのです。ライフタイムを指定せずに構造体に参照を保持させようとしたとしましょう。以下の通りですが、これは動きません:

ファイル名: `src/main.rs`

```
struct User {
    username: &str,
    email: &str,
    sign_in_count: u64,
    active: bool,
}

fn main() {
    let user1 = User {
        email: "someone@example.com",
        username: "someusername123",
        active: true,
        sign_in_count: 1,
    };
}
```



```
}

```

コンパイラは、ライフタイム指定子が必要だと怒るでしょう：

```
error[E0106]: missing lifetime specifier
(エラー: ライフタイム指定子がありません)
-->
|
2 |     username: &str,
|               ^ expected lifetime parameter
               (ライフタイム引数を予期しました)

error[E0106]: missing lifetime specifier
-->
|
3 |     email: &str,
|           ^ expected lifetime parameter

```

第 10 章で、これらのエラーを解消して構造体に参照を保持する方法について議論しますが、当面、今回のようなエラーは、`&str` のような参照の代わりに、`String` のような所有された型を使うことで修正します。

5.2 構造体を使ったプログラム例

構造体を使用したくなる可能性のあるケースを理解するために、長方形の面積を求めるプログラムを書きましょう。単一の変数から始め、代わりに構造体を使うようにプログラムをリファクタリングします。

Cargo で **rectangles** という新規バイナリプロジェクトを作成しましょう。このプロジェクトは、長方形の幅と高さをピクセルで指定し、その面積を求めます。リスト 5-8 に、プロジェクトの **src/main.rs** で、正にそうする一例を短いプログラムとして示しました。

ファイル名: `src/main.rs`

```
fn main() {
    let width1 = 30;
    let height1 = 50;

    println!(
        // 長方形の面積は、{} 平方ピクセルです
        "The area of the rectangle is {} square pixels.",
        area(width1, height1)
    );
}

fn area(width: u32, height: u32) -> u32 {
    width * height
}
```

```
}
```

リスト 5-8: 個別の幅と高さ変数を指定して長方形の面積を求める

では、`cargo run` でこのプログラムを走らせてください:

```
The area of the rectangle is 1500 square pixels.  
(長方形の面積は、1500平方ピクセルです)
```

5.2.1 タプルでリファクタリングする

リスト 5-8 のコードはうまく動き、各寸法を与えて `area` 関数を呼び出すことで長方形の面積を割り出しますが、改善点があります。幅と高さは、組み合わせると一つの長方形を表すので、相互に関係があるわけです。

このコードの問題点は、`area` のシグニチャから明らかです:

```
fn area(width: u32, height: u32) -> u32 {
```

`area` 関数は、1 長方形の面積を求めるものと考えられますが、今書いた関数には、引数が 2 つあります。引数は関連性があるのに、このプログラム内のどこにもそのことは表現されていません。幅と高さを一緒にグループ化する方が、より読みやすく、扱いやすくなるでしょう。それをする一つの方法については、第 3 章の「タプル型」節ですでに議論しました: タプルを使うのです。

5.2.2 タプルでリファクタリングする

リスト 5-9 は、タプルを使う別バージョンのプログラムを示しています。

ファイル名: `src/main.rs`

```
fn main() {  
    let rect1 = (30, 50);  
  
    println!(  
        "The area of the rectangle is {} square pixels.",  
        area(rect1)  
    );  
}  
  
fn area(dimensions: (u32, u32)) -> u32 {  
    dimensions.0 * dimensions.1  
}
```

リスト 5-9: タプルで長方形の幅と高さを指定する

ある意味では、このプログラムはマシです。タプルのおかげで少し構造的になり、一引数を渡すだけになりました。しかし別の意味では、このバージョンは明確性を失っています: タプルは要素に名前を付けないので、計算が不明瞭になったのです。なぜなら、タプルの一部に添え字アクセスする必要があるからです。

面積計算で幅と高さを混在させるのなら問題はないのですが、長方形を画面に描画したいとなると、問題になるのです! タプルの添え字 0 が幅で、添え字 1 が高さであることを肝に銘じておかなければなりません。他人がこのコードをいじることになったら、このことを割り出し、同様に肝に銘じなければならいでしょう。容易く、このことを忘れたり、これらの値を混ぜこぜにしたりしてエラーを発生させてしまうでしょう。データの意味をコードに載せていないからです。

5.2.3 構造体でリファクタリングする: より意味付けする

データのラベル付けで意味を付与するために構造体を使います。現在使用しているタプルを全体と一部に名前のあるデータ型に、変形することができます。そう、リスト 5-10 に示したように。

ファイル名: src/main.rs

```
struct Rectangle {
    width: u32,
    height: u32,
}

fn main() {
    let rect1 = Rectangle { width: 30, height: 50 };

    println!(
        "The area of the rectangle is {} square pixels.",
        area(&rect1)
    );
}

fn area(rectangle: &Rectangle) -> u32 {
    rectangle.width * rectangle.height
}
```

リスト 5-10: Rectangle 構造体を定義する

ここでは、構造体を定義し、Rectangle という名前にしています。波括弧の中で width と height というフィールドを定義し、u32 という型にしました。それから main 内で Rectangle の特定のインスタンスを生成し、幅を 30、高さを 50 にしました。

これで area 関数は引数が一つになり、この引数は名前が rectangle、型は Rectangle 構造体インスタンスへの不変借用になりました。第 4 章で触れたように、構造体の所有権を奪うよりも借用する必要があります。こうすることで main は所有権を保って、rect1 を使用し続けることができ、そのために関数シグニチャと関数呼び出し時に & を使っているわけです。

area 関数は、Rectangle インスタンスの width と height フィールドにアクセスしています。これで、area の関数シグニチャは、我々の意図をズバリ示すようになりました: width と height フィールドを使って、Rectangle の面積を計算します。これにより、幅と高さが相互に関係していることが伝わり、タプルの 0 や 1 という添え字を使うよりも、これらの値に説明的な名前を与えられるのです。プログラムの意図が明瞭になりました。

5.2.4 トレイトの導出で有用な機能を追加する

プログラムのデバッグをしている間に、Rectangle のインスタンスを出力し、フィールドの値を確認できると、素晴らしいわけです。リスト 5-11 では、以前の章のように、println! マクロを試しに使用しようとしていますが、動きません。

ファイル名: src/main.rs

```
struct Rectangle {
    width: u32,
    height: u32,
}

fn main() {
    let rect1 = Rectangle { width: 30, height: 50 };

    // rect1は{}です
    println!("rect1 is {}", rect1);
}
```

リスト 5-11: Rectangle のインスタンスを出力しようとする

このコードを走らせると、こんな感じのエラーが出ます:

```
error[E0277]: the trait bound `Rectangle: std::fmt::Display` is not satisfied
(エラー: トレイト境界`Rectangle: std::fmt::Display`が満たされていません)
```

println! マクロには、様々な整形があり、標準では、波括弧は Display として知られる整形をするよう、println! に指示するのです: 直接エンドユーザ向けの出力です。これまでに見てきた基本型は、標準で Display を実装しています。というのも、1 や他の基本型をユーザに見せる方法は一つしかないからです。しかし構造体では、println! が出力を整形する方法は自明ではなくなります。出力方法がいくつもあるからです: カンマは必要なの? 波かっこを出力する必要はある? 全フィールドが見えるべき? この曖昧性のため、Rust は必要なものを推測しようとせず、構造体には Display 実装が提供されないのです。

エラーを読み下すと、こんな有益な注意書きがあります:

```
`Rectangle` cannot be formatted with the default formatter; try using
`:?` instead if you are using a format string
```

(注釈: `Rectangle` は、デフォルト整形機では、整形できません; フォーマット文字列を使うのなら代わりに `:?` を試してみてください)

試してみましょう! `println!` マクロ呼び出しは、`println!("rect1 is {:?}", rect1);` という見た目になるでしょう。波括弧内に `:?` という指定子を書くと、`println!` に `Debug` と呼ばれる出力整形を使いたいと指示するのです。`Debug` トレイトは、開発者にとって有用な方法で構造体を出力させてくれるので、コードをデバッグしている最中に、値を確認することができます。

変更してコードを走らせてください。なに! まだエラーが出ます:

```
error[E0277]: the trait bound `Rectangle: std::fmt::Debug` is not satisfied
(エラー: トレイト境界 `Rectangle: std::fmt::Debug` が満たされていません)
```

しかし今回も、コンパイラは有益な注意書きを残してくれています:

```
`Rectangle` cannot be formatted using `:?`; if it is defined in your
crate, add `#[derive(Debug)]` or manually implement it
(注釈: `Rectangle` は `:?` を使って整形できません; 自分のクレートで定義しているのなら
`#[derive(Debug)]` を追加するか、手動で実装してください)
```

確かに Rust にはデバッグ用の情報を出力する機能が備わっていますが、この機能を構造体で使えるようにするには、明示的な選択をしなければならないのです。そうするには、構造体定義の直前に `#[derive(Debug)]` という注釈を追加します。そう、リスト 5-12 で示されている通りです。

ファイル名: `src/main.rs`

```
#[derive(Debug)]
struct Rectangle {
    width: u32,
    height: u32,
}

fn main() {
    let rect1 = Rectangle { width: 30, height: 50 };

    println!("rect1 is {:?}", rect1);
}
```

リスト 5-12: `Debug` トレイトを導出する注釈を追加し、`Rectangle` インスタンスをデバッグ用整形機で出力する

これでプログラムを実行すれば、エラーは出ず、以下のような出力が得られるでしょう:

```
rect1 is Rectangle { width: 30, height: 50 }
```

素晴らしい! 最善の出力ではないものの、このインスタンスの全フィールドの値を出力しているの

で、デバッグ中には間違いなく役に立つでしょう。より大きな構造体があるなら、もう少し読みやすい出力の方が有用です; そのような場合には、`println!` 文字列中の `{:?}` の代わりに `{:#?}` を使うことができます。この例で `{:#?}` というスタイルを使用したら、出力は以下のようになるでしょう:

```
rect1 is Rectangle {
  width: 30,
  height: 50
}
```

Rust には、`derive` 注釈で使えるトレイトが多く提供されており、独自の型に有用な振る舞いを追加することができます。そのようなトレイトとその振る舞いは、付録 C で一覧になっています。これらのトレイトを独自の動作とともに実装する方法だけでなく、独自のトレイトを生成する方法については、第 10 章で解説します。

`area` 関数は、非常に特殊です: 長方形の面積を算出するだけです。Rectangle 構造体とこの動作をより緊密に結び付けられると、役に立つでしょう。なぜなら、他のどんな型でもうまく動作しなくなるからです。`area` 関数を Rectangle 型に定義された `area` メソッドに変形することで、このコードをリファクタリングし続けられる方法について見ていきましょう。

5.3 メソッド記法

メソッドは関数に似ています: `fn` キーワードと名前宣言されるし、引数と戻り値があるし、どこか別の場所で呼び出された時に実行されるコードを含みます。ところが、メソッドは構造体の文脈(あるいは `enum` かトレイトオブジェクトの。これらについては各々第 6 章と 17 章で解説します)で定義されるという点で、関数とは異なり、最初の引数は必ず `self` になり、これはメソッドが呼び出されている構造体インスタンスを表します。

5.3.1 メソッドを定義する

Rectangle インスタンスを引数に取る `area` 関数を変え、代わりに Rectangle 構造体上に `area` メソッドを作りましょう。リスト 5-13 に示した通りですね。

ファイル名: `src/main.rs`

```
#[derive(Debug)]
struct Rectangle {
    width: u32,
    height: u32,
}

impl Rectangle {
    fn area(&self) -> u32 {
        self.width * self.height
    }
}
```

```
}

fn main() {
    let rect1 = Rectangle { width: 30, height: 50 };

    println!(
        "The area of the rectangle is {} square pixels.",
        rect1.area()
    );
}
```

リスト 5-13: Rectangle 構造体上に area メソッドを定義する

Rectangle の文脈内で関数を定義するには、`impl (implementation; 実装)` ブロックを始めます。それから `area` 関数を `impl` の波かっこ内に移動させ、最初の (今回は唯一の) 引数をシグニチャ内と本体内容全てで `self` に変えます。`area` 関数を呼び出し、`rect1` を引数として渡す `main` では、代替としてメソッド記法を使用して、Rectangle インスタンスの `area` メソッドを呼び出せます。メソッド記法は、インスタンスの後に続きます: ドット、メソッド名、かっこ、そして引数と続くわけです。

`area` のシグニチャでは、`rectangle: &Rectangle` の代わりに `&self` を使用しています。というのも、コンパイラは、このメソッドが `impl Rectangle` という文脈内に存在するために、`self` の型が `Rectangle` であると把握しているからです。`&Rectangle` と同様に、`self` の直前に `&` を使用していることに注意してください。メソッドは、`self` の所有権を奪ったり、ここでしているように不変で `self` を借用したり、可変で `self` を借用したりできるのです。他の引数と全く同じですね。

ここで `&self` を選んでいるのは、関数バージョンで `&Rectangle` を使用していたのと同様の理由です: 所有権はいらず、構造体のデータを読み込みたいだけで、書き込む必要はないわけです。メソッドの一部でメソッドを呼び出したインスタンスを変更しなかったら、第 1 引数に `&mut self` を使用するでしょう。`self` だけを第 1 引数にしてインスタンスの所有権を奪うメソッドを定義することは稀です; このテクニックは通常、メソッドが `self` を何か別のものに変形し、変形後に呼び出し元が元のインスタンスを使用できないようにしたい場合に使用されます。

関数の代替としてメソッドを使う主な利点は、メソッド記法を使用して全メソッドのシグニチャで `self` の型を繰り返す必要がなくなる以外だと、体系化です。コードの将来的な利用者に `Rectangle` の機能を提供しているライブラリ内の各所でその機能を探させるのではなく、この型のインスタンスでできることを一つの `impl` ブロックにまとめあげています。

5.3.2 -> 演算子はどこに行ったの？

C と C++ では、メソッド呼び出しには 2 種類の異なる演算子を使用されます: オブジェクトに対して直接メソッドを呼び出すのなら、`.` を使用するし、オブジェクトのポインタに対してメソッドを呼び出し、先にポインタを参照外しする必要があるなら、`->` を使用するわけです。言い換えると、`object` がポインタなら、`object->something()` は、`(*object).something()` と同

等なのです。

Rust には `->` 演算子の代わりとなるようなものではありません; その代わり、Rust には、**自動参照および参照外し**という機能があります。Rust においてメソッド呼び出しは、この動作が行われる数少ない箇所なのです。

動作方法はこうです: `object.something()` とメソッドを呼び出すと、コンパイラは `object` がメソッドのシグニチャと合致するように、自動で `&` か `&mut`、`*` を付与するのです。要するに、以下のコードは同じものです:

```
# #[derive(Debug, Copy, Clone)]
# struct Point {
#     x: f64,
#     y: f64,
# }
#
# impl Point {
#     fn distance(&self, other: &Point) -> f64 {
#         let x_squared = f64::powi(other.x - self.x, 2);
#         let y_squared = f64::powi(other.y - self.y, 2);
#
#         f64::sqrt(x_squared + y_squared)
#     }
# }
# let p1 = Point { x: 0.0, y: 0.0 };
# let p2 = Point { x: 5.0, y: 6.5 };
p1.distance(&p2);
(&p1).distance(&p2);
```

前者の方がずっと明確です。メソッドには自明な受け手 (`self` の型) がいるので、この自動参照機能は動作するのです。受け手とメソッド名が与えられれば、コンパイラは確実にメソッドが読み込み専用 (`&self`) か、書き込みもする (`&mut self`) のか、所有権を奪う (`self`) のか判断できるわけです。メソッドの受け手に関して借用が明示されないというのが、所有権を実際に使うのが Rust において簡単である大きな理由です。

5.3.3 より引数の多いメソッド

Rectangle 構造体に 2 番目のメソッドを実装して、メソッドを使う鍛錬をしましょう。今回は、Rectangle のインスタンスに、別の Rectangle のインスタンスを取らせ、2 番目の Rectangle が `self` に完全にはめ込まれたら、`true` を返すようにしたいのです; そうでなければ、`false` を返すべきです。つまり、一旦 `can_hold` メソッドを定義したら、リスト 5-14 のようなプログラムを書けるようになります。

ファイル名: `src/main.rs`

```
fn main() {
```



```

let rect1 = Rectangle { width: 30, height: 50 };
let rect2 = Rectangle { width: 10, height: 40 };
let rect3 = Rectangle { width: 60, height: 45 };

// rect1にrect2ははまり込む?
println!("Can rect1 hold rect2? {}", rect1.can_hold(&rect2));
println!("Can rect1 hold rect3? {}", rect1.can_hold(&rect3));
}

```

リスト 5-14: まだ書いていない `can_hold` メソッドを使用する

そして、予期される出力は以下のようになります。なぜなら、`rect2` の各寸法は `rect1` よりも小さいものの、`rect3` は `rect1` より幅が広いからです:

```

Can rect1 hold rect2? true
Can rect1 hold rect3? false

```

メソッドを定義したいことはわかっているので、`impl Rectangle` ブロック内での話になります。メソッド名は、`can_hold` になり、引数として別の `Rectangle` を不変借用で取るでしょう。メソッドを呼び出すコードを見れば、引数の型が何になるかわかります: `rect1.can_hold(&rect2)` は、`&rect2`、`Rectangle` のインスタンスである `rect2` への不変借用を渡しています。これは道理が通っています。なぜなら、`rect2` を読み込む (書き込みではなく。この場合、可変借用が必要になります) だけでよく、`can_hold` メソッドを呼び出した後にも `rect2` が使えるよう、所有権を `main` に残したままにしたいからです。`can_hold` の返り値は、**boolean** になり、メソッドの中身は、`self` の幅と高さがもう一つの `Rectangle` の幅と高さよりも、それぞれ大きいことを確認します。リスト 5-13 の `impl` ブロックに新しい `can_hold` メソッドを追記しましょう。リスト 5-15 に示した通りです。

ファイル名: `src/main.rs`

```

# #[derive(Debug)]
# struct Rectangle {
#     width: u32,
#     height: u32,
# }
#
# impl Rectangle {
#     fn area(&self) -> u32 {
#         self.width * self.height
#     }
#
#     fn can_hold(&self, other: &Rectangle) -> bool {
#         self.width > other.width && self.height > other.height
#     }
# }

```

リスト 5-15: 別の `Rectangle` のインスタンスを引数として取る `can_hold` メソッドを、`Rectangle`

に実装する

このコードをリスト 5-14 の main 関数と合わせて実行すると、望み通りの出力が得られます。メソッドは、self 引数の後にシグニチャに追加した引数を複数取ることができ、その引数は、関数の引数と同様に動作するのです。

5.3.4 関連関数

impl ブロックの別の有益な機能は、impl ブロック内に self を引数に取らない関数を定義できることです。これは、構造体に関連付けられているので、**関連関数**と呼ばれます。それでも、関連関数は関数であり、メソッドではありません。というのも、対象となる構造体のインスタンスが存在しないからです。もう String::from という関連関数を使用したことがありますね。

関連関数は、構造体の新規インスタンスを返すコンストラクタによく使用されます。例えば、一つの寸法を引数に取り、長さと幅両方に使用する関連関数を提供することができ、その結果、同じ値を 2 回指定する必要なく、正方形の Rectangle を生成しやすくなります。

ファイル名: src/main.rs

```
# #[derive(Debug)]
# struct Rectangle {
#     width: u32,
#     height: u32,
# }
#
# impl Rectangle {
#     fn square(size: u32) -> Rectangle {
#         Rectangle { width: size, height: size }
#     }
# }
```

この関連関数を呼び出すために、構造体名と一緒に :: 記法を使用します; 一例は let sq = Rectangle::square(3); です。この関数は、構造体によって名前空間分けされています: :: という記法は、関連関数とモジュールによって作り出される名前空間両方に使用されます。モジュールについては第 7 章で議論します。

5.3.5 複数の impl ブロック

各構造体には、複数の impl ブロックを存在させることができます。例えば、リスト 5-15 はリスト 5-16 に示したコードと等価で、リスト 5-16 では、各メソッドごとに impl ブロックを用意しています。

```
# #[derive(Debug)]
# struct Rectangle {
```

```
#     width: u32,
#     height: u32,
# }
#
impl Rectangle {
    fn area(&self) -> u32 {
        self.width * self.height
    }
}

impl Rectangle {
    fn can_hold(&self, other: &Rectangle) -> bool {
        self.width > other.width && self.height > other.height
    }
}
```

リスト 5-16: 複数の `impl` ブロックを使用してリスト 5-15 を書き直す

ここでこれらのメソッドを個々の `impl` ブロックに分ける理由はないのですが、合法的な書き方です。複数の `impl` ブロックが有用になるケースは第 10 章で見ますが、そこではジェネリック型と、トレイトについて議論します。

5.4 まとめ

構造体により、自分の領域で意味のある独自の型を作成することができます。構造体を使用することで、関連のあるデータ片を相互に結合させたままにし、各部品に名前を付け、コードを明確にすることができます。メソッドにより、構造体のインスタンスが行う動作を指定することができ、関連関数により、構造体に特有の機能をインスタンスを利用することなく、名前空間分けすることができます。

しかし、構造体だけが独自の型を作成する手段ではありません: Rust の `enum` 機能に目を向けて、別の道具を工具箱に追加しましょう。

第 6 章

Enum とパターンマッチング

この章では、**列挙型**について見ていきます。列挙型は、**enum** と称されます。**enum** は、取りうる値を列挙することで、型を定義させてくれます。最初に、**enum** を定義し、使用して、**enum** がデータとともに意味をコード化する方法を示します。次に、特別に有用な **enum** である `Option` について掘り下げていきましょう。この型は、値が何かかなんでもないかを表現します。それから、`match` 式のパターンマッチングにより、どう **enum** の色々な値に対して異なるコードを走らせやすくなるかを見ます。最後に、`if let` 文法要素も、如何 (いか) に **enum** をコードで扱う際に使用可能な便利で簡潔な慣用句であるかを解説します。

enum は多くの言語に存在する機能ですが、その能力は言語ごとに異なります。Rust の **enum** は、F#、OCaml、Haskell などの、関数型言語に存在する**代数的データ型**に最も酷似しています。

6.1 Enum を定義する

コードで表現したくなるかもしれない場面に目を向けて、**enum** が有用でこの場合、構造体よりも適切である理由を確認しましょう。IP アドレスを扱う必要が出たとしましょう。現在、IP アドレスの規格は二つあります: バージョン 4 とバージョン 6 です。これらは、プログラムが遭遇する IP アドレスのすべての可能性です: 列挙型は、取りうる値をすべて**列挙**でき、これが列挙型の名前の由来です。

どんな IP アドレスも、バージョン 4 かバージョン 6 のどちらかになります。同時に両方にはなり得ません。IP アドレスのその特性により、**enum** データ構造が適切なものになります。というのも、**enum** の値は、その列挙子のいずれか一つにしかなり得ないからです。バージョン 4 とバージョン 6 のアドレスは、どちらも根源的には IP アドレスですから、コードがいかなる種類の IP アドレスにも適用される場面を扱う際には、同じ型として扱われるべきです。

この概念をコードでは、`IpAddrKind` 列挙型を定義し、IP アドレスがなりうる種類、`v4` と `v6` を列挙することで、表現できます。これらは、**enum** の**列挙子**として知られています:

```
enum IpAddrKind {
```

```
V4,  
V6,  
}
```

これで、IpAddrKind はコードの他の場所で使用できる独自のデータ型になります。

6.1.1 Enum の値

以下のようにして、IpAddrKind の各列挙子のインスタンスは生成できます：

```
# enum IpAddrKind {  
#   V4,  
#   V6,  
# }  
#  
let four = IpAddrKind::V4;  
let six = IpAddrKind::V6;
```

enum の列挙子は、その識別子の元に名前空間分けされていることと、2 連コロンを使ってその二つを区別していることに注意してください。これが有効な理由は、こうすることで、値 IpAddrKind::V4 と IpAddrKind::V6 という値は両方とも、同じ型 IpAddrKind になったからです。そうしたら、例えば、どんな IpAddrKind を取る関数も定義できるようになります。

```
# enum IpAddrKind {  
#   V4,  
#   V6,  
# }  
#  
fn route(ip_type: IpAddrKind) { }
```

そして、この関数をどちらの列挙子に対しても呼び出せます：

```
# enum IpAddrKind {  
#   V4,  
#   V6,  
# }  
#  
# fn route(ip_type: IpAddrKind) { }  
#  
route(IpAddrKind::V4);  
route(IpAddrKind::V6);
```

enum の利用には、さらなる利点さえもあります。この IP アドレス型についてもっと考えてみると、現状では、実際の IP アドレスのデータを保持する方法がありません。つまり、どんな種類であるかを知っているだけです。構造体について第 5 章で学んだばかりとすると、この問題に対して、あなたはリスト 6-1 のように対処するかもしれません。

```
enum IpAddrKind {
    V4,
    V6,
}

struct IpAddr {
    kind: IpAddrKind,
    address: String,
}

let home = IpAddr {
    kind: IpAddrKind::V4,
    address: String::from("127.0.0.1"),
};

let loopback = IpAddr {
    kind: IpAddrKind::V6,
    address: String::from("::1"),
};
```

リスト 6-1: IP アドレスのデータと IpAddrKind の列挙子を struct を使って保持する

ここでは、二つのフィールドを持つ IpAddr という構造体を定義しています: IpAddrKind 型 (先ほど定義した **enum** ですね) の kind フィールドと、String 型の address フィールドです。この構造体のインスタンスが 2 つあります。最初のインスタンス、home には kind として IpAddrKind::V4 があり、紐付けられたアドレスデータは 127.0.0.1 です。2 番目のインスタンス、loopback には、kind の値として、IpAddrKind のもう一つの列挙子、V6 があり、アドレス ::1 が紐付いています。構造体を使って kind と address 値を一緒に包んだので、もう列挙子は値と紐付けられています。

各 **enum** の列挙子に直接データを格納して、**enum** を構造体内に使うというよりも **enum** だけを使って、同じ概念をもっと簡潔な方法で表現することができます。この新しい IpAddr の定義は、V4 と V6 列挙子両方に String 値が紐付けられていることを述べています。

```
enum IpAddr {
    V4(String),
    V6(String),
}

let home = IpAddr::V4(String::from("127.0.0.1"));

let loopback = IpAddr::V6(String::from("::1"));
```

enum の各列挙子にデータを直接添付できるので、余計な構造体を作る必要は全くありません。

構造体よりも **enum** を使うことには、別の利点もあります: 各列挙子に紐付けるデータの型と量は、異なってもいいのです。バージョン 4 の IP アドレスには、常に 0 から 255 の値を持つ 4 つの数値があります。V4 のアドレスは、4 つの u8 型の値として格納するけれども、V6 のアドレスは引き続

き、単独の String 型の値で格納したかったとしても、構造体では不可能です。enum なら、こんな場合も容易に対応できます:

```
enum IpAddr {
    V4(u8, u8, u8, u8),
    V6(String),
}

let home = IpAddr::V4(127, 0, 0, 1);

let loopback = IpAddr::V6(String::from("::1"));
```

バージョン 4 とバージョン 6 の IP アドレスを格納するデータ構造を定義する複数の異なる方法を示してきました。しかしながら、蓋を開けてみれば、IP アドレスを格納してその種類をコード化したくなるということは一般的なので、標準ライブラリに使用可能な定義があります！標準ライブラリでの IpAddr の定義のされ方を見てみましょう: 私たちが定義し、使用したのと全く同じ enum と列挙子がありますが、アドレスデータを二種の異なる構造体の形で列挙子に埋め込み、この構造体は各列挙子用に異なる形で定義されています。

```
struct Ipv4Addr {
    // 省略
}

struct Ipv6Addr {
    // 省略
}

enum IpAddr {
    V4(Ipv4Addr),
    V6(Ipv6Addr),
}
```

このコードは、enum 列挙子内にいかなる種類のデータでも格納できることを描き出しています: 例を挙げれば、文字列、数値型、構造体などです。他の enum を含むことさえできます！また、標準ライブラリの型は、あなたの想像するよりも複雑ではないことがしばしばあります。

標準ライブラリに IpAddr に対する定義は含まれるものの、標準ライブラリの定義をまだ我々のスコープに導入していないので、干渉することなく自分自身の定義を生成して使用できることに注意してください。型をスコープに導入することについては、第 7 章でもっと詳しく言及します。

リスト 6-2 で enum の別の例を見てみましょう: 今回のコードは、幅広い種類の型が列挙子に埋め込まれています。

```
enum Message {
    Quit,
    Move { x: i32, y: i32 },
    Write(String),
}
```

```
    ChangeColor(i32, i32, i32),
}
```

リスト 6-2: 列挙子各々が異なる型と量の値を格納する Message enum

この enum には、異なる型の列挙子が 4 つあります:

- Quit には紐付けられたデータは全くなし。
- Move は、中に匿名構造体を含む。
- Write は、単独の String オブジェクトを含む。
- ChangeColor は、3 つの i32 値を含む。

リスト 6-2 のような列挙子を含む enum を定義することは、enum の場合、struct キーワードを使わず、全部の列挙子が Message 型の元に分類される点を除いて、異なる種類の構造体定義を定義するのと類似しています。以下の構造体も、先ほどの enum の列挙子が保持しているのと同じデータを格納することができるでしょう:

```
struct QuitMessage; // ユニット構造体
struct MoveMessage {
    x: i32,
    y: i32,
}
struct WriteMessage(String); // タプル構造体
struct ChangeColorMessage(i32, i32, i32); // タプル構造体
```

ですが、異なる構造体を使っていたら、各々、それ自身の型があるので、単独の型になるリスト 6-2 で定義した Message enum ほど、これらの種のメッセージいずれもとる関数を簡単に定義することはできないでしょう。

enum と構造体にはもう 1 点似通っているところがあります: impl を使って構造体にメソッドを定義できるのと全く同様に、enum にもメソッドを定義することができるのです。こちらは、Message enum 上に定義できる call という名前のメソッドです:

```
# enum Message {
#     Quit,
#     Move { x: i32, y: i32 },
#     Write(String),
#     ChangeColor(i32, i32, i32),
# }
#
impl Message {
    fn call(&self) {
        // method body would be defined here
        // メソッド本体はここに定義される
    }
}
```



```
let m = Message::Write(String::from("hello"));
m.call();
```

メソッドの本体では、`self` を使用して、メソッドを呼び出した相手の値を取得できるでしょう。この例では、`Message::Write(String::from("hello"))` という値を持つ、変数 `m` を生成したので、これが `m.call()` を走らせた時に、`call` メソッドの本体内で `self` が表す値になります。

非常に一般的で有用な別の標準ライブラリの `enum` を見てみましょう: `Option` です。

6.1.2 Option enum と Null 値に勝る利点

前節で、`IpAddr` `enum` が `Rust` の型システムを使用して、プログラムにデータ以上の情報をコード化できる方法を目撃しました。この節では、`Option` のケーススタディを掘り下げていきます。この型も標準ライブラリにより定義されている `enum` です。この `Option` 型はいろんな箇所で使用されます。なぜなら、値が何かかそうでないかという非常に一般的な筋書きをコード化するからです。この概念を型システムの観点で表現することは、コンパイラが、プログラマが処理すべき場面全てを処理していることをチェックできることを意味します; この機能は、他の言語において、究極的にありふれたバグを阻止することができます。

プログラミング言語のデザインは、しばしばどの機能を入れるかという観点で考えられるが、除いた機能も重要なのです。`Rust` には、他の多くの言語にはある `null` 機能がありません。**`null`** とはそこに何も値がないことを意味する値です。`null` のある言語において、変数は常に二者択一どちらかの状態になります: `null` かそうでないかです。

`null` の開発者であるトニー・ホーア (Tony Hoare) の 2009 年のプレゼンテーション、*"Null References: The Billion Dollar Mistake"* (Null 参照: 10 億ドルの間違い) では、こんなことが語られています。

私はそれを 10 億ドルの失敗と呼んでいます。その頃、私は、オブジェクト指向言語の参照に対する、最初のわかりやすい型システムを設計していました。私の目標は、どんな参照の使用も全て完全に安全であるべきことを、コンパイラにそのチェックを自動で行ってもらって保証することだったのです。しかし、`null` 参照を入れるという誘惑に打ち勝つことができませんでした。それは、単純に実装が非常に容易だったからです。これが無数のエラーや脆弱性、システムクラッシュにつながり、過去 40 年で 10 億ドルの苦痛や損害を引き起こしたであろうということなのです。

`null` 値の問題は、`null` の値を `null` でない値のように使用しようとしたら、何らかの種類のエラーが出ることです。この `null` かそうでないかという特性は広く存在するので、この種の間違いを大変犯しやすいのです。

しかしながら、`null` が表現しようとしている概念は、それでも役に立つものです: `null` は、何らかの理由で現在無効、または存在しない値のことなのです。

問題は、全く概念にあるのではなく、特定の実装にあるのです。そんな感じなので、`Rust` には `null`

がありませんが、値が存在するか不在かという概念をコード化する `enum` ならあります。この `enum` が `Option<T>` で、以下のように標準ライブラリに定義されています。

```
enum Option<T> {  
    Some(T),  
    None,  
}
```

`Option<T>` は有益すぎて、初期化処理 (**prelude**) にさえ含まれています。つまり、明示的にスコープに導入する必要がないのです。さらに、列挙子もそうになっています: `Some` と `None` を `Option::` の接頭辞なしに直接使えるわけです。ただ、`Option<T>` はそうは言っても、普通の `enum` であり、`Some(T)` と `None` も `Option<T>` 型のただの列挙子です。

`<T>` という記法は、まだ語っていない **Rust** の機能です。これは、ジェネリック型引数であり、ジェネリクスについて詳しくは、第 10 章で解説します。とりあえず、知っておく必要があることは、`<T>` は、`Option` `enum` の `Some` 列挙子が、あらゆる型のデータを 1 つだけ持つことができることを意味していることだけです。こちらは、`Option` 値を使って、数値型や文字列型を保持する例です。

```
let some_number = Some(5);  
let some_string = Some("a string");  
  
let absent_number: Option<i32> = None;
```

`Some` ではなく、`None` を使ったら、コンパイラに `Option<T>` の型が何になるかを教えなければいけません。というのも、`None` 値を見ただけでは、`Some` 列挙子が保持する型をコンパイラが推論できないからです。

`Some` 値がある時、値が存在するとわかり、その値は、`Some` に保持されています。`None` 値がある場合、ある意味、`null` と同じことを意図します: 有効な値がないのです。では、なぜ `Option<T>` の方が、`null` よりも少しでも好ましいのでしょうか？

簡潔に述べると、`Option<T>` と `T` (ここで `T` はどんな型でもいい) は異なる型なので、コンパイラが `Option<T>` 値を確実に有効な値かのように使用してくれません。例えば、このコードは `i8` を `Option<i8>` に足そうとしているので、コンパイルできません。

```
let x: i8 = 5;  
let y: Option<i8> = Some(5);  
  
let sum = x + y;
```

このコードを動かしたら、以下のようなエラーメッセージが出ます。

```
error[E0277]: the trait bound `i8: std::ops::Add<std::option::Option<i8>>` is  
not satisfied  
(エラー: `i8: std::ops::Add<std::option::Option<i8>>` というトレイト境界が満た  
されていません)
```

```
-->
|
5 |     let sum = x + y;
|           ^ no implementation for `i8 + std::option::Option<i8>`
|
```

なんて強烈な！ 実際に、このエラーメッセージは、`i8` と `Option<i8>` が異なる型なので、足し合わせる方法がコンパイラにはわからないことを意味します。Rust において、`i8` のような型の値がある場合、コンパイラが常に有効な値であることを確認してくれます。この値を使う前に `null` であることをチェックする必要なく、自信を持って先に進むことができます。 `Option<i8>` がある時 (あるいはどんな型を扱おうとしていても) のみ、値を保持していない可能性を心配する必要があるわけであり、コンパイラはプログラマが値を使用する前にそのような場面を扱っているか確かめてくれます。

言い換えると、`T` 型の処理を行う前には、`Option<T>` を `T` に変換する必要があるわけです。一般的に、これにより、`null` の最もありふれた問題の一つを捕捉する一助になります: 実際には `null` なのに、そうでないかのように想定することです。

不正確に `null` でない値を想定する心配をしなくてもよいということは、コード内でより自信を持つることになります。 `null` になる可能性のある値を保持するには、その値の型を `Option<T>` にすることで明示的に同意しなければなりません。それからその値を使用する際には、値が `null` である場合を明示的に処理する必要があります。値が `Option<T>` 以外の型であるところ全てにおいて、値が `null` でないと安全に想定することができます。これは、Rust にとって、意図的な設計上の決定であり、`null` の普遍性を制限し、Rust コードの安全性を向上させます。

では、`Option<T>` 型の値がある時、その値を使えるようにするには、どのように `Some` 列挙子から `T` 型の値を取り出せばいいのでしょうか? `Option<T>` には様々な場面で有効に活用できる非常に多くのメソッドが用意されています; ドキュメントでそれらを確認できます。 `Option<T>` のメソッドに馴染むと、Rust の旅が極めて有益になるでしょう。

一般的に、`Option<T>` 値を使うには、各列挙子を処理するコードが欲しくなります。 `Some(T)` 値がある時だけ走る何らかのコードが欲しくなり、このコードが内部の `T` を使用できます。 `None` 値があった場合に走る別のコードが欲しくなり、そちらのコードは `T` 値は使用できない状態になります。 `match` 式が、`enum` とともに使用した時にこれだけの動作をする制御フロー文法要素になります: `enum` の列挙子によって、違うコードが走り、そのコードがマッチした値の中のデータを使用できるのです。

6.2 match 制御フロー演算子

Rust には、一連のパターンに対して値を比較し、マッチしたパターンに応じてコードを実行させてくれる `match` と呼ばれる、非常に強力な制御フロー演算子があります。パターンは、リテラル値、変数名、ワイルドカードやその他多数のことで構成することができます; 第 18 章で、全ての種類のパターンと、その目的については解説します。 `match` のパワーは、パターンの表現力とコンパイラが全てのありうるパターンを処理しているかを確認してくれるという事実由来します。

`match` 式をコイン並べ替え装置のようなものと考えてください: コインは、様々なサイズの穴が空

いた通路を流れ落ち、各コインは、サイズのあった最初の穴に落ちます。同様に、値は `match` の各パターンを通り抜け、値が「適合する」最初のパターンで、値は紐付けられたコードブロックに落ち、実行中に使用されるわけです。

コインについて話したので、それを `match` を使用する例にとってみましょう！ 数え上げ装置と同じ要領で未知のアメリカコインを一枚取り、どの種類のコインなのか決定し、その価値をセントで返す関数をリスト 6-3 で示したように記述することができます。

```
enum Coin {  
    Penny,  
    Nickel,  
    Dime,  
    Quarter,  
}  
  
fn value_in_cents(coin: Coin) -> u32 {  
    match coin {  
        Coin::Penny => 1,  
        Coin::Nickel => 5,  
        Coin::Dime => 10,  
        Coin::Quarter => 25,  
    }  
}
```

リスト 6-3: `enum` とその `enum` の列挙子をパターンにした `match` 式

`value_in_cents` 関数内の `match` を噛み砕きましょう。まず、`match` キーワードに続けて式を並べています。この式は今回の場合、値 `coin` です。if で使用した式と非常に酷似しているみたいですね。しかし、大きな違いがあります: if では、式は論理値を返す必要がありますが、ここでは、どんな型でも構いません。この例における `coin` の型は、1 行目で定義した `Coin` `enum` です。

次は、`match` アームです。一本のアームには 2 つの部品があります: パターンと何らかのコードです。今回の最初のアームは `Coin::Penny` という値のパターンであり、パターンと動作するコードを区別する `=>` 演算子が続きます。この場合のコードは、ただの値 `1` です。各アームは次のアームとカンマで区切られています。

この `match` 式が実行されると、結果の値を各アームのパターンと順番に比較します。パターンに値がマッチしたら、そのコードに紐付けられたコードが実行されます。パターンが値にマッチしなければ、コイン並べ替え装置と全く同じように、次のアームが継続して実行されます。必要なだけパターンは存在できます: リスト 6-3 では、`match` には 4 本のアームがあります。

各アームに紐付けられるコードは式であり、マッチしたアームの式の結果が `match` 式全体の戻り値になります。

典型的に、アームのコードが短い場合、波かっこは使用されません。リスト 6-3 では、各アームが値を返すだけなので、これに倣っています。マッチのアームで複数行のコードを走らせたいのなら、波かっこを使用することができます。例えば、以下のコードは、メソッドが `Coin::Penny` とともに呼

び出されるたびに「Lucky penny!」と表示しつつ、ブロックの最後の値、1を返すでしょう。

```
# enum Coin {
#   Penny,
#   Nickel,
#   Dime,
#   Quarter,
# }
#
fn value_in_cents(coin: Coin) -> u32 {
  match coin {
    Coin::Penny => {
      println!("Lucky penny!");
      1
    },
    Coin::Nickel => 5,
    Coin::Dime => 10,
    Coin::Quarter => 25,
  }
}
```

6.2.1 値に束縛されるパターン

マッチのアームの別の有益な機能は、パターンにマッチした値の一部に束縛できる点です。こうして、`enum` の列挙子から値を取り出すことができます。

例として、`enum` の列挙子の一つを中にデータを保持するように変えましょう。1999年から2008年まで、アメリカは、片側に50の州それぞれで異なるデザインをしたクォーターコインを鑄造していました。他のコインは州のデザインがなされることはなかったので、クォーターだけがこのおまけの値を保持します。Quarter 列挙子を変更して、`UsState` 値が中に保持されるようにすることで `enum` にこの情報を追加でき、それをしたのがリスト 6-4 のコードになります。

```
#[derive(Debug)] // すぐに州を点検できるように
enum UsState {
  Alabama,
  Alaska,
  // ... などなど
}

enum Coin {
  Penny,
  Nickel,
  Dime,
  Quarter(UsState),
}
```

リスト 6-4: Quarter 列挙子が `UsState` の値も保持する `Coin` `enum`

友人の一人が 50 州全部のクォーターコインを収集しようとしているところを想像しましょう。コインの種類で小銭を並べ替えつつ、友人が持っていない種類だったら、コレクションに追加できるように、各クォーターに関連した州の名前を出力します。

このコードの `match` 式では、`Coin::Quarter` 列挙子の値にマッチする `state` という名の変数をパターンに追加します。`Coin::Quarter` がマッチすると、`state` 変数はそのクォーターの `state` の値に束縛されます。それから、`state` をそのアームのコードで使用できます。以下のようにですね:

```
# #[derive(Debug)]
# enum UsState {
#     Alabama,
#     Alaska,
# }
#
# enum Coin {
#     Penny,
#     Nickel,
#     Dime,
#     Quarter(UsState),
# }
#
fn value_in_cents(coin: Coin) -> u32 {
    match coin {
        Coin::Penny => 1,
        Coin::Nickel => 5,
        Coin::Dime => 10,
        Coin::Quarter(state) => {
            println!("State quarter from {:?}!", state);
            25
        },
    }
}
```

`value_in_cents(Coin::Quarter(UsState::Alaska))` と呼び出すつもりだったなら、`coin` は `Coin::Quarter(UsState::Alaska)` になります。その値を `match` の各アームと比較すると、`Coin::Quarter(state)` に到達するまで、どれにもマッチしません。その時に、`state` に束縛されるのは、`UsState::Alaska` という値です。そして、`println!` 式でその束縛を使用することができ、そのため、`Coin` `enum` の列挙子から `Quarter` に対する中身の `state` の値を取得できたわけです。

6.2.2 Option<T>とのマッチ

前節では、`Option<T>` を使用する際に、`Some` ケースから中身の `T` の値を取得したくなりました。要するに、`Coin` `enum` に対して行ったように、`match` を使って `Option<T>` を扱うこともできるというわけです！ コインを比較する代わりに、`Option<T>` の列挙子を比較するのですが、`match` 式の動作の仕方は同じままです。

`Option<i32>` を取る関数を書きたくなったとし、中に値があったら、その値に 1 を足すことにしま

しょう。中に値がなければ、関数は `None` 値を返し、何も処理を試みるべきではありません。

`match` のおかげで、この関数は大変書きやすく、リスト 6-5 のような見た目になります。

```
fn plus_one(x: Option<i32>) -> Option<i32> {  
    match x {  
        None => None,  
        Some(i) => Some(i + 1),  
    }  
}  
  
let five = Some(5);  
let six = plus_one(five);  
let none = plus_one(None);
```

リスト 6-5: `Option<i32>` に `match` 式を使う関数

`plus_one` の最初の実行についてもっと詳しく検証しましょう。`plus_one(five)` と呼び出した時、`plus_one` の本体の変数 `x` は `Some(5)` になります。そして、これをマッチの各アームと比較します。

```
None => None,
```

`Some(5)` という値は、`None` というパターンにはマッチしませんので、次のアームに処理が移ります。

```
Some(i) => Some(i + 1),
```

`Some(5)` は `Some(i)` にマッチしますか？ なんと、します！ 列挙子が同じです。`i` は `Some` に含まれる値に束縛されるので、`i` は値 5 になります。それから、このマッチのアームのコードが実行されるので、`i` の値に 1 を足し、合計の 6 を中身にした新しい `Some` 値を生成します。

さて、`x` が `None` になるリスト 6-5 の 2 回目の `plus_one` の呼び出しを考えましょう。`match` に入り、最初のアームと比較します。

```
None => None,
```

マッチします！ 足し算する値がないので、プログラムは停止し、`=>` の右辺にある `None` 値が返ります。最初のアームがマッチしたため、他のアームは比較されません。

`match` と `enum` の組み合わせは、多くの場面で有効です。`Rust` コードにおいて、このパターンはよく見かけるでしょう：`enum` に対し `match` し、内部のデータに変数を束縛させ、それに基づいたコードを実行します。最初はちょっと巧妙ですが、一旦慣れてしまえば、全ての言語にあってほしいと願うことになるでしょう。一貫してユーザのお気に入りなのです。

6.2.3 マッチは包括的

もう一つ議論する必要がある `match` の観点があります。一点バグがありコンパイルできないこんなバージョンの `plus_one` 関数を考えてください:

```
fn plus_one(x: Option<i32>) -> Option<i32> {
    match x {
        Some(i) => Some(i + 1),
    }
}
```

`None` の場合を扱っていないため、このコードはバグを生みます。幸い、コンパイラが捕捉できるバグです。このコードのコンパイルを試みると、こんなエラーが出ます:

```
error[E0004]: non-exhaustive patterns: `None` not covered
(エラー: 包括的でないパターン: `None` がカバーされてません)
-->
6 |         match x {
   |             ^ pattern `None` not covered
```

全可能性を網羅していないことをコンパイラは検知しています。もっと言えば、どのパターンを忘れているかさえ知っているのです。Rust におけるマッチは、**包括的**です: 全てのあらゆる可能性を網羅し尽くさなければ、コードは有効にならないのです。特に `Option<T>` の場合には、私達が明示的に `None` の場合を処理するのを忘れないようにしてくれます。`null` になるかもしれないのに値があると思ひ込まないように、すなわち前に議論した 10 億ドルの失敗を犯さないよう、コンパイラが保護してくれるわけです。

6.2.4 `_` というプレースホルダー

Rust には、全ての可能性を列挙したくない時に使用できるパターンもあります。例えば、`u8` は、有効な値として、0 から 255 までを取ります。1、3、5、7 の値にだけ興味があったら、0、2、4、6、8、9 と 255 までの数値を列挙する必要に迫られたくはないです。幸運なことに、する必要はありません: 代わりに特別なパターンの `_` を使用できます:

```
let some_u8_value = 0u8;
match some_u8_value {
    1 => println!("one"),
    3 => println!("three"),
    5 => println!("five"),
    7 => println!("seven"),
    _ => (),
}
```


`_` というパターンは、どんな値にもマッチします。他のアームの後に記述することで、`_` は、それまでに指定されていない全ての可能性にマッチします。`()` は、ただのユニット値なので、`_` の場合には、何も起こりません。結果として、`_` プレースホルダーの前に列挙していない可能性全てに対しては、何もしたくないと言えるわけです。

ですが、一つのケースにしか興味がないような場面では、`match` 式はちょっと長ったらしすぎます。このような場面用に、`Rust` には、`if let` が用意されています。

6.3 `if let` で簡潔な制御フロー

`if let` 記法で `if` と `let` をより冗長性の少ない方法で組み合わせ、残りを無視しつつ、一つのパターンにマッチする値を扱うことができます。`Option<u8>` にマッチするけれど、値が `3` の時にだけコードを実行したい、リスト 6-6 のプログラムを考えてください。

```
let some_u8_value = Some(0u8);
match some_u8_value {
    Some(3) => println!("three"),
    _ => (),
}
```

リスト 6-6: 値が `Some(3)` の時だけコードを実行する `match`

`Some(3)` にマッチした時だけ何かをし、他の `Some<u8>` 値や `None` 値の時には何もしたくありません。`match` 式を満たすためには、列挙子を一つだけ処理した後に `_ => ()` を追加しなければなりません。これでは、追加すべき定型コードが多すぎます。

その代わりに、`if let` を使用してもっと短く書くことができます。以下のコードは、リスト 6-6 の `match` と同じように振る舞います:

```
# let some_u8_value = Some(0u8);
if let Some(3) = some_u8_value {
    println!("three");
}
```

`if let` という記法は等号記号で区切られたパターンと式を取り、式が `match` に与えられ、パターンが最初のアームになった `match` と、同じ動作をします。

`if let` を使うと、タイプ数が減り、インデントも少なくなり、定型コードも減ります。しかしながら、`match` では強制された包括性チェックを失ってしまいます。`match` か `if let` かの選択は、特定の場面でどんなことをしたいかと簡潔性を得ることが包括性チェックを失うのに適切な代償となるかによります。

言い換えると、`if let` は値が一つのパターンにマッチした時にコードを走らせ、他は無視する `match` への糖衣構文と考えることができます。

`if let` では、`else` を含むこともできます。`else` に入るコードブロックは、`if let` と `else` に等価

な match 式の `_` の場合に入るコードブロックと同じになります。リスト 6-4 の `Coin` enum 定義を思い出してください。ここでは、`Quarter` 列挙子は、`UsState` の値も保持していましたね。クォーターコインの状態を告げつつ、見かけたクォーター以外のコインの枚数を数えたいなら、以下のように match 式で実現することができるでしょう：

```
# #[derive(Debug)]
# enum UsState {
#     Alabama,
#     Alaska,
# }
#
# enum Coin {
#     Penny,
#     Nickel,
#     Dime,
#     Quarter(UsState),
# }
# let coin = Coin::Penny;
# let mut count = 0;
# match coin {
#     // {:?}州のクォーターコイン
#     Coin::Quarter(state) => println!("State quarter from {:?}!", state),
#     _ => count += 1,
# }
```

または、以下のように if let と else を使うこともできるでしょう：

```
# #[derive(Debug)]
# enum UsState {
#     Alabama,
#     Alaska,
# }
#
# enum Coin {
#     Penny,
#     Nickel,
#     Dime,
#     Quarter(UsState),
# }
# let coin = Coin::Penny;
# let mut count = 0;
# if let Coin::Quarter(state) = coin {
#     println!("State quarter from {:?}!", state);
# } else {
#     count += 1;
# }
```

match を使って表現するには冗長的すぎるロジックがプログラムにあるようなシチュエーションに遭遇したら、if let も Rust 工具箱にあることを思い出してください。

6.4 まとめ

これで、`enum` を使用してワンセットの列挙された値のどれかになりうる独自の型を生成する方法を講義しました。標準ライブラリの `Option<T>` が型システムを使用して、エラーを回避する際に役立つ方法についても示しました。`enum` の値がデータを内部に含む場合、処理すべきケースの数に応じて、`match` か `if let` を使用して値を取り出し、使用できます。

もう Rust プログラムで構造体と `enum` を使用して、自分の領域の概念を表現できます。API 内で使用するために独自の型を生成することで、型安全性を保証することができます: コンパイラが、各関数の予期する型の値のみを関数が得ることを確かめてくれるのです。

使用するのに率直な整理整頓された API をユーザに提供し、ユーザが必要とするものだけを公開するために、今度は、Rust のモジュールに目を向けてみましょう。

第 7 章

肥大化していくプロジェクトをパッケージ、クレート、モジュールを利用して管理する

大きなプログラムを書く時、そのすべてを頭の中に入れておくのは不可能になるため、コードのまとまりを良くすることが重要になります。関係した機能をまとめ、異なる特徴を持つコードを分割することにより、特定の機能を実装しているコードを見つけたり、機能を変更したりするためにどこを探せば良いのかを明確にできます。

私達がこれまでに書いてきたプログラムは、一つのファイル内の一つのモジュール内にありました。プロジェクトが大きくなるにつれて、これを複数のモジュールに、ついで複数のファイルに分割することで、プログラムを整理することができます。パッケージは複数のバイナリクレートからなり、またライブラリクレートを 1 つもつこともできます。パッケージが大きくなるにつれて、その一部を抜き出して分離したクレートにし、外部依存とするのもよいでしょう。この章ではそれらのテクニックすべてを学びます。相互に関係し合い、同時に成長するパッケージの集まりからなる巨大なプロジェクトには、Cargo がワークスペースという機能を提供します。これは 14 章の Cargo ワークスペースで解説します。

機能をグループにまとめられることに加え、実装の詳細がカプセル化されることにより、コードをより高いレベルで再利用できるようになります：手続きを実装し終えてしまえば、他のコードはそのコードの公開されたインターフェースを通じて、実装の詳細を知ることなくそのコードを呼び出すことができるのです。コードをどう書くかによって、どの部分が他のコードにも使える公開のものになるのか、それとも自分だけが変更できる非公開のものになるのかが決定されます。これもまた、記憶しておくべき細部を制限してくれる方法のひとつです。

関係する概念にスコープがあります：コードが記述されているネストされた文脈には、「スコープ内」として定義される名前の集合があります。コードを読んだり書いたりコンパイルしたりする時に

は、プログラマーやコンパイラは特定の場所にある特定の名前が、変数・関数・構造体・`enum`・モジュール・定数・その他のどの要素を表すのか、そしてその要素は何を意味するのかを知る必要があります。そこでスコープを作り、どの名前がスコープ内/スコープ外にあるのかを変更することができます。同じ名前のものを2つ同じスコープ内に持つことはできません。そこで、名前の衝突を解決するための方法があります。

`Rust` には、どの詳細を公開するか、どの詳細を非公開にするか、どの名前がプログラムのそれぞれのスコープにあるか、といったコードのまとまりを保つためのたくさんの機能があります。これらの機能は、まとめて「モジュールシステム」と呼ばれることがあり、以下のようなものが含まれます。

- **パッケージ:** クレートをビルドし、テストし、共有することができる `Cargo` の機能
- **クレート:** ライブラリか実行可能ファイルを生成する、木構造をしたモジュール群
- **モジュールと `use`:** これを使うことで、パスの構成、スコープ、公開する可否かを決定できます
- **パス:** 要素（例えば構造体や関数やモジュール）に名前をつける方法

この章では、これらの機能をすべて学び、これらがどう相互作用するかについて議論し、これらをどう使ってスコープを制御するのかについて説明します。この章を読み終わる頃には、モジュールシステムをしっかりと理解し、熟練者のごとくスコープを扱うことができるようになっているでしょう！

7.1 パッケージとクレート

最初に学ぶモジュールシステムの要素は、パッケージとクレートです。クレートはバイナリかライブラリのどちらかです。**クレートルート (crate root)** とは、`Rust` コンパイラの開始点となり、クレートのルートモジュールを作るソースファイルのことです（モジュールについて詳しくは「モジュールを定義して、スコープとプライバシーを制御する」のセクションで説明します）。**パッケージ** はある機能群を提供する1つ以上のクレートです。パッケージは **`Cargo.toml`** という、それらのクレートをどのようにビルドするかを説明するファイルを持っています。

パッケージが何を持ってよいかはいくつかのルールで決まっています。パッケージは0個か1個のライブラリクレートを持っていないといけません。それ以上は駄目です。バイナリクレートはいくらでも持って良いですが、少なくとも（ライブラリでもバイナリでも良いですが）1つのクレートを持っていないといけません。

パッケージを作る時に何が起こるか見てみましょう。まず、`cargo new` というコマンドを入力します：

```
$ cargo new my-project
   Created binary (application) `my-project` package
$ ls my-project
Cargo.toml
src
$ ls my-project/src
main.rs
```

このコマンドを入力したとき、Cargo は **Cargo.toml** ファイルを作り、パッケージを作ってくれました。**Cargo.toml** の中身を見ても、**src/main.rs** については何も書いてありません。これは、Cargo は **src/main.rs** が、パッケージと同じ名前を持つバイナリクレートのクレートルートであるという慣習に従っているためです。同じように、Cargo はパッケージディレクトリに **src/lib.rs** が含まれていたら、パッケージにはパッケージと同じ名前のライブラリクレートが含まれており、**src/lib.rs** がそのクレートルートなのだと判断します。Cargo はクレートルートファイルを `rustc` に渡し、ライブラリやバイナリをビルドします。

今、このパッケージには **src/main.rs** しか含まれておらず、つまりこのパッケージは `my-project` という名前のバイナリクレートのみを持っているということです。もしパッケージが **src/main.rs** と **src/lib.rs** を持っていたら、クレートは2つになります：どちらもパッケージと同じ名前を持つ、ライブラリクレートとバイナリクレートです。ファイルを **src/bin** ディレクトリに置くことで、パッケージは複数のバイナリクレートを持つことができます。それぞれのファイルが別々のバイナリクレートになります。

クレートは、関連した機能を一つのスコープにまとめることで、その機能が複数のプロジェクト間で共有しやすいようにします。例えば、2章で使った `rand` クレートは、乱数を生成する機能を提供します。`rand` クレートを私達のプロジェクトのスコープに持ち込むことで、この機能を私達のプロジェクトで使うことができます。`rand` クレートが提供する機能にはすべて、クレートの名前 `rand` を使ってアクセスできます。

クレートの機能をそれ自身のスコープの中に入れたままにしておくことは、ある機能が私達のクレートで定義されたのか `rand` クレートで定義されたのかを明確にし、名前の衝突を予防してくれます。例えば、`rand` クレートは `Rng` という名前のトレイトを提供しています。更に、私達のクレートで `Rng` という名前の `struct` を定義することもできます。クレートの機能はそのスコープ内の名前空間に位置づけられているので、`rand` を依存先として追加しても、コンパイラは `Rng` という名前が何を意味するのかについて混乱することはないのです。私達のクレートでは、私達の定義した `struct Rng` のことであり、`rand` クレートの `Rng` トレイトには `rand::Rng` でアクセスするというわけです。

では、モジュールシステムの話に移りましょう！

7.2 モジュールを定義して、スコープとプライバシーを制御する

この節では、モジュールと、その他のモジュールシステムの要素——すなわち、要素に名前をつけるための `パス`、パスをスコープに持ち込む `use` キーワード、要素を公開する `pub` キーワード——について学びます。また、`as` キーワード、外部パッケージ、`glob` 演算子についても話します。とりあえず、今はモジュールに集中しましょう！

モジュールはクレート内のコードをグループ化し、可読性と再利用性を上げるのに役に立ちます。モジュールは要素のプライバシーも制御できます。プライバシーとは、要素がコードの外側で使える（公開 **public**）のか、内部の実装の詳細であり外部では使えない（非公開 **private**）のかです。例えば、レストランの機能を提供するライブラリクレートを書いてみましょう。実際にレストランを実装

することではなく、コードの関係性に注目したいので、関数にシグネチャをつけますが中身は空白のままにします。

レストラン業界では、レストランの一部を**接客部門 (front of house)** といい、その他を**後方部門 (back of house)** といいます。接客部門とはお客さんがいるところです。接客係がお客様を席に案内し、給仕係が注文と支払いを受け付け、バーテンダーが飲み物を作ります。後方部門とはシェフや料理人がキッチンで働き、皿洗い係が食器を片付け、マネージャが管理業務をする場所です。

私達のクレートを現実のレストランと同じような構造にするために、関数をネストしたモジュールにまとめましょう。restaurant という名前の新しいライブラリを `cargo new --lib restaurant` と実行することで作成し、Listing 7-1 のコードを **src/lib.rs** に書き込み、モジュールと関数のシグネチャを定義してください。

ファイル名: **src/lib.rs**

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch07-managing-growing-projects/listing-07-01/src/
lib.rs:here}}
```

Listing 7-1: `front_of_house` モジュールにその他のモジュールが含まれ、さらにそれらが関数を含んでいる

モジュールは、`mod` キーワードを書き、次にモジュールの名前（今回の場合、`front_of_house`）を指定することで定義されます。モジュールの中には、今回だと `hosting` と `serving` のように、他のモジュールをおくこともできます。モジュールにはその他の要素の定義も置くことができます。例えば、構造体、`enum`、定数、トレイト、そして（Listing 7-1 のように）関数です。

モジュールを使うことで、関連する定義を一つにまとめ、関連する理由を名前で示せます。このコードを使うプログラマーは、定義を全部読むことなく、グループ単位でコードを読み進められるので、欲しい定義を見つけ出すのが簡単になるでしょう。このコードに新しい機能を付け加えるプログラマーは、プログラムのまとまりを保つために、どこにその機能のコードを置けば良いのかがわかるでしょう。

以前、**src/main.rs** と **src/lib.rs** はクレートルートと呼ばれていると言いました。この名前のわけは、**モジュールツリー**と呼ばれるクレートのモジュール構造の根っこ（ルート）にこれら2つのファイルの中身が `crate` というモジュールを形成するからです。

Listing 7-2 は、Listing 7-1 の構造のモジュールツリーを示しています。

```
crate
├── front_of_house
│   ├── hosting
│   │   ├── add_to_waitlist
│   │   └── seat_at_table
│   └── serving
│       ├── take_order
│       └── serve_order
```

```
└── take_payment
```

Listing 7-2: Listing 7-1 のコードのモジュールツリー

このツリーを見ると、どのモジュールがどのモジュールの中にネストしているのかがわかります（例えば、`hosting` は `front_of_house` の中にネストしています）。また、いくつかのモジュールはお互いに**兄弟**の関係にある、つまり、同じモジュール内で定義されていることもわかります（例えば `hosting` と `serving` は `front_of_house` で定義されています）。他にも、家族関係の比喻を使って、モジュール A がモジュール B の中に入っている時、A は B の**子**であるといい、B は A の**親**であるといえます。モジュールツリー全体が、暗黙のうちに作られた `crate` というモジュールの下にあることにも注目してください。

モジュールツリーを見ていると、コンピュータのファイルシステムのディレクトリツリーを思い出すかもしれません。その喩えはとても適切です！ ファイルシステムのディレクトリのように、モジュールはコードをまとめるのに使われるのです。そしてディレクトリからファイルを見つけるように、目的のモジュールを見つけ出す方法が必要になります。

7.3 モジュールツリーの要素を示すためのパス

ファイルシステムの中を移動する時と同じように、Rust にモジュールツリー内の要素を見つけるためにはどこを探せばいいのか教えるためにパスを使います。関数を呼び出したいなら、そのパスを知っていなければなりません。

パスは 2 つの形を取ることができます：

- **絶対パス**は、クレートの名前か `crate` という文字列を使うことで、クレートルートからスタートします。
- **相対パス**は、`self`、`super` または今のモジュール内の識別子を使うことで、現在のモジュールからスタートします。

絶対パスも相対パスも、その後の一つ以上の識別子がダブルコロンの (`::`) で仕切られて続きます。

Listing 7-1 の例に戻ってみましょう。`add_to_waitlist` 関数をどうやって呼べばいいのでしょうか？ Listing 7-3 は、モジュールと関数をいくつか取り除いてコードをやや簡潔にしています。これを使って、クレートルートに定義された新しい `eat_at_restaurant` という関数から、`add_to_waitlist` 関数を呼び出す 2 つの方法を示しましょう。`eat_at_restaurant` 関数はこのライブラリクレートの公開 (**public**) API の 1 つなので、`pub` キーワードをつけておきます。`pub` については、パスを `pub` キーワードで公開するの節でより詳しく学びます。この例はまだコンパイルできないことに注意してください。理由はすぐに説明します。

ファイル名: `src/lib.rs`

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch07-managing-growing-projects/listing-07-03/src/
```



```
lib.rs}}
```

Listing 7-3: add_to_waitlist 関数を絶対パスと相対パスで呼び出す

eat_at_restaurant で最初に add_to_waitlist 関数を呼び出す時、絶対パスを使っています。add_to_waitlist 関数は eat_at_restaurant と同じクレートで定義されているので、crate キーワードで絶対パスを始めることができます。

crate の後は、add_to_waitlist にたどり着くまで、後に続くモジュールを書き込んでいます。同じ構造のファイルシステムを想像すれば、/front_of_house/hosting/add_to_waitlist とパスを指定して add_to_waitlist を実行していることに相当します。crate という名前を使ってクレートルートからスタートするというのは、/ を使ってファイルシステムのルートからスタートするようなものです。

eat_at_restaurant で2回目に add_to_waitlist 関数を呼び出す時、相対パスを使っています。パスは、モジュールツリーにおいて eat_at_restaurant と同じ階層で定義されているモジュールである front_of_house からスタートします。これはファイルシステムで front_of_house/hosting/add_to_waitlist というパスを使っているのに相当します。名前から始めるのは、パスが相対パスであることを意味します。

相対パスを使うか絶対パスを使うかは、プロジェクトによって決めましょう。要素を定義するコードを、その要素を使うコードと別々に動かすか一緒に動かすか、どちらが起こりそうかによって決めるのが良いです。例えば、front_of_house モジュールと eat_at_restaurant 関数を customer_experience というモジュールに移動させると、add_to_waitlist への絶対パスを更新しないといけませんが、相対パスは有効なままです。しかし、eat_at_restaurant 関数だけを dining というモジュールに移動させると、add_to_waitlist への絶対パスは同じままですが、相対パスは更新しないといけなんでしょう。コードの定義と、その要素の呼び出しは独立に動かしそうなので、絶対パスのほうが好ましいです。

では、Listing 7-3 をコンパイルしてみて、どうしてこれはまだコンパイルできないのか考えてみましょう！ エラーを Listing 7-4 に示しています。

```
{{#include ../listings/ch07-managing-growing-projects/listing-07-03/output.txt}}
```

Listing 7-4: Listing 7-3 のコードをビルドしたときのコンパイルエラー

エラーメッセージは、hosting は非公開 (private) だ、と言っています。言い換えるなら、hosting モジュールと add_to_waitlist 関数へのパスは正しいが、非公開な部分へのアクセスは許可されていないので、Rust がそれを使わせてくれないということです。

モジュールはコードの整理に役立つだけではありません。モジュールは Rust の**プライバシー境界**も定義します。これは、外部のコードが知ったり、呼び出したり、依存したりしてはいけない実装の詳細をカプセル化する線引きです。なので、関数や構造体といった要素を非公開にしたければ、モジュールに入れればよいのです。

Rust におけるプライバシーは、「あらゆる要素（関数、メソッド、構造体、**enum**、モジュールおよび定数）は標準では非公開」というやり方で動いています。親モジュールの要素は子モジュールの非公開要素を使えませんが、子モジュールの要素はその祖先モジュールの要素を使えます。これは、子モジュールは実装の詳細を覆い隠しますが、子モジュールは自分の定義された文脈を見ることができるためです。レストランの喩えを続けるなら、レストランの後方部門になったつもりでプライバシーのルールを考えてみてください。レストランの顧客にはそこで何が起きているのかは非公開ですが、そこで働くオフィスマネージャには、レストランのことは何でも見えるし何でもできるのです。

Rust は、内部実装の詳細を隠すことが標準であるようにモジュールシステムを機能させることを選択しました。こうすることで、内部のコードのどの部分が、外部のコードを壊すことなく変更できるのかを知ることができます。しかし、`pub` キーワードを使って要素を公開することで、子モジュールの内部部品を外部の祖先モジュールに見せることができます。

7.3.1 パスを `pub` キーワードで公開する

Listing 7-4 の、`hosting` モジュールが非公開だと言ってきたエラーに戻りましょう。親モジュールの `eat_at_restaurant` 関数が子モジュールの `add_to_waitlist` 関数にアクセスできるようにしたいので、`hosting` モジュールに `pub` キーワードをつけます。Listing 7-5 のようになります。

ファイル名: `src/lib.rs`

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch07-managing-growing-projects/listing-07-05/src/lib.rs}}
```

Listing 7-5: `hosting` モジュールを `pub` として宣言することで `eat_at_restaurant` から使う

残念ながら、Listing 7-5 のコードも Listing 7-6 に示されるようにエラーとなります。

```
{{#include ../listings/ch07-managing-growing-projects/listing-07-05/output.txt}}
```

Listing 7-6: Listing 7-5 のコードをビルドしたときのコンパイルエラー

何が起きたのでしょうか？ `pub` キーワードを `mod hosting` の前に追加したことで、このモジュールは公開されました。この変更によって、`front_of_house` にアクセスできるなら、`hosting` にもアクセスできるようになりました。しかし `hosting` の中身はまだ非公開です。モジュールを公開してもその中身は公開されないのです。モジュールに `pub` キーワードがついていても、祖先モジュールのコードはモジュールを参照できるようになるだけです。

Listing 7-6 のエラーは `add_to_waitlist` 関数が非公開だと言っています。プライバシーのルールは、モジュール同様、構造体、**enum**、関数、メソッドにも適用されるのです。

`add_to_waitlist` の定義の前に `pub` キーワードを追加して、これも公開しましょう。

ファイル名: `src/lib.rs`

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch07-managing-growing-projects/listing-07-07/src/
lib.rs:here}}
```

Listing 7-7: `pub` キーワードを `mod hosting` と `fn add_to_waitlist` に追加することで、`eat_at_restaurant` からこの関数を呼べるようになる

これでこのコードはコンパイルできます！絶対パスと相対パスをもう一度確認して、どうして `pub` キーワードを追加することで `add_to_waitlist` のそれらのパスを使えるようになるのか、プライバシーの観点からもう一度確認してみましょう。

絶対パスは、クレートのモジュールツリーのルートである `crate` から始まります。クレートルートの中に `front_of_house` が定義されています。`front_of_house` は公開されていませんが、`eat_at_restaurant` 関数は `front_of_house` と同じモジュール内で定義されている（つまり、`eat_at_restaurant` と `front_of_house` は兄弟な）ので、`eat_at_restaurant` から `front_of_house` を参照することができます。次は `pub` の付いた `hosting` モジュールです。`hosting` の親モジュールにアクセスできるので、`hosting` にもアクセスできます。最後に、`add_to_waitlist` 関数は `pub` が付いており、私達はその親モジュールにアクセスできるので、この関数呼び出しはうまく行くというわけです。

相対パスについても、最初のステップを除けば同じ理屈です。パスをクレートルートから始めるのではなくて、`front_of_house` から始めるのです。`front_of_house` モジュールは `eat_at_restaurant` と同じモジュールで定義されているので、`eat_at_restaurant` が定義されている場所からの相対パスが使えます。そして、`hosting` と `add_to_waitlist` は `pub` が付いていますから、残りのパスについても問題はなく、この関数呼び出しは有効というわけです。

7.3.2 相対パスを `super` で始める

親モジュールから始まる相対パスなら、`super` を最初につけることで構成できます。ファイルシステムパスを `..` 構文で始めるのに似ています。どのようなときのこの機能が使いたくなるのでしょうか？

シェフが間違った注文を修正し、自分でお客さんに持っていくという状況をモデル化している、**Listing 7-8** を考えてみてください。`fix_incorrect_order` 関数は `serve_order` 関数を呼び出すために、`super` から始まる `serve_order` 関数へのパスを使っています。

ファイル名: `src/lib.rs`

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch07-managing-growing-projects/listing-07-08/src/
lib.rs:here}}
```

Listing 7-8: `super` で始まる相対パスを使って関数を呼び出す

`fix_incorrect_order` 関数は `back_of_house` モジュールの中にあるので、`super` を使って `back_of_house` の親モジュールにいきます。親モジュールは、今回の場合ルートである `crate` です。

そこから、`serve_order` を探し、見つけ出します。成功！もしクレートのモジュールツリーを再編成することにした場合でも、`back_of_house` モジュールと `serve_order` 関数は同じ関係性で有り続け、一緒に動くように思われます。そのため、`super` を使うことで、将来このコードが別のモジュールに移動するとしても、更新する場所が少なく済むようにしました。

7.3.3 構造体と `enum` を公開する

構造体や `enum` も `pub` を使って公開するよう指定できますが、追加の細目がいくつかあります。構造体定義の前に `pub` を使うと、構造体は公開されますが、構造体のフィールドは非公開のままなのです。それぞれのフィールドを公開するか否かを個々に決められます。Listing 7-9 では、公開の `toast` フィールドと、非公開の `seasonal_fruit` フィールドをもつ公開の `back_of_house::Breakfast` 構造体を定義しました。これは、例えば、レストランで、お客さんが食事についてくるパンの種類は選べるけれど、食事についてくるフルーツは季節と在庫に合わせてシェフが決める、という状況をモデル化しています。提供できるフルーツはすぐ変わるのも、お客さんはフルーツを選ぶどころかどんなフルーツが提供されるのか知ることできません。

ファイル名: `src/lib.rs`

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch07-managing-growing-projects/listing-07-09/src/
lib.rs}}
```

Listing 7-9: 公開のフィールドと非公開のフィールドとを持つ構造体

`back_of_house::Breakfast` の `toast` フィールドは公開されているので、`eat_at_restaurant` において `toast` をドット記法を使って読み書きできます。`seasonal_fruit` は非公開なので、`eat_at_restaurant` において `seasonal_fruit` は使えないということに注意してください。`seasonal_fruit` を修正している行のコメントを外して、どのようなエラーが得られるか試してみてください！

また、`back_of_house::Breakfast` は非公開のフィールドを持っているので、`Breakfast` のインスタンスを作成 (`construct`) する公開された関連関数が構造体によって提供されている必要があります(ここでは `summer` と名付けました)。もし `Breakfast` にそのような関数がなかったら、`eat_at_restaurant` において非公開である `seasonal_fruit` の値を設定できないので、`Breakfast` のインスタンスを作成できません。

一方で、`enum` を公開すると、そのヴァリエントはすべて公開されます。Listing 7-10 に示されているように、`pub` は `enum` キーワードの前にだけおけばよいのです。

ファイル名: `src/lib.rs`

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch07-managing-growing-projects/listing-07-10/src/
lib.rs}}
```

Listing 7-10: enum を公開に指定することはそのヴァリエントをすべて公開にする

Appetizer という **enum** を公開したので、Soup と Salad というヴァリエントも `eat_at_restaurant` で使えます。**enum** はヴァリエントが公開されてないとあまり便利ではないのですが、毎回 **enum** のすべてのヴァリエントに `pub` をつけるのは面倒なので、**enum** のヴァリエントは標準で公開されるようになっています。構造体はフィールドが公開されていなくても便利が多いので、構造体のフィールドは、`pub` がついてない限り標準で非公開という通常のルールに従うわけです。

まだ勉強していない、`pub` の関わるシチュエーションがもう一つあります。モジュールシステムの最後の機能、`use` キーワードです。`use` 自体の勉強をした後、`pub` と `use` を組み合わせる方法についてお見せします。

7.4 use キーワードでパスをスコープに持ち込む

これまで関数呼び出しのために書いてきたパスは、長く、繰り返しも多くて不便なものでした。例えば、**Listing 7-7** においては、絶対パスを使うか相対パスを使うかにかかわらず、`add_to_waitlist` 関数を呼ぼうと思うたびに `front_of_house` と `hosting` も指定しないといけませんでした。ありがたいことに、この手続きを簡単化する方法があります。`use` キーワードを使うことで、パスを一度スコープに持ち込んでしまえば、それ以降はパス内の要素がローカルにあるかのように呼び出すことができるのです。

Listing 7-11 では、`crate::front_of_house::hosting` モジュールを `eat_at_restaurant` 関数のスコープに持ち込むことで、`eat_at_restaurant` において、`hosting::add_to_waitlist` と指定するだけで `add_to_waitlist` 関数を呼び出せるようにしています。

ファイル名: `src/lib.rs`

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch07-managing-growing-projects/listing-07-11/src/
  lib.rs:here}}
```

Listing 7-11: use でモジュールをスコープに持ち込む

`use` とパスをスコープに追加することは、ファイルシステムにおいてシンボリックリンクを張ることに似ています。`use crate::front_of_house::hosting` をクレートルートに追加することで、`hosting` はこのスコープで有効な名前となり、まるで `hosting` はクレートルートで定義されていたかようになります。スコープに `use` で持ち込まれたパスも、他のパスと同じようにプライバシーがチェックされます。

`use` と相対パスで要素をスコープに持ち込むこともできます。**Listing 7-12** は **Listing 7-11** と同じふるまいを得るためにどう相対パスを書けば良いかを示しています。

ファイル名: src/lib.rs

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch07-managing-growing-projects/listing-07-12/src/
lib.rs:here}}
```

Listing 7-12: モジュールを `use` と相対パスを使ってスコープに持ち込む

7.4.1 慣例に従った `use` パスを作る

Listing 7-11 を見て、なぜ `use crate::front_of_house::hosting` と書いて `eat_at_restaurant` 内で `hosting::add_to_waitlist` と呼び出したのか不思議に思っているかもしれません。Listing 7-13 のように、`use` で `add_to_waitlist` までのパスをすべて指定しても同じ結果が得られるのに、と。

ファイル名: src/lib.rs

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch07-managing-growing-projects/listing-07-13/src/
lib.rs:here}}
```

Listing 7-13: `add_to_waitlist` 関数を `use` でスコープに持ち込む。このやりかたは慣例的ではない

Listing 7-11 も 7-13 もおなじ仕事をしてくれますが、関数をスコープに `use` で持ち込む場合、Listing 7-11 のほうが慣例的なやり方です。関数の親モジュールを `use` で持ち込むことで、関数を呼び出す際、毎回親モジュールを指定しなければならないようにすれば、フルパスを繰り返して書くことを抑えつつ、関数がローカルで定義されていないことを明らかにできます。Listing 7-13 のコードではどこで `add_to_waitlist` が定義されたのかが不明瞭です。

一方で、構造体や `enum` その他の要素を `use` で持ち込むときは、フルパスを書くのが慣例的です。Listing 7-14 は標準ライブラリの `HashMap` 構造体をバイナリクレートのスコープに持ち込む慣例的なやり方を示しています。

ファイル名: src/main.rs

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch07-managing-growing-projects/listing-07-14/src/
main.rs}}
```

Listing 7-14: `HashMap` を慣例的なやり方でスコープに持ち込む

こちらの慣例の背後には、はっきりとした理由はありません。自然に発生した慣習であり、みんな Rust のコードをこのやり方で読み書きするのに慣れてしまったというだけです。

同じ名前の 2 つの要素を `use` でスコープに持ち込むのは Rust では許されないの、そのときこの慣例は例外的に不可能です。Listing 7-15 は、同じ名前を持つけれど異なる親モジュールを持つ 2 つ

の `Result` 型をスコープに持ち込み、それらを参照するやり方を示しています。

ファイル名: `src/lib.rs`

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch07-managing-growing-projects/listing-07-15/src/
lib.rs:here}}
```

Listing 7-15: 同じ名前を持つ 2 つの型を同じスコープに持ち込むには親モジュールを使わないといけない。

このように、親モジュールを使うことで 2 つの `Result` 型を区別できます。もし `use std::fmt::Result` と `use std::io::Result` と書いていたとしたら、2 つの `Result` 型が同じスコープに存在することになり、私達が `Result` を使ったときにどちらのことを意味しているのか **Rust** はわからなくなってしまいます。

7.4.2 新しい名前を `as` キーワードで与える

同じ名前の 2 つの型を `use` を使って同じスコープに持ち込むという問題には、もう一つ解決策があります。パスの後に、`as` と型の新しいローカル名、即ちエイリアスを指定すればよいのです。**Listing 7-16** は、**Listing 7-15** のコードを、2 つの `Result` 型のうち一つを `as` を使ってリネームするという別のやり方で書いたものを表しています。

ファイル名: `src/lib.rs`

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch07-managing-growing-projects/listing-07-16/src/
lib.rs:here}}
```

Listing 7-16: 型がスコープに持ち込まれた時、`as` キーワードを使ってその名前を変えている

2 つめの `use` 文では、`std::io::Result` に、`IoResult` という新たな名前を選んでやります。`std::fmt` の `Result` もスコープに持ち込んでいますが、この名前はこれとは衝突しません。**Listing 7-15** も **Listing 7-16** も慣例的とみなされているので、どちらを使っても構いませんよ！

7.4.3 `pub use` を使って名前を再公開する

`use` キーワードで名前をスコープに持ちこんだ時、新しいスコープで使用できるその名前は非公開です。私達のコードを呼び出すコードが、まるでその名前が私達のコードのスコープで定義されていたかのように参照できるようにするためには、`pub` と `use` を組み合わせればよいです。このテクニックは、要素を自分たちのスコープに持ち込むだけでなく、他の人がその要素をその人のスコープに持ち込むことも可能にすることから、**再公開 (re-exporting)** と呼ばれています。

Listing 7-17 は **Listing 7-11** のコードのルートモジュールでの `use` を `pub use` に変更したものを

示しています。

ファイル名: `src/lib.rs`

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch07-managing-growing-projects/listing-07-17/src/
lib.rs:here}}
```

Listing 7-17: `pub use` で、新たなスコープのコードがその名前を使えるようにする

`pub use` を使うことで、外部のコードが `hosting::add_to_waitlist` を使って `add_to_waitlist` 関数を呼び出せるようになりました。`pub use` を使っていなければ、`eat_at_restaurant` 関数は `hosting::add_to_waitlist` を自らのスコープ内で使えるものの、外部のコードはこの新しいパスを利用することはできないでしょう。

再公開は、あなたのコードの内部構造と、あなたのコードを呼び出すプログラマーたちのその領域に関しての見方が異なるときに有用です。例えば、レストランの比喻では、レストランを経営している人は「接客部門 (front of house)」と「後方部門 (back of house)」のことについて考えるでしょう。しかし、レストランを訪れるお客さんは、そのような観点からレストランの部門について考えることはありません。`pub use` を使うことで、ある構造でコードを書きつつも、別の構造で公開することが可能になります。こうすることで、私達のライブラリを、ライブラリを開発するプログラマーにとっても、ライブラリを呼び出すプログラマーにとっても、よく整理されたものとすることができます。

7.4.4 外部のパッケージを使う

2章で、乱数を得るために `rand` という外部パッケージを使って、数当てゲームをプログラムしました。`rand` を私達のプロジェクトで使うために、次の行を **Cargo.toml** に書き加えましたね：

ファイル名: `Cargo.toml`

```
{{#include ../listings/ch02-guessing-game-tutorial/listing-02-02/Cargo.toml:9:}}
```

`rand` を依存 (dependency) として **Cargo.toml** に追加すると、`rand` パッケージとそのすべての依存を `crates.io` からダウンロードして、私達のプロジェクトで `rand` が使えるようにするよう `Cargo` に命令します。

そして、`rand` の定義を私達のパッケージのスコープに持ち込むために、クレートの名前である `rand` から始まる `use` の行を追加し、そこにスコープに持ち込みたい要素を並べました。2章の乱数を生成するの節で、`Rng` トraitをスコープに持ち込み `rand::thread_rng` 関数を呼び出したことを思い出してください。

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch02-guessing-game-tutorial/listing-02-03/src/
main.rs:ch07-04}}
```


Rust コミュニティに所属する人々が crates.io でたくさんのパッケージを利用できるようにしてくれており、上と同じステップを踏めばそれらをあなたのパッケージに取り込むことができます：あなたのパッケージの **Cargo.toml** ファイルにそれらを書き並べ、`use` を使って要素をクレートからスコープへと持ち込めばよいのです。

標準ライブラリ (`std`) も、私達のパッケージの外部にあるクレートだということに注意してください。標準ライブラリは Rust 言語に同梱されているので、**Cargo.toml** を `std` を含むように変更する必要はありません。しかし、その要素をそこから私達のパッケージのスコープに持ち込むためには、`use` を使って参照する必要があります。例えば、`HashMap` には次の行を使います。

```
use std::collections::HashMap;
```

これは標準ライブラリクレートの名前 `std` から始まる絶対パスです。

7.4.5 巨大な `use` のリストをネストしたパスを使って整理する

同じクレートか同じモジュールで定義された複数の要素を使おうとする時、それぞれの要素を一行一行並べると、縦に大量のスペースを取ってしまいます。例えば、[Listing 2-4](#) の数当てゲームで使った次の 2 つの `use` 文が `std` からスコープへ要素を持ち込みました。

ファイル名: `src/main.rs`

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch07-managing-growing-projects/no-listing-01-use-std-unnested/src/main.rs:here}}
```

代わりに、ネストしたパスを使うことで、同じ一連の要素を 1 行でスコープに持ち込めます。これをするには、[Listing 7-18](#) に示されるように、パスの共通部分を書き、2 つのコロンを続け、そこで波括弧で互いに異なる部分のパスのリストを囲みます。

ファイル名: `src/main.rs`

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch07-managing-growing-projects/listing-07-18/src/main.rs:here}}
```

Listing 7-18: 同じプレフィックスをもつ複数の要素をスコープに持ち込むためにネストしたパスを指定する

大きなプログラムにおいては、同じクレートやモジュールからのたくさんの要素をネストしたパスで持ち込むようにすれば、独立した `use` 文の数を大きく減らすことができます！

ネストしたパスはパスのどの階層においても使うことができます。これはサブパスを共有する 2 つ

の `use` 文を合体させるときに有用です。例えば、Listing 7-19 は 2 つの `use` 文を示しています：1 つは `std::io` をスコープに持ち込み、もう一つは `std::io::Write` をスコープに持ち込んでいます。

ファイル名: `src/lib.rs`

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch07-managing-growing-projects/listing-07-19/src/
lib.rs}}
```

Listing 7-19: 片方がもう片方のサブパスである 2 つの `use` 文

これらの 2 つのパスの共通部分は `std::io` であり、そしてこれは最初のパスにほかなりません。これらの 2 つのパスを 1 つの `use` 文へと合体させるには、Listing 7-20 に示されるように、ネストしたパスに `self` を使いましょう。

ファイル名: `src/lib.rs`

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch07-managing-growing-projects/listing-07-20/src/
lib.rs}}
```

Listing 7-20: Listing 7-19 のパスを一つの `use` 文に合体させる

この行は `std::io` と `std::io::Write` をスコープに持ち込みます。

7.4.6 glob 演算子

パスにおいて定義されているすべての公開要素をスコープに持ち込みたいときは、`glob` 演算子 `*` をそのパスの後ろに続けて書きましょう：

```
use std::collections::*;
```

この `use` 文は `std::collections` のすべての公開要素を現在のスコープに持ち込みます。`glob` 演算子を使う際にはご注意ください！ `glob` をすると、どの名前がスコープ内にあり、プログラムで使われている名前がどこで定義されたのか分かりづらくなります。

`glob` 演算子はしばしば、テストの際、テストされるあらゆるものを `tests` モジュールに持ち込むために使われます。これについては 11 章テストの書き方の節で話します。`glob` 演算子はプレリユードパターンの一部としても使われることがあります：そのようなパターンについて、より詳しくは標準ライブラリのドキュメントをご覧ください。

7.5 モジュールを複数のファイルに分割する

この章のすべての例において、今までのところ、複数のモジュールを一つのファイルに定義していました。モジュールが大きくなる時、コードを読み進めやすくするため、それらの定義を別のファイ

ルへ移動させたいかもしれません。

例えば、Listing 7-17 のコードからはじめましょう。クレートルートのファイルを Listing 7-21 のコードを持つように変更して、`front_of_house` モジュールをそれ専用のファイル `src/front_of_house.rs` に動かしましょう。今回、クレートルートファイルは `src/lib.rs` ですが、この手続きはクレートルートファイルが `src/main.rs` であるバイナリクレートでもうまく行きます。

ファイル名: `src/lib.rs`

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch07-managing-growing-projects/listing-07-21-and-22/src/lib.rs}}
```

Listing 7-21: `front_of_house` モジュールを宣言する。その中身は `src/front_of_house.rs` 内にある

そして、Listing 7-22 のように、**`src/front_of_house.rs`** には `front_of_house` モジュールの中身の定義を与えます。

ファイル名: `src/front_of_house.rs`

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch07-managing-growing-projects/listing-07-21-and-22/src/front_of_house.rs}}
```

Listing 7-22: **`src/front_of_house.rs`** における、`front_of_house` モジュール内部の定義

`mod front_of_house` の後にブロックではなくセミコロンを使うと、Rust にモジュールの中身をモジュールと同じ名前をした別のファイルから読み込むように命令します。私達の例で、つづけて `hosting` モジュールをそれ専用のファイルに抽出するには、`src/front_of_house.rs` が `hosting` モジュールの宣言のみを含むように変更します：

ファイル名: `src/front_of_house.rs`

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch07-managing-growing-projects/no-listing-02-extracting-hosting/src/front_of_house.rs}}
```

さらに **`src/front_of_house`** ディレクトリと **`src/front_of_house/hosting.rs`** ファイルを作つて、`hosting` モジュール内でなされていた定義を持つようにします。

ファイル名: `src/front_of_house/hosting.rs`

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch07-managing-growing-projects/no-listing-02-extracting-hosting/src/front_of_house/hosting.rs}}
```

定義は別のファイルにあるにもかかわらず、モジュールツリーは同じままであり、

`eat_at_restaurant` 内での関数呼び出しもなんの変更もなくうまく行きます。このテクニックのおかげで、モジュールが大きくなってきた段階で新しいファイルへ動かす、ということが出来ます。

src/lib.rs における `pub use crate::front_of_house::hosting` という文も変わっていないし、`use` はどのファイルがクレートの一部としてコンパイルされるかになんの影響も与えないということに注意してください。`mod` キーワードがモジュールを宣言したなら、**Rust** はそのモジュールに挿入するためのコードを求めて、モジュールと同じ名前のファイルの中を探すというわけです。

7.6 まとめ

Rust では、パッケージを複数のクレートに、そしてクレートを複数のモジュールに分割して、あるモジュールで定義された要素を他のモジュールから参照することができます。これは絶対パスか相対パスを指定することで行なえます。これらのパスは `use` 文でスコープに持ち込むことができ、こうすると、そのスコープで要素を複数回使う時に、より短いパスで済むようになります。モジュールのコードは標準では非公開ですが、`pub` キーワードを追加することで定義を公開することができます。

次の章では、きちんと整理されたあなたのコードで使うことができる、標準ライブラリのいくつかのコレクションデータ構造を見ていきます。

第 8 章

一般的なコレクション

Rust の標準ライブラリは、**コレクション**と呼ばれる多くの非常に有益なデータ構造を含んでいます。他の多くのデータ型は、ある一つの値を表しますが、コレクションは複数の値を含むことができます。組み込みの配列とタプル型とは異なり、これらのコレクションが指すデータはヒープに確保され、データ量はコンパイル時にわかる必要はなく、プログラムの実行にあわせて、伸縮可能であることになります。各種のコレクションには異なる能力とコストが存在し、自分の現在の状況に最適なものを選び取るスキルは、時間とともに育っていきます。この章では、Rust のプログラムにおいて、非常に頻繁に使用される 3 つのコレクションについて議論しましょう。

- **ベクタ型**は、可変長の値を並べて保持できる。
- **文字列**は、文字のコレクションである。以前、String 型について触れたが、この章ではより掘り下げていく。
- **ハッシュマップ**は、値を特定のキーと紐付けさせてくれる。より一般的なデータ構造である、**マップ**の特定の実装である。

標準ライブラリで提供されている他の種のコレクションについて学ぶには、ドキュメントを参照されたし。

ベクタ型、文字列、ハッシュマップの生成と更新方法や、各々が特別な点について議論していきましょう。

8.1 ベクタで値のリストを保持する

最初に見るコレクション型は `Vec<T>` であり、これは**ベクタ**としても知られています。ベクタは単体のデータ構造でありながら複数の値を保持でき、それらの値をメモリ上に隣り合わせに並べます。ベクタには同じ型の値しか保持できません。要素のリストがある場合にベクタは有用です。例えば、テキストファイルの各行とか、ショッピングカートのアイテムの価格などです。

8.1.1 新しいベクタを生成する

空のベクタを新たに作るには、リスト 8-1 に示すように `Vec::new` 関数を呼びます。

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch08-common-collections/listing-08-01/src/main.rs
:here}}
```

リスト 8-1：新しい空のベクタを生成して `i32` 型の値を保持する

ここで、型注釈を付けていることに注目してください。なぜなら、このベクタに対して何も値を挿入していないので、コンパイラには私たちがどんなデータを保持させるつもりか推測できないからです。これは重要な点です。ベクタはジェネリクスを使用して実装されています。あなた自身の型でどうジェネリクスを使用するかについては第 10 章で解説します。現時点では標準ライブラリで提供される `Vec<T>` 型は、どんな型でも保持でき、ある特定のベクタがある型を保持するとき、その型は山かっこ内に指定されることを知っておいてください。リスト 8-1 では、コンパイラに `v` の `Vec<T>` は `i32` 型の要素を保持すると指示しました。

いったん値を挿入すると、多くの場合、コンパイラは保持させたい値の型を推論できるようになります。ですから、より現実的なコードでは、型注釈を付ける必要はあまりないでしょう。また、初期値を持つ `Vec<T>` を生成する方が一般的ですし、Rust には `vec!` という便利なマクロも用意されています。このマクロは与えた値を保持する新しいベクタを生成します。リスト 8-2 では、1、2、3 という値を持つ新しい `Vec<i32>` を生成しています。整数型を `i32` にしているのは、3 章の「データ型」節で学んだように、これが標準の整数型だからです。

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch08-common-collections/listing-08-02/src/main.rs
:here}}
```

リスト 8-2: 値を含む新しいベクタを生成する

初期値の `i32` 値を与えたので、コンパイラは `v` の型が `Vec<i32>` であると推論でき、型注釈は不要になりました。次はベクタを変更する方法を見ましょう。

8.1.2 ベクタを更新する

ベクタを生成し、それから要素を追加するには、リスト 8-3 に示すように `push` メソッドを使います。

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch08-common-collections/listing-08-03/src/main.rs
:here}}
```

リスト 8-3：`push` メソッドを使用してベクタに値を追加する

第 3 章で説明したとおり、どんな変数でも、その値を変更したかったら `mut` キーワードで可変にする必要があります。中に配置する数値は全て `i32` 型であり、`Rust` はこのことをデータから推論するので、`Vec<i32>` という注釈は不要です。

8.1.3 ベクタをドロップすれば、要素もドロップする

他のあらゆる `struct`（構造体）と同様に、ベクタもスコープを抜ければ解放されます。その様子をリスト 8-4 に示します。

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch08-common-collections/listing-08-04/src/main.rs
:here}}
```

リスト 8-4：ベクタとその要素がドロップされる箇所を示す

ベクタがドロップされると、その中身もドロップされます。つまり、保持されていた整数値が片付けられるということです。これは一見単純そうですが、ベクタの要素に対する参照を使い始めると少し複雑になり得ます。次はそれに挑戦しましょう！

8.1.4 ベクタの要素を読む

ベクタを生成し、更新し、破棄する方法がわかったので、次のステップでは中身を読む方法について学ぶのが良いでしょう。ベクタに保持された値を参照する方法は 2 つあります。これから示す例では、理解を助けるために、それらの関数からの戻り値型を注釈しています。

リスト 8-5 はベクタの値にアクセスする両方の方法として、添え字記法と `get` メソッドが示されています。

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch08-common-collections/listing-08-05/src/main.rs
:here}}
```

リスト 8-5：添え字記法か `get` メソッドを使用してベクタの要素にアクセスする

ここでは 2 つのことに注目してください。1 つ目は、3 番目の要素を得るのに 2 という添え字の値を使用していることです。ベクタは番号で索引化されますが、その番号は 0 から始まります。2 つ目は、3 番目の要素を得る 2 つの方法とは、`&` と `[]` を使用して参照を得るものと、`get` メソッドに引数として添え字を渡して `Option<&T>` を得るものだということです。

`Rust` のベクタには要素を参照する方法が 2 通りあるので、ベクタに含まれない要素の添え字を使おうとしたときのプログラムの振る舞いを選択できます。例として、ベクタに 5 つ要素があるとして、添え字 100 の要素にアクセスを試みた場合、プログラムがどうなるのか確認しましょう。リスト 8-6 に示します。

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch08-common-collections/listing-08-06/src/main.rs
:here}}
```

リスト 8-6：5つの要素を含むベクタの添え字 100 の要素にアクセスしようとする

このコードを走らせると、最初の `[]` メソッドはプログラムをパニックさせます。なぜなら存在しない要素を参照しているからです。このメソッドは、ベクタの終端を超えて要素にアクセスしようとしたときにプログラムをクラッシュさせたい場合に最適です。

`get` メソッドにベクタ外の添え字を渡すと、パニックすることなく `None` を返します。普通の状況でもベクタの範囲外にアクセスする可能性があるなら、このメソッドを使用することになるでしょう。その場合、第 6 章で説明したように、コードは `Some(&element)` か `None` を扱うロジックを持つことになります。例えば、誰かが入力した数値が添え字になるかもしれません。もし誤って大きすぎる値を入力し、プログラムが `None` 値を得たなら、いまベクタに何要素あるかをユーザに教え、正しい値を再入力してもらうこともできます。その方が、ただのタイプミスでプログラムをクラッシュさせるより、ユーザに優しいといえそうです。

プログラムに有効な参照がある場合、借用チェッカー (**borrow checker**) は、(第 4 章で解説しましたが) 所有権と借用規則を強制し、ベクタの中身へのこの参照や他のいかなる参照も有効であり続けることを保証してくれます。同一スコープ上では、可変と不変な参照を同時には存在させられないというルールを思い出してください。このルールはリスト 8-7 でも適用されています。リスト 8-7 ではベクタの最初の要素への不変参照を保持しつつ、終端に要素を追加しようとしています。関数内のここ以降で、この要素（訳注：`first` のこと）を参照しようすると失敗します。

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch08-common-collections/listing-08-07/src/main.rs
:here}}
```

リスト 8-7：要素への参照を保持しつつ、ベクタに要素を追加しようとする

このコードをコンパイルすると、こんなエラーになります。

```
{{#include ../listings/ch08-common-collections/listing-08-07/output.txt}}
```

リスト 8-7 のコードは、一見動きそうに見えるかもしれませんが。なぜ最初の要素への参照が、ベクタの終端への変更を気にかける必要があるのでしょうか？ このエラーはベクタが動作するしくみによるものです。新たな要素をベクタの終端に追加するとき、いまベクタのある場所に全要素を隣り合わせに配置するだけのスペースがないなら、新しいメモリを割り当て、古い要素を新しいスペースにコピーする必要があります。その場合、最初の要素を指す参照は、解放されたメモリを指すことになるでしょう。借用規則がそのような状況に陥らないよう防いでくれるのです。

注釈： `Vec<T>` の実装に関する詳細については、“[The Rustonomicon](#)” を参照してください（訳注：日本語版はこちらです）。

8.1.5 ベクタ内の値を順に処理する

ベクタの要素に順番にアクセスしたいなら、添え字で 1 要素ごとにアクセスするのではなく、全要素を走査することができます。リスト 8-8 で for ループを使い、i32 のベクタの各要素に対する不変な参照を得て、それらを表示する方法を示します。

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch08-common-collections/listing-08-08/src/main.rs
:here}}
```

リスト 8-8：for ループで要素を走査し、ベクタの各要素を表示する

また、全要素に変更を加えるために、可変なベクタの各要素への可変な参照を走査することもできます。リスト 8-9 の for ループでは各要素に 50 を足しています。

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch08-common-collections/listing-08-09/src/main.rs
:here}}
```

リスト 8-9：ベクタの要素への可変な参照を走査する

可変参照が参照している値を変更するには、+= 演算子を使用する前に、参照外し演算子(`*`)を使用して `i` の値にたどり着かないといけません。参照外し演算子については、第 15 章の「参照外し演算子で値までポインタを追いかける」節でより詳しく扱います。

8.1.6 Enum を使って複数の型を保持する

この章の冒頭で、ベクタは同じ型の値しか保持できないと述べました。これは不便なこともあります。異なる型の要素を保持する必要があるユースケースは必ず存在します。幸運なことに、`enum` の列挙子は同じ `enum` の型の中に定義されるので、ベクタに異なる型の要素を保持する必要が出たら、`enum` を定義して使用すればよいのです！

例えば、スプレッドシートのある行から値を得ることを考えます。ここで、その行の中の列には、整数を含むもの、浮動小数点数を含むもの、文字列を含むものがあるとします。列挙子ごとに異なる値の型を保持する `enum` が定義できます。そして、この `enum` の列挙子は全て同じ型、つまり `enum` の型、と考えられるわけです。ですから、その `enum` を保持するベクタを作成でき、結果的に異なる型を保持できるようになるわけです。リスト 8-10 でこれを実演しています。

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch08-common-collections/listing-08-10/src/main.rs
:here}}
```

リスト 8-10：enum を定義して、一つのベクタに異なる型の値を保持する

個々の要素を格納するのにヒープ上で必要となるメモリの量を正確に把握するために、Rust コンパ

イラはコンパイル時にベクタに入る型を知る必要があります。また、このベクタではどんな型が許容されるのか明示できるという副次的な利点があります。もし Rust が、ベクタにどんな型でも保持できることを許していたら、ベクタの要素に対して行われる処理に対して、いくつかの型がエラーを引き起こすかもしれません。enum に加えて match 式を使うことで、第 6 章で説明したとおり、あらゆるケースが処理できることを、Rust がコンパイル時に保証することになります。

プログラムを書いている時点で、プログラムが実行時に取得し、ベクタに格納し得る全ての型を網羅できない場合には、この enum を使ったテクニックはうまくいかないでしょう。代わりにトレイトオブジェクトを使用できます。こちらは第 17 章で取り上げます。

これまでにベクタの代表的な使い方をいくつか紹介しました。標準ライブラリで `Vec<T>` に定義されている多くの有益なメソッドについて、API ドキュメントを必ず確認するようにしてください。例えば、push に加えて、pop というメソッドがあり、これは最後の要素を削除して返します。それでは次のコレクション型である String に移りましょう！

8.2 文字列で UTF-8 でエンコードされたテキストを保持する

第 4 章で文字列について語りましたが、今度はより掘り下げていきましょう。新参者の Rustacean は、3 つの概念の組み合わせにより、文字列でよく行き詰まります: Rust のありうるエラーを晒す性質、多くのプログラマが思っている以上に文字列が複雑なデータ構造であること、そして UTF-8 です。これらの要因が、他のプログラミング言語から移ってきた場合、一見困難に見えるように絡み合うわけです。

コレクションの文脈で文字列を議論することは、有用なことです。なぜなら、文字列はテキストとして解釈された時に有用になる機能を提供するメソッドと、バイトのコレクションで実装されているからです。この節では、生成、更新、読み込みのような全コレクションが持つ String の処理について語ります。また、String が他のコレクションと異なる点についても議論します。具体的には、人間とコンピュータが String データを解釈する方法の差異により、String に添え字アクセスする方法がどう複雑なのかということです。

8.2.1 文字列とは？

まずは、**文字列**という用語の意味を定義しましょう。Rust には、言語の核として 1 種類しか文字列型が存在しません。文字列スライスの `str` で、通常借用された形態 `&str` で見かけます。第 4 章で、**文字列スライス**について語りました。これは、別の場所に格納された UTF-8 エンコードされた文字列データへの参照です。例えば、文字列リテラルは、プログラムのバイナリ出力に格納されるので、文字列スライスになります。

String 型は、言語の核として組み込まれるのではなく、Rust の標準ライブラリで提供されますが、伸長可能、可変、所有権のある UTF-8 エンコードされた文字列型です。Rustacean が Rust において「文字列」を指したら、どちらかではなく、String と文字列スライスの `&str` のことを通常意

味します。この節は、大方、String についてですが、どちらの型も Rust の標準ライブラリで重宝されており、どちらも UTF-8 エンコードされています。

また、Rust の標準ライブラリには、他の文字列型も含まれています。OsString、OsStr、CString、CStr などです。ライブラリクレートにより、文字列データを格納する選択肢はさらに増えます。それらの名前が全て String か Str で終わっているのがわかりますか？ 所有権ありと借用されたバージョンを指しているのです。ちょうど以前見かけた String と &str のようですね。例えば、これらの文字列型は、異なるエンコード方法でテキストを格納していたり、メモリ上の表現が異なったりします。この章では、これらの他の種類の文字列については議論しません；使用方法やどれが最適かについては、API ドキュメントを参照してください。

8.2.2 新規文字列を生成する

Vec<T> で使用可能な処理の多くが String でも使用できます。文字列を生成する new 関数から始めましょうか。リスト 8-11 に示したようにですね。

```
let mut s = String::new();
```

リスト 8-11: 新しい空の String を生成する

この行は、新しい空の s という文字列を生成しています。それからここにデータを読み込むことができるわけです。だいたい、文字列の初期値を決めるデータがあるでしょう。そのために、to_string メソッドを使用します。このメソッドは、文字列リテラルのように、Display トレイトを実装する型ならなんでも使用できます。リスト 8-12 に 2 例、示しています。

```
let data = "initial contents";

let s = data.to_string();

// the method also works on a literal directly:
let s = "initial contents".to_string();
```

リスト 8-12: to_string メソッドを使用して文字列リテラルから String を生成する

このコードは、initial contents (初期値) を含む文字列を生成します。

さらに、String::from 関数を使っても、文字列リテラルから String を生成することができます。リスト 8-13 のコードは、to_string を使用するリスト 8-12 のコードと等価です。

```
let s = String::from("initial contents");
```

リスト 8-13: String::from 関数を使って文字列リテラルから String を作る

文字列は、非常に多くのものに使用されるので、多くの異なる一般的な API を使用でき、たく

さんの選択肢があるわけです。冗長に思われるものもありますが、適材適所です！ 今回の場合、`String::from` と `to_string` は全く同じことをします。従って、どちらを選ぶかは、スタイル次第です。

文字列は UTF-8 エンコードされていることを覚えていますか？ 要するに文字列には、適切にエンコードされていればどんなものでも含めます。リスト 8-14 に示したように。

```
let hello = String::from("عليكم السلام");
let hello = String::from("Dobrý den");
let hello = String::from("Hello");
let hello = String::from("ஹெல்லோ");
let hello = String::from("नमस्ते");
let hello = String::from("こんにちは");
let hello = String::from("안녕하세요");
let hello = String::from("你好");
let hello = String::from("Olá");
let hello = String::from("Здравствуйте");
let hello = String::from("Hola");
```

リスト 8-14: いろんな言語の挨拶を文字列に保持する

これらは全て、有効な `String` の値です。

8.2.3 文字列を更新する

`String` は、サイズを伸ばすことができ、`Vec<T>` の中身のように、追加のデータをプッシュすれば、中身も変化します。付け加えると、`String` 値を連結する `+` 演算子や、`format!` マクロを便利に使用することができます。

8.2.3.1 `push_str` と `push` で文字列に追加する

`push_str` メソッドで文字列スライスを追記することで、`String` を伸ばすことができます。リスト 8-15 の通りです。

```
let mut s = String::from("foo");
s.push_str("bar");
```

リスト 8-15: `push_str` メソッドで `String` に文字列スライスを追記する

この 2 行の後、`s` は `foobar` を含むことになります。`push_str` メソッドは、必ずしも引数の所有権を得なくていいので、文字列スライスを取ります。例えば、リスト 8-16 のコードは、中身を `s1` に追加した後、`s2` を使えなかったら残念だということを示しています。

```
let mut s1 = String::from("foo");
let s2 = "bar";
s1.push_str(s2);
println!("s2 is {}", s2);
```

リスト 8-16: 中身を `String` に追加した後に、文字列スライスを使用する

もし、`push_str` メソッドが `s2` の所有権を奪っていたら、最後の行でその値を出力することは不可能でしょう。ところが、このコードは予想通りに動きます！

`push` メソッドは、1 文字を引数として取り、`String` に追加します。リスト 8-15 は、`push` メソッドで `l` を `String` に追加するコードを呈示しています。

```
let mut s = String::from("lol");
s.push('l');
```

リスト 8-17: `push` で `String` 値に 1 文字を追加する

このコードの結果、`s` は `lol` を含むことになるでしょう。

編者注: `lol` は `laughing out loud` (大笑いする) の頭文字からできたスラングです。日本語の `www` みたいなものですね。

8.2.3.2 + 演算子、または `format!` マクロで連結

2 つのすでにある文字列を組み合わせたいことがよくあります。リスト 8-18 に示したように、一つ目の方法は、+ 演算子を使用することです。

```
let s1 = String::from("Hello, ");
let s2 = String::from("world!");
let s3 = s1 + &s2; // s1はムーブされ、もう使用できないことに注意
```

リスト 8-18: + 演算子を使用して二つの `String` 値を新しい `String` 値にする

このコードの結果、`s3` という文字列は、`Hello, world!` を含むことになるでしょう。追記の後、`s1` がもう有効でなくなった理由と、`s2` への参照を使用した理由は、+ 演算子を使用した時に呼ばれるメソッドのシグニチャと関係があります。+ 演算子は、`add` メソッドを使用し、そのシグニチャは以下のような感じです:

```
fn add(self, s: &str) -> String {
```

これは、標準ライブラリにあるシグニチャそのものではありません: 標準ライブラリでは、`add` はジェネリクスで定義されています。ここでは、ジェネリックな型を具体的な型に置き換えた `add` のシグニチャを見ており、これは、このメソッドを `String` 値とともに呼び出した時に起こることです。ジェネリクスについては、第 10 章で議論します。このシグニチャが、+ 演算子の巧妙な部分を理解するのに必要な手がかりになるのです。

まず、`s2` には `&` がついてます。つまり、`add` 関数の `s` 引数のために最初の文字列に 2 番目の文字列の参照を追加するということです: `String` には `&str` を追加することしかできません。要するに 2 つの `String` 値を追加することはできないのです。でも待ってください。`add` の第 2 引数で指定されているように、`&s2` の型は、`&str` ではなく、`&String` ではないですか。では、なぜ、リスト 8-18 は、コンパイルできるのでしょうか？

`add` 呼び出しで `&s2` を使える理由は、コンパイラが `&String` 引数を `&str` に型強制してくれるためです。`add` メソッド呼び出しの際、コンパイラは、参照外し型強制というものを使用し、ここでは、`&s2` を `&s2[..]` に変えるものと考えることができます。参照外し型強制について詳しくは、第 15 章で議論します。`add` が `s` 引数の所有権を奪わないので、この処理後も `s2` が有効な `String` になるわけです。

2 番目に、シグニチャから `add` は `self` の所有権をもらうことがわかります。`self` には `&` がついていないからです。これはつまり、リスト 8-18 において `s1` は `add` 呼び出しにムーブされ、その後は有効ではなくなるということです。故に、`s3 = s1 + &s2`; は両文字列をコピーして新しいものを作るように見えますが、この文は実際には `s1` の所有権を奪い、`s2` の中身のコピーを追記し、結果の所有権を返すのです。言い換えると、たくさんのコピーをしているように見えますが、違います; 実装は、コピーよりも効率的です。

複数の文字列を連結する必要があると、`+` 演算子の振る舞いは扱いにくくなります:

```
let s1 = String::from("tic");
let s2 = String::from("tac");
let s3 = String::from("toe");

let s = s1 + "-" + &s2 + "-" + &s3;
```

ここで、`s` は `tic-tac-toe` になるでしょう。`+` と `"` 文字のせいで何が起きているのかわかりにくいです。もっと複雑な文字列の連結には、`format!` マクロを使用することができます:

```
let s1 = String::from("tic");
let s2 = String::from("tac");
let s3 = String::from("toe");

let s = format!("{}", s1, s2, s3);
```

このコードでも、`s` は `tic-tac-toe` になります。`format!` マクロは、`println!` と同様の動作をしますが、出力をスクリーンに行う代わりに、中身を `String` で返すのです。`format!` を使用したコードの方がはるかに読みやすく、引数の所有権を奪いません。

8.2.4 文字列に添え字アクセスする

他の多くのプログラミング言語では、文字列中の文字に、添え字で参照してアクセスすることは、有効なコードであり、一般的な処理です。しかしながら、**Rust** において、添え字記法で `String` の一部にアクセスしようとすると、エラーが発生するでしょう。リスト 8-19 の非合法的なコードを考えて

ください。

```
let s1 = String::from("hello");
let h = s1[0];
```

リスト 8-19: 文字列に対して添え字記法を試みる

このコードは、以下のようなエラーに落ち着きます:

```
error[E0277]: the trait bound `std::string::String: std::ops::Index<{Integer}>`
             is not satisfied
(エラー: トレイト境界`std::string::String: std::ops::Index<{Integer}>`が満たされ
             ていません)
|>
3 |>     let h = s1[0];
|>           ^^^^^ the type `std::string::String` cannot be indexed by `{
             Integer}`
|>                               (型`std::string::String`は`{Integer}`で添え字アクセスでき
             ません)
= help: the trait `std::ops::Index<{Integer}>` is not implemented for `std:::
             string::String`
(ヘルプ: `std::ops::Index<{Integer}>`というトレイトが`std::string::String`に対
             して実装されていません)
```

エラーと注釈が全てを物語っています: Rust の文字列は、添え字アクセスをサポートしていないのです。でも、なぜでしょうか? その疑問に答えるには、Rust がメモリにどのように文字列を保持しているかについて議論する必要があります。

8.2.4.1 内部表現

String は Vec<u8> のラップです。リスト 8-14 から適切に UTF-8 でエンコードされた文字列の例をご覧ください。まずは、これ:

```
let len = String::from("Hola").len();
```

この場合、len は 4 になり、これは、文字列“Hola”を保持するベクタの長さが 4 バイトであることを意味します。これらの各文字は、UTF-8 でエンコードすると、1 バイトになるのです。しかし、以下の行ではどうでしょうか? (この文字列は大文字のキリル文字 Ze で始まり、アラビア数字の 3 で始まっていないことに注意してください)

```
let len = String::from("Здравствуйте").len();
```

文字列の長さとは問われたら、あなたは 12 と答えるかもしれません。ところが、Rust の答えは、24 です: “Здравствуйте” を UTF-8 でエンコードすると、この長さになります。各 Unicode スカラー値は、2 バイトの領域を取るからです。それ故に、文字列のバイトの添え字は、必ずしも有効な

Unicode のスカラー値とは相互に関係しないのです。デモ用に、こんな非合法的 Rust コードを考えてください:

```
let hello = "Здравствуйте";
let answer = &hello[0];
```

answer の値は何になるべきでしょうか？ 最初の文字の 3 になるべきでしょうか？ UTF-8 エンコードされた時、3 の最初のバイトは 208、2 番目は 151 になるので、answer は実際、208 になるべきですが、208 は単独では有効な文字ではありません。この文字列の最初の文字を求めている場合、208 を返すことは、ユーザの望んでいるものではないでしょう；しかしながら、Rust には、バイト添え字 0 の位置には、そのデータしかないのです。文字列がラテン文字のみを含む場合でも、ユーザは一般的にバイト値が返ることを望みません: &"hello"[0] がバイト値を返す有効なコードだったら、h ではなく、104 を返すでしょう。予期しない値を返し、すぐには判明しないバグを引き起こさないために、Rust はこのコードを全くコンパイルせず、開発過程の早い段階で誤解を防いでくれるのです。

8.2.4.2 バイトとスカラー値と書記素クラスタ！ なんてこった！

UTF-8 について別の要点は、実際 Rust の観点から文字列を見るには 3 つの関連した方法があるということです: バイトとして、スカラー値として、そして、書記素クラスタ (人間が文字と呼ぶものに一番近い) としてです。

ヒンディー語の単語、“नमस्ते” をデーヴァナーガリー (訳注: サンスクリット語とヒンディー語を書くときに使われる書記法) で表記したものを見たら、以下のような見た目の u8 値のベクタとして保持されます:

```
[224, 164, 168, 224, 164, 174, 224, 164, 184, 224, 165, 141, 224, 164, 164,
224, 165, 135]
```

18 バイトになり、このようにしてコンピュータは最終的にこのデータを保持しているわけです。これを Unicode スカラー値として見たら (Rust の char 型はこれなのですが) このバイトは以下のような見た目になります:

```
['न', 'म', 'स्', 'ते', 'ँ']
```

ここでは、6 つ char 値がありますが、4 番目と 6 番目は文字ではありません: 単独では意味をなさないダイアクリティックです。最後に、書記素クラスタとして見たら、このヒンディー語の単語を作り上げる人間が 4 文字と呼ぶであろうものが得られます:

```
["न", "म", "स्", "ते"]
```

Rust には、データが表す自然言語に関わらず、各プログラムが必要な解釈方法を選択できるように、コンピュータが保持する生の文字列データを解釈する方法がいろいろ用意されています。

Rust で文字を得るのに String に添え字アクセスすることが許されない最後の理由は、添え字アク

セスという処理が常に定数時間 ($O(1)$) になると期待されるからです。しかし、String でそのパフォーマンスを保証することはできません。というのも、合法的な文字がいくつあるか決定するのに、最初から添え字まで中身を走査する必要があるからです。

8.2.5 文字列をスライスする

文字列に添え字アクセスするのは、しばしば悪い考えです。文字列添え字処理の戻り値の型が明瞭ではないからです: バイト値、文字、書記素クラスタ、あるいは文字列スライスにもなります。故に、文字列スライスを生成するのに、添え字を使う必要が本当に出た場合にコンパイラは、もっと特定するよう求めてきます。添え字アクセスを特定し、文字列スライスが欲しいと示唆するためには、`[]` で 1 つの数値により添え字アクセスするのではなく、範囲とともに `[]` を使って、特定のバイトを含む文字列スライスを作ることができます:

```
let hello = "Здравствуйते";  
  
let s = &hello[0..4];
```

ここで、`s` は文字列の最初の 4 バイトを含む `&str` になります。先ほど、これらの文字は各々 2 バイトになると指摘しましたから、`s` は `3д` になります。

`&hello[0..1]` と使用したら、何が起きるでしょうか? 答え: Rust はベクタの非合法的な添え字にアクセスしたかのように、実行時にパニックするでしょう:

```
thread 'main' panicked at 'byte index 1 is not a char boundary; it is inside '3' (bytes 0..2) of `Здравствуйते`, src/libcore/str/mod.rs:2188:4  
( 'main' スレッドは「バイト添え字1は文字の境界ではありません; `Здравствуйते` の '3' (バイト番号0から2) の中です」でパニックしました )
```

範囲を使用して文字列スライスを作る際にはプログラムをクラッシュさせることがあるので、気をつけるべきです。

8.2.6 文字列を走査するメソッド群

幸いなことに、他の方法でも文字列の要素にアクセスすることができます。

もし、個々の Unicode スカラー値に対して処理を行う必要があったら、最適な方法は `chars` メソッドを使用するものです。“नमस्ते” に対して `chars` を呼び出したら、分解して 6 つの `char` 型の値を返すので、各要素にアクセスするには、その結果を走査すればいいわけです:

```
for c in "नमस्ते".chars() {  
    println!("{}", c);  
}
```

このコードは、以下のように出力します:

```

न
म
स
,
त
,

```

bytes メソッドは、各バイトをそのまま返すので、最適になることもあるかもしれません:

```

for b in "नमस्ते".bytes() {
    println!("{}", b);
}

```

このコードは、String をなす 18 バイトを出力します:

```

224
164
// --snip--
165
135

```

ですが、合法的な Unicode スカラー値は、2 バイト以上からなる場合もあることは心得ておいてください。

書記素クラスを文字列から得る方法は複雑なので、この機能は標準ライブラリでは提供されていません。この機能が必要なら、crates.io でクレートを入手可能です。

8.2.7 文字列はそう単純じゃない

まとめると、文字列は込み入っています。プログラミング言語ごとにこの複雑性をプログラマに提示する方法は違います。Rust では、String データを正しく扱うことが、全ての Rust プログラムにとっての既定動作になっているわけであり、これは、プログラマが UTF-8 データを素直に扱う際に、よりしっかり考えないといけないことを意味します。このトレードオフにより、他のプログラミング言語で見えるよりも文字列の複雑性がより露出していますが、ASCII 以外の文字に関するエラーを開発の後半で扱わなければならない可能性が排除されているのです。

もう少し複雑でないものに切り替えていきましょう: ハッシュマップです!

8.3 キーとそれに紐づいた値をハッシュマップに格納する

一般的なコレクションのトリを飾るのは、ハッシュマップです。型 `HashMap<K, V>` は、K 型のキーと V 型の値の対応関係を保持します。これをハッシュ関数を介して行います。ハッシュ関数は、キーと値のメモリ配置方法を決めるものです。多くのプログラミング言語でもこの種のデータ構造はサポートされていますが、しばしば名前が違います。hash、map、object、ハッシュテーブル、連想

配列など、枚挙に暇 (いとま) はありません。

ハッシュマップは、ベクタのように番号ではなく、どんな型にもなりうるキーを使ってデータを参照したいときに有用です。例えば、ゲームにおいて、各チームのスコアをハッシュマップで追いかけることができます。ここで、各キーはチーム名、値が各チームのスコアになります。チーム名が与えられれば、スコアを扱うことができるわけです。

この節でハッシュマップの基礎的な API を見ていきますが、より多くのグッズが標準ライブラリにより、`HashMap<K, V>` 上に定義された関数に隠されています。いつものように、もっと情報が欲しければ、標準ライブラリのドキュメントをチェックしてください。

8.3.1 新規ハッシュマップを生成する

空のハッシュマップを `new` で作り、要素を `insert` で追加することができます。リスト 8-20 では、名前がブルーとイエローの 2 チームのスコアを追いかけています。ブルーチームは 10 点から、イエローチームは 50 点から始まります。

```
use std::collections::HashMap;

let mut scores = HashMap::new();

scores.insert(String::from("Blue"), 10);
scores.insert(String::from("Yellow"), 50);
```

リスト 8-20: ハッシュマップを生成してキーと値を挿入する

最初に標準ライブラリのコレクション部分から `HashMap` を `use` する必要があることに注意してください。今までの 3 つの一般的なコレクションの内、これが最も使用頻度が低いので、初期化処理で自動的にスコープに導入される機能には含まれていません。また、標準ライブラリからのサポートもハッシュマップは少ないです; 例えば、生成するための組み込みマクロがありません。

ベクタと全く同様に、ハッシュマップはデータをヒープに保持します。この `HashMap` はキーが `String` 型、値は `i32` 型です。ベクタのように、ハッシュマップは均質です: キーは全て同じ型でなければならず、値も全て同じ型でなければなりません。

ハッシュマップを生成する別の方法は、タプルのベクタに対して `collect` メソッドを使用するものです。ここで、各タプルは、キーと値から構成されています。`collect` メソッドはいろんなコレクション型にデータをまとめ上げ、そこには `HashMap` も含まれています。例として、チーム名と初期スコアが別々のベクタに含まれていたら、`zip` メソッドを使ってタプルのベクタを作り上げることができ、そこでは「ブルー」は 10 とペアになるなどします。リスト 8-21 に示したように、それから `collect` メソッドを使って、そのタプルのベクタをハッシュマップに変換することができるわけです。

```
use std::collections::HashMap;

let teams = vec![String::from("Blue"), String::from("Yellow")];
```

```
let initial_scores = vec![10, 50];

let scores: HashMap<_, _> = teams.iter().zip(initial_scores.iter()).collect();
```

リスト 8-21: チームのリストとスコアのリストからハッシュマップを作る

ここでは、HashMap<_, _> という型注釈が必要になります。なぜなら、いろんなデータ構造にまとめあげることができ、コンパイラは指定しない限り、どれを所望なのかわからないからです。ところが、キーと値の型引数については、アンダースコアを使用しており、コンパイラはベクタのデータ型に基づいてハッシュマップが含む型を推論することができるのです。

8.3.2 ハッシュマップと所有権

i32 のような Copy トレイトを実装する型について、値はハッシュマップにコピーされます。String のような所有権のある値なら、値はムーブされ、リスト 8-22 でデモされているように、ハッシュマップはそれらの値の所有者になるでしょう。

```
use std::collections::HashMap;

let field_name = String::from("Favorite color");
let field_value = String::from("Blue");

let mut map = HashMap::new();
map.insert(field_name, field_value);
// field_name and field_value are invalid at this point, try using them and
// see what compiler error you get!
// field_nameとfield_valueはこの時点で無効になる。試しに使ってみて
// どんなコンパイルエラーが出るか確認してみてください！
```

リスト 8-22: 一旦挿入されたら、キーと値はハッシュマップに所有されることを示す

insert を呼び出して field_name と field_value がハッシュマップにムーブされた後は、これらの変数を使用することは叶いません。

値への参照をハッシュマップに挿入したら、値はハッシュマップにムーブされません。参照が指している値は、最低でもハッシュマップが有効な間は、有効でなければなりません。これらの問題について詳細には、第 10 章の「ライフタイムで参照を有効化する」節で語ります。

8.3.3 ハッシュマップの値にアクセスする

リスト 8-23 に示したように、キーを get メソッドに提供することで、ハッシュマップから値を取り出すことができます。

```
use std::collections::HashMap;
```

```
let mut scores = HashMap::new();

scores.insert(String::from("Blue"), 10);
scores.insert(String::from("Yellow"), 50);

let team_name = String::from("Blue");
let score = scores.get(&team_name);
```

リスト 8-23: ハッシュマップに保持されたブルーチームのスコアにアクセスする

ここで、score はブルーチームに紐づけられた値になり、結果は `Some(&10)` となるでしょう。結果は `Some` に包まれます。というのも、`get` は `Option<&V>` を返すからです; キーに対応する値がハッシュマップになかったら、`get` は `None` を返すでしょう。プログラムは、この `Option` を第 6 章で講義した方法のどれかで扱う必要があるでしょう。

ベクタのように、`for` ループでハッシュマップのキーと値のペアを走査することができます:

```
use std::collections::HashMap;

let mut scores = HashMap::new();

scores.insert(String::from("Blue"), 10);
scores.insert(String::from("Yellow"), 50);

for (key, value) in &scores {
    println!("{}", key, value);
}
```

このコードは、各ペアを任意の順番で出力します:

```
Yellow: 50
Blue: 10
```

8.3.4 ハッシュマップを更新する

キーと値の数は伸長可能なものの、各キーには 1 回に 1 つの値しか紐づけることができません。ハッシュマップ内のデータを変えたい時は、すでにキーに値が紐づいている場合の扱い方を決めなければなりません。古い値を新しい値で置き換えて、古い値を完全に無視することもできます。古い値を保持して、新しい値を無視し、キーにまだ値がない場合に新しい値を追加するだけにすることもできます。あるいは、古い値と新しい値を組み合わせることもできます。各方法について見ていきましょう!

8.3.4.1 値を上書きする

キーと値をハッシュマップに挿入し、同じキーを異なる値で挿入したら、そのキーに紐づけられている値は置換されます。リスト 8-24 のコードは、insert を二度呼んでいるものの、ハッシュマップには一つのキーと値の組しか含まれません。なぜなら、ブルーチームキーに対する値を 2 回とも挿入しているからです。

```
use std::collections::HashMap;

let mut scores = HashMap::new();

scores.insert(String::from("Blue"), 10);
scores.insert(String::from("Blue"), 25);

println!("{:?}", scores);
```

リスト 8-24: 特定のキーで保持された値を置き換える

このコードは、{"Blue": 25} と出力するでしょう。10 という元の値は上書きされたのです。

8.3.4.2 キーに値がなかった時のみ値を挿入する

特定のキーに値があるか確認することは一般的であり、存在しない時に値を挿入することも一般的です。ハッシュマップには、これを行う entry と呼ばれる特別な API があり、これは、引数としてチェックしたいキーを取ります。この entry メソッドの戻り値は、Entry と呼ばれる enum であり、これは存在したりしなかったりする可能性のある値を表します。イエローチームに対するキーに値が紐づけられているか否か確認したくなったらとしましょう。存在しなかったら、50 という値を挿入したく、ブルーチームに対しても同様です。entry API を使用すれば、コードはリスト 8-25 のようになります。

```
use std::collections::HashMap;

let mut scores = HashMap::new();
scores.insert(String::from("Blue"), 10);

scores.entry(String::from("Yellow")).or_insert(50);
scores.entry(String::from("Blue")).or_insert(50);

println!("{:?}", scores);
```

リスト 8-25: entry メソッドを使ってキーに値がない場合だけ挿入する

Entry 上の or_insert メソッドは、対応する Entry キーが存在した時にそのキーに対する値への可変参照を返すために定義されており、もしなかったら、引数をこのキーの新しい値として挿入し、新しい値への可変参照を返します。このテクニックの方が、そのロジックを自分で書くよりもはるかに

綺麗な上に、**borrow checker** とも親和性が高くなります。

リスト 8-25 のコードを実行すると、{"Yellow": 50, "Blue": 10} と出力するでしょう。最初の entry 呼び出しは、まだイエローチームに対する値がないので、値 50 でイエローチームのキーを挿入します。entry の 2 回目の呼び出しはハッシュマップを変更しません。なぜなら、ブルーチームには既に 10 という値があるからです。

8.3.4.3 古い値に基づいて値を更新する

ハッシュマップの別の一般的なユースケースは、キーの値を探し、古い値に基づいてそれを更新することです。例えば、リスト 8-26 は、各単語があるテキストに何回出現するかを数え上げるコードを示しています。キーに単語を入れたハッシュマップを使用し、その単語を何回見かけたか追いかけるために値を増やします。ある単語を見かけたのが最初だったら、まず 0 という値を挿入します：

```
use std::collections::HashMap;

let text = "hello world wonderful world";

let mut map = HashMap::new();

for word in text.split_whitespace() {
    let count = map.entry(word).or_insert(0);
    *count += 1;
}

println!("{:?}", map);
```

リスト 8-26: 単語とカウントを保持するハッシュマップを使って単語の出現数をカウントする

このコードは、{"world": 2, "hello": 1, "wonderful": 1} と出力するでしょう。or_insert 関数は実際、このキーに対する値への変数参照 (&mut v) を返すのです。ここでその可変参照を count 変数に保持しているので、その値に代入するには、まずアスタリスク (*) で count を参照外ししなければならないのです。この可変参照は、for ループの終端でスコープを抜けるので、これらの変更は全て安全であり、借用規則により許可されるのです。

8.3.5 ハッシュ関数

標準では、HashMap はサービス拒否 (DoS) アタックに対して抵抗を示す暗号的に安全なハッシュ関数を使用します。これは、利用可能な最速のハッシュアルゴリズムではありませんが、パフォーマンスの欠落と引き換えに安全性を得るというトレードオフは、価値があります。自分のコードをプロファイリングして、自分の目的では標準のハッシュ関数は遅すぎると判明したら、異なる **hasher** を指定することで別の関数に切り替えることができます。**hasher** とは、BuildHasher トレイトを実装する型のことです。トレイトについてとその実装方法については、第 10 章で語ります。必ずしも独自の hasher を 1 から作り上げる必要はありません; crates.io には、他の Rust ユーザによって共有

された多くの一般的なハッシュアルゴリズムを実装した **hasher** を提供するライブラリがあります。

8.4 まとめ

ベクタ、文字列、ハッシュマップはデータを保持し、アクセスし、変更する必要があるプログラムで必要になる、多くの機能を提供してくれるでしょう。今なら解決可能なはずの練習問題を用意しました：

- 整数のリストが与えられ、ベクタを使って **mean**(平均値)、**median**(ソートされた時に真ん中に来る値)、**mode**(最も頻繁に出現する値; ハッシュマップがここでは有効活用できるでしょう) を返してください。
- 文字列をピッグ・ラテン (訳注：英語の言葉遊びの一つ) に変換してください。各単語の最初の子音は、単語の終端に移り、“ay” が足されます。従って、“first” は“irst-fay” になります。ただし、母音で始まる単語には、お尻に“hay” が付け足されます (“apple” は“apple-hay” になります)。UTF-8 エンコードに関する詳細を心に留めておいてください！
- ハッシュマップとベクタを使用して、ユーザに会社の部署に雇用者の名前を追加させられるテキストインターフェイスを作ってください。例えば、“Add Sally to Engineering”(開発部門にサリーを追加) や“Add Amir to Sales”(販売部門にアミールを追加) などです。それからユーザに、ある部署にいる人間の一覧や部署ごとにアルファベット順で並べ替えられた会社の全人間の一覧を扱わせてあげてください。

標準ライブラリの API ドキュメントには、この練習問題に有用な、ベクタ、文字列、ハッシュマップのメソッドが解説されています。

処理が失敗することもあるような、より複雑なプログラムに入り込んできています；ということは、エラーの処理法について議論するのにぴったりということです。次はそれをします！

第 9 章

エラー処理

Rust の信頼性への傾倒は、エラー処理にも及びます。ソフトウェアにおいて、エラーは生きている証しです。従って、Rust には何かがおかしくなる場面を扱う機能がたくさんあります。多くの場面で、コンパイラは、プログラマにエラーの可能性を知り、コードのコンパイルが通るまでに何かしら対応を行うことを要求してきます。この要求により、エラーを発見し、コードを実用に供する前に適切に対処していることを確認することでプログラムを頑健なものにしてくれるのです！

Rust では、エラーは大きく二つに分類されます：**回復可能**と**回復不能**なエラーです。ファイルが見つからないなどの回復可能なエラーには、問題をユーザに報告し、処理を再試行することが合理的になります。回復不能なエラーは、常にバグの兆候です。例えば、配列の境界を超えた箇所にアクセスしようとするなどです。

多くの言語では、この 2 種のエラーを区別することはなく、例外などの機構を使用して同様に扱います。Rust には例外が存在しません。代わりに、回復可能なエラーには `Result<T, E>` 値があり、プログラムが回復不能なエラーに遭遇した時には、実行を中止する `panic!` マクロがあります。この章では、まず `panic!` の呼び出しを講義し、それから `Result<T, E>` を戻り値にする話をします。加えて、エラーからの回復を試みるか、実行を中止するか決定する際に考慮すべき事項についても、探究しましょう。

9.1 `panic!` で回復不能なエラー

時として、コードで悪いことが起きるものです。そして、それに対してできることは何もありません。このような場面で、Rust には `panic!` マクロが用意されています。`panic!` マクロが実行されると、プログラムは失敗のメッセージを表示し、スタックを巻き戻し掃除して、終了します。これが最もありふれて起こるのは、何らかのバグが検出された時であり、プログラマには、どうエラーを処理すればいいか明確ではありません。

9.1.1 パニックに対してスタックを巻き戻すか異常終了するか

標準では、パニックが発生すると、プログラムは巻き戻しを始めます。つまり、言語がスタックを遡り、遭遇した各関数のデータを片付けるということです。しかし、この遡りと片付けはすべきことが多くなります。対立案は、即座に異常終了し、片付けをせずにプログラムを終了させることです。そうすると、プログラムが使用していたメモリは、OS が片付ける必要があります。プロジェクトにおいて、実行可能ファイルを極力小さくする必要がある場合は、**Cargo.toml** ファイルの適切な `[profile]` 欄に `panic = 'abort'` を追記することで、パニック時に巻き戻しから異常終了するように切り替えることができます。例として、リリースモード時に異常終了するようにしたければ、以下を追記してください:

```
[profile.release]
panic = 'abort'
```

単純なプログラムで `panic!` の呼び出しを試してみましょう:

ファイル名: `src/main.rs`

```
fn main() {
    panic!("crash and burn"); //クラッシュして炎上
}
```

このプログラムを実行すると、以下のような出力を目の当たりにするでしょう:

```
$ cargo run
   Compiling panic v0.1.0 (file:///projects/panic)
   Finished dev [unoptimized + debuginfo] target(s) in 0.25 secs
   Running `target/debug/panic`
thread 'main' panicked at 'crash and burn', src/main.rs:2:4
('main' スレッドはsrc/main.rs:2:4の「クラッシュして炎上」でパニックしました)
note: Run with `RUST_BACKTRACE=1` for a backtrace.
```

`panic!` の呼び出しが、最後の 2 行に含まれるエラーメッセージを発生させているのです。1 行目にパニックメッセージとソースコード中でパニックが発生した箇所を示唆しています: **src/main.rs:2:4** は、**src/main.rs** ファイルの 2 行目 4 文字目であることを示しています。

この場合、示唆される行は、自分のコードの一部で、その箇所を見に行けば、`panic!` マクロ呼び出しがあるわけです。それ以外では、`panic!` 呼び出しが、自分のコードが呼び出しているコードの一部になっている可能性もあるわけです。エラーメッセージで報告されるファイル名と行番号が、結果的に `panic!` 呼び出しに導いた自分のコードの行ではなく、`panic!` マクロが呼び出されている他人のコードになるでしょう。`panic!` 呼び出しの発生元である関数のバックトレースを使用して、問題を起こしている自分のコードの箇所を割り出すことができます。バックトレースがどんなものか、次に議

論しましょう。

9.1.2 panic! バックトレースを使用する

別の例を眺めて、自分のコードでマクロを直接呼び出す代わりに、コードに存在するバグにより、ライブラリで panic! 呼び出しが発生するとどんな感じなのか確かめてみましょう。リスト 9-1 は、添え字でベクタの要素にアクセスを試みる何らかのコードです。

ファイル名: src/main.rs

```
fn main() {  
    let v = vec![1, 2, 3];  
  
    v[99];  
}
```

リスト 9-1: ベクタの境界を超えて要素へのアクセスを試み、panic! の呼び出しを発生させる

ここでは、ベクタの 100 番目の要素 (添え字は 0 始まりなので添え字 99) にアクセスを試みていますが、ベクタには 3 つしか要素がありません。この場面では、Rust はパニックします。[] の使用は、要素を返すと想定されるものの、無効な添え字を渡せば、ここで Rust が返せて正しいと思われる要素は何もないわけです。

他の言語 (C など) では、この場面で欲しいものではないにもかかわらず、まさしく要求したものを返そうとしてきます: メモリがベクタに属していないにもかかわらず、ベクタ内のその要素に対応するメモリ上の箇所にあるものを何か返してくるのです。これは、**バッファ外読み出し (buffer overread)**; 訳注: バッファ読みすぎとも解釈できるか) と呼ばれ、攻撃者が、配列の後に格納された読めるべきでないデータを読み出せるように添え字を操作できたら、セキュリティ脆弱性につながる可能性があります。

この種の脆弱性からプログラムを保護するために、存在しない添え字の要素を読もうとしたら、Rust は実行を中止し、継続を拒みます。試して確認してみましょう:

```
$ cargo run  
Compiling panic v0.1.0 (file:///projects/panic)  
Finished dev [unoptimized + debuginfo] target(s) in 0.27 secs  
Running `target/debug/panic`  
thread 'main' panicked at 'index out of bounds: the len is 3 but the index is  
99', /checkout/src/liballoc/vec.rs:1555:10  
( 'main' スレッドは、/checkout/src/liballoc/vec.rs:1555:10 の  
「境界外番号: 長さは3なのに、添え字は99です」でパニックしました )  
note: Run with `RUST_BACKTRACE=1` for a backtrace.
```

このエラーは、自分のファイルではない **vec.rs** ファイルを指しています。標準ライブラリの `Vec<T>` の実装です。ベクタ `v` に対して [] を使った時に走るコードは、**vec.rs** に存在し、ここで実際

に `panic!` が発生しているのです。

その次の注釈行は、`RUST_BACKTRACE` 環境変数をセットして、まさしく何が起き、エラーが発生したのかのバックトレースを得られることを教えてくれています。**バックトレース**とは、ここに至るまでに呼び出された全関数の一覧です。**Rust** のバックトレースも、他の言語同様に動作します: バックトレースを読むコツは、頭からスタートして自分のファイルを見つけるまで読むことです。そこが、問題の根源になるのです。自分のファイルを言及している箇所以前は、自分のコードで呼び出したコードになります; 以後は、自分のコードで呼び出しているコードになります。これらの行には、**Rust** の核となるコード、標準ライブラリのコード、使用しているクレートなどが含まれるかもしれません。`RUST_BACKTRACE` 環境変数を `0` 以外の値にセットして、バックトレースを出力してみましょう。リスト 9-2 のような出力が得られるでしょう。

```
$ RUST_BACKTRACE=1 cargo run
  Finished dev [unoptimized + debuginfo] target(s) in 0.0 secs
  Running `target/debug/panic`
thread 'main' panicked at 'index out of bounds: the len is 3 but the index is
  99', /checkout/src/liballoc/vec.rs:1555:10
stack backtrace:
 0: std::sys::imp::backtrace::tracing::imp::unwind_backtrace
    at /checkout/src/libstd/sys/unix/backtrace/tracing/gcc_s.rs:49
 1: std::sys_common::backtrace::_print
    at /checkout/src/libstd/sys_common/backtrace.rs:71
 2: std::panicking::default_hook::{{closure}}
    at /checkout/src/libstd/sys_common/backtrace.rs:60
    at /checkout/src/libstd/panicking.rs:381
 3: std::panicking::default_hook
    at /checkout/src/libstd/panicking.rs:397
 4: std::panicking::rust_panic_with_hook
    at /checkout/src/libstd/panicking.rs:611
 5: std::panicking::begin_panic
    at /checkout/src/libstd/panicking.rs:572
 6: std::panicking::begin_panic_fmt
    at /checkout/src/libstd/panicking.rs:522
 7: rust_begin_unwind
    at /checkout/src/libstd/panicking.rs:498
 8: core::panicking::panic_fmt
    at /checkout/src/libcore/panicking.rs:71
 9: core::panicking::panic_bounds_check
    at /checkout/src/libcore/panicking.rs:58
10: <alloc::vec::Vec<T> as core::ops::index::Index<usize>>::index
    at /checkout/src/liballoc/vec.rs:1555
11: panic::main
    at src/main.rs:4
12: __rust_maybe_catch_panic
    at /checkout/src/libpanic_unwind/lib.rs:99
13: std::rt::lang_start
    at /checkout/src/libstd/panicking.rs:459
    at /checkout/src/libstd/panic.rs:361
    at /checkout/src/libstd/rt.rs:61
14: main
```

```
15: __libc_start_main
16: <unknown>
```

リスト 9-2: RUST_BACKTRACE 環境変数をセットした時に表示される、panic! 呼び出しが生成するバックトレース

出力が多いですね！ OS や Rust のバージョンによって、出力の詳細は変わる可能性があります。この情報とともに、バックトレースを得るには、デバッグシンボルを有効にしなければなりません。デバッグシンボルは、`--release` オプションなしで `cargo build` や `cargo run` を使用していれば、標準で有効になり、ここではそうなっています。

リスト 9-2 の出力で、バックトレースの 11 行目が問題発生箇所を指し示しています: **src/main.rs** の 4 行目です。プログラムにパニックしてほしいくなければ、自分のファイルについて言及している最初の行で示されている箇所が、どのようにパニックを引き起こす値でこの箇所にたどり着いたか割り出すために調査を開始すべき箇所になります。バックトレースの使用法を模擬するためにわざとパニックするコードを書いたリスト 9-1 において、パニックを解消する方法は、3 つしか要素のないベクタの添え字 99 の要素を要求しないことです。将来コードがパニックしたら、パニックを引き起こすどんな値でコードがどんな動作をしているのかと、代わりにコードは何をすべきなのかを算出する必要がありますでしょう。

この章の後ほど、「panic! するか panic! するまいか」節で panic! とエラー状態を扱うのに panic! を使うべき時と使わぬべき時に戻ってきます。次は、Result を使用してエラーから回復する方法を見ましょう。

9.2 Result で回復可能なエラー

多くのエラーは、プログラムを完全にストップさせるほど深刻ではありません。時々、関数が失敗した時に、容易に解釈し、対応できる理由によることがあります。例えば、ファイルを開こうとして、ファイルが存在しないために処理が失敗したら、プロセスを停止するのではなく、ファイルを作成したいことがあります。

第 2 章の「Result 型で失敗する可能性に対処する」で Result `enum` が以下のように、Ok と Err の 2 列挙子からなるよう定義されていることを思い出してください:

```
enum Result<T, E> {
    Ok(T),
    Err(E),
}
```

T と E は、ジェネリックな型引数です: ジェネリクスについて詳しくは、第 10 章で議論します。たった今知っておく必要があることは、T が成功した時に Ok 列挙子に含まれて返される値の型を表すことと、E が失敗した時に Err 列挙子に含まれて返されるエラーの型を表すことです。Result はこのようなジェネリックな型引数を含むので、標準ライブラリ上に定義されている Result 型や関数など

を、成功した時とエラーの時に返したい値が異なるような様々な場面で使用できるのです。

関数が失敗する可能性があるために `Result` 値を返す関数を呼び出しましょう: リスト 9-3 では、ファイルを開こうとしています。

ファイル名: `src/main.rs`

```
use std::fs::File;

fn main() {
    let f = File::open("hello.txt");
}
```

リスト 9-3: ファイルを開く

`File::open` が `Result` を返すとどう知るのでしょくか? 標準ライブラリの API ドキュメントを参照することもできますし、コンパイラに尋ねることもできます! `f` に関数の戻り値ではないと判明している型注釈を与えて、コードのコンパイルを試みれば、コンパイラは型が合わないと教えてくれるでしょう。そして、エラーメッセージは、`f` の実際の型を教えてくれるでしょう。試してみましょう! `File::open` の戻り値の型は `u32` ではないと判明しているので、`let f` 文を以下のように変更しましょう:

```
let f: u32 = File::open("hello.txt");
```

これでコンパイルしようとする、以下のような出力が得られます:

```
error[E0308]: mismatched types
(エラー: 型が合いません)
--> src/main.rs:4:18
   |
4 |     let f: u32 = File::open("hello.txt");
   |                   ^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^ expected u32, found enum
   |
   = note: expected type `u32`
   |
   = note: found type `std::result::Result<std::fs::File, std::io::Error>`
   |
   = note: (実際の型は `std::result::Result<std::fs::File, std::io::Error>` です)
```

これにより、`File::open` 関数の戻り値の型は、`Result<T, E>` であることがわかります。ジェネリック引数の `T` は、ここでは成功値の型 `std::fs::File` で埋められていて、これはファイルハンドルです。エラー値で使用されている `E` の型は、`std::io::Error` です。

この戻り値型は、`File::open` の呼び出しが成功し、読み込みと書き込みを行えるファイルハンドルを返す可能性があることを意味します。また、関数呼び出しは失敗もする可能性があります: 例えば、ファイルが存在しない可能性、ファイルへのアクセス権限がない可能性です。`File::open` には成功し

たか失敗したかを知らせる方法とファイルハンドルまたは、エラー情報を与える方法が必要なのです。この情報こそが `Result` `enum` が伝達するものなのです。

`File::open` が成功した場合、変数 `f` の値はファイルハンドルを含む `Ok` インスタンスになります。失敗した場合には、発生したエラーの種類に関する情報をより多く含む `Err` インスタンスが `f` の値になります。

リスト 9-3 のコードに追記をして `File::open` が返す値に応じて異なる動作をする必要があります。リスト 9-4 に基礎的な道具を使って `Result` を扱う方法を一つ示しています。第 6 章で議論した `match` 式です。

ファイル名: `src/main.rs`

```
use std::fs::File;

fn main() {
    let f = File::open("hello.txt");

    let f = match f {
        Ok(file) => file,
        Err(error) => {
            // ファイルを開く際に問題がありました
            panic!("There was a problem opening the file: {:?}", error)
        },
    };
}
```

リスト 9-4: `match` 式を使用して返却される可能性のある `Result` 列挙子进行处理する

`Option` `enum` のように、`Result` `enum` とその列挙子は、初期化处理でインポートされているので、`match` アーム内で `Ok` と `Err` 列挙子の前に `Result::` を指定する必要がないことに注目してください。

ここでは、結果が `Ok` の時に、`Ok` 列挙子から中身の `file` 値を返すように指示し、それからそのファイルハンドル値を変数 `f` に代入しています。`match` の後には、ファイルハンドルを使用して読み込んだり書き込むことができるわけです。

`match` のもう一つのアームは、`File::open` から `Err` 値が得られたケース进行处理しています。この例では、`panic!` マクロを呼び出すことを選択しています。カレントディレクトリに **hello.txt** というファイルがなく、このコードを走らせたなら、`panic!` マクロからの以下のような出力を目の当たりにするでしょう：

```
thread 'main' panicked at 'There was a problem opening the file: Error { repr:
0s { code: 2, message: "No such file or directory" } }', src/main.rs:9:12
('main' スレッドは、src/main.rs:9:12 の「ファイルを開く際に問題がありました: Error
{ repr:
0s { code: 2, message: "そのような名前のファイルまたはディレクトリはありません
"}}」でパニックしました)
```

通常通り、この出力は、一体何がおかしくなったのかを物語っています。

9.2.1 色々なエラーにマッチする

リスト 9-4 のコードは、`File::open` が失敗した理由にかかわらず `panic!` します。代わりにしたいことは、失敗理由によって動作を変えることです: ファイルが存在しないために `File::open` が失敗したら、ファイルを作成し、その新しいファイルへのハンドルを返したいです。他の理由 (例えばファイルを開く権限がなかったなど) で、`File::open` が失敗したら、リスト 9-4 のようにコードには `panic!` してほしいのです。リスト 9-5 を眺めてください。ここでは `match` に別のアームを追加しています。

ファイル名: `src/main.rs`

```
use std::fs::File;
use std::io::ErrorKind;

fn main() {
    let f = File::open("hello.txt");

    let f = match f {
        Ok(file) => file,
        Err(ref error) if error.kind() == ErrorKind::NotFound => {
            match File::create("hello.txt") {
                Ok(fc) => fc,
                Err(e) => {
                    panic!(
                        //ファイルを作成しようとしたが、問題がありました
                        "Tried to create file but there was a problem: {:?}",
                        e
                    )
                },
            }
        },
        Err(error) => {
            panic!(
                "There was a problem opening the file: {:?}",
                error
            )
        },
    };
}
```

リスト 9-5: 色々な種類のエラーを異なる方法で扱う

`File::open` が `Err` 列挙子に含めて返す値の型は、`io::Error` であり、これは標準ライブラリで提供されている構造体です。この構造体には、呼び出すと `io::ErrorKind` 値が得られる `kind` メソッドがあります。`io::ErrorKind` という `enum` は、標準ライブラリで提供されていて、`io` 処理の結果発生する可能性のある色々な種類のエラーを表す列挙子があります。使用したい列挙子は、

`ErrorKind::NotFound` で、これは開こうとしているファイルがまだ存在しないことを示唆します。

`if error.kind() == ErrorKind::NotFound` という条件式は、**マッチガード**と呼ばれます: アームのパターンをさらに洗練する `match` アーム上のおまけの条件式です。この条件式は、そのアームのコードが実行されるには真でなければいけないのです; そうでなければ、パターンマッチングは継続し、`match` の次のアームを考慮します。パターンの `ref` は、`error` がガード条件式にムーブされないように必要ですが、ただ単にガード式に参照されます。 `ref` を使用して `&` の代わりにパターン内で参照を作っている理由は、第18章で詳しく講義します。手短かに言えば、パターンの文脈において、`&` は参照にマッチし、その値を返しますが、`ref` は値にマッチし、それへの参照を返すということなのです。

マッチガードで精査したい条件は、`error.kind()` により返る値が、`ErrorKind` `enum` の `NotFound` 列挙子であるかということです。もしそうなら、`File::create` でファイル作成を試みます。ところが、`File::create` も失敗する可能性があるので、内部にも `match` 式を追加する必要があります。ファイルが開けないなら、異なるエラーメッセージが出力されるでしょう。外側の `match` の最後のアームは同じまななので、ファイルが存在しないエラー以外ならプログラムはパニックします。

9.2.2 エラー時にパニックするショートカット: `unwrap` と `expect`

`match` の使用は、十分に仕事をしてくれますが、いささか冗長になり得る上、必ずしも意図をよく伝えるとは限りません。 `Result<T, E>` 型には、色々な作業をするヘルパーメソッドが多く定義されています。それらの関数の一つは、`unwrap` と呼ばれますが、リスト9-4 で書いた `match` 式と同じように実装された短絡メソッドです。 `Result` 値が `Ok` 列挙子なら、`unwrap` は `Ok` の中身を返します。 `Result` が `Err` 列挙子なら、`unwrap` は `panic!` マクロを呼んでくれます。こちらが実際に動作している `unwrap` の例です:

ファイル名: `src/main.rs`

```
use std::fs::File;

fn main() {
    let f = File::open("hello.txt").unwrap();
}
```

このコードを **hello.txt** ファイルなしで走らせたなら、`unwrap` メソッドが行う `panic!` 呼び出しからのエラーメッセージを目の当たりにするでしょう:

```
thread 'main' panicked at 'called `Result::unwrap()` on an `Err` value: Error {
repr: Os { code: 2, message: "No such file or directory" } }',
src/libcore/result.rs:906:4
('main' スレッドは、src/libcore/result.rs:906:4の
「`Err` 値に対して `Result::unwrap()` が呼び出されました: Error{
repr: Os { code: 2, message: "そのようなファイルまたはディレクトリはありません"
} }」でパニックしました)
```

別のメソッド `expect` は、`unwrap` に似ていますが、`panic!` のエラーメッセージも選択させてくれます。`unwrap` の代わりに `expect` を使用して、いいエラーメッセージを提供すると、意図を伝え、パニックの原因をたどりやすくしてくれます。`expect` の表記はこんな感じです:

ファイル名: `src/main.rs`

```
use std::fs::File;

fn main() {
    // hello.txtを開くのに失敗しました
    let f = File::open("hello.txt").expect("Failed to open hello.txt");
}
```

`expect` を `unwrap` と同じように使用しています: ファイルハンドルを返したり、`panic!` マクロを呼び出しています。`expect` が `panic!` 呼び出しで使用するエラーメッセージは、`unwrap` が使用するデフォルトの `panic!` メッセージではなく、`expect` に渡した引数になります。以下のようになります:

```
thread 'main' panicked at 'Failed to open hello.txt: Error { repr: Os { code: 2, message: "No such file or directory" } }', src/libcore/result.rs:906:4
```

このエラーメッセージは、指定したテキストの `hello.txt`を開くのに失敗しました で始まっているので、コード内のどこでエラーメッセージが出力されたのかより見つけやすくなるでしょう。複数箇所でも `unwrap` を使用していたら、ズバリどの `unwrap` がパニックを引き起こしているのか理解するのは、より時間がかかる可能性があります。パニックする `unwrap` 呼び出しは全て、同じメッセージを出力するからです。

9.2.3 エラーを委譲する

失敗する可能性のある何かを呼び出す実装をした関数を書く際、関数内でエラーを処理する代わりに、呼び出し元がどうするかを決められるようにエラーを返すことができます。これはエラーの委譲として認知され、自分のコードの文脈で利用可能なものよりも、エラーの処理法を規定する情報やロジックがより多くある呼び出し元のコードに制御を明け渡します。

例えば、リスト 9-6 の関数は、ファイルからユーザ名を読み取ります。ファイルが存在しなかったり、読み込みできなければ、この関数はそのようなエラーを呼び出し元のコードに返します。

ファイル名: `src/main.rs`

```
use std::io;
use std::io::Read;
use std::fs::File;

fn read_username_from_file() -> Result<String, io::Error> {
    let f = File::open("hello.txt");
```

```
let mut f = match f {
    Ok(file) => file,
    Err(e) => return Err(e),
};

let mut s = String::new();

match f.read_to_string(&mut s) {
    Ok(_) => Ok(s),
    Err(e) => Err(e),
}
}
```

リスト 9-6: match でエラーを呼び出し元のコードに返す関数

まずは、関数の戻り値型に注目してください: `Result<String, io::Error>` です。つまり、この関数は、`Result<T, E>` 型の値を返しているということです。ここでジェネリック引数の `T` は、具体型 `String` で埋められ、ジェネリック引数の `E` は具体型 `io::Error` で埋められています。この関数が何の問題もなく成功すれば、この関数を呼び出したコードは、`String` (関数がファイルから読み取ったユーザ名) を保持する `Ok` 値を受け取ります。この関数が何か問題に行き当たったら、呼び出し元のコードは `io::Error` のインスタンスを保持する `Err` 値を受け取り、この `io::Error` は問題の内容に関する情報をより多く含んでいます。関数の戻り値の型に `io::Error` を選んだのは、この関数本体で呼び出している失敗する可能性のある処理が両方とも偶然この型をエラー値として返すからです: `File::open` 関数と `read_to_string` メソッドです。

関数の本体は、`File::open` 関数を呼び出すところから始まります。そして、リスト 9-4 の `match` に似た `match` で返ってくる `Result` 値を扱い、`Err` ケースに `panic!` を呼び出すだけの代わりに、この関数から早期リターンしてこの関数のエラー値として、`File::open` から得たエラー値を呼び出し元に渡し戻します。`File::open` が成功すれば、ファイルハンドルを変数 `f` に保管して継続します。

さらに、変数 `s` に新規 `String` を生成し、`f` のファイルハンドルに対して `read_to_string` を呼び出して、ファイルの中身を `s` に読み出します。`File::open` が成功しても、失敗する可能性があるので、`read_to_string` メソッドも、`Result` を返却します。その `Result` を処理するために別の `match` が必要になります: `read_to_string` が成功したら、関数は成功し、今は `Ok` に包まれた `s` に入っているファイルのユーザ名を返却します。`read_to_string` が失敗したら、`File::open` の戻り値を扱った `match` でエラー値を返したように、エラー値を返します。しかし、明示的に `return` を述べる必要はありません。これが関数の最後の式だからです。

そうしたら、呼び出し元のコードは、ユーザ名を含む `Ok` 値か、`io::Error` を含む `Err` 値を得て扱います。呼び出し元のコードがそれらの値をどうするかはわかりません。呼び出しコードが `Err` 値を得たら、例えば、`panic!` を呼び出してプログラムをクラッシュさせたり、デフォルトのユーザ名を使ったり、ファイル以外の場所からユーザ名を検索したりできるでしょう。呼び出し元のコードが実際に何をしようとするかについて、十分な情報がないので、成功や失敗情報を全て委譲して適切に扱えるようにするのです。

Rust において、この種のエラー委譲は非常に一般的なもので、Rust にはこれをしやすくする ? 演算子が用意されています。

9.2.3.1 エラー委譲のショートカット: ?演算子

リスト 9-7 もリスト 9-6 と同じ機能を有する `read_username_from_file` の実装ですが、こちらは ? 演算子を使用しています:

ファイル名: `src/main.rs`

```
use std::io;
use std::io::Read;
use std::fs::File;

fn read_username_from_file() -> Result<String, io::Error> {
    let mut f = File::open("hello.txt")?;
    let mut s = String::new();
    f.read_to_string(&mut s)?;
    Ok(s)
}
```

リスト 9-7: ? 演算子でエラーを呼び出し元に返す関数

`Result` 値の直後に置かれた ? は、リスト 9-6 で `Result` 値を処理するために定義した `match` 式とほぼ同じように動作します。`Result` の値が `Ok` なら、`Ok` の中身がこの式から返ってきて、プログラムは継続します。値が `Err` なら、`return` キーワードを使ったかのように関数全体から `Err` の中身が返ってくるので、エラー値は呼び出し元のコードに委譲されます。

リスト 9-6 の `match` 式と ? 演算子には違いがあります: ? を使ったエラー値は、標準ライブラリの `From` トレイトで定義され、エラーの型を別のものに変換する `from` 関数を通ることで、? 演算子が `from` 関数を呼び出すと、受け取ったエラー型が現在の関数の戻り値型で定義されているエラー型に変換されます。これは、個々がいろんな理由で失敗する可能性があるのにも関わらず、関数が失敗する可能性を全て一つのエラー型で表現して返す時に有用です。各エラー型が `from` 関数を実装して戻り値のエラー型への変換を定義している限り、? 演算子の変換の面倒を自動的に見てくれます。

リスト 9-7 の文脈では、`File::open` 呼び出し末尾の ? は `Ok` の中身を変数 `f` に返します。エラーが発生したら、? 演算子により関数全体から早期リターンし、あらゆる `Err` 値を呼び出し元に与えます。同じ法則が `read_to_string` 呼び出し末尾の ? にも適用されます。

? 演算子により定型コードの多くが排除され、この関数の実装を単純にしてくれます。リスト 9-8 で示したように、? の直後のメソッド呼び出しを連結することでさらにこのコードを短くすることさえできます。

ファイル名: `src/main.rs`

```
use std::io;
```

```
use std::io::Read;
use std::fs::File;

fn read_username_from_file() -> Result<String, io::Error> {
    let mut s = String::new();

    File::open("hello.txt")?.read_to_string(&mut s)?;

    Ok(s)
}
```

リスト 9-8: ? 演算子の後のメソッド呼び出しを連結する

s の新規 String の生成を関数の冒頭に移動しました; その部分は変化していません。変数 f を生成する代わりに、read_to_string の呼び出しを直接 File::open("hello.txt")? の結果に連結させました。それでも、read_to_string 呼び出しの末尾には ? があり、File::open と read_to_string 両方が成功したら、エラーを返すというよりもそれでも、s にユーザ名を含む Ok 値を返します。機能もまたリスト 9-6 及び、9-7 と同じです; ただ単に異なるバージョンのよりエルゴノミックな書き方なのです。

9.2.3.2 ? 演算子は、Result を返す関数でしか使用できない

? 演算子は戻り値に Result を持つ関数でしか使用できません。というのも、リスト 9-6 で定義した match 式と同様に動作するよう、定義されているからです。Result の戻り値型を要求する match の部品は、return Err(e) なので、関数の戻り値はこの return と互換性を保つために Result でなければならないのです。

main 関数で ? 演算子を使用したらどうなるか見てみましょう。main 関数は、戻り値が () でしたね:

```
use std::fs::File;

fn main() {
    let f = File::open("hello.txt");
}
```

このコードをコンパイルすると、以下のようなエラーメッセージが得られます:

```
error[E0277]: the trait bound `(): std::ops::Try` is not satisfied
(エラー: `(): std::ops::Try` というトレイト境界が満たされていません)
--> src/main.rs:4:13
  |
4 |     let f = File::open("hello.txt");
  |               ^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^
  |               |
  |               the `?` operator can only be used in a function that returns
  |               `Result` (or another type that implements `std::ops::Try`)
  |               in this macro invocation
  |               (このマクロ呼び出しの `Result` (かまたは `std::ops::Try` を実装する
```

```
他の型)を返す関数でしか`?`演算子は使用できません)
|
= help: the trait `std::ops::Try` is not implemented for `()`
(助言: `std::ops::Try`トレイトは`() `には実装されていません)
= note: required by `std::ops::Try::from_error`
(注釈: `std::ops::Try::from_error`で要求されています)
```

このエラーは、? 演算子は Result を返す関数でしか使用が許可されないと指摘しています。Result を返さない関数では、Result を返す別の関数を呼び出した時、? 演算子を使用してエラーを呼び出し元に委譲する可能性を生み出す代わりに、match か Result のメソッドのどれかを使う必要があるでしょう。

さて、panic! 呼び出しや Result を返す詳細について議論し終えたので、どんな場合にどちらを使うのが適切か決める方法についての話に戻しましょう。

9.3 panic!すべきかするまいか

では、panic! すべき時と Result を返すべき時はどう決定すればいいのでしょうか？ コードがパニックしたら、回復する手段はありません。回復する可能性のある手段の有る無しに関わらず、どんなエラー場面でも panic! を呼ぶことはできますが、そうすると、呼び出す側のコードの立場に立ってこの場面は回復不能だという決定を下すことになります。Result 値を返す決定をすると、決断を下すのではなく、呼び出し側に選択肢を与えることになります。呼び出し側は、場面に合わせて回復を試みることを決定したり、この場合の Err 値は回復不能と断定して、panic! を呼び出し、回復可能だったエラーを回復不能に変換することもできます。故に、Result を返却することは、失敗する可能性のある関数を定義する際には、いい第一選択肢になります。

稀な場面では、Result を返すよりもパニックするコードを書く方がより適切になることもあります。例やプロトタイプコード、テストでパニックするのが適切な理由を探ってみましょう。それからコンパイラではありえない失敗だと気づけなくとも、人間なら気づける場面を議論しましょう。そして、ライブラリコードでパニックするか決定する方法についての一般的なガイドラインで結論づけましょう。

9.3.1 例、プロトタイプコード、テスト

例を記述して何らかの概念を具体化している時、頑健なエラー処理コードも例に含むことは、例の明瞭さを欠くことになりかねません。例において、unwrap などのパニックする可能性のあるメソッド呼び出しは、アプリケーションにエラーを処理してほしい方法へのプレースホルダーを意味していると理解され、これは残りのコードがしていることによって異なる可能性があります。

同様に、unwrap や expect メソッドは、エラーの処理法を決定する準備ができる前、プロトタイプの段階では、非常に便利です。それらにより、コードにプログラムをより頑健にする時の明らかなマーカーが残されるわけです。

メソッド呼び出しがテスト内で失敗したら、そのメソッドがテスト下に置かれた機能ではなかったとしても、テスト全体が失敗してほしいでしょう。panic! が、テストが失敗と印づけられる手段なので、unwrap や expect の呼び出しはズバリ起こるべきことです。

9.3.2 コンパイラよりもプログラマがより情報を持っている場合

Result が Ok 値であると確認する何らかの別のロジックがある場合、unwrap を呼び出すことは適切でしょうが、コンパイラは、そのロジックを理解しません。それでも、処理する必要のある Result は存在するでしょう: 呼び出している処理が何であれ、自分の特定の場面では論理的に起こり得なくとも、一般的にまだ失敗する可能性はあるわけです。手動でコードを調査して Err 列挙子は存在しないと確認できたら、unwrap を呼び出すことは完全に受容できることです。こちらが例です:

```
use std::net::IpAddr;

let home: IpAddr = "127.0.0.1".parse().unwrap();
```

ハードコードされた文字列を構文解析することで IpAddr インスタンスを生成しています。プログラマには 127.0.0.1 が合法的な IP アドレスであることがわかるので、ここで unwrap を使用することは、受容可能なことです。しかしながら、ハードコードされた合法的な文字列が存在することは、parse メソッドの戻り値型を変えることにはなりません: それでも得られるのは、Result 値であり、コンパイラはまだ Err 列挙子になる可能性があるかのように Result を処理することを強制してきます。コンパイラは、この文字列が常に合法的な IP アドレスであると把握できるほど利口ではないからです。プログラムにハードコードされるのではなく、IP アドレス文字列がユーザ起源でそれ故に**確かに**失敗する可能性がある場合、Result をもっと頑健な方法で処理したほうが絶対にいいでしょう。

9.3.3 エラー処理のガイドライン

コードが悪い状態に陥る可能性があるときにパニックさせるのは、推奨されることです。この文脈において、**悪い状態**とは、何らかの前提、保証、契約、不変性が破られたことを言い、例を挙げれば、無効な値、矛盾する値、行方不明な値がコードに渡されることと、さらに以下のいずれか一つ以上の状態であります:

- 悪い状態がときに起こるとは**予想**されないとき。
- この時点以降、この悪い状態にないことを頼りにコードが書かれているとき。
- 使用している型にこの情報をコード化するいい手段がないとき。

誰かが自分のコードを呼び出して筋の通らない値を渡してきたら、最善の選択肢は panic! し、開発段階で修正できるように自分たちのコードにバグがあることをライブラリ使用者に通知することかもしれません。同様に自分の制御下でない外部コードを呼び出し、修正しようのない無効な状態を返すときに panic! はしばしば適切です。

しかし、どんなにコードをうまく書いても起こると予想されますが、悪い状態に達したとき、それでも `panic!` 呼び出しをするよりも、`Result` を返すほうがより適切です。例には、不正なデータを渡されたパーサとか、訪問制限に引っかかったことを示唆するステータスを返す `HTTP` リクエストなどが挙げられます。このような場合には、呼び出し側が問題の処理方法を決定できるように `Result` を返してこの悪い状態を委譲して、失敗が予想される可能性であることを示唆するべきです。`panic!` を呼び出すことは、これらのケースでは最善策ではないでしょう。

コードが値に対して処理を行う場合、コードはまず値が合法であることを確認し、値が合法でなければパニックするべきです。これはほぼ安全性上の理由によるものです：不正なデータの処理を試みると、コードを脆弱性に晒す可能性があります。これが、境界外へのメモリアccessを試みたときに標準ライブラリが `panic!` を呼び出す主な理由です：現在のデータ構造に属しないメモリにアクセスを試みることは、ありふれたセキュリティ問題なのです。関数にはしばしば**契約**が伴います：入力が特定の条件を満たすときのみ、振る舞いが保証されるのです。契約が侵されたときにパニックすることは、道理が通っています。なぜなら、契約侵害は常に呼び出し側のバグを示唆し、呼び出し側に明示的に処理してもらう必要のある種類のエラーではないからです。実際に、呼び出し側が回復する合理的な手段はありません；呼び出し側の**プログラマ**がコードを修正する必要があるのです。関数の契約は、特に侵害がパニックを引き起こす際には、関数の `API` ドキュメント内で説明されているべきです。

ですが、全ての関数でたくさんのエラーチェックを行うことは冗長で煩わしいことでしょう。幸運にも、`Rust` の型システム（故にコンパイラが行う型精査）を使用して多くの検査を行ってもらうことができます。関数の引数に特定の型があるなら、合法的な値があるとコンパイラがすでに確認していることを把握して、コードのロジックに進むことができます。例えば、`Option` 以外の型がある場合、プログラムは、**何もない**ではなく**何かある**と想定します。そうしたらコードは、`Some` と `None` 列挙子の2つの場合を処理する必要がなくなるわけです：確実に値があるという可能性しかありません。関数に何もないことを渡そうとしてくるコードは、コンパイルが通りもしませんので、その場合を実行時に検査する必要はないわけです。別の例は、`u32` のような符号なし整数を使うことであり、この場合、引数は負には絶対にならないことが確認されます。

9.3.4 検証のために独自の型を作る

`Rust` の型システムを使用して合法的な値があると確認するというアイデアを一步先に進め、検証のために独自の型を作ることに目を向けましょう。第2章の数当てゲームで、コードがユーザに1から100までの数字を推測するよう求めたことを思い出してください。秘密の数字と照合する前にユーザの推測がそれらの値の範囲にあることを全く確認しませんでした；推測が正であることしか確認しませんでした。この場合、結果はそれほど悲惨なものではありませんでした：「大きすぎ」、「小さすぎ」という出力は、それでも正しかったでしょう。ユーザを合法的な推測に導き、ユーザが範囲外の数字を推測したり、例えばユーザが文字を代わりに入力したりしたときに別の挙動をするようにしたら、有益な改善になるでしょう。

これをする一つの方法は、ただの `u32` の代わりに `i32` として推測をパースし、負の数になる可能性

を許可し、それから数字が範囲に収まっているというチェックを追加することでしょう。そう、以下のように:

```
loop {
    // --snip--

    let guess: i32 = match guess.trim().parse() {
        Ok(num) => num,
        Err(_) => continue,
    };

    if guess < 1 || guess > 100 {
        println!("The secret number will be between 1 and 100.");
        continue;
    }

    match guess.cmp(&secret_number) {
        // --snip--
    }
}
```

この if 式が、値が範囲外かどうかをチェックし、ユーザーに問題を告知し、continue を呼び出してループの次の繰り返しを始め、別の推測を求めます。if 式の後、guess は 1 から 100 の範囲にあると把握して、guess と秘密の数字の比較に進むことができます。

ところが、これは理想的な解決策ではありません: プログラムが 1 から 100 の範囲の値しか処理しないことが間違いなく、肝要であり、この要求がある関数の数が多ければ、このようなチェックを全関数で行うことは、面倒でパフォーマンスにも影響を及ぼす可能性があるでしょう。

代わりに、新しい型を作って検証を関数内に閉じ込め、検証を全箇所で行うのではなく、その型のインスタンスを生成することができます。そうすれば、関数とその新しい型をシグニチャに用い、受け取った値を自信を持って使用することは安全になります。リスト 9-9 に、new 関数が 1 から 100 までの値を受け取った時のみ、Guess のインスタンスを生成する Guess 型を定義する方法を示しました。

```
pub struct Guess {
    value: u32,
}

impl Guess {
    pub fn new(value: u32) -> Guess {
        if value < 1 || value > 100 {
            // 予想の値は1から100の範囲でなければなりません、{}でした
            panic!("Guess value must be between 1 and 100, got {}. ", value);
        }

        Guess {
            value
        }
    }
}
```

```
pub fn value(&self) -> u32 {  
    self.value  
}  
}
```

リスト 9-9: 値が 1 から 100 の場合のみ処理を継続する Guess 型

まず、u32 型の value をフィールドに持つ Guess という名前の構造体を定義しています。ここに数値が保管されます。

それから Guess に Guess 値のインスタンスを生成する new という名前の関連関数を実装しています。new 関数は、u32 型の value という引数を取り、Guess を返すように定義されています。new 関数の本体のコードは、value をふるいにかけ、1 から 100 の範囲であることを確かめます。value がふるいに引っかかったら、panic! 呼び出しを行います。これにより、呼び出しコードを書いているプログラマに、修正すべきバグがあると警告します。というのも、この範囲外の value で Guess を生成することは、Guess::new が頼りにしている契約を侵害するからです。Guess::new がパニックするかもしれない条件は、公開されている API ドキュメントで議論されるべきでしょう; あなたが作成する API ドキュメントで panic! の可能性を示唆する、ドキュメントの規約は、第 14 章で講義します。value が確かにふるいを通ったら、value フィールドが value 引数にセットされた新しい Guess を作成して返します。

次に、self を借用し、他に引数はなく、u32 を返す value というメソッドを実装します。この類のメソッドは時に**ゲッター**と呼ばれます。目的がフィールドから何らかのデータを得て返すことだからです。この公開メソッドは、Guess 構造体の value フィールドが非公開なので、必要になります。value フィールドが非公開なことは重要であり、そのために Guess 構造体を使用するコードは、直接 value をセットすることが叶わないのです: モジュール外のコードは、Guess::new 関数を使用して Guess のインスタンスを生成し**なければならない**、それにより、Guess::new 関数の条件式でチェックされていない value が Guess に存在する手段はないことが保証されるわけです。

そうしたら、引数を一つ持つか、1 から 100 の範囲の数値のみを返す関数は、シグニチャで u32 ではなく、Guess を取るか返し、本体内で追加の確認を行う必要はなくなると宣言できるでしょう。

9.4 まとめ

Rust のエラー処理機能は、プログラマがより頑健なコードを書く手助けをするように設計されています。panic! マクロは、プログラムが処理できない状態にあり、無効だったり不正な値で処理を継続するのではなく、プロセスに処理を中止するよう指示することを通知します。Result enum は、Rust の型システムを使用して、コードが回復可能な方法で処理が失敗するかもしれないことを示唆します。Result を使用して、呼び出し側のコードに成功や失敗する可能性を処理する必要があることも教えます。適切な場面で panic! や Result を使用することで、必然的な問題の眼前でコードの信頼性を上げてくれます。

今や、標準ライブラリが `Option` や `Result enum` などジェネリクスを有効活用するところを目の当たりにしたので、ジェネリクスの動作法と自分のコードでの使用方法について語りましょう。

第 10 章

ジェネリック型、トレイト、ライフタイム

全てのプログラミング言語には、概念の重複を効率的に扱う道具があります。Rust において、そのような道具の一つが**ジェネリクス**です。ジェネリクスは、具体型や他のプロパティの抽象的な代役です。コード記述の際、コンパイルやコード実行時に、ジェネリクスの位置に何が入るかを知ることなく、ジェネリクスの振る舞いや他のジェネリクスとの関係を表現できるのです。

関数が未知の値の引数を取り、同じコードを複数の具体的な値に対して走らせるように、`i32` や `String` などの具体的な型の代わりに何かジェネリックな型の引数を取ることができます。実際、第 6 章で `Option<T>`、第 8 章で `Vec<T>` と `HashMap<K, V>`、第 9 章で `Result<T, E>` を既に使用しました。この章では、独自の型、関数、メソッドをジェネリクスとともに定義する方法を探究します！

まず、関数を抽出して、コードの重複を減らす方法を確認しましょう。次に同じテクニックを活用して、引数の型のみが異なる 2 つの関数からジェネリックな関数を生成します。また、ジェネリックな型を構造体や `enum` 定義で使用方法も説明します。

それから、トレイトを使用して、ジェネリックな方法で振る舞いを定義する方法を学びます。ジェネリックな型にトレイトを組み合わせることで、ジェネリックな型を、単にあらゆる型に対してではなく、特定の振る舞いのある型だけに制限できます。

最後に、ライフタイムを議論します。ライフタイムとは、コンパイラに参照がお互いにどう関係しているかの情報を与える一種のジェネリクスです。ライフタイムのおかげでコンパイラに参照が有効であることを確認してもらうことを可能にしつつ、多くの場面で値を借用できます。

10.1 関数を抽出することで重複を取り除く

ジェネリクスの記法に飛び込む前にまずは、関数を抽出することでジェネリックな型に関わらない重複を取り除く方法を見ましょう。そして、このテクニックを適用してジェネリックな関数を抽出す

るのです！ 重複したコードを認識して関数に抽出できるのと同じように、ジェネリクスを使用できる重複コードも認識し始めるでしょう。

リスト 10-1 に示したように、リスト内の最大値を求める短いプログラムを考えてください。

ファイル名: src/main.rs

```
fn main() {
    let number_list = vec![34, 50, 25, 100, 65];

    let mut largest = number_list[0];

    for number in number_list {
        if number > largest {
            largest = number;
        }
    }

    // 最大値は{}です
    println!("The largest number is {}", largest);
    # assert_eq!(largest, 100);
}
```

リスト 10-1: 数字のリストから最大値を求めるコード

このコードは、整数のリストを変数 `number_list` に格納し、リストの最初の数字を `largest` という変数に配置しています。それからリストの数字全部を走査し、現在の数字が `largest` に格納された数値よりも大きければ、その変数の値を置き換えます。ですが、現在の数値が今まで見た最大値よりも小さければ、変数は変わらず、コードはリストの次の数値に移っていきます。リストの数値全てを吟味した後、`largest` は最大値を保持しているはずで、今回は **100** になります。

2 つの異なる数値のリストから最大値を発見するには、リスト 10-1 のコードを複製し、プログラムの異なる 2 箇所で同じロジックを使用できます。リスト 10-2 のようにですね。

ファイル名: src/main.rs

```
fn main() {
    let number_list = vec![34, 50, 25, 100, 65];

    let mut largest = number_list[0];

    for number in number_list {
        if number > largest {
            largest = number;
        }
    }

    println!("The largest number is {}", largest);
}
```

```
let number_list = vec![102, 34, 6000, 89, 54, 2, 43, 8];

let mut largest = number_list[0];

for number in number_list {
    if number > largest {
        largest = number;
    }
}

println!("The largest number is {}", largest);
}
```

リスト 10-2: 2 つの数値のリストから最大値を探すコード

このコードは動くものの、コードを複製することは退屈ですし、間違いも起きやすいです。また、コードを変更したい時に複数箇所、更新しなければなりません。

この重複を排除するには、引数で与えられた整数のどんなリストに対しても処理が行える関数を定義して抽象化できます。この解決策によりコードがより明確になり、リストの最大値を探すという概念を抽象的に表現させてくれます。

リスト 10-3 では、最大値を探すコードを `largest` という関数に抽出しました。リスト 10-1 のコードは、たった 1 つの特定のリストからだけ最大値を探せますが、それとは異なり、このプログラムは 2 つの異なるリストから最大値を探せます。

ファイル名: `src/main.rs`

```
fn largest(list: &[i32]) -> i32 {
    let mut largest = list[0];

    for &item in list.iter() {
        if item > largest {
            largest = item;
        }
    }

    largest
}

fn main() {
    let number_list = vec![34, 50, 25, 100, 65];

    let result = largest(&number_list);
    println!("The largest number is {}", result);
    # assert_eq!(result, 100);

    let number_list = vec![102, 34, 6000, 89, 54, 2, 43, 8];

    let result = largest(&number_list);
}
```

```
println!("The largest number is {}", result);  
#   assert_eq!(result, 6000);  
}
```

リスト 10-3: 2 つのリストから最大値を探す抽象化されたコード

`largest` 関数には `list` と呼ばれる引数があり、これは、関数に渡す可能性のある、あらゆる `i32` 値の具体的なスライスを示します。結果的に、関数呼び出しの際、コードは渡した特定の値に対して走るのです。

まとめとして、こちらがリスト 10-2 のコードからリスト 10-3 に変更するのに要したステップです:

1. 重複したコードを見分ける。
2. 重複コードを関数本体に抽出し、コードの入力と戻り値を関数シグニチャで指定する。
3. 重複したコードの 2 つの実体を代わりに関数を呼び出すように更新する。

次は、この同じ手順をジェネリクスでも踏んで異なる方法でコードの重複を減らします。関数本体が特定の値ではなく抽象的な `list` に対して処理できたのと同様に、ジェネリクスは抽象的な型に対して処理するコードを可能にしてくれます。

例えば、関数が 2 つあるとしましょう: 1 つは `i32` 値のスライスから最大の要素を探し、1 つは `char` 値のスライスから最大要素を探します。この重複はどう排除するのでしょうか? 答えを見つけましょう!

10.2 ジェネリックなデータ型

関数シグニチャや構造体などの要素の定義を生成するのにジェネリクスを使用することができ、それはさらに他の多くの具体的なデータ型と使用することもできます。まずは、ジェネリクスで関数、構造体、`enum`、メソッドを定義する方法を見ましょう。それから、ジェネリクスがコードのパフォーマンスに与える影響を議論します。

10.2.1 関数定義では

ジェネリクスを使用する関数を定義する時、通常、引数や戻り値のデータ型を指定する関数のシグニチャにジェネリクスを配置します。そうすることでコードがより柔軟になり、コードの重複を阻止しつつ、関数の呼び出し元により多くの機能を提供します。

`largest` 関数を続けます。リスト 10-4 はどちらもスライスから最大値を探す 2 つの関数を示しています。

ファイル名: `src/main.rs`

```
fn largest_i32(list: &[i32]) -> i32 {  
    let mut largest = list[0];
```

```
    for &item in list.iter() {
        if item > largest {
            largest = item;
        }
    }

    largest
}

fn largest_char(list: &[char]) -> char {
    let mut largest = list[0];

    for &item in list.iter() {
        if item > largest {
            largest = item;
        }
    }

    largest
}

fn main() {
    let number_list = vec![34, 50, 25, 100, 65];

    let result = largest_i32(&number_list);
    println!("The largest number is {}", result);
    # assert_eq!(result, 100);

    let char_list = vec!['y', 'm', 'a', 'q'];

    let result = largest_char(&char_list);
    println!("The largest char is {}", result);
    # assert_eq!(result, 'y');
}
```

リスト 10-4: 名前とシグニチャの型のみが異なる 2 つの関数

largest_i32 関数は、リスト 10-3 で抽出したスライスから最大の i32 を探す関数です。largest_char 関数は、スライスから最大の char を探します。関数本体には同じコードがあるので、単独の関数にジェネリックな型引数を導入してこの重複を排除しましょう。

これから定義する新しい関数の型を引数にするには、ちょうど関数の値引数のように型引数に名前をつける必要があります。型引数の名前にはどんな識別子も使用できますが、`T` を使用します。というのも、慣習では、Rust の引数名は短く (しばしばたった 1 文字になります)、Rust の型の命名規則がキャメルケースだからです。“type” の省略形なので、`T` が多くの Rust プログラムの既定の選択なのです。

関数の本体で引数を使用するとき、コンパイラがその名前の意味を把握できるようにシグニチャでその引数名を宣言しなければなりません。同様に、型引数名を関数シグニチャで使用する際には、使

用する前に型引数名を宣言しなければなりません。ジェネリックな `largest` 関数を定義するために、型名宣言を山カッコ (`<>`) 内、関数名と引数リストの間に配置してください。こんな感じに:

```
fn largest<T>(list: &[amp;T]) -> T {
```

この定義は以下のように解釈します: 関数 `largest` は、なんらかの型 `T` に関してジェネリックであると。この関数には `list` という引数が 1 つあり、これは型 `T` の値のスライスです。`largest` 関数は同じ `T` 型の値を返します。

リスト 10-5 は、シグニチャにジェネリックなデータ型を使用して `largest` 関数定義を組み合わせたものを示しています。このリストはさらに、この関数を `i32` 値か `char` 値のどちらかで呼べる方法も表示しています。このコードはまだコンパイルできないことに注意してください。ですが、この章の後ほど修正します。

ファイル名: `src/main.rs`

```
fn largest<T>(list: &[amp;T]) -> T {
    let mut largest = list[0];

    for &item in list.iter() {
        if item > largest {
            largest = item;
        }
    }

    largest
}

fn main() {
    let number_list = vec![34, 50, 25, 100, 65];

    let result = largest(&number_list);
    println!("The largest number is {}", result);

    let char_list = vec!['y', 'm', 'a', 'q'];

    let result = largest(&char_list);
    println!("The largest char is {}", result);
}
```

リスト 10-5: ジェネリックな型引数を使用するものの、まだコンパイルできない `largest` 関数の定義

直ちにこのコードをコンパイルしたら、以下のようなエラーが出ます:

```
error[E0369]: binary operation `>` cannot be applied to type `T`
(エラー: 2項演算`>`は、型`T`に適用できません)
--> src/main.rs:5:12
```

```

5 |         if item > largest {
|             ^^^^^^^^^^^^^^^^^
|
= note: an implementation of `std::cmp::PartialOrd` might be missing for `T`
(注釈: `std::cmp::PartialOrd` の実装が `T` に対して存在しない可能性があります)

```

注釈が `std::cmp::PartialOrd` に触れています。これは、**トレイト**です。トレイトについては、次の節で語ります。とりあえず、このエラーは、`largest` の本体は、`T` がなりうる全ての可能性のある型に対して動作しないと述べています。本体で型 `T` の値を比較したいので、値が順序付け可能な型のみしか使用できないのです。比較を可能にするために、標準ライブラリには型に実装できる `std::cmp::PartialOrd` トレイトがあります(このトレイトについて詳しくは付録 C を参照されたし)。ジェネリックな型が特定のトレイトを持つと指定する方法は「トレイト境界」節で習うでしょうが、先にジェネリックな型引数を使用する他の方法を探究しましょう。

10.2.2 構造体定義では

構造体を定義して `<>` 記法で 1 つ以上のフィールドにジェネリックな型引数を使用することもできます。リスト 10-6 は、`Point<T>` 構造体を定義してあらゆる型の `x` と `y` 座標を保持する方法を示しています。

ファイル名: `src/main.rs`

```

struct Point<T> {
    x: T,
    y: T,
}

fn main() {
    let integer = Point { x: 5, y: 10 };
    let float = Point { x: 1.0, y: 4.0 };
}

```

リスト 10-6: 型 `T` の `x` と `y` 値を保持する `Point<T>` 構造体

構造体定義でジェネリクスを使用する記法は、関数定義のものと似ています。まず、山カッコ内に型引数の名前を構造体名の直後に宣言します。そうすると、本来具体的なデータ型を記述する構造体定義の箇所に、ジェネリックな型を使用できます。

ジェネリックな型を 1 つだけ使用して `Point<T>` を定義したので、この定義は、`Point<T>` 構造体がある特定の型 `T` に関して、ジェネリックであると述べていて、その型がなんであれ、`x` と `y` のフィールドは両方その同じ型になっていることに注意してください。リスト 10-7 のように、異なる型の値のある `Point<T>` のインスタンスを生成すれば、コードはコンパイルできません。

ファイル名: src/main.rs

```
struct Point<T> {  
    x: T,  
    y: T,  
}  
  
fn main() {  
    let wont_work = Point { x: 5, y: 4.0 };  
}
```

リスト 10-7: どちらも同じジェネリックなデータ型 `T` なので、`x` と `y` というフィールドは同じ型でなければならない

この例で、`x` に整数値 `5` を代入すると、この `Point<T>` のインスタンスに対するジェネリックな型 `T` は整数になるとコンパイラに知らせます。それから `y` に `4.0` を指定する時に、このフィールドは `x` と同じ型と定義したはずなので、このように型不一致エラーが出ます:

```
error[E0308]: mismatched types  
--> src/main.rs:7:38  
|  
7 |     let wont_work = Point { x: 5, y: 4.0 };  
|                                     ^^^ expected integral variable, found  
floating-point variable  
|  
= note: expected type `{integer}`  
       found type `{float}`
```

`x` と `y` が両方ジェネリックだけれども、異なる型になり得る `Point` 構造体を定義するには、複数のジェネリックな型引数を使用できます。例えば、リスト 10-8 では、`Point` の定義を変更して、型 `T` と `U` に関してジェネリックにし、`x` が型 `T` で、`y` が型 `U` になります。

ファイル名: src/main.rs

```
struct Point<T, U> {  
    x: T,  
    y: U,  
}  
  
fn main() {  
    let both_integer = Point { x: 5, y: 10 };  
    let both_float = Point { x: 1.0, y: 4.0 };  
    let integer_and_float = Point { x: 5, y: 4.0 };  
}
```

リスト 10-8: `Point<T, U>` は 2 つの型に関してジェネリックなので、`x` と `y` は異なる型の値になり得る

これで、示された `Point` インスタンスは全部使用可能です！ 所望の数だけ定義でジェネリックな型引数を使用できますが、数個以上使用すると、コードが読みづらくなります。コードで多くのジェネリックな型が必要な時は、コードの小分けが必要なサインかもしれません。

10.2.3 enum 定義では

構造体のように、列挙子にジェネリックなデータ型を保持する `enum` を定義することができます。標準ライブラリが提供している `Option<T>` `enum` をもう一度見ましょう。この `enum` は第 6 章で使いました：

```
enum Option<T> {  
    Some(T),  
    None,  
}
```

この定義はもう、あなたにとってより道理が通っているはずです。ご覧の通り、`Option<T>` は、型 `T` に関してジェネリックで 2 つの列挙子のある `enum` です：その列挙子は、型 `T` の値を保持する `Some` と、値を何も保持しない `None` です。`Option<T>` `enum` を使用することで、オプショナルな値があるという抽象的な概念を表現でき、`Option<T>` はジェネリックなので、オプショナルな値の型に関わらず、この抽象を使用できます。

`enum` も複数のジェネリックな型を使用できます。第 9 章で使った `Result` `enum` の定義が一例です：

```
enum Result<T, E> {  
    Ok(T),  
    Err(E),  
}
```

`Result` `enum` は 2 つの型 `T`、`E` に関してジェネリックで、2 つの列挙子があります：型 `T` の値を保持する `Ok` と、型 `E` の値を保持する `Err` です。この定義により、`Result` `enum` を、成功する（なんらかの型 `T` の値を返す）か、失敗する（なんらかの型 `E` のエラーを返す）可能性のある処理がある、あらゆる箇所に使用するのが便利になります。事実、ファイルを開くのに成功した時に `T` に型 `std::fs::File` が入り、ファイルを開く際に問題があった時に `E` に型 `std::io::Error` が入ったものが、リスト 9-3 でファイルを開くのに使用したものです。

自分のコード内で、保持している値の型のみが異なる構造体や `enum` 定義の場面を認識したら、代わりにジェネリックな型を使用することで重複を避けることができます。

10.2.4 メソッド定義では

（第 5 章のように、）定義にジェネリックな型を使うメソッドを構造体や `enum` に実装することもできます。リスト 10-9 は、リスト 10-6 で定義した `Point<T>` 構造体に `x` というメソッドを実装した

ものを示しています。

ファイル名: src/main.rs

```
struct Point<T> {
    x: T,
    y: T,
}

impl<T> Point<T> {
    fn x(&self) -> &T {
        &self.x
    }
}

fn main() {
    let p = Point { x: 5, y: 10 };

    println!("p.x = {}", p.x());
}
```

リスト 10-9: 型 `T` の `x` フィールドへの参照を返す `x` というメソッドを `Point<T>` 構造体を実装する

ここで、フィールド `x` のデータへの参照を返す `x` というメソッドを `Point<T>` に定義しました。

`impl` の直後に `T` を宣言しなければならないことに注意してください。こうすることで、型 `Point<T>` にメソッドを実装していることを指定するために、`T` を使用することができます。`impl` の後に `T` をジェネリックな型として宣言することで、コンパイラは、`Point` の山カッコ内の型が、具体的な型ではなくジェネリックな型であることを認識できるのです。

例えば、ジェネリックな型を持つ `Point<T>` インスタンスではなく、`Point<f32>` だけにメソッドを実装することもできるでしょう。リスト 10-10 では、具体的な型 `f32` を使用しています。つまり、`impl` の後に型を宣言しません。

```
# struct Point<T> {
#     x: T,
#     y: T,
# }
#
impl Point<f32> {
    fn distance_from_origin(&self) -> f32 {
        (self.x.powi(2) + self.y.powi(2)).sqrt()
    }
}
```

リスト 10-10: ジェネリックな型引数 `T` に対して特定の具体的な型がある構造体だけにのみ適用される `impl` ブロック

このコードは、`Point<f32>` には `distance_from_origin` というメソッドが存在するが、`T` が `f32` で

はない `Point<T>` の他のインスタンスにはこのメソッドが定義されないことを意味します。このメソッドは、この点が座標 **(0.0, 0.0)** の点からどれだけ離れているかを測定し、浮動小数点数にのみ利用可能な数学的処理を使用します。

構造体定義のジェネリックな型引数は、必ずしもその構造体のメソッドシグニチャで使用するものと同じにはなりません。例を挙げれば、リスト 10-11 は、リスト 10-8 の `Point<T, U>` にメソッド `mixup` を定義しています。このメソッドは、他の `Point` を引数として取り、この引数は `mixup` を呼び出している `self` の `Point` とは異なる型の可能性があります。このメソッドは、(型 `T` の) `self` の `Point` の `x` 値と渡した (型 `W` の) `Point` の `y` 値から新しい `Point` インスタンスを生成します。

ファイル名: `src/main.rs`

```
struct Point<T, U> {
    x: T,
    y: U,
}

impl<T, U> Point<T, U> {
    fn mixup<V, W>(self, other: Point<V, W>) -> Point<T, W> {
        Point {
            x: self.x,
            y: other.y,
        }
    }
}

fn main() {
    let p1 = Point { x: 5, y: 10.4 };
    let p2 = Point { x: "Hello", y: 'c' };

    let p3 = p1.mixup(p2);

    println!("p3.x = {}, p3.y = {}", p3.x, p3.y);
}
```

リスト 10-11: 構造体定義とは異なるジェネリックな型を使用するメソッド

`main` で、`x` (値は 5) に `i32`、`y` (値は 10.4) に `f64` を持つ `Point` を定義しました。 `p2` 変数は、`x` (値は "Hello") に文字列スライス、`y` (値は `c`) に `char` を持つ `Point` 構造体です。引数 `p2` で `p1` に `mixup` を呼び出すと、`p3` が得られ、`x` は `i32` になります。`x` は `p1` 由来だからです。`p3` 変数の `y` は、`char` になります。`y` は `p2` 由来だからです。`println!` マクロの呼び出しは、`p3.x = 5`、`p3.y = c` と出力するでしょう。

この例の目的は、一部のジェネリックな引数は `impl` で宣言され、他の一部はメソッド定義で宣言される場面をデモすることです。ここで、ジェネリックな引数 `T` と `U` は `impl` の後に宣言されています。構造体定義にはまるからです。ジェネリックな引数 `V` と `W` は `fn mixup` の後に宣言されています。何故なら、このメソッドにしか関係ないからです。

10.2.5 ジェネリクスを使用したコードのパフォーマンス

ジェネリックな型引数を使用すると、実行時にコストが発生するのかな、と思うかもしれません。嬉しいことに Rust では、ジェネリクスを、具体的な型があるコードよりもジェネリックな型を使用したコードを実行するのが遅くならないように実装しています。

コンパイラはこれを、ジェネリクスを使用しているコードの単相化をコンパイル時に行うことで達成しています。**単相化 (monomorphization)** は、コンパイル時に使用されている具体的な型を入れることで、ジェネリックなコードを特定のコードに変換する過程のことです。

この過程において、コンパイラは、リスト 10-5 でジェネリックな関数を生成するために使用した手順と真逆のことをしています: コンパイラは、ジェネリックなコードが呼び出されている箇所全部を見て、ジェネリックなコードが呼び出されている具体的な型のコードを生成するのです。

標準ライブラリの `Option<T> enum` を使用する例でこれが動作する方法を見ましょう:

```
let integer = Some(5);
let float = Some(5.0);
```

コンパイラがこのコードをコンパイルすると、単相化を行います。その過程で、コンパイラは `Option<T>` のインスタンスに使用された値を読み取り、2 種類の `Option<T>` を識別します: 一方は `i32` で、もう片方は `f64` です。そのように、コンパイラは、`Option<T>` のジェネリックな定義を `Option_i32` と `Option_f64` に展開し、それにより、ジェネリックな定義を特定の定義と置き換えます。

単相化されたバージョンのコードは、以下のようになります。ジェネリックな `Option<T>` が、コンパイラが生成した特定の定義に置き換えられています:

ファイル名: `src/main.rs`

```
enum Option_i32 {
    Some(i32),
    None,
}

enum Option_f64 {
    Some(f64),
    None,
}

fn main() {
    let integer = Option_i32::Some(5);
    let float = Option_f64::Some(5.0);
}
```

Rust では、ジェネリックなコードを各インスタンスで型を指定したコードにコンパイルするので、ジェネリクスを使用することに対して実行時コストを払うことはありません。コードを実行すると、

それぞれの定義を手作業で複製した時のように振る舞います。単相化の過程により、Rust のジェネリクスは実行時に究極的に効率的になるのです。

10.3 トレイト: 共通の振る舞いを定義する

トレイトは、Rust コンパイラに、特定の型に存在し、他の型と共有できる機能について知らせます。トレイトを使用すると、共通の振る舞いを抽象的に定義できます。トレイト境界を使用すると、あるジェネリックが、特定の振る舞いをもつあらゆる型になり得ることを指定できます。

注釈: 違いはあるものの、トレイトは他の言語でよくインターフェイスと呼ばれる機能に類似しています。

10.3.1 トレイトを定義する

型の振る舞いは、その型に対して呼び出せるメソッドから構成されます。異なる型は、それらの型全てに対して同じメソッドを呼び出せるなら、同じ振る舞いを共有することになります。トレイト定義は、メソッドシグニチャをあるグループにまとめ、なんらかの目的を達成するのに必要な一連の振る舞いを定義する手段です。

例えば、いろんな種類や量のテキストを保持する複数の構造体があるとしましょう: 特定の場所から送られる新しいニュースを保持する `NewsArticle` と、新規ツイートか、リツイートか、はたまた他のツイートへのリプライなのかを示すメタデータを伴う最大で 280 文字までの `Tweet` です。

`NewsArticle` または `Tweet` インスタンスに保存されているデータのサマリーを表示できるメディアアグリゲータライブラリを作成します。これをするには、各型のサマリーが必要で、インスタンスで `summarize` メソッドを呼び出してサマリーを要求する必要があります。リスト 10-12 は、この振る舞いを表現する `Summary` トレイトの定義を表示しています。

ファイル名: `src/lib.rs`

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch10-generic-types-traits-and-lifetimes/listing-10-12/src/lib.rs}}
```

リスト 10-12: `summarize` メソッドで提供される振る舞いからなる `Summary` トレイト

ここでは、`trait` キーワード、それからトレイト名を使用してトレイトを定義していて、その名前は今回の場合、`Summary` です。波括弧の中にこのトレイトを実装する型の振る舞いを記述するメソッドシグニチャを定義し、今回の場合は、`fn summarize(&self) -> String` です。

メソッドシグニチャの後に、波括弧内に実装を提供する代わりに、セミコロンを使用しています。このトレイトを実装する型はそれぞれ、メソッドの本体に独自の振る舞いを提供しなければなりません。コンパイラにより、`Summary` トレイトを保持するあらゆる型に、このシグニチャと全く同じメソッド

ド `summarize` が定義されていることが強制されます。

トレイトには、本体に複数のメソッドを含むことができます: メソッドシグニチャは行ごとに並べられ、各行はセミコロンで終わります。

10.3.2 トレイトを型に実装する

今や `Summary` トレイトを使用して目的の動作を定義できたので、メディアアグリゲータでこれを型に実装できます。リスト 10-13 は、`Summary` トレイトを `NewsArticle` 構造体上に実装したもので、ヘッダライン、著者、そして地域情報を使って `summarize` の戻り値を作っています。`Tweet` 構造体に関しては、ツイートの内容が既に 280 文字に制限されていると仮定して、ユーザー名の後にツイートのテキスト全体が続くものとして `summarize` を定義します。

ファイル名: `src/lib.rs`

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch10-generic-types-traits-and-lifetimes/listing-10-13/src/lib.rs:here}}
```

リスト 10-13: `Summary` トレイトを `NewsArticle` と `Tweet` 型に実装する

型にトレイトを実装することは、普通のメソッドを実装することに似ています。違いは、`impl` の後に、実装したいトレイトの名前を置き、それから `for` キーワード、さらにトレイトの実装対象の型の名前を指定することです。`impl` ブロック内に、トレイト定義で定義したメソッドシグニチャを置きます。各シグニチャの後にセミコロンを追記するのではなく、波括弧を使用し、メソッド本体に特定の型のトレイトのメソッドに欲しい特定の振る舞いを入れます。

トレイトを実装後、普通のメソッド同様に `NewsArticle` や `Tweet` のインスタンスに対してこのメソッドを呼び出せます。こんな感じで:

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch10-generic-types-traits-and-lifetimes/no-listing-01-calling-trait-method/src/main.rs:here}}
```

このコードは、`1 new tweet: horse_ebooks: of course, as you probably already know, people` と出力します。

リスト 10-13 で `Summary` トレイトと `NewArticle`、`Tweet` 型を同じ **lib.rs** に定義したので、全部同じスコープにあることに注目してください。この **lib.rs** を `aggregator` と呼ばれるクレート専用にして、誰か他の人が私たちのクレートの機能を活用して自分のライブラリのスコープに定義された構造体に `Summary` トレイトを実装したいとしましょう。まず、トレイトをスコープに取り込む必要があります。用 `use aggregator::Summary;` と指定してそれを行えば、これにより、自分の型に `Summary` を実装することが可能になるでしょう。`Summary` トレイトは、他のクレートが実装するためには、公開トレイトである必要があります、ここでは、リスト 10-12 の `trait` の前に、`pub` キーワードを置いたのでそうになっています。

トレイト実装で注意すべき制限の 1 つは、トレイトが対象の型が自分のクレートに固有 (local) である時のみ、型に対してトレイトを実装できるということです。例えば、Display のような標準ライブラリのトレイトを aggregator クレートの機能の一部として、Tweet のような独自の型に実装できます。型 Tweet が aggregator クレートに固有だからです。また、Summary を aggregator クレートで Vec<T> に対して実装することもできます。トレイト Summary は、aggregator クレートに固有だからです。

しかし、外部のトレイトを外部の型に対して実装することはできません。例として、aggregator クレート内で Vec<T> に対して Display トレイトを実装することはできません。Display と Vec<T> は標準ライブラリで定義され、aggregator クレートに固有ではないからです。この制限は、**コヒーレンス (coherence)**、特に**孤児のルール (orphan rule)**と呼ばれるプログラムの特性の一部で、親の型が存在しないためにそう命名されました。この規則により、他の人のコードが自分のコードを壊したり、その逆が起きないことを保証してくれます。この規則がなければ、2 つのクレートが同じ型に対して同じトレイトを実装できてしまい、コンパイラはどちらの実装を使うべきかわからなくなってしまうでしょう。

10.3.3 デフォルト実装

時として、全ての型の全メソッドに対して実装を要求するのではなく、トレイトの全てあるいは一部のメソッドに対してデフォルトの振る舞いがあると有用です。そうすれば、特定の型にトレイトを実装する際、各メソッドのデフォルト実装を保持するかオーバーライドするか選べるわけです。

リスト 10-14 は、リスト 10-12 のように、メソッドシグニチャだけを定義するのではなく、Summary トレイトの summarize メソッドにデフォルトの文字列を指定する方法を示しています。

ファイル名: src/lib.rs

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch10-generic-types-traits-and-lifetimes/listing-10-14/src/lib.rs:here}}
```

リスト 10-14: summarize メソッドのデフォルト実装がある Summary トレイトの定義

独自の実装を定義するのではなく、デフォルト実装を利用して NewsArticle のインスタンスをまとめるには、impl Summary for NewsArticle {} と空の impl ブロックを指定します。

もはや NewsArticle に直接 summarize メソッドを定義してはいませんが、私達はデフォルト実装を提供しており、NewsArticle は Summary トレイトを実装すると指定しました。そのため、NewsArticle のインスタンスに対して summarize メソッドを同じように呼び出すことができます。このように:

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch10-generic-types-traits-and-lifetimes/no-listing-02-calling-default-impl/src/main.rs:here}}
```

このコードは、New article available! (Read more...) (新しい記事があります! (もっと読む)) と出

力します。

`summarize` にデフォルト実装を用意しても、リスト 10-13 の `Tweet` の `Summary` 実装を変える必要はありません。理由は、デフォルト実装をオーバーライドする記法はデフォルト実装のないトレイトメソッドを実装する記法と同じだからです。

デフォルト実装は、自らのトレイトのデフォルト実装を持たない他のメソッドを呼び出すことができます。このようにすれば、トレイトは多くの有用な機能を提供しつつ、実装者は僅かな部分しか指定しなくて済むようになります。例えば、`Summary` トレイトを、(実装者が) 内容を実装しなければならない `summarize_author` メソッドを持つように定義し、それから `summarize_author` メソッドを呼び出すデフォルト実装を持つ `summarize` メソッドを定義することもできます:

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch10-generic-types-traits-and-lifetimes/no-listing-03-default-impl-calls-other-methods/src/lib.rs:here}}
```

このバージョンの `Summary` を使用するために、型にトレイトを実装する際、実装する必要があるのは `summarize_author` だけです:

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch10-generic-types-traits-and-lifetimes/no-listing-03-default-impl-calls-other-methods/src/lib.rs:impl}}
```

`summarize_author` 定義後、`Tweet` 構造体のインスタンスに対して `summarize` を呼び出せ、`summarize` のデフォルト実装は、私達が提供した `summarize_author` の定義を呼び出すでしょう。`summarize_author` を実装したので、追加のコードを書く必要なく、`Summary` トレイトは、`summarize` メソッドの振る舞いを与えてくれました。

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch10-generic-types-traits-and-lifetimes/no-listing-03-default-impl-calls-other-methods/src/main.rs:here}}
```

このコードは、`1 new tweet: (Read more from @horse_ebooks...)` (1つの新しいツイート: (@horse_ebooksさんの文章をもっと読む)) と出力します。

デフォルト実装を、そのメソッドをオーバーライドしている実装から呼び出すことはできないことに注意してください。

10.3.4 引数としてのトレイト

トレイトを定義し実装する方法はわかったので、トレイトを使っているいろんな種類の型を受け付ける関数を定義する方法を学んでいきましょう。

たとえば、Listing 10-13 では、`NewsArticle` と `Tweet` 型に `Summary` トレイトを実装しました。ここで、引数の `item` の `summarize` メソッドを呼ぶ関数 `notify` を定義することができます。ただし、引数 `item` は `Summary` トレイトを実装しているような何らかの型であるとします。このようなことをするためには、`impl Trait` 構文を使うことができます。

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch10-generic-types-traits-and-lifetimes/no-
  listing-04-traits-as-parameters/src/lib.rs:here}}
```

引数の `item` には、具体的な型の代わりに、`impl` キーワードとトレイト名を指定します。この引数は、指定されたトレイトを実装しているあらゆる型を受け付けます。`notify` の中身では、`summarize` のような、`Summary` トレイトに由来する `item` のあらゆるメソッドを呼び出すことができます。私達は、`notify` を呼びだし、`NewsArticle` か `Tweet` のどんなインスタンスでも渡すことができます。この関数を呼び出すときに、`String` や `i32` のような他の型を渡すようなコードはコンパイルできません。なぜなら、これらの型は `Summary` を実装していないからです。

10.3.4.1 トレイト境界構文

`impl Trait` 構文は単純なケースを解決しますが、実はより長い**トレイト境界 (trait bound)** と呼ばれる姿の糖衣構文 (**syntax sugar**) なのです。それは以下のようなものです：

```
pub fn notify<T: Summary>(item: &T) {
    // 速報! {}
    println!("Breaking news! {}", item.summarize());
}
```

この「より長い」姿は前節の例と等価ですが、より冗長です。山カッコの中にジェネリックな型引数の宣言を書き、型引数の後ろにコロンを挟んでトレイト境界を置いています。

簡単なケースに対し、`impl Trait` 構文は便利で、コードを簡潔にしてくれます。そうでないケースの場合、トレイト境界構文を使えば複雑な状態を表現できます。たとえば、`Summary` を実装する 2 つのパラメータを持つような関数を考えることができます。`impl Trait` 構文を使うとこのようになるでしょう：

```
pub fn notify(item1: &impl Summary, item2: &impl Summary) {
```

この関数が受け取る `item1` と `item2` の型が（どちらも `Summary` を実装する限り）異なっても良いとするならば、`impl Trait` は適切でしょう。両方の引数が同じ型であることを強制することは、以下のようにトレイト境界を使ってのみ表現可能です：

```
pub fn notify<T: Summary>(item1: &T, item2: &T) {
```

引数である `item1` と `item2` の型としてジェネリックな型 `T` を指定しました。これにより、`item1` と `item2` として関数に渡される値の具体的な型が同一でなければならない、という制約を与えています。

10.3.4.2 複数のトレイト境界を + 構文で指定する

複数のトレイト境界も指定できます。たとえば、`notify` に `summarize` メソッドに加えて `item` の画面出力形式（ディスプレイフォーマット）を使わせたいとします。その場合は、`notify` の定義に `item`

は `Display` と `Summary` の両方を実装していなくてはならないと指定することになります。これは、以下のように `+` 構文で行うことができます：

```
pub fn notify(item: &(impl Summary + Display)) {
```

`+` 構文はジェネリック型につけたトレイト境界に対しても使えます：

```
pub fn notify<T: Summary + Display>(item: &T) {
```

これら 2 つのトレイト境界が指定されていれば、`notify` の中では `summarize` を呼び出すことと、`{}` を使って `item` をフォーマットすることの両方が行なえます。

10.3.4.3 where 句を使ったより明確なトレイト境界

あまりたくさんのトレイト境界を使うことには欠点もあります。それぞれのジェネリック（な型）がそれぞれのトレイト境界をもつので、複数のジェネリック型の引数をもつ関数は、関数名と引数リストの間に大量のトレイト境界に関する情報を含むことがあります。これでは関数のシグネチャが読みにくくなってしまいます。このため、`Rust` はトレイト境界を関数シグネチャの後の `where` 句の中で指定するという別の構文を用意しています。なので、このように書く：

```
fn some_function<T: Display + Clone, U: Clone + Debug>(t: &T, u: &U) -> i32 {
```

代わりに、`where` 句を使い、このように書くことができます：

```
fn some_function<T, U>(t: &T, u: &U) -> i32
    where T: Display + Clone,
          U: Clone + Debug
{
```

この関数シグニチャは、よりさっぱりとしています。トレイト境界を多く持たない関数と同じように、関数名、引数リスト、戻り値の型が一緒になって近くにあるからですね。

10.3.5 トレイトを実装している型を返す

以下のように、`impl Trait` 構文を戻り値型のところで使うことにより、あるトレイトを実装する何らかの型を返すことができます。

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch10-generic-types-traits-and-lifetimes/no-
    listing-05-returning-impl-trait/src/lib.rs:here}}
```

戻り値の型として `impl Summary` を使うことにより、具体的な型が何かを言うことなく、`returns_summarizable` 関数は `Summary` トレイトを実装している何らかの型を返すのだ、と指定する

ことができます。今回 `returns_summarizable` は `Tweet` を返しますが、この関数を呼び出すコードはそれを知りません。

実装しているトレイトだけで戻り値型を指定できることは、13 章で学ぶ、クロージャとイテレータを扱うときに特に便利です。クロージャとイテレータの作り出す型は、コンパイラだけが知っているものであったり、指定するには長すぎるものであったりします。`impl Trait` 構文を使えば、非常に長い型を書くことなく、ある関数は `Iterator` トレイトを実装するある型を返すのだ、と簡潔に指定することができます。

ただし、`impl Trait` は一種類の型を返す場合にのみ使えます。たとえば、以下のように、戻り値の型は `impl Summary` で指定しつつ、`NewsArticle` か `Tweet` を返すようなコードは失敗します：

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch10-generic-types-traits-and-lifetimes/no-listing-06-impl-trait-returns-one-type/src/lib.rs:here}}
```

`NewsArticle` か `Tweet` を返すというのは、コンパイラの `impl Trait` 構文の実装まわりの制約により許されていません。このような振る舞いをする関数を書く方法は、17 章のトレイトオブジェクトで異なる型の値を許容する節で学びます。

10.3.6 トレイト境界で `largest` 関数を修正する

ジェネリックな型引数の境界で使用したい振る舞いを指定する方法がわかったので、リスト 10-5 に戻って、ジェネリックな型引数を使用する `largest` 関数の定義を修正しましょう！最後にそのコードを実行しようとした時、こんなエラーが出ていました：

```
{{#include ../listings/ch10-generic-types-traits-and-lifetimes/listing-10-05/output.txt}}
```

`largest` の本体で、大なり演算子 (`>`) を使用して型 `T` の 2 つの値を比較しようとしていました。この演算子は、標準ライブラリトレイトの `std::cmp::PartialOrd` でデフォルトメソッドとして定義されているので、`largest` 関数が、比較できるあらゆる型のスライスに対して動くようにするためには、`T` のトレイト境界に `PartialOrd` を指定する必要があります。`PartialOrd` は `prelude` に含まれているので、これをスコープに導入する必要はありません。`largest` のシグニチャを以下のように変えてください：

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch10-generic-types-traits-and-lifetimes/no-listing-07-fixing-listing-10-05/src/main.rs:here}}
```

今回のコンパイルでは、別のエラーが出てきます：

```
{{#include ../listings/ch10-generic-types-traits-and-lifetimes/no-listing-07-fixing-listing-10-05/output.txt}}
```

このエラーの鍵となる行は、`cannot move out of type [T], a non-copy slice` です。ジェネリッ

クでないバージョンの `largest` 関数では、最大の `i32` か `char` を探そうとするだけでした。第 4 章のスタックのみのデータ: コピー節で議論したように、`i32` や `char` のようなサイズが既知の型はスタックに格納できるので、`Copy` トレイトを実装しています。しかし、`largest` 関数をジェネリックにすると、`list` 引数が `Copy` トレイトを実装しない型を含む可能性も出てきたのです。結果として、`list[0]` から値を `largest` にムーブできず、このエラーに陥ったのです。

このコードを `Copy` トレイトを実装する型だけを使って呼び出すようにしたいなら、`T` のトレイト境界に `Copy` を追加すればよいです！ リスト 10-15 は、関数に渡したスライスの値の型が、`i32` や `char` などのように `PartialOrd` と `Copy` を実装する限りコンパイルできる、ジェネリックな `largest` 関数の完全なコードを示しています。

ファイル名: `src/main.rs`

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch10-generic-types-traits-and-lifetimes/listing-10-15/src/main.rs}}
```

リスト 10-15: `PartialOrd` と `Copy` トレイトを実装するあらゆるジェネリックな型に対して動く、`largest` 関数の実際の定義

もし `largest` 関数を `Copy` を実装する型だけに制限したくなかったら、`T` が `Copy` ではなく `Clone` というトレイト境界を持つと指定することもできます。そうしたら、`largest` 関数に所有権が欲しい時にスライスの各値をクローンできます。`clone` 関数を使用するということは、`String` のようなヒープデータを持つ型の場合により多くのヒープ確保が発生する可能性があることを意味します。そして、大量のデータを取り扱っていたら、ヒープ確保には時間がかかることもあります。

`largest` の別の実装方法は、関数がスライスの `T` 値への参照を返すようにすることです。戻り値の型を `T` ではなく `&T` に変え、それにより関数の本体を参照を返すように変更したら、`Clone` や `Copy` トレイト境界は必要なくなり、ヒープ確保も避けられるでしょう。これらの代替策をご自身で実装してみましょう！

10.3.7 トレイト境界を使用して、メソッド実装を条件分けする

ジェネリックな型引数を持つ `impl` ブロックにトレイト境界を与えることで、特定のトレイトを実装する型に対するメソッド実装を条件分けできます。例えば、リスト 10-16 の型 `Pair<T>` は、常に `new` 関数を実装します。しかし、`Pair<T>` は、内部の型 `T` が比較を可能にする `PartialOrd` トレイトと出力を可能にする `Display` トレイトを実装している時のみ、`cmp_display` メソッドを実装します。

ファイル名: `src/lib.rs`

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch10-generic-types-traits-and-lifetimes/listing-10-16/src/lib.rs}}
```


リスト 10-16: トレイト境界によってジェネリックな型に対するメソッド実装を条件分けする

また、別のトレイトを実装するあらゆる型に対するトレイト実装を条件分けすることもできます。トレイト境界を満たすあらゆる型にトレイトを実装することは、**ブランケット実装 (blanket implementation)** と呼ばれ、Rust の標準ライブラリで広く使用されています。例を挙げれば、標準ライブラリは、Display トレイトを実装するあらゆる型に ToString トレイトを実装しています。標準ライブラリの impl ブロックは以下のような見た目です:

```
impl<T: Display> ToString for T {  
    // --snip--  
}
```

標準ライブラリにはこのブランケット実装があるので、Display トレイトを実装する任意の型に対して、ToString トレイトで定義された to_string メソッドを呼び出せるのです。例えば、整数は Display を実装するので、このように整数値に対応する String 値に変換できます:

```
let s = 3.to_string();
```

ブランケット実装は、トレイトのドキュメンテーションの「実装したもの」節に出現します。

トレイトとトレイト境界により、ジェネリックな型引数を使用して重複を減らしつつ、コンパイラに対して、そのジェネリックな型に特定の振る舞いが欲しいことを指定するコードを書くことができます。それからコンパイラは、トレイト境界の情報を活用してコードに使用された具体的な型が正しい振る舞いを提供しているか確認できます。動的型付き言語では、その型に定義されていないメソッドを呼び出せば、実行時 (runtime) にエラーが出るでしょう。しかし、Rust はこの種のエラーをコンパイル時に移したので、コードが動かせるようになる以前に問題を修正することを強制されるのです。加えて、コンパイル時に既に確認したので、実行時の振る舞いを確認するコードを書かなくても済みます。そうすることで、ジェネリクス柔軟性を諦めることなくパフォーマンスを向上させます。

すでに使っている他のジェネリクスに、ライフタイムと呼ばれるものがあります。ライフタイムは、型が欲しい振る舞いを保持しているのではなく、必要な間だけ参照が有効であることを保証します。ライフタイムがどうやってそれを行うかを見てみましょう。

10.4 ライフタイムで参照を検証する

第 4 章の「参照と借用」節で議論しなかった詳細の一つに、Rust において参照は全てライフタイムを保持するということがあります。ライフタイムとは、その参照が有効になるスコープのことです。多くの場合、型が推論されるように、大抵の場合、ライフタイムも暗黙的に推論されます。複数の型の可能性があるときには、型を注釈しなければなりません。同様に、参照のライフタイムがいくつか異なる方法で関係することがある場合には注釈しなければなりません。コンパイラは、ジェネリックライフタイム引数を使用して関係を注釈し、実行時に実際の参照が確かに有効であることを保証する

ことを要求するのです。

ライフタイムの概念は、他のプログラミング言語の道具とはどこか異なり、間違いなく Rust で一番際立った機能になっています。この章では、ライフタイムの全体を解説することはしませんが、ライフタイム記法が必要となる最も一般的な場合について議論しますので、ライフタイムの概念について馴染むことができるでしょう。

10.4.1 ライフタイムでダングリング参照を回避する

ライフタイムの主な目的は、ダングリング参照を回避することです。ダングリング参照によりプログラムは、参照するつもりだったデータ以外のデータを参照してしまいます。リスト 10-17 のプログラムを考えてください。これには、外側のスコープと内側のスコープが含まれています。

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch10-generic-types-traits-and-lifetimes/listing-10-17/src/main.rs:here}}
```

リスト 10-17: 値がスコープを抜けてしまった参照を使用しようとする

注釈: リスト 10-17 や 10-18、10-24 では、変数に初期値を与えずに宣言しているので、変数名は外側のスコープに存在します。初見では、これは Rust には `null` 値が存在しないということと衝突しているように見えるかもしれません。しかしながら、値を与える前に変数を使用しようとするれば、コンパイルエラーになり、確かに Rust では `null` 値は許可されていないことがわかります。

外側のスコープで初期値なしの `r` という変数を宣言し、内側のスコープで初期値 5 の `x` という変数を宣言しています。内側のスコープ内で、`r` の値を `x` への参照にセットしようとしています。それから内側のスコープが終わり、`r` の値を出力しようとしています。`r` が参照している値が使おうとする前にスコープを抜けるので、このコードはコンパイルできません。こちらがエラーメッセージです:

```
{{#include ../listings/ch10-generic-types-traits-and-lifetimes/listing-10-17/output.txt}}
```

変数 `x` の「生存期間が短すぎます」。原因は、内側のスコープが 7 行目で終わった時点で `x` がスコープを抜けるからです。ですが、`r` はまだ、外側のスコープに対して有効です; スコープが大きいので、「長生きする」と言います。Rust で、このコードが動くことを許可していたら、`r` は `x` がスコープを抜けた時に解放されるメモリを参照していることになり、`r` で行おうとするいかなることもちゃんと動作しないでしょう。では、どうやってコンパイラはこのコードが無効であると決定しているのでしょうか? それは、借用チェッカーを使用しているのです。

10.4.2 借用精査機

Rust コンパイラには、スコープを比較して全ての借用が有効であることを決定する**借用チェッカー**があります。リスト 10-18 は、リスト 10-17 と同じコードを示していますが、変数のライフタイムを表示する注釈が付いています。

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch10-generic-types-traits-and-lifetimes/listing-10-18/src/main.rs:here}}
```

リスト 10-18: それぞれ 'a と 'b と名付けられた r と x のライフタイムの注釈

ここで、r のライフタイムは 'a、x のライフタイムは 'b で注釈しました。ご覧の通り、内側の 'b ブロックの方が、外側の 'a ライフタイムブロックよりはるかに小さいです。コンパイル時に、コンパイラは 2 つのライフタイムのサイズを比較し、r は 'a のライフタイムだけれども、'b のライフタイムのメモリを参照していると確認します。'b は 'a よりも短いので、プログラムは拒否されます: 参照の対象が参照ほど長生きしないのです。

リスト 10-19 でコードを修正したので、ダングリング参照はなくなり、エラーなくコンパイルできます。

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch10-generic-types-traits-and-lifetimes/listing-10-19/src/main.rs:here}}
```

リスト 10-19: データのライフタイムが参照より長いので、有効な参照

ここで x のライフタイムは 'b になり、今回の場合 'a よりも大きいです。つまり、コンパイラは x が有効な間、r の参照も常に有効になることを把握しているので、r は x を参照できます。

今や、参照のライフタイムがどれだけであるかと、コンパイラがライフタイムを解析して参照が常に有効であることを保証する仕組みがわかったので、関数における引数と戻り値のジェネリックなライフタイムを探究しましょう。

10.4.3 関数のジェネリックなライフタイム

2 つの文字列スライスのうち、長い方を返す関数を書きましょう。この関数は、2 つの文字列スライスを取り、1 つの文字列スライスを返します。longest 関数の実装完了後、リスト 10-20 のコードは、The longest string is abcd と出力するはずです。

ファイル名: src/main.rs

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch10-generic-types-traits-and-lifetimes/listing-10-20/src/main.rs}}
```

リスト 10-20: `longest` 関数を呼び出して 2 つの文字列スライスのうち長い方を探す `main` 関数

関数に取ってほしい引数が文字列スライス、つまり参照であることに注意してください。何故なら、`longest` 関数に引数の所有権を奪ってほしくないからです。リスト 10-20 で使用している引数が、我々が必要としているものである理由についてもっと詳しい議論は、第 4 章の「引数としての文字列スライス」節をご参照ください。

リスト 10-21 に示すように `longest` 関数を実装しようとしたら、コンパイルできないでしょう。

ファイル名: `src/main.rs`

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch10-generic-types-traits-and-lifetimes/listing-10-21/src/main.rs:here}}
```

リスト 10-21: 2 つの文字列スライスのうち長い方を返すけれども、コンパイルできない `longest` 関数の実装

代わりに、以下のようなライフタイムに言及するエラーが出ます:

```
{{#include ../listings/ch10-generic-types-traits-and-lifetimes/listing-10-21/output.txt}}
```

助言テキストが、戻り値の型はジェネリックなライフタイム引数である必要があると明かしています。というのも、返している参照が `x` か `y` のどちらを参照しているか、コンパイラにはわからないからです。実際のところ、この関数の本体の `if` ブロックは `x` への参照を返し、`else` ブロックは `y` への参照を返すので、どちらなのか私たちにもわかりません!

この関数を定義する際、この関数に渡される具体的な値がわからないので、`if` ケースと `else` ケースのどちらが実行されるかわからないのです。また、リスト 10-18 と 10-19 で、返す参照が常に有効であるかを決定したときのようにスコープを見ることも、渡される参照の具体的なライフタイムがわからないのでできないのです。借用チェッカーもこれを決定することはできません。`x` と `y` のライフタイムがどう戻り値のライフタイムと関係するかわからないからです。このエラーを修正するために、借用チェッカーが解析を実行できるように、参照間の関係を定義するジェネリックなライフタイム引数を追加しましょう。

10.4.4 ライフタイム注釈記法

ライフタイム注釈は、いかなる参照の生存期間も変えることはありません。シグニチャにジェネリックな型引数を指定された関数が、あらゆる型を受け取ることができるのと同様に、ジェネリックなライフタイム引数を指定された関数は、あらゆるライフタイムの参照を受け取ることができます。ライフタイム注釈は、ライフタイムに影響することなく、複数の参照のライフタイムのお互いの関係を記述します。

ライフタイム注釈は、少し不自然な記法です: ライフタイム引数の名前はアポストロフィー (') で始まらなければならない、通常全部小文字で、ジェネリック型のようにとても短い。多くの人は、 'a という名前を使います。ライフタイム引数注釈は、参照の & の後に配置し、注釈と参照の型を区別するために空白を 1 つ使用します。

例を挙げましょう: ライフタイム引数なしの i32 への参照、 'a というライフタイム引数付きの i32 への参照、そして同じくライフタイム 'a を持つ i32 への可変参照です。

```
&i32           // a reference
               // (ただの)参照
&'a i32        // a reference with an explicit lifetime
               // 明示的なライフタイム付きの参照
&'a mut i32    // a mutable reference with an explicit lifetime
               // 明示的なライフタイム付きの可変参照
```

1 つのライフタイム注釈それだけでは、大して意味はありません。注釈は、複数の参照のジェネリックなライフタイム引数が、お互いにどう関係するかをコンパイラに指示することを意図しているからです。例えば、ライフタイム 'a 付きの i32 への参照となる引数 first のある関数があるとしましょう。この関数にはさらに、 'a のライフタイム付きの i32 への別の参照となる second という別の引数もあります。ライフタイム注釈は、first と second の参照がどちらもこのジェネリックなライフタイムと同じだけ生きることを示唆します。

10.4.5 関数シグニチャにおけるライフタイム注釈

さて、longest 関数を例にライフタイム注釈を詳しく見ていきましょう。ジェネリックな型引数同様、関数名と引数リストの間の山カッコの中にジェネリックなライフタイム引数を宣言します。このシグニチャで表現したい制約は、引数の全ての参照と戻り値が同じライフタイムを持つことです。リスト 10-22 に示すように、ライフタイムを 'a と名付け、それを各参照に付与します。

ファイル名: src/main.rs

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch10-generic-types-traits-and-lifetimes/listing
-10-22/src/main.rs:here}}
```

リスト 10-22: シグニチャの全参照が同じライフタイム 'a を持つと指定した longest 関数の定義

このコードはコンパイルでき、リスト 10-20 の main 関数とともに使用したら、欲しい結果になるはずです。

これで関数シグニチャは、何らかのライフタイム 'a に対して、関数は 2 つの引数を取り、どちらも少なくともライフタイム 'a と同じだけ生きる文字列スライスであるとコンパイラに教えるようになりました。また、この関数シグニチャは、関数から返る文字列スライスも少なくともライフタイム 'a と同じだけ生きると、コンパイラに教えています。実際には、longest 関数が返す参照のライフタ

タイムは、渡された参照のうち、小さい方のライフタイムと同じであるという事です。これらの制約は、まさに私たちがコンパイラに保証してほしいものです。

この関数シグニチャでライフタイム引数を指定する時、渡されたり、返したりした、いかなる値のライフタイムも変更していないことを思い出してください。むしろ、借用チェッカーは、これらの制約を守らない値全てを拒否するべきと指定しています。longest 関数は、x と y の正確な生存期間を知っている必要はなく、このシグニチャを満たすようなスコープを 'a に代入できることを知っているだけであることに注意してください。

関数にライフタイムを注釈するときは、注釈は関数の本体ではなくシグニチャに付与します。コンパイラは注釈がなくとも関数内のコードを解析できます。しかしながら、関数に関数外からの参照や関数外への参照がある場合、コンパイラが引数や戻り値のライフタイムを自力で解決することはほとんど不可能になります。そのライフタイムは、関数が呼び出される度に異なる可能性があります。このために、手動でライフタイムを注釈する必要があるのです。

具体的な参照を longest に渡すと、'a に代入される具体的なライフタイムは、x のスコープの一部であって y のスコープと重なる部分となります。言い換えると、ジェネリックなライフタイム 'a は、x と y のライフタイムのうち、小さい方に等しい具体的なライフタイムになるのです。返却される参照を同じライフタイム引数 'a で注釈したので、返却される参照も x か y のライフタイムの小さい方と同じだけ有効になるでしょう。

ライフタイム注釈が異なる具体的なライフタイムを持つ参照を渡すことで longest 関数を制限する方法を見ましょう。リスト 10-23 はそのシンプルな例です。

ファイル名: src/main.rs

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch10-generic-types-traits-and-lifetimes/listing-10-23/src/main.rs:here}}
```

リスト 10-23: 異なる具体的なライフタイムを持つ String 値への参照で longest 関数を使用する

この例において、string1 は外側のスコープの終わりまで有効で、string2 は内側のスコープの終わりまで有効、そして result は内側のスコープの終わりまで有効な何かを参照しています。このコードを実行すると、借用チェッカーがこのコードを良しとするのがわかるでしょう。要するに、コンパイルでき、The longest string is long string is long と出力するのです。

次に、result の参照のライフタイムが 2 つの引数の小さい方のライフタイムになることを示す例を試しましょう。result 変数の宣言を内側のスコープの外に移すものの、result 変数への代入は string2 のスコープ内に残したままにします。それから result を使用する println! を内側のスコープの外、内側のスコープが終わった後に移動します。リスト 10-24 のコードはコンパイルできません。

ファイル名: src/main.rs

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch10-generic-types-traits-and-lifetimes/listing-10-24/src/main.rs:here}}
```

リスト 10-24: `string2` がスコープを抜けてから `result` を使用しようとする

このコードのコンパイルを試みると、こんなエラーになります:

```
{{#include ../listings/ch10-generic-types-traits-and-lifetimes/listing-10-24/  
output.txt}}
```

このエラーは、`result` が `println!` 文に対して有効であるためには、`string2` が外側のスコープの終わりまで有効である必要があることを示しています。関数引数と戻り値のライフタイムを同じライフタイム引数 `'a` で注釈したので、コンパイラはこのことを知っています。

人間からしたら、`string1` は `string2` よりも長く、それ故に `result` が `string1` への参照を含んでいることはコードから明らかです。まだ `string1` はスコープを抜けていないので、`string1` への参照は `println!` にとって有効でしょう。ですが、コンパイラはこの場合、参照が有効であると見なせません。`longest` 関数から返ってくる参照のライフタイムは、渡した参照のうちの小さい方と同じだとコンパイラに指示しました。したがって、借用チェッカーは、リスト 10-24 のコードを無効な参照がある可能性があるとして許可しないのです。

試しに、値や、`longest` 関数に渡される参照のライフタイムや、返される参照の使われかたが異なる実験をもっとしてみてください。コンパイル前に、その実験が借用チェッカーを通るかどうか仮説を立ててください;そして、正しいか確かめてください!

10.4.6 ライフタイムの観点で思考する

何にライフタイム引数を指定する必要があるかは、関数が行っていることに依存します。例えば、`longest` 関数の実装を最長の文字列スライスではなく、常に最初の引数を返すように変更したら、`y` 引数に対してライフタイムを指定する必要はなくなるでしょう。以下のコードはコンパイルできます:

ファイル名: `src/main.rs`

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch10-generic-types-traits-and-lifetimes/no-  
listing-08-only-one-reference-with-lifetime/src/main.rs:here}}
```

この例では、引数 `x` と戻り値に対してライフタイム引数 `'a` を指定しましたが、引数 `y` には指定していません。`y` のライフタイムは `x` や戻り値のライフタイムとは何の関係もないからです。

関数から参照を返す際、戻り値型のライフタイム引数は、引数のうちどれかのライフタイム引数と一致する必要があります。返される参照が引数のどれかを参照していないならば、この関数内で生成された値を参照しているはずで、その値は関数の末端でスコープを抜けるので、これはダングリング参照になるでしょう。以下に示す、コンパイルできない `longest` 関数の未完成の実装を考えてください:

ファイル名: src/main.rs

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch10-generic-types-traits-and-lifetimes/no-listing-09-unrelated-lifetime/src/main.rs:here}}
```

ここでは、たとえ、戻り値型にライフタイム引数 'a' を指定していても、戻り値のライフタイムは、引数のライフタイムと全く関係がないので、この実装はコンパイルできないでしょう。こちらが、得られるエラーメッセージです:

```
{{#include ../listings/ch10-generic-types-traits-and-lifetimes/no-listing-09-unrelated-lifetime/output.txt}}
```

問題は、result が longest 関数の末端でスコープを抜け、片付けられてしまうことです。かつ、関数から result への参照を返そうともしています。ダングリング参照を変えてくれるようなライフタイム引数を指定する手段はなく、コンパイラは、ダングリング参照を生成させてくれません。今回の場合、最善の修正案は、(呼び出し先ではなく) 呼び出し元の関数に値の片付けをさせるために、参照ではなく所有されたデータ型を返すことでしょう。

究極的にライフタイム記法は、関数のいろんな引数と戻り値のライフタイムを接続することに関するものです。一旦それらが繋がれば、メモリ安全な処理を許可し、ダングリングポインタを生成したりメモリ安全性を侵害したりする処理を禁止するのに十分な情報をコンパイラは得たことになります。

10.4.7 構造体定義のライフタイム注釈

ここまで、所有された型を保持する構造体だけを定義してきました。構造体に参照を保持させることもできますが、その場合、構造体定義の全参照にライフタイム注釈を付け加える必要があるでしょう。リスト 10-25 には、文字列スライスを保持する ImportantExcerpt (重要な一節) という構造体があります。

ファイル名: src/main.rs

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch10-generic-types-traits-and-lifetimes/listing-10-25/src/main.rs}}
```

リスト 10-25: 参照を含む構造体なので、定義にライフタイム注釈が必要

この構造体には文字列スライスを保持する 1 つのフィールド、part があり、これは参照です。ジェネリックなデータ型同様、構造体名の後、山カッコの中にジェネリックなライフタイム引数の名前を宣言するので、構造体定義の本体でライフタイム引数を使用できます。この注釈は、ImportantExcerpt のインスタンスが、part フィールドに保持している参照よりも長生きしないことを意味します。

ここの main 関数は、変数 novel に所有される String の、最初の文への参照を保持する ImportantExcerpt インスタンスを生成しています。novel のデータは、ImportantExcerpt インスタ

ンスが作られる前に存在しています。加えて、ImportantExcerpt がスコープを抜けるまで novel はスコープを抜けないので、ImportantExcerpt インスタンスの参照は有効なのです。

10.4.8 ライフタイム省略

全参照にはライフタイムがあり、参照を使用する関数や構造体にはライフタイム引数を指定する必要がありますことを学びました。しかし、リスト 4-9 にあった関数（リスト 10-26 に再度示しました）はライフタイム注釈なしでコンパイルできました。

ファイル名: src/lib.rs

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch10-generic-types-traits-and-lifetimes/listing-10-26/src/main.rs:here}}
```

リスト 10-26: リスト 4-9 で定義した、引数と戻り値型が参照であるにも関わらず、ライフタイム注釈なしでコンパイルできた関数

この関数がライフタイム注釈なしでコンパイルできる理由には、Rust の歴史が関わっています: 昔のバージョンの Rust(1.0 以前) では、全参照に明示的なライフタイムが必要だったので、このコードはコンパイルできませんでした。その頃、関数シグニチャはこのように記述されていたのです:

```
fn first_word<'a>(s: &'a str) -> &'a str {
```

多くの Rust コードを書いた後、Rust チームは、Rust プログラマが、特定の場面で何度も同じライフタイム注釈を入力していることを発見しました。これらの場面は予測可能で、いくつかの決まりきったパターンに従っていました。開発者はこのパターンをコンパイラのコードに落とし込んだので、このような場面には借用チェッカーがライフタイムを推論できるようになり、明示的な注釈を必要としなくなったのです。

ここで、この Rust の歴史話が関係しているのは、他にも決まりきったパターンが出現し、コンパイラに追加されることもあり得るからです。将来的に、さらに少数のライフタイム注釈しか必要にならない可能性もあります。

コンパイラの参照解析に落とし込まれたパターンは、**ライフタイム省略規則**と呼ばれます。これらはプログラマが従う規則ではありません; コンパイラが考慮する一連の特定のケースであり、自分のコードがこのケースに当てはまれば、ライフタイムを明示的に書く必要はなくなります。

省略規則は、完全な推論を提供しません。コンパイラが決定的に規則を適用できるけれども、参照が保持するライフタイムに関してそれでも曖昧性があるなら、コンパイラは、残りの参照がなるべきライフタイムを推測しません。この場合コンパイラは、それらを推測するのではなくエラーを与えます。これらは、参照がお互いにどう関係するかを指定するライフタイム注釈を追記することで解決できます。

関数やメソッドの引数のライフタイムは、**入力ライフタイム**と呼ばれ、戻り値のライフタイムは**出**

カライフタイムと称されます。

コンパイラは 3 つの規則を活用し、明示的な注釈がない時に、参照がどんなライフタイムになるかを計算します。最初の規則は入力ライフタイムに適用され、2 番目と 3 番目の規則は出力ライフタイムに適用されます。コンパイラが 3 つの規則の最後まで到達し、それでもライフタイムを割り出せない参照があったら、コンパイラはエラーで停止します。これらのルールは `fn` の定義にも `impl` ブロックにも適用されます。

最初の規則は、参照である各引数は、独自のライフタイム引数を得るというものです。換言すれば、1 引数の関数は、1 つのライフタイム引数を得るということです: `fn foo<'a>(x: &'a i32);` 2 つ引数のある関数は、2 つの個別のライフタイム引数を得ます: `fn foo<'a, 'b>(x: &'a i32, y: &'b i32);` 以下同様。

2 番目の規則は、1 つだけ入力ライフタイム引数があるなら、そのライフタイムが全ての出力ライフタイム引数に代入されるというものです: `fn foo<'a>(x: &'a i32) -> &'a i32。`

3 番目の規則は、複数の入力ライフタイム引数があるけれども、メソッドなのでそのうちの 하나가 `&self` や `&mut self` だったら、`self` のライフタイムが全出力ライフタイム引数に代入されるというものです。この 3 番目の規則により、必要なシンボルの数が減るので、メソッドが遥かに読み書きしやすくなります。

コンパイラの立場になってみましょう。これらの規則を適用して、リスト 10-26 の `first_word` 関数のシグニチャの参照のライフタイムが何か計算します。シグニチャは、参照に紐づけられるライフタイムがない状態から始まります:

```
fn first_word(s: &str) -> &str {
```

そうして、コンパイラは最初の規則を適用し、各引数が独自のライフタイムを得ると指定します。それを通常通り `'a` と呼ぶので、シグニチャはこうなります:

```
fn first_word<'a>(s: &'a str) -> &str {
```

1 つだけ入力ライフタイムがあるので、2 番目の規則を適用します。2 番目の規則は、1 つの入力引数のライフタイムが、出力引数に代入されると指定するので、シグニチャはこうなります:

```
fn first_word<'a>(s: &'a str) -> &'a str {
```

もうこの関数シグニチャの全ての参照にライフタイムが付いたので、コンパイラは、プログラマにこの関数シグニチャのライフタイムを注釈してもらう必要なく、解析を続行できます。

別の例に目を向けましょう。今回は、リスト 10-21 で取り掛かったときにはライフタイム引数なかった `longest` 関数です:

```
fn longest(x: &str, y: &str) -> &str {
```

最初の規則を適用しましょう: 各引数が独自のライフタイムを得るのです。今回は、1 つではなく 2 つ引数があるので、ライフタイムも 2 つです:

```
fn longest<'a, 'b>(x: &'a str, y: &'b str) -> &str {
```

2 つ以上入力ライフタイムがあるので、2 番目の規則は適用されないとわかります。また 3 番目の規則も適用されません。longest はメソッドではなく関数なので、どの引数も self ではないのです。3 つの規則全部を適用した後でも、まだ戻り値型のライフタイムが判明していません。このために、リスト 10-21 でこのコードをコンパイルしようとしてエラーになったのです: コンパイラは、ライフタイム省略規則全てを適用したけれども、シグニチャの参照全部のライフタイムを計算できなかったのです。

実際のところ、3 番目の規則はメソッドのシグニチャにしか適用されません。ですので、次はその文脈においてライフタイムを観察し、3 番目の規則のおかげで、メソッドシグニチャであまり頻繁にライフタイムを注釈しなくても済む理由を確認します。

10.4.9 メソッド定義におけるライフタイム注釈

構造体にライフタイムのあるメソッドを実装する際、リスト 10-11 で示したジェネリックな型引数と同じ記法を使用します。ライフタイム引数を宣言し使用する場所は、構造体フィールドかメソッド引数と戻り値に関係するかによります。

構造体のフィールド用のライフタイム名は、impl キーワードの後に宣言する必要があり、それから構造体名の後に使用されます。そのようなライフタイムは構造体の型の一部になるからです。

impl ブロック内のメソッドシグニチャでは、参照は構造体のフィールドの参照のライフタイムに紐づいている可能性と、独立している可能性があります。加えて、ライフタイム省略規則により、メソッドシグニチャでライフタイム注釈が必要なくなることがよくあります。リスト 10-25 で定義した ImportantExcerpt という構造体を使用した例をいくつか見てみましょう。

まず、唯一の引数が self への参照で戻り値が i32 という何かへの参照ではない level というメソッドを使用します:

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch10-generic-types-traits-and-lifetimes/no-  
listing-10-lifetimes-on-methods/src/main.rs:1st}}
```

impl 後のライフタイム引数宣言と型名の後にそれを使用するのは必須ですが、最初の省略規則のため、self への参照のライフタイムを注釈する必要はありません。

3 番目のライフタイム省略規則が適用される例はこちらです:

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch10-generic-types-traits-and-lifetimes/no-  
listing-10-lifetimes-on-methods/src/main.rs:3rd}}
```

2 つ入力ライフタイムがあるので、コンパイラは最初のライフタイム省略規則を適用し、&self と

announcement に独自のライフタイムを与えます。それから、引数の 1 つが `&self` なので、戻り値型は `&self` のライフタイムを得て、全てのライフタイムが説明されました。

10.4.10 静的ライフタイム

議論する必要のある 1 種の特殊なライフタイムが、`'static` であり、これは、この参照がプログラムの全期間生存できる事を意味します。文字列リテラルは全て `'static` ライフタイムになり、次のように注釈できます:

```
// 僕は静的ライフタイムを持ってるよ
let s: &'static str = "I have a static lifetime.";
```

この文字列のテキストは、プログラムのバイナリに直接格納され、常に利用可能です。故に、全文字列リテラルのライフタイムは、`'static` なのです。

エラーメッセージで、`'static` ライフタイムを使用するよう勧める提言を見かける可能性があります。ですが、参照に対してライフタイムとして `'static` を指定する前に、今ある参照が本当にプログラムの全期間生きるかどうか考えてください。それが可能であったとしても、参照がそれだけの期間生きてほしいのかどうか考慮するのも良いでしょう。ほとんどの場合、問題は、ダングリング参照を生成しようとしているか、利用可能なライフタイムの不一致が原因です。そのような場合、解決策はその問題を修正することであり、`'static` ライフタイムを指定することではありません。

10.5 ジェネリックな型引数、トレイト境界、ライフタイムを一度に

ジェネリックな型引数、トレイト境界、ライフタイム指定の構文のすべてを 1 つの関数で簡単に見てみましょう！

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch10-generic-types-traits-and-lifetimes/no-
  listing-11-generics-traits-and-lifetimes/src/main.rs:here}}
```

これがリスト 10-22 からの 2 つの文字列のうち長い方を返す `longest` 関数ですが、ジェネリックな型 `T` の `ann` という追加の引数があり、これは `where` 節で指定されているように、`Display` トレイトを実装するあらゆる型で埋めることができます。この追加の引数は、関数が文字列スライスの長さを比較する前に出力されるので、`Display` トレイト境界が必要なのです。ライフタイムは一種のジェネリックなので、ライフタイム引数 `'a` とジェネリックな型引数 `T` が関数名の後、山カッコ内の同じリストに収まっています。

10.6 まとめ

たくさんのことをこの章では講義しましたね！ 今やジェネリックな型引数、トレイトとトレイト境界、そしてジェネリックなライフタイム引数を知ったので、多くの異なる場面で動くコードを繰り返

すことなく書く準備ができました。ジェネリックな型引数により、コードを異なる型に適用させてくれます。トレイトとトレイト境界は、型がジェネリックであっても、コードが必要とする振る舞いを持つことを保証します。ライフタイム注釈を活用して、この柔軟なコードにダングリング参照が存在しないことを保証する方法を学びました。さらにこの解析は全てコンパイル時に起こり、実行時のパフォーマンスには影響しません！

信じられないかもしれませんが、この章で議論した話題にはもっともっと学ぶべきことがあります：第 17 章ではトレイトオブジェクトを議論します。これはトレイトを使用する別の手段です。非常に高度な筋書きの場合でのみ必要になる、ライフタイム注釈が関わる、もっと複雑な筋書きもあります。それらについては、**Rust Reference** をお読みください。ですが次は、コードがあるべき通りに動いていることを確かめられるように、**Rust** でテストを書く方法を学びます。

第 11 章

自動テストを書く

1972 年のエッセイ「謙虚なプログラマ」でエドガー・W・ダイクストラは以下のように述べています。「プログラムのテストは、バグの存在を示すには非常に効率的な手法であるが、バグの不在を示すには望み薄く不適切である」と。これは、できるだけテストを試みるべきではないということではありません。

プログラムの正当性は、どこまで自分のコードが意図していることをしているかなのです。Rust は、プログラムの正当性に重きを置いて設計されていますが、正当性は複雑で、単純に証明することはありません。Rust の型システムは、この重荷の多くの部分を肩代わりしてくれますが、型システムはあらゆる種類の不当性を捕捉してはくれません。ゆえに、Rust では、言語内で自動化されたソフトウェアテストを書くことをサポートしているのです。

例として、渡された何かの数値に 2 を足す `add_two` という関数を書くとしましょう。この関数のシグニチャは、引数に整数を取り、結果として整数を返します。この関数を実装してコンパイルすると、コンパイラはこれまでに学んできた型チェックと借用チェックを全て行い、例えば、`String` の値や無効な参照をこの関数に渡していないかなどを確かめるのです。ところが、コンパイラはプログラマがまさしく意図したことを関数が実行しているかどうかは確かめられません。つまり、そうですね、引数に 10 を足したり、50 を引いたりするのではなく、引数に 2 を足していることです。そんな時に、テストは必要になるのです。

例えば、`add_two` 関数に 3 を渡した時に、戻り値は 5 であることをアサーションするようなテストを書くことができます。コードに変更を加えた際にこれらのテストを走らせ、既存の正当な振る舞いが変わっていないことを確認できます。

テストは、複雑なスキルです: いいテストの書き方をあらゆる方面から講義することは 1 章だけではできないのですが、Rust のテスト機構のメカニズムについて議論します。テストを書く際に利用可能になるアノテーションとマクロについて、テストを実行するのに提供されているオプションと標準の動作、さらにテストをユニットテストや統合テストに体系化する方法について語ります。

11.1 テストの記述法

テストは、テスト以外のコードが想定された方法で機能していることを実証する Rust の関数です。テスト関数の本体は、典型的には以下の 3 つの動作を行います：

1. 必要なデータや状態をセットアップする。
2. テスト対象のコードを走らせる。
3. 結果が想定通りであることを断定（以下、アサーションという）する。

Rust が、特にこれらの動作を行うテストを書くために用意している機能を見ていきましょう。これには、`test` 属性、いくつかのマクロ、`should_panic` 属性が含まれます。

11.2 テスト関数の構成

最も単純には、Rust におけるテストは `test` 属性で注釈された関数のことです。属性とは、Rust コードの部品に関するメタデータです；一例を挙げれば、構造体とともに第 5 章で使った `derive` 属性です。関数をテスト関数に変えるには、`fn` の前に `#[test]` を付け加えてください。`cargo test` コマンドでテストを実行したら、コンパイラは `test` 属性で注釈された関数を走らせるテスト用バイナリをビルドし、各テスト関数が通過したか失敗したかを報告します。

新しいライブラリプロジェクトを **Cargo** で作ると、テスト関数付きのテストモジュールが自動的に生成されます。このモジュールのおかげで、新しいプロジェクトを始めるたびにテスト関数の正しい構造とか文法をいちいち検索しなくて済みます。ここに好きな数だけテスト関数やテストモジュールを追加すればいいというわけです！

まず、実際にはコードをテストしない、自動生成されたテンプレートのテストで実験して、テストの動作の性質をいくらか学びましょう。その後で、以前書いたコードを呼び出し、振る舞いが正しいことをアサーションする、ホンモノのテストを書きましょう。

`adder` という新しいライブラリプロジェクトを生成しましょう：

```
$ cargo new adder --lib
    Created library `adder` project
$ cd adder
```

`adder` ライブラリの **`src/lib.rs`** ファイルの中身は、リスト 11-1 のような見た目のはずです。

ファイル名: `src/lib.rs`

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch11-writing-automated-tests/listing-11-01/src/
lib.rs:here}}
```

リスト 11-1: `cargo new` で自動生成されたテストモジュールと関数

とりあえず、最初の 2 行は無視し、関数に集中してその動作法を見ましょう。fn 行の `#[test]` 注釈に注目してください: この属性は、これがテスト関数であることを示すので、テスト実行機はこの関数をテストとして扱うとわかるのです。さらに、`tests` モジュール内にはテスト関数以外の関数を入れ、一般的なシナリオをセットアップしたり、共通の処理を行う手助けをしたりもできるので、`#[test]` 属性でどの関数がテストかを示す必要があるのです。

関数本体は、`assert_eq!` マクロを使用して、`2 + 2` が 4 に等しいことをアサーションしています。このアサーションは、典型的なテストのフォーマット例をなしているわけです。走らせてこのテストが通る（訳注：テストが成功する、の意味。英語で **pass** ということから、このように表現される）ことを確かめましょう。

`cargo test` コマンドでプロジェクトにあるテストが全て実行されます。リスト 11-2 に示したようにですね。

```
{{#include ../listings/ch11-writing-automated-tests/listing-11-01/output.txt}}
```

リスト 11-2: 自動生成されたテストを走らせた出力

Cargo がテストをコンパイルし、走らせました。Compiling, Finished, Running の行の後に `running 1 test` の行があります。次行が、生成されたテスト関数の `it_works` という名前とこのテストの実行結果、`ok` を示しています。テスト実行の総合的なまとめが次に出現します。`test result:ok.` というテキストは、全テストが通ったことを意味し、`1 passed; 0 failed` と読める部分は、通過または失敗したテストの数を合計しているのです。

無視すると指定したテストは何もなかったため、まとめは `0 ignored` と示しています。また、実行するテストにフィルタをかけもしなかったため、まとめの最後に `0 filtered out` と表示されています。テストを無視することとフィルタすることに関しては次の節、テストの実行され方を制御するで語ります。

`0 measured` という統計は、パフォーマンスを測定するベンチマークテスト用です。ベンチマークテストは、本書記述の時点では、**nightly** 版の **Rust** でのみ利用可能です。詳しくは、ベンチマークテストのドキュメンテーションを参照されたい。

テスト出力の次の部分、つまり `Doc-tests adder` で始まる部分は、ドキュメンテーションテストの結果用のものです。まだドキュメンテーションテストは何もないものの、コンパイラは、API ドキュメントに現れるどんなコード例もコンパイルできます。この機能により、ドキュメントとコードを同期することができるわけです。ドキュメンテーションテストの書き方については、第 14 章のテストとしてのドキュメンテーションコメント節で議論しましょう。今は、`Doc-tests` 出力は無視します。

テストの名前を変更してどうテスト出力が変わるか確かめましょう。`it_works` 関数を違う名前、`exploration` などに変えてください。そう、以下のように:

ファイル名: `src/lib.rs`

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch11-writing-automated-tests/no-listing-01-
```

```
changing-test-name/src/lib.rs:here}}
```

そして、`cargo test` を再度走らせませす。これで出力が `it_works` の代わりに `exploration` と表示しています:

```
{{#include ../listings/ch11-writing-automated-tests/no-listing-01-changing-test-name/output.txt}}
```

別のテストを追加しますが、今回は失敗するテストにしましょう！ テスト関数内の何かがパニックすると、テストは失敗します。各テストは、新規スレッドで実行され、メインスレッドが、テストスレッドが死んだと確認した時、テストは失敗と印づけられます。第 9 章でパニックを引き起こす最も単純な方法について語りました。そう、`panic!` マクロを呼び出すことですね。**src/lib.rs** ファイルがリスト 11-3 のような見た目になるよう、新しいテスト `another` を入力してください。

ファイル名: **src/lib.rs**

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch11-writing-automated-tests/listing-11-03/src/lib.rs:here}}
```

リスト 11-3: `panic!` マクロを呼び出したために失敗する 2 番目のテストを追加する

`cargo test` で再度テストを走らせてください。出力はリスト 11-4 のようになるはずであり、`exploration` テストは通り、`another` は失敗したと表示されます。

```
{{#include ../listings/ch11-writing-automated-tests/listing-11-03/output.txt}}
```

リスト 11-4: 一つのテストが通り、一つが失敗するときのテスト結果

`ok` の代わりに `test test::another` の行は、`FAILED` を表示しています。個々の結果とまとめの間に、2 つ新たな区域ができました: 最初の区域は、失敗したテスト各々の具体的な理由を表示しています。今回の場合、`another` は `'Make this test fail!'` でパニックしたために失敗し、これは、**src/lib.rs** ファイルの 10 行で起きました。次の区域は失敗したテストの名前だけを列挙しています。これは、テストがたくさんあり、失敗したテストの詳細がたくさん表示されるときに有用になります。失敗したテストの名前を使用してそのテストだけを実行し、より簡単にデバッグすることができます。テストの実行方法については、テストの実行され方を制御する節でもっと語りましょう。

サマリー行が最後に出力されています: 総合的に言うと、テスト結果は `FAILED` でした。一つのテストが通り、一つが失敗したわけです。

様々な状況でのテスト結果がどんな風になるか見てきたので、テストを行う際に有用になる `panic!` 以外のマクロに目を向けましょう。

11.2.1 assert! マクロで結果を確認する

assert! マクロは、標準ライブラリで提供されていますが、テスト内の何らかの条件が true と評価されることを確かめたいときに有効です。assert! マクロには、論理値に評価される引数を与えます。その値が true なら、assert! は何もせず、テストは通ります。その値が false なら、assert! マクロは panic! マクロを呼び出し、テストは失敗します。assert! マクロを使用することで、コードが意図した通りに機能していることを確認する助けになるわけです。

第 5 章のリスト 5-15 で、Rectangle 構造体と can_hold メソッドを使用しました。リスト 11-5 でもそれを繰り返しています。このコードを **src/lib.rs** ファイルに放り込み、assert! マクロでそれ用のテストを何か書いてみましょう。

ファイル名: src/lib.rs

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch11-writing-automated-tests/listing-11-05/src/
lib.rs:here}}
```

リスト 11-5: 第 5 章から Rectangle 構造体とその can_hold メソッドを使用する

can_hold メソッドは論理値を返すので、assert! マクロの完璧なユースケースになるわけです。リスト 11-6 で、幅が 8、高さが 7 の Rectangle インスタンスを生成し、これが幅 5、高さ 1 の別の Rectangle インスタンスを保持できるとアサーションすることで can_hold を用いるテストを書きます。

ファイル名: src/lib.rs

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch11-writing-automated-tests/listing-11-06/src/
lib.rs:here}}
```

リスト 11-6: より大きな長方形がより小さな長方形を確かに保持できるかを確認する can_hold 用のテスト

tests モジュール内に新しい行を加えたことに注目してください: use super::*; です。tests モジュールは、第 7 章のモジュールツリーの要素を示すためのパス節で講義した通常の公開ルールに従う普通のモジュールです。tests モジュールは、内部モジュールなので、外部モジュール内のテスト配下にあるコードを内部モジュールのスコープに持っていく必要があります。ここでは glob を使用して、外部モジュールで定義したもの全てがこの tests モジュールでも使用可能になるようにしています。

テストは larger_can_hold_smaller と名付け、必要な Rectangle インスタンスを 2 つ生成しています。そして、assert! マクロを呼び出し、larger.can_hold(&smaller) の呼び出し結果を渡しました。この式は、true を返すと考えられるので、テストは通るはずです。確かめましょう！

```
{{#include ../listings/ch11-writing-automated-tests/listing-11-06/output.txt}}
```

通ります！ 別のテストを追加しましょう。今回は、小さい長方形は、より大きな長方形を保持できないことをアサーションします。

ファイル名: `src/lib.rs`

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch11-writing-automated-tests/no-listing-02-adding-  
-another-rectangle-test/src/lib.rs:here}}
```

今回の場合、`can_hold` 関数の正しい結果は `false` なので、その結果を `assert!` マクロに渡す前に反転させる必要があります。結果として、`can_hold` が `false` を返せば、テストは通ります。

```
{{#include ../listings/ch11-writing-automated-tests/no-listing-02-adding-another-  
-rectangle-test/output.txt}}
```

通るテストが 2 つ！ さて、コードにバグを導入したらテスト結果がどうなるか確認してみましょう。幅を比較する大なり記号を小なり記号で置き換えて `can_hold` メソッドの実装を変更しましょう：

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch11-writing-automated-tests/no-listing-03-  
-introducing-a-bug/src/lib.rs:here}}
```

テストを実行すると、以下のような出力をします：

```
{{#include ../listings/ch11-writing-automated-tests/no-listing-03-introducing-a-  
-bug/output.txt}}
```

テストによりバグが捕捉されました！ `larger.width` が 8、`smaller.width` が 5 なので、`can_hold` 内の幅の比較が今は `false` を返すようになったのです：8 は 5 より小さくないですからね。

11.2.2 `assert_eq!` と `assert_ne!` マクロで等値性をテストする

機能をテストする一般的な方法は、テスト下にあるコードの結果をコードが返すと期待される値と比較して、等しいと確かめることです。これを `assert` マクロを使用して `==` 演算子を使用した式を渡すことで行うこともできます。しかしながら、これはありふれたテストなので、標準ライブラリには 1 組のマクロ (`assert_eq!` と `assert_ne!`) が提供され、このテストをより便利に行うことができます。これらのマクロはそれぞれ、二つの引数を比べ、等しいかと等しくないかを確かめます。また、アサーションが失敗したら二つの値の出力もし、テストが失敗した原因を確認しやすくなります。一方で `assert!` マクロは、`==` 式の値が `false` になったことしか示さず、`false` になった原因の値は出力しません。

リスト 11-7 において、引数に 2 を加えて結果を返す `add_two` という名前の関数を書いています。そして、`assert_eq!` マクロでこの関数をテストしています。

ファイル名: src/lib.rs

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch11-writing-automated-tests/listing-11-07/src/
lib.rs:here}}
```

リスト 11-7: assert_eq! マクロで add_two 関数をテストする

```
{{#include ../listings/ch11-writing-automated-tests/listing-11-07/output.txt}}
```

assert_eq! マクロに与えた第 1 引数の 4 は、add_two(2) の呼び出し結果と等しいです。このテストの行は test tests::it_adds_two ... ok であり、ok というテキストはテストが通ったことを示しています！

コードにバグを仕込んで、assert_eq! を使ったテストが失敗した時にどんな見た目になるのか確認してみましょう。add_two 関数の実装を代わりに 3 を足すように変えてください:

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch11-writing-automated-tests/no-listing-04-bug-in-
-add-two/src/lib.rs:here}}
```

テストを再度実行します:

```
{{#include ../listings/ch11-writing-automated-tests/no-listing-04-bug-in-add-two
/output.txt}}
```

テストがバグを捕捉しました！ it_adds_two のテストは失敗し、assertion failed: `(left == right)` というメッセージを表示し、left は 4 で、right は 5 だったと示しています。このメッセージは有用で、デバッグを開始する助けになります: assert_eq! の left 引数は 4 だったが、add_two(2) がある right 引数は 5 だったことを意味しています。

二つの値が等しいとアサーションを行う関数の引数を expected と actual と呼び、引数を指定する順序が問題になる言語やテストフレームワークもあることに注意してください。ですが Rust では、left と right と呼ばれ、期待する値とテスト下のコードが生成する値を指定する順序は問題になりません。今回のテストのアサーションを assert_eq!(add_two(2), 4) と書くこともでき、そうすると失敗メッセージは、assertion failed: `(left == right)` となり、left が 5 で right が 4 と表示されるでしょう。

assert_ne! マクロは、与えた 2 つの値が等しくなれば通り、等しければ失敗します。このマクロは、値が何になるだろうか確信が持てないけれども、コードが意図した通りに動いていれば、確実にこの値にはならないだろうとわかっているような場合に最も有用になります。例えば、入力を何らかの手段で変え（て出力す）ることが保証されているけれども、入力の変え方がテストを実行する曜日に依存する関数をテストしているなら、アサーションすべき最善の事柄は、関数の出力が入力と等しくないことかもしれません。

内部的には、assert_eq! と assert_ne! マクロは、それぞれ == と != 演算子を使用しています。ア

サーションが失敗すると、これらのマクロは引数をデバッグフォーマットを使用してプリントするので、比較対象の値は `PartialEq` と `Debug` トレイトを実装していなければなりません。すべての組み込み型と、ほぼすべての標準ライブラリの型はこれらのトレイトを実装しています。自分で定義した構造体や `enum` については、その型の値が等しいか等しくないかをアサーションするために、`PartialEq` を実装する必要があるでしょう。それが失敗した時にその値をプリントできるように、`Debug` を実装する必要もあるでしょう。第 5 章のリスト 5-12 で触れたように、どちらのトレイトも導出可能なトレイトなので、これは通常、単純に構造体や `enum` 定義に `#[derive(PartialEq, Debug)]` という注釈を追加するだけですみます。これらやその他の導出可能なトレイトに関する詳細については、付録 C、導出可能なトレイトをご覧ください。

11.2.3 カスタムの失敗メッセージを追加する

さらに、`assert!`、`assert_eq!`、`assert_ne!` の追加引数として、失敗メッセージと共にカスタムのメッセージが表示されるよう、追加することもできます。`assert!` の 1 つの必須引数の後に、あるいは `assert_eq!` と `assert_ne!` の 2 つの必須引数の後に指定された引数はすべて `format!` マクロに渡されるので、(`format!` マクロについては第 8 章の + 演算子、または `format!` マクロで連結節で議論しました)、`{}` プレースホルダーを含むフォーマット文字列とこのプレースホルダーに置き換えられる値を渡すことができます。カスタムメッセージは、アサーションがどんな意味を持つかドキュメント化するのに役に立ちます; もしテストが失敗した時、コードにどんな問題があるのかをよりしっかり把握できるはずです。

例として、人々に名前で挨拶をする関数があり、関数に渡した名前が出力に出現することをテストしたいとしましょう:

ファイル名: `src/lib.rs`

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch11-writing-automated-tests/no-listing-05-greeter/src/lib.rs:here}}
```

このプログラムの要件はまだ取り決められておらず、挨拶の先頭の `Hello` というテキストはおそらく変わります。要件が変わった時にテストを更新しなくてもよいようにしたいと考え、`greeting` 関数から返る値と正確な等値性を確認するのではなく、出力が入力引数のテキストを含むことをアサーションするだけにします。

`greeting` が `name` を含まないように変更してこのコードにバグを仕込み、このテストの失敗がどんな風になるのか確かめましょう:

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch11-writing-automated-tests/no-listing-06-greeter-with-bug/src/lib.rs:here}}
```

このテストを実行すると、以下のように出力されます:

```
{{#include ../listings/ch11-writing-automated-tests/no-listing-06-greeter-with-bug/output.txt}}
```

この結果は、アサーションが失敗し、どの行にアサーションがあるかを示しているだけです。今回の場合、失敗メッセージが `greeting` 関数から得た値を出力していればより有用でしょう。テスト関数を変更し、`greeting` 関数から得た実際の値で埋められるプレースホルダーを含むフォーマット文字列からなるカスタムの失敗メッセージを与えてみましょう。

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch11-writing-automated-tests/no-listing-07-custom-failure-message/src/lib.rs:here}}
```

これでテストを実行したら、より有益なエラーメッセージが得られるでしょう:

```
{{#include ../listings/ch11-writing-automated-tests/no-listing-07-custom-failure-message/output.txt}}
```

実際に得られた値がテスト出力に表示されているので、起こると想定していたものではなく、起こったものをデバッグするのに役に立ちます。

11.2.4 `should_panic` でパニックを確認する

期待する正しい値をコードが返すことを確認することに加えて、想定通りにコードがエラー状態を扱っていることを確認するのも重要です。例えば、第 9 章のリスト 9-10 で生成した `Guess` 型を考えてください。`Guess` を使用する他のコードは、`Guess` のインスタンスは 1 から 100 の範囲の値しか含まないという保証に依存しています。その範囲外の値で `Guess` インスタンスを生成しようとするとパニックすることを確認するテストを書くことができます。

これは、テスト関数に `should_panic` という別の属性を追加することで達成できます。この属性は、関数内のコードがパニックしたら、テストを通過させます。つまり、関数内のコードがパニックしなかったら、テストは失敗するわけです。

リスト 11-8 は、予想どおりに `Guess::new` のエラー条件が発生していることを確認するテストを示しています。

ファイル名: `src/lib.rs`

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch11-writing-automated-tests/listing-11-08/src/lib.rs:here}}
```

リスト 11-8: 状況が `panic!` を引き起こすとテストする

`#[test]` 属性の後、適用するテスト関数の前に `#[should_panic]` 属性を配置しています。このテストが通るときの結果を見ましょう:

```
{{#include ../listings/ch11-writing-automated-tests/listing-11-08/output.txt}}
```

よさそうですね！では、値が 100 より大きいときに new 関数がパニックするという条件を除去することでコードにバグを導入しましょう：

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch11-writing-automated-tests/no-listing-08-guess-with-bug/src/lib.rs:here}}
```

リスト 11-8 のテストを実行すると、失敗するでしょう：

```
{{#include ../listings/ch11-writing-automated-tests/no-listing-08-guess-with-bug/output.txt}}
```

この場合、それほど役に立つメッセージは得られませんが、テスト関数に目を向ければ、#[should_panic] で注釈されていることがわかります。得られた失敗は、テスト関数のコードがパニックを引き起こさなかったことを意味するのです。

should_panic を使用するテストは不正確なこともあります。なぜなら、コードが何らかのパニックを起こしたことしか示さないからです。should_panic のテストは、起きると想定していたもの以外の理由でテストがパニックしても通ってしまうのです。should_panic のテストの正確を期すために、should_panic 属性に expected 引数を追加することもできます。このテストハーネスは、失敗メッセージに与えられたテキストが含まれていることを確かめてくれます。例えば、リスト 11-9 の修正された Guess のコードを考えてください。ここでは、new 関数は、値が大きすぎるか小さすぎるかによって異なるメッセージでパニックします。

ファイル名: src/lib.rs

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch11-writing-automated-tests/listing-11-09/src/lib.rs:here}}
```

リスト 11-9: 状況が特定のパニックメッセージで panic! を引き起こすことをテストする

should_panic 属性の expected 引数に置いた値が Guess::new 関数がパニックしたメッセージの一部になっているので、このテストは通ります。予想されるパニックメッセージ全体を指定することもでき、今回の場合、Guess value must be less than or equal to 100, got 200. となります。should_panic の予想される引数に何を指定するかは、パニックメッセージのどこが固有でどこが動局的か、またテストをどの程度正確に行いたいかに依ります。今回の場合、パニックメッセージの一部でも、テスト関数内のコードが、else if value > 100 の場合を実行していると確認するのに事足りるのです。

expected メッセージありの should_panic テストが失敗すると何が起きるのが確かめるために、if value < 1 と else if value > 100 ブロックの本体を入れ替えることで再度コードにバグを仕込

みましょう:

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch11-writing-automated-tests/no-listing-09-guess-with-panic-msg-bug/src/lib.rs:here}}
```

`should_panic` テストを実行すると、今回は失敗するでしょう:

```
{{#include ../listings/ch11-writing-automated-tests/no-listing-09-guess-with-panic-msg-bug/output.txt}}
```

この失敗メッセージは、このテストが確かに予想通りパニックしたことを示していますが、パニックメッセージは、予想される文字列の 'Guess value must be less than or equal to 100' を含んでいませんでした。実際に得られたパニックメッセージは今回の場合、Guess value must be greater than or equal to 1, got 200 でした。そうしてバグの所在地を割り出し始めることができるわけです!

11.2.5 Result<T, E>をテストで使う

これまでは、失敗するとパニックするようなテストを書いてきましたが、`Result<T, E>` を使うようなテストを書くこともできます! 以下は、Listing 11-1 のテストを、`Result<T, E>` を使い、パニックする代わりに `Err` を返すように書き直したものです:

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch11-writing-automated-tests/no-listing-10-result-in-tests/src/lib.rs}}
```

`it_works` 関数の戻り値の型は `Result<(), String>` になりました。関数内で `assert_eq!` マクロを呼び出す代わりに、テストが成功すれば `Ok(())` を、失敗すれば `Err` に `String` を入れて返すようにします。

`Result<T, E>` を返すようなテストを書くと、`?` 演算子をテストの中で使えるようになります。これは、テスト内で何らかの工程が `Err` ヴァリエントを返したときに失敗するべきテストを書くのに便利です。

`Result<T, E>` を使うテストに `#[should_panic]` 注釈を使うことはできません。テストが失敗しなければならないときは、直接 `Err` 値を返してください。

今やテスト記法を複数知ったので、テストを走らせる際に起きていることに目を向け、`cargo test` で使用できるいろんなオプションを探究しましょう。

11.3 テストの実行のされ方を制御する

`cargo run` がコードをコンパイルし、出来上がったバイナリを走らせるのと全く同様に、`cargo test` はコードをテストモードでコンパイルし、出来上がったテストバイナリを実行します。コマンドラインオプションを指定して `cargo test` の既定動作を変更することができます。例えば、`cargo test`

で生成されるバイナリの既定動作は、テストを全て並行に実行し、テスト実行中に生成された出力をキャプチャして出力が表示されるのを防ぎ、テスト結果に関する出力を読みやすくすることです。

コマンドラインオプションの中には `cargo test` にかかるものや、出来上がったテストバイナリにかかるものがあります。この 2 種の引数を区別するために、`cargo test` にかかる引数を `--` という区分記号の後に列挙し、それからテストバイナリにかかる引数を列挙します。`cargo test --help` を走らせると、`cargo test` で使用できるオプションが表示され、`cargo test -- --help` を走らせると、`--` という区分記号の後に使えるオプションが表示されます。

11.3.1 テストを並行または連続して実行する

複数のテストを実行するとき、標準では、スレッドを使用して並行に走ります。これはつまり、テストが早く実行し終わり、コードが機能しているいかにかわらず、反応をより早く得られることを意味します。テストは同時に実行されているので、テストが相互や共有された環境を含む他の共通の状態に依存していないことを確かめてください。現在の作業対象ディレクトリや環境変数などですね。

例えば、各テストがディスクに `test_output.txt` というファイルを作成し、何らかのデータを書き込むコードを走らせるとしてください。そして、各テストはそのファイルのデータを読み取り、ファイルが特定の値を含んでいるとアサーションし、その値は各テストで異なります。テストが同時に走るので、あるテストが、他のテストが書き込んだり読み込んだりする間隙にファイルを上書きするかもしれません。それから 2 番目のテストが失敗します。コードが不正だからではなく、並行に実行されている間にテストがお互いに邪魔をしてしまったせいです。各テストが異なるファイルに書き込むことを確かめるのが一つの解決策です; 別の解決策では、一度に一つのテストを実行します。

並行にテストを実行したくなかったり、使用されるスレッド数をよりきめ細かく制御したい場合、`--test-threads` フラグと使用したいスレッド数をテストバイナリに送ることができます。以下の例に目を向けてください:

```
$ cargo test -- --test-threads=1
```

テストスレッドの数を 1 にセットし、並行性を使用しないようにプログラムに指示しています。1 スレッドのみを使用してテストを実行すると、並行に実行するより時間がかかりますが、状態を共有していても、お互いに邪魔をすることはありません。

11.3.2 関数の出力を表示する

標準では、テストが通ると、Rust のテストライブラリは標準出力に出力されたものを全てキャプチャします。例えば、テストで `println!` を呼び出してテストが通ると、`println!` の出力は、端末に表示されません; テストが通ったことを示す行しか見られないでしょう。テストが失敗すれば、残りの失敗メッセージと共に、標準出力に出力されたものが全て見えるでしょう。

例として、リスト 11-10 は引数の値を出力し、10 を返す馬鹿げた関数と通過するテスト 1 つ、失敗するテスト 1 つです。

ファイル名: src/lib.rs

```
fn prints_and_returns_10(a: i32) -> i32 {
    //{}という値を得た
    println!("I got the value {}", a);
    10
}

#[cfg(test)]
mod tests {
    use super::*;

    #[test]
    fn this_test_will_pass() {
        let value = prints_and_returns_10(4);
        assert_eq!(10, value);
    }

    #[test]
    fn this_test_will_fail() {
        let value = prints_and_returns_10(8);
        assert_eq!(5, value);
    }
}
```

リスト 11-10: println! を呼び出す関数用のテスト

これらのテストを cargo test で実行すると、以下のような出力を目の当たりにするでしょう:

```
running 2 tests
test tests::this_test_will_pass ... ok
test tests::this_test_will_fail ... FAILED

failures:

---- tests::this_test_will_fail stdout ----
    I got the value 8
thread 'tests::this_test_will_fail' panicked at 'assertion failed: `(left ==
    right)`
  left: `5`,
 right: `10`, src/lib.rs:19:8
note: Run with `RUST_BACKTRACE=1` for a backtrace.

failures:
    tests::this_test_will_fail

test result: FAILED. 1 passed; 1 failed; 0 ignored; 0 measured; 0 filtered out
```

この出力のどこにも I got the value 4 と表示されていないことに注意してください。これは、テストに合格した場合に出力されるものです。その出力はキャプチャされてしまいました。失敗したテストのからの出力 I got the value 8 がテストサマリー出力のセクションに表示され、テストが失敗

した原因も示されます。

通過するテストについても出力される値が見たかったら、出力キャプチャ機能を `--nocapture` フラグで無効化することができます:

```
$ cargo test -- --nocapture
```

リスト 11-10 のテストを `--nocapture` フラグと共に再度実行したら、以下のような出力を目の当たりにします:

```
running 2 tests
I got the value 4
I got the value 8
test tests::this_test_will_pass ... ok
thread 'tests::this_test_will_fail' panicked at 'assertion failed: `(left ==
  right)`
  left: `5`,
  right: `10`', src/lib.rs:19:8
note: Run with `RUST_BACKTRACE=1` for a backtrace.
test tests::this_test_will_fail ... FAILED

failures:

failures:
  tests::this_test_will_fail

test result: FAILED. 1 passed; 1 failed; 0 ignored; 0 measured; 0 filtered out
```

テスト用の出力とテスト結果の出力がまぜこぜになっていることに注意してください; その理由は、前節で語ったようにテストが並行に実行されているからです。 `-test-threads=1` オプションと `--nocapture` フラグを使ってみて、その時、出力がどうなるか確かめてください!

11.3.3 名前でテストの一部を実行する

時々、全テストを実行すると時間がかかってしまうことがあります。特定の部分のコードしか対象にしていない場合、そのコードに関わるテストのみを走らせたいかもしれません。 `cargo test` に走らせたいテストの名前を引数として渡すことで、実行するテストを選ぶことができます。

テストの一部を走らせる方法を模擬するために、リスト 11-11 に示したように、 `add_two` 関数用に 3 つテストを作成し、走らせるテストを選択します。

ファイル名: `src/lib.rs`

```
pub fn add_two(a: i32) -> i32 {
    a + 2
}

#[cfg(test)]
```

```
mod tests {  
    use super::*;  
  
    #[test]  
    fn add_two_and_two() {  
        assert_eq!(4, add_two(2));  
    }  
  
    #[test]  
    fn add_three_and_two() {  
        assert_eq!(5, add_two(3));  
    }  
  
    #[test]  
    fn one_hundred() {  
        assert_eq!(102, add_two(100));  
    }  
}
```

リスト 11-11: 異なる名前の 3 つのテスト

以前見かけたように、引数なしでテストを走らせたら、全テストが並行に走ります:

```
running 3 tests  
test tests::add_two_and_two ... ok  
test tests::add_three_and_two ... ok  
test tests::one_hundred ... ok  
  
test result: ok. 3 passed; 0 failed; 0 ignored; 0 measured; 0 filtered out
```

11.3.3.1 単独のテストを走らせる

あらゆるテスト関数の名前を `cargo test` に渡して、そのテストのみを実行することができます:

```
$ cargo test one_hundred  
    Finished dev [unoptimized + debuginfo] target(s) in 0.0 secs  
    Running target/debug/deps/adder-06a75b4a1f2515e9  
  
running 1 test  
test tests::one_hundred ... ok  
  
test result: ok. 1 passed; 0 failed; 0 ignored; 0 measured; 2 filtered out
```

`one_hundred` という名前のテストだけが走りました; 他の 2 つのテストはその名前に合致しなかったのです。まとめ行の最後に `2 filtered out` と表示することでテスト出力は、このコマンドが走らせた以上のテストがあることを知らせてくれています。

この方法では、複数のテストの名前を指定することはできません; `cargo test` に与えられた最初の値のみが使われるのです。ですが、複数のテストを走らせる方法もあります。

11.3.3.2 複数のテストを実行するようフィルターをかける

テスト名の一部を指定でき、その値に合致するあらゆるテストが走ります。例えば、我々のテストの 2 つが `add` という名前を含むので、`cargo test add` を実行することで、その二つを走らせることができます:

```
$ cargo test add
  Finished dev [unoptimized + debuginfo] target(s) in 0.0 secs
  Running target/debug/deps/adder-06a75b4a1f2515e9

running 2 tests
test tests::add_two_and_two ... ok
test tests::add_three_and_two ... ok

test result: ok. 2 passed; 0 failed; 0 ignored; 0 measured; 1 filtered out
```

このコマンドは名前に `add` を含むテストを全て実行し、`one_hundred` という名前のテストを除外しました。また、テストが出現するモジュールがテスト名の一部になっていて、モジュール名でフィルターをかけることで、あるモジュール内のテスト全てを実行できることに注目してください。

11.3.4 特に要望のない限りテストを無視する

時として、いくつかの特定のテストが実行するのに非常に時間がかかることがあり、`cargo test` の実行のほとんどで除外したくなるかもしれません。引数として確かに実行したいテストを全て列挙するのではなく、ここに示したように代わりに時間のかかるテストを `ignore` 属性で除外すると注釈することができます。

ファイル名: `src/lib.rs`

```
#[test]
fn it_works() {
    assert_eq!(2 + 2, 4);
}

#[test]
#[ignore]
fn expensive_test() {
    // 実行に1時間かかるコード
    // code that takes an hour to run
}
```

`#[test]` の後の除外したいテストに `#[ignore]` 行を追加しています。これで、テストを実行したら、`it_works` は実行されるものの、`expensive_test` は実行されません:

```
$ cargo test
Compiling adder v0.1.0 (file:///projects/adder)
```

```
Finished dev [unoptimized + debuginfo] target(s) in 0.24 secs
Running target/debug/deps/adder-ce99bcc2479f4607

running 2 tests
test expensive_test ... ignored
test it_works ... ok

test result: ok. 1 passed; 0 failed; 1 ignored; 0 measured; 0 filtered out
```

`expensive_test` 関数は、`ignored` と列挙されています。無視されるテストのみを実行したかったら、`cargo test -- --ignored` を使うことができます:

```
$ cargo test -- --ignored
Finished dev [unoptimized + debuginfo] target(s) in 0.0 secs
Running target/debug/deps/adder-ce99bcc2479f4607

running 1 test
test expensive_test ... ok

test result: ok. 1 passed; 0 failed; 0 ignored; 0 measured; 1 filtered out
```

どのテストを走らせるか制御することで、結果が早く出ることを確かめることができます。`ignored` テストの結果を確認することが道理に合い、結果を待つだけの時間ができたときに、代わりに `cargo test -- --ignored` を走らせることができます。

11.4 テストの体系化

章の初めで触れたように、テストは複雑な鍛錬であり、人によって専門用語や体系化が異なります。Rust のコミュニティでは、テストを 2 つの大きなカテゴリで捉えています: **単体テスト**と**結合テスト**です。単体テストは小規模でより集中していて、個別に 1 回に 1 モジュールをテストし、非公開のインターフェイスもテストすることがあります。結合テストは、完全にライブラリ外になり、他の外部コード同様に自分のコードを使用し、公開インターフェイスのみ使用し、1 テストにつき複数のモジュールを用いることもあります。

どちらのテストを書くのも、ライブラリの一部が個別かつ共同でしてほしいことをしていることを確認するのに重要なのです。

11.4.1 単体テスト

単体テストの目的は、残りのコードから切り離して各単位のコードをテストし、コードが想定通り、動いたり動いていなかったりする箇所を迅速に特定することです。単体テストは、テスト対象となるコードと共に、**src** ディレクトリの各ファイルに置きます。慣習は、各ファイルに `tests` という名前のモジュールを作り、テスト関数を含ませ、そのモジュールを `cfg(test)` で注釈することです。

11.4.1.1 テストモジュールと#[cfg(test)]

`tests` モジュールの `#[cfg(test)]` という注釈は、コンパイラに `cargo build` を走らせた時ではなく、`cargo test` を走らせた時にだけ、テストコードをコンパイルし走らせるよう指示します。これにより、ライブラリをビルドしたいだけの時にはコンパイルタイムを節約し、テストが含まれないので、コンパイル後の成果物のサイズも節約します。結合テストは別のディレクトリに存在することになるので、`#[cfg(test)]` 注釈は必要ないとわかるでしょう。しかしながら、単体テストはコードと同じファイルに存在するので、`#[cfg(test)]` を使用してコンパイル結果に含まれないよう指定するのです。

この章の最初の節で新しい `adder` プロジェクトを生成した時に、`Cargo` がこのコードも生成してくれたことを思い出してください:

ファイル名: `src/lib.rs`

```
#[cfg(test)]
mod tests {
    #[test]
    fn it_works() {
        assert_eq!(2 + 2, 4);
    }
}
```

このコードが自動生成されたテストモジュールです。`cfg` という属性は、**configuration** を表していて、コンパイラに続く要素が、ある特定の設定オプションを与えられたら、含まれるように指示します。今回の場合、設定オプションは、`test` であり、言語によって提供されているテストをコンパイルし、走らせるためのものです。`cfg` 属性を使用することで、`cargo test` で積極的にテストを実行した場合のみ、`Cargo` がテストコードをコンパイルします。これには、このモジュールに含まれるかもしれないヘルパー関数全ても含まれ、`#[test]` で注釈された関数だけにはなりません。

11.4.1.2 非公開関数をテストする

テストコミュニティ内で非公開関数を直接テストするべきかについては議論があり、他の言語では非公開関数をテストするのは困難だったり、不可能だったりします。あなたがどちらのテストイデオロギーを支持しているかに関わらず、**Rust** の公開性規則により、非公開関数をテストすることが確かに可能です。リスト 11-12 の非公開関数 `internal_adder` を含むコードを考えてください。

ファイル名: `src/lib.rs`

```
pub fn add_two(a: i32) -> i32 {
    internal_adder(a, 2)
}

fn internal_adder(a: i32, b: i32) -> i32 {
```

```
    a + b
}

#[cfg(test)]
mod tests {
    use super::*;

    #[test]
    fn internal() {
        assert_eq!(4, internal_adder(2, 2));
    }
}
```

リスト 11-12: 非公開関数をテストする

`internal_adder` 関数は `pub` とマークされていないものの、テストも単なる Rust のコードであり、`tests` モジュールもただのモジュールでしかないので、テスト内で `internal_adder` を普通にインポートし呼び出すことができます。非公開関数はテストするべきではないとお考えなら、Rust にはそれを強制するものは何もあります。

11.4.2 結合テスト

Rust において、結合テストは完全にライブラリ外のものです。他のコードと全く同様にあなたのライブラリを使用するので、ライブラリの公開 API の一部である関数しか呼び出すことはできません。その目的は、ライブラリのいろんな部分が共同で正常に動作しているかをテストすることです。単体では正常に動くコードも、結合した状態だと問題を孕む可能性もあるので、結合したコードのテストの範囲も同様に重要になるのです。結合テストを作成するには、まず **tests** ディレクトリが必要になります。

11.4.2.1 tests ディレクトリ

プロジェクトディレクトリのトップ階層、**src** の隣に **tests** ディレクトリを作成します。Cargo は、このディレクトリに結合テストのファイルを探すことを把握しています。そして、このディレクトリ内にいくらかでもテストファイルを作成することができ、Cargo はそれぞれのファイルを個別のクレートとしてコンパイルします。

結合テストを作成しましょう。リスト 11-12 のコードが **src/lib.rs** ファイルにあるまま、**tests** ディレクトリを作成し、**tests/integration_test.rs** という名前の新しいファイルを生成し、リスト 11-13 のコードを入力してください。

ファイル名: `tests/integration_test.rs`

```
extern crate adder;

#[test]
```

```
fn it_adds_two() {  
    assert_eq!(4, adder::add_two(2));  
}
```

リスト 11-13: adder クレートの関数の結合テスト

コードの頂点に `extern crate adder` を追記しましたが、これは単体テストでは必要なかったものです。理由は、`tests` ディレクトリのテストはそれぞれ個別のクレートであるため、各々ライブラリをインポートする必要があるためです。

tests/integration_test.rs のどんなコードも `#[cfg(test)]` で注釈する必要はありません。Cargo は `tests` ディレクトリを特別に扱い、`cargo test` を走らせた時にのみこのディレクトリのファイルをコンパイルするのです。さあ、`cargo test` を実行してください:

```
$ cargo test  
Compiling adder v0.1.0 (file:///projects/adder)  
Finished dev [unoptimized + debuginfo] target(s) in 0.31 secs  
Running target/debug/deps/adder-abcabcabc  
  
running 1 test  
test tests::internal ... ok  
  
test result: ok. 1 passed; 0 failed; 0 ignored; 0 measured; 0 filtered out  
  
Running target/debug/deps/integration_test-ce99bcc2479f4607  
  
running 1 test  
test it_adds_two ... ok  
  
test result: ok. 1 passed; 0 failed; 0 ignored; 0 measured; 0 filtered out  
  
Doc-tests adder  
  
running 0 tests  
  
test result: ok. 0 passed; 0 failed; 0 ignored; 0 measured; 0 filtered out
```

3つの区域の出力が単体テスト、結合テスト、ドックテストを含んでいます。単体テスト用の最初の区域は、今まで見てきたものと同じです: 各単体テストに1行(リスト 11-12 で追加した `internal` という名前のもの)と、単体テストのサマリー行です。

結合テストの区域は、`Running target/debug/deps/integration_test-ce99bcc2479f4607` という行で始まっています(最後のハッシュはあなたの出力とは違うでしょう)。次に、この結合テストの各テスト関数用の行があり、`Doc-tests adder` 区域が始まる直前に、結合テストの結果用のサマリー行があります。

単体テスト関数を追加することで単体テスト区域のテスト結果の行が増えたように、作成した結合テストファイルにテスト関数を追加することでそのファイルの区域に結果の行が増えることになりま

す。結合テストファイルはそれぞれ独自の区域があるため、**tests** ディレクトリにさらにファイルを追加すれば、結合テストの区域が増えることになるでしょう。

それでも、テスト関数の名前を引数として `cargo test` に指定することで、特定の結合テスト関数を走らせることができます。特定の結合テストファイルにあるテストを全て走らせるには、`cargo test` に `--test` 引数、その後にファイル名を続けて使用してください:

```
$ cargo test --test integration_test
    Finished dev [unoptimized + debuginfo] target(s) in 0.0 secs
    Running target/debug/integration_test-952a27e0126bb565

running 1 test
test it_adds_two ... ok

test result: ok. 1 passed; 0 failed; 0 ignored; 0 measured; 0 filtered out
```

このコマンドは、**tests/integration_test.rs** ファイルにあるテストのみを実行します。

11.4.2.2 結合テスト内のサブモジュール

結合テストを追加するにつれて、**tests** ディレクトリに 2 つ以上のファイルを作成して体系化しなくなるかもしれません; 例えば、テスト対象となる機能でテスト関数をグループ化することができます。前述したように、**tests** ディレクトリの各ファイルは、個別のクレートとしてコンパイルされます。

各結合テストファイルをそれ自身のクレートとして扱うと、エンドユーザがあなたのクレートを使用するかのように個別のスコープを生成するのに役立ちます。ですが、これは **tests** ディレクトリのファイルが、コードをモジュールとファイルに分ける方法に関して第 7 章で学んだように、**src** のファイルとは同じ振る舞いを共有しないことを意味します。

tests ディレクトリのファイルの異なる振る舞いは、複数の結合テストファイルで役に立ちそうなヘルパー関数ができ、第 7 章の「モジュールを別のファイルに移動する」節の手順に従って共通モジュールに抽出しようとした時に最も気付きやすくなります。例えば、**tests/common.rs** を作成し、そこに `setup` という名前の関数を配置したら、複数のテストファイルの複数のテスト関数から呼び出したい `setup` に何らかのコードを追加することができます:

ファイル名: **tests/common.rs**

```
pub fn setup() {
    // ここにライブラリテスト固有のコードが来る
    // setup code specific to your library's tests would go here
}
```

再度テストを実行すると、**common.rs** ファイルは何もテスト関数を含んだり、`setup` 関数をどこから呼んだりしてないのに、テスト出力に **common.rs** 用の区域が見えるでしょう。

```

running 1 test
test tests::internal ... ok

test result: ok. 1 passed; 0 failed; 0 ignored; 0 measured; 0 filtered out

    Running target/debug/deps/common-b8b07b6f1be2db70

running 0 tests

test result: ok. 0 passed; 0 failed; 0 ignored; 0 measured; 0 filtered out

    Running target/debug/deps/integration_test-d993c68b431d39df

running 1 test
test it_adds_two ... ok

test result: ok. 1 passed; 0 failed; 0 ignored; 0 measured; 0 filtered out

    Doc-tests adder

running 0 tests

test result: ok. 0 passed; 0 failed; 0 ignored; 0 measured; 0 filtered out

```

common が running 0 tests とテスト結果に表示されるのは、望んだ結果ではありません。ただ単に他の結合テストファイルと何らかのコードを共有したかっただけです。

common がテスト出力に出現するのを防ぐには、**tests/common.rs** を作成する代わりに、**tests/common/mod.rs** を作成します。第 7 章の「モジュールファイルシステムの規則」節において、**module_name/mod.rs** という命名規則をサブモジュールのあるモジュールのファイルに使用しました。ここでは common にサブモジュールはありませんが、このように命名することでコンパイラに common モジュールを結合テストファイルとして扱わないように指示します。setup 関数のコードを **tests/common/mod.rs** に移動し、**tests/common.rs** ファイルを削除すると、テスト出力に区域はもう表示されなくなります。**tests** ディレクトリのサブディレクトリ内のファイルは個別クレートとしてコンパイルされたり、テスト出力に区域が表示されることがないのです。

tests/common/mod.rs を作成した後、それをどの結合テストファイルからもモジュールとして使用することができます。こちらは、**tests/integration_test.rs** 内の `it_adds_two` テストから `setup` 関数を呼び出す例です：

ファイル名: `tests/integration_test.rs`

```

extern crate adder;

mod common;

#[test]
fn it_adds_two() {
    common::setup();
}

```

```
    assert_eq!(4, adder::add_two(2));  
}
```

`mod common;` という宣言は、リスト 7-21 で模擬したモジュール宣言と同じであることに注意してください。それから、テスト関数内で `common::setup()` 関数を呼び出すことができます。

11.4.2.3 バイナリクレート用の結合テスト

もしもプロジェクトが **src/main.rs** ファイルのみを含み、**src/lib.rs** ファイルを持たないバイナリクレートだったら、**tests** ディレクトリに結合テストを作成し、`extern crate` を使用して **src/main.rs** ファイルに定義された関数をインポートすることはできません。ライブラリクレートのみが、他のクレートが呼び出して使用できる関数を晒せるのです；バイナリクレートはそれ単体で実行することを意味しています。

これは、バイナリを提供する Rust のプロジェクトに、**src/lib.rs** ファイルに存在するロジックを呼び出す単純な **src/main.rs** ファイルがある一因になっています。この構造を使用して結合テストは、`extern crate` を使用して重要な機能を用いることでライブラリクレートをテストすることができます。この重要な機能が動作すれば、**src/main.rs** ファイルの少量のコードも動作し、その少量のコードはテストする必要がないわけです。

11.5 まとめ

Rust のテスト機能は、変更を加えた後でさえ想定通りにコードが機能し続けることを保証して、コードが機能すべき方法を指定する手段を提供します。単体テストはライブラリの異なる部分を個別に用い、非公開の実装詳細をテストすることができます。結合テストは、ライブラリのいろんな部分が共同で正常に動作することを確認し、ライブラリの公開 API を使用して外部コードが使用するのと同じ方法でコードをテストします。Rust の型システムと所有権ルールにより防がれるバグの種類もあるものの、それでもテストは、コードが振る舞うと予想される方法に関するロジックのバグを減らすのに重要なのです。

この章と以前の章で学んだ知識を結集して、とあるプロジェクトに取り掛かりましょう！

第 12 章

入出力プロジェクト：コマンドラインプログラムを構築する

この章は、ここまで学んできた多くのスキルを思い出すきっかけであり、もういくつか標準ライブラリの機能も探究します。ファイルやコマンドラインの入出力と相互作用するコマンドラインツールを構築し、今やあなたの支配下にある Rust の概念の一部を練習していきます。

Rust の速度、安全性、単バイナリ出力、クロスプラットフォームサポートにより、コマンドラインツールを作るのにふさわしい言語なので、このプロジェクトでは、独自の伝統的なコマンドラインツールの `grep` (**g**lobally **s**earch a **r**egular **e**xpression and **p**rint: 正規表現をグローバルで検索し表示する) を作成していきます。最も単純な使用法では、`grep` は指定したファイルから指定した文字列を検索します。そうするには、`grep` は引数としてファイル名と文字列を受け取ります。それからファイルを読み込んでそのファイル内で文字列引数を含む行を探し、検索した行を出力するのです。

その過程で、多くのコマンドラインツールが使用している端末の機能を使用させる方法を示します。環境変数の値を読み取ってユーザがこのツールの振る舞いを設定できるようにします。また、標準出力 (`stdout`) の代わりに、標準エラーに出力 (`stderr`) するので、例えば、ユーザはエラーメッセージは画面上で確認しつつ、成功した出力はファイルにリダイレクトできます。

Rust コミュニティのあるメンバであるアンドリュー・ガラント (Andrew Gallant) が既に全機能装備の非常に高速な `grep`、`ripgrep` と呼ばれるものを作成しました。比較対象として、我々の `grep` はとても単純ですが、この章により、`ripgrep` のような現実世界のプロジェクトを理解するのに必要な背景知識の一部を身に付けられるでしょう。

この `grep` プロジェクトは、ここまで学んできた多くの概念を集結させます:

- コードを体系化する (モジュール、第 7 章で学んだことを使用)
- ベクタと文字列を使用する (コレクション、第 8 章)
- エラーを処理する (第 9 章)
- 適切な箇所トレイトとライフタイムを使用する (第 10 章)

- テストを記述する (第 11 章)

さらに、クロージャ、イテレータ、トレイトオブジェクトなど、第 13 章、17 章で詳しく講義するものもちょっとだけ紹介します。

12.1 コマンドライン引数を受け付ける

いつものように、`cargo new` で新しいプロジェクトを作りましょう。プロジェクトを `minigrep` と名付けて、既に自分のシステムに存在するかもしれない `grep` ツールと区別しましょう。

最初の仕事は、`minigrep` を二つの引数を受け付けるようにすることです: ファイル名と検索する文字列ですね。つまり、`cargo run` で検索文字列と検索を行うファイルへのパスと共にプログラムを実行できるようになりたいということです。こんな感じにね:

```
$ cargo run searchstring example-filename.txt
```

今現在は、`cargo new` で生成されたプログラムは、与えた引数を処理できません。[Crates.io](https://crates.io) に存在する既存のライブラリには、コマンドライン引数を受け付けるプログラムを書く手助けをしてくれるものもありますが、ちょうどこの概念を学んでいる最中なので、この能力を自分で実装しましょう。

12.1.1 引数の値を読み取る

`minigrep` が渡したコマンドライン引数の値を読み取れるようにするために、**Rust** の標準ライブラリで提供されている関数が必要になり、それは、`std::env::args` です。この関数は、`minigrep` に与えられたコマンドライン引数の**イテレータ**を返します。イテレータについてはまだ議論していません(完全には第 13 章で講義します)が、とりあえずイテレータに関しては、2 つの詳細のみ知っていればいいです: イテレータは一連の値を生成することと、イテレータに対して `collect` 関数を呼び出し、イテレータが生成する要素全部を含むベクタなどのコレクションに変えられることです。

リスト 12-1 のコードを使用して `minigrep` プログラムに渡されたあらゆるコマンドライン引数を読み取れるようにし、それからその値をベクタとして集結させてください。

ファイル名: `src/main.rs`

```
use std::env;

fn main() {
    let args: Vec<String> = env::args().collect();
    println!("{:?}", args);
}
```

リスト 12-1: コマンドライン引数をベクタに集結させ、出力する

まず、`std::env` モジュールを `use` 文でスコープに導入したので、`args` 関数を使用できます。`std::`

`env::args` 関数は、2 レベルモジュールがネストされていることに注目してください。第 7 章で議論したように、希望の関数が 2 モジュール以上ネストされている場合、関数ではなく親モジュールをスコープに導入するのが因習的です。そうすることで、`std::env` から別の関数も容易に使用することができます。また、`use std::env::args` を追記し、関数を `args` とするだけで呼び出すのに比べて曖昧でもありません。というのも、`args` は現在のモジュールに定義されている関数と容易に見間違えられるかもしれないからです。

12.1.2 args 関数と不正なユニコード

引数のどれかが不正なユニコードを含んでいたら、`std::env::args` はパニックすることに注意してください。プログラムが不正なユニコードを含む引数を受け付ける必要があるなら、代わりに `std::env::args_os` を使用してください。この関数は、`String` 値ではなく、`OsString` 値を生成するイテレータを返します。ここでは、簡潔性のために `std::env::args` を使うことを選択しました。なぜなら、`OsString` 値はプラットフォームごとに異なり、`String` 値に比べて取り扱いが煩雑だからです。

`main` の最初の行で `env::args` を呼び出し、そして即座に `collect` を使用して、イテレータをイテレータが生成する値全てを含むベクタに変換しています。`collect` 関数を使用して多くの種類のコレクションを生成することができるので、`args` の型を明示的に注釈して文字列のベクタが欲しいのだと指定しています。**Rust** において、型を注釈しなければならない頻度は非常に少ないのですが、`collect` はよく確かに注釈が必要になる一つの関数なのです。コンパイラには、あなたが欲しているコレクションの種類が推論できないからです。

最後に、デバッグ整形機の `:?` を使用してベクタを出力しています。引数なしでコードを走らせてみて、それから引数二つで試してみましょう：

```
$ cargo run
--snip--
["target/debug/minigrep"]

$ cargo run needle haystack
--snip--
["target/debug/minigrep", "needle", "haystack"]
```

ベクタの最初の値は `"target/debug/minigrep"` であることに注目してください。これはバイナリの名前です。これは `C` の引数リストの振る舞いと合致し、実行時に呼び出された名前をプログラムに使わせてくれるわけです。メッセージで出力したり、プログラムを起動するのに使用されたコマンドラインエイリアスによってプログラムの振る舞いを変えたい場合に、プログラム名にアクセスするのにしばしば便利です。ですが、この章の目的には、これを見捨て、必要な二つの引数のみを保存します。

12.1.3 引数の値を変数に保存する

引数のベクタの値を出力すると、プログラムはコマンドライン引数として指定された値にアクセスできることが説明されました。さて、プログラムの残りを通して使用できるように、二つの引数の値を変数に保存する必要があります。それをしているのがリスト 12-2 です。

ファイル名: src/main.rs

```
use std::env;

fn main() {
    let args: Vec<String> = env::args().collect();

    let query = &args[1];
    let filename = &args[2];

    // {}を探しています
    println!("Searching for {}", query);
    // {}というファイルの中
    println!("In file {}", filename);
}
```

リスト 12-2: クエリ引数とファイル名引数を保持する変数を生成

ベクタを出力した時に確認したように、プログラム名がベクタの最初の値、args[0] を占めているので、添え字 1 から始めます。minigrep が取る最初の引数は、検索する文字列なので、最初の引数への参照を変数 query に置きました。2 番目の引数はファイル名でしょうから、2 番目の引数への参照は変数 filename に置きました。

一時的にこれらの変数の値を出力して、コードが意図通りに動いていることを証明しています。再度このプログラムを test と sample.txt という引数で実行しましょう:

```
$ cargo run test sample.txt
   Compiling minigrep v0.1.0 (file:///projects/minigrep)
   Finished dev [unoptimized + debuginfo] target(s) in 0.0 secs
   Running `target/debug/minigrep test sample.txt`
Searching for test
In file sample.txt
```

素晴らしい、プログラムは動作しています！ 必要な引数の値が、正しい変数に保存されています。後ほど、何らかのエラー処理を加えて、ユーザが引数を提供しなかった場合など、可能性のある特定のエラー状況に対処します; 今は、そのような状況はないものとし、代わりにファイル読み取り能力を追加することに取り組みます。

12.2 ファイルを読み込む

では、filename コマンドライン引数で指定されたファイルを読み込む機能を追加しましょう。まず、テスト実行するためのサンプルファイルが必要です。minigrep が動作していることを確かめるために使用するのに最適なファイルは、複数行にわたって同じ単語の繰り返しのある少量のテキストです。リスト 12-3 は、うまくいくであろうエミリー・ディキンソン (Emily Dickinson) の詩です！プロジェクトのルート階層に **poem.txt** というファイルを作成し、この詩「私は誰でもない！ あなたは誰？」を入力してください。

ファイル名: poem.txt

```
I'm nobody! Who are you?
Are you nobody, too?
Then there's a pair of us - don't tell!
They'd banish us, you know.

How dreary to be somebody!
How public, like a frog
To tell your name the livelong day
To an admiring bog!

私は誰でもない！ あなたは誰？
あなたも誰でもないの？
なら、私たちは組だね、何も言わないで！
あの人たちは、私たちを追放するでしょう。わかりますよね？

誰かでいるなんて侘しいじゃない！
カエルみたいで公すぎるじゃない。
自分の名を長い1日に告げるのなんて。
感服するような沼地にね！
```

リスト 12-3: エミリー・ディキンソンの詩は、いいテストケースになる

テキストを適当な場所に置いて、**src/main.rs** を編集し、ファイルを開くコードを追加してください。リスト 12-4 に示したようにです。

ファイル名: src/main.rs

```
use std::env;
use std::fs::File;
use std::io::prelude::*;

fn main() {
#   let args: Vec<String> = env::args().collect();
#
#   let query = &args[1];
#   let filename = &args[2];
```



```
#
#     println!("Searching for {}", query);
// --snip--
println!("In file {}", filename);

// ファイルが見つかりませんでした
let mut f = File::open(filename).expect("file not found");

let mut contents = String::new();
f.read_to_string(&mut contents)
    // ファイルの読み込み中に問題がありました
    .expect("something went wrong reading the file");

// テキストは\n{}です
println!("With text:\n{}", contents);
}
```

リスト 12-4: 第 2 引数で指定されたファイルの中身を読み込む

最初に、もう何個か `use` 文を追記して、標準ライブラリのある箇所を持ってきています: ファイルを扱うのに `std::fs::File` が必要ですし、`std::io::prelude::*` はファイル入出力を含む入出力処理をするのに有用なトレイトを色々含んでいます。言語が一般的な初期化処理で特定の型や関数を自動的にスコープに導入するように、`std::io` モジュールにはそれ独自の共通の型や関数の初期化処理があり、入出力を行う際に必要になるわけです。標準の初期化処理とは異なり、`std::io` の初期化処理には明示的に `use` 文を加えなければなりません。

`main` に 3 文を追記しました: 一つ目が、`File::open` 関数を呼んで `filename` 変数の値に渡して、ファイルへの可変なハンドルを得る処理です。二つ目が、`contents` という名の変数を生成して、可変で空の `String` を割り当てる処理です。この変数が、ファイル読み込み後に中身を保持します。三つ目が、ファイルハンドルに対して `read_to_string` を呼び出し、引数として `contents` への可変参照を渡す処理です。

それらの行の後に、今回もファイル読み込み後に `contents` の値を出力する一時的な `println!` 文を追記したので、ここまでプログラムがきちんと動作していることを確認できます。

第 1 コマンドライン引数には適当な文字列 (まだ検索する箇所は実装してませんからね) を、第 2 引数に **poem.txt** ファイルを入れて、このコードを実行しましょう:

```
$ cargo run the poem.txt
Compiling minigrep v0.1.0 (file:///projects/minigrep)
Finished dev [unoptimized + debuginfo] target(s) in 0.0 secs
Running `target/debug/minigrep the poem.txt`
Searching for the
In file poem.txt
With text:
I'm nobody! Who are you?
Are you nobody, too?
Then there's a pair of us - don't tell!
They'd banish us, you know.
```

```
How dreary to be somebody!  
How public, like a frog  
To tell your name the livelong day  
To an admiring bog!
```

素晴らしい！コードがファイルの中身を読み込み、出力するようになりました。しかし、このコードにはいくつか欠陥があります。main 関数が複数の責任を受け持っています: 一般に、各関数がただ一つの責任だけを持つようになれば、関数は明確かつ、管理しやすくなります。もう一つの問題点は、できうる限りのエラー処理を怠っていることです。まだプログラムが小規模なので、これらの欠陥は大きな問題にはなりませんが、プログラムが大規模になるにつれ、それを綺麗に解消するのは困難になっていきます。プログラムを開発する際に早い段階でリファクタリングを行うのは、良い戦術です。リファクタリングするコードの量が少なければ、はるかに簡単になりますからね。次は、それを行いましょう。

12.3 リファクタリングしてモジュール性とエラー処理を向上させる

プログラムを改善するために、プログラムの構造と起こりうるエラーに対処する方法に関連する 4 つの問題を修正していきましょう。

1 番目は、main 関数が 2 つの仕事を受け持っていることです: 引数を解析し、ファイルを開いています。このような小さな関数なら、これは、大した問題ではありませんが、main 内でプログラムを巨大化させ続けたら、main 関数が扱う個別の仕事の数も増えていきます。関数が責任を受け持つごとに、正しいことを確認しにくくなり、テストも行いづらくなり、機能を壊さずに変更するのも困難になっていきます。機能を小分けして、各関数が 1 つの仕事のみに責任を持つようにするのが最善です。

この問題は、2 番目の問題にも結びついています: `query` と `filename` はプログラムの設定用変数ですが、`f` や `contents` といった変数は、プログラムのロジックを担っています。main が長くなるほど、スコープに入れるべき変数も増えます。そして、スコープにある変数が増えれば、各々の目的を追うのも大変になるわけです。設定用変数を一つの構造に押し込め、目的を明瞭化するのが最善です。

3 番目の問題は、ファイルを開き損ねた時に `expect` を使ってエラーメッセージを出力しているのに、エラーメッセージが「ファイルが見つかりませんでした」としか表示しないことです。ファイルを開く行為は、ファイルが存在しない以外にもいろんな方法で失敗することがあります: 例えば、ファイルは存在するかもしれないけれど、開く権限がないかもしれないなどです。現時点では、そのような状況になった時、「ファイルが見つかりませんでした」というエラーメッセージを出力し、これはユーザに間違った情報を与えるのです。

4 番目は、異なるエラーを処理するのに `expect` を繰り返し使用しているので、ユーザが十分な数の引数を渡さずにプログラムを起動した時に、問題を明確に説明しない「範囲外アクセス (`index out of bounds`)」というエラーが Rust から得られることです。エラー処理のコードが全て 1 箇所が存在し、将来エラー処理ロジックが変更になった時に、メンテナンス者が 1 箇所のコードのみを考慮すればいいようにするのが最善でしょう。エラー処理コードが 1 箇所にあれば、エンドユーザにとって意

味のあるメッセージを出力していることを確認することにもつながります。

プロジェクトをリファクタリングして、これら 4 つの問題を扱しましょう。

12.3.1 バイナリプロジェクトの責任の分離

`main` 関数に複数の仕事の責任を割り当てるという構造上の問題は、多くのバイナリプロジェクトでありふれています。結果として、`main` が肥大化し始めた際にバイナリプログラムの個別の責任を分割するためにガイドラインとして活用できる工程を Rust コミュニティは、開発しました。この工程は、以下のような手順になっています:

- プログラムを **main.rs** と **lib.rs** に分け、ロジックを **lib.rs** に移動する。
- コマンドライン引数の解析ロジックが小規模な限り、**main.rs** に置いても良い。
- コマンドライン引数の解析ロジックが複雑化の様相を呈し始めたら、**main.rs** から抽出して **lib.rs** に移動する。

この工程の後に `main` 関数に残る責任は以下に限定される:

- 引数の値でコマンドライン引数の解析ロジックを呼び出す
- 他のあらゆる設定を行う
- **lib.rs** の `run` 関数を呼び出す
- `run` がエラーを返した時に処理する

このパターンは、責任の分離についてです: **main.rs** はプログラムの実行を行い、そして、**lib.rs** が手にある仕事のロジック全てを扱います。`main` 関数を直接テストすることはできないので、この構造により、プログラムのロジック全てを **lib.rs** の関数に移すことでテストできるようになります。**main.rs** に残る唯一のコードは、読めばその正当性が評価できるだけ小規模になるでしょう。この工程に従って、プログラムのやり直しをしましょう。

12.3.1.1 引数解析器を抽出する

引数解析の機能を `main` が呼び出す関数に抽出して、コマンドライン引数解析ロジックを **src/lib.rs** に移動する準備をします。リスト 12-5 に新しい関数 `parse_config` を呼び出す `main` の冒頭部を示し、この新しい関数は今だけ **src/main.rs** に定義します。

ファイル名: `src/main.rs`

```
fn main() {
    let args: Vec<String> = env::args().collect();

    let (query, filename) = parse_config(&args);

    // --snip--
}
```

```
fn parse_config(args: &[String]) -> (&str, &str) {  
    let query = &args[1];  
    let filename = &args[2];  
  
    (query, filename)  
}
```

リスト 12-5: main から parse_config 関数を抽出する

それでもまだ、コマンドライン引数をベクタに集結させていますが、main 関数内で引数の値の添え字 1 を変数 query に、添え字 2 を変数 filename に代入する代わりに、ベクタ全体を parse_config 関数に渡しています。そして、parse_config 関数にはどの引数がどの変数に入り、それらの値を main に返すというロジックが存在します。まだ main 内に query と filename という変数を生成していますが、もう main は、コマンドライン引数と変数がどう対応するかを決定する責任は持ちません。

このやり直しは、私たちの小規模なプログラムにはやりすぎに思えるかもしれませんが、少しずつ段階的にリファクタリングしているのです。この変更後、プログラムを再度実行して、引数解析がまだ動作していることを実証してください。問題が発生した時に原因を特定する助けにするために頻繁に進捗を確認するのはいいことです。

12.3.1.2 設定値をまとめる

もう少し parse_config 関数を改善することができます。現時点では、タプルを返していますが、即座にタプルを分解して再度個別の値にしています。これは、正しい抽象化をまだできていないかもしれない兆候です。

まだ改善の余地があると示してくれる他の徴候は、parse_config の config の部分であり、返却している二つの値は関係があり、一つの設定値の一部にどちらもなることを暗示しています。現状では、一つのタプルにまとめていること以外、この意味をデータの構造に載せていません; この二つの値を 1 構造体に置き換え、構造体のフィールドそれぞれに意味のある名前をつけることもできるでしょう。そうすることで将来このコードのメンテナンス者が、異なる値が相互に関係する仕方や、目的を理解しやすくなるでしょう。

注釈: この複雑型 (complex type) がより適切な時に組み込みの値を使うアンチパターンを、**primitive obsession**(訳注: 初めて聞いた表現。組み込み型強迫観念といったところだろうか) と呼ぶ人もいます。

リスト 12-6 は、parse_config 関数の改善を示しています。

ファイル名: src/main.rs

```
# use std::env;  
# use std::fs::File;  
#
```

```
fn main() {
    let args: Vec<String> = env::args().collect();

    let config = parse_config(&args);

    println!("Searching for {}", config.query);
    println!("In file {}", config.filename);

    let mut f = File::open(config.filename).expect("file not found");

    // --snip--
}

struct Config {
    query: String,
    filename: String,
}

fn parse_config(args: &[String]) -> Config {
    let query = args[1].clone();
    let filename = args[2].clone();

    Config { query, filename }
}
```

リスト 12-6: `parse_config` をリファクタリングして `Config` 構造体のインスタンスを返す

`query` と `filename` というフィールドを持つよう定義された `Config` という構造体を追加しました。`parse_config` のシグニチャは、これで `Config` 値を返すと示すようになりました。`parse_config` の本体では、以前は `args` の `String` 値を参照する文字列スライスを返していましたが、今では所有する `String` 値を含むように `Config` を定義しています。`main` の `args` 変数は引数値の所有者であり、`parse_config` 関数だけに借用させていますが、これは `Config` が `args` の値の所有権を奪おうとしたら、**Rust** の借用規則に違反してしまうことを意味します。

`String` のデータは、多くの異なる手法で管理できますが、最も単純だけれどもどこか非効率的な手段は、値に対して `clone` メソッドを呼び出すことです。これにより、`Config` インスタンスが所有するデータの総コピーが生成されるので、文字列データへの参照を保持するよりも時間とメモリを消費します。ですが、データをクローンすることで、コードがとても素直にもなります。というのも、参照のライフタイムを管理する必要がないからです。つまり、この場面において、少々のパフォーマンスを犠牲にして単純性を得るのは、価値のある代償です。

12.3.2 `clone` を使用する代償

実行時コストのために `clone` を使用して所有権問題を解消するのを避ける傾向が多くの Rustacean にあります。第 13 章で、この種の状況においてより効率的なメソッドの使用法を

学んでしょう。ですがとりあえずは、これらのコピーをするのは 1 回だけですし、ファイル名とクエリ文字列は非常に小さなものなので、いくつかの文字列をコピーして進捗するのは良しとしましょう。最初の通り道でコードを究極的に効率化しようとするよりも、ちょっと非効率的でも動くプログラムを用意する方がいいでしょう。もっと Rust の経験を積めば、最も効率的な解決法から開始することも簡単になるでしょうが、今は、clone を呼び出すことは完璧に受け入れられることです。

main を更新したので、parse_config から返された Config のインスタンスを config という変数に置くようになり、以前は個別の query と filename 変数を使用していたコードを更新したので、代わりに Config 構造体のフィールドを使用するようになりました。

これでコードは query と filename が関連していることと、その目的がプログラムの振る舞い方を設定するということをより明確に伝えます。これらの値を使用するあらゆるコードは、config インスタンスの目的の名前を冠したフィールドにそれらを発見することを把握しています。

12.3.2.1 Config のコンストラクタを作成する

ここまでで、コマンドライン引数を解析する責任を負ったロジックを main から抽出し、parse_config 関数に配置しました。そうすることで query と filename の値が関連し、その関係性がコードに載っていることを確認する助けになりました。それから Config 構造体を追加して query と filename の関係する目的を名前付けし、構造体のフィールド名として parse_config 関数からその値の名前を返すことができています。

したがって、今や parse_config 関数の目的は Config インスタンスを生成することになったので、parse_config をただの関数から Config 構造体に紐づく new という関数に変えることができます。この変更を行うことで、コードがより慣用的になります。String などの標準ライブラリの型のインスタンスを、String::new を呼び出すことで生成できます。同様に、parse_config を Config に紐づく new 関数に変えれば、Config::new を呼び出すことで Config のインスタンスを生成できるようになります。リスト 12-7 が、行う必要のある変更を示しています。

ファイル名: src/main.rs

```
# use std::env;
#
fn main() {
    let args: Vec<String> = env::args().collect();

    let config = Config::new(&args);

    // --snip--
}

# struct Config {
#     query: String,
#     filename: String,
```

```
# }
#
// --snip--

impl Config {
    fn new(args: &[String]) -> Config {
        let query = args[1].clone();
        let filename = args[2].clone();

        Config { query, filename }
    }
}
```

リスト 12-7: `parse_config` を `Config::new` に変える

`parse_config` を呼び出していた `main` を代わりに `Config::new` を呼び出すように更新しました。`parse_config` の名前を `new` に変え、`impl` ブロックに入れ込んだので、`new` 関数と `Config` が紐づくようになりました。再度このコードをコンパイルしてみて、動作することを確認してください。

12.3.3 エラー処理を修正する

さて、エラー処理の修正に取り掛かりましょう。ベクタが 2 個以下の要素しか含んでいないときに `args` ベクタの添え字 1 か 2 にアクセスしようとすると、プログラムがパニックすることを思い出してください。試しに引数なしでプログラムを実行してください。すると、こんな感じになります:

```
$ cargo run
   Compiling minigrep v0.1.0 (file:///projects/minigrep)
   Finished dev [unoptimized + debuginfo] target(s) in 0.0 secs
   Running `target/debug/minigrep`
thread 'main' panicked at 'index out of bounds: the len is 1
but the index is 1', src/main.rs:29:21
(スレッド 'main' は、「境界外アクセス: 長さは1なのに添え字も1です」でパニックしました)
note: Run with `RUST_BACKTRACE=1` for a backtrace.
```

境界外アクセス: 長さは1なのに添え字も1です という行は、プログラマ向けのエラーメッセージです。エンドユーザが起きたことと代わりにすべきことを理解する手助けにはならないでしょう。これを今修正しましょう。

12.3.3.1 エラーメッセージを改善する

リスト 12-8 で、`new` 関数に、添え字 1 と 2 にアクセスする前にスライスが十分長いことを実証するチェックを追加しています。スライスの長さが十分でなければ、プログラムはパニックし、境界外インデックス よりもいいエラーメッセージを表示します。

ファイル名: `src/main.rs`

```
// --snip--
fn new(args: &[String]) -> Config {
    if args.len() < 3 {
        // 引数の数が足りません
        panic!("not enough arguments");
    }
    // --snip--
```

リスト 12-8: 引数の数のチェックを追加する

このコードは、リスト 9-9 で記述した `value` 引数が正常な値の範囲外だった時に `panic!` を呼び出した `Guess::new` 関数と似ています。ここでは、値の範囲を確かめる代わりに、`args` の長さが少なくとも 3 であることを確かめていて、関数の残りの部分は、この条件が満たされているという前提のもとで処理を行うことができます。`args` に 2 要素以下しかなければ、この条件は真になり、`panic!` マクロを呼び出して、即座にプログラムを終了させます。

では、`new` のこの追加の数行がある状態で、再度引数なしでプログラムを走らせ、エラーがどんな見た目か確かめましょう:

```
$ cargo run
Compiling minigrep v0.1.0 (file:///projects/minigrep)
Finished dev [unoptimized + debuginfo] target(s) in 0.0 secs
Running `target/debug/minigrep`
thread 'main' panicked at 'not enough arguments', src/main.rs:30:12
(スレッド 'main' は「引数が足りません」でパニックしました)
note: Run with `RUST_BACKTRACE=1` for a backtrace.
```

この出力の方がマシです: これでエラーメッセージが合理的になりました。ですが、ユーザに与えたくない追加の情報も含まれてしまっています。おそらく、ここではリスト 9-9 で使用したテクニックを使用するのは最善ではありません: `panic!` の呼び出しは、第 9 章で議論したように、使用の問題よりもプログラミング上の問題により適しています。代わりに、第 9 章で学んだもう一つのテクニックを使用することができます。成功か失敗かを示唆する `Result` を返すことです。

12.3.3.2 `panic!` を呼び出す代わりに `new` から `Result` を返す

代わりに、成功時には `Config` インスタンスを含み、エラー時には問題に言及する `Result` 値を返すことができます。`Config::new` が `main` と対話する時、`Result` 型を使用して問題があったと信号を送ることができます。それから `main` を変更して、`panic!` 呼び出しが引き起こしていた `thread 'main'` と `RUST_BACKTRACE` に関する周囲のテキストがない、ユーザ向けのより実用的なエラーに `Err` 列挙子を変換することができます。

リスト 12-9 は、`Config::new` の戻り値に必要な変更と `Result` を返すのに必要な関数の本体を示しています。`main` も更新するまで、これはコンパイルできないことに注意してください。その更新は次のリストで行います。

ファイル名: src/main.rs

```
impl Config {
    fn new(args: &[String]) -> Result<Config, &'static str> {
        if args.len() < 3 {
            return Err("not enough arguments");
        }

        let query = args[1].clone();
        let filename = args[2].clone();

        Ok(Config { query, filename })
    }
}
```

リスト 12-9: Config::new から Result を返却する

new 関数は、これで、成功時には Config インスタンスを、エラー時には &'static str を伴う Result を返すようになりました。第 10 章の「静的ライフタイム」節から &'static str は文字列リテラルの型であることを思い出してください。これは、今はエラーメッセージの型になっています。

new 関数の本体で 2 つ変更を行いました: 十分な数の引数をユーザが渡さなかった場合に panic! を呼び出す代わりに、今は Err 値を返し、Config 戻り値を Ok に包んでいます。これらの変更により、関数が新しい型シグニチャに適合するわけです。

Config::new から Err 値を返すことにより、main 関数は、new 関数から返ってくる Result 値を処理し、エラー時により綺麗にプロセスから抜け出すことができます。

12.3.3.3 Config::new を呼び出し、エラーを処理する

エラーケースを処理し、ユーザフレンドリーなメッセージを出力するために、main を更新して、リスト 12-10 に示したように Config::new から返されている Result を処理する必要があります。また、panic! からコマンドラインツールを 0 以外のエラーコードで抜け出す責任も奪い取り、手作業でそれも実装します。0 以外の終了コードは、我々のプログラムを呼び出したプロセスにプログラムがエラー状態で終了したことを通知する慣習です。

ファイル名: src/main.rs

```
use std::process;

fn main() {
    let args: Vec<String> = env::args().collect();

    let config = Config::new(&args).unwrap_or_else(|err| {
        // 引数解析時に問題
        println!("Problem parsing arguments: {}", err);
        process::exit(1);
    });
}
```

```
// --snip--
```

リスト 12-10: 新しい Config 作成に失敗したら、エラーコードで終了する

このリストにおいて、以前には講義していないメソッドを使用しました: `unwrap_or_else` です。これは標準ライブラリで `Result<T, E>` に定義されています。`unwrap_or_else` を使うことで、`panic!` ではない何らかの独自のエラー処理を定義できるのです。この `Result` が `Ok` 値だったら、このメソッドの振る舞いは `unwrap` に似ています: `Ok` が包んでいる中身の値を返すのです。しかし、値が `Err` 値なら、このメソッドは、**クロージャ**内でコードを呼び出し、クロージャは私たちが定義し、引数として `unwrap_or_else` に渡す匿名関数です。クロージャについては第 13 章で詳しく講義します。とりあえず、`unwrap_or_else` は、今回リスト 12-9 で追加した `not enough arguments` という静的文字列の `Err` の中身を、縦棒の間に出現する `err` 引数のクロージャに渡していることだけ知っておく必要があります。クロージャのコードはそれから、実行された時に `err` 値を使用できます。

新規 `use` 行を追加して標準ライブラリから `process` をインポートしました。クロージャ内のエラー時に走るコードは、たった 2 行です: `err` の値を出力し、それから `process::exit` を呼び出します。`process::exit` 関数は、即座にプログラムを停止させ、渡された数字を終了コードとして返します。これは、リスト 12-8 で使用した `panic!` ベースの処理と似ていますが、もう余計な出力はされません。試みましょう:

```
$ cargo run
Compiling minigrep v0.1.0 (file:///projects/minigrep)
Finished dev [unoptimized + debuginfo] target(s) in 0.48 secs
Running `target/debug/minigrep`
Problem parsing arguments: not enough arguments
```

素晴らしい! この出力の方が遥かにユーザに優しいです。

12.3.4 main からロジックを抽出する

これで設定解析のリファクタリングが終了したので、プログラムのロジックに目を向けましょう。「バイナリプロジェクトの責任の分離」で述べたように、現在 `main` 関数に存在する設定のセットアップやエラー処理に関わらない全てのロジックを保持することになる `run` という関数を抽出します。やり終わったら、`main` は簡潔かつ視察で確かめやすくなり、他のロジック全部に対してテストを書くことができるでしょう。

リスト 12-11 は、抜き出した `run` 関数を示しています。今は少しずつ段階的に関数を抽出する改善を行っています。それでも、**`src/main.rs`** に関数を定義していきます。

ファイル名: `src/main.rs`

```
fn main() {
```

```
// --snip--

println!("Searching for {}", config.query);
println!("In file {}", config.filename);

run(config);
}

fn run(config: Config) {
    let mut f = File::open(config.filename).expect("file not found");

    let mut contents = String::new();
    f.read_to_string(&mut contents)
        .expect("something went wrong reading the file");

    println!("With text:\n{}", contents);
}

// --snip--
```

リスト 12-11: 残りのプログラムロジックを含む run 関数を抽出する

これで run 関数は、ファイル読み込みから始まる main 関数の残りのロジック全てを含むようになりました。この run 関数は、引数に Config インスタンスを取ります。

12.3.4.1 run 関数からエラーを返す

残りのプログラムロジックが run 関数に隔離されたので、リスト 12-9 の Config::new のように、エラー処理を改善することができます。expect を呼び出してプログラムにパニックさせる代わりに、run 関数は、何か問題が起きた時に Result<T, E> を返します。これにより、さらにエラー処理周りのロジックをユーザに優しい形で main に統合することができます。リスト 12-12 にシグニチャと run 本体に必要な変更を示しています。

ファイル名: src/main.rs

```
use std::error::Error;

// --snip--

fn run(config: Config) -> Result<(), Box<Error>> {
    let mut f = File::open(config.filename)?;

    let mut contents = String::new();
    f.read_to_string(&mut contents)?;

    println!("With text:\n{}", contents);

    Ok(())
}
```

リスト 12-12: run 関数を変更して Result を返す

ここでは、3つの大きな変更を行いました。まず、run 関数の戻り値を `Result<(), Box<Error>>` に変えました。この関数は、以前はユニット型、`()` を返していて、それを `Ok` の場合に返される値として残しました。

エラー型については、**トレイトオブジェクト**の `Box<Error>` を使用しました (同時に冒頭で `use` 文により、`std::error::Error` をスコープに導入しています)。トレイトオブジェクトについては、第 17 章で講義します。とりあえず、`Box<Error>` は、関数が `Error` トレイトを実装する型を返すことを意味しますが、戻り値の型を具体的に指定しなくても良いことを覚えておいてください。これにより、エラーケースによって異なる型のエラー値を返す柔軟性を得ます。

2 番目に、`expect` の呼び出しよりも `?` 演算子を選択して取り除きました。第 9 章で語りましたね。エラーでパニックするのではなく、`?` 演算子は呼び出し元が処理できるように、現在の関数からエラー値を返します。

3 番目に、run 関数は今、成功時に `Ok` 値を返すようになりました。run 関数の成功型は、シグニチャで `()` と定義したので、ユニット型の値を `Ok` 値に包む必要があります。最初は、この `Ok()` という記法は奇妙に見えるかもしれませんが、このように `()` を使うことは、run を副作用のためだけに呼び出していると示唆する慣習的な方法です; 必要な値は返しません。

このコードを実行すると、コンパイルは通るものの、警告が表示されるでしょう:

```
warning: unused `std::result::Result` which must be used
(警告: 使用されなければならない`std::result::Result`が未使用です)
--> src/main.rs:18:5
   |
18 |     run(config);
   |     ^^^^^^^^^^^^^
= note: #[warn(unused_must_use)] on by default
```

コンパイラは、コードが `Result` 値を無視していると教えてくれて、この `Result` 値は、エラーが発生したと示唆しているかもしれません。しかし、エラーがあったか確認するつもりはありませんが、コンパイラは、ここにエラー処理コードを書くつもりだったんじゃないかと思わせてくれています! 今、その問題を改修しましょう。

12.3.4.2 main で run から返ってきたエラーを処理する

リスト 12-10 の `Config::new` に対して行った方法に似たテクニックを使用してエラーを確認し、扱いますが、少し違いがあります:

ファイル名: `src/main.rs`

```
fn main() {
    // --snip--
```

```
println!("Searching for {}", config.query);
println!("In file {}", config.filename);

if let Err(e) = run(config) {
    println!("Application error: {}", e);

    process::exit(1);
}
```

`unwrap_or_else`ではなく、`if let`で `run` が `Err` 値を返したかどうかを確認し、そうなら `process::exit(1)` を呼び出しています。`run` 関数は、`Config::new` が `Config` インスタンスを返すのと同じように `unwrap` したい値を返すことはありません。`run` は成功時に `()` を返すので、エラーを検知することにのみ興味があり、`()` でしかないので、`unwrap_or_else` に包まれた値を返してもらう必要はないのです。

`if let` と `unwrap_or_else` 関数の中身はどちらも同じです: エラーを出力して終了します。

12.3.5 コードをライブラリクレートに分割する

ここまで `minigrep` は良さそうですね! では、テストを行え、**`src/main.rs`** ファイルの責任が減らせるように、**`src/main.rs`** ファイルを分割し、一部のコードを **`src/lib.rs`** ファイルに置きましょう。

`main` 関数以外のコード全部を **`src/main.rs`** から **`src/lib.rs`** に移動しましょう:

- `run` 関数定義
- 関係する `use` 文
- `Config` の定義
- `Config::new` 関数定義

`src/lib.rs` の中身にはリスト 12-13 に示したようなシグニチャがあるはずです (関数の本体は簡潔性のために省略しました)。リスト 12-14 で **`src/main.rs`** に変更を加えるまで、このコードはコンパイルできないことに注意してください。

ファイル名: `src/lib.rs`

```
use std::error::Error;
use std::fs::File;
use std::io::prelude::*;

pub struct Config {
    pub query: String,
    pub filename: String,
}

impl Config {
```

```
pub fn new(args: &[String]) -> Result<Config, &'static str> {
    // --snip--
}

pub fn run(config: Config) -> Result<(), Box<Error>> {
    // --snip--
}
```

リスト 12-13: Config と run を **src/lib.rs** に移動する

ここでは、寛大に pub を使用しています: Config のフィールドと new メソッドと run 関数です。これでテスト可能な公開 API のあるライブラリクレートができました!

さて、**src/lib.rs** に移動したコードを **src/main.rs** のバイナリクレートのスコープに持っていく必要があります。リスト 12-14 に示したようにですね。

ファイル名: src/main.rs

```
extern crate minigrep;

use std::env;
use std::process;

use minigrep::Config;

fn main() {
    // --snip--
    if let Err(e) = minigrep::run(config) {
        // --snip--
    }
}
```

リスト 12-14: minigrep クレートを **src/main.rs** のスコープに持っていく

ライブラリクレートをバイナリクレートに持っていくのに、extern crate minigrep を使用しています。それから use minigrep::Config 行を追加して Config 型をスコープに持ってきて、run 関数にクレート名を接頭辞として付けます。これで全機能が連結され、動くはずです。cargo run でプログラムを走らせて、すべてがうまくいっていることを確かめてください。

ふう! 作業量が多かったですね。ですが、将来成功する準備はできています。もう、エラー処理は遥かに楽になり、コードのモジュール化もできました。ここから先の作業は、ほぼ **src/lib.rs** で完結するでしょう。

古いコードでは大変だけれども、新しいコードでは楽なことをして新発見のモジュール性を活用しましょう: テストを書くのです!

12.4 テスト駆動開発でライブラリの機能を開発する

今や、ロジックを **src/lib.rs** に抜き出し、引数集めとエラー処理を **src/main.rs**に残したので、コードの核となる機能のテストを書くのが非常に容易になりました。いろんな引数で関数を直接呼び出し、コマンドラインからバイナリを呼び出す必要なく戻り値を確認できます。ご自由に `Config::new` や `run` 関数の機能のテストは、ご自身でお書きください。

この節では、テスト駆動開発 (TDD) 過程を活用して `minigrep` プログラムに検索ロジックを追加します。このソフトウェア開発テクニックは、以下の手順に従います:

1. 失敗するテストを書き、走らせて想定通りの理由で失敗することを確認する。
2. 十分な量のコードを書くか変更して新しいテストを通過するようにする。
3. 追加または変更したばかりのコードをリファクタリングし、テストが通り続けることを確認する。
4. 手順 1 から繰り返す!

この過程は、ソフトウェアを書く多くの方法の一つに過ぎませんが、TDD によりコードデザインも駆動することができます。テストを通過させるコードを書く前にテストを書くことで、過程を通して高いテストカバー率を保つ助けになります。

実際にクエリ文字列の検索を行う機能の実装をテスト駆動し、クエリに合致する行のリストを生成します。この機能を `search` という関数に追加しましょう。

12.4.1 失敗するテストを記述する

もう必要ないので、プログラムの振る舞いを確認していた `println!` 文を **src/lib.rs** と **src/main.rs** から削除しましょう。それから **src/lib.rs** で、テスト関数のある `test` モジュールを追加します。第 11 章のようにですね。このテスト関数が `search` 関数に欲しい振る舞いを指定します: クエリとそれを検索するテキストを受け取り、クエリを含む行だけをテキストから返します。リスト 12-15 にこのテストを示していますが、まだコンパイルは通りません。

ファイル名: `src/lib.rs`

```
# fn search<'a>(query: &str, contents: &'a str) -> Vec<&'a str> {
#     vec![]
# }
#
#[cfg(test)]
mod test {
    use super::*;

    #[test]
    fn one_result() {
```

```
let query = "duct";
// Rustは
// 安全で速く生産性も高い。
// 3つ選んで。
let contents = "\
Rust:
safe, fast, productive.
Pick three.";

assert_eq!(
    vec!["safe, fast, productive."],
    search(query, contents)
);
}
```

リスト 12-15: こうだったらいいなという search 関数の失敗するテストを作成する

このテストは、"duct" という文字列を検索します。検索対象の文字列は 3 行で、うち 1 行だけが "duct" を含みます。search 関数から返る値が想定している行だけを含むことをアサーションします。

このテストを走らせ、失敗するところを観察することはできません。このテストはコンパイルもできないからです: まだ search 関数が存在していません! ゆえに今度は、空のベクタを常に返す search 関数の定義を追加することで、テストをコンパイルし走らせるだけのコードを追記します。リスト 12-16 に示したようにですね。そうすれば、テストはコンパイルでき、失敗するはずです。なぜなら、空のベクタは、"safe, fast, productive." という行を含むベクタとは合致しないからです。

ファイル名: src/lib.rs

```
pub fn search<'a>(query: &str, contents: &'a str) -> Vec<'a str> {
    vec![]
}
```

リスト 12-16: テストがコンパイルできるのに十分なだけ search 関数を定義する

明示的なライフタイムの 'a が search のシグニチャで定義され、contents 引数と戻り値で使用されていることに注目してください。第 10 章からライフタイム仮引数は、どの実引数のライフタイムが戻り値のライフタイムに関連づけられているかを指定することを思い出してください。この場合、返却されるベクタは、(query 引数ではなく) contents 引数のスライス参照する文字列スライスを含むべきと示唆しています。

言い換えると、コンパイラに search 関数に返されるデータは、search 関数に contents 引数で渡されているデータと同期間生きることを教えています。これは重要なことです! スライスに参照されるデータは、参照が有効になるために有効である必要があります; コンパイラが contents ではなく query の文字列スライスを生成すると想定してしまったら、安全性チェックを間違ってしまうことになってしまいます。

ライフタイム注釈を忘れてこの関数をコンパイルしようとする、こんなエラーが出ます:

```
error[E0106]: missing lifetime specifier
(エラー: ライフタイム指定子が欠けています)
--> src/lib.rs:5:51
   |
5 | pub fn search(query: &str, contents: &str) -> Vec<&str> {
   |                                           ^ expected lifetime
parameter
   |
   = help: this function's return type contains a borrowed value, but the
signature does not say whether it is borrowed from `query` or `contents`
(助言: この関数の戻り値は、借用された値を含んでいますが、シグニチャにはそれ
が、
`query`か`contents`から借用されたものであるかが示されていません)
```

コンパイラには、二つの引数のどちらが必要なのか知る由がないので、教えてあげる必要があるのです。contents がテキストを全て含む引数で、合致するそのテキストの一部を返したいので、contents がライフタイム記法で戻り値に関連づくはずの引数であることをプログラマは知っています。

他のプログラミング言語では、シグニチャで引数と戻り値を関連づける必要はありません。これは奇妙に思えるかもしれませんが、時間とともに楽になっていきます。この例を第 10 章、「ライフタイムで参照を有効化する」節と比較したくなるかもしれません。

さあ、テストを実行しましょう:

```
$ cargo test
  Compiling minigrep v0.1.0 (file:///projects/minigrep)
--warnings--
  Finished dev [unoptimized + debuginfo] target(s) in 0.43 secs
  Running target/debug/deps/minigrep-abcabcabc

running 1 test
test test::one_result ... FAILED

failures:

---- test::one_result stdout ----
thread 'test::one_result' panicked at 'assertion failed: `(left ==
right)`
left: `["safe, fast, productive."]`,
right: `[]`', src/lib.rs:48:8
note: Run with `RUST_BACKTRACE=1` for a backtrace.

failures:
  test::one_result

test result: FAILED. 0 passed; 1 failed; 0 ignored; 0 measured; 0 filtered out
error: test failed, to rerun pass '--lib'
```

素晴らしい。テストは全く想定通りに失敗しています。テストが通るようにしましょう！

12.4.2 テストを通過させるコードを書く

空のベクタを常に返しているために、現状テストは失敗しています。それを修正し、`search` を実装するには、プログラムは以下の手順に従う必要があります：

- 中身を各行ごとに繰り返す。
- 行にクエリ文字列が含まれるか確認する。
- するなら、それを返却する値のリストに追加する。
- しないなら、何もしない。
- 一致する結果のリストを返す。

各行を繰り返す作業から、この手順に順に取り掛かりましょう。

12.4.2.1 `lines` メソッドで各行を繰り返す

Rust には、文字列を行ごとに繰り返す役立つメソッドがあり、利便性のために `lines` と名付けられ、リスト 12-17 のように動作します。まだ、これはコンパイルできないことに注意してください。

ファイル名: `src/lib.rs`

```
pub fn search<'a>(query: &str, contents: &'a str) -> Vec<&'a str> {  
    for line in contents.lines() {  
        // 行に対して何かする  
        // do something with line  
    }  
}
```

リスト 12-17: `contents` の各行を繰り返す

`lines` メソッドはイテレータを返します。イテレータについて詳しくは、第 13 章で話しますが、リスト 3-5 でこのようなイテレータの使用法は見かけたことを思い出してください。そこでは、イテレータに `for` ループを使用してコレクションの各要素に対して何らかのコードを走らせていました。

12.4.2.2 クエリを求めて各行を検索する

次に現在の行がクエリ文字列を含むか確認します。幸運なことに、文字列にはこれを行ってくれる `contains` という役に立つメソッドがあります！`search` 関数に、`contains` メソッドの呼び出しを追加してください。リスト 12-18 のようにですね。それでもまだコンパイルできないことに注意してください。

ファイル名: `src/lib.rs`

```
pub fn search<'a>(query: &str, contents: &'a str) -> Vec<&'a str> {
    for line in contents.lines() {
        if line.contains(query) {
            // do something with line
        }
    }
}
```

リスト 12-18: 行が query の文字列を含むか確認する機能を追加する

12.4.2.3 合致した行を保存する

また、クエリ文字列を含む行を保存する方法が必要です。そのために、for ループの前に可変なベクタを生成し、push メソッドを呼び出して line をベクタに保存することができます。for ループの後でベクタを返却します。リスト 12-19 のようにですね。

ファイル名: src/lib.rs

```
pub fn search<'a>(query: &str, contents: &'a str) -> Vec<&'a str> {
    let mut results = Vec::new();

    for line in contents.lines() {
        if line.contains(query) {
            results.push(line);
        }
    }

    results
}
```

リスト 12-19: 合致する行を保存したので、返すことができる

これで search 関数は、query を含む行だけを返すはずであり、テストも通るはずです。テストを実行しましょう:

```
$ cargo test
--snip--
running 1 test
test test::one_result ... ok

test result: ok. 1 passed; 0 failed; 0 ignored; 0 measured; 0 filtered out
```

テストが通り、動いていることがわかりました！

ここで、テストが通過するよう保ったまま、同じ機能を保持しながら、検索関数の実装をリファクタリングする機会を考えることもできます。検索関数のコードは悪すぎるわけではありませんが、イテレータの有用な機能の一部を活用していません。この例には第 13 章で再度触れ、そこでは、イテ

レータをより深く探究し、さらに改善する方法に目を向けます。

12.4.2.4 run 関数内で search 関数を使用する

search 関数が動きテストできたので、run 関数から search を呼び出す必要があります。config.query の値と、ファイルから run が読み込む contents の値を search 関数に渡す必要があります。それから run は、search から返ってきた各行を出力するでしょう:

ファイル名: src/lib.rs

```
pub fn run(config: Config) -> Result<(), Box<Error>> {
    let mut f = File::open(config.filename)?;

    let mut contents = String::new();
    f.read_to_string(&mut contents)?;

    for line in search(&config.query, &contents) {
        println!("{}", line);
    }

    Ok(())
}
```

それでも for ループで search から各行を返し、出力しています。

さて、プログラム全体が動くはずです！ 試してみましょう。まずはエミリー・ディキンソンの詩から、ちょうど 1 行だけを返すはずの言葉から。”frog” です:

```
$ cargo run frog poem.txt
Compiling minigrep v0.1.0 (file:///projects/minigrep)
Finished dev [unoptimized + debuginfo] target(s) in 0.38 secs
Running `target/debug/minigrep frog poem.txt`
How public, like a frog
```

かっこいい！ 今度は、複数行にマッチするであろう言葉を試しましょう。”body” とかね:

```
$ cargo run body poem.txt
Finished dev [unoptimized + debuginfo] target(s) in 0.0 secs
Running `target/debug/minigrep body poem.txt`
I' m nobody! Who are you?
Are you nobody, too?
How dreary to be somebody!
```

そして最後に、詩のどこにも現れない単語を探したときに、何も出力がないことを確かめましょう。”monomorphization” などね:

```
$ cargo run monomorphization poem.txt
Finished dev [unoptimized + debuginfo] target(s) in 0.0 secs
Running `target/debug/minigrep monomorphization poem.txt`
```

最高です！ 古典的なツールの独自のミニバージョンを構築し、アプリケーションを構造化する方法を多く学びました。また、ファイル入出力、ライフタイム、テスト、コマンドライン引数の解析についても、少し学びました。

このプロジェクトをまとめ上げるために、環境変数を扱う方法と標準エラー出力に出力する方法を少しだけデモします。これらはどちらも、コマンドラインプログラムを書く際に有用です。

12.5 環境変数を取り扱う

おまけの機能を追加して `minigrep` を改善します: 環境変数でユーザがオンにできる大文字小文字無視の検索用のオプションです。この機能をコマンドラインオプションにして、適用したい度にユーザが入力しなければならないようにすることもできますが、代わりに環境変数を使用します。そうすることでユーザは 1 回環境変数をセットすれば、そのターミナルセッションの間は、大文字小文字無視の検索を行うことができるようになるわけです。

12.5.1 大文字小文字を区別しない `search` 関数用に失敗するテストを書く

環境変数がオンの場合に呼び出す `search_case_insensitive` 関数を新しく追加したいです。テスト駆動開発の過程に従い続けるので、最初の手順は、今回も失敗するテストを書くことです。新しい `search_case_insensitive` 関数用の新規テストを追加し、古いテストを `one_result` から `case_sensitive` に名前変更して、二つのテストの差異を明確化します。リスト 12-20 に示したようにですね。

ファイル名: `src/lib.rs`

```
#[cfg(test)]
mod test {
    use super::*;

    #[test]
    fn case_sensitive() {
        let query = "duct";

        // Rust
        // 安全かつ高速で生産的
        // 三つを選んで
        // ガムテープ
        let contents = "\
Rust:
safe, fast, productive.
Pick three.
Duct tape.";

        assert_eq!(
            vec!["safe, fast, productive."],
            search(query, contents)
        );
    }
}
```

```
    );  
}  
  
#[test]  
fn case_insensitive() {  
    let query = "rUsT";  
    // (最後の行のみ)  
    // 私を信じて  
    let contents = "\n  
Rust:  
safe, fast, productive.  
Pick three.  
Trust me.";  
  
    assert_eq!(  
        vec!["Rust:", "Trust me."],  
        search_case_insensitive(query, contents)  
    );  
}
```

リスト 12-20: 追加しようとしている大文字小文字を区別しない関数用の失敗するテストを新しく追加する

古いテストの `contents` も変更していることに注意してください。大文字小文字を区別する検索を行う際に、`"duct"` というクエリに合致しないはずの大文字 `D` を使用した `"Duct tape"` (ガムテープ) という新しい行を追加しました。このように古いテストを変更することで、既に実装済みの大文字小文字を区別する検索機能を誤って壊してしまわないことを保証する助けになります。このテストはもう通り、大文字小文字を区別しない検索に取り掛かっても通り続けるはずです。

大文字小文字を区別しない検索の新しいテストは、クエリに `"rUsT"` を使用しています。追加直前の `search_case_insensitive` 関数では、`"rUsT"` というクエリは、両方ともクエリとは大文字小文字が異なるのに、大文字 `R` の `"Rust:"` を含む行と、`"Trust me."` という行にもマッチするはずです。これが失敗するテストであり、まだ `search_case_insensitive` 関数を定義していないので、コンパイルは失敗するでしょう。リスト 12-16 の `search` 関数で行ったのと同様に空のベクタを常に返すような仮実装を追加し、テストがコンパイルされるものの、失敗する様をご自由に確認してください。

12.5.2 `search_case_insensitive` 関数を実装する

`search_case_insensitive` 関数は、リスト 12-21 に示しましたが、`search` 関数とほぼ同じです。唯一の違いは、`query` と各 `line` を小文字化していることなので、入力引数の大文字小文字によらず、行がクエリを含んでいるか確認する際には、同じになるわけです。

ファイル名: `src/lib.rs`

```
pub fn search_case_insensitive<'a>(query: &str, contents: &'a str) -> Vec<'a str> {
    let query = query.to_lowercase();
    let mut results = Vec::new();

    for line in contents.lines() {
        if line.to_lowercase().contains(&query) {
            results.push(line);
        }
    }

    results
}
```

リスト 12-21: 比較する前にクエリと行を小文字化するよう、`search_case_insensitive` 関数を定義する

まず、`query` 文字列を小文字化し、同じ名前の覆い隠された変数に保存します。ユーザのクエリが `"rust"` や `"RUST"`、`"Rust"`、`"rUsT"` などだったりしても、`"rust"` であり、大文字小文字を区別しないかのようにクエリを扱えるように、`to_lowercase` をクエリに対して呼び出すことは必須です。

`query` は最早、文字列スライスではなく `String` であることに注意してください。というのも、`to_lowercase` を呼び出すと、既存のデータを参照するというよりも、新しいデータを作成するからです。例として、クエリは `"rUsT"` だとしましょう: その文字列スライスは、小文字の `u` や `t` を使えるように含んでいないので、`"rust"` を含む新しい `String` のメモリを確保しなければならないのです。今、`contains` メソッドに引数として `query` を渡すと、アンド記号を追加する必要があります。`contains` のシグニチャは、文字列スライスを取るよう定義されているからです。

次に、各 `line` が `query` を含むか確かめる前に `to_lowercase` の呼び出しを追加し、全文字を小文字化しています。今や `line` と `query` を小文字に変換したので、クエリが大文字であろうと小文字であろうとマッチを検索するでしょう。

この実装がテストを通過するか確認しましょう:

```
running 2 tests
test test::case_insensitive ... ok
test test::case_sensitive ... ok

test result: ok. 2 passed; 0 failed; 0 ignored; 0 measured; 0 filtered out
```

素晴らしい! どちらも通りました。では、`run` 関数から新しい `search_case_insensitive` 関数を呼び出しましょう。1 番目に大文字小文字の区別を切り替えられるよう、`Config` 構造体に設定オプションを追加します。まだどこでも、このフィールドの初期化をしていないので、追加するとコンパイルエラーが起きます:

ファイル名: `src/lib.rs`

```
pub struct Config {  
    pub query: String,  
    pub filename: String,  
    pub case_sensitive: bool,  
}
```

論理値を持つ `case_sensitive` フィールドを追加したことに注意してください。次に、`run` 関数に、`case_sensitive` フィールドの値を確認し、`search` 関数か `search_case_insensitive` 関数を呼ぶかを決定するのに使ってもらう必要があります。リスト 12-22 のようにですね。それでも、これはまだコンパイルできないことに注意してください。

ファイル名: `src/lib.rs`

```
# use std::error::Error;  
# use std::fs::File;  
# use std::io::prelude::*;  
#  
# fn search<'a>(query: &str, contents: &'a str) -> Vec<&'a str> {  
#     vec![]  
# }  
#  
# pub fn search_case_insensitive<'a>(query: &str, contents: &'a str) -> Vec<&'a str> {  
#     vec![]  
# }  
#  
# pub struct Config {  
#     query: String,  
#     filename: String,  
#     case_sensitive: bool,  
# }  
#  
pub fn run(config: Config) -> Result<(), Box<Error>> {  
    let mut f = File::open(config.filename)?;  
  
    let mut contents = String::new();  
    f.read_to_string(&mut contents)?;  
  
    let results = if config.case_sensitive {  
        search(&config.query, &contents)  
    } else {  
        search_case_insensitive(&config.query, &contents)  
    };  
  
    for line in results {  
        println!("{}", line);  
    }  
  
    Ok(())  
}
```


リスト 12-22: `config.case_sensitive` の値に基づいて `search` か `search_case_insensitive` を呼び出す

最後に、環境変数を確認する必要があります。環境変数を扱う関数は、標準ライブラリの `env` モジュールにあるので、`use std::env;` 行で **src/lib.rs** の冒頭でそのモジュールをスコープに持つてくる必要があります。そして、`env` モジュールから `var` 関数を使用して `CASE_INSENSITIVE` という環境変数のチェックを行います。リスト 12-23 のようにですね。

ファイル名: `src/lib.rs`

```
use std::env;
# struct Config {
#     query: String,
#     filename: String,
#     case_sensitive: bool,
# }

// --snip--

impl Config {
    pub fn new(args: &[String]) -> Result<Config, &'static str> {
        if args.len() < 3 {
            return Err("not enough arguments");
        }

        let query = args[1].clone();
        let filename = args[2].clone();

        let case_sensitive = env::var("CASE_INSENSITIVE").is_err();

        Ok(Config { query, filename, case_sensitive })
    }
}
```

リスト 12-23: `CASE_INSENSITIVE` という環境変数のチェックを行う

ここで、`case_sensitive` という新しい変数を生成しています。その値をセットするために、`env::var` 関数を呼び出し、`CASE_INSENSITIVE` 環境変数の名前を渡しています。`env::var` 関数は、環境変数がセットされていたら、環境変数の値を含む `Ok` 列挙子の成功値になる `Result` を返します。環境変数がセットされていない場合は、`Err` 列挙子を返すでしょう。

`Result` の `is_err` メソッドを使用して、エラーでありゆえに、セットされていないことを確認しています。これは大文字小文字を区別する検索をすべきことを意味します。`CASE_INSENSITIVE` 環境変数が何かにセットされていれば、`is_err` は `false` を返し、プログラムは大文字小文字を区別しない検索を実行するでしょう。環境変数の値はどうしてもよく、セットされているかどうかだけ気にするので、

`unwrap` や `expect` あるいは、他のここまで見かけた `Result` のメソッドではなく、`is_err` をチェックしています。

`case_sensitive` 変数の値を `Config` インスタンスに渡しているのです、リスト 12-22 で実装したように、`run` 関数はその値を読み取り、`search` か `search_case_insensitive` を呼び出すか決定できるのです。

試行してみましょう！ まず、環境変数をセットせずにクエリは `to` でプログラムを実行し、この時は全て小文字で”`to`” という言葉を含むあらゆる行が合致するはずです。

```
$ cargo run to poem.txt
Compiling minigrep v0.1.0 (file:///projects/minigrep)
Finished dev [unoptimized + debuginfo] target(s) in 0.0 secs
Running `target/debug/minigrep to poem.txt`
Are you nobody, too?
How dreary to be somebody!
```

まだ機能しているようです！ では、`CASE_INSENSITIVE` を 1 にしつつ、同じクエリの `to` でプログラムを実行しましょう。

PowerShell を使用しているなら、1 コマンドではなく、2 コマンドで環境変数をセットし、プログラムを実行する必要があるでしょう：

```
$ $env:CASE_INSENSITIVE=1
$ cargo run to poem.txt
```

大文字も含む可能性のある”`to`” を含有する行が得られるはずです：

```
$ CASE_INSENSITIVE=1 cargo run to poem.txt
Finished dev [unoptimized + debuginfo] target(s) in 0.0 secs
Running `target/debug/minigrep to poem.txt`
Are you nobody, too?
How dreary to be somebody!
To tell your name the livelong day
To an admiring bog!
```

素晴らしい、”`To`” を含む行も出てきましたね！ `minigrep` プログラムはこれで、環境変数によって制御できる大文字小文字を区別しない検索も行えるようになりました。もうコマンドライン引数か、環境変数を使ってオプションを管理する方法も知りましたね。

引数と環境変数で同じ設定を行うことができるプログラムもあります。そのような場合、プログラムはどちらが優先されるか決定します。自身の別の鍛錬として、コマンドライン引数か、環境変数で大文字小文字の区別を制御できるようにしてみてください。片方は大文字小文字を区別するようにセットされ、もう片方は区別しないようにセットしてプログラムが実行された時に、コマンドライン引数と環境変数のどちらの優先度が高くなるかを決めてください。

`std::env` モジュールは、環境変数を扱うもっと多くの有用な機能を有しています：ドキュメンテーションを確認して、何が利用可能か確かめてください。

12.6 標準出力ではなく標準エラーにエラーメッセージを書き込む

現時点では、すべての出力を `println!` 関数を使用して端末に書き込んでいます。多くの端末は、2 種類の出力を提供します: 普通の情報用の**標準出力** (`stdout`) とエラーメッセージ用の**標準エラー出力** (`stderr`) です。この差異のおかげで、ユーザは、エラーメッセージを画面に表示しつつ、プログラムの成功した出力をファイルにリダイレクトすることを選択できます。

`println!` 関数は、標準出力に出力する能力しかないので、標準エラーに出力するには他のものを使用しなければなりません。

12.6.1 エラーが書き込まれる場所を確認する

まず、`minigrep` に出力される中身が、代わりに標準エラーに書き込みたいいかなるエラーメッセージも含め、どのように標準出力に書き込まれているかを観察しましょう。意図的にエラーを起こしつつ、ファイルに標準出力ストリームをリダイレクトすることでそうします。標準エラーストリームはリダイレクトしないので、標準エラーに送られる内容は、すべて画面に表示され続けます。

コマンドラインプログラムは、エラーメッセージを標準エラー出力に送信していると期待されているので、標準出力ストリームをファイルにリダイレクトしても、画面にエラーメッセージが見られます。我々のプログラムは、現状、いい振る舞いをしていません: 代わりにファイルにエラーメッセージ出力を保存するところを、目撃するところです!

この動作をデモする方法は、`>` と標準出力ストリームをリダイレクトする先のファイル名、**output.txt** でプログラムを走らせることによります。引数は何も渡さず、そうするとエラーが起きるはずです:

```
$ cargo run > output.txt
```

`>` 記法により、標準出力の中身を画面の代わりに **output.txt** に書き込むようシェルは指示されます。画面に出力されると期待していたエラーメッセージは見られないので、ファイルに入っているということでしょう。以下が **output.txt** が含んでいる内容です:

```
Problem parsing arguments: not enough arguments
```

そうです。エラーメッセージは標準出力に出力されているのです。このようなエラーメッセージは標準エラーに出力され、成功した状態のデータのみがファイルに残ると遥かに有用です。それを変更します。

12.6.2 エラーを標準エラーに出力する

リスト 12-24 のコードを使用して、エラーメッセージの出力の仕方を変更します。この章の前で行ったリファクタリングのため、エラーメッセージを出力するコードはすべて `1` 関数、`main` にあり

ます。標準ライブラリは、標準エラーストリームに出力する `eprintln!` マクロを提供しているので、`println!` を呼び出してエラーを出力していた 2 箇所を代わりに `eprintln!` を使うように変更しましょう。

ファイル名: `src/main.rs`

```
fn main() {
    let args: Vec<String> = env::args().collect();

    let config = Config::new(&args).unwrap_or_else(|err| {
        eprintln!("Problem parsing arguments: {}", err);
        process::exit(1);
    });

    if let Err(e) = minigrep::run(config) {
        eprintln!("Application error: {}", e);

        process::exit(1);
    }
}
```

リスト 12-24: `eprintln!` を使って標準出力ではなく、標準エラーにエラーメッセージを書き込む

`println!` を `eprintln!` に変えてから、再度同じようにプログラムを実行しましょう。引数なしかつ、標準出力を `>` でリダイレクトしてね:

```
$ cargo run > output.txt
Problem parsing arguments: not enough arguments
```

これで、エラーは画面に見えつつ、**output.txt** は何も含まなくなり、これはコマンドラインプログラムに期待する動作です。

再度、標準出力をファイルにリダイレクトしてエラーは起こさない引数でプログラムを走らせましょう。以下のようにですね:

```
$ cargo run to poem.txt > output.txt
```

ターミナルには出力は見られず、**output.txt** に結果が含まれます:

ファイル名: `output.txt`

```
Are you nobody, too?
How dreary to be somebody!
```

これは、もう成功した出力には標準出力を、エラー出力には標準エラーを適切に使用していることをデモしています。

12.7 まとめ

この章では、ここまで学んできた主要な概念の一部を念押しし、**Rust** で入出力処理を行う方法を講義しました。コマンドライン引数、ファイル、環境変数、そしてエラー出力に `eprintln!` マクロを使用することで、もう、コマンドラインアプリケーションを書く準備ができています。以前の章の概念を使用することで、コードはうまく体系化され、適切なデータ構造に効率的にデータを保存し、エラーをうまく扱い、よくテストされるでしょう。

次は、関数型言語に影響された **Rust** 機能を一部探究します：クロージャとイテレータです。

第 13 章

関数型言語の機能: イテレータとクロージャ

Rust の設計は、多くの既存の言語やテクニックにインスピレーションを得ていて、その一つの大きな影響が**関数型プログラミング**です。関数型でのプログラミングには、しばしば、引数で渡したり、関数から関数を返したり、関数を後ほど使用するために変数に代入することで関数を値として使用することが含まれます。

この章では、関数型プログラミングがどんなものであったり、なかったりするかという問題については議論しませんが、代わりに関数型とよく言及される多くの言語の機能に似た Rust の機能の一部について議論しましょう。

具体的には、以下を講義します:

- クロージャ、変数に保存できる関数に似た文法要素
- イテレータ、一連の要素を処理する方法
- これら 2 つの機能を使用して第 12 章の入出力プロジェクトを改善する方法
- これら 2 つの機能のパフォーマンス (ネタバレ: 思ったよりも速いです)

パターンマッチングや `enum` など、他の Rust の機能も関数型に影響されていますが、他の章で講義してきました。クロージャとイテレータをマスターすることは、慣用的で速い Rust コードを書くことの重要な部分なので、この章を丸ごと捧げます。

13.1 クロージャ: 環境をキャプチャできる匿名関数

Rust のクロージャは、変数に保存したり、引数として他の関数に渡すことのできる匿名関数です。ある場所でクロージャを生成し、それから別の文脈でクロージャを呼び出して評価することができます。関数と異なり、呼び出されたスコープの値をクロージャは、キャプチャすることができます。こ

これらのクロージャの機能がコードの再利用や、動作のカスタマイズを行わせてくれる方法を模擬しましょう。

13.1.1 クロージャで動作の抽象化を行う

クロージャを保存して後々使用できるようにするのが有用な場面の例に取り掛かりましょう。その過程で、クロージャの記法、型推論、トレイトについて語ります。

以下のような架空の場面を考えてください: カスタマイズされたエクササイズの実行プランを生成するアプリを作るスタートアップで働くことになりました。バックエンドは Rust で記述され、トレーニングプランを生成するアルゴリズムは、アプリユーザの年齢や、BMI、運動の好み、最近のトレーニング、指定された強弱値などの多くの要因を考慮します。実際に使用されるアルゴリズムは、この例では重要ではありません; 重要なのは、この計算が数秒要することです。必要なときだけこのアルゴリズムを呼び出し、1 回だけ呼び出したいので、必要以上にユーザを待たせないことになります。

リスト 13-1 に示した `simulated_expensive_calculation` 関数でこの仮定のアルゴリズムを呼び出すことをシミュレートし、この関数は `calculating slowly` と出力し、2 秒待ってから、渡した数値をなんでも返します。

ファイル名: `src/main.rs`

```
use std::thread;
use std::time::Duration;

fn simulated_expensive_calculation(intensity: u32) -> u32 {
    // ゆっくり計算します
    println!("calculating slowly...");
    thread::sleep(Duration::from_secs(2));
    intensity
}
```

リスト 13-1: 実行に約 2 秒かかる架空の計算の代役を務める関数

次は、この例で重要なトレーニングアプリの部分を含む `main` 関数です。この関数は、ユーザがトレーニングプランを要求した時にアプリが呼び出すコードを表します。アプリのフロントエンドと相互作用する部分は、クロージャの使用と関係ないので、プログラムへの入力を表す値をハードコードし、その出力を表示します。

必要な入力は以下の通りです:

- ユーザの強弱値、これはユーザがトレーニングを要求して、低強度のトレーニングか、高強度のトレーニングがしたいかを示したときに指定されます。
- 乱数、これはトレーニングプランにバリエーションを起こします。

出力は、推奨されるトレーニングプランになります。リスト 13-2 は使用する main 関数を示しています。

ファイル名: src/main.rs

```
fn main() {  
    let simulated_user_specified_value = 10;  
    let simulated_random_number = 7;  
  
    generate_workout(  
        simulated_user_specified_value,  
        simulated_random_number  
    );  
}  
# fn generate_workout(intensity: u32, random_number: u32) {}
```

リスト 13-2: ユーザ入力や乱数生成をシミュレートするハードコードされた値がある main 関数

簡潔性のために、変数 `simulated_user_specified_value` は 10、変数 `simulated_random_number` は 7 とハードコードしました; 実際のプログラムにおいては、強弱値はアプリのフロントエンドから取得し、乱数の生成には、第 2 章の数当てゲームの例のように、`rand` クレートを使用するでしょう。main 関数は、シミュレートされた入力値とともに `generate_workout` 関数を呼び出します。

今や文脈ができたので、アルゴリズムに取り掛かりましょう。リスト 13-3 の `generate_workout` 関数は、この例で最も気にかかるアプリのビジネスロジックを含んでいます。この例での残りの変更は、この関数に対して行われるでしょう:

ファイル名: src/main.rs

```
# use std::thread;  
# use std::time::Duration;  
#  
# fn simulated_expensive_calculation(num: u32) -> u32 {  
#     println!("calculating slowly...");  
#     thread::sleep(Duration::from_secs(2));  
#     num  
# }  
#  
fn generate_workout(intensity: u32, random_number: u32) {  
    if intensity < 25 {  
  
        println!(  
            // 今日は{}回腕立て伏せをしてください!  
            "Today, do {} pushups!",  
            simulated_expensive_calculation(intensity)  
        );  
  
        println!(  
            // 次に、{}回腹筋をしてください!  
            "Next, do {} situps!",  
            simulated_expensive_calculation(intensity)  
        );  
    }  
}
```



```
        "Next, do {} situps!",
        simulated_expensive_calculation(intensity)
    );
} else {
    if random_number == 3 {
        // 今日は休憩してください! 水分補給を忘れずに!
        println!("Take a break today! Remember to stay hydrated!");
    } else {
        println(
            // 今日は、{}分間走ってください!
            "Today, run for {} minutes!",
            simulated_expensive_calculation(intensity)
        );
    }
}
}
```

リスト 13-3: 入力に基づいてトレーニングプランを出力するビジネスロジックと、`simulated_expensive_calculation` 関数の呼び出し

リスト 13-3 のコードには、遅い計算を行う関数への呼び出しが複数あります。最初の `if` ブロックが、`simulated_expensive_calculation` を 2 回呼び出し、外側の `else` 内の `if` は全く呼び出さず、2 番目の `else` ケースの内側にあるコードは 1 回呼び出しています。

`generate_workout` 関数の期待される振る舞いは、まずユーザが低強度のトレーニング (25 より小さい数値で表される) か、高強度のトレーニング (25 以上の数値) を欲しているか確認することです。

低強度のトレーニングプランは、シミュレーションしている複雑なアルゴリズムに基づいて、多くの腕立て伏せや腹筋運動を推奨してきます。

ユーザが高強度のトレーニングを欲していれば、追加のロジックがあります: アプリが生成した乱数がたまたま 3 なら、アプリは休憩と水分補給を勧めます。そうでなければ、ユーザは複雑なアルゴリズムに基づいて数分間のランニングをします。

このコードは現在、ビジネスのほしいままに動くでしょうが、データサイエンスチームが、`simulated_expensive_calculation` 関数を呼び出す方法に何らかの変更を加える必要があると決定したとしましょう。そのような変更が起きた時に更新を簡略化するため、`simulated_expensive_calculation` 関数を 1 回だけ呼び出すように、このコードをリファクタリングしたいです。また、その過程でその関数への呼び出しを増やすことなく無駄に 2 回、この関数を現時点で呼んでいるところを切り捨てたくもあります。要するに、結果が必要なければ関数を呼び出したくなく、それでも 1 回だけ呼び出したいのです。

13.1.1.1 関数でリファクタリング

多くの方法でトレーニングプログラムを再構築することもできます。1 番目に `simulated_expensive_calculation` 関数への重複した呼び出しを変数に抽出しようとしましょう。リスト 13-4 に示したように。

ファイル名: src/main.rs

```
# use std::thread;
# use std::time::Duration;
#
# fn simulated_expensive_calculation(num: u32) -> u32 {
#     println!("calculating slowly...");
#     thread::sleep(Duration::from_secs(2));
#     num
# }
#
fn generate_workout(intensity: u32, random_number: u32) {
    let expensive_result =
        simulated_expensive_calculation(intensity);

    if intensity < 25 {
        println!(
            "Today, do {} pushups!",
            expensive_result
        );
        println!(
            "Next, do {} situps!",
            expensive_result
        );
    } else {
        if random_number == 3 {
            println!("Take a break today! Remember to stay hydrated!");
        } else {
            println!(
                "Today, run for {} minutes!",
                expensive_result
            );
        }
    }
}
```

リスト 13-4: 複数の `simulated_expensive_calculation` の呼び出しを 1 箇所に抽出し、結果を `expensive_result` 変数に保存する

この変更により `simulated_expensive_calculation` の呼び出しが単一化され、最初の `if` ブロックが無駄に関数を 2 回呼んでいた問題を解決します。不幸なことに、これでは、あらゆる場合にこの関数を呼び出し、その結果を待つことになり、結果値を全く使用しない内側の `if` ブロックでもそうしてしまいます。

プログラムの 1 箇所でコードを定義したいですが、結果が本当に必要なところでだけコードを実行します。これは、クロージャのユースケースです！

13.1.1.2 クロージャでリファクタリングして、コードを保存する

if ブロックの前にいつも `simulated_expensive_calculation` 関数を呼び出す代わりに、クロージャを定義し、関数呼び出しの結果を保存するのではなく、そのクロージャを変数に保存できます。リスト 13-5 のようにですね。`simulated_expensive_calculation` の本体全体を実際に、ここで導入しているクロージャ内に移すことができます。

ファイル名: `src/main.rs`

```
# use std::thread;
# use std::time::Duration;
#
let expensive_closure = |num| {
    println!("calculating slowly...");
    thread::sleep(Duration::from_secs(2));
    num
};
# expensive_closure(5);
```

リスト 13-5: クロージャを定義し、`expensive_closure` 変数に保存する

クロージャ定義が `=` に続き、変数 `expensive_closure` に代入されています。クロージャを定義するには、1 組の縦棒から始め、その内部にクロージャの仮引数を指定します; この記法は、**Smalltalk** や **Ruby** のクロージャ定義と類似していることから、選択されました。このクロージャには、`num` という引数が 1 つあります: 2 つ以上引数があるなら、`|param1, param2|` のように、カンマで区切ります。

引数の後に、クロージャの本体を保持する波括弧を配置します (これはクロージャ本体が式一つなら省略可能です)。波括弧の後、クロージャのお尻には、セミコロンが必要で、`let` 文を完成させます。クロージャ本体の最後の行から返る値 (`num`) が、呼び出された時にクロージャから返る値になります。その行がセミコロンで終わっていないからです; ちょうど関数の本体みたいですね。

この `let` 文は、`expensive_closure` が、匿名関数を呼び出した結果の値ではなく、匿名関数の定義を含むことを意味することに注意してください。コードを定義して、1 箇所呼び出し、そのコードを保存し、後々、それを呼び出したいがためにクロージャを使用していることを思い出してください; 呼び出したいコードは、現在、`expensive_closure` に保存されています。

クロージャが定義されたので、`if` ブロックのコードを変更して、そのコードを実行するクロージャを呼び出し、結果値を得ることができます。クロージャは、関数のように呼び出せます: クロージャ定義を含む変数名を指定し、使用したい引数値を含むかっこを続けます。リスト 13-6 に示したようにですね。

ファイル名: `src/main.rs`

```
# use std::thread;
# use std::time::Duration;
```

```
#
fn generate_workout(intensity: u32, random_number: u32) {
    let expensive_closure = |num| {
        println!("calculating slowly...");
        thread::sleep(Duration::from_secs(2));
        num
    };

    if intensity < 25 {
        println!(
            "Today, do {} pushups!",
            expensive_closure(intensity)
        );
        println!(
            "Next, do {} situps!",
            expensive_closure(intensity)
        );
    } else {
        if random_number == 3 {
            println!("Take a break today! Remember to stay hydrated!");
        } else {
            println!(
                "Today, run for {} minutes!",
                expensive_closure(intensity)
            );
        }
    }
}
```

リスト 13-6: 定義した `expensive_closure` を呼び出す

今では、重い計算はたった 1 箇所でのみ呼び出され、その結果が必要なコードを実行するだけになりました。

ところが、リスト 13-3 の問題の一つを再浮上させてしまいました: それでも、最初の `if` ブロックでクロージャを 2 回呼んでいて、そうすると、重いコードを 2 回呼び出し、必要な分の 2 倍ユーザを待たせてしまいます。その `if` ブロックのみに属する変数を生成して、クロージャの呼び出し結果を保持するその `if` ブロックに固有の変数を生成することでこの問題を解消することもできますが、クロージャは他の解決法も用意してくれます。その解決策については、もう少し先で語りましょう。でもまずは、クロージャ定義に型注釈がない理由とクロージャに関わるトレイトについて話しましょう。

13.1.2 クロージャの型推論と注釈

クロージャでは、`fn` 関数のように引数の型や戻り値の型を注釈する必要はありません。関数では、型注釈は必要です。ユーザに露出する明示的なインターフェイスの一部だからです。このインターフェイスを堅実に定義することは、関数が使用したり、返したりする値の型についてみんなが合意していることを保証するために重要なのです。しかし、クロージャはこのような露出するインターフェ

イスには使用されません: 変数に保存され、名前付けしたり、ライブラリの使用者に晒されることなく、使用されます。

クロージャは通常短く、あらゆる任意の筋書きではなく、狭い文脈でのみ関係します。このような限定された文脈内では、コンパイラは、多くの変数の型を推論できるのと似たように、引数や戻り値の型を頼もしく推論することができます。

このような小さく匿名の関数で型をプログラマに注釈させることは煩わしいし、コンパイラがすでに利用可能な情報と大きく被っています。

本当に必要な以上に冗長になることと引き換えに、明示性と明瞭性を向上させたいなら、変数に型注釈を加えることもできます; リスト 13-5 で定義したクロージャに型を注釈するなら、リスト 13-7 に示した定義のようになるでしょう。

ファイル名: src/main.rs

```
# use std::thread;
# use std::time::Duration;
#
let expensive_closure = |num: u32| -> u32 {
    println!("calculating slowly...");
    thread::sleep(Duration::from_secs(2));
    num
};
```

リスト 13-7: クロージャの引数と戻り値の省略可能な型注釈を追加する

型注釈を付け加えると、クロージャの記法は、関数の記法により酷似して見えます。以下が、引数に 1 を加える関数の定義と、同じ振る舞いをするクロージャの定義の記法を縦に比べたものです。空白を追加して、関連のある部分を並べています。これにより、縦棒の使用と省略可能な記法の量を除いて、クロージャ記法が関数記法に似ているところを説明しています。

```
fn add_one_v1    (x: u32) -> u32 { x + 1 }
let add_one_v2 = |x: u32| -> u32 { x + 1 };
let add_one_v3 = |x|           { x + 1 };
let add_one_v4 = |x|           x + 1 ;
```

1 行目が関数定義を示し、2 行目がフルに注釈したクロージャ定義を示しています。3 行目は、クロージャ定義から型注釈を取り除き、4 行目は、かっこを取り除いていて、かっこはクロージャの本体がただ 1 つの式からなるので、省略可能です。これらは全て、呼び出された時に同じ振る舞いになる合法的な定義です。

クロージャ定義には、引数それぞれと戻り値に対して推論される具体的な型が一つあります。例えば、リスト 13-8 に引数として受け取った値を返すだけの短いクロージャの定義を示しました。このクロージャは、この例での目的以外には有用ではありません。この定義には、何も型注釈を加えていないことに注意してください: それから 1 回目に String を引数に、2 回目に u32 を引数に使用してこ

のクロージャを 2 回呼び出そうとしたら、エラーになります。

ファイル名: src/main.rs

```
let example_closure = |x| x;

let s = example_closure(String::from("hello"));
let n = example_closure(5);
```

リスト 13-8: 2 つの異なる型で型が推論されるクロージャの呼び出しを試みる

コンパイラは、次のエラーを返します:

```
error[E0308]: mismatched types
--> src/main.rs
|
| let n = example_closure(5);
|                               ^ expected struct `std::string::String`, found
integral variable
|
= note: expected type `std::string::String`
       found type `{integer}`
```

String 値で example_closure を呼び出した最初の時点で、コンパイラは x とクロージャの戻り値の型を String と推論します。そして、その型が example_closure のクロージャに閉じ込められ、同じクロージャを異なる型で使用しようとする、型エラーが出るのです。

13.1.3 ジェネリック引数と Fn トレイトを使用してクロージャを保存する

トレーニング生成アプリに戻しましょう。リスト 13-6 において、まだコードは必要以上の回数、重い計算のクロージャを呼んでいました。この問題を解決する一つの選択肢は、重いクロージャの結果を再利用できるように変数に保存し、クロージャを再度呼ぶ代わりに、結果が必要になる箇所それぞれでその変数を使用することです。しかしながら、この方法は同じコードを大量に繰り返す可能性があります。

運のいいことに、別の解決策もあります。クロージャやクロージャの呼び出し結果の値を保持する構造体を作れるのです。結果の値が必要な場合のみにその構造体はクロージャを実行し、その結果の値をキャッシュするので、残りのコードは、結果を保存し、再利用する責任を負わなくて済むのです。このパターンは、**メモ化 (memoization)** または、**遅延評価 (lazy evaluation)** として知っているかもしれません。

クロージャを保持する構造体を作成するために、クロージャの型を指定する必要があります。構造体定義は、各フィールドの型を把握しておく必要がありますからね。各クロージャインスタンスには、独自の匿名の型があります: つまり、たとえ 2 つのクロージャが全く同じシグニチャでも、その型はそれでも違うものと考えられるということです。クロージャを使用する構造体、enum、関数引数を

定義するには、第 10 章で議論したように、ジェネリクスとトレイト境界を使用します。

Fn トレイトは、標準ライブラリで用意されています。全てのクロージャは、以下のいずれかのトレイトを実装しています: Fn、FnMut または、FnOnce です。「クロージャで環境をキャプチャする」節で、これらのトレイト間の差異を議論します; この例では、Fn トレイトを使えます。

Fn トレイト境界にいくつかの型を追加することで、このトレイト境界に合致するクロージャが持つべき引数と戻り値の型を示します。今回のクロージャは u32 型の引数を取り、u32 を返すので、指定するトレイト境界は Fn(u32) -> u32 になります。

リスト 13-9 は、クロージャとオプションの結果値を保持する Cacher 構造体の定義を示しています。

ファイル名: src/main.rs

```
struct Cacher<T>
    where T: Fn(u32) -> u32
{
    calculation: T,
    value: Option<u32>,
}
```

リスト 13-9: クロージャを calculation に、オプションの結果値を value に保持する Cacher 構造体を定義する

Cacher 構造体は、ジェネリックな型 T の calculation フィールドを持ちます。T のトレイト境界は、Fn トレイトを使うことでクロージャであると指定しています。calculation フィールドに保存したいクロージャは全て、1 つの u32 引数 (Fn の後の括弧内で指定されている) を取り、u32 (-> の後に指定されている) を返さなければなりません。

注釈: 関数も 3 つの Fn トレイト全部を実装します。もし環境から値をキャプチャする必要がなければ、Fn トレイトを実装する何かが必要になるクロージャではなく、関数を使用できます。

value フィールドの型は、Option<u32> です。クロージャを実行する前に、value は None になるでしょう。Cacher を使用するコードがクロージャの結果を求めてきたら、その時点で Cacher はクロージャを実行し、その結果を value フィールドの Some 列挙子に保存します。それから、コードが再度クロージャの結果を求めたら、クロージャを再実行するのではなく、Cacher は Some 列挙子に保持された結果を返すでしょう。

たった今解説した value フィールド周りのロジックは、リスト 13-10 で定義されています。

ファイル名: src/main.rs

```
# struct Cacher<T>
#     where T: Fn(u32) -> u32
# {
#     calculation: T,
```

```

#     value: Option<u32>,
# }
#
impl<T> Cacher<T>
  where T: Fn(u32) -> u32
{
  fn new(calculation: T) -> Cacher<T> {
    Cacher {
      calculation,
      value: None,
    }
  }

  fn value(&mut self, arg: u32) -> u32 {
    match self.value {
      Some(v) => v,
      None => {
        let v = (self.calculation)(arg);
        self.value = Some(v);
        v
      },
    }
  }
}

```

リスト 13-10: Cacher のキャッシュ機構

呼び出し元のコードにこれらのフィールドの値を直接変えてもらうのではなく、Cacher に構造体のフィールドの値を管理してほしいので、これらのフィールドは非公開になっています。

Cacher::new 関数はジェネリックな引数の T を取り、Cacher 構造体と同じトレイト境界を持つよう定義しました。それから calculation フィールドに指定されたクロージャと、value フィールドに None 値を保持する Cacher インスタンスを Cacher::new は返します。まだクロージャを実行していないからです。

呼び出し元のコードがクロージャの評価結果を必要としたら、クロージャを直接呼ぶ代わりに、value メソッドを呼びます。このメソッドは、結果の値が self.value の Some に既にあるかどうか確認します; そうなら、クロージャを再度実行することなく Some 内の値を返します。

self.value が None なら、コードは self.calculation に保存されたクロージャを呼び出し、結果を将来使えるように self.value に保存し、その値を返します。

リスト 13-11 は、リスト 13-6 の関数 generate_workout でこの Cacher 構造体を使用する方法を示しています。

ファイル名: src/main.rs

```

# use std::thread;
# use std::time::Duration;
#

```



```
# struct Cacher<T>
#   where T: Fn(u32) -> u32
# {
#   calculation: T,
#   value: Option<u32>,
# }
#
# impl<T> Cacher<T>
#   where T: Fn(u32) -> u32
# {
#   fn new(calculation: T) -> Cacher<T> {
#       Cacher {
#           calculation,
#           value: None,
#       }
#   }
#
#   fn value(&mut self, arg: u32) -> u32 {
#       match self.value {
#           Some(v) => v,
#           None => {
#               let v = (self.calculation)(arg);
#               self.value = Some(v);
#               v
#           },
#       }
#   }
# }
#
fn generate_workout(intensity: u32, random_number: u32) {
    let mut expensive_result = Cacher::new(|num| {
        println!("calculating slowly...");
        thread::sleep(Duration::from_secs(2));
        num
    });

    if intensity < 25 {
        println!(
            "Today, do {} pushups!",
            expensive_result.value(intensity)
        );
        println!(
            "Next, do {} situps!",
            expensive_result.value(intensity)
        );
    } else {
        if random_number == 3 {
            println!("Take a break today! Remember to stay hydrated!");
        } else {
            println!(
                "Today, run for {} minutes!",
                expensive_result.value(intensity)
            );
        }
    }
}
```

```
    }
  }
}
```

リスト 13-11: `generate_workout` 関数内で `Cacher` を使用し、キャッシュ機構を抽象化する

クロージャを変数に直接保存する代わりに、クロージャを保持する `Cacher` の新規インスタンスを保存しています。そして、結果が必要な場所それぞれで、その `Cacher` インスタンスに対して `value` メソッドを呼び出しています。必要なだけ `value` メソッドを呼び出したり、全く呼び出さないこともでき、重い計算は最大でも 1 回しか走りません。

リスト 13-2 の `main` 関数とともにこのプログラムを走らせてみてください。`simulated_user_specified_value` と `simulated_random_number` 変数の値を変えて、いろんな `if` や `else` ブロックの場合全てで、`calculating slowly` は 1 回だけ、必要な時にのみ出現することを実証してください。必要以上に重い計算を呼び出さないことを保証するのに必要なロジックの面倒を `Cacher` は見るので、`generate_workout` はビジネスロジックに集中できるのです。

13.1.4 Cacher 実装の限界

値をキャッシュすることは、コードの他の部分でも異なるクロージャで行いたくなる可能性のある一般的に有用な振る舞いです。しかし、現在の `Cacher` の実装には、他の文脈で再利用することを困難にしまう問題が 2 つあります。

1 番目の問題は、`Cacher` インスタンスが、常に `value` メソッドの引数 `arg` に対して同じ値になると想定していることです。言い換えると、`Cacher` のこのテストは、失敗するでしょう:

```
#[test]
fn call_with_different_values() {
    let mut c = Cacher::new(|a| a);

    let v1 = c.value(1);
    let v2 = c.value(2);

    assert_eq!(v2, 2);
}
```

このテストは、渡された値を返すクロージャを伴う `Cacher` インスタンスを新しく生成しています。この `Cacher` インスタンスに対して 1 という `arg` 値で呼び出し、それから 2 という `arg` 値で呼び出し、2 という `arg` 値の `value` 呼び出しは 2 を返すべきと期待しています。

このテストをリスト 13-9 とリスト 13-10 の `Cacher` 実装で動かすと、`assert_eq` からこんなメッセージが出て、テストは失敗します:

```
thread 'call_with_different_values' panicked at 'assertion failed: `(left ==
  right)`
left: `1`,
```

```
right: `2`, src/main.rs
```

問題は、初めて `c.value` を `1` で呼び出した時に、`Cacher` インスタンスは `self.value` に `Some(1)` を保存したことです。その後 `value` メソッドに何を渡しても、常に `1` を返すわけです。

単独の値ではなく、ハッシュマップを保持するように `Cacher` を改変してみてください。ハッシュマップのキーは、渡される `arg` 値になり、ハッシュマップの値は、そのキーでクロージャを呼び出した結果になるでしょう。`self.value` が直接 `Some` か `None` 値であることを調べる代わりに、`value` 関数はハッシュマップの `arg` を調べ、存在するならその値を返します。存在しないなら、`Cacher` はクロージャを呼び出し、`arg` 値に紐づけてハッシュマップに結果の値を保存します。

現在の `Cacher` 実装の 2 番目の問題は、引数の型に `u32` を一つ取り、`u32` を返すクロージャしか受け付けません。例えば、文字列スライスを取り、`usize` を返すクロージャの結果をキャッシュしたくなるかもしれません。この問題を修正するには、`Cacher` 機能の柔軟性を向上させるためによりジェネリックな引数を導入してみてください。

13.1.5 クロージャで環境をキャプチャする

トレーニング生成の例においては、クロージャをインラインの匿名関数として使っただけでした。しかし、クロージャには、関数にはない追加の能力があります: 環境をキャプチャし、自分が定義されたスコープの変数にアクセスできるのです。

リスト 13-12 は、`equal_to_x` 変数に保持されたクロージャを囲む環境から `x` 変数を使用するクロージャの例です。

ファイル名: `src/main.rs`

```
fn main() {
    let x = 4;

    let equal_to_x = |z| z == x;

    let y = 4;

    assert!(equal_to_x(y));
}
```

リスト 13-12: 内包するスコープの変数を参照するクロージャの例

ここで、`x` は `equal_to_x` の引数でもないのに、`equal_to_x` が定義されているのと同じスコープで定義されている `x` 変数を `equal_to_x` クロージャは使用できています。

同じことを関数では行うことができません; 以下の例で試したら、コードはコンパイルできません:

ファイル名: `src/main.rs`

```
fn main() {
    let x = 4;

    fn equal_to_x(z: i32) -> bool { z == x }

    let y = 4;

    assert!(equal_to_x(y));
}
```

エラーが出ます:

```
error[E0434]: can't capture dynamic environment in a fn item; use the || { ...
} closure form instead
(エラー: fn要素では動的な環境をキャプチャできません; 代わりに|| { ... }のクロージャ形式を使用してください)
--> src/main.rs
  |
4 |     fn equal_to_x(z: i32) -> bool { z == x }
  |                                   ^
```

コンパイラは、この形式はクロージャでのみ動作することさえも思い出させてくれます!

クロージャが環境から値をキャプチャすると、メモリを使用してクロージャ本体で使えるようにその値を保存します。このメモリ使用は、環境をキャプチャしないコードを実行するようなもっと一般的な場合には払いたくないオーバーヘッドです。関数は、絶対に環境をキャプチャすることが許可されていないので、関数を定義して使えば、このオーバーヘッドを招くことは絶対にありません。

クロージャは、3つの方法で環境から値をキャプチャでき、この方法は関数が引数を取れる3つの方法に直に対応します: 所有権を奪う、可変で借用する、不変で借用するです。これらは、以下のよう

- `FnOnce` は、クロージャの**環境**として知られている内包されたスコープからキャプチャした変数を消費します。キャプチャした変数を消費するために、定義された際にクロージャはこれらの変数の所有権を奪い、自身にムーブするのです。名前のうち、`Once`の部分は、このクロージャは同じ変数の所有権を2回以上奪うことができないという事実を表しているのです、1回しか呼ぶことができないのです。
- `FnMut` は、可変で値を借用するので、環境を変更することができます。
- `Fn` は、環境から値を不変で借用します。

クロージャを生成する時、クロージャが環境を使用する方法に基づいて、コンパイラはどのトレイトを使用するか推論します。少なくとも1回は呼び出されるので、全てのクロージャは `FnOnce` を実装しています。キャプチャした変数をムーブしないクロージャは、`FnMut` も実装し、キャプチャした変数に可変でアクセスする必要のないクロージャは、`Fn` も実装しています。リスト 13-12 では、`equal_to_x` クロージャは `x` を不変で借用しています (ゆえに `equal_to_x` は `Fn` トレイトです)。ク

ロージャの本体は、`x` を読む必要しかないからです。

環境でクロージャが使用している値の所有権を奪うことをクロージャに強制したいなら、引数リストの前に `move` キーワードを使用できます。このテクニックは、新しいスレッドにデータが所有されるように、クロージャを新しいスレッドに渡して、データをムーブする際に大概は有用です。

並行性について語る第 16 章で、`move` クロージャの例はもっと多く出てきます。とりあえず、こちらが `move` キーワードがクロージャ定義に追加され、整数の代わりにベクタを使用するリスト 13-12 からのコードです。整数はムーブではなく、コピーされてしまいますからね; このコードはまだコンパイルできないことに注意してください。

ファイル名: `src/main.rs`

```
fn main() {
    let x = vec![1, 2, 3];

    let equal_to_x = move |z| z == x;

    // ここでは、xを使用できません: {:?}
    println!("can't use x here: {:?}", x);

    let y = vec![1, 2, 3];

    assert!(equal_to_x(y));
}
```

以下のようなエラーを受けます:

```
error[E0382]: use of moved value: `x`
(エラー: ムーブされた値の使用: `x`)
--> src/main.rs:6:40
|
4 |     let equal_to_x = move |z| z == x;
|                               ^^^^^ value moved (into closure) here
|                               (値はここで(クロージャに)ムーブされた)
5 |
6 |     println!("can't use x here: {:?}", x);
|                                     ^ value used here after move
|                                     (ムーブ後、値はここで使用された)
|
= note: move occurs because `x` has type `std::vec::Vec<i32>`, which does not
implement the `Copy` trait
(注釈: `x`が`std::vec::Vec<i32>`という`Copy`トレイトを実装しない型のため、ムーブが起きました)
```

クロージャが定義された際に、クロージャに `x` の値はムーブされています。`move` キーワードを追加したからです。そして、クロージャは `x` の所有権を持ち、`main` が `println!` で `x` を使うことはもう叶わないのです。`println!` を取り除けば、この例は修正されます。

`Fn` トレイトのどれかを指定するほとんどの場合、`Fn` から始めると、コンパイラがクロージャ本体

内で起こっていることにより、FnMut や FnOnce が必要な場合、教えてくれるでしょう。

環境をキャプチャできるクロージャが関数の引数として有用な場면을説明するために、次のトピックに移りましょう: イテレータです。

13.2 一連の要素をイテレータで処理する

イテレータパターンにより、一連の要素に順番に何らかの作業を行うことができます。イテレータは、各要素を繰り返し、シーケンスが終わったことを決定するロジックの責任を負います。イテレータを使用すると、自身でそのロジックを再実装する必要がなくなるのです。

Rust において、イテレータは**怠惰**です。つまり、イテレータを使い込んで消費するメソッドを呼ぶまで何の効果もないということです。例えば、リスト 13-13 のコードは、Vec<T> に定義された iter メソッドを呼ぶことで v1 ベクタの要素に対するイテレータを生成しています。このコード単独では、何も有用なことはしません。

```
let v1 = vec![1, 2, 3];  
  
let v1_iter = v1.iter();
```

リスト 13-13: イテレータを生成する

一旦イテレータを生成したら、いろんな手段で使うことができます。第 3 章のリスト 3-5 では、ここまで iter の呼び出しが何をするかごまかしてきましたが、for ループでイテレータを使い、各要素に何かコードを実行しています。

リスト 13-14 の例は、イテレータの生成と for ループでイテレータを使用することを区別しています。イテレータは、v1_iter 変数に保存され、その時には繰り返しは起きていません。v1_iter のイテレータで、for ループが呼び出された時に、イテレータの各要素がループの繰り返しで使用され、各値が出力されます。

```
let v1 = vec![1, 2, 3];  
  
let v1_iter = v1.iter();  
  
for val in v1_iter {  
    // {} でした  
    println!("Got: {}", val);  
}
```

リスト 13-14: for ループでイテレータを使用する

標準ライブラリにより提供されるイテレータが存在しない言語では、変数を添え字 0 から始め、その変数でベクタに添え字アクセスして値を得て、ベクタの総要素数に到達するまでループでその変数の値をインクリメントすることで、この同じ機能を書く可能性が高いでしょう。

イテレータはそのロジック全てを処理してくれるので、めちゃくちゃにしてしまう可能性のあるコードの繰り返しを減らしてくれます。イテレータにより、添え字を使えるデータ構造、ベクタなどだけではなく、多くの異なるシーケンスに対して同じロジックを使う柔軟性も得られます。イテレータがそれをする方法を調査しましょう。

13.2.1 Iterator トレイトと next メソッド

全てのイテレータは、標準ライブラリで定義されている `Iterator` というトレイトを実装しています。このトレイトの定義は、以下のようになっています:

```
pub trait Iterator {  
    type Item;  
  
    fn next(&mut self) -> Option<Self::Item>;  
  
    // デフォルト実装のあるメソッドは省略  
    // methods with default implementations elided  
}
```

この定義は新しい記法を使用していることに注目してください: `type Item` と `Self::Item` で、これらはこのトレイトとの**関連型 (associated type)** を定義しています。関連型についての詳細は、第 19 章で語ります。とりあえず、知っておく必要があることは、このコードが `Iterator` トレイトを実装するには、`Item` 型も定義する必要があること、そして、この `Item` 型が `next` メソッドの戻り値の型に使われていると述べていることです。換言すれば、`Item` 型がイテレータから返ってくる型になるだろうということです。

`Iterator` トレイトは、一つのメソッドを定義することを実装者に要求することだけします: `next` メソッドで、これは 1 度に `Some` に包まれたイテレータの 1 要素を返し、繰り返しが終わったら、`None` を返します。

イテレータに対して直接 `next` メソッドを呼び出すこともできます; リスト 13-15 は、ベクタから生成されたイテレータの `next` を繰り返し呼び出した時にどんな値が返るかを模擬しています。

ファイル名: `src/lib.rs`

```
#[test]  
fn iterator_demonstration() {  
    let v1 = vec![1, 2, 3];  
  
    let mut v1_iter = v1.iter();  
  
    assert_eq!(v1_iter.next(), Some(&1));  
    assert_eq!(v1_iter.next(), Some(&2));  
    assert_eq!(v1_iter.next(), Some(&3));  
    assert_eq!(v1_iter.next(), None);  
}
```

リスト 13-15: イテレータに対して next メソッドを呼び出す

`v1_iter` を可変にする必要があったことに注目してください: イテレータの `next` メソッドを呼び出すと、今シーケンスのどこにいるかを追いかけるためにイテレータが使用している内部の状態が変わります。つまり、このコードはイテレータを消費、または使い込むのです。`next` の各呼び出しは、イテレータの要素を一つ、食います。`for` ループを使用した時には、`v1_iter` を可変にする必要はありませんでした。というのも、ループが `v1_iter` の所有権を奪い、陰で可変にしていたからです。

また、`next` の呼び出しで得られる値は、ベクタの値への不変な参照であることにも注目してください。`iter` メソッドは、不変参照へのイテレータを生成します。`v1` の所有権を奪い、所有された値を返すイテレータを生成したいなら、`iter` ではなく `into_iter` を呼び出すことができます。同様に、可変参照を繰り返したいなら、`iter` ではなく `iter_mut` を呼び出せます。

13.2.2 イテレータを消費するメソッド

`Iterator` トレイトには、標準ライブラリが提供してくれているデフォルト実装のある多くの異なるメソッドがあります; `Iterator` トレイトの標準ライブラリの API ドキュメントを検索することで、これらのメソッドについて知ることができます。これらのメソッドの中には、定義内で `next` メソッドを呼ぶものもあり、故に `Iterator` トレイトを実装する際には、`next` メソッドを実装する必要があります。

`next` を呼び出すメソッドは、消費アダプタ (consuming adaptors) と呼ばれます。呼び出しがイテレータの使い込みになるからです。一例は、`sum` メソッドで、これはイテレータの所有権を奪い、`next` を繰り返し呼び出すことで要素を繰り返し、故にイテレータを消費するのです。繰り返しが進むごとに、各要素を一時的な合計に追加し、繰り返しが完了したら、その合計を返します。リスト 13-16 は、`sum` の使用を説明したテストです:

ファイル名: `src/lib.rs`

```
#[test]
fn iterator_sum() {
    let v1 = vec![1, 2, 3];

    let v1_iter = v1.iter();

    let total: i32 = v1_iter.sum();

    assert_eq!(total, 6);
}
```

リスト 13-16: `sum` メソッドを呼び出してイテレータの全要素の合計を得る

`sum` は呼び出し対象のイテレータの所有権を奪うので、`sum` 呼び出し後に `v1_iter` を使用することはできません。

13.3 他のイテレータを生成するメソッド

`Iterator` トレイトに定義された他のメソッドは、**イテレータアダプタ (iterator adaptors)** として知られていますが、イテレータを別の種類のイテレータに変えさせてくれます。イテレータアダプタを複数回呼ぶ呼び出しを連結して、複雑な動作を読みやすい形で行うことができます。ですが、全てのイテレータは怠惰なので、消費アダプタメソッドのどれかを呼び出し、イテレータアダプタの呼び出しから結果を得なければなりません。

リスト 13-17 は、イテレータアダプタメソッドの `map` の呼び出し例を示し、各要素に対して呼び出すクロージャを取り、新しいイテレータを生成します。このクロージャは、ベクタの各要素が 1 インクリメントされる新しいイテレータを作成します。ところが、このコードは警告を発します:

ファイル名: `src/main.rs`

```
let v1: Vec<i32> = vec![1, 2, 3];

v1.iter().map(|x| x + 1);
```

リスト 13-17: イテレータアダプタの `map` を呼び出して新規イテレータを作成する

出る警告は以下の通りです:

```
warning: unused `std::iter::Map` which must be used: iterator adaptors are lazy
and do nothing unless consumed
(警告: 使用されねばならない`std::iter::Map`が未使用です: イテレータアダプタは怠
惰で、
消費されるまで何もしません)
--> src/main.rs:4:5
|
4 |     v1.iter().map(|x| x + 1);
|     ^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^
|
= note: #[warn(unused_must_use)] on by default
```

リスト 13-17 のコードは何もしません; 指定したクロージャは、決して呼ばれないのです。警告が理由を思い出させてくれています: イテレータアダプタは怠惰で、ここでイテレータを消費する必要があるのです。

これを修正し、イテレータを消費するには、`collect` メソッドを使用しますが、これは第 12 章のリスト 12-1 で `env::args` とともに使用しました。このメソッドはイテレータを消費し、結果の値をコレクションデータ型に集結させます。

リスト 13-18 において、`map` 呼び出しから返ってきたイテレータを繰り返した結果をベクタに集結

させています。このベクタは、最終的に元のベクタの各要素に 1 を足したものが含まれます。

ファイル名: src/main.rs

```
let v1: Vec<i32> = vec![1, 2, 3];

let v2: Vec<_> = v1.iter().map(|x| x + 1).collect();

assert_eq!(v2, vec![2, 3, 4]);
```

リスト 13-18: map メソッドを呼び出して新規イテレータを作成し、それから collect メソッドを呼び出してその新規イテレータを消費し、ベクタを生成する

map はクロージャを取るので、各要素に対して行いたいどんな処理も指定することができます。これは、Iterator トレイトが提供する繰り返し動作を再利用しつつ、クロージャにより一部の動作をカスタマイズできる好例になっています。

13.3.1 環境をキャプチャするクロージャを使用する

イテレータが出てきたので、filter イテレータアダプタを使って環境をキャプチャするクロージャの一般的な使用をデモすることができます。イテレータの filter メソッドは、イテレータの各要素を取り、論理値を返すクロージャを取ります。このクロージャが true を返せば、filter が生成するイテレータにその値が含まれます。クロージャが false を返したら、結果のイテレータにその値は含まれません。

リスト 13-19 では、環境から shoe_size 変数をキャプチャするクロージャで filter を使って、Shoe 構造体インスタンスのコレクションを繰り返しています。指定したサイズの靴だけを返すわけです。

ファイル名: src/lib.rs

```
#[derive(PartialEq, Debug)]
struct Shoe {
    size: u32,
    style: String,
}

fn shoes_in_my_size(shoes: Vec<Shoe>, shoe_size: u32) -> Vec<Shoe> {
    shoes.into_iter()
        .filter(|s| s.size == shoe_size)
        .collect()
}

#[test]
fn filters_by_size() {
    let shoes = vec![
```

```

    Shoe { size: 10, style: String::from("sneaker") },
    Shoe { size: 13, style: String::from("sandal") },
    Shoe { size: 10, style: String::from("boot") },
  ];

  let in_my_size = shoes_in_my_size(shoes, 10);

  assert_eq!(
    in_my_size,
    vec![
      Shoe { size: 10, style: String::from("sneaker") },
      Shoe { size: 10, style: String::from("boot") },
    ]
  );
}

```

リスト 13-19: shoe_size をキャプチャするクロージャで filter メソッドを使用する

shoes_in_my_size 関数は、引数として靴のベクタとサイズの所有権を奪います。指定されたサイズの靴だけを含むベクタを返します。

shoes_in_my_size の本体で、into_iter を呼び出してベクタの所有権を奪うイテレータを作成しています。そして、filter を呼び出してそのイテレータをクロージャが true を返した要素だけを含む新しいイテレータに適合させます。

クロージャは、環境から shoe_size 引数をキャプチャし、指定されたサイズの靴だけを保持しながら、その値を各靴のサイズと比較します。最後に、collect を呼び出すと、関数により返ってきたベクタに適合させたイテレータから返ってきた値が集まるのです。

shoes_in_my_size を呼び出した時に、指定した値と同じサイズの靴だけが得られることをテストは示しています。

13.3.2 Iterator トレイトで独自のイテレータを作成する

ベクタに対し、iter、into_iter、iter_mut を呼び出すことでイテレータを作成できることを示してきました。ハッシュマップなどの標準ライブラリの他のコレクション型からもイテレータを作成できます。Iterator トレイトを自分で実装することで、したいことを何でもするイテレータを作成することもできます。前述の通り、定義を提供する必要のある唯一のメソッドは、next メソッドなのです。一旦、そうしてしまえば、Iterator トレイトが用意しているデフォルト実装のある他の全てのメソッドを使うことができます！

デモ用に、絶対に 1 から 5 をカウントするだけのイテレータを作成しましょう。まず、値を保持する構造体を生成し、Iterator トレイトを実装することでこの構造体をイテレータにし、その実装内の値を使用します。

リスト 13-20 は、Counter 構造体と Counter のインスタンスを作る new 関連関数の定義です：

ファイル名: src/lib.rs

```
struct Counter {  
    count: u32,  
}  
  
impl Counter {  
    fn new() -> Counter {  
        Counter { count: 0 }  
    }  
}
```

リスト 13-20: Counter 構造体と count に対して 0 という初期値で Counter のインスタンスを作る new 関数を定義する

Counter 構造体には、count というフィールドがあります。このフィールドは、1 から 5 までの繰り返しのどこにいるかを追いかける u32 値を保持しています。Counter の実装にその値を管理してほしいので、count フィールドは非公開です。count フィールドは常に 0 という値から新規インスタンスを開始するという動作を new 関数は強要します。

次に、next メソッドの本体をこのイテレータが使用された際に起きてほしいことを指定するように定義して、Counter 型に対して Iterator トレイトを実装します。リスト 13-21 のようにですね:

ファイル名: src/lib.rs

```
# struct Counter {  
#     count: u32,  
# }  
#  
impl Iterator for Counter {  
    type Item = u32;  
  
    fn next(&mut self) -> Option<Self::Item> {  
        self.count += 1;  
  
        if self.count < 6 {  
            Some(self.count)  
        } else {  
            None  
        }  
    }  
}
```

リスト 13-21: Counter 構造体に Iterator トレイトを実装する

イテレータの Item 関連型を u32 に設定しました。つまり、イテレータは、u32 の値を返します。ここでも、まだ関連型について心配しないでください。第 19 章で講義します。

イテレータに現在の状態に 1 を足してほしいので、まず 1 を返すように count を 0 に初期化しま

した。count の値が 5 以下なら、next は Some に包まれた現在の値を返しますが、count が 6 以上なら、イテレータは None を返します。

13.3.2.1 Counter イテレータの next メソッドを使用する

一旦 Iterator トレイトを実装し終わったら、イテレータの出来上がりです！ リスト 13-22 は、リスト 13-15 のベクタから生成したイテレータと全く同様に、直接 next メソッドを呼び出すことで、Counter 構造体のイテレータ機能を使用できることをデモするテストを示しています。

ファイル名: src/lib.rs

```
# struct Counter {
#     count: u32,
# }
#
# impl Iterator for Counter {
#     type Item = u32;
#
#     fn next(&mut self) -> Option<Self::Item> {
#         self.count += 1;
#
#         if self.count < 6 {
#             Some(self.count)
#         } else {
#             None
#         }
#     }
# }
#
#[test]
fn calling_next_directly() {
    let mut counter = Counter::new();

    assert_eq!(counter.next(), Some(1));
    assert_eq!(counter.next(), Some(2));
    assert_eq!(counter.next(), Some(3));
    assert_eq!(counter.next(), Some(4));
    assert_eq!(counter.next(), Some(5));
    assert_eq!(counter.next(), None);
}
```

リスト 13-22: next メソッド実装の機能をテストする

このテストは、counter 変数に新しい Counter インスタンスを生成し、それからイテレータにほしい動作が実装し終わっていることを実証しながら、next を繰り返し呼び出しています: 1 から 5 の値を返すことです。

13.3.2.2 他の Iterator トレイトメソッドを使用する

next メソッドを定義して Iterator トレイトを実装したので、今では、標準ライブラリで定義されているように、どんな Iterator トレイトメソッドのデフォルト実装も使えるようになりました。全て next メソッドの機能を使っているからです。

例えば、何らかの理由で、Counter インスタンスが生成する値を取り、最初の値を飛ばしてから、別の Counter インスタンスが生成する値と一組にし、各ペアを掛け算し、3 で割り切れる結果だけを残し、全結果の値を足し合わせたら、リスト 13-23 のテストに示したように、そうすることができます:

ファイル名: src/lib.rs

```
# struct Counter {
#     count: u32,
# }
#
# impl Counter {
#     fn new() -> Counter {
#         Counter { count: 0 }
#     }
# }
#
# impl Iterator for Counter {
#     // このイテレータはu32を生成します
#     // Our iterator will produce u32s
#     type Item = u32;
#
#     fn next(&mut self) -> Option<Self::Item> {
#         // カウントをインクリメントする。故に0から始まる
#         // increment our count. This is why we started at zero.
#         self.count += 1;
#
#         // カウントが終わったかどうか確認する
#         // check to see if we've finished counting or not.
#         if self.count < 6 {
#             Some(self.count)
#         } else {
#             None
#         }
#     }
# }
#
#[test]
fn using_other_iterator_trait_methods() {
    let sum: u32 = Counter::new().zip(Counter::new().skip(1))
        .map(|(a, b)| a * b)
        .filter(|x| x % 3 == 0)
        .sum();

    assert_eq!(18, sum);
}
```

```
}
```

リスト 13-23: Counter イテレータに対していろんな Iterator トレイトのメソッドを使用する

zip は 4 組しか生成しないことに注意してください; 理論的な 5 番目の組の (5, None) は、入力イテレータのどちらかが None を返したら、zip は None を返却するため、決して生成されることはありません。

next メソッドの動作方法を指定し、標準ライブラリが next を呼び出す他のメソッドにデフォルト実装を提供しているので、これらのメソッド呼び出しは全て可能です。

13.4 入出力プロジェクトを改善する

このイテレータに関する新しい知識があれば、イテレータを使用してコードのいろんな場所をより明確で簡潔にすることで、第 12 章の入出力プロジェクトを改善することができます。イテレータが Config::new 関数と search 関数の実装を改善する方法に目を向けましょう。

13.4.1 イテレータを使用して clone を取り除く

リスト 12-6 において、スライスに添え字アクセスして値をクローンすることで、Config 構造体に値を所有させながら、String 値のスライスを取り、Config 構造体のインスタンスを作るコードを追記しました。リスト 13-24 では、リスト 12-23 のような Config::new の実装を再現しました:

ファイル名: src/lib.rs

```
impl Config {
    pub fn new(args: &[String]) -> Result<Config, &'static str> {
        if args.len() < 3 {
            return Err("not enough arguments");
        }

        let query = args[1].clone();
        let filename = args[2].clone();

        let case_sensitive = env::var("CASE_INSENSITIVE").is_err();

        Ok(Config { query, filename, case_sensitive })
    }
}
```

リスト 13-24: リスト 12-23 から Config::new 関数の再現

その際、将来的に除去する予定なので、非効率的な clone 呼び出しを憂慮するなど述べました。えっと、その時は今です！

引数 `args` に `String` 要素のスライスがあるためにここで `clone` が必要だったのですが、`new` 関数は `args` を所有していません。`Config` インスタンスの所有権を返すためには、`Config` インスタンスがその値を所有できるように、`Config` の `query` と `filename` フィールドから値をクローンしなければなりませんでした。

イテレータについての新しい知識があれば、`new` 関数をスライスを借用する代わりに、引数としてイテレータの所有権を奪うように変更することができます。スライスの長さを確認し、特定の場所に添え字アクセスするコードの代わりにイテレータの機能を使います。これにより、イテレータは値にアクセスするので、`Config::new` 関数がすることが明確化します。

ひとたび、`Config::new` がイテレータの所有権を奪い、借用する添え字アクセス処理をやめたら、`clone` を呼び出して新しくメモリ確保するのではなく、イテレータからの `String` 値を `Config` にムーブできます。

13.4.1.1 返却されるイテレータを直接使う

入出力プロジェクトの **src/main.rs** ファイルを開いてください。こんな見た目のはずです:

ファイル名: `src/main.rs`

```
fn main() {
    let args: Vec<String> = env::args().collect();

    let config = Config::new(&args).unwrap_or_else(|err| {
        eprintln!("Problem parsing arguments: {}", err);
        process::exit(1);
    });

    // --snip--
}
```

リスト 12-24 のような `main` 関数の冒頭をリスト 13-25 のコードに変更します。これは、`Config::new` も更新するまでコンパイルできません。

ファイル名: `src/main.rs`

```
fn main() {
    let config = Config::new(env::args()).unwrap_or_else(|err| {
        eprintln!("Problem parsing arguments: {}", err);
        process::exit(1);
    });

    // --snip--
}
```

リスト 13-25: `env::args` の戻り値を `Config::new` に渡す

`env::args` 関数は、イテレータを返します！ イテレータの値をベクタに集結させ、それからスライスを `Config::new` に渡すのではなく、今では `env::args` から返ってくるイテレータの所有権を直接 `Config::new` に渡しています。

次に、`Config::new` の定義を更新する必要があります。入出力プロジェクトの **src/lib.rs** ファイルで、`Config::new` のシグニチャをリスト 13-26 のように変えましょう。関数本体を更新する必要がありますので、それでもコンパイルはできません。

ファイル名: `src/lib.rs`

```
impl Config {
    pub fn new(mut args: std::env::Args) -> Result<Config, &'static str> {
        // --snip--
    }
}
```

リスト 13-26: `Config::new` のシグニチャをイテレータを期待するように更新する

`env::args` 関数の標準ライブラリドキュメントは、自身が返すイテレータの型は、`std::env::Args` であると表示しています。`Config::new` 関数のシグニチャを更新したので、引数 `args` の型は、`&[String]` ではなく、`std::env::Args` になりました。`args` の所有権を奪い、繰り返しを行うことで `args` を可変化する予定なので、`args` 引数の仕様に `mut` キーワードを追記でき、可変にします。

13.4.1.2 添え字の代わりに Iterator トレイトのメソッドを使用する

次に、`Config::new` の本体を修正しましょう。標準ライブラリのドキュメントは、`std::env::Args` が `Iterator` トレイトを実装していることにも言及しているので、それに対して `next` メソッドを呼び出せることがわかります！ リスト 13-27 は、リスト 12-23 のコードを `next` メソッドを使用するように更新したものです：

ファイル名: `src/lib.rs`

```
# fn main() {}
# use std::env;
#
# struct Config {
#     query: String,
#     filename: String,
#     case_sensitive: bool,
# }
#
impl Config {
    pub fn new(mut args: std::env::Args) -> Result<Config, &'static str> {
        args.next();

        let query = match args.next() {
            Some(arg) => arg,
            // クエリ文字列を取得しませんでした
            None => return Err("Didn't get a query string"),
        };
    }
}
```

```

    };

    let filename = match args.next() {
        Some(arg) => arg,
        // ファイル名を取得しませんでした
        None => return Err("Didn't get a file name"),
    };

    let case_sensitive = env::var("CASE_INSENSITIVE").is_err();

    Ok(Config { query, filename, case_sensitive })
}
}

```

リスト 13-27: Config::new の本体をイテレータメソッドを使うように変更する

env::args の戻り値の 1 番目の値は、プログラム名であることを思い出してください。それは無視し、次の値を取得したいので、まず next を呼び出し、戻り値に対して何もしません。2 番目に、next を呼び出して Config の query フィールドに置きたい値を得ます。next が Some を返したら、match を使用してその値を抜き出します。None を返したら、十分な引数が与えられなかったということなので、Err 値で早期リターンします。filename 値に対しても同じことをします。

13.4.2 イテレータアダプタでコードをより明確にする

入出力プロジェクトの search 関数でも、イテレータを活用することができます。その関数はリスト 12-19 に示していますが、以下のリスト 13-28 に再掲します。

ファイル名: src/lib.rs

```

pub fn search<'a>(query: &str, contents: &'a str) -> Vec<&'a str> {
    let mut results = Vec::new();

    for line in contents.lines() {
        if line.contains(query) {
            results.push(line);
        }
    }

    results
}

```

リスト 13-28: リスト 12-19 の search 関数の実装

イテレータアダプタメソッドを使用して、このコードをもっと簡潔に書くことができます。そうすれば、可変な中間の results ベクタをなくすこともできます。関数型プログラミングスタイルは、可変な状態の量を最小化することを好み、コードを明瞭化します。可変な状態を除去すると、検索を同

時並行に行うという将来的な改善をするのが、可能になる可能性があります。なぜなら、results ベクタへの同時アクセスを管理する必要がなくなるからです。リスト 13-29 は、この変更を示しています:

ファイル名: src/lib.rs

```
pub fn search<'a>(query: &str, contents: &'a str) -> Vec<&'a str> {
    contents.lines()
        .filter(|line| line.contains(query))
        .collect()
}
```

リスト 13-29: search 関数の実装でイテレータアダプタのメソッドを使用する

search 関数の目的は、query を含む contents の行全てを返すことであることを思い出してください。リスト 13-19 の filter 例に酷似して、このコードは filter アダプタを使用して line.contains(query) が真を返す行だけを残すことができます。それから、合致した行を別のベクタに collect で集結させます。ずっと単純です! ご自由に、同じ変更を行い、search_case_insensitive 関数でもイテレータメソッドを使うようにしてください。

次の論理的な疑問は、自身のコードでどちらのスタイルを選ぶかと理由です: リスト 13-28 の元の実装とリスト 13-29 のイテレータを使用するバージョンです。多くの Rust プログラマは、イテレータスタイルを好みます。とっかかりが少し困難ですが、いろんなイテレータアダプタとそれがすることの感覚を一度掴めれば、イテレータの方が理解しやすいこともあります。いろんなループを少しずつもてあそんだり、新しいベクタを構築する代わりに、コードは、ループの高難度の目的に集中できるのです。これは、ありふれたコードの一部を抽象化するので、イテレータの各要素が通過しなければならぬふり条件など、このコードに独特の概念を理解しやすくなります。

ですが、本当に 2 つの実装は等価なのでしょう吗? 直観的な仮説は、より低レベルのループの方がより高速ということかもしれません。パフォーマンスに触れましょう。

13.5 パフォーマンス比較: ループ VS イテレータ

ループを使うべきかイテレータを使うべきか決定するために、search 関数のうち、どちらのバージョンが速いか知る必要があります: 明示的な for ループがあるバージョンと、イテレータのバージョンです。

サー・アーサー・コナン・ドイル (Sir Arthur Conan Doyle) の、シャーロックホームズの冒険 (The Adventures of Sherlock Homes) 全体を String に読み込み、そのコンテンツで **the** という単語を検索することでベンチマークを行いました。こちらが、for を使用した search 関数のバージョンと、イテレータを使用したバージョンに関するベンチマーク結果です。

```
test bench_search_for ... bench: 19,620,300 ns/iter (+/- 915,700)
test bench_search_iter ... bench: 19,234,900 ns/iter (+/- 657,200)
```

イテレータバージョンの方が些 (いささ) か高速ですね！ここでは、ベンチマークのコードは説明しません。なぜなら、要点は、2 つのバージョンが等価であることを証明することではなく、これら 2 つの実装がパフォーマンス的にどう比較されるかを大まかに把握することだからです。

より包括的なベンチマークとするためには、いろんなサイズの様々なテキストを `contents` として、異なる単語、異なる長さの単語を `query` として、他のあらゆる種類のバリエーションを確認する必要があります。重要なのは: イテレータは、高度な抽象化にも関わらず、低レベルのコードを自身で書いているかのように、ほぼ同じコードにコンパイルされることです。イテレータは、**Rust のゼロコスト抽象化**の一つであり、これは、抽象化を使うことが追加の実行時オーバーヘッドを生まないことを意味しています。このことは、C++ の元の設計者であり実装者のビャーネ・ストロヴストルupp (Bjarne Stroustrup) が、**ゼロオーバーヘッド**を「C++ の基礎 (2012)」で定義したのと類似しています。

一般的に、C++ の実装は、ゼロオーバーヘッド原則を遵守します: 使用しないものには、支払わなくてよい。さらに: 実際に使っているものに対して、コードをそれ以上うまく渡すことはできない。

別の例として、以下のコードは、オーディオデコーダから取ってきました。デコードアルゴリズムは、線形予測数学演算を使用して、以前のサンプルの線形関数に基づいて未来の値を予測します。このコードは、イテレータ連結をしてスコープにある 3 つの変数に計算を行っています: `buffer` というデータのスライス、12 の `coefficients` (係数) の配列、`qlp_shift` でデータをシフトする量です。この例の中で変数を宣言しましたが、値は与えていません; このコードは、文脈の外では大して意味を持ちませんが、それでも Rust が高レベルな考えを低レベルなコードに翻訳する簡潔で現実的な例になっています:

```
let buffer: &mut [i32];
let coefficients: [i64; 12];
let qlp_shift: i16;

for i in 12..buffer.len() {
    let prediction = coefficients.iter()
        .zip(&buffer[i - 12..i])
        .map(|(&c, &s)| c * s as i64)
        .sum::<i64>() >> qlp_shift;

    let delta = buffer[i];
    buffer[i] = prediction as i32 + delta;
}
```

`prediction` の値を算出するために、このコードは、`coefficients` の 12 の値を繰り返し、`zip` メソッドを使用して、係数値を前の `buffer` の 12 の値と組にします。それから各組について、その値をかけ合わせ、結果を全て合計し、合計のビットを `qlp_shift` ビット分だけ右にシフトさせます。

オーディオデコーダのようなアプリケーションの計算は、しばしばパフォーマンスに最も重きを置きます。ここでは、イテレータを作成し、2 つのアダプタを使用し、それから値を消費しています。この Rust コードは、どんな機械語コードにコンパイルされるのでしょうか？ えー、執筆時点では、手

作業で書いたものと同じ機械語にコンパイルされます。`coefficients` の値の繰り返しに対応するループは全く存在しません: コンパイラは、12 回繰り返しがあることを把握しているので、ループを「展開」します。**ループの展開**は、ループ制御コードのオーバーヘッドを除去し、代わりにループの繰り返しごとに同じコードを生成する最適化です。

係数は全てレジスタに保存されます。つまり、値に非常に高速にアクセスします。実行時に配列の境界チェックをすることもありません。コンパイラが適用可能なこれらの最適化全てにより、結果のコードは究極的に効率化されます。このことがわかったので、もうイテレータとクロージャを恐れなしに使用することができますね! それらのおかげでコードは、高レベルだけれども、そうすることに対して実行時のパフォーマンスを犠牲にしないようになります。

13.6 まとめ

クロージャとイテレータは、関数型言語の考えに着想を得た **Rust** の機能です。低レベルのパフォーマンスで、高レベルの考えを明確に表現するという **Rust** の能力に貢献しています。クロージャとイテレータの実装は、実行時のパフォーマンスが影響されないようなものです。これは、ゼロ代償抽象化を提供するのに努力を惜しまない **Rust** の目標の一部です。

今や入出力プロジェクトの表現力を改善したので、プロジェクトを世界と共有するのに役に立つ `cargo` の機能にもっと目を向けましょう。

第 14 章

Cargo と Crates.io についてより詳しく

今まで Cargo のビルド、実行、コードのテストを行うという最も基礎的な機能のみを使ってきましたが、他にもできることはたくさんあります。この章では、そのような他のより高度な機能の一部を議論し、以下のことをする方法をお見せしましょう：

- リリースプロファイルでビルドをカスタマイズする
- crates.io でライブラリを公開する
- ワークスペースで巨大なプロジェクトを体系化する
- crates.io からバイナリをインストールする
- 独自のコマンドを使用して Cargo を拡張する

また、Cargo はこの章で講義する以上のこともできるので、機能の全解説を見るには、ドキュメンテーションを参照されたい。

14.1 リリースプロファイルでビルドをカスタマイズする

Rust において、リリースプロファイルとは、プログラマがコードのコンパイルオプションについてより制御可能にしてくれる、定義済みのカスタマイズ可能なプロファイルです。各プロファイルは、それぞれ独立して設定されます。

Cargo には 2 つの主なプロファイルが存在します：dev プロファイルは、cargo build コマンドを実行したときに使用され、release プロファイルは、cargo build --release コマンドを実行したときに使用されます。dev プロファイルは、開発中に役に立つデフォルト設定がなされており、release プロファイルは、リリース用の設定がなされています。

これらのプロファイル名は、ビルドの出力で馴染みのある可能性があります：

```
$ cargo build
Finished dev [unoptimized + debuginfo] target(s) in 0.0 secs
```

```
$ cargo build --release
Finished release [optimized] target(s) in 0.0 secs
```

このビルド出力で表示されている `dev` と `release` は、コンパイラが異なるプロファイルを使用していることを示しています。

プロジェクトの **Cargo.toml** ファイルに `[profile.*]` セクションが存在しない際に適用される各プロファイル用のデフォルト設定が、Cargo には存在します。カスタマイズしたいプロファイル用の `[profile.*]` セクションを追加することで、デフォルト設定の一部を上書きすることができます。例えば、こちらが `dev` と `release` プロファイルの `opt-level` 設定のデフォルト値です：

ファイル名: **Cargo.toml**

```
[profile.dev]
opt-level = 0

[profile.release]
opt-level = 3
```

`opt-level` 設定は、0 から 3 の範囲でコンパイラがコードに適用する最適化の度合いを制御します。最適化を多くかけると、コンパイル時間が延びるので、開発中に頻繁にコードをコンパイルするのなら、たとえ出力結果のコードの動作速度が遅くなっても早くコンパイルが済んでほしいですね。これが、`dev` の `opt-level` のデフォルト設定が 0 になっている唯一の理由です。コードのリリース準備ができたなら、より長い時間をコンパイルにかけるのが最善の策です。リリースモードでコンパイルするのはたった 1 回ですが、コンパイル結果のプログラムは何度も実行するので、リリースモードでは、長いコンパイル時間と引き換えに、生成したコードが速く動作します。そのため、`release` の `opt-level` のデフォルト設定が 3 になっているのです。

デフォルト設定に対して **Cargo.toml** で異なる値を追加すれば、上書きすることができます。例として、開発用プロファイルで最適化レベル 1 を使用したければ、以下の 2 行をプロジェクトの **Cargo.toml** ファイルに追加できます：

ファイル名: **Cargo.toml**

```
[profile.dev]
opt-level = 1
```

このコードは、デフォルト設定の 0 を上書きします。こうすると、`cargo build` を実行したときに、`dev` プロファイル用のデフォルト設定に加えて、Cargo は `opt-level` の変更を適用します。`opt-level` を 1 に設定したので、Cargo はデフォルトよりは最適化を行いますが、リリースビルドほどではありません。

設定の選択肢と各プロファイルのデフォルト設定の一覧は、Cargo のドキュメンテーションを参照されたい。

14.2 Crates.io にクレートを公開する

プロジェクトの依存として `crates.io` のパッケージを使用しましたが、自分のパッケージを公開することで他の人とコードを共有することもできます。`crates.io` のクレート登録所は、自分のパッケージのソースコードを配布するので、主にオープンソースのコードをホストします。

Rust と Cargo は、公開したパッケージを人が使用し、そもそも見つけやすくしてくれる機能を有しています。これらの機能の一部を次に語り、そして、パッケージの公開方法を説明します。

14.2.1 役に立つドキュメンテーションコメントを行う

パッケージを正確にドキュメントすることで、他のユーザがパッケージを使用する方法や、いつ使用すべきかを理解する手助けをすることになるので、ドキュメンテーションを書くことに時間を費やす価値があります。第 3 章で、2 連スラッシュ、`//` で Rust のコードにコメントをつける方法を議論しました。Rust には、ドキュメンテーション用のコメントも用意されていて、便利なことに**ドキュメンテーションコメント**として知られ、HTML ドキュメントを生成します。クレートの**実装法**とは対照的にクレートの**使用法**を知ることに関心のあるプログラマ向けの、公開 API 用のドキュメンテーションコメントの中身をこの HTML は表示します。

ドキュメンテーションコメントは、2 つではなく、3 連スラッシュ、`///` を使用し、テキストを整形する Markdown 記法もサポートしています。ドキュメント対象の要素の直前にドキュメンテーションコメントを配置してください。リスト 14-1 は、`my_crate` という名のクレートの `add_one` 関数用のドキュメンテーションコメントを示しています：

ファイル名: `src/lib.rs`

```
/// Adds one to the number given.
/// 与えられた数値に1を足す。
///
/// # Examples
///
/// ```
/// let five = 5;
///
/// assert_eq!(6, my_crate::add_one(5));
/// ```
pub fn add_one(x: i32) -> i32 {
    x + 1
}
```

リスト 14-1: 関数のドキュメンテーションコメント

ここで、`add_one` 関数がすることの説明を与え、`Examples` というタイトルでセクションを開始し、`add_one` 関数の使用法を模擬するコードを提供しています。このドキュメンテーションコメントが

ら `cargo doc` を実行することで、HTML ドキュメントを生成することができます。このコマンドはコンパイラとともに配布されている `rustdoc` ツールを実行し、生成された HTML ドキュメントを **target/doc** ディレクトリに配置します。

利便性のために、`cargo doc --open` を走らせれば、現在のクレートのドキュメント用の HTML(と、自分のクレートが依存している全てのドキュメント)を構築し、その結果を Web ブラウザで開きます。`add_one` 関数まで下り、図 14-1 に示したように、ドキュメンテーションコメントのテキストがどう描画されるかを確認しましょう:

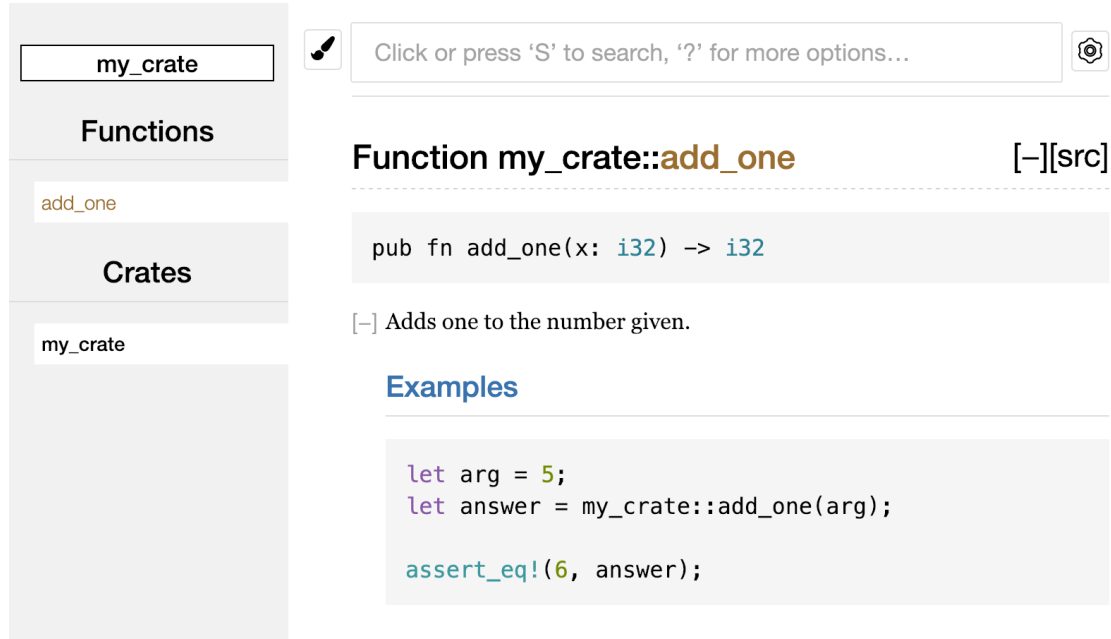


図 14-1: `add_one` 関数の HTML ドキュメント

14.2.1.1 よく使われるセクション

`Examples` マークダウンのタイトルをリスト 14-1 で使用し、「例」というタイトルのセクションを HTML に生成しました。こちらがこれ以外にドキュメントでよくクレート筆者が使用するセクションです:

- **Panics:** ドキュメント対象の関数が `panic!` する可能性のある筋書きです。プログラムをパニックさせたくない関数の使用者は、これらの状況で関数が呼ばれないことを確かめる必要があります。
- **Errors:** 関数が `Result` を返すなら、起きうるエラーの種類とどんな条件がそれらのエラーを引き起こす可能性があるのか解説すると、呼び出し側の役に立つので、エラーの種類によって処理するコードを変えて書くことができます。

- **Safety:** 関数が呼び出すのに `unsafe` (`unsafe` については第 19 章で議論します) なら、関数が `unsafe` な理由を説明し、関数が呼び出し元に保持していると期待する不変条件を講義するセクションがあるべきです。

多くのドキュメンテーションコメントでは、これら全てのセクションが必要になることはありませんが、これは自分のコードを呼び出している人が知りたいと思うコードの方向性を思い出させてくれるいいチェックリストになります。

14.2.1.2 テストとしてのドキュメンテーションコメント

ドキュメンテーションコメントに例のコードブロックを追加すると、ライブラリの使用方法のデモに役立ち、おまけもついてきます: `cargo test` を走らせると、ドキュメントのコード例をテストとして実行するのです! 例付きのドキュメントに上回るものはありません。しかし、ドキュメントが書かれてからコードが変更されたがために、動かない例がついているよりも悪いものはありません。リスト 14-1 から `add_one` 関数のドキュメンテーションとともに、`cargo test` を走らせたら、テスト結果に以下のような区域が見られます:

```
Doc-tests my_crate

running 1 test
test src/lib.rs - add_one (line 5) ... ok

test result: ok. 1 passed; 0 failed; 0 ignored; 0 measured; 0 filtered out
```

さて、例の `assert_eq!` がパニックするように、関数か例を変更し、再度 `cargo test` を実行したら、`doc` テストが、例とコードがお互いに同期されていないことを捕捉するところを目撃するでしょう!

14.2.1.3 含まれている要素にコメントする

`doc` コメントの別スタイル、`//!` は、コメントに続く要素にドキュメンテーションを付け加えるのではなく、コメントを含む要素にドキュメンテーションを付け加えます。典型的には、クレートのルートファイル (慣例的には、`src/lib.rs`) 内部や、モジュールの内部で使用して、クレートやモジュール全体にドキュメントをつけます。

例えば、`add_one` 関数を含む `my_crate` クレートの目的を解説するドキュメンテーションを追加したいのなら、`//!` で始まるドキュメンテーションコメントを `src/lib.rs` ファイルの先頭につけることができます。リスト 14-2 に示したようにですね:

ファイル名: `src/lib.rs`

```
//! # My Crate
//!
//! `my_crate` is a collection of utilities to make performing certain
//! calculations more convenient.
```

```
//! #自分のクレート
//!
//! `my_crate` は、ユーティリティの集まりであり、特定の計算をより便利に行うことができます。

/// Adds one to the number given.
// --snip--
```

リスト 14-2: 全体として `my_crate` クレイトにドキュメントをつける

`//!` で始まる最後の行のあとにコードがないことに注目してください。`///` ではなく、`//!` でコメントを開始しているので、このコメントに続く要素ではなく、このコメントを含む要素にドキュメントをつけているわけです。今回の場合、このコメントを含む要素は **src/lib.rs** ファイルであり、クレイトのルートです。これらのコメントは、クレイト全体を解説しています。

`cargo doc --open` を実行すると、これらのコメントは、`my_crate` のドキュメントの最初のページ、クレイトの公開要素のリストの上部に表示されます。図 14-2 のようにですね:

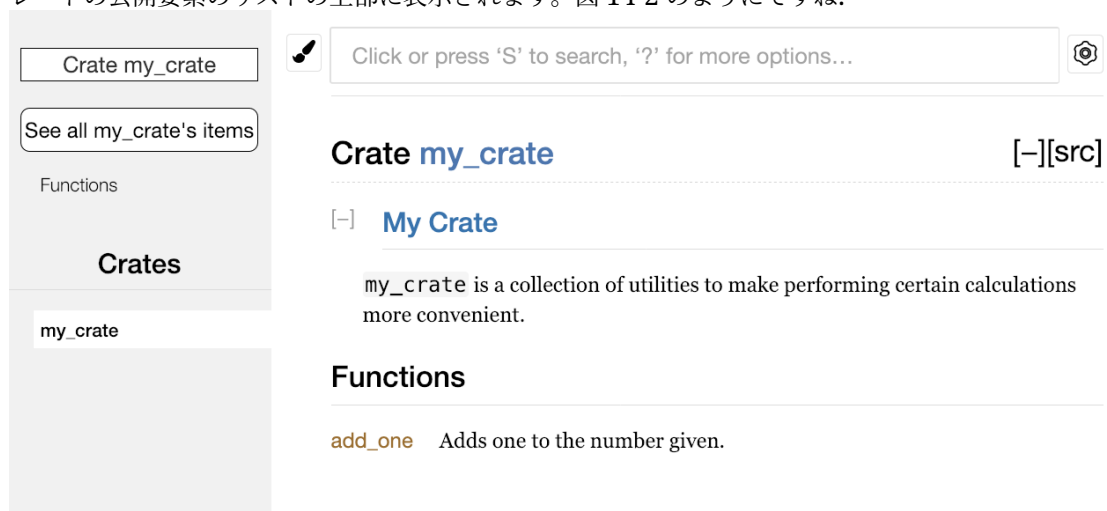


図 14-2: クレイト全体を解説するコメントを含む `my_crate` の描画されたドキュメンテーション

要素内のドキュメンテーションコメントは、特にクレイトやモジュールを解説するのに有用です。コンテナの全体の目的を説明し、クレイトの使用者がクレイトの体系を理解する手助けをするのに使用してください。

14.2.2 pub use で便利な公開 API をエクスポートする

第 7 章において、`mod` キーワードを使用してモジュールにコードを体系化する方法、`pub` キーワードで要素を公開にする方法、`use` キーワードで要素をスコープに導入する方法について講義しました。しかしながら、クレイトの開発中に、自分にとって意味のある構造は、ユーザにはあまり便利で

はない可能性があります。複数階層を含む階層で、自分の構造体を体系化したくなるかもしれませんが、それから階層の深いところで定義した型を使用したい人は、型が存在することを見つけ出すのに困難を伴う可能性もあります。また、そのような人は、`use my_crate::UsefulType` の代わりに `use my_crate::some_module::another_module::UsefulType`; と入力するのを煩わしく感じる可能性もあります。

自分の公開 API の構造は、クレーンを公開する際に考慮すべき点です。自分のクレーンを使用した人は、自分よりもその構造に馴染みがないですし、クレーンのモジュール階層が大きければ、使用したい部分を見つけるのが困難になる可能性があります。

嬉しいお知らせは、構造が他人が他のライブラリから使用するのに便利ではない場合、内部的な体系を再構築する必要はないということです: 代わりに、要素を再エクスポートし、`pub use` で自分の非公開構造とは異なる公開構造にできます。再エクスポートは、ある場所の公開要素を一つ取り、別の場所で定義されているかのように別の場所で公開します。

例えば、芸術的な概念をモデル化するために `art` という名のライブラリを作ったとしましょう。このライブラリ内には、2 つのモジュールがあります: `PrimaryColor` と `SecondaryColor` という名前の 2 つの `enum` を含む、`kinds` モジュールと `mix` という関数を含む `utils` モジュールです。リスト 14-3 のようにですね:

ファイル名: `src/lib.rs`

```
///! # Art
///!
///! A library for modeling artistic concepts.
///! # 芸術
///!
///! 芸術的な概念をモデル化するライブラリ。

pub mod kinds {
    /// The primary colors according to the RYB color model.
    /// RYBカラーモデルによる主色
    pub enum PrimaryColor {
        Red,
        Yellow,
        Blue,
    }

    /// The secondary colors according to the RYB color model.
    /// RYBカラーモデルによる副色
    pub enum SecondaryColor {
        Orange,
        Green,
        Purple,
    }
}

pub mod utils {
    use kinds::*;
```

```

    /// Combines two primary colors in equal amounts to create
    /// a secondary color.
    /// 2つの主色を同じ割合で混合し、副色にする
    pub fn mix(c1: PrimaryColor, c2: PrimaryColor) -> SecondaryColor {
        // --snip--
    }
}

```

リスト 14-3: kinds と utils モジュールに体系化される要素を含む art ライブラリ

図 14-3 は、cargo doc により生成されるこのクレートのドキュメンテーションの最初のページがどんな見た目になるか示しています:

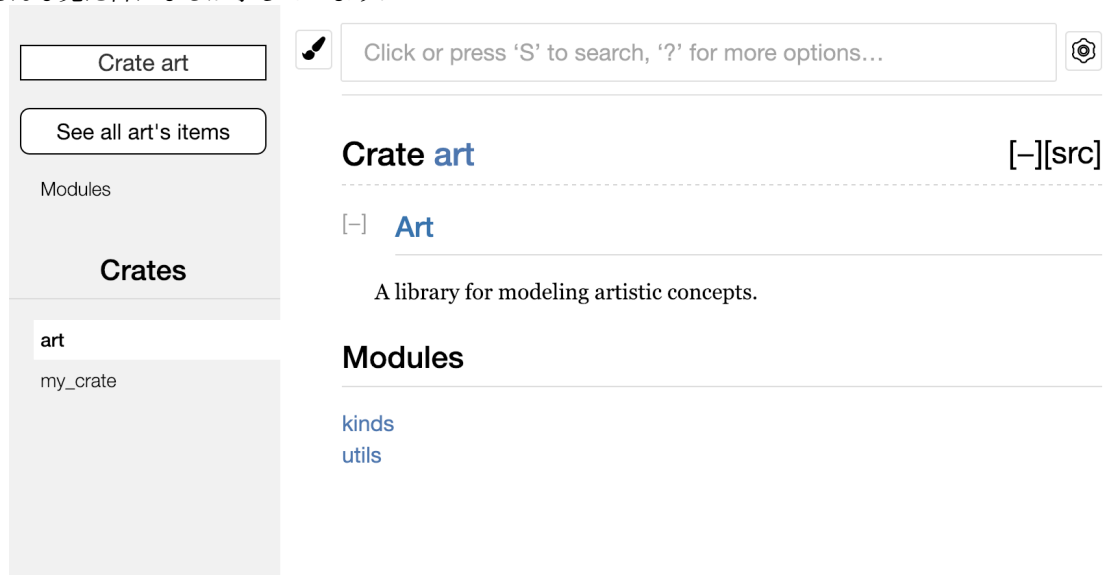


図 14-3: kinds と utils モジュールを列挙する art のドキュメンテーションのトップページ

PrimaryColor 型も SecondaryColor 型も、mix 関数もトップページには列挙されていないことに注意してください。kinds と utils をクリックしなければ、参照することができません。

このライブラリに依存する別のクレートは、現在定義されているモジュール構造を指定して、art の要素をインポートする use 文が必要になるでしょう。リスト 14-4 は、art クレートから PrimaryColor と mix 要素を使用するクレートの例を示しています:

ファイル名: src/main.rs

```

extern crate art;

use art::kinds::PrimaryColor;
use art::utils::mix;

```

```
fn main() {  
    let red = PrimaryColor::Red;  
    let yellow = PrimaryColor::Yellow;  
    mix(red, yellow);  
}
```

リスト 14-4: 内部構造がエクスポートされて art クレートの要素を使用するクレート

リスト 14-4 は art クレートを使用していますが、このコードの筆者は、PrimaryColor が kinds モジュールにあり、mix が utils モジュールにあることを理解しなければなりません。art クレートのモジュール構造は、art クレートの使用者よりも、art クレートに取り組む開発者などに関係が深いです。クレートの一部を kinds モジュールと utils モジュールに体系化する内部構造は、art クレートの使用方法を理解しようとする人には、何も役に立つ情報を含んでいません。代わりに、開発者がどこを見るべきか計算する必要があるので、art クレートのモジュール構造は混乱を招き、また、開発者はモジュール名を use 文で指定しなければならないので、この構造は不便です。

公開 API から内部体系を除去するために、リスト 14-3 の art クレートコードを変更し、pub use 文を追加して、最上位で要素を再エクスポートすることができます。リスト 14-5 みたいにですね:

ファイル名: src/lib.rs

```
//! # Art  
//!  
//! A library for modeling artistic concepts.  
  
pub use kinds::PrimaryColor;  
pub use kinds::SecondaryColor;  
pub use utils::mix;  
  
pub mod kinds {  
    // --snip--  
}  
  
pub mod utils {  
    // --snip--  
}
```

リスト 14-5: pub use 文を追加して要素を再エクスポートする

このクレートに対して cargo doc が生成する API ドキュメンテーションは、これで図 14-4 のようにトップページに再エクスポートを列挙しリンクするので、PrimaryColor 型と SecondaryColor 型と mix 関数を見つけやすくします。

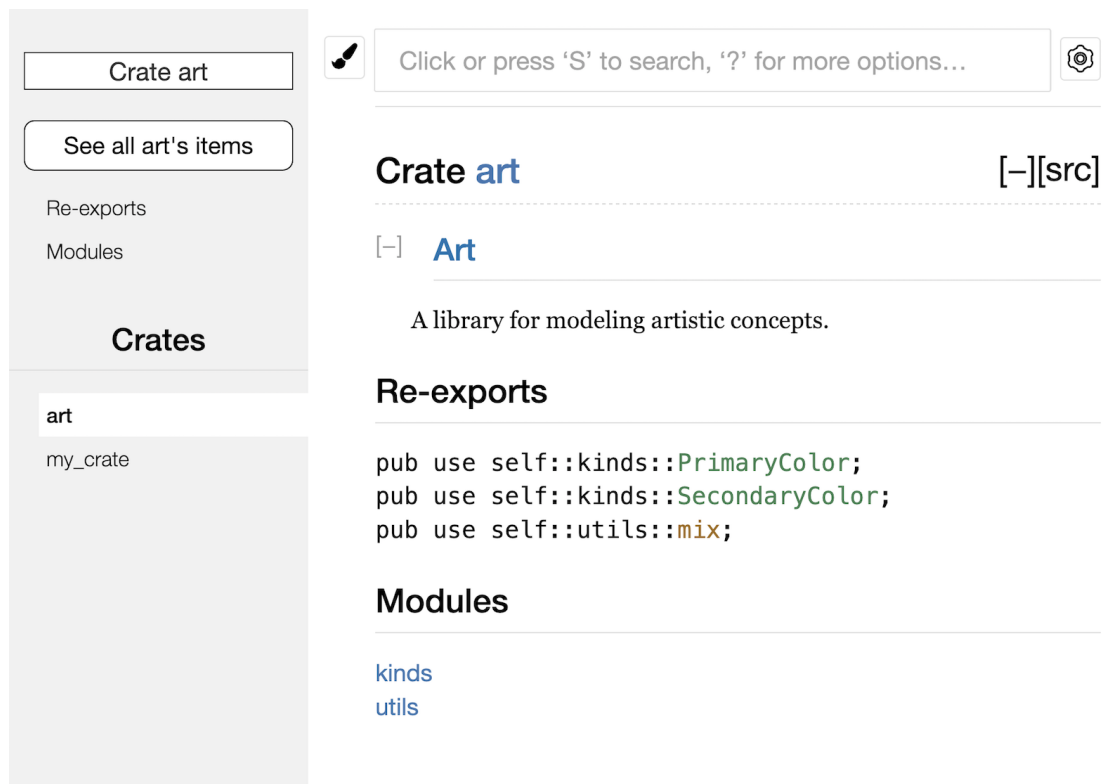


図 14-4: 再エクスポートを列挙する art のドキュメンテーションのトップページ

art クレートのユーザは、それでも、リスト 14-4 にデモされているように、リスト 14-3 の内部構造を見て使用することもできますし、リスト 14-5 のより便利な構造を使用することもできます。リスト 14-6 に示したようにですね:

ファイル名: src/main.rs

```
extern crate art;

use art::PrimaryColor;
use art::mix;

fn main() {
    // --snip--
}
```

リスト 14-6: art クレートの再エクスポートされた要素を使用するプログラム

ネストされたモジュールがたくさんあるような場合、最上位階層で `pub use` により型を再エクスポートすることは、クレートの使用者の経験に大きな違いを生みます。

役に立つ API 構造を作ることは、科学というよりも芸術の領域であり、ユーザにとって何が最善の API なのか、探究するために繰り返してみることができます。pub use は、内部的なクレート構造に柔軟性をもたらし、その内部構造をユーザに提示する構造から切り離してくれます。インストールしてある他のクレートを見て、内部構造が公開 API と異なっているか確認してみてください。

14.2.3 Crates.io のアカウントをセットアップする

クレートを公開する前に、crates.io のアカウントを作成し、API トークンを取得する必要があります。そうするには、crates.io のホームページを訪れ、Github アカウントでログインしてください。(現状は、Github アカウントがなければなりません、いずれは他の方法でもアカウントを作成できるようになる可能性があります。) ログインしたら、<https://crates.io/me/>で自分のアカウントの設定に行き、API キーを取り扱ってください。そして、cargo login コマンドを API キーとともに実行してください。以下のようにですね:

```
$ cargo login abcdefghijklmnopqrstuvwxyz012345
```

このコマンドは、Cargo に API トークンを知らせ、`~/.cargo/credentials` にローカルに保存します。このトークンは、**秘密**です: 他人とは共有しないでください。なんらかの理由で他人と実際に共有してしまったら、古いものを破棄して crates.io で新しいトークンを生成するべきです。

14.2.4 新しいクレートにメタデータを追加する

アカウントはできたので、公開したいクレートがあるとしましょう。公開前に、**Cargo.toml** ファイルの [package] セクションに追加することでクレートにメタデータを追加する必要があります。

クレートには、独自の名前が必要でしょう。クレートをローカルで作成している間、クレートの名前はなんでもいい状態でした。ところが、crates.io のクレート名は、最初に来たもの勝ちの精神で付与されていますので、一旦クレート名が取られてしまったら、その名前のクレートを他の人が公開することは絶対できません。もう使われているか、サイトで使いたい名前を検索してください。まだなら、**Cargo.toml** ファイルの [package] 以下の名前を編集して、名前を公開用に使ってください。以下のように:

ファイル名: Cargo.toml

```
[package]
name = "guessing_game"
```

たとえ、独自の名前を選択していたとしても、この時点で cargo publish を実行すると、警告とエラーが出ます:

```
$ cargo publish
Updating registry `https://github.com/rust-lang/crates.io-index`
```



```
warning: manifest has no description, license, license-file, documentation,  
homepage or repository.  
(警告: マニフェストに説明、ライセンス、ライセンスファイル、ドキュメンテーショ  
ン、ホームページ、  
リポジトリがありません)  
--snip--  
error: api errors: missing or empty metadata fields: description, license.  
(エラー: APIエラー: 存在しないメタデータフィールド: description, license)
```

原因は、大事な情報を一部入れていないからです: 説明とライセンスは、他の人があなたのクレートは何をし、どんな条件の元で使っているのかを知るために必要なのです。このエラーを解消するには、**Cargo.toml** ファイルにこの情報を入れ込む必要があります。

1 文か 2 文程度の説明をつけてください。これは、検索結果に表示されますからね。license フィールドには、**ライセンス識別子**を与える必要があります。Linux 団体の **Software Package Data Exchange (SPDX)** に、この値に使用できる識別子が列挙されています。例えば、自分のクレートを MIT ライセンスでライセンスするためには、MIT 識別子を追加してください:

ファイル名: Cargo.toml

```
[package]  
name = "guessing_game"  
license = "MIT"
```

SPDX に出現しないライセンスを使用したい場合、そのライセンスをファイルに配置し、プロジェクトにそのファイルを含め、それから license キーを使う代わりに、そのファイルの名前を指定するのに license-file を使う必要があります。

どのライセンスが自分のプロジェクトに相 (ふ) 応 (さわ) しいかというガイドは、この本の範疇を超えています。Rust コミュニティの多くの人間は、MIT OR Apache-2.0 のデュアルライセンスを使用することで、Rust 自体と同じようにプロジェクトをライセンスします。この実践は、OR で区切られる複数のライセンス識別子を指定して、プロジェクトに複数のライセンスを持たせることもできることを模擬しています。

独自の名前、バージョン、クレート作成時に cargo new が追加した筆者の詳細、説明、ライセンスが追加され、公開準備のできたプロジェクト用の Cargo.toml ファイルは以下のような見た目になっていることでしょう:

ファイル名: Cargo.toml

```
[package]  
name = "guessing_game"  
version = "0.1.0"  
authors = ["Your Name <you@example.com>"]  
description = "A fun game where you guess what number the computer has chosen."  
              (コンピュータが選択した数字を言い当てる面白いゲーム)  
license = "MIT OR Apache-2.0"
```

```
[dependencies]
```

Cargo のドキュメンテーションには、指定して他人が発見し、より容易くクレートを使用できることを保証する他のメタデータが解説されています。

14.2.5 Crates.io に公開する

アカウントを作成し、API トークンを保存し、クレートの名前を決め、必要なメタデータを指定したので、公開する準備が整いました！ クレートを公開すると、特定のバージョンが、crates.io に他の人が使用できるようにアップロードされます。

公開は**永久**なので、クレートの公開時には気をつけてください。バージョンは絶対に上書きできず、コードも削除できません。crates.io の一つの主な目標が、crates.io のクレートに依存している全てのプロジェクトのビルドが、動き続けるようにコードの永久アーカイブとして機能することなのです。バージョン削除を可能にしてしまうと、その目標を達成するのが不可能になってしまいます。ですが、公開できるクレートバージョンの数に制限はありません。

再度 cargo publish コマンドを実行してください。今度は成功するはずです：

```
$ cargo publish
Updating registry `https://github.com/rust-lang/crates.io-index`
Packaging guessing_game v0.1.0 (file:///projects/guessing_game)
Verifying guessing_game v0.1.0 (file:///projects/guessing_game)
Compiling guessing_game v0.1.0
(file:///projects/guessing_game/target/package/guessing_game-0.1.0)
Finished dev [unoptimized + debuginfo] target(s) in 0.19 secs
Uploading guessing_game v0.1.0 (file:///projects/guessing_game)
```

おめでとうございます！ Rust コミュニティとコードを共有し、誰でもあなたのクレートを依存として簡単に追加できます。

14.2.6 既存のクレートの新バージョンを公開する

クレートに変更を行い、新バージョンをリリースする準備ができれば、**Cargo.toml** ファイルに指定された version の値を変更し、再公開します。セマンティックバージョンルールを使用して加えた変更の種類に基づいて次の適切なバージョン番号を決定してください。そして、cargo publish を実行し、新バージョンをアップロードします。

14.2.7 cargo yank で Crates.io からバージョンを削除する

以前のバージョンのクレートを削除することはできないものの、将来のプロジェクトがこれに新たに依存することを防ぐことはできます。これは、なんらかの理由により、クレートバージョンが壊れている場合に有効です。そのような場面において、Cargo はクレートバージョンの**取り下げ (yank)**

をサポートしています。

バージョンを取り下げると、既存のプロジェクトは、引き続きダウンロードしたりそのバージョンに依存したりしつづけられますが、新規プロジェクトが新しくそのバージョンに依存しだすことは防止されます。つまり、取り下げは、すでに **Cargo.lock** が存在するプロジェクトは壊さないが、将来的に生成された **Cargo.lock** ファイルは取り下げられたバージョンを使わない、ということの意味します。

あるバージョンのクレートを取り下げるには、`cargo yank` を実行し、取り下げたいバージョンを指定します：

```
$ cargo yank --vers 1.0.1
```

`--undo` をコマンドに付与することで、取り下げを取り消し、再度あるバージョンにプロジェクトを依存させ始めることもできます：

```
$ cargo yank --vers 1.0.1 --undo
```

取り下げは、コードの削除は一切し**ません**。例として、取り下げ機能は、誤ってアップロードされた秘密鍵を削除するためのものではありません。もしそうってしまったら、即座に秘密鍵をリセットしなければなりません。

14.3 Cargo のワークスペース

第 12 章で、バイナリクレートとライブラリクレートを含むパッケージを構築しました。プロジェクトの開発が進むにつれて、ライブラリクレートの肥大化が続き、その上で複数のライブラリクレートにパッケージを分割したくなることでしょう。この場面において、Cargo はワークスペースという協調して開発された関連のある複数のパッケージを管理するのに役立つ機能を提供しています。

14.3.1 ワークスペースを生成する

ワークスペースは、同じ **Cargo.lock** と出力ディレクトリを共有する一連のパッケージです。ワークスペースを使用したプロジェクトを作成し、ワークスペースの構造に集中できるよう、瑣末なコードを使用しましょう。ワークスペースを構築する方法は複数ありますが、一般的な方法を提示しましょう。バイナリ 1 つとライブラリ 2 つを含むワークスペースを作ります。バイナリは、主要な機能を提供しますが、2 つのライブラリに依存しています。一方のライブラリは、`add_one` 関数を提供し、2 番目のライブラリは、`add_two` 関数を提供します。これら 3 つのクレートが同じワークスペースの一部になります。ワークスペース用の新しいディレクトリを作ることから始めましょう：

```
$ mkdir add
$ cd add
```

次に **add** ディレクトリにワークスペース全体を設定する **Cargo.toml** ファイルを作成します。このファイルには、他の **Cargo.toml** ファイルで見かけるような [package] セクションやメタデータはありません。代わりにバイナリクレートへのパスを指定することでワークスペースにメンバを追加させてくれる [workspace] セクションから開始します; 今回の場合、そのパスは **adder** です:

ファイル名: Cargo.toml

```
[workspace]

members = [
    "adder",
]
```

次に、**add** ディレクトリ内で `cargo new` を実行することで `adder` バイナリクレートを作成しましょう:

```
$ cargo new --bin adder
Created binary (application) `adder` project
```

この時点で、`cargo build` を走らせるとワークスペースを構築できます。**add** ディレクトリに存在するファイルは、以下になるはずです:

```
├── Cargo.lock
├── Cargo.toml
├── adder
│   ├── Cargo.toml
│   └── src
│       └── main.rs
└── target
```

ワークスペースには、コンパイルした生成物を置けるように最上位に **target** のディレクトリがあります; `adder` クレートには **target** ディレクトリはありません。**adder** ディレクトリ内部から `cargo build` を走らせることになっていたとしても、コンパイルされる生成物は、**add/adder/target** ではなく、**add/target** に落ち着くでしょう。ワークスペースのクレートは、お互いに依存しあうことを意味するので、Cargo はワークスペースの **target** ディレクトリをこのように構成します。各クレートが **target** ディレクトリを持っていたら、各クレートがワークスペースの他のクレートを再コンパイルし、**target** ディレクトリに生成物がある状態にしなければならないでしょう。一つの **target** ディレクトリを共有することで、クレートは不必要な再ビルドを回避できるのです。

14.3.2 ワークスペース内に 2 番目のクレートを作成する

次に、ワークスペースに別のメンバクレートを作成し、`add-one` と呼びましょう。最上位の **Cargo.toml** を変更して `members` リストで **add-one** パスを指定するようにしてください:

ファイル名: Cargo.toml

```
[workspace]

members = [
    "adder",
    "add-one",
]
```

それから、add-one という名前のライブラリクレートを生成してください:

```
$ cargo new add-one --lib
    Created library `add-one` project
```

これで **add** ディレクトリには、以下のディレクトリやファイルが存在するはずです:

```
├── Cargo.lock
├── Cargo.toml
├── add-one
│   ├── Cargo.toml
│   └── src
│       └── lib.rs
├── adder
│   ├── Cargo.toml
│   └── src
│       └── main.rs
└── target
```

add-one/src/lib.rs ファイルに `add_one` 関数を追加しましょう:

ファイル名: add-one/src/lib.rs

```
pub fn add_one(x: i32) -> i32 {
    x + 1
}
```

ワークスペースにライブラリクレートが存在するようになったので、バイナリクレート `adder` をライブラリクレートの `add-one` に依存させられます。まず、`add-one` へのパス依存を **adder/Cargo.toml** に追加する必要があります:

ファイル名: adder/Cargo.toml

```
[dependencies]

add-one = { path = "../add-one" }
```

Cargo はワークスペースのクレートが、お互いに依存しているとは想定していないので、クレート間の依存関係について明示する必要があります。

次に、adder クレートの add-one クレートから `add_one` 関数を使用しましょう。**adder/src/main.rs** ファイルを開き、冒頭に `extern crate` 行を追加して新しい add-one ライブラリクレートをスコープに導入してください。それから `main` 関数を変更し、`add_one` 関数を呼び出します。リスト 14-7 のようにですね:

ファイル名: `adder/src/main.rs`

```
extern crate add_one;

fn main() {
    let num = 10;
    // こんにちは世界! {}+1は{}!
    println!("Hello, world! {} plus one is {}!", num, add_one::add_one(num));
}
```

リスト 14-7: adder クレートから add-one ライブラリクレートを使用する

最上位の **add** ディレクトリで `cargo build` を実行することでワークスペースをビルドしましょう!

```
$ cargo build
   Compiling add-one v0.1.0 (file:///projects/add/add-one)
   Compiling adder v0.1.0 (file:///projects/add/adder)
    Finished dev [unoptimized + debuginfo] target(s) in 0.68 secs
```

add ディレクトリからバイナリクレートを実行するには、`-p` 引数とパッケージ名を `cargo run` と共に使用して、使用したいワークスペースのパッケージを指定する必要があります:

```
$ cargo run -p adder
    Finished dev [unoptimized + debuginfo] target(s) in 0.0 secs
    Running `target/debug/adder`
Hello, world! 10 plus one is 11!
```

これにより、**adder/src/main.rs** のコードが実行され、これは `add_one` クレートに依存しています。

14.3.2.1 ワークスペースの外部クレートに依存する

ワークスペースには、各クレートのディレクトリそれぞれに **Cargo.lock** が存在するのではなく、ワークスペースの最上位階層にただ一つの **Cargo.lock** が存在するだけのことに注目してください。これにより、全クレートが全依存の同じバージョンを使用していることが確認されます。`rand` クレートを **adder/Cargo.toml** と **add-one/Cargo.toml** ファイルに追加すると、Cargo は両者のあるバージョンの `rand` に解決し、それを一つの **Cargo.lock** に記録します。ワークスペースの全クレートに同じ依存を使用させるということは、ワークスペースのクレートが相互に互換性を常に維持することになります。**add-one/Cargo.toml** ファイルの `[dependencies]` セクションに `rand` ク

レートを追加して、add-one クレートで rand クレートを 사용할 수 있습니다:

파일名: add-one/Cargo.toml

```
[dependencies]

rand = "0.3.14"
```

これで、**add-one/src/lib.rs** 파일에 `extern crate rand;`를 추가하고, **add** 디렉토리에서 `cargo build`를 실행함으로써 워크스페이스 전체를 빌드하면, rand 클레ートを 가져와서 컴파일할 수 있습니다:

```
$ cargo build
  Updating registry `https://github.com/rust-lang/crates.io-index`
  Downloading rand v0.3.14
  --snip--
  Compiling rand v0.3.14
  Compiling add-one v0.1.0 (file:///projects/add/add-one)
  Compiling adder v0.1.0 (file:///projects/add/adder)
  Finished dev [unoptimized + debuginfo] target(s) in 10.18 secs
```

さて、最上位의 **Cargo.lock** は、rand に対する add-one 의 依存의 情報을 포함하게 되었습니다。但是、rand は 워크스페이스의 ใด處에서 사용されているにも関わらず、それぞれの **Cargo.toml** 파일にも、rand を追加しない限り、워크스페이스의 其他의 클레옌에서 그것을 사용할 수 없습니다。예를 들어、adder 클레옌의 **adder/src/main.rs** 파일에 `extern crate rand;`를 추가하면、에러가 나옵니다:

```
$ cargo build
  Compiling adder v0.1.0 (file:///projects/add/adder)
error: use of unstable library feature 'rand': use `rand` from crates.io (see issue #27703)
(에러: 불안定な 라이브러리의 機能 'rand'를 사용하고 있습니다: crates.io의 `rand`를 사용
  하십시오)
--> adder/src/main.rs:1:1
   |
1 | extern crate rand;
```

이를 수정하기 위해서는、adder 클레옌의 **Cargo.toml** 파일을 편집하고、同様に 그 클레옌이 rand 에 依存하고 있는 것을 표시하십시오。adder 클레옌을 빌드하면、rand 를 **Cargo.lock** 의 adder 의 依存一覽에 추가하지만、rand 의 파일이 추가적으로 다운로드되는 것은 없습니다。Cargo 가、워크스페이스의 rand 를 사용하는 클레옌도、同버젝을 사용하고 있는 것을 確かめてくれる 것입니다。워크스페이스 전체에서 rand 의 同버젝을 사용하는 것에 의해、複數의 拷本이 존재하지 않음으로써 스페이스를節約하고、워크스페이스의 클레옌이 相互에 互換性을維持하는 것을 確かめます。

14.3.2.2 ワークスペースにテストを追加する

さらなる改善として、`add_one` クレート内に `add_one::add_one` 関数のテストを追加しましょう:

ファイル名: `add-one/src/lib.rs`

```
pub fn add_one(x: i32) -> i32 {
    x + 1
}

#[cfg(test)]
mod tests {
    use super::*;

    #[test]
    fn it_works() {
        assert_eq!(3, add_one(2));
    }
}
```

では、最上位の **add** ディレクトリで `cargo test` を実行してください:

```
$ cargo test
Compiling add-one v0.1.0 (file:///projects/add/add-one)
Compiling adder v0.1.0 (file:///projects/add/adder)
Finished dev [unoptimized + debuginfo] target(s) in 0.27 secs
Running target/debug/deps/add_one-f0253159197f7841

running 1 test
test tests::it_works ... ok

test result: ok. 1 passed; 0 failed; 0 ignored; 0 measured; 0 filtered out

Running target/debug/deps/adder-f88af9d2cc175a5e

running 0 tests

test result: ok. 0 passed; 0 failed; 0 ignored; 0 measured; 0 filtered out

Doc-tests add-one

running 0 tests

test result: ok. 0 passed; 0 failed; 0 ignored; 0 measured; 0 filtered out
```

出力の最初の区域が、`add-one` クレートの `it_works` テストが通ったことを示しています。次の区域には、`adder` クレートにはテストが見つからなかったことが示され、さらに最後の区域には、`add-one` クレートにドキュメンテーションテストは見つからなかったと表示されています。このような構造をしたワークスペースで `cargo test` を走らせると、ワークスペースの全クレートのテストを実行し

ます。

-p フラグを使用し、テストしたいクレートの名前を指定することで最上位ディレクトリから、ワークスペースのある特定のクレート用のテストを実行することもできます:

```
$ cargo test -p add-one
    Finished dev [unoptimized + debuginfo] target(s) in 0.0 secs
    Running target/debug/deps/add_one-b3235fea9a156f74

running 1 test
test tests::it_works ... ok

test result: ok. 1 passed; 0 failed; 0 ignored; 0 measured; 0 filtered out

    Doc-tests add-one

running 0 tests

test result: ok. 0 passed; 0 failed; 0 ignored; 0 measured; 0 filtered out
```

この出力は、cargo test が add-one クレートのテストのみを実行し、adder クレートのテストは実行しなかったことを示しています。

ワークスペースのクレートを <https://crates.io/> に公開したら、ワークスペースのクレートは個別に公開される必要があります。cargo publish コマンドには --all フラグや -p フラグはないので、各クレートのディレクトリに移動して、ワークスペースの各クレートを cargo publish して、公開しなければなりません。

鍛錬を積むために、add-one クレートと同様の方法でワークスペースに add-two クレートを追加してください！

プロジェクトが肥大化してきたら、ワークスペースの使用を考えてみてください: 大きな一つのコードの塊よりも、微細で個別のコンポーネントの方が理解しやすいです。またワークスペースにクレートを保持することは、同時に変更されることが多いのなら、協調しやすくなることにも繋がります。

14.4 cargo install で Crates.io からバイナリをインストールする

cargo install コマンドにより、バイナリクレートをローカルにインストールし、使用することができます。これは、システムパッケージを置き換えることを意図したものではありません。即(すなわ)ち、Rust の開発者が、他人が crates.io に共有したツールをインストールするのに便利な方法を意味するのです。バイナリターゲットを持つパッケージのみインストールできることに注意してください。バイナリターゲットとは、クレートが **src/main.rs** ファイルやバイナリとして指定された他のファイルを持つ場合に生成される実行可能なプログラムのことであり、単独では実行不可能なもの、他のプログラムに含むのには適しているライブラリターゲットとは一線を画します。通常、ク

レートには、**README** ファイルに、クレートがライブラリかバイナリターゲットか、両方をもつかという情報があります。

`cargo install` でインストールされるバイナリは全て、インストールのルートの **bin** フォルダに保持されます。Rust を `rustup` を使用し、独自の設定を何も行なっていなければ、このディレクトリは、**\$HOME/.cargo/bin** になります。`cargo install` でインストールしたプログラムを実行できるようにするためには、そのディレクトリが `$PATH` に含まれていることを確かめてください。

例えば、第 12 章で、ファイルを検索する `ripgrep` という `grep` ツールの Rust 版があることに触れました。`ripgrep` をインストールしたかったら、以下を実行することができます：

```
$ cargo install ripgrep
Updating registry `https://github.com/rust-lang/crates.io-index`
Downloading ripgrep v0.3.2
--snip--
Compiling ripgrep v0.3.2
Finished release [optimized + debuginfo] target(s) in 97.91 secs
Installing ~/.cargo/bin/rg
```

出力の最後の行が、インストールされたバイナリの位置と名前を示していて、`ripgrep` の場合、`rg` です。インストールディレクトリが `$PATH` に存在する限り、前述したように、`rg --help` を走らせて、より高速で Rust らしいファイル検索ツールを使用し始めることができます！

14.5 独自のコマンドで Cargo を拡張する

Cargo は変更する必要なく、新しいサブコマンドで拡張できるように設計されています。`$PATH` にあるバイナリが `cargo-something` という名前なら、`cargo something` を実行することで、Cargo のサブコマンドであるかのように実行することができます。このような独自のコマンドは、`cargo --list` を実行すると、列挙もされます。`cargo install` を使用して拡張をインストールし、それから組み込みの Cargo ツール同様に実行できることは、Cargo の設計上の非常に便利な恩恵です！

14.6 まとめ

Cargo で `crates.io` とコードを共有することは、Rust のエコシステムを多くの異なる作業に有用にするものの一部です。Rust の標準ライブラリは、小さく安定的ですが、クレートは共有および使用しやすく、言語とは異なるタイムラインで進化します。積極的に `crates.io` で自分にとって有用なコードを共有してください；他の誰かにとっても、役に立つものであることでしょう！

第 15 章

スマートポインタ

ポインタは、メモリのアドレスを含む変数の一般的な概念です。このアドレスは、何らかの他のデータを参照、または「指します」。Rust において最もありふれた種類のポインタは参照です。参照については第 4 章で習いましたね。参照は & 記号で示唆され、指している値を借用します。データを参照すること以外に特別な能力は何もありません。また、オーバーヘッドもなく、ポインタの中では最も頻繁に使われます。

一方、**スマートポインタ**は、ポインタのように振る舞うだけでなく、追加のメタデータと能力があるデータ構造です。スマートポインタという概念は、Rust に特有のものではありません。スマートポインタは、C++ に端を発し、他の言語にも存在しています。Rust では、標準ライブラリに定義された様々なスマートポインタが、参照以上の機能を提供します。この章で探究する一つの例が、**参照カウント**方式のスマートポインタ型です。このポインタのおかげでデータに複数の所有者を持たせることができます。所有者の数を追いかけ、所有者がいなくなったらデータの片付けをしてくれるからです。

所有権と借用の概念を使う Rust において、参照とスマートポインタにはもう 1 つ違いがあります。参照はデータを借用するだけのポインタなのです。対照的に多くの場合、スマートポインタは指しているデータを**所有**します。

私達はすでに、この本の中でいくつかのスマートポインタに遭遇してきました。例えば第 8 章の `String` や `Vec<T>` です。ただし、私達はそれらをスマートポインタとは呼んでいませんでした。これらの型がどちらもスマートポインタに数えられるのは、あるメモリを所有しそれを弄ることができるからです。また、メタデータ（キャパシティなど）や追加の能力、あるいは保証（`String` ならデータが常に有効な UTF-8 であると保証することなど）もあります。

スマートポインタは普通、構造体を使用して実装されています。スマートポインタを通常の構造体と区別する特徴は、スマートポインタが `Deref` と `Drop` トレイトを実装していることです。`Deref` トレイトにより、スマートポインタ構造体のインスタンスは、参照のように振る舞うことができるので、参照あるいはスマートポインタのどちらも動作するコードを書くことができます。`Drop` トレイトにより、スマートポインタのインスタンスがスコープを外れた時に走るコードをカスタマイズすること

ができます。この章では、どちらのトレイトについても議論し、これらのトレイトがスマートポインタにとって重要な理由を説明します。

スマートポインタパターンが Rust においてよく使われる一般的なデザインパターンであることを考えれば、この章で既存のスマートポインタを全て取り扱うことなどできません。多くのライブラリに独自のスマートポインタがあり、自分だけのスマートポインタを書くことさえできるのです。ここでは標準ライブラリの最もありふれたスマートポインタを取り扱っていきます。

- ヒープに値を確保する `Box<T>`
- 複数の所有権を可能にする参照カウント型の `Rc<T>`
- `RefCell<T>` を通してアクセスされ、コンパイル時ではなく実行時に借用規則を強制する型の `Ref<T>` と `RefMut<T>`

さらに、**内部可変性**パターンも扱います。そこでは不変な型が、内部の値を変更するための API を公開するのです。また、**循環参照**についても議論します。つまり、循環参照によっていかにしてメモリがリークするのか、そしてどうやってそれを回避するのかを議論します。

さあ、飛び込みましょう！

15.1 ヒープのデータを指す `Box<T>` を使用する

最も素直なスマートポインタは**ボックス**であり、その型は `Box<T>` と記述されます。ボックスにより、スタックではなくヒープにデータを格納することができます。スタックに残るのは、ヒープデータへのポインタです。スタックとヒープの違いを再確認するには、第 4 章を参照されたし。

ボックスは、データをスタックの代わりにヒープに格納する以外は、パフォーマンスのオーバーヘッドはありません。しかし、特別な能力がたくさんあるわけでもありません。以下のような場面で最もよく使われるでしょう。

- コンパイル時にはサイズを知ることができない型があり、正確なサイズを要求する文脈でその型の値を使用する時
- 多くのデータがあり、その所有権を移したいが、その際にデータがコピーされないようにしたい時
- 値を所有する必要があるが、特定の型であることではなく、特定のトレイトを実装する型であることのみ気にかけたい時

「ボックスで再帰的な型を可能にする」節で 1 つ目の場合について実際に説明します。2 番目の場合、多くのデータの所有権を転送するには、データがスタック上でコピーされるので、長い時間がかかります。この場面でパフォーマンスを向上させるために、多くのデータをヒープ上にボックスとして格納することができます。そして、小さなポインタのデータのみがスタック上でコピーされる一方、それが参照しているデータはヒープ上の 1 箇所に留まります。3 番目のケースは**トレイトオブジェクト**として知られています。第 17 章の「トレイトオブジェクトで異なる型の値を許容する」の

節は、すべてその話題に捧げられています。従って、ここで学ぶことは第 17 章でもまた使うことになります！

15.1.1 Box<T>を使ってヒープにデータを格納する

Box<T> のこのユースケースを議論する前に、Box<T> の記法と、Box<T> 内に格納された値を読み書きする方法について講義しましょう。

リスト 15-1 は、ボックスを使用してヒープに i32 の値を格納する方法を示しています。

ファイル名: src/main.rs

```
fn main() {  
    let b = Box::new(5);  
    println!("b = {}", b);  
}
```

リスト 15-1: ボックスを使用して i32 の値をヒープに格納する

変数 `b` を定義して Box の値を保持します。Box は値 5 を指し、値 5 はヒープに確保されています。このプログラムは、`b = 5` と出力するでしょう。つまりこの場合、このデータがスタックにあるのと同じような方法でボックスのデータにアクセスできます。所有された値と全く同じでスコープを抜けるとき、実際 `b` は main の終わりで抜けるのですが、ボックスはメモリから解放されます。メモリの解放は（スタックに格納されている）ボックスと（ヒープに格納されている）指しているデータに対して起きます。

ヒープに単独の値を置いても嬉しいことはほとんどないので、このように単独でボックスを使用することはあまりありません。単独の i32 のような値はデフォルトではスタックに置かれます。ほとんどの場合ではその方が適切です。ボックスのおかげで定義できるようになる型を見てみましょう。ボックスがなければそれらの型は定義できません。

15.1.2 ボックスで再帰的な型を可能にする

コンパイル時にコンパイラが知っておかねばならないのは、ある型が占有する領域の大きさです。コンパイル時にサイズがわからない型の 1 つとして**再帰的な型**があります。この型の値は、値の一部として同じ型の他の値を持つ場合があります。値のこうしたネストは、理論的には無限に続く可能性があるので、コンパイラは再帰的な型の値が必要とする領域を知ることができないのです。しかしながら、ボックスのサイズはわかっているので、再帰的な型の定義にボックスを挟むことで再帰的な型を作ることができます。

コンスリストは関数型プログラミング言語では一般的なデータ型ですが、これを再帰的な型の例として探究しましょう。我々が定義するコンスリストは、再帰を除けば素直です。故に、これから取り掛かる例に現れる概念は、再帰的な型に関わるもっと複雑な場面に遭遇したときには必ず役に立つで

しょう。

15.1.2.1 コンスリストについてもっと詳しく

コンスリストは、Lisp プログラミング言語とその方言に由来するデータ構造です。Lisp では、cons 関数（“construct function” の省略形です）は 2 つの引数から新しいペアを構成します。この引数は通常、単独の値と別のペアからなります。これらのペアを含むペアがリストをなすのです。

cons 関数という概念は、より一般的な関数型プログラミングの俗語にもなっています。“to cons **x** onto **y**” はコンテナ **y** の先頭に要素 **x** を置くことで新しいコンテナのインスタンスを生成することを意味します。

コンスリストの各要素は、2 つの要素を含みます。現在の要素の値と次の要素です。リストの最後の要素は、Nil と呼ばれる値だけを含み、次の要素を持ちません。コンスリストは、繰り返し cons 関数を呼び出すことで生成されます。繰り返しの基底ケースを示すのに標準的に使われる名前は Nil です。これは第 6 章の“null” や“nil” の概念とは異なることに注意してください。“null” や“nil” は、無効だったり存在しない値です。

関数型プログラミング言語ではコンスリストは頻繁に使われますが、Rust ではあまり使用されないデータ構造です。Rust で要素のリストがあるときはほとんど、Vec<T> を使用するのがよりよい選択になります。より複雑な他の再帰的なデータ型は様々な場面で役に立ちます。しかしコンスリストから始めることで、ボックスのおかげで再帰的なデータ型を定義できるわけを、あまり気を散らすことなく調べることができるのです。

リスト 15-2 には、コンスリストの enum 定義が含まれています。このコードはまだコンパイルできないことに注意してください。List 型のサイズが分からないからです。これについてはこの後説明します。

ファイル名: src/main.rs

```
enum List {  
    Cons(i32, List),  
    Nil,  
}
```

リスト 15-2: i32 値のコンスリストデータ構造を表す enum を定義する最初の試行

注釈: この例のために i32 値だけを保持するコンスリストを実装します。第 10 章で議論したように、ジェネリクスを使用してどんな型の値も格納できるコンスリストを定義して実装することもできたでしょう。

この List 型を使用してリスト 1, 2, 3 を格納すると、リスト 15-3 のコードのような見た目になるでしょう。

ファイル名: src/main.rs

```
use List::{Cons, Nil};

fn main() {
    let list = Cons(1, Cons(2, Cons(3, Nil)));
}
```

リスト 15-3: List enum を使用してリスト 1, 2, 3 を格納する

最初の Cons 値は、1 と別の List 値を保持しています。この List 値は別の Cons 値で、2 とまた別の List 値を保持しています。この List 値はまたまた別の Cons 値で、3 と List 値を保持していますが、この List 値でついに Nil になります。Nil はリストの終端を通知する非再帰的な列挙子です。

リスト 15-3 のコードをコンパイルしようとすると、リスト 15-4 に示したエラーが出ます。

```
error[E0072]: recursive type `List` has infinite size
(エラー: 再帰的な型 `List` は無限のサイズです)
--> src/main.rs:1:1
|
1 | enum List {
|   ^^^^^^^ recursive type has infinite size
2 |     Cons(i32, List),
|               ----- recursive without indirection
|
= help: insert indirection (e.g., a `Box`, `Rc`, or `&`) at some point to
make `List` representable
(助言: 間接参照(例: `Box`、`Rc`、あるいは `&`)をどこかに挿入して、`List`を表現
可能にしてください)
```

リスト 15-4: 再帰的な enum を定義しようとすると得られるエラー

エラーは、この型は「無限のサイズである」と表示しています。理由は、再帰的な列挙子を含む List を定義したからです。つまり、List は自身の別の値を直接保持しているのです。結果として、コンパイラは List 値を格納するのに必要な領域が計算できません。このエラーが出た理由を少し噛み砕きましょう。まず、非再帰的な型の値を格納するのに必要な領域をどうコンパイラが決定しているかを見ましょう。

15.1.2.2 非再帰的な型のサイズを計算する

第 6 章で enum 定義を議論した時にリスト 6-2 で定義した Message enum を思い出してください。

```
enum Message {
    Quit,
    Move { x: i32, y: i32 },
    Write(String),
    ChangeColor(i32, i32, i32),
}
```

Message 値一つにメモリを確保するために必要な領域を決定するために、コンパイラは、各列挙子を見てどの列挙子が最も領域を必要とするかを確認します。コンパイラは、`Message::Quit` は全く領域を必要とせず、`Message::Move` は `i32` 値を 2 つ格納するのに十分な領域が必要、などと確かめます。ただ 1 つの列挙子しか使用されないので、Message 値一つが必要とする最大の領域は、最大の列挙子を格納するのに必要になる領域です。

これをコンパイラがリスト 15-2 の `List enum` のような再帰的な型が必要とする領域を決定しようとする時に起こることと比較してください。コンパイラは `Cons` 列挙子を見ることから始めます。この列挙子には、型 `i32` 値が一つと型 `List` の値が一つ保持されます。故に、`Cons` は 1 つの `i32` と `List` のサイズに等しい領域を必要とします。`List` が必要とするメモリ量を計算するのに、コンパイラは `Cons` 列挙子から列挙子を観察します。`Cons` 列挙子は型 `i32` を 1 つと型 `List` の値 1 つを保持し、この過程は無限に続きます。図 15-1 のようにですね。

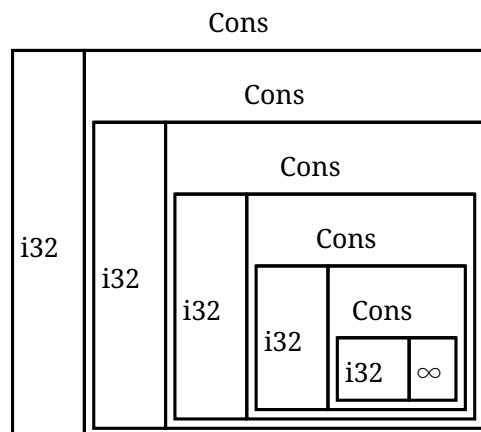


図 15-1: 無限の `Cons` 列挙子からなる無限の `List`

15.1.2.3 `Box<T>` で既知のサイズの再帰的な型を得る

コンパイラは、再帰的に定義された型に必要なメモリ量を計算できないので、リスト 15-4 ではエラーを返します。しかし、エラーにはこんな役立つ提案が含まれているのです。

```
= help: insert indirection (e.g., a `Box`, `Rc`, or `&`) at some point to
make `List` representable
```

この提案において「間接参照」は、値を直接格納するのではなく、データ構造を変更して値を間接的に格納することを意味します。これは値の代わりに値へのポインタを格納することによって可能になります。

`Box<T>` はポインタなので、コンパイラには `Box<T>` が必要とする領域が必ずわかります。すなわち、ポインタのサイズは指しているデータの量に左右されません。つまり、別の `List` 値を直接置く代わりに、`Cons` 列挙子の中に `Box<T>` を配置することができます。`Box<T>` は、`Cons` 列挙子の中ではなく、ヒープに置かれる次の `List` 値を指します。概念的には、依然として我々のリストは他のリストを「保持する」リストによって作られたものです。しかし、今やこの実装は、要素をお互いの中に配置するというより、隣り合うように配置するような感じになります。

リスト 15-2 の `List enum` の定義とリスト 15-3 の `List` の使用をリスト 15-5 のコードに変更することができ、これはコンパイルが通ります。

ファイル名: `src/main.rs`

```
enum List {
    Cons(i32, Box<List>),
    Nil,
}

use List::{Cons, Nil};

fn main() {
    let list = Cons(1,
        Box::new(Cons(2,
            Box::new(Cons(3,
                Box::new(Nil))))));
}
```

リスト 15-5: 既知のサイズにするために `Box<T>` を使用する `List` の定義

`Cons` 列挙子は、1 つの `i32` のサイズに加えてボックスのポインタデータを格納する領域を必要とするでしょう。`Nil` 列挙子は値を格納しないので、`Cons` 列挙子よりも必要な領域は小さいです。これで、どんな `List` 値も `i32` 1 つのサイズに加えてボックスのポインタデータのサイズを必要とすることがわかりました。ボックスを使うことで無限に続く再帰の連鎖を断ち切ったので、コンパイラは `List` 値を格納するのに必要なサイズを計算できます。図 15-2 は、`Cons` 列挙子の今の見た目を示しています。

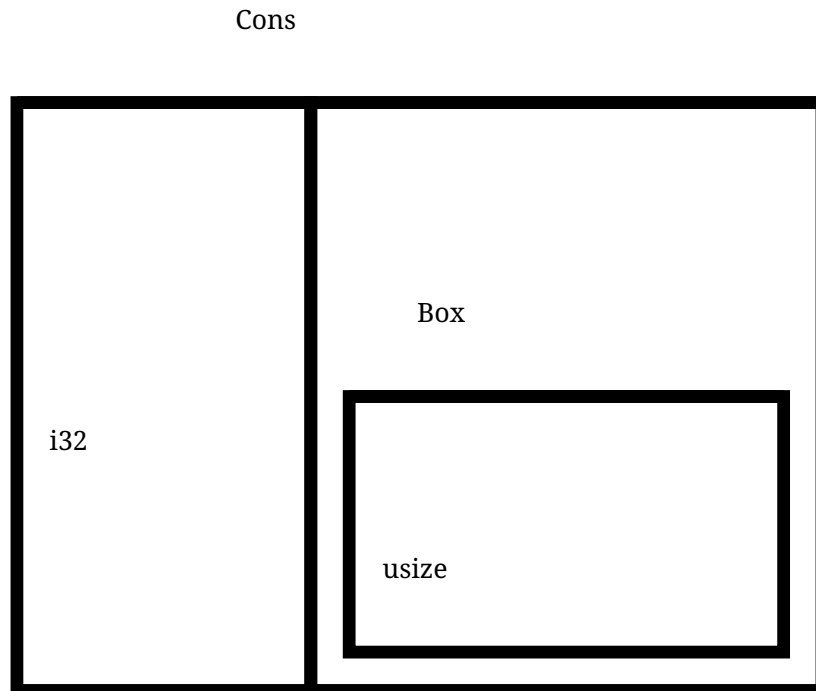


図 15-2: Cons が Box を保持しているので、無限にサイズがあるわけではない List

ボックスは、間接参照とヒープメモリ確保だけを提供します。他のスマートポインタ型に見られるような別の特別な能力は何もありません。これらの特別な能力が招くパフォーマンスのオーバーヘッドもないので、コンスリストのように間接参照だけが必要な機能である場合には便利でしょう。より多くのボックスのユースケースは第 17 章でもお見かけするでしょう。

`Box<T>` 型がスマートポインタなのは、`Deref` トレイトを実装しているからです。このトレイトにより `Box<T>` の値を参照のように扱うことができます。`Box<T>` 値がスコープを抜けると、ボックスが参照しているヒープデータも片付けられます。これは `Drop` トレイト実装のおかげです。これら 2 つのトレイトをより詳しく探究しましょう。これら 2 つのトレイトは、他のスマートポインタ型が提供する機能にとってさらに重要なものです。それらについてはこの章の残りで議論します。

15.2 Deref トレイトでスマートポインタを普通の参照のように扱う

Deref トレイトを実装することで、**参照外し演算子**の `*`（掛け算やグロブ演算子とは違います）の振る舞いをカスタマイズできます。Deref を実装してスマートポインタを普通の参照みたいに扱えるようにすれば、参照に対して処理を行うコードを書いて、そのコードをスマートポインタに対しても使うことができるのです。

まずは、参照外し演算子が普通の参照に対して動作するところを見ましょう。それから、`Box<T>` のように振る舞う独自の型を定義してみましょう。参照とは異なり、新しく定義した型には参照外し演算子を使えません。その理由を確認します。Deref トレイトを実装すればスマートポインタは参照と同じように機能するので、そのやり方を調べましょう。そして、Rust には**参照外し型強制**という機能があり、その機能のおかげで参照やスマートポインタをうまく使うことができるので、それに目を向けてみましょう。

15.2.1 参照外し演算子で値までポインタを追いかける

普通の参照は 1 種のポインタであり、ポインタはどこか他の場所に格納された値への矢印と見なすことができます。リスト 15-6 では、`i32` 値への参照を生成してから参照外し演算子を使ってデータまで参照を辿ります。

ファイル名: `src/main.rs`

```
fn main() {  
    let x = 5;  
    let y = &x;  
  
    assert_eq!(5, x);  
    assert_eq!(5, *y);  
}
```

リスト 15-6: 参照外し演算子を使用して参照を `i32` 値まで追いかける

変数 `x` は `i32` 値の 5 を保持しています。`y` は `x` への参照として設定します。`x` は 5 に等しいとアサートできます。しかしながら、`y` の値に関するアサートを行いたい場合、`*y` を使用して参照が指している値まで追いかける必要があります（そのため**参照外し**です）。一旦 `y` の参照を外せば、`y` が指している整数値にアクセスできます。これは 5 と比較可能です。

代わりに `assert_eq!(5, y);` と書こうとしたら、こんなコンパイルエラーが出るでしょう。

```
error[E0277]: the trait bound `{integer}: std::cmp::PartialEq<&{integer}>` is not satisfied  
(エラー: トレイト境界 `{integer}: std::cmp::PartialEq<&{integer}>` は満たされていません)
```

```
--> src/main.rs:6:5
|
6 |     assert_eq!(5, y);
|     ^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^ can't compare `{integer}` with `&{integer}`
|
= help: the trait `std::cmp::PartialEq<&{integer}>` is not implemented for
`{integer}`
(助言: トレイト `std::cmp::PartialEq<&{integer}>` は `{integer}` に対して実装され
ていません)
```

数値と数値への参照の比較は許されていません。これらは異なる型だからです。参照外し演算子を使用して、参照が指している値まで追いかける必要があります。

15.2.2 Box<T>を参照のように使う

リスト 15-6 のコードを、参照の代わりに Box<T> を使うように書き直すことができます。参照外し演算子は、リスト 15-7 に示したように動くでしょう。

ファイル名: src/main.rs

```
fn main() {
    let x = 5;
    let y = Box::new(x);

    assert_eq!(5, x);
    assert_eq!(5, *y);
}
```

リスト 15-7: Box<i32> に対して参照外し演算子を使用する

リスト 15-7 とリスト 15-6 の唯一の違いは、ここでは y が、x の値を指す参照ではなく、x の値を指すボックスのインスタンスとして設定されている点にあります。最後のアサートでは、参照外し演算子を使ってボックスのポインタを辿ることができます。これは y が参照だった時と同じやり方です。参照外し演算子が使える以上 Box<T> には特別な何かがあるので、次はそれについて調べることにします。そのために、独自にボックス型を定義します。

15.2.3 独自のスマートポインタを定義する

標準ライブラリが提供している Box<T> 型に似たスマートポインタを作りましょう。そうすれば、スマートポインタがそのまま参照と同じ様には振る舞わないことがわかります。それから、どうすれば参照外し演算子を使えるようになるのか見てみましょう。

Box<T> 型は突き詰めると（訳註：データがヒープに置かれることを無視すると）1 要素のタプル構造体のような定義になります。なのでリスト 15-8 ではそのように MyBox<T> 型を定義しています。また、Box<T> に定義された new 関数に対応する new 関数も定義しています。

ファイル名: src/main.rs

```
struct MyBox<T>(T);

impl<T> MyBox<T> {
    fn new(x: T) -> MyBox<T> {
        MyBox(x)
    }
}
```

リスト 15-8: MyBox<T> 型を定義する

MyBox という構造体を定義し、ジェネリック引数の T を宣言しています。この型にどんな型の値も持たせたいからです。MyBox 型は型 T の要素を 1 つ持つタプル構造体です。MyBox::new 関数は型 T の引数を 1 つ取り、渡した値を持つ MyBox のインスタンスを返します。

試しにリスト 15-7 の main 関数をリスト 15-8 に追加し、定義した MyBox<T> 型を Box<T> の代わりに使うよう変更してみてください。コンパイラは MyBox を参照外しする方法がわからないので、リスト 15-9 のコードはコンパイルできません。

ファイル名: src/main.rs

```
fn main() {
    let x = 5;
    let y = MyBox::new(x);

    assert_eq!(5, x);
    assert_eq!(5, *y);
}
```

リスト 15-9: 参照と Box<T> を使ったのと同じように MyBox<T> を使おうとする

こちらが結果として出るコンパイルエラーです。

```
error[E0614]: type `MyBox<{integer}>` cannot be dereferenced
(エラー: 型 `MyBox<{integer}>` は参照外しできません)
--> src/main.rs:14:19
    |
14 |     assert_eq!(5, *y);
    |                   ^^
```

MyBox<T> の参照を外すことはできません。そのための実装を与えていないからです。* 演算子で参照外しできるようにするには、Deref トレイトを実装します。

15.2.4 Deref トレイトを実装して型を参照のように扱う

第 10 章で議論したように、トレイトを実装するにはトレイトの必須メソッドに実装を与える必要があります。Deref トレイトは標準ライブラリで提供されており、deref という 1 つのメソッドの実装を要求します。deref は self を借用し、内部のデータへの参照を返すメソッドです。リスト 15-10 には、MyBox の定義に付け足す Deref の実装が含まれています。

ファイル名: src/main.rs

```
use std::ops::Deref;

# struct MyBox<T>(T);
impl<T> Deref for MyBox<T> {
    type Target = T;

    fn deref(&self) -> &T {
        &self.0
    }
}
```

リスト 15-10: MyBox<T> に Deref を実装する

type Target = T; という記法は、Deref トレイトが使用する関連型を定義しています。関連型はまた少し違ったやり方でジェネリック引数を宣言するためのものですが、今は気にする必要はありません。第 19 章でより詳しく扱います。

deref メソッドの本体は &self.0 だけなので、deref が返すのは私達が `*` 演算子でアクセスしたい値への参照なわけです。リスト 15-9 の MyBox<T> に `*` を呼び出す main 関数はこれでコンパイルでき、アサートも通ります！

Deref トレイトがないと、コンパイラは `&` 参照しか参照外しできません。deref メソッドのおかげで、コンパイラは Deref を実装している型の値を取り、deref メソッドを呼ぶことで、参照外しが可能な `&` 参照を得られるようになります。

リスト 15-9 に `*y` を入力した時、水面下で Rust は実際にはこのようなコードを走らせていました。

```
*(&y.deref())
```

Rust が `*` 演算子を deref メソッドの呼び出しと普通の参照外しへと置き換えてくれるので、私達は deref メソッドを呼び出す必要があるかどうかを考えなくて済むわけです。この Rust の機能により、普通の参照か Deref を実装した型であるかどうかに関わらず、等しく機能するコードを書くことができます。

deref メソッドが値への参照を返し、`*(&y.deref())` のかっこの外にある普通の参照外しがそれでも必要になるのは、所有権システムがあるからです。deref メソッドが値への参照ではなく値を直接

返したら、値は `self` から外にムーブされてしまいます。今回もそうですが、参照外し演算子を使用するときはほとんどの場合、`MyBox<T>` の中の値の所有権を奪いたくはありません。

★ 演算子が `deref` メソッドの呼び出しと ★ 演算子の呼び出しに置き換えられるのは、コード内で ★ を打つ毎にただ 1 回だけ、という点に注意して下さい。★ 演算子の置き換えは無限に繰り返されないで、型 `i32` のデータに行き着きます。これはリスト 15-9 で `assert_eq!` の 5 と合致します。

15.2.5 関数やメソッドで暗黙的な参照外し型強制

参照外し型強制は、コンパイラが関数やメソッドの実引数に行う便利なものです。参照外し型強制は、`Deref` を実装する型への参照を `Deref` が元の型を変換できる型への参照に変換します。参照外し型強制は、特定の型の値への参照を関数やメソッド定義の引数型と一致しない引数として関数やメソッドに渡すときに自動的に発生します。一連の `deref` メソッドの呼び出しが、提供した型を引数が必要とする型に変換します。

参照外し型強制は、関数やメソッド呼び出しを書くプログラマが `&` や ★ を多くの明示的な参照や参照外しとして追記する必要がないように、**Rust** に追加されました。また、参照外し型強制のおかげで参照あるいはスマートポインタのどちらかで動くコードをもっと書くことができます。

参照外し型強制が実際に動いていることを確認するため、リスト 15-8 で定義した `MyBox<T>` と、リスト 15-10 で追加した `Deref` の実装を使用しましょう。リスト 15-11 は、文字列スライス引数のある関数の定義を示しています：

ファイル名: `src/main.rs`

```
fn hello(name: &str) {
    println!("Hello, {}!", name);
}
```

リスト 15-11: 型 `&str` の引数 `name` のある `hello` 関数

`hello` 関数は、文字列スライスを引数として呼び出すことができます。例えば、`hello("Rust")` などです。参照外し型強制により、`hello` を型 `MyBox<String>` の値への参照とともに呼び出すことができます。リスト 15-12 のようにですね：

ファイル名: `src/main.rs`

```
# use std::ops::Deref;
#
# struct MyBox<T>(T);
#
# impl<T> MyBox<T> {
#     fn new(x: T) -> MyBox<T> {
#         MyBox(x)
#     }
# }
```

```
#
# impl<T> Deref for MyBox<T> {
#     type Target = T;
#
#     fn deref(&self) -> &T {
#         &self.0
#     }
# }
#
# fn hello(name: &str) {
#     println!("Hello, {}!", name);
# }
#
fn main() {
    let m = MyBox::new(String::from("Rust"));
    hello(&m);
}
```

リスト 15-12: `hello` を `MyBox<String>` 値とともに呼び出し、参照外し型強制のおかげで動く

ここで、`hello` 関数を引数 `&m` とともに呼び出しています。この引数は、`MyBox<String>` 値への参照です。リスト 15-10 で `MyBox<T>` に `Deref` トレイトを実装したので、コンパイラは `deref` を呼び出すことで、`&MyBox<String>` を `&String` に変換できるのです。標準ライブラリは、`String` に文字列スライスを返す `Deref` の実装を提供していて、この実装は、`Deref` の API ドキュメンテーションに載っています。コンパイラはさらに `deref` を呼び出して、`&String` を `&str` に変換し、これは `hello` 関数の定義と合致します。

`Rust` に参照外し型強制が実装されていなかったら、リスト 15-12 のコードの代わりにリスト 15-13 のコードを書き、型 `&MyBox<String>` の値で `hello` を呼び出さなければならなかったでしょう。

ファイル名: `src/main.rs`

```
# use std::ops::Deref;
#
# struct MyBox<T>(T);
#
# impl<T> MyBox<T> {
#     fn new(x: T) -> MyBox<T> {
#         MyBox(x)
#     }
# }
#
# impl<T> Deref for MyBox<T> {
#     type Target = T;
#
#     fn deref(&self) -> &T {
#         &self.0
#     }
# }
```



```
#
# fn hello(name: &str) {
#     println!("Hello, {}!", name);
# }
#
fn main() {
    let m = MyBox::new(String::from("Rust"));
    hello(&(*m)[..]);
}
```

リスト 15-13: Rust に参照外し型強制がなかった場合に書かなければならないであろうコード

(`*m`) が `MyBox<String>` を `String` に参照外ししています。そして、`&` と `[..]` により、文字列全体と等しい `String` の文字列スライスを取り、`hello` のシグニチャと一致するわけです。参照外し型強制のないコードは、これらの記号が関係するので、読むのも書くのも理解するのもより難しくなります。参照外し型強制により、コンパイラはこれらの変換を自動的に扱えるのです。

`Deref` トレイトが関係する型に定義されていると、コンパイラは、型を分析し必要なだけ `Deref::deref` を使用して、参照を得、引数の型と一致させます。`Deref::deref` が挿入される必要のある回数は、コンパイル時に解決されるので、参照外し型強制を活用するための実行時の代償は何もありません。

15.2.6 参照外し型強制が可変性と相互作用する方法

`Deref` トレイトを使用して不変参照に対して `*` をオーバーライドするように、`DerefMut` トレイトを使用して可変参照の `*` 演算子をオーバーライドできます。

以下の 3 つの場合に型やトレイト実装を見つけた時にコンパイラは、参照外し型強制を行います：

- `T: Deref<Target=U>` の時、`&T` から `&U`
- `T: DerefMut<Target=U>` の時、`&mut T` から `&mut U`
- `T: Deref<Target=U>` の時、`&mut T` から `&U`

前者 2 つは、可変性を除いて一緒です。最初のケースは、`&T` があり、`T` が何らかの型 `U` への `Deref` を実装しているなら、透過的に `&U` を得られると述べています。2 番目のケースは、同じ参照外し型強制が可変参照についても起こることを述べています。

3 番目のケースはもっと巧妙です: Rust はさらに、可変参照を不変参照にも型強制するのです。ですが、逆はできません: 不変参照は、絶対に可変参照に型強制されないのです。借用規則により、可変参照があるなら、その可変参照がそのデータへの唯一の参照に違いありません (でなければ、プログラムはコンパイルできません)。1 つの可変参照を 1 つの不変参照に変換することは、借用規則を絶対に破壊しません。不変参照を可変参照にするには、そのデータへの不変参照がたった 1 つしかないことが必要ですが、借用規則はそれを保証してくれません。故に、不変参照を可変参照に変換することが可能であるという前提を敷けません。

15.3 Drop トレイトで片付け時にコードを走らせる

スマートポインタパターンにとって重要な 2 番目のトレイトは、Drop であり、これのおかげで値がスコープを抜けそうになった時に起こることをカスタマイズできます。どんな型に対しても Drop トレイトの実装を提供することができ、指定したコードは、ファイルやネットワーク接続などのリソースを解放するのに活用できます。Drop をスマートポインタの文脈で導入しています。Drop トレイトの機能は、ほぼ常にスマートポインタを実装する時に使われるからです。例えば、Box<T> は Drop をカスタマイズしてボックスが指しているヒープの領域を解放しています。

ある言語では、プログラマがスマートポインタのインスタンスを使い終わる度にメモリやリソースを解放するコードを呼ばなければなりません。忘れてしまったら、システムは詰め込みすぎになりクラッシュする可能性があります。Rust では、値がスコープを抜ける度に特定のコードが走るよう指定でき、コンパイラはこのコードを自動的に挿入します。結果として、特定の型のインスタンスを使い終わったプログラムの箇所全部にクリーンアップコードを配置するのに配慮する必要はありません。それでもリソースをリークすることはありません。

Drop トレイトを実装することで値がスコープを抜けた時に走るコードを指定してください。Drop トレイトは、self への可変参照を取る drop という 1 つのメソッドを実装する必要があります。いつ Rust が drop を呼ぶのか確認するために、今は println! 文のある drop を実装しましょう。

リスト 15-14 は、唯一の独自の機能が、インスタンスがスコープを抜ける時に Dropping CustomSmartPointer! と出力するだけの、CustomSmartPointer 構造体です。この例は、コンパイラがいつ drop 関数を走らせるかをデモしています。

ファイル名: src/main.rs

```
struct CustomSmartPointer {
    data: String,
}

impl Drop for CustomSmartPointer {
    fn drop(&mut self) {
        // CustomSmartPointerをデータ`{}`とともにドロップするよ
        println!("Dropping CustomSmartPointer with data `{}`!", self.data);
    }
}

fn main() {
    let c = CustomSmartPointer { data: String::from("my stuff") }; // 俺の
    // もの
    let d = CustomSmartPointer { data: String::from("other stuff") }; // 別の
    // もの
    println!("CustomSmartPointers created."); //
    // CustomSmartPointerが生成された
}
```

リスト 15-14: クリーンアップコードを配置する Drop トレイトを実装する CustomSmartPointer 構造体

Drop トレイトは、初期化処理に含まれるので、インポートする必要はありません。CustomSmartPointer に Drop トレイトを実装し、println! を呼び出す drop メソッドの実装を提供しています。drop 関数の本体は、自分の型のインスタンスがスコープを抜ける時に走らせたいあらゆるロジックを配置する場所です。ここで何らかのテキストを出力し、コンパイラがいつ drop を呼ぶのかデモしています。

main で、CustomSmartPointer のインスタンスを 2 つ作り、それから CustomSmartPointers created. と出力しています。main の最後で、CustomSmartPointer のインスタンスはスコープを抜け、コンパイラは最後のメッセージを出力しながら、drop メソッドに置いたコードを呼び出します。drop メソッドを明示的に呼び出す必要はなかったことに注意してください。

このプログラムを実行すると、以下のような出力が出ます:

```
CustomSmartPointers created.  
Dropping CustomSmartPointer with data `other stuff`!  
Dropping CustomSmartPointer with data `my stuff`!
```

インスタンスがスコープを抜けた時に指定したコードを呼び出しながらコンパイラは、drop を自動的に呼び出してくれました。変数は、生成されたのと逆の順序でドロップされるので、d は c より先にドロップされました。この例は、drop メソッドの動き方を見ただけで案内するだけですが、通常は、メッセージ出力ではなく、自分の型が走らせる必要のあるクリーンアップコードを指定するでしょう。

15.3.1 std::mem::drop で早期に値をドロップする

残念ながら、自動的な drop 機能を無効化することは、単純ではありません。通常、drop を無効化する必要はありません; Drop トレイトの最重要な要点は、自動的に考慮されることです。ですが、時として、値を早期に片付けたいという可能性があります。一例は、ロックを管理するスマートポインタを使用する時です: 同じスコープの他のコードがロックを獲得できるように、ロックを解放する drop メソッドを強制的に走らせたいという可能性があります。Rust は、Drop トレイトの drop メソッドを手動で呼ばせてくれませんが; スコープが終わる前に値を強制的にドロップさせたいなら、代わりに標準ライブラリが提供する std::mem::drop 関数を呼ばなければなりません。

リスト 15-14 の main 関数を変更して手動で Drop トレイトの drop メソッドを呼び出そうとしたら、コンパイルエラーになるでしょう。リスト 15-15 のようにですね:

ファイル名: src/main.rs

```
fn main() {  
    let c = CustomSmartPointer { data: String::from("some data") };  
    println!("CustomSmartPointer created.");  
    c.drop();  
}
```

```
// mainの終端の前にCustomSmartPointerがドロップされた
println!("CustomSmartPointer dropped before the end of main.");
}
```

リスト 15-15: Drop トレイトから drop メソッドを手動で呼び出し、早期に片付けようとする

このコードをコンパイルしてみようとする、こんなエラーが出ます:

```
error[E0040]: explicit use of destructor method
(エラー: デストラクタメソッドを明示的に使用しています)
--> src/main.rs:14:7
   |
14 |     c.drop();
   |       ^^^^^ explicit destructor calls not allowed
```

明示的に drop を呼び出すことは許されていないことをこのエラーメッセージは述べています。エラーメッセージは**デストラクタ**という専門用語を使っていて、これは、インスタンスを片付ける関数の一般的なプログラミング専門用語です。**デストラクタ**は、**コンストラクタ**に類似していて、これはインスタンスを生成します。**Rust** の drop 関数は、1 種の特定のデストラクタです。

コンパイラはそれでも、main の終端で値に対して自動的に drop を呼び出すので、drop を明示的に呼ばせてくれません。コンパイラが 2 回同じ値を片付けようとするので、これは**二重解放エラー**になるでしょう。

値がスコープを抜けるときに drop が自動的に挿入されるのを無効化できず、drop メソッドを明示的に呼ぶこともできません。よって、値を早期に片付けさせる必要があるなら、std::mem::drop 関数を使用できます。

std::mem::drop 関数は、Drop トレイトの drop メソッドとは異なります。早期に強制的にドロップさせたい値を引数で渡すことで呼びます。この関数は初期化処理に含まれているので、リスト 15-15 の main を変更して drop 関数を呼び出せます。リスト 15-16 のようにですね:

ファイル名: src/main.rs

```
# struct CustomSmartPointer {
#     data: String,
# }
#
# impl Drop for CustomSmartPointer {
#     fn drop(&mut self) {
#         println!("Dropping CustomSmartPointer!");
#     }
# }
#
fn main() {
    let c = CustomSmartPointer { data: String::from("some data") };
    println!("CustomSmartPointer created.");
    drop(c);
    // CustomSmartPointerはmainが終わる前にドロップされた
```

```
println!("CustomSmartPointer dropped before the end of main.");  
}
```

リスト 15-16: 値がスコープを抜ける前に明示的にドロップするために `std::mem::drop` を呼び出す

このコードを実行すると、以下のように出力されます:

```
CustomSmartPointer created.  
Dropping CustomSmartPointer with data `some data`!  
CustomSmartPointer dropped before the end of main.
```

`Dropping CustomSmartPointer with data `some data`!`というテキストが、`CustomSmartPointer created.` と `CustomSmartPointer dropped before the end of main.` テキストの間に出力されるので、`drop` メソッドのコードがその時点で呼び出されて `c` をドロップしたことを示しています。

`Drop` トレイト実装で指定されたコードをいろんな方法で使用し、片付けを便利で安全にすることができます: 例を挙げれば、これを使用して独自のメモリアロケータを作れるでしょう! `Drop` トレイトと `Rust` の所有権システムがあれば、コンパイラが自動的に行うので、片付けを覚えておく必要はなくなります。

まだ使用中の値を間違えて片付けてしまうことに起因する問題を心配する必要もなくて済みます: 参照が常に有効であると確認してくれる所有権システムが、値が最早使用されなくなった時に `drop` が 1 回だけ呼ばれることを保証してくれるのです。

これで `Box<T>` とスマートポインタの特徴の一部を調査したので、標準ライブラリに定義されている他のスマートポインタをいくつか見ましょう。

15.4 `Rc<T>` は、参照カウント方式のスマートポインタ

大多数の場合、所有権は明らかです: 一体どの変数が与えられた値を所有しているかわかるのです。ところが、単独の値が複数の所有者を持つ可能性のある場合もあります。例えば、グラフデータ構造では、複数の辺が同じノードを指す可能性があり、概念的にそのノードはそれを指す全ての辺に所有されるわけです。指す辺がなくなる限り、ノードは片付けられるべきではありません。

複数の所有権を可能にするため、`Rust` には `Rc<T>` という型があり、これは、**reference counting**(参照カウント)の省略形です。`Rc<T>` 型は、値がまだ使用中かどうか決定する値への参照の数を追跡します。値への参照が 0 なら、どの参照も無効にすることなく、値は片付けられます。

`Rc<T>` を家族部屋のテレビと想像してください。1 人がテレビを見に部屋に入ったら、テレビをつけます。他の人も部屋に入ってテレビを観ることができます。最後の人が部屋を離れる時、もう使用されていないので、テレビを消します。他の人がまだ観ているのに誰かがテレビを消したら、残りのテレビ視聴者が騒ぐでしょう!

ヒープにプログラムの複数箇所で読む何らかのデータを確保したいけれど、コンパイル時にはどの

部分が最後にデータを使用し終わるか決定できない時に `Rc<T>` 型を使用します。どの部分が最後に終わるかわかっているなら、単にその部分をデータの所有者にして、コンパイル時に強制される普通の所有権ルールが効果を発揮するでしょう。

`Rc<T>` は、シングルスレッドの筋書きで使用するためだけのものであることに注意してください。第 16 章で並行性について議論する時に、マルチスレッドプログラムで参照カウントをする方法を講義します。

15.4.1 `Rc<T>` でデータを共有する

リスト 15-5 のコンスリストの例に回帰しましょう。`Box<T>` を使って定義したことを思い出してください。今回は、両方とも 3 番目のリストの所有権を共有する 2 つのリストを作成します。これは概念的には図 15-3 のような見た目になります:

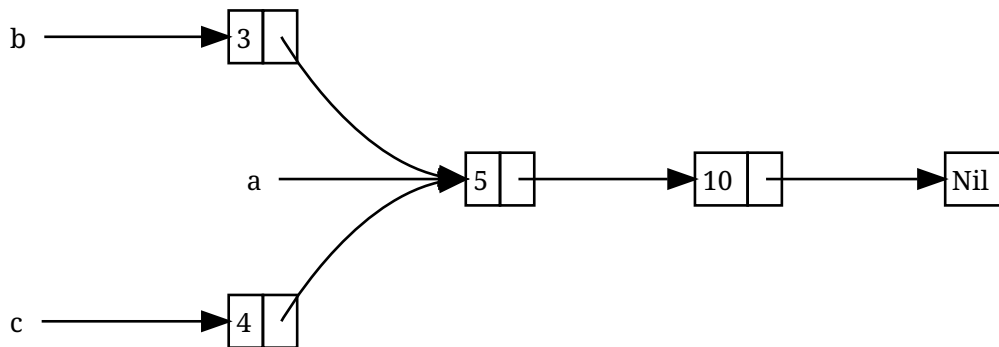


図 15-3: 3 番目のリスト、a の所有権を共有する 2 つのリスト、b と c

5 と 10 を含むリスト a を作ります。さらにもう 2 つリストを作ります: 3 で始まる b と 4 で始まる c です。b と c のどちらもそれから 5 と 10 を含む最初の a リストに続きます。換言すれば、どちらのリストも 5 と 10 を含む最初のリストを共有しています。

`List` の定義を使用して `Box<T>` とともにこの筋書きを実装しようとしても、うまくいきません。リスト 15-17 のようにですね:

ファイル名: `src/main.rs`

```

enum List {
    Cons(i32, Box<List>),
    Nil,
}

use List::{Cons, Nil};

fn main() {

```

```

let a = Cons(5,
    Box::new(Cons(10,
        Box::new(Nil))));
let b = Cons(3, Box::new(a));
let c = Cons(4, Box::new(a));
}

```

リスト 15-17: 3 番目のリストの所有権を共有しようとする `Box<T>` を使った 2 つのリストを存在させることはできないとデモする

このコードをコンパイルすると、こんなエラーが出ます:

```

error[E0382]: use of moved value: `a`
--> src/main.rs:13:30
   |
12 |     let b = Cons(3, Box::new(a));
   |                               - value moved here
13 |     let c = Cons(4, Box::new(a));
   |                               ^ value used here after move
   |
   = note: move occurs because `a` has type `List`, which does not implement
         the `Copy` trait

```

`Cons` 列挙子は、保持しているデータを所有するので、`b` リストを作成する時に、`a` が `b` にムーブされ、`b` が `a` を所有します。それから `c` を作る際に再度 `a` を使用しようすると、`a` はムーブ済みなので、できないわけです。

`Cons` の定義を代わりに参照を保持するように変更することもできますが、そうしたら、ライフタイム引数を指定しなければなりません。ライフタイム引数を指定することで、リストの各要素が最低でもリスト全体と同じ期間だけ生きることが指定することになります。例えば、借用チェッカーは `let a = Cons(10, &Nil);` をコンパイルさせてくれません。一時的な `Nil` 値が、`a` が参照を得られるより前にドロップされてしまうからです。

代わりに、`List` の定義をリスト 15-18 のように、`Box<T>` の箇所に `Rc<T>` を使うように変更します。これで各 `Cons` 列挙子は、値と `List` を指す `Rc<T>` を保持するようになりました。`b` を作る際、`a` の所有権を奪うのではなく、`a` が保持している `Rc<List>` をクローンします。それによって、参照の数が 1 から 2 に増え、`a` と `b` にその `Rc<List>` にあるデータの所有権を共有させます。また、`c` を生成する際にも `a` をクローンするので、参照の数は 2 から 3 になります。`Rc::clone` を呼ぶ度に、`Rc<List>` 内のデータの参照カウントが増え、参照が 0 にならない限りデータは片付けられません。

ファイル名: `src/main.rs`

```

enum List {
    Cons(i32, Rc<List>),
    Nil,
}

```

```

use List::{Cons, Nil};
use std::rc::Rc;

fn main() {
    let a = Rc::new(Cons(5, Rc::new(Cons(10, Rc::new(Nil)))));
    let b = Cons(3, Rc::clone(&a));
    let c = Cons(4, Rc::clone(&a));
}

```

リスト 15-18: Rc<T> を使用する List の定義

初期化処理に含まれていないので、use 文を追加して Rc<T> をスコープに導入する必要があります。main で 5 と 10 を保持するリストを作成し、a の新しい Rc<List> に格納しています。それから、b と c を作成する際に、Rc::clone 関数を呼び出し、引数として a の Rc<List> への参照を渡しています。

Rc::clone(&a) ではなく、a.clone() を呼ぶこともできますが、Rust のしきたりは、この場合 Rc::clone を使うことです。Rc::clone の実装は、多くの型の clone 実装のように、全てのデータのディープコピーをすることではありません。Rc::clone の呼び出しは、参照カウントをインクリメントするだけであり、時間はかかりません。データのディープコピーは時間がかかることもあります。参照カウントに Rc::clone を使うことで、視覚的にディープコピーをする類のクローンと参照カウントを増やす種類のクローンを区別することができます。コード内でパフォーマンスの問題を探す際、ディープコピーのクローンだけを考慮し、Rc::clone の呼び出しを無視できるのです。

15.4.2 Rc<T>をクローンすると、参照カウントが増える

a の Rc<List> への参照を作ったりドロップする毎に参照カウントが変化するのが確かめられるように、リスト 15-18 の動く例を変更しましょう。

リスト 15-19 で、リスト c を囲む内側のスコープができるよう main を変更します; そうすれば、c がスコープを抜けるときに参照カウントがどう変化するか確認できます。

ファイル名: src/main.rs

```

# enum List {
#     Cons(i32, Rc<List>),
#     Nil,
# }
#
# use List::{Cons, Nil};
# use std::rc::Rc;
#
fn main() {
    let a = Rc::new(Cons(5, Rc::new(Cons(10, Rc::new(Nil)))));
    // a生成後のカウント = {}
    println!("count after creating a = {}", Rc::strong_count(&a));
    let b = Cons(3, Rc::clone(&a));
    // b生成後のカウント = {}
}

```



```
println!("count after creating b = {}", Rc::strong_count(&a));
{
    let c = Cons(4, Rc::clone(&a));
    // c生成後のカウント = {}
    println!("count after creating c = {}", Rc::strong_count(&a));
}
// cがスコープを抜けた後のカウント = {}
println!("count after c goes out of scope = {}", Rc::strong_count(&a));
}
```

リスト 15-19: 参照カウントを出力する

プログラム内で参照カウントが変更される度に、参照カウントを出力します。参照カウントは、`Rc::strong_count` 関数を呼び出すことで得られます。`Rc<T>` 型には `weak_count` もあるので、この関数は `count` ではなく `strong_count` と命名されています；`weak_count` の使用目的は、「循環参照を回避する」節で確かめます。

このコードは、以下の出力をします：

```
count after creating a = 1
count after creating b = 2
count after creating c = 3
count after c goes out of scope = 2
```

`a` の `Rc<List>` は最初 **1** という参照カウントであることがわかります；そして、`clone` を呼び出す度に、カウントは **1** ずつ上がります。`c` がスコープを抜けると、カウントは **1** 下がります。参照カウントを増やすのに、`Rc::clone` を呼ばなければいけなかったみたいに参照カウントを減らすのに関数を呼び出す必要はありません：`Rc<T>` 値がスコープを抜けるときに `Drop` トレイトの実装が自動的に参照カウントを減らします。

この例でわからないことは、`b` そして `a` が、`main` の終端でスコープを抜ける時に、カウントが **0** になり、その時点で `Rc<List>` が完全に片付けられることです。`Rc<T>` を使用すると、単独の値に複数の所有者を持たせることができ、所有者のいずれかが存在している限り、値が有効であり続けることをカウントは保証します。

不変参照経由で、`Rc<T>` は読み取り専用プログラムで複数の箇所間でデータを共有させてくれます。`Rc<T>` が複数の可変参照を存在させることも許可してくれたら、第 4 章で議論した借用ルールを 1 つを侵害する虞（おそれ）があります：同じ場所への複数の可変借用は、データ競合や矛盾を引き起こすことがあるのです。しかし、データを可変化する能力はとても有用です！ 次の節では、内部可変性パターンと、`Rc<T>` と絡めて使用してこの不変性制限を手がけられる `RefCell<T>` 型について議論します。

15.5 RefCell<T>と内部可変性パターン

内部可変性は、そのデータへの不変参照がある時でさえもデータを可変化できる Rust のデザインパターンです: 普通、この行動は借用規則により許可されません。データを可変化するために、このパターンは、データ構造内で `unsafe` コードを使用して、可変性と借用を支配する Rust の通常の規則を捻じ曲げています。まだ、`unsafe` コードについては講義していません; 第 19 章で行います。たとえば、コンパイラが保証できなくても、借用規則に実行時に従うことが保証できる時、内部可変性パターンを使用した型を使用できます。関係する `unsafe` コードはそうしたら、安全な API にラップされ、外側の型は、それでも不変です。

内部可変性パターンに従う `RefCell<T>` 型を眺めてこの概念を探究しましょう。

15.5.1 RefCell<T>で実行時に借用規則を強制する

`Rc<T>` と異なり、`RefCell<T>` 型は、保持するデータに対して単独の所有権を表します。では、どうして `RefCell<T>` が `Box<T>` のような型と異なるのでしょうか? 第 4 章で学んだ借用規則を思い出してください:

- いかなる時も (以下の両方ではなく、) 1 つの可変参照かいくつもの不変参照のどちらかが可能になる
- 参照は常に有効でなければならない。

参照と `Box<T>` では、借用規則の不変条件は、コンパイル時に強制されています。`RefCell<T>` では、これらの不変条件は、**実行時に**強制されます。参照でこれらの規則を破ったら、コンパイルエラーになりました。`RefCell<T>` でこれらの規則を破ったら、プログラムはパニックし、終了します。

コンパイル時に借用規則を精査することの利点は、エラーが開発過程の早い段階で捕捉されることと、あらかじめ全ての分析が終わるので、実行パフォーマンスへの影響がないことです。それらの理由により、多くの場合でコンパイル時に借用規則を精査することが最善の選択肢であり、これが Rust の既定になっているのです。

借用規則を実行時に代わりに精査する利点は、コンパイル時の精査では許容されない特定のメモリ安全な筋書きが許容されることです。Rust コンパイラのような静的解析は、本質的に保守的です。コードの特性には、コードを解析するだけでは検知できないものもあります: 最も有名な例は停止性問題であり、この本の範疇を超えていますが、調べると面白い話題です。

不可能な分析もあるので、Rust のコンパイラが、コードが所有権規則に忠実であると確証を得られない場合、正しいプログラムを拒否する可能性があります; このように、保守的なのです。コンパイラが不正なプログラムを受け入れたら、ユーザは、コンパイラが行う保証を信じることはできなくなるでしょう。しかしながら、コンパイラが正当なプログラムを拒否するのなら、プログラマは不便に思うでしょうが、悲劇的なことは何も起こり得ません。コードが借用規則に従っているとプログラマ

は確証を得ているが、コンパイラがそれを理解し保証することができない時に `RefCell<T>` 型は有用です。

`Rc<T>` と類似して、`RefCell<T>` もシングルスレッドの筋書きで使用するためのものであり、試しにマルチスレッドの文脈で使ってみようとする、コンパイルエラーを出します。`RefCell<T>` の機能をマルチスレッドのプログラムで得る方法については、第 16 章で語ります。

こちらに `Box<T>`、`Rc<T>`、`RefCell<T>` を選択する理由を要約しておきます:

- `Rc<T>` は、同じデータに複数の所有者を持たせてくれる; `Box<T>` と `RefCell<T>` は単独の所有者。
- `Box<T>` では、不変借用も可変借用もコンパイル時に精査できる; `Rc<T>` では不変借用のみがコンパイル時に精査できる; `RefCell<T>` では、不変借用も可変借用も実行時に精査される。
- `RefCell<T>` は実行時に精査される可変借用を許可するので、`RefCell<T>` が不変でも、`RefCell<T>` 内の値を可変化できる。

不変な値の中の値を可変化することは、**内部可変性**パターンです。内部可変性が有用になる場面を見て、それが可能になる方法を調査しましょう。

15.5.2 内部可変性: 不変値への可変借用

借用規則の結果は、不変値がある時、可変で借用することはできないということです。例えば、このコードはコンパイルできません:

```
fn main() {  
    let x = 5;  
    let y = &mut x;  
}
```

このコードをコンパイルしようとしたら、以下のようなエラーが出るでしょう:

```
error[E0596]: cannot borrow immutable local variable `x` as mutable  
(エラー: 不変なローカル変数`x`を可変で借用することはできません)  
--> src/main.rs:3:18  
  |  
2 |     let x = 5;  
  |         - consider changing this to `mut x`  
3 |     let y = &mut x;  
  |               ^ cannot borrow mutably
```

ですが、メソッド内で値が自身を可変化するけれども、他のコードにとっては、不変に見えることが有用な場面もあります。その値のメソッドの外のコードは、その値を可変化することはできないでしょう。`RefCell<T>` を使うことは、内部可変性を取得する能力を得る 1 つの方法です。しかし、`RefCell<T>` は借用規則を完全に回避するものではありません: コンパイラの借用チェッカーは、内部可変性を許可し、借用規則は代わりに実行時に精査されます。この規則を侵害したら、コンパイルエ

ラーではなく panic! になるでしょう。

RefCell<T> を使用して不変値を可変化する実践的な例に取り組み、それが役に立つ理由を確認しましょう。

15.5.2.1 内部可変性のユースケース: モックオブジェクト

テストダブルは、テスト中に別の型の代わりに使用される型の一般的なプログラミングの概念です。**モックオブジェクト**は、テスト中に起きることを記録するテストダブルの特定の型なので、正しい動作が起きたことをアサートできます。

編注：テストダブルとは、ソフトウェアテストにおいて、テスト対象が依存しているコンポーネントを置き換える代用品のこと。

Rust には、他の言語でいうオブジェクトは存在せず、また、他の言語のように標準ライブラリにモックオブジェクトの機能が組み込まれてもいません。ですが、同じ目的をモックオブジェクトとして提供する構造体を作成することは確実にできます。

以下が、テストを行う筋書きです：値を最大値に対して追跡し、現在値がどれくらい最大値に近いかに基づいてメッセージを送信するライブラリを作成します。このライブラリは、ユーザが行うことのできる API コールの数の割り当てを追跡するのに使用することができます。

作成するライブラリは、値がどれくらい最大に近いかと、いつどんなメッセージになるべきかを追いかける機能を提供するだけです。このライブラリを使用するアプリケーションは、メッセージを送信する機構を提供すると期待されるでしょう：アプリケーションは、アプリケーションにメッセージを置いたり、メールを送ったり、テキストメッセージを送るなどできるでしょう。ライブラリはその詳細を知る必要はありません。必要なのは、提供する Messenger と呼ばれるトレイトを実装している何かなのです。リスト 15-20 は、ライブラリのコードを示しています：

ファイル名: src/lib.rs

```
pub trait Messenger {
    fn send(&self, msg: &str);
}

pub struct LimitTracker<'a, T: 'a + Messenger> {
    messenger: &'a T,
    value: usize,
    max: usize,
}

impl<'a, T> LimitTracker<'a, T>
    where T: Messenger {
    pub fn new(messenger: &T, max: usize) -> LimitTracker<T> {
        LimitTracker {
            messenger,
            value: 0,
            max,
        }
    }
}
```

```

    }
}

pub fn set_value(&mut self, value: usize) {
    self.value = value;

    let percentage_of_max = self.value as f64 / self.max as f64;

    if percentage_of_max >= 0.75 && percentage_of_max < 0.9 {
        // 警告: 割り当ての75%以上を使用してしまいました
        self.messenger.send("Warning: You've used up over 75% of your quota!");
    } else if percentage_of_max >= 0.9 && percentage_of_max < 1.0 {
        // 切迫した警告: 割り当ての90%以上を使用してしまいました
        self.messenger.send("Urgent warning: You've used up over 90% of your quota!");
    } else if percentage_of_max >= 1.0 {
        // エラー: 割り当てを超えています
        self.messenger.send("Error: You are over your quota!");
    }
}
}

```

リスト 15-20: 値が最大値にどれくらい近いかを追跡し、特定のレベルの時に警告するライブラリ

このコードの重要な部分の 1 つは、Messenger トレイトには、self への不変参照とメッセージのテキストを取る send というメソッドが 1 つあることです。これが、モックオブジェクトが持つ必要のあるインターフェイスなのです。もう 1 つの重要な部分は、LimitTracker の set_value メソッドの振る舞いをテストしたいということです。value 引数に渡すものを変えることができますが、set_value はアサートを行えるものは何も返してくれません。LimitTracker を Messenger トレイトを実装する何かと、max の特定の値で生成したら、value に異なる数値を渡した時にメッセージャーは適切なメッセージを送ると指示されると言えるようになります。

send を呼び出す時にメールやテキストメッセージを送る代わりに送ると指示されたメッセージを追跡するだけのモックオブジェクトが必要です。モックオブジェクトの新規インスタンスを生成し、モックオブジェクトを使用する LimitTracker を生成し、LimitTracker の set_value を呼び出し、それからモックオブジェクトに期待しているメッセージがあることを確認できます。リスト 15-21 は、それだけをするモックオブジェクトを実装しようとするところを示しますが、借用チェッカーが許可してくれません:

ファイル名: src/lib.rs

```

#[cfg(test)]
mod tests {
    use super::*;

    struct MockMessenger {

```

```

        sent_messages: Vec<String>,
    }

    impl MockMessenger {
        fn new() -> MockMessenger {
            MockMessenger { sent_messages: vec![] }
        }
    }

    impl Messenger for MockMessenger {
        fn send(&self, message: &str) {
            self.sent_messages.push(String::from(message));
        }
    }

    #[test]
    fn it_sends_an_over_75_percent_warning_message() {
        let mock_messenger = MockMessenger::new();
        let mut limit_tracker = LimitTracker::new(&mock_messenger, 100);

        limit_tracker.set_value(80);

        assert_eq!(mock_messenger.sent_messages.len(), 1);
    }
}

```

リスト 15-21: 借用チェッカーが許可してくれない MockMessenger を実装しようとする

このテストコードは String の Vec で送信すると指示されたメッセージを追跡する sent_messages フィールドのある MockMessenger 構造体を定義しています。また、空のメッセージリストから始まる新しい MockMessenger 値を作るのを便利にしてくれる関連関数の new も定義しています。それから MockMessenger に Messenger トレイトを実装しているので、LimitTracker に MockMessenger を与えられます。send メソッドの定義で引数として渡されたメッセージを取り、sent_messages の MockMessenger リストに格納しています。

テストでは、max 値の 75% 以上になる何かに value をセットしろと LimitTracker が指示される時に起きることをテストしています。まず、新しい MockMessenger を生成し、空のメッセージリストから始まります。そして、新しい LimitTracker を生成し、新しい MockMessenger の参照と 100 という max 値を与えます。LimitTracker の set_value メソッドは 80 という値で呼び出し、これは 100 の 75% を上回っています。そして、MockMessenger が追いかけているメッセージのリストが、今は 1 つのメッセージを含んでいるはずとアサートします。

ところが、以下のようにこのテストには 1 つ問題があります:

```

error[E0596]: cannot borrow immutable field `self.sent_messages` as mutable
(エラー: 不変なフィールド`self.sent_messages`を可変で借用できません)
--> src/lib.rs:52:13
|

```

```

51 |         fn send(&self, message: &str) {
    |             ----- use `&mut self` here to make mutable
52 |             self.sent_messages.push(String::from(message));
    |             ^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^ cannot mutably borrow immutable field

```

send メソッドは self への不変参照を取るなので、MockMessenger を変更してメッセージを追跡できないのです。代わりに &mut self を使用するというエラーテキストからの提言を選ぶこともできないのです。そうしたら、send のシグニチャが、Messenger トレイト定義のシグニチャと一致しなくなるからです (気軽に試してエラーメッセージを確認してください)。

これは、内部可変性が役に立つ場面なのです！ sent_messages を RefCell<T> 内部に格納し、そうしたら send メッセージは、sent_messages を変更して見かけたメッセージを格納できるようになるでしょう。リスト 15-22 は、それがどんな感じかを示しています：

ファイル名: src/lib.rs

```

#[cfg(test)]
mod tests {
    use super::*;
    use std::cell::RefCell;

    struct MockMessenger {
        sent_messages: RefCell<Vec<String>>,
    }

    impl MockMessenger {
        fn new() -> MockMessenger {
            MockMessenger { sent_messages: RefCell::new(vec![]) }
        }
    }

    impl Messenger for MockMessenger {
        fn send(&self, message: &str) {
            self.sent_messages.borrow_mut().push(String::from(message));
        }
    }

    #[test]
    fn it_sends_an_over_75_percent_warning_message() {
        // --snip--
        # let mock_messenger = MockMessenger::new();
        # let mut limit_tracker = LimitTracker::new(&mock_messenger, 100);
        # limit_tracker.set_value(75);

        assert_eq!(mock_messenger.sent_messages.borrow().len(), 1);
    }
}

```

リスト 15-22: 外側の値は不変と考えられる一方で RefCell<T> で内部の値を可変化する

さて、`sent_messages` フィールドは、`Vec<String>` ではなく、型 `RefCell<Vec<String>>` になりました。new 関数で、空のベクタの周りに `RefCell<Vec<String>>` を新しく作成しています。

`send` メソッドの実装については、最初の引数はそれでも `self` への不変借用で、トレイト定義と合致しています。`RefCell<Vec<String>>` の `borrow_mut` を `self.sent_messages` に呼び出し、`RefCell<Vec<String>>` の中の値への可変参照を得て、これはベクタになります。それからベクタへの可変参照に `push` を呼び出して、テスト中に送られるメッセージを追跡しています。

行わなければならない最後の変更は、アサート内部にあります: 内部のベクタにある要素の数を確認するため、`RefCell<Vec<String>>` に `borrow` を呼び出し、ベクタへの不変参照を得ています。

`RefCell<T>` の使用法を見かけたので、動作の仕方を深掘りしましょう！

15.5.2.2 `RefCell<T>` で実行時に借用を追いかける

不変および可変参照を作成する時、それぞれ `&` と `&mut` 記法を使用します。`RefCell<T>` では、`borrow` と `borrow_mut` メソッドを使用し、これらは `RefCell<T>` に所属する安全な API の一部です。`borrow` メソッドは、スマートポインタ型の `Ref<T>` を返し、`borrow_mut` はスマートポインタ型の `RefMut<T>` を返します。どちらの型も `Deref` を実装しているので、普通の参照のように扱うことができます。

`RefCell<T>` は、現在活動中の `Ref<T>` と `RefMut<T>` スマートポインタの数を追いかけます。`borrow` を呼び出す度に、`RefCell<T>` は活動中の不変参照の数を増やします。`Ref<T>` の値がスコープを抜けたら、不変参照の数は 1 下がります。コンパイル時の借用規則と全く同じように、`RefCell<T>` はいかなる時も、複数の不変借用または 1 つの可変借用を持たせてくれるのです。

これらの規則を侵害しようとするれば、参照のようにコンパイルエラーになるのではなく、`RefCell<T>` の実装は実行時にパニックするでしょう。リスト 15-23 は、リスト 15-22 の `send` 実装に対する変更を示しています。同じスコープで 2 つの可変借用が活動するようわざと生成し、`RefCell<T>` が実行時にこれをするのを阻止してくれるところを説明しています。

ファイル名: `src/lib.rs`

```
impl Messenger for MockMessenger {
    fn send(&self, message: &str) {
        let mut one_borrow = self.sent_messages.borrow_mut();
        let mut two_borrow = self.sent_messages.borrow_mut();

        one_borrow.push(String::from(message));
        two_borrow.push(String::from(message));
    }
}
```

リスト 15-23: 同じスコープで 2 つの可変参照を生成して `RefCell<T>` がパニックすることを確認する

`borrow_mut` から返ってきた `RefMut<T>` スマートポインタに対して変数 `one_borrow` を生成しています。そして、同様にして変数 `two_borrow` にも別の可変借用を生成しています。これにより同じス

コードで 2 つの可変参照ができ、これは許可されないことです。このテストを自分のライブラリ用に走らせると、リスト 15-23 のコードはエラーなくコンパイルできますが、テストは失敗するでしょう：

```
---- tests::it_sends_an_over_75_percent_warning_message stdout ----
    thread 'tests::it_sends_an_over_75_percent_warning_message' panicked at
    'already borrowed: BorrowMutError', src/libcore/result.rs:906:4
    (スレッド 'tests::it_sends_an_over_75_percent_warning_message' は、
    'すでに借用されています: BorrowMutError', src/libcore/result.rs:906:4 でパニック
    しました)
note: Run with `RUST_BACKTRACE=1` for a backtrace.
```

コードは、`already borrowed: BorrowMutError` というメッセージとともにパニックしたことに注目してください。このようにして `RefCell<T>` は実行時に借用規則の侵害を扱うのです。

コンパイル時ではなく実行時に借用エラーをキャッチするということは、開発過程の遅い段階でコードのミスを発見し、コードをプロダクションにデプロイする時まで発見しない可能性もあることを意味します。また、コンパイル時ではなく、実行時に借用を迫りかける結果として、少し実行時にパフォーマンスを犠牲にするでしょう。しかしながら、`RefCell<T>` を使うことで、不変値のみが許可される文脈で使用しつつ、自身を変更して見かけたメッセージを追跡するモックオブジェクトを書くことが可能になります。代償はありますが、`RefCell<T>` を使用すれば、普通の参照よりも多くの機能を得ることができるわけです。

15.5.3 `Rc<T>` と `RefCell<T>` を組み合わせることで可変なデータに複数の所有者を持たせる

`RefCell<T>` の一般的な使用法は、`Rc<T>` と組み合わせることにあります。`Rc<T>` は何らかのデータに複数の所有者を持たせてくれるけれども、そのデータに不変のアクセスしかさせてくれないことを思い出してください。`RefCell<T>` を抱える `Rc<T>` があれば、複数の所有者を持ちそして、可変化できる値を得ることができるのです。

例を挙げれば、`Rc<T>` を使用して複数のリストに別のリストの所有権を共有させたリスト 15-18 のコンスリストの例を思い出してください。`Rc<T>` は不変値だけを抱えるので、一旦生成したら、リストの値はどれも変更できません。`RefCell<T>` を含めて、リストの値を変更する能力を得ましょう。`RefCell<T>` を `Cons` 定義で使用することで、リスト全体に格納されている値を変更できることをリスト 15-24 は示しています：

ファイル名: `src/main.rs`

```
[derive(Debug)]
enum List {
    Cons(Rc<RefCell<i32>>, Rc<List>),
    Nil,
}

use List::{Cons, Nil};
```

```

use std::rc::Rc;
use std::cell::RefCell;

fn main() {
    let value = Rc::new(RefCell::new(5));

    let a = Rc::new(Cons(Rc::clone(&value), Rc::new(Nil)));

    let b = Cons(Rc::new(RefCell::new(6)), Rc::clone(&a));
    let c = Cons(Rc::new(RefCell::new(10)), Rc::clone(&a));

    *value.borrow_mut() += 10;

    println!("a after = {:?}", a);
    println!("b after = {:?}", b);
    println!("c after = {:?}", c);
}

```

リスト 15-24: Rc<RefCell<i32>> で可変化できる List を生成する

Rc<RefCell<i32>> のインスタンスの値を生成し、value という名前の変数に格納しているので、直接後ほどアクセスすることができます。そして、a に value を持つ Cons 列挙子で List を生成しています。value から a に所有権を移したり、a が value から借用するのではなく、a と value どちらにも中の 5 の値の所有権を持たせるよう、value をクローンする必要があります。

リスト a を Rc<T> に包んでいるので、リスト b と c を生成する時に、どちらも a を参照できます。リスト 15-18 ではそうしていました。

a、b、c のリストを作成した後、value の値に 10 を足しています。これを value の borrow_mut を呼び出すことで行い、これは、第 5 章で議論した自動参照外し機能（「-> 演算子はどこに行ったの？」節をご覧ください）を使用して、Rc<T> を内部の RefCell<T> 値に参照外ししています。borrow_mut メソッドは、RefMut<T> スマートポインタを返し、それに対して参照外し演算子を使用し、中の値を変更します。

a、b、c を出力すると、全て 5 ではなく、変更された 15 という値になっていることがわかります。

```

a after = Cons(RefCell { value: 15 }, Nil)
b after = Cons(RefCell { value: 6 }, Cons(RefCell { value: 15 }, Nil))
c after = Cons(RefCell { value: 10 }, Cons(RefCell { value: 15 }, Nil))

```

このテクニックは非常に綺麗です！RefCell<T> を使用することで表面上は不変な List 値を持てます。しかし、内部可変性へのアクセスを提供する RefCell<T> のメソッドを使用できるので、必要な時にはデータを変更できます。借用規則を実行時に精査することでデータ競合を防ぎ、時としてデータ構造でちょっとのスピードを犠牲にこの柔軟性を得るのは価値があります。

標準ライブラリには、Cell<T> などの内部可変性を提供する他の型もあり、この型は、内部値への参照を与える代わりに、値は Cell<T> の内部や外部へコピーされる点を除き似ています。また Mutex<T> もあり、これはスレッド間で使用するのが安全な内部可変性を提供します；第 16 章でその使いみちに

ついて議論しましょう。これらの型の違いをより詳しく知るには、標準ライブラリのドキュメンテーションをチェックしてください。

15.6 循環参照は、メモリをリークすることもある

Rust のメモリ安全保証により誤って絶対に片付けられることのないメモリ (メモリリークとして知られています) を生成してしまいにくくなりますが、不可能にはなりません。コンパイル時にデータ競合を防ぐのと同じようにメモリリークを完全に回避することは、Rust の保証の一つではなく、メモリリークは Rust においてはメモリ安全であることを意味します。Rust では、`Rc<T>` と `RefCell<T>` を使用してメモリリークを許可するとわかります: 要素がお互いに循環して参照する参照を生成することも可能ということです。循環の各要素の参照カウントが絶対に 0 にならないので、これはメモリリークを起こし、値は絶対にドロップされません。

15.6.1 循環参照させる

リスト 15-25 の `List enum` の定義と `tail` メソッドから始めて、どう循環参照が起こる可能性があるのかとその回避策を見ましょう:

ファイル名: `src/main.rs`

```
# fn main() {}
use std::rc::Rc;
use std::cell::RefCell;
use List::{Cons, Nil};

#[derive(Debug)]
enum List {
    Cons(i32, RefCell<Rc<List>>),
    Nil,
}

impl List {
    fn tail(&self) -> Option<&RefCell<Rc<List>>> {
        match *self {
            Cons(_, ref item) => Some(item),
            Nil => None,
        }
    }
}
```

リスト 15-25: `Cons` 列挙子が参照しているものを変更できるように `RefCell<T>` を抱えているコンスリストの定義

リスト 15-5 の `List` 定義の別バリエーションを使用しています。 `Cons` 列挙子の 2 番目の要素はこ

れで `RefCell<Rc<List>>` になり、リスト 15-24 のように `i32` 値を変更する能力があるのではなく、`Cons` 列挙子が指している `List` 値の先を変えたいということです。また、`tail` メソッドを追加して `Cons` 列挙子があるときに 2 番目の要素にアクセスするのが便利になるようにしています。

リスト 15-26 でリスト 15-25 の定義を使用する `main` 関数を追加しています。このコードは、`a` にリストを、`b` に `a` のリストを指すリストを作成します。それから `a` のリストを変更して `b` を指し、循環参照させます。その流れの中に過程のいろんな場所での参照カウントを示す `println!` 文が存在しています。

ファイル名: `src/main.rs`

```
# use List::{Cons, Nil};
# use std::rc::Rc;
# use std::cell::RefCell;
# #[derive(Debug)]
# enum List {
#     Cons(i32, RefCell<Rc<List>>),
#     Nil,
# }
#
# impl List {
#     fn tail(&self) -> Option<&RefCell<Rc<List>>> {
#         match *self {
#             Cons(_, ref item) => Some(item),
#             Nil => None,
#         }
#     }
# }
#
fn main() {
    let a = Rc::new(Cons(5, RefCell::new(Rc::new(Nil))));

    // aの最初の参照カウント = {}
    println!("a initial rc count = {}", Rc::strong_count(&a));
    // aの次の要素は = {:?}
    println!("a next item = {:?}", a.tail());

    let b = Rc::new(Cons(10, RefCell::new(Rc::clone(&a))));

    // b作成後のaの参照カウント = {}
    println!("a rc count after b creation = {}", Rc::strong_count(&a));
    // bの最初の参照カウント = {}
    println!("b initial rc count = {}", Rc::strong_count(&b));
    // bの次の要素 = {:?}
    println!("b next item = {:?}", b.tail());

    if let Some(link) = a.tail() {
        *link.borrow_mut() = Rc::clone(&b);
    }

    // aを変更後のbの参照カウント = {}
}
```

```
println!("b rc count after changing a = {}", Rc::strong_count(&b));
// aを変更後のaの参照カウント = {}
println!("a rc count after changing a = {}", Rc::strong_count(&a));

// Uncomment the next line to see that we have a cycle;
// it will overflow the stack
// 次の行のコメントを外して循環していると確認してください; スタックオーバーフローします
// println!("a next item = {:?}", a.tail());           // aの次の要素 = {:?}
}
```

リスト 15-26: 2 つの List 値がお互いを指して循環参照する

最初のリストが 5, Nil の List 値を保持する Rc<List> インスタンスを変数 a に生成します。そして、値 10 と a のリストを指す別の List 値を保持する Rc<List> インスタンスを変数 b に生成します。

a が Nil ではなく b を指すように変更して、循環させます。tail メソッドを使用して、a の RefCell<Rc<List>> への参照を得ることで循環させて、この参照は変数 link に配置します。それから RefCell<Rc<List>> の borrow_mut メソッドを使用して中の値を Nil 値を持つ Rc<List> から、b の Rc<List> に変更します。

最後の println! を今だけコメントアウトしたまま、このコードを実行すると、こんな出力が得られます:

```
a initial rc count = 1
a next item = Some(RefCell { value: Nil })
a rc count after b creation = 2
b initial rc count = 1
b next item = Some(RefCell { value: Cons(5, RefCell { value: Nil }) })
b rc count after changing a = 2
a rc count after changing a = 2
```

a のリストを b を指すように変更した後の a と b の Rc<List> インスタンスの参照カウントは 2 です。main の終端で、コンパイラはまず b をドロップしようとし、a と b の各 Rc<List> インスタンスのカウントを 1 減らします。

しかしながら、それでも a は b にあった Rc<List> を参照しているので、その Rc<List> のカウントは 0 ではなく 1 になり、その Rc<List> がヒープに確保していたメモリはドロップされません。メモリはただ、カウント 1 のままそこに永遠に居座るのです。この循環参照を可視化するために、図 15-4 に図式を作成しました:

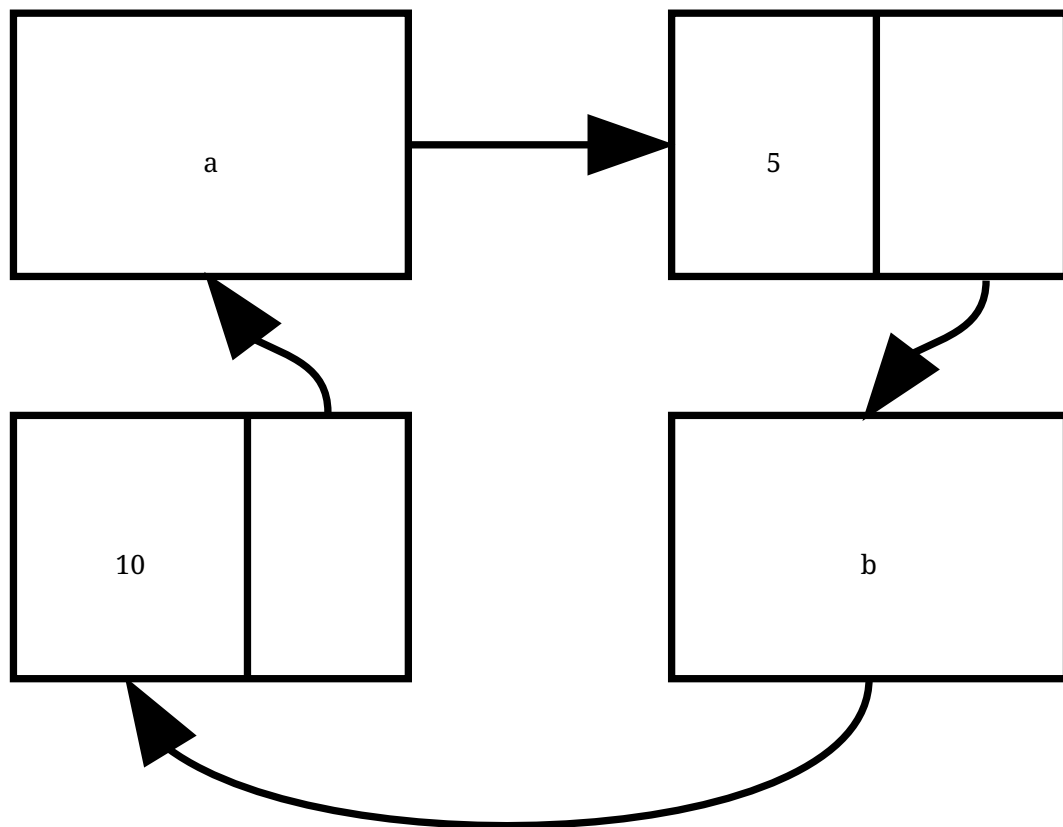


図 15-4: お互いを指すリスト a と b の循環参照

最後の `println!` のコメントを外してプログラムを実行したら、a が b を指して、b が a を指してと、スタックがオーバーフローするまでコンパイラはこの循環を出力しようとするでしょう。

この場合、循環参照を作る直後にプログラムは終了します。この循環の結果は、それほど悲壮なものではありません。しかしながら、より複雑なプログラムが多くのメモリを循環で確保し長い間その状態を保ったら、プログラムは必要以上のメモリを使用し、使用可能なメモリを枯渇させてシステムを参らせてしまう可能性があります。

循環参照は簡単にできることはありませんが、不可能というわけでもありません。Rc<T> 値を含む `RefCell<T>` 値があるなどの内部可変性と参照カウントのある型がネストして組み合わさっていたら、循環していないことを保証しなければなりません; コンパイラがそれを捕捉することを信頼できないのです。循環参照をするのは、自動テストやコードレビューなどの他のソフトウェア開発手段を使用して最小化すべきプログラム上のロジックバグでしょう。

循環参照を回避する別の解決策は、ある参照は所有権を表現して他の参照はしないというようにデータ構造を再構成することです。結果として、所有権のある関係と所有権のない関係からなる循環ができ、所有権のある関係だけが、値がドロップされうるかどうかに影響します。リスト 15-25 で

は、常に Cons 列挙子にリストを所有してほしいので、データ構造を再構成することはできません。親ノードと子ノードからなるグラフを使った例に目を向けて、どんな時に所有権のない関係が循環参照を回避するのに適切な方法になるか確認しましょう。

15.6.2 循環参照を回避する: Rc<T>を Weak<T>に変換する

ここまで、`Rc::clone` を呼び出すと `Rc<T>` インスタンスの `strong_count` が増えることと、`strong_count` が 0 になった時に `Rc<T>` インスタンスは片付けられることをデモしてきました。`Rc::downgrade` を呼び出し、`Rc<T>` への参照を渡すことで、`Rc<T>` インスタンス内部の値への弱い参照 (weak reference) を作ることもできます。`Rc::downgrade` を呼び出すと、型 `Weak<T>` のスマートポインタが得られます。`Rc<T>` インスタンスの `strong_count` を 1 増やす代わりに、`Rc::downgrade` を呼び出すと、`weak_count` が 1 増えます。`strong_count` 同様、`Rc<T>` 型は `weak_count` を使用して、幾つの `Weak<T>` 参照が存在しているかを追跡します。違いは、`Rc<T>` が片付けられるのに、`weak_count` が 0 である必要はないということです。

強い参照は、`Rc<T>` インスタンスの所有権を共有する方法です。弱い参照は、所有権関係を表現しません。ひとたび、関係する値の強い参照カウントが 0 になれば、弱い参照に関わる循環はなんでも破壊されるので、循環参照にはなりません。

`Weak<T>` が参照する値はドロップされてしまっている可能性があるので、`Weak<T>` が指す値に何かをするには、値がまだ存在することを確認しなければなりません。`Weak<T>` の `upgrade` メソッドを呼び出すことでこれをしてください。このメソッドは `Option<Rc<T>>` を返します。`Rc<T>` 値がまだドロップされていなければ、`Some` の結果が、`Rc<T>` 値がドロップ済みなら、`None` の結果が得られます。`upgrade` が `Option<T>` を返すので、コンパイラは、`Some` ケースと `None` ケースが扱われていることを確かめてくれ、無効なポインタは存在しません。

例として、要素が次の要素を知っているだけのリストを使うのではなく、要素が子要素と親要素を知っている木を作りましょう。

15.6.2.1 木データ構造を作る: 子ノードのある Node

手始めに子ノードを知っているノードのある木を構成します。独自の `i32` 値と子供の `Node` 値への参照を抱える `Node` という構造体を作ります:

ファイル名: `src/main.rs`

```
use std::rc::Rc;
use std::cell::RefCell;

#[derive(Debug)]
struct Node {
    value: i32,
    children: RefCell<Vec<Rc<Node>>>,
}
```

Node に子供を所有してほしく、木の各 Node に直接アクセスできるよう、その所有権を変数と共有したいです。こうするために、Vec<T> 要素を型 Rc<Node> の値になるよう定義しています。どのノードが他のノードの子供になるかも変更したいので、Vec<Rc<Node>> の周りの children を RefCell<T> にしています。

次にこの構造体定義を使って値 3 と子供なしの leaf という 1 つの Node インスタンスと、値 5 と leaf を子要素の一つとして持つ branch という別のインスタンスを作成します。リスト 15-27 のようにですね:

ファイル名: src/main.rs

```
# use std::rc::Rc;
# use std::cell::RefCell;
#
# #[derive(Debug)]
# struct Node {
#     value: i32,
#     children: RefCell<Vec<Rc<Node>>>,
# }
#
fn main() {
    let leaf = Rc::new(Node {
        value: 3,
        children: RefCell::new(vec![]),
    });

    let branch = Rc::new(Node {
        value: 5,
        children: RefCell::new(vec![Rc::clone(&leaf)]),
    });
}
```

リスト 15-27: 子供なしの leaf ノードと leaf を子要素に持つ branch ノードを作る

leaf の Rc<Node> をクローンし、branch に格納しているので、leaf の Node は leaf と branch という 2 つの所有者を持つことになります。branch.children を通して branch から leaf へ辿ることはできるものの、leaf から branch へ辿る方法はありません。理由は、leaf には branch への参照がなく、関係していることを知らないからです。leaf に branch が親であることを知ってほしいです。次はそれを行います。

15.6.2.2 子供から親に参照を追加する

子供に親の存在を気付かせるために、Node 構造体定義に parent フィールドを追加する必要があります。parent の型を決める際に困ったことになります。Rc<T> を含むことができないのはわかります。そうしたら、leaf.parent が branch を指し、branch.children が leaf を指して循環参照になり、

strong_count 値が絶対に 0 にならなくなってしまうからです。

この関係を別の方法で捉えると、親ノードは子供を所有すべきです: 親ノードがドロップされたら、子ノードもドロップされるべきなのです。ですが、子供は親を所有するべきではありません: 子ノードをドロップしても、親はまだ存在するべきです。弱い参照を使う場面ですね!

従って、Rc<T> の代わりに parent の型を Weak<T> を使ったもの、具体的には RefCell<Weak<Node>> にします。さあ、Node 構造体定義はこんな見た目になりました:

ファイル名: src/main.rs

```
use std::rc::{Rc, Weak};
use std::cell::RefCell;

#[derive(Debug)]
struct Node {
    value: i32,
    parent: RefCell<Weak<Node>>,
    children: RefCell<Vec<Rc<Node>>>,
}
```

ノードは親ノードを参照できるものの、所有はしないでしょう。リスト 15-28 で、leaf ノードが親の branch を参照できるよう、この新しい定義を使用するように main を更新します:

ファイル名: src/main.rs

```
# use std::rc::{Rc, Weak};
# use std::cell::RefCell;
#
# #[derive(Debug)]
# struct Node {
#     value: i32,
#     parent: RefCell<Weak<Node>>,
#     children: RefCell<Vec<Rc<Node>>>,
# }
#
fn main() {
    let leaf = Rc::new(Node {
        value: 3,
        parent: RefCell::new(Weak::new()),
        children: RefCell::new(vec![]),
    });

    // leafの親 = {:?}
    println!("leaf parent = {:?}", leaf.parent.borrow().upgrade());

    let branch = Rc::new(Node {
        value: 5,
        parent: RefCell::new(Weak::new()),
        children: RefCell::new(vec![Rc::clone(&leaf)]),
    });
```

```

    *leaf.parent.borrow_mut() = Rc::downgrade(&branch);

    println!("leaf parent = {:?}", leaf.parent.borrow().upgrade());
}

```

リスト 15-28: 親ノードの branch への弱い参照がある leaf ノード

leaf ノードを作成することは、parent フィールドの例外を除いてリスト 15-27 での leaf ノードの作成法の見た目に似ています: leaf は親なしで始まるので、新しく空の `Weak<Node>` 参照インスタンスを作ります。

この時点で `upgrade` メソッドを使用して leaf の親への参照を得ようとする、`None` 値になります。このことは、最初の `println!` 文の出力でわかります:

```
leaf parent = None
```

branch ノードを作る際、branch には親ノードがないので、こちらも parent フィールドには新しい `Weak<Node>` 参照が入ります。それでも、leaf は branch の子供になっています。一旦 branch に `Node` インスタンスができたなら、leaf を変更して親への `Weak<Node>` 参照を与えることができます。leaf の parent フィールドには、`RefCell<Weak<Node>>` の `borrow_mut` メソッドを使用して、それから `Rc::downgrade` 関数を使用して、branch の `Rc<Node>` から branch への `Weak<Node>` 参照を作ります。

再度 leaf の親を出力すると、今度は branch を保持する `Some` 列挙子が得られます: これで leaf が親にアクセスできるようになったのです! leaf を出力すると、リスト 15-26 で起こっていたような最終的にスタックオーバーフローに行き着く循環を避けることもできます; `Weak<Node>` 参照は、(Weak) と出力されます:

```

leaf parent = Some(Node { value: 5, parent: RefCell { value: (Weak) },
children: RefCell { value: [Node { value: 3, parent: RefCell { value: (Weak) },
children: RefCell { value: [] } } ] } })

```

無限の出力が欠けているということは、このコードは循環参照しないことを示唆します。このことは、`Rc::strong_count` と `Rc::weak_count` を呼び出すことで得られる値を見てもわかります。

15.6.2.3 strong_count と weak_count への変更を可視化する

新しい内部スコープを作り、branch の作成をそのスコープに移動することで、`Rc<Node>` インスタンスの `strong_count` と `weak_count` 値がどう変化するかを眺めましょう。そうすることで、branch が作成され、それからスコープを抜けてドロップされる時に起こることが確認できます。変更は、リスト 15-29 に示してあります:

ファイル名: `src/main.rs`

```
# use std::rc::{Rc, Weak};
```

```
# use std::cell::RefCell;
#
# #[derive(Debug)]
# struct Node {
#     value: i32,
#     parent: RefCell<Weak<Node>>,
#     children: RefCell<Vec<Rc<Node>>>,
# }
#
fn main() {
    let leaf = Rc::new(Node {
        value: 3,
        parent: RefCell::new(Weak::new()),
        children: RefCell::new(vec![]),
    });

    println!(
        // leafのstrong_count = {}, weak_count = {}
        "leaf strong = {}, weak = {}",
        Rc::strong_count(&leaf),
        Rc::weak_count(&leaf),
    );

    {
        let branch = Rc::new(Node {
            value: 5,
            parent: RefCell::new(Weak::new()),
            children: RefCell::new(vec![Rc::clone(&leaf)]),
        });

        *leaf.parent.borrow_mut() = Rc::downgrade(&branch);

        println!(
            // branchのstrong_count = {}, weak_count = {}
            "branch strong = {}, weak = {}",
            Rc::strong_count(&branch),
            Rc::weak_count(&branch),
        );

        println!(
            "leaf strong = {}, weak = {}",
            Rc::strong_count(&leaf),
            Rc::weak_count(&leaf),
        );
    }

    println!("leaf parent = {:?}", leaf.parent.borrow().upgrade());
    println!(
        "leaf strong = {}, weak = {}",
        Rc::strong_count(&leaf),
        Rc::weak_count(&leaf),
    );
}
```

リスト 15-29: 内側のスコープで `branch` を作成し、強弱参照カウントを調査する

`leaf` 作成後、その `Rc<Node>` の強カウントは 1、弱カウントは 0 になります。内側のスコープで `branch` を作成し、`leaf` に紐付け、この時点でカウントを出力すると、`branch` の `Rc<Node>` の強カウントは 1、弱カウントも 1 になります (`leaf.parent` が `Weak<Node>` で `branch` を指しているため)。`leaf` のカウントを出力すると、強カウントが 2 になっていることがわかります。`branch` が今は、`branch.children` に格納された `leaf` の `Rc<Node>` のクローンを持っているからですが、それでも弱カウントは 0 でしょう。

内側のスコープが終わると、`branch` はスコープを抜け、`Rc<Node>` の強カウントは 0 に減るので、この `Node` はドロップされます。`leaf.parent` からの弱カウント 1 は、`Node` がドロップされるか否かには関係ないので、メモリリークはしないのです！

このスコープの終端以後に `leaf` の親にアクセスしようとしたら、再び `None` が得られます。プログラムの終端で `leaf` の `Rc<Node>` の強カウントは 1、弱カウントは 0 です。変数 `leaf` が今では `Rc<Node>` への唯一の参照に再度なったからです。

カウントや値のドロップを管理するロジックは全て、`Rc<T>` や `Weak<T>` とその `Drop` トレイトの実装に組み込まれています。`Node` の定義で子供から親への関係は `Weak<T>` 参照になるべきと指定することで、循環参照やメモリリークを引き起こさずに親ノードに子ノードを参照させたり、その逆を行うことができます。

15.7 まとめ

この章は、スマートポインタを使用して `Rust` が既定で普通の参照に対して行うのとは異なる保証や代償を行う方法を講義しました。`Box<T>` 型は、既知のサイズで、ヒープに確保されたデータを指します。`Rc<T>` 型は、ヒープのデータへの参照の数を追跡するので、データは複数の所有者を保有できます。内部可変性のある `RefCell<T>` 型は、不変型が必要だけでも、その型の中の値を変更する必要がある時に使用できる型を与えてくれます；また、コンパイル時ではなく実行時に借用規則を強制します。

`Deref` と `Drop` トレイトについても議論しましたね。これらは、スマートポインタの多くの機能を可能にしてくれます。メモリリークを引き起こす循環参照と `Weak<T>` でそれを回避する方法も探究しました。

この章で興味をそそられ、独自のスマートポインタを実装したくなったら、もっと役に立つ情報を求めて、“`The Rustonomicon`” をチェックしてください。

訳注: 日本語版の `The Rustonomicon` はこちらです。

次は、`Rust` での並行性について語ります。もういくつか新しいスマートポインタについてさえも学ぶでしょう。

第 16 章

恐れるな！ 並行性

並行性を安全かつ効率的に扱うことは、Rust の別の主な目標です。**並行プログラミング**は、プログラムの異なる部分が独立して実行することであり、**並列プログラミング**はプログラムの異なる部分が同時に実行することですが、多くのコンピュータが複数のプロセッサの利点を生かすようになるにつれ、重要度を増しています。歴史的に、これらの文脈で行うプログラミングは困難で、エラーが起きやすいものでした: Rust はこれを変えようと願っています。

当初、Rust チームは、メモリ安全性を保証することと、並行性問題を回避することは、異なる方法で解決すべき別々の課題だと考えていました。時間とともに、チームは、所有権と型システムは、メモリ安全性と並行性問題を管理する役に立つ一連の強力な道具であることを発見しました。所有権と型チェックを活用することで、多くの並行性エラーは、実行時エラーではなくコンパイル時エラーになります。故に、実行時に並行性のバグが起きた状況と全く同じ状況を再現しようと時間を浪費させるよりも、不正なコードはコンパイルを拒み、問題を説明するエラーを提示するでしょう。結果として、プロダクトになった後でなく、作業中にコードを修正できます。Rust のこの方向性を**恐れるな！並行性**とニックネーム付けしました。これにより、潜在的なバグがなく、かつ、新しいバグを導入することなく簡単にリファクタリングできるコードを書くことができます。

注釈: 簡潔性のため、並行または並列と述べることで正確を期するのではなく、多くの問題を**並行**と割り切ってしまう。この本がもし**並行性あるいは並列性**に関した本ならば、詳述していたでしょう。この章に対しては、**並行**を使ったら、脳内で**並行または並列**と置き換えてください。

多くの言語は、自分が提供する並行性問題を扱う解決策について独断的です。例えば、Erlang には、メッセージ受け渡しの並行性に関する素晴らしい機能がありますが、スレッド間で状態を共有することに関しては、曖昧な方法しかありません。可能な解決策の一部のみをサポートすることは、高級言語にとっては合理的な施策です。なぜなら、高級言語は一部の制御を失う代わりに抽象化することから恩恵を受けるからです。ところが、低級言語は、どんな場面でも最高のパフォーマンスで解決

策を提供すると想定され、ハードウェアに関してほとんど抽象化はしません。そのため、Rust は、自分の状況と必要性に適した方法が何であれ、問題をモデル化するためのいろんな道具を備えています。

こちらが、この章で講義する話題です：

- スレッドを生成して、複数のコードを同時に走らせる方法
- チャンネルがスレッド間でメッセージを送る**メッセージ受け渡し**並行性
- 複数のスレッドが何らかのデータにアクセスする**状態共有**並行性
- 標準ライブラリが提供する型だけでなく、ユーザが定義した型に対しても Rust の並行性の安全保証を拡張する Sync と Send トレイト

16.1 スレッドを使用してコードを同時に走らせる

多くの現代の OS では、実行中のプログラムのコードは**プロセス**で走り、OS は同時に複数のプロセスを管理します。自分のプログラム内で、独立した部分を同時に実行できます。これらの独立した部分を走らせる機能を**スレッド**と呼びます。

プログラム内の計算を複数のスレッドに分けると、パフォーマンスが改善します。プログラムが同時に複数の作業をするからです、複雑度も増します。スレッドは同時に走らせることができるので、異なるスレッドのコードが走る順番に関して、本来的に保証はありません。これは例えば以下のような問題を招きます：

- スレッドがデータやリソースに矛盾した順番でアクセスする競合状態
- 2 つのスレッドがお互いにもう一方が持っているリソースを使用し終わるのを待ち、両者が継続するのを防ぐデッドロック
- 特定の状況でのみ起き、確実な再現や修正が困難なバグ

Rust は、スレッドを使用する際の悪影響を軽減しようとしています、それでも、マルチスレッドの文脈でのプログラミングでは、注意深い思考とシングルスレッドで走るプログラムとは異なるコード構造が必要です。

プログラミング言語によってスレッドはいくつかの方法で実装されています。多くの OS で、新規スレッドを生成する API が提供されています。言語が OS の API を呼び出してスレッドを生成するこのモデルを時に **1:1** と呼び、1 つの OS スレッドに対して 1 つの言語スレッドを意味します。

多くのプログラミング言語がスレッドの独自の特別な実装を提供しています。プログラミング言語が提供するスレッドは、**グリーンスレッド**として知られ、このグリーンスレッドを使用する言語は、それを異なる数の OS スレッドの文脈で実行します。このため、グリーンスレッドのモデルは **M:N** モデルと呼ばれます：M 個のグリーンスレッドに対して、N 個の OS スレッドがあり、M と N は必ずしも同じ数字ではありません。

各モデルには、それだけの利点と代償があり、Rust にとって最も重要な代償は、ランタイムのサポートです。**ランタイム**は、混乱しやすい用語で文脈によって意味も変わります。

この文脈での**ランタイム**とは、言語によって全てのバイナリに含まれるコードのことを意味します。言語によってこのコードの大小は決まりますが、非アセンブリ言語は全てある量の実行時コードを含みます。そのため、口語的に誰かが「ノーランタイム」と言ったら、「小さいランタイム」のことを意味することがしばしばあります。ランタイムが小さいと機能も少ないですが、バイナリのサイズも小さくなるという利点があり、その言語を他の言語とより多くの文脈で組み合わせることが容易になります。多くの言語では、より多くの機能と引き換えにランタイムのサイズが膨れ上がるのは、受け入れられることですが、**Rust** にはほとんどゼロのランタイムが必要でパフォーマンスを維持するために **C** コードを呼び出せることを妥協できないのです。

M:N のグリーンスレッドモデルは、スレッドを管理するのにより大きな言語ランタイムが必要です。よって、**Rust** の標準ライブラリは、**1:1** スレッドの実装のみを提供しています。**Rust** はそのような低級言語なので、例えば、むしろどのスレッドがいつ走るかのより詳細な制御や、より低コストの文脈切り替えなどの一面をオーバーヘッドと引き換えるなら、**M:N** スレッドの実装をしたクレートもあります。

今や **Rust** におけるスレッドを定義したので、標準ライブラリで提供されているスレッド関連の API の使用法を探究しましょう。

16.1.1 spawn で新規スレッドを生成する

新規スレッドを生成するには、`thread::spawn` 関数を呼び出し、新規スレッドで走らせたいコードを含むクロージャ (クロージャについては第 13 章で語りました) を渡します。リスト 16-1 の例は、メインスレッドと新規スレッドからテキストを出力します:

ファイル名: `src/main.rs`

```
use std::thread;
use std::time::Duration;

fn main() {
    thread::spawn(|| {
        for i in 1..10 {
            // やあ！ 立ち上げたスレッドから数字{}だよ！
            println!("hi number {} from the spawned thread!", i);
            thread::sleep(Duration::from_millis(1));
        }
    });

    for i in 1..5 {
        // メインスレッドから数字{}だよ！
        println!("hi number {} from the main thread!", i);
        thread::sleep(Duration::from_millis(1));
    }
}
```

リスト 16-1: メインスレッドが別のものを出力する間に新規スレッドを生成して何かを出力する

この関数では、新しいスレッドは、実行が終わったかどうかにかかわらず、メインスレッドが終了したら停止することに注意してください。このプログラムからの出力は毎回少々異なる可能性があります。だいたい以下のような感じでしょう：

```
hi number 1 from the main thread!
hi number 1 from the spawned thread!
hi number 2 from the main thread!
hi number 2 from the spawned thread!
hi number 3 from the main thread!
hi number 3 from the spawned thread!
hi number 4 from the main thread!
hi number 4 from the spawned thread!
hi number 5 from the spawned thread!
```

`thread::sleep` を呼び出すと、少々の間、スレッドの実行を止め、違うスレッドを走らせることができます。スレッドはおそらく切り替わるでしょうが、保証はありません: OS がスレッドのスケジュールを行う方法によります。この実行では、コード上では立ち上げられたスレッドの `print` 文が先に現れているのに、メインスレッドが先に出力しています。また、立ち上げたスレッドには `i` が 9 になるまで出力するよう指示しているのに、メインスレッドが終了する前の 5 までしか到達していません。

このコードを実行してメインスレッドの出力しか目の当たりにできなかったり、オーバーラップがなければ、範囲の値を増やして OS がスレッド切り替えを行う機会を増やしてみてください。

16.1.2 join ハンドルで全スレッドの終了を待つ

リスト 16-1 のコードは、メインスレッドが終了するためにほとんどの場合、立ち上げたスレッドがすべて実行されないだけでなく、立ち上げたスレッドが実行されるかどうか保証できません。原因は、スレッドの実行順に保証がないからです。

`thread::spawn` の戻り値を変数に保存することで、立ち上げたスレッドが実行されなかったり、完全には実行されなかったりする問題を修正することができます。`thread::spawn` の戻り値の型は `JoinHandle` です。`JoinHandle` は、その `join` メソッドを呼び出したときにスレッドの終了を待つ所有された値です。リスト 16-2 は、リスト 16-1 で生成したスレッドの `JoinHandle` を使用し、`join` を呼び出して、`main` が終了する前に、立ち上げたスレッドが確実に完了する方法を示しています：

ファイル名: `src/main.rs`

```
use std::thread;
use std::time::Duration;

fn main() {
    let handle = thread::spawn(|| {
```



```
        for i in 1..10 {
            println!("hi number {} from the spawned thread!", i);
            thread::sleep(Duration::from_millis(1));
        }
    });

    for i in 1..5 {
        println!("hi number {} from the main thread!", i);
        thread::sleep(Duration::from_millis(1));
    }

    handle.join().unwrap();
}
```

リスト 16-2: `thread::spawn` の `JoinHandle` を保存してスレッドが完了するのを保証する

ハンドルに対して `join` を呼び出すと、ハンドルが表すスレッドが終了するまで現在実行中のスレッドをブロックします。スレッドを**ブロック**するとは、そのスレッドが動いたり、終了したりすることを防ぐことです。`join` の呼び出しをメインスレッドの `for` ループの後に配置したので、リスト 16-2 を実行すると、以下のように出力されるはずです:

```
hi number 1 from the main thread!
hi number 2 from the main thread!
hi number 1 from the spawned thread!
hi number 3 from the main thread!
hi number 2 from the spawned thread!
hi number 4 from the main thread!
hi number 3 from the spawned thread!
hi number 4 from the spawned thread!
hi number 5 from the spawned thread!
hi number 6 from the spawned thread!
hi number 7 from the spawned thread!
hi number 8 from the spawned thread!
hi number 9 from the spawned thread!
```

2 つのスレッドが代わる代わる実行されていますが、`handle.join()` 呼び出しのためにメインスレッドは待機し、立ち上げたスレッドが終了するまで終わりません。

ですが、代わりに `handle.join()` を `for` ループの前に移動したらどうなるのか確認しましょう。こんな感じに:

ファイル名: `src/main.rs`

```
use std::thread;
use std::time::Duration;

fn main() {
    let handle = thread::spawn(|| {
        for i in 1..10 {
```

```
        println("hi number {} from the spawned thread!", i);
        thread::sleep(Duration::from_millis(1));
    }
});

handle.join().unwrap();

for i in 1..5 {
    println("hi number {} from the main thread!", i);
    thread::sleep(Duration::from_millis(1));
}
```

メインスレッドは、立ち上げたスレッドが終了するまで待ち、それから for ループを実行するので、以下のように出力はもう混ざらないでしょう：

```
hi number 1 from the spawned thread!
hi number 2 from the spawned thread!
hi number 3 from the spawned thread!
hi number 4 from the spawned thread!
hi number 5 from the spawned thread!
hi number 6 from the spawned thread!
hi number 7 from the spawned thread!
hi number 8 from the spawned thread!
hi number 9 from the spawned thread!
hi number 1 from the main thread!
hi number 2 from the main thread!
hi number 3 from the main thread!
hi number 4 from the main thread!
```

どこで join を呼ぶかといったほんの些細なことが、スレッドが同時に走るかどうかに影響することもあります。

16.1.3 スレッドで move クロージャを使用する

move クロージャは、thread::spawn とともによく使用されます。あるスレッドのデータを別のスレッドで使用できるようになるからです。

第 13 章で、クロージャの引数リストの前に move キーワードを使用して、クロージャに環境で使用している値の所有権を強制的に奪わせることができると述べました。このテクニックは、あるスレッドから別のスレッドに値の所有権を移すために新しいスレッドを生成する際に特に有用です。

リスト 16-1 において、thread::spawn に渡したクロージャには引数がなかったことに注目してください：立ち上げたスレッドのコードでメインスレッドからのデータは何も使用していないのです。立ち上げたスレッドでメインスレッドのデータを使用するには、立ち上げるスレッドのクロージャは、必要な値をキャプチャしなければなりません。リスト 16-3 は、メインスレッドでベクタを生成し、立ち上げたスレッドで使用する試みを示しています。しかしながら、すぐにわかるように、これはまだ

動きません:

ファイル名: src/main.rs

```
use std::thread;

fn main() {
    let v = vec![1, 2, 3];

    let handle = thread::spawn(|| {
        // こちらがベクタ: {:?}
        println!("Here's a vector: {:?}", v);
    });

    handle.join().unwrap();
}
```

リスト 16-3: 別のスレッドでメインスレッドが生成したベクタを使用しようとする

クロージャは `v` を使用しているので、`v` をキャプチャし、クロージャの環境の一部にしています。`thread::spawn` はこのクロージャを新しいスレッドで走らせるので、その新しいスレッド内で `v` にアクセスできるはずです。しかし、このコードをコンパイルすると、以下のようなエラーが出ます:

```
error[E0373]: closure may outlive the current function, but it borrows `v`,
which is owned by the current function
(エラー: クロージャは現在の関数よりも長生きするかもしれませんが、現在の関数が所
有している
`v` を借用しています)
--> src/main.rs:6:32
|
6 |     let handle = thread::spawn(|| {
|                               ^^ may outlive borrowed value `v`
7 |         println!("Here's a vector: {:?}", v);
|                               - `v` is borrowed here
|
help: to force the closure to take ownership of `v` (and any other referenced
variables), use the `move` keyword
(助言: `v` (や他の参照されている変数) の所有権をクロージャに奪わせるには、`move`
キーワードを使用してください)
6 |     let handle = thread::spawn(move || {
|                               ^^^^^^^
```

Rust は `v` のキャプチャ方法を推論し、`println!` は `v` への参照のみを必要とするので、クロージャは、`v` を借用しようとしています。ですが、問題があります: コンパイラには、立ち上げたスレッドがどのくらいの期間走るのかわからないので、`v` への参照が常に有効であるか把握できないのです。

リスト 16-4 は、`v` への参照がより有効でなさそうな筋書きです:

ファイル名: src/main.rs

```
use std::thread;

fn main() {
    let v = vec![1, 2, 3];

    let handle = thread::spawn(|| {
        println!("Here's a vector: {:?}", v);
    });

    // いや～！
    drop(v); // oh no!

    handle.join().unwrap();
}
```

リスト 16-4: `v` をドロップするメインスレッドから `v` への参照をキャプチャしようとするクロージャを伴うスレッド

このコードを実行できてしまうなら、立ち上げたスレッドはまったく実行されることなく即座にバックグラウンドに置かれる可能性があります。立ち上げたスレッドは内部に `v` への参照を保持していますが、メインスレッドは、第 15 章で議論した `drop` 関数を使用して、即座に `v` をドロップしています。そして、立ち上げたスレッドが実行を開始する時には、`v` はもう有効ではなく、参照も不正になるのです。あちゃー！

リスト 16-3 のコンパイルエラーを修正するには、エラーメッセージのアドバイスを活用できます:

```
help: to force the closure to take ownership of `v` (and any other referenced
variables), use the `move` keyword
6 |     let handle = thread::spawn(move || {
  |                               ^^^^^^^^
```

クロージャの前に `move` キーワードを付することで、コンパイラに値を借用すべきと推論させるのではなく、クロージャに使用している値の所有権を強制的に奪わせます。リスト 16-5 に示したリスト 16-3 に対する変更は、コンパイルでき、意図通りに動きます:

ファイル名: src/main.rs

```
use std::thread;

fn main() {
    let v = vec![1, 2, 3];

    let handle = thread::spawn(move || {
        println!("Here's a vector: {:?}", v);
    });
}
```

```
    handle.join().unwrap();
}
```

リスト 16-5: `move` キーワードを使用してクロージャに使用している値の所有権を強制的に奪わせる

`move` クロージャを使用していたら、メインスレッドが `drop` を呼び出すリスト 16-4 のコードはどうなるのでしょうか？ `move` で解決するのでしょうか？ 残念ながら、違います；リスト 16-4 が試みていることは別の理由によりできないので、違うエラーが出ます。クロージャに `move` を付与したら、`v` をクロージャの環境にムーブするので、最早メインスレッドで `drop` を呼び出すことは叶わなくなるでしょう。代わりにこのようなコンパイルエラーが出るでしょう：

```
error[E0382]: use of moved value: `v`
(エラー: ムーブされた値の使用: `v`)
--> src/main.rs:10:10
   |
 6 |         let handle = thread::spawn(move || {
   |                                     ----- value moved (into closure) here
...
10 |         drop(v); // oh no!
   |         ^ value used here after move
   |
   = note: move occurs because `v` has type `std::vec::Vec<i32>`, which does
   not implement the `Copy` trait
(注釈: `v` の型が `std::vec::Vec<i32>` のためムーブが起きました。この型は、`Copy`
 トレイトを実装していません)
```

再三 Rust の所有権規則が救ってくれました！ リスト 16-3 のコードはエラーになりました。コンパイラが一時的に保守的になり、スレッドに対して `v` を借用しただけだったからで、これは、メインスレッドは理論上、立ち上げたスレッドの参照を不正化する可能性があることを意味します。`v` の所有権を立ち上げたスレッドに移動するとコンパイラに指示することで、メインスレッドはもう `v` を使用しないとコンパイラに保証しているのです。リスト 16-4 も同様に変更したら、メインスレッドで `v` を使用しようとする際に所有権の規則に違反することになります。`move` キーワードにより、Rust の保守的な借用のデフォルトが上書きされるのです；所有権の規則を侵害させてくれないのです。

スレッドとスレッド API の基礎知識を得たので、スレッドでできることを見ていきましょう。

16.2 メッセージ受け渡しを使ってスレッド間でデータを転送する

人気度を増してきている安全な並行性を保証する一つのアプローチがメッセージ受け渡しで、スレッドやアクターがデータを含むメッセージを相互に送り合うことでやり取りします。こちらが、Go 言語のドキュメンテーションのスローガンにある考えです：「メモリを共有することでやり取りするな；代わりにやり取りすることでメモリを共有しろ」

メッセージ送信並行性を達成するために Rust に存在する一つの主な道具は、**チャンネル**で、Rust の標準ライブラリが実装を提供しているプログラミング概念です。プログラミングのチャンネルは、水の流れるように考えることができます。小川とか川ですね。アヒルのおもちゃやボートみたいなものを流れに置いたら、水路の終端まで下流に流れていきます。

プログラミングにおけるチャンネルは、2 分割できます: 転送機と受信機です。転送機はアヒルのおもちゃを川に置く上流になり、受信機は、アヒルのおもちゃが行き着く下流になります。コードのある箇所が送信したいデータとともに転送機のメソッドを呼び出し、別の部分がメッセージが到着していないか受信側を調べます。転送機と受信機のどちらかがドロップされると、チャンネルは**閉じられた**と言います。

ここで、1つのスレッドが値を生成し、それをチャンネルに送信し、別のスレッドがその値を受け取り、出力するプログラムに取り掛かります。チャンネルを使用してスレッド間に単純な値を送り、機能の説明を行います。一旦、そのテクニックに慣れてしまえば、チャンネルを使用してチャットシステムや、多くのスレッドが計算の一部を担い、結果をまとめる 1つのスレッドにその部分を送るようなシステムを実装できるでしょう。

まず、リスト 16-6 において、チャンネルを生成するものの、何もしません。チャンネル越しにどんな型の値を送りたいのかコンパイラがわからないため、これはまだコンパイルできないことに注意してください。

ファイル名: src/main.rs

```
use std::sync::mpsc;

fn main() {
    let (tx, rx) = mpsc::channel();
    # tx.send(()).unwrap();
}
```

リスト 16-6: チャンネルを生成し、2つの部品を tx と rx に代入する

`mpsc::channel` 関数で新しいチャンネルを生成しています; `mpsc` は **multiple producer, single consumer** を表しています。簡潔に言えば、Rust の標準ライブラリがチャンネルを実装している方法は、1つのチャンネルが値を生成する複数の**送信側**と、その値を消費するたった 1つの**受信側**を持つことができるということを意味します。複数の小川が互いに合わさって 1つの大きな川になるところを想像してください: どの小川を通っても、送られたものは最終的に 1つの川に行き着きます。今は、1つの生成器から始めますが、この例が動作するようになったら、複数の生成器を追加します。

`mpsc::channel` 関数はタプルを返し、1つ目の要素は、送信側、2つ目の要素は受信側になります。tx と rx という略称は、多くの分野で伝統的に**転送機**と**受信機**にそれぞれ使用されているので、変数をそのように名付けて、各終端を示します。タプルを分配するパターンを伴う `let` 文を使用しています; `let` 文でパターンを使用することと分配については、第 18 章で議論しましょう。このように `let` 文を使うと、`mpsc::channel` で返ってくるタプルの部品を抽出するのが便利になります。

立ち上げたスレッドがメインスレッドとやり取りするように、転送機を立ち上げたスレッドに移動し、1 文字列を送らせましょう。リスト 16-7 のようにですね。川の上流にアヒルのおもちゃを置いたり、チャットのメッセージをあるスレッドから別のスレッドに送るみたいですね。

ファイル名: src/main.rs

```
use std::thread;
use std::sync::mpsc;

fn main() {
    let (tx, rx) = mpsc::channel();

    thread::spawn(move || {
        let val = String::from("hi");
        tx.send(val).unwrap();
    });
}
```

リスト 16-7: tx を立ち上げたスレッドに移動し、「やあ」を送る

今回も、thread::spawn を使用して新しいスレッドを生成し、それから move を使用して、立ち上げたスレッドが tx を所有するようにクロージャに tx をムーブしています。立ち上げたスレッドは、メッセージをチャンネルを通して送信できるように、チャンネルの送信側を所有する必要があります。

転送側には、送信したい値を取る send メソッドがあります。send メソッドは Result<T, E> 型を返すので、既に受信側がドロップされ、値を送信する場所がなければ、送信処理はエラーを返します。この例では、エラーの場合には、パニックするように unwrap を呼び出しています。ですが、実際のアプリケーションでは、ちゃんと扱うでしょう: 第 9 章に戻ってちゃんとしたエラー処理の方法を再確認してください。

リスト 16-8 において、メインスレッドのチャンネルの受信側から値を得ます。アヒルのおもちゃを川の終端で水から回収したり、チャットメッセージを取得するみたいですね。

ファイル名: src/main.rs

```
use std::thread;
use std::sync::mpsc;

fn main() {
    let (tx, rx) = mpsc::channel();

    thread::spawn(move || {
        let val = String::from("hi");
        tx.send(val).unwrap();
    });

    let received = rx.recv().unwrap();
    // 値は {} です
}
```

```
println!("Got: {}", received);
}
```

リスト 16-8: 「やあ」の値をメインスレッドで受け取り、出力する

チャンネルの受信側には有用なメソッドが 2 つあります: `recv` と `try_recv` です。**receive** の省略形である `recv` を使っています。これは、メインスレッドの実行をブロックし、値がチャンネルを流れてくるまで待機します。一旦値が送信されたら、`recv` はそれを `Result<T, E>` に含んで返します。チャンネルの送信側が閉じたら、`recv` はエラーを返し、もう値は来ないと通知します。

`try_recv` メソッドはブロックせず、代わりに即座に `Result<T, E>` を返します: メッセージがあったら、それを含む `Ok` 値、今回は何もメッセージがなければ、`Err` 値です。メッセージを待つ間にこのスレッドにすることが他にあれば、`try_recv` は有用です: `try_recv` を頻繁に呼び出し、メッセージがあったら処理し、それ以外の場合は、再度チェックするまでちょっとの間、他の作業をするループを書くことができますでしょう。

この例では、簡潔性のために `recv` を使用しました; メッセージを待つこと以外にメインスレッドがすべき作業はないので、メインスレッドをブロックするのは適切です。

リスト 16-8 のコードを実行したら、メインスレッドから値が出力される場所を目撃しましょう:

```
Got: hi
```

完璧です！

16.2.1 チャンネルと所有権の転送

安全な並行コードを書く手助けをしてくれるので、所有権規則は、メッセージ送信で重要な役割を担っています。並行プログラミングでエラーを回避することは、**Rust** プログラム全体で所有権について考える利点です。実験をしてチャンネルと所有権がともに動いて、どう問題を回避するかをお見せしましょう: `val` 値を立ち上げたスレッドで、チャンネルに送った後に使用を試みます。リスト 16-9 のコードのコンパイルを試みて、このコードが許容されない理由を確認してください:

ファイル名: `src/main.rs`

```
use std::thread;
use std::sync::mpsc;

fn main() {
    let (tx, rx) = mpsc::channel();

    thread::spawn(move || {
        let val = String::from("hi");
        tx.send(val).unwrap();
        // val は {}
    });
}
```



```
        println!("val is {}", val);
    });

    let received = rx.recv().unwrap();
    println!("Got: {}", received);
}
```

リスト 16-9: チャンネルに送信後に val の使用を試みる

ここで、tx.send 経由でチャンネルに送信後に val を出力しようとしています。これを許可するのは、悪い考えです：一旦、値が他のスレッドに送信されたら、再度値を使用しようとする前にそのスレッドが変更したりドロップできてしまいます。可能性として、その別のスレッドの変更により、矛盾していたり存在しないデータのせいでエラーが発生したり、予期しない結果になるでしょう。ですが、リスト 16-9 のコードのコンパイルを試みると、Rust はエラーを返します：

```
error[E0382]: use of moved value: `val`
--> src/main.rs:10:31
   |
 9 |         tx.send(val).unwrap();
   |                   --- value moved here
10 |         println!("val is {}", val);
   |                               ^^^ value used here after move
   |
   = note: move occurs because `val` has type `std::string::String`, which does
   not implement the `Copy` trait
```

並行性のミスがコンパイルエラーを招きました。send 関数は引数の所有権を奪い、値がムーブされると、受信側が所有権を得るのです。これにより、送信後に誤って再度値を使用するのを防いでくれます；所有権システムが、万事問題ないことを確認してくれます。

16.2.2 複数の値を送信し、受信側が待機するのを確かめる

リスト 16-8 のコードはコンパイルでき、動きましたが、2 つの個別のスレッドがお互いにチャンネル越しに会話していることは、明瞭に示されませんでした。リスト 16-10 において、リスト 16-8 のコードが並行に動いていることを証明する変更を行いました：立ち上げたスレッドは、複数のメッセージを送信し、各メッセージ間で、1 秒待機します。

ファイル名: src/main.rs

```
use std::thread;
use std::sync::mpsc;
use std::time::Duration;

fn main() {
    let (tx, rx) = mpsc::channel();
```

```
thread::spawn(move || {
    // スレッドからやあ(hi from the thread)
    let vals = vec![
        String::from("hi"),
        String::from("from"),
        String::from("the"),
        String::from("thread"),
    ];

    for val in vals {
        tx.send(val).unwrap();
        thread::sleep(Duration::from_secs(1));
    }
});

for received in rx {
    println!("Got: {}", received);
}
```

リスト 16-10: 複数のメッセージを送信し、メッセージ間で停止する

今回は、メインスレッドに送信したい文字列のベクタを立ち上げたスレッドが持っています。それらを繰り返し、各々個別に送信し、Duration の値 1 秒とともに thread::sleep 関数を呼び出すことで、メッセージ間で停止します。

メインスレッドにおいて、最早 recv 関数を明示的に呼んではいません: 代わりに、rx をイテレータとして扱っています。受信した値それぞれを出力します。チャンネルが閉じられると、繰り返しも終わります。

リスト 16-10 のコードを走らせると、各行の間に 1 秒の待機をしつつ、以下のような出力を目の当たりにするはずです:

```
Got: hi
Got: from
Got: the
Got: thread
```

メインスレッドの for ループには停止したり、遅れせたりするコードは何もないので、メインスレッドが立ち上げたスレッドから値を受け取るのを待機していることがわかります。

16.2.3 転送機をクローンして複数の生成器を作成する

mpsc は、**mutiple producer, single consumer** の頭字語であると前述しました。mpsc を使い、リスト 16-10 のコードを拡張して、全ての値を同じ受信機に送信する複数のスレッドを生成しましょう。チャンネルの転送の片割れをクローンすることでそうすることができます。リスト 16-11 のようにですね:

ファイル名: src/main.rs

```
# use std::thread;
# use std::sync::mpsc;
# use std::time::Duration;
#
# fn main() {
// --snip--

let (tx, rx) = mpsc::channel();

let tx1 = mpsc::Sender::clone(&tx);
thread::spawn(move || {
    let vals = vec![
        String::from("hi"),
        String::from("from"),
        String::from("the"),
        String::from("thread"),
    ];

    for val in vals {
        tx1.send(val).unwrap();
        thread::sleep(Duration::from_secs(1));
    }
});

thread::spawn(move || {
    // 君のためにもっとメッセージを (more messages for you)
    let vals = vec![
        String::from("more"),
        String::from("messages"),
        String::from("for"),
        String::from("you"),
    ];

    for val in vals {
        tx.send(val).unwrap();
        thread::sleep(Duration::from_secs(1));
    }
});

for received in rx {
    println!("Got: {}", received);
}

// --snip--
# }
```

リスト 16-11: 複数の生成器から複数のメッセージを送信する

今回、最初のスレッドを立ち上げる前に、チャンネルの送信側に対して `clone` を呼び出しています。

これにより、最初に立ち上げたスレッドに渡せる新しい送信ハンドルが得られます。元のチャンネルの送信側は、2 番目に立ち上げたスレッドに渡します。これにより 2 つスレッドが得られ、それぞれチャンネルの受信側に異なるメッセージを送信します。

コードを実行すると、出力は以下のようなものになるはずです:

```
Got: hi
Got: more
Got: from
Got: messages
Got: for
Got: the
Got: thread
Got: you
```

別の順番で値が出る可能性もあります; システム次第です。並行性が面白いと同時に難しい部分でもあります。異なるスレッドで色々な値を与えて `thread::sleep` で実験をしたら、走らせるたびにより非決定的になり、毎回異なる出力をするでしょう。

チャンネルの動作方法を見たので、他の並行性に目を向けましょう。

16.3 状態共有並行性

メッセージ受け渡しは、並行性を扱う素晴らしい方法ですが、唯一の方法ではありません。Go 言語ドキュメンテーションのスローガンのこの部分を再び考えてください: 「メモリを共有することでやり取りする。」

メモリを共有することでやり取りするとはどんな感じなのでしょう? さらに、なぜメッセージ受け渡しに熱狂的な人は、それを使わず、代わりに全く反対のことをするのでしょうか?

ある意味では、どんなプログラミング言語のチャンネルも単独の所有権に類似しています。一旦チャンネルに値を転送したら、その値は最早使用することがないからです。メモリ共有並行性は、複数の所有権に似ています: 複数のスレッドが同時に同じメモリ位置にアクセスできるのです。第 15 章でスマートポインタが複数の所有権を可能にするのを目の当たりにしたように、異なる所有者を管理する必要があるので、複数の所有権は複雑度を増させます。Rust の型システムと所有権規則は、この管理を正しく行う大きな助けになります。例として、メモリ共有を行うより一般的な並行性の基本型の一つであるミューテックスを見てみましょう。

16.3.1 ミューテックスを使用して一度に 1 つのスレッドからデータにアクセスすることを許可する

ミューテックスは、どんな時も 1 つのスレッドにしかなんらかのデータへのアクセスを許可しないというように、“mutual exclusion”(相互排他) の省略形です。ミューテックスにあるデータにアクセスするには、ミューテックスのロックを所望することでアクセスしたいことをまず、スレッドは通

知しなければなりません。ロックとは、現在誰がデータへの排他的アクセスを行なっているかを追跡するミューテックスの一部をなすデータ構造です。故に、ミューテックスはロックシステム経由で保持しているデータを**死守する (guarding)** と解説されます。

ミューテックスは、2 つの規則を覚えておく必要があるため、難しいという評判があります：

- データを使用する前にロックの獲得を試みなければならない。
- ミューテックスが死守しているデータの使用が終わったら、他のスレッドがロックを獲得できるように、データをアンロックしなければならない。

ミューテックスを現実世界の物で例えるなら、マイクが 1 つしかない会議のパネルディスカッションを思い浮かべてください。パネリストが発言できる前に、マイクを使用したいと申し出たり、通知しなければなりません。マイクを受け取ったら、話したいだけ話し、それから次に発言を申し出たパネリストにマイクを手渡します。パネリストが発言し終わった時に、マイクを手渡すのを忘れていたら、誰も他の人は発言できません。共有されているマイクの管理がうまくいかなければ、パネルは予定通りに機能しないでしょう！

ミューテックスの管理は、正しく行うのに著しく技巧を要することがあるので、多くの人がチャンネルに熱狂的になるわけです。しかしながら、Rust の型システムと所有権規則のおかげで、ロックとアンロックをおかしくすることはありません。

16.3.1.1 Mutex<T>の API

ミューテックスの使用法の例として、ミューテックスをシングルスレッドの文脈で使うことから始めましょう。リスト 16-12 のようにですね：

ファイル名: src/main.rs

```
use std::sync::Mutex;

fn main() {
    let m = Mutex::new(5);

    {
        let mut num = m.lock().unwrap();
        *num = 6;
    }

    println!("m = {:?}", m);
}
```

リスト 16-12: 簡潔性のために Mutex<T> の API をシングルスレッドの文脈で探究する

多くの型同様、new という関連関数を使用して Mutex<T> を生成します。ミューテックス内部のデータにアクセスするには、lock メソッドを使用してロックを獲得します。この呼び出しは、現在のスレッドをブロックするので、ロックを得られる順番が来るまで何も作業はできません。

ロックを保持している他のスレッドがパニックしたら、lock の呼び出しは失敗するでしょう。その場合、誰もロックを取得することは叶わないので、unwrap すると決定し、そのような状況になったら、このスレッドをパニックさせます。

ロックを獲得した後、今回の場合、num と名付けられていますが、戻り値の中に入っているデータへの可変参照として扱うことができます。型システムにより、m の値を使用する前にロックを獲得していることが確認されます: Mutex<i32> は i32 ではないので、i32 を使用できるようにするには、ロックを獲得しなければならないのです。忘れることはあり得ません; 型システムにより、それ以外の場合に内部の i32 にアクセスすることは許されません。

お察しかもしれませんが、Mutex<T> はスマートポインタです。より正確を期すなら、lock の呼び出しが MutexGuard というスマートポインタを返却します。このスマートポインタが、内部のデータを指す Deref を実装しています; このスマートポインタはさらに MutexGuard がスコープを外れた時に、自動的にロックを解除する Drop 実装もしていて、これがリスト 16-12 の内部スコープの終わりで発生します。結果として、ロックの解除が自動的に行われるので、ロックの解除を忘れ、ミューテックスが他のスレッドで使用されるのを阻害するリスクを負いません。

ロックをドロップした後、ミューテックスの値を出力し、内部の i32 の値を 6 に変更できたことが確かめられるのです。

16.3.1.2 複数のスレッド間で Mutex<T>を共有する

さて、Mutex<T> を使って複数のスレッド間で値を共有してみましょう。10 個のスレッドを立ち上げ、各々カウンタの値を 1 ずつインクリメントさせるので、カウンタは 0 から 10 まで上がります。以下の数例は、コンパイルエラーになることに注意し、そのエラーを使用して Mutex<T> の使用法と、コンパイラがそれを正しく活用する手助けをしてくれる方法について学びます。リスト 16-13 が最初の例です:

ファイル名: src/main.rs

```
use std::sync::Mutex;
use std::thread;

fn main() {
    let counter = Mutex::new(0);
    let mut handles = vec![];

    for _ in 0..10 {
        let handle = thread::spawn(move || {
            let mut num = counter.lock().unwrap();

            *num += 1;
        });
        handles.push(handle);
    }

    for handle in handles {
```

```

        handle.join().unwrap();
    }

    println!("Result: {}", *counter.lock().unwrap());
}

```

リスト 16-13: `Mutex<T>` により死守されているカウンタを 10 個のスレッドがそれぞれインクリメントする

リスト 16-12 のように、`counter` 変数を生成して `Mutex<T>` の内部に `i32` を保持しています。次に、数値の範囲をマッピングして 10 個のスレッドを生成しています。`thread::spawn` を使用して、全スレッドに同じクロージャを与えています。このクロージャは、スレッド内にカウンタをムーブし、`lock` メソッドを呼ぶことで `Mutex<T>` のロックを獲得し、それからミューテックスの値に 1 を足します。スレッドがクロージャを実行し終わったら、`num` はスコープ外に出てロックを解除するので、他のスレッドが獲得できるわけです。

メインスレッドで全ての `join` ハンドルを収集します。それからリスト 16-2 のように、各々に対して `join` を呼び出し、全スレッドが終了するのを確かめています。その時点で、メインスレッドはロックを獲得し、このプログラムの結果を出力します。

この例はコンパイルできないでしょうと仄めかしました。では、理由を探りましょう！

```

error[E0382]: capture of moved value: `counter`
(エラー: ムーブされた値をキャプチャしています: `counter`)
--> src/main.rs:10:27
   |
 9 |         let handle = thread::spawn(move || {
   |                                     ----- value moved (into closure) here
10 |             let mut num = counter.lock().unwrap();
   |                             ^^^^^^^^ value captured here after move
   |
   = note: move occurs because `counter` has type `std::sync::Mutex<i32>`,
   which does not implement the `Copy` trait

error[E0382]: use of moved value: `counter`
--> src/main.rs:21:29
   |
 9 |         let handle = thread::spawn(move || {
   |                                     ----- value moved (into closure) here
...
21 |     println!("Result: {}", *counter.lock().unwrap());
   |                             ^^^^^^^^ value used here after move
   |
   = note: move occurs because `counter` has type `std::sync::Mutex<i32>`,
   which does not implement the `Copy` trait

error: aborting due to 2 previous errors
(エラー: 前述の2つのエラーによりアボート)

```

エラーメッセージは、counter 値はクロージャにムーブされ、それから lock を呼び出したときにキャプチャされていると述べています。その説明は、所望した動作のように聞こえますが、許可されていないのです！

プログラムを単純化してこれを理解しましょう。for ループで 10 個スレッドを生成する代わりに、ループなしで 2 つのスレッドを作るだけにしてどうなるか確認しましょう。リスト 16-13 の最初の for ループを代わりにこのコードと置き換えてください：

```
use std::sync::Mutex;
use std::thread;

fn main() {
    let counter = Mutex::new(0);
    let mut handles = vec![];

    let handle = thread::spawn(move || {
        let mut num = counter.lock().unwrap();

        *num += 1;
    });
    handles.push(handle);

    let handle2 = thread::spawn(move || {
        let mut num2 = counter.lock().unwrap();

        *num2 += 1;
    });
    handles.push(handle2);

    for handle in handles {
        handle.join().unwrap();
    }

    println!("Result: {}", *counter.lock().unwrap());
}
```

2 つのスレッドを生成し、2 番目のスレッドの変数名を handle2 と num2 に変更しています。今回このコードを走らせると、コンパイラは以下の出力をします：

```
error[E0382]: capture of moved value: `counter`
--> src/main.rs:16:24
   |
 8 |     let handle = thread::spawn(move || {
   |                                ----- value moved (into closure) here
...
16 |         let mut num2 = counter.lock().unwrap();
   |                        ^^^^^^^^^ value captured here after move
   |
   = note: move occurs because `counter` has type `std::sync::Mutex<i32>`,
   which does not implement the `Copy` trait
```



```

error[E0382]: use of moved value: `counter`
--> src/main.rs:26:29
   |
 8 |         let handle = thread::spawn(move || {
   |                                     ----- value moved (into closure) here
...
26 |         println!("Result: {}", *counter.lock().unwrap());
   |                                   ^^^^^^^^^ value used here after move
   |
   = note: move occurs because `counter` has type `std::sync::Mutex<i32>`,
          which does not implement the `Copy` trait

error: aborting due to 2 previous errors

```

なるほど！ 最初のエラーメッセージは、`handle` に紐づけられたスレッドのクロージャに `counter` がムーブされていることを示唆しています。そのムーブにより、それに対して `lock` を呼び出し、結果を 2 番目のスレッドの `num2` に保持しようとした時に、`counter` をキャプチャすることを妨げています！ ゆえに、コンパイラは、`counter` の所有権を複数のスレッドに移すことはできないと教えてくれています。これは、以前では確認しづかったことです。なぜなら、スレッドはループの中にあり、ループの違う繰り返しにある違うスレッドをコンパイラは指し示せないからです。第 15 章で議論した複数所有権メソッドによりコンパイルエラーを修正しましょう。

16.3.1.3 複数のスレッドで複数の所有権

第 15 章で、スマートポインタの `Rc<T>` を使用して参照カウントの値を作ることで、1 つの値に複数の所有者を与えました。同じことをここでもして、どうなるか見ましょう。リスト 16-14 で `Rc<T>` に `Mutex<T>` を包含し、所有権をスレッドに移す前に `Rc<T>` をクローンします。今やエラーを確認したので、`for` ループの使用に立ち戻り、クロージャに `move` キーワードを使用し続けます。

ファイル名: `src/main.rs`

```

use std::rc::Rc;
use std::sync::Mutex;
use std::thread;

fn main() {
    let counter = Rc::new(Mutex::new(0));
    let mut handles = vec![];

    for _ in 0..10 {
        let counter = Rc::clone(&counter);
        let handle = thread::spawn(move || {
            let mut num = counter.lock().unwrap();

            *num += 1;
        });
        handles.push(handle);
    }
}

```

```

    }

    for handle in handles {
        handle.join().unwrap();
    }

    println!("Result: {}", *counter.lock().unwrap());
}

```

リスト 16-14: Rc<T> を使用して複数のスレッドに Mutex<T> を所有させようとする

再三、コンパイルし……別のエラーが出ました！ コンパイラはいろんなことを教えてくれます。

```

error[E0277]: the trait bound `std::rc::Rc<std::sync::Mutex<i32>>:
std::marker::Send` is not satisfied in `[closure@src/main.rs:11:36:
15:10 counter:std::rc::Rc<std::sync::Mutex<i32>>]`
(エラー: トレイト境界`std::rc::Rc<std::sync::Mutex<i32>>:
std::marker::Send`は`[closure@src/main.rs:11:36:15:10
counter:std::rc::Rc<std::sync::Mutex<i32>>]`で満たされていません)
--> src/main.rs:11:22
|
11 |         let handle = thread::spawn(move || {
|                                     ^^^^^^^^^^^^^^^^^ `std::rc::Rc<std::sync::Mutex<i32>>`
cannot be sent between threads safely
                                   (`std::rc::Rc<std::sync::Mutex<i32>>`は、スレッド間で
                                   安全に送信できません)

|
= help: within `[closure@src/main.rs:11:36: 15:10
counter:std::rc::Rc<std::sync::Mutex<i32>>]`, the trait `std::marker::Send` is
not implemented for `std::rc::Rc<std::sync::Mutex<i32>>`
(ヘルプ: `[closure@src/main.rs:11:36 15:10
counter:std::rc::Rc<std::sync::Mutex<i32>>]`内でトレイト`std::marker::Send`
は、
`std::rc::Rc<std::sync::Mutex<i32>>`に対して実装されていません)
= note: required because it appears within the type
`[closure@src/main.rs:11:36: 15:10 counter:std::rc::Rc<std::sync::Mutex<i32>>]`
(注釈: 型`[closure@src/main.rs:11:36 15:10
counter:std::rc::Rc<std::sync::Mutex<i32>>]`内に出現するので必要です)
= note: required by `std::thread::spawn`
(注釈: `std::thread::spawn`により必要とされています)

```

おお、このエラーメッセージはとても長ったらしいですね！ こちらが、注目すべき重要な部分です: 最初のインラインエラーは `std::rc::Rc<std::sync::Mutex<i32>>` cannot be sent between threads safely と述べています。この理由は、エラーメッセージの次に注目すべき重要な部分にあります。洗練されたエラーメッセージは、the trait bound `Send` is not satisfied と述べています。Send については、次の節で語ります: スレッドとともに使用している型が並行な場面で使われることを意図したものであることを保証するトレイトの 1 つです。

残念ながら、`Rc<T>` はスレッド間で共有するには安全ではないのです。`Rc<T>` が参照カウントを管理する際、`clone` が呼び出されるたびにカウントを追加し、クローンがドロップされるたびにカウントを差し引きます。しかし、並行基本型を使用してカウントの変更が別のスレッドに妨害されないことを確認していないのです。これは間違ったカウントにつながる可能性があり、今度はメモリリークや、使用し終わる前に値がドロップされることにつながる可能性のある潜在的なバグです。必要なのは、いかにも `Rc<T>` のようだけれども、参照カウントへの変更をスレッドセーフに行うものです。

16.3.1.4 `Arc<T>` で原子的な参照カウント

幸いなことに、`Arc<T>` は `Rc<T>` のような並行な状況で安全に使用できる型です。**a** は **atomic** を表し、原子的に参照カウントする型を意味します。アトミックは、ここでは詳しく講義しない並行性の別の基本型です：詳細は、`std::sync::atomic` の標準ライブラリドキュメンテーションを参照されたい。現時点では、アトミックは、基本型のように動くけれども、スレッド間で共有しても安全なことだけ知っていれば良いです。

そうしたらあなたは、なぜ全ての基本型がアトミックでなく、標準ライブラリの型も標準で `Arc<T>` を使って実装されていないのか疑問に思う可能性があります。その理由は、スレッド安全性が、本当に必要な時だけ支払いたいパフォーマンスの犠牲とともに得られるものだからです。シングルスレッドで値に処理を施すだけなら、アトミックが提供する保証を強制する必要がない方がコードはより速く走るのです。

例に回帰しましょう：`Arc<T>` と `Rc<T>` の API は同じなので、`use` 行と `new` の呼び出しと `clone` の呼び出しを変更して、プログラムを修正します。リスト 16-15 は、ようやくコンパイルでき、動作します：

ファイル名: `src/main.rs`

```
use std::sync::{Mutex, Arc};
use std::thread;

fn main() {
    let counter = Arc::new(Mutex::new(0));
    let mut handles = vec![];

    for _ in 0..10 {
        let counter = Arc::clone(&counter);
        let handle = thread::spawn(move || {
            let mut num = counter.lock().unwrap();

            *num += 1;
        });
        handles.push(handle);
    }

    for handle in handles {
        handle.join().unwrap();
    }
}
```

```
println!("Result: {}", *counter.lock().unwrap());  
}
```

リスト 16-15: `Arc<T>` を使用して `Mutex<T>` をラップし、所有権を複数のスレッド間で共有できるようにする

このコードは、以下のように出力します:

```
Result: 10
```

やりました！ 0 から 10 まで数え上げました。これは、あまり印象的ではないように思えるかもしれませんが、本当に `Mutex<T>` とスレッド安全性についていろんなことを教えてくれました。このプログラムの構造を使用して、カウンタをインクリメントする以上の複雑な処理を行うこともできるでしょう。この手法を使えば、計算を独立した部分に小分けにし、その部分をスレッドに分割し、それから `Mutex<T>` を使用して、各スレッドに最終結果を更新させることができます。

16.3.2 `RefCell<T>/Rc<T>` と `Mutex<T>/Arc<T>` の類似性

`counter` は不変なのに、その内部にある値への可変参照を得ることができたことに気付いたでしょうか; つまり、`Mutex<T>` は、`Cell` 系のように内部可変性を提供するわけです。第 15 章で `RefCell<T>` を使用して `Rc<T>` の内容を可変化できるようにしたのと同様に、`Mutex<T>` を使用して `Arc<T>` の内容を可変化しているのです。

気付いておくべき別の詳細は、`Mutex<T>` を使用する際にあらゆる種類のロジックエラーからは、コンパイラは保護してくれないということです。第 15 章で `Rc<T>` は、循環参照を生成してしまうリスクを伴い、そうすると、2 つの `Rc<T>` の値がお互いを参照し合い、メモリリークを引き起こしてしまうことを思い出してください。同様に、`Mutex<T>` は**デッドロック**を生成するリスクを伴っています。これは、処理が 2 つのリソースをロックする必要があり、2 つのスレッドがそれぞれにロックを 1 つ獲得して永久にお互いを待ちあってしまうときに起こります。デッドロックに興味があるのなら、デッドロックのある Rust プログラムを組んでみてください; それからどんな言語でもいいので、ミューテックスに対してデッドロックを緩和する方法を調べて、Rust で是非、それを実装してみてください。`Mutex<T>` と `MutexGuard` に関する標準ライブラリの API ドキュメンテーションは、役に立つ情報を提供してくれます。

`Send` と `Sync` トレイトと、それらを独自の型で使用方法について語って、この章を締めくくります。

16.4 Sync と Send トレイトで拡張可能な並行性

面白いことに、Rust 言語には、寡少な並行性機能があります。この章でここまで語った並行性機能のほとんどは、標準ライブラリの一部であり、言語ではありません。並行性を扱う選択肢は、言語や標準ライブラリに制限されません；独自の並行性機能を書いたり、他人が書いたものを利用したりできるのです。

ですが、2 つの並行性概念が言語に埋め込まれています： `std::marker` トレイトの `Sync` と `Send` です。

16.4.1 Send でスレッド間の所有権の転送を許可する

`Send` マーカートレイトは、`Send` を実装した型の所有権をスレッド間で転送できることを示唆します。Rust のほとんどの型は `Send` ですが、`Rc<T>` を含めて一部例外があります：この型は、`Rc<T>` の値をクローンし、クローンしたものの所有権を別のスレッドに転送しようとしたら、両方のスレッドが同時に参照カウントを更新できてしまうので、`Send` になり得ません。このため、`Rc<T>` はスレッド安全性のためのパフォーマンスの犠牲を支払わなくても済む、シングルスレッド環境で使用するために実装されているわけです。

故に、Rust の型システムとトレイト境界により、`Rc<T>` の値を不安全にスレッド間で誤って送信することが絶対ないよう保証してくれるのです。リスト 16-14 でこれを試みた時には、`the trait Send is not implemented for Rc<Mutex<i32>>` というエラーが出ました。`Send` の `Arc<T>` に切り替えたら、コードはコンパイルできたわけです。

完全に `Send` の型からなる型も全て自動的に `Send` と印付けされます。生ポインタを除くほとんどの基本型も `Send` で、生ポインタについては第 19 章で議論します。

16.4.2 Sync で複数のスレッドからのアクセスを許可する

`Sync` マーカートレイトは、`Sync` を実装した型は、複数のスレッドから参照されても安全であることを示唆します。言い換えると、`&T` (`T` への参照) が `Send` なら、型 `T` は `Sync` であり、参照が他のスレッドに安全に送信できることを意味します。`Send` 同様、基本型は `Sync` であり、`Sync` の型からのみ構成される型もまた `Sync` です。

`Send` ではなかったのと同じ理由で、スマートポインタの `Rc<T>` もまた `Sync` ではありません。`RefCell<T>` 型 (これについては第 15 章で話しました) と関連する `Cell<T>` 系についても `Sync` ではありません。`RefCell<T>` が実行時に行う借用チェックの実装は、スレッド安全ではないのです。スマートポインタの `Mutex<T>` は `Sync` で、「複数のスレッド間で `Mutex<T>` を共有する」節で見たように、複数のスレッドでアクセスを共有するのに使用することができます。

16.4.3 Send と Sync を手動で実装するのは非安全である

Send と Sync トレイトから構成される型は自動的に Send と Sync にもなるので、それらのトレイトを手動で実装する必要はありません。マーカートレイトとして、実装すべきメソッドさえも何もありません。並行性に関連する不変条件を強制することに役立つだけなのです。

これらのトレイトを手動で実装するには、**unsafe** な Rust コードを実装することが関わってきます。**unsafe** な Rust コードを使用することについては第 19 章で語ります; とりあえず、重要な情報は、Send と Sync ではない部品からなる新しい並行な型を構成するには、安全性保証を保持するために、注意深い思考が必要になるということです。The Rustonomicon には、これらの保証とそれを保持する方法についての情報がより多くあります。

訳注: 日本語版の The Rustonomicon はこちらです。

16.5 まとめ

この本において並行性を見かけるのは、これで最後ではありません: 第 20 章のプロジェクトでは、この章の概念をここで議論した微小な例よりもより現実的な場面で使用するでしょう。

前述のように、Rust による並行性の取扱いのごく一部のみが言語仕様なので、多くの並行性の解決策はクレートとして実装されています。これらは標準ライブラリよりも迅速に進化するので、マルチスレッド環境で使用するべき現在の最先端のクレートを必ずネットで検索してください。

Rust の標準ライブラリは、メッセージ受け渡しにチャンネルを、並行の文脈で安全に使用できる、`Mutex<T>` や `Arc<T>` などのスマートポインタ型を提供しています。型システムと借用チェッカーにより、これらの解決策を使用するコードがデータ競合や無効な参照に行き着かないことを保証してくれます。一旦コードをコンパイルすることができたら、他の言語ではありふれている追跡困難な類のバグなしに、複数のスレッドでも喜んで動くので安心できます。並行プログラミングは、もはや恐れるべき概念ではありません: 恐れることなく前進し、プログラムを並行にしてください!

次は、Rust プログラムが肥大化するにつれて問題をモデル化し、解決策を構造化する慣例的な方法について話します。さらに、Rust のイディオムがオブジェクト指向プログラミングで馴染み深いかもしれないイディオムにどのように関連しているかについても議論します。

第 17 章

Rust のオブジェクト指向プログラミング機能

オブジェクト指向プログラミング (OOP) は、プログラムをモデル化する手段です。オブジェクトは、1960 年代の Simula に端緒を発しています。このオブジェクトは、お互いにメッセージを渡す合うというアラン・ケイ (Alan Kay) のプログラミングアーキテクチャに影響を及ぼしました。彼は、このアーキテクチャを解説するために、オブジェクト指向プログラミングという用語を造語しました。多くの競合する定義が OOP が何かを解説しています; Rust をオブジェクト指向と区分する定義もありますし、しない定義もあります。この章では、広くオブジェクト指向と捉えられる特定の特徴と、それらの特徴がこなれた Rust でどう表現されるかを探究します。それからオブジェクト指向のデザインパターンを Rust で実装する方法を示し、そうすることと Rust の強みを活用して代わりの解決策を実装する方法の代償を議論します。

17.1 オブジェクト指向言語の特徴

言語がオブジェクト指向と考えられるのになければならない機能について、プログラミングコミュニティ内での総意はありません。Rust は OOP を含めた多くのプログラミングパラダイムに影響を受けています; 例えば、第 13 章で関数型プログラミングに由来する機能を探究しました。議論はあるかもしれませんが、OOP 言語は特定の一般的な特徴を共有しています。具体的には、オブジェクトやカプセル化、継承などです。それらの個々の特徴が意味するものと Rust がサポートしているかを見ましょう。

17.1.1 オブジェクトは、データと振る舞いを含む

エーリヒ・ガンマ (Enoch Gamma)、リチャード・ヘルム (Richard Helm)、ラルフ・ジョンソン (Ralph Johnson)、ジョン・ブリシディース (John Vlissides)(アディソン・ワズリー・プロ) により、

1994 年に書かれた**デザインパターン: 再利用可能なオブジェクト指向ソフトウェアの要素**という本は、俗に**4 人のギャングの本**(訳注: the Gang of Four book; GoF とよく略される)と呼ばれ、オブジェクト指向デザインパターンのカタログです。そこでは、OOP は以下のように定義されています:

オブジェクト指向プログラムは、オブジェクトで構成される。オブジェクトは、データとそのデータを処理するプロシージャを梱包している。このプロシージャは、典型的に**メソッド**または**オペレーション**と呼ばれる。

この定義を使用すれば、Rust はオブジェクト指向です: 構造体と `enum` にはデータがありますし、`impl` ブロックが構造体と `enum` にメソッドを提供します。メソッドのある構造体と `enum` は、オブジェクトとは呼ばれないものの、GoF のオブジェクト定義によると、同じ機能を提供します。

17.1.2 カプセル化は、実装詳細を隠蔽する

OOP とよく紐づけられる別の側面は、カプセル化の思想です。これは、オブジェクトの実装詳細は、そのオブジェクトを使用するコードにはアクセスできないことを意味します。故に、オブジェクトと相互作用する唯一の手段は、その公開 API を通してです; オブジェクトを使用するコードは、オブジェクトの内部に到達して、データや振る舞いを直接変更できるべきではありません。このために、プログラマはオブジェクトの内部をオブジェクトを使用するコードを変更する必要なく、変更しリファクタリングできます。

カプセル化を制御する方法は、第 7 章で議論しました: `pub` キーワードを使用して、自分のコードのどのモジュールや型、関数、メソッドを公開するか決められ、既定ではそれ以外のものは全て非公開になります。例えば、`i32` 値のベクタを含むフィールドのある `AveragedCollection` という構造体を定義できます。この構造体はさらに、ベクタの値の平均を含むフィールドを持てます。つまり、平均は誰かが必要とする度に、オンデマンドで計算する必要はないということです。言い換えれば、`AveragedCollection` は、計算した平均をキャッシュしてくれるわけです。リスト 17-1 には、`AveragedCollection` 構造体の定義があります:

ファイル名: `src/lib.rs`

```
pub struct AveragedCollection {  
    list: Vec<i32>,  
    average: f64,  
}
```

リスト 17-1: 整数のリストとコレクションの要素の平均を管理する `AveragedCollection` 構造体

構造体は、他のコードが使用できるように `pub` で印づけされていますが、構造体のフィールドは非公開のままです。値が追加されたりリストから削除される度に、平均も更新されることを保証したいので、今回の場合重要です。 `add` や `remove`、`average` メソッドを構造体を実装することでこれをしま

す。リスト 17-2 のようにですね:

ファイル名: src/lib.rs

```
# pub struct AveragedCollection {
#     list: Vec<i32>,
#     average: f64,
# }
impl AveragedCollection {
    pub fn add(&mut self, value: i32) {
        self.list.push(value);
        self.update_average();
    }

    pub fn remove(&mut self) -> Option<i32> {
        let result = self.list.pop();
        match result {
            Some(value) => {
                self.update_average();
                Some(value)
            },
            None => None,
        }
    }

    pub fn average(&self) -> f64 {
        self.average
    }

    fn update_average(&mut self) {
        let total: i32 = self.list.iter().sum();
        self.average = total as f64 / self.list.len() as f64;
    }
}
```

リスト 17-2: AveragedCollection の add、remove、average 公開メソッドの実装

add、remove、average の公開メソッドが AveragedCollection のインスタンスを変更する唯一の方法になります。要素が add メソッドを使用して list に追加されたり、remove メソッドを使用して削除されたりすると、各メソッドの実装が average フィールドの更新を扱う非公開の update_average メソッドも呼び出します。

list と average フィールドを非公開のままにしているので、外部コードが要素を list フィールドに直接追加したり削除したりする方法はありません; そうでなければ、average フィールドは、list が変更された時に同期されなくなる可能性があります。average メソッドは average フィールドの値を返し、外部コードに average を読ませるものの、変更は許可しません。

構造体 AveragedCollection の実装詳細をカプセル化したので、データ構造などの側面を将来容易に変更することができます。例を挙げれば、list フィールドに Vec<i32> ではなく HashSet<i32> を

使うこともできます。add、remove、average といった公開メソッドのシグニチャが同じである限り、AveragedCollection を使用するコードは変更する必要がないでしょう。代わりに list を公開にしたら、必ずしもこうはならないでしょう: HashSet<i32> と Vec<i32> は、要素の追加と削除に異なるメソッドを持っているので、外部コードが直接 list を変更しているなら、外部コードも変更しなければならない可能性が高いでしょう。

カプセル化が、言語がオブジェクト指向と考えられるのに必要な側面ならば、Rust はその条件を満たしています。コードの異なる部分で pub を使用するかしらないかという選択肢のおかげで、実装詳細をカプセル化することが可能になります。

17.1.3 型システム、およびコード共有としての継承

継承は、それによってオブジェクトが他のオブジェクトの定義から受け継ぐことができる機構であり、それ故に、再定義する必要なく、親オブジェクトのデータと振る舞いを得ます。

言語がオブジェクト指向言語であるために継承がなければならないのならば、Rust は違います。親構造体のフィールドとメソッドの実装を受け継ぐ構造体を定義する方法はありません。しかしながら、継承がプログラミング道具箱にあることに慣れていれば、そもそも継承に手を伸ばす理由によって、Rust で他の解決策を使用することができます。

継承を選択する理由は主に 2 つあります。1 つ目は、コードの再利用です: ある型に特定の振る舞いを実装し、継承により、その実装を他の型にも再利用できるわけです。デフォルトのトレイトメソッド実装を代わりに使用して、Rust コードを共有でき、これは、リスト 10-14 で Summary トレイトに summarize メソッドのデフォルト実装を追加した時に見かけました。Summary トレイトを実装する型は全て、追加のコードなく summarize メソッドが使用できます。これは、親クラスにメソッドの実装があり、継承した子クラスにもそのメソッドの実装があることと似ています。また、Summary トレイトを実装する時に、summarize メソッドのデフォルト実装を上書きすることもでき、これは、親クラスから継承したメソッドの実装を子クラスが上書きすることに似ています。

継承を使用するもう 1 つの理由は、型システムに関連しています: 親の型と同じ箇所で子供の型を使用できるようにです。これは、**多相性 (polymorphism)** と呼ばれ、複数のオブジェクトが特定の特徴を共有しているなら、実行時にお互いに代用できることを意味します。

17.1.4 多相性

多くの人にとって、多相性は、継承の同義語です。ですが、実際には複数の型のデータを取り扱えるコードを指すより一般的な概念です。継承について言えば、それらの型は一般的にはサブクラスです。

Rust は代わりにジェネリクスを使用して様々な可能性のある型を抽象化し、トレイト境界を使用してそれらの型が提供するものに制約を課します。これは時に、**パラメータ境界多相性 (bounded parametric polymorphism)** と呼ばれます。

継承は、近年、多くのプログラミング言語において、プログラムの設計解決策としては軽んじられています。というのも、しばしば必要以上にコードを共有してしまう危険性があるからです。サブクラスは、必ずしも親クラスの特徴を全て共有するべきではないのに、継承ではそうになってしまうのです。これにより、プログラムの設計の柔軟性を失わせることもあります。また、道理に合わなかったり、メソッドがサブクラスには適用されないために、エラーを発生させるようなサブクラスのメソッドの呼び出しを引き起こす可能性が出てくるのです。さらに、サブクラスに 1 つのクラスからだけ継承させる言語もあり、さらにプログラムの設計の柔軟性が制限されます。

これらの理由により、継承ではなくトレイトオブジェクトを使用して Rust は異なるアプローチを取っています。Rust において、トレイトオブジェクトがどう多相性を可能にするかを見ましょう。

17.2 トレイトオブジェクトで異なる型の値を許容する

第 8 章で、ベクタの 1 つの制限は、たった 1 つの型の要素を保持することしかできないことだと述べました。リスト 8-10 で整数、浮動小数点数、テキストを保持する列挙子のある `SpreadsheetCell enum` を定義して、これを回避しました。つまり、各セルに異なる型のデータを格納しつつ、1 行のセルを表すベクタを保持するということです。コンパイル時にわかるある固定されたセットの型にしかり取り替え可能な要素がならない場合には、完璧な解決策です。

ところが、時として、ライブラリの使用者が特定の場面で合法になる型のセットを拡張できるようにしたくなることがあります。これをどう実現する可能性があるか示すために、各アイテムに `draw` メソッドを呼び出してスクリーンに描画するという、GUI ツールで一般的なテクニックをしてあるリストの要素を走査する例の GUI ツールを作ります。GUI ライブラリの構造を含む `gui` と呼ばれるライブラリクレートを作成します。このクレートには、他人が使用できる `Button` や `TextField` などの型が包含されるかもしれません。さらに、`gui` の使用者は、描画可能な独自の型を作成したくなるでしょう：例えば、ある人は `Image` を追加し、別の人は `SelectBox` を追加するかもしれません。

この例のために本格的な GUI ライブラリは実装するつもりはありませんが、部品がどう組み合わせるかは示します。ライブラリの記述時点では、他のプログラマが作成したくなる可能性のある型全てを知る由もなければ、定義することもできません。しかし、`gui` は異なる型の多くの値を追いかけて、この異なる型の値に対して `draw` メソッドを呼び出す必要があることは、確かにわかっています。`draw` メソッドを呼び出した時に正確に何が起きるかを知っている必要はありません。値にそのメソッドが呼び出せるようあることだけわかっているだけでいいのです。

継承のある言語でこれを行うには、`draw` という名前のメソッドがある `Component` というクラスを定義するかもしれません。`Button`、`Image`、`SelectBox` などの他のクラスは、`Component` を継承し、故に `draw` メソッドを継承します。個々に `draw` メソッドをオーバーライドして、独自の振る舞いを定義するものの、フレームワークは、`Component` インスタンスであるかのようにその型全部を扱い、この型に対して `draw` を呼び出します。ですが、Rust に継承は存在しないので、使用者に新しい型で拡張してもらうために `gui` ライブラリを構成する他の方法が必要です。

17.2.1 一般的な振る舞いにトレイトを定義する

gui に欲しい振る舞いを実装するには、draw という 1 つのメソッドを持つ Draw というトレイトを定義します。それからトレイトオブジェクトを取るベクタを定義できます。トレイトオブジェクトは、指定したトレイトを実装するある型のインスタンスを指します。& 参照や Box<T> スマートポインタなどの、何らかのポインタを指定し、それから関係のあるトレイトを指定する (トレイトオブジェクトがポインタを使用しなければならない理由については、第 19 章の「動的サイズ決定型と Sized トレイト」節で語ります) ことでトレイトオブジェクトを作成します。ジェネリックまたは具体的な型があるところにトレイトオブジェクトは使用できます。どこでトレイトオブジェクトを使用しようと、Rust の型システムは、コンパイル時にその文脈で使用されているあらゆる値がそのトレイトオブジェクトのトレイトを実装していることを保証します。結果としてコンパイル時に可能性のある型を全て知る必要はなくなるのです。

Rust では、構造体と enum を他の言語のオブジェクトと区別するために「オブジェクト」と呼ぶことを避けていることに触れましたね。構造体や enum において、構造体のフィールドのデータや impl ブロックの振る舞いは分けられているものの、他の言語では 1 つの概念に押し込められるデータと振る舞いは、しばしばオブジェクトと分類されます。しかしながら、トレイトオブジェクトは、データと振る舞いをごちゃ混ぜにするという観点で他の言語のオブジェクトに近いです。しかし、トレイトオブジェクトは、データを追加できないという点で伝統的なオブジェクトと異なっています。トレイトオブジェクトは、他の言語のオブジェクトほど一般的に有用ではありません: その特定の目的は、共通の振る舞いに対して抽象化を行うことです。

リスト 17-3 は、draw という 1 つのメソッドを持つ Draw というトレイトを定義する方法を示しています:

ファイル名: src/lib.rs

```
pub trait Draw {  
    fn draw(&self);  
}
```

リスト 17-3: Draw トレイトの定義

この記法は、第 10 章のトレイトの定義方法に関する議論で馴染み深いはずですが。その次は、新しい記法です: リスト 17-4 では、components というベクタを保持する Screen という名前の構造体を定義しています。このベクタの型は Box<Draw> で、これはトレイトオブジェクトです; Draw トレイトを実装する Box 内部の任意の型に対する代役です。

ファイル名: src/lib.rs

```
# pub trait Draw {
```

```
#     fn draw(&self);
# }
#
pub struct Screen {
    pub components: Vec<Box<Draw>>,
}
```

リスト 17-4: Draw トrait を実装する Trait オブジェクトのベクタを保持する components フィールドがある Screen 構造体の定義

Screen 構造体に、components の各要素に対して draw メソッドを呼び出す run というメソッドを定義します。リスト 17-5 のようにですね:

ファイル名: src/lib.rs

```
# pub trait Draw {
#     fn draw(&self);
# }
#
# pub struct Screen {
#     pub components: Vec<Box<Draw>>,
# }
#
impl Screen {
    pub fn run(&self) {
        for component in self.components.iter() {
            component.draw();
        }
    }
}
```

リスト 17-5: 各コンポーネントに対して draw メソッドを呼び出す Screen の run メソッド

これは、Trait 境界を伴うジェネリックな型引数を使用する構造体を定義するのとは異なる動作をします。ジェネリックな型引数は、一度に 1 つの具体型にしか置き換えられないのに対して、Trait オブジェクトは、実行時に Trait オブジェクトに対して複数の具体型で埋めることができます。例として、ジェネリックな型と Trait 境界を使用してリスト 17-6 のように Screen 構造体を定義することもできました:

ファイル名: src/lib.rs

```
# pub trait Draw {
#     fn draw(&self);
# }
#
pub struct Screen<T: Draw> {
    pub components: Vec<T>,
}
```

```

}

impl<T> Screen<T>
where T: Draw {
    pub fn run(&self) {
        for component in self.components.iter() {
            component.draw();
        }
    }
}

```

リスト 17-6: ジェネリクスとトレイト境界を使用した Screen 構造体と run メソッドの対立的な実装

こうすると、全てのコンポーネントの型が Button だったり、TextField だったりする Screen のインスタンスに制限されてしまいます。絶対に同種のコレクションしか持つ予定がないのなら、ジェネリクスとトレイト境界は、定義がコンパイル時に具体的な型を使用するように単相化されるので、望ましいです。

一方で、メソッドがトレイトオブジェクトを使用すると、1 つの Screen インスタンスが、Box<Button> と Box<TextField> を含む Vec<T> を保持できます。この動作方法を見、それから実行時性能の裏の意味について語りましょう。

17.2.2 トレイトを実装する

さて、Draw トレイトを実装する型を追加しましょう。Button 型を提供します。ここも、実際に GUI ライブラリを実装することは、この本の範疇を超えているので、draw メソッドの本体は、何も有用な実装はしません。実装がどんな感じになるか想像するために、Button 構造体は、width、height、label フィールドを持っている可能性があります。リスト 17-7 に示したようにですね:

ファイル名: src/lib.rs

```

# pub trait Draw {
#     fn draw(&self);
# }
#
pub struct Button {
    pub width: u32,
    pub height: u32,
    pub label: String,
}

impl Draw for Button {
    fn draw(&self) {
        // code to actually draw a button
        // 実際にボタンを描画するコード
    }
}

```

```
}
```

リスト 17-7: Draw トレイトを実装するある Button 構造体

Button の width、height、label フィールドは、TextField 型のように、それらのフィールドプラス placeholder フィールドを代わりに持つ可能性のある他のコンポーネントのフィールドとは異なるでしょう。スクリーンに描画したい型のコンポーネントはそれぞれ Draw トレイトを実装しますが、Button がここですいているように、draw メソッドでは異なるコードを使用してその特定の型を描画する方法を定義しています (実際の GUI コードは、この章の範疇を超えるのでありませんが)。例えば、Button には、ユーザがボタンをクリックした時に起こることに関連するメソッドを含む、追加の impl ブロックがある可能性があります。この種のメソッドは、TextField のような型には適用されません。

ライブラリの使用者が、width、height、options フィールドのある SelectBox 構造体を実装しようと決めたら、SelectBox 型にも Draw トレイトを実装します。リスト 17-8 のようにですね:

ファイル名: src/main.rs

```
extern crate gui;
use gui::Draw;

struct SelectBox {
    width: u32,
    height: u32,
    options: Vec<String>,
}

impl Draw for SelectBox {
    fn draw(&self) {
        // code to actually draw a select box
        //セレクトボックスを実際に描画するコード
    }
}
```

リスト 17-8: gui を使用し、SelectBox 構造体に Draw トレイトを実装する別のクレート

ライブラリの使用者はもう、main 関数を書き、Screen インスタンスを生成できます。Screen インスタンスには、それぞれを Box<T> に放り込んでトレイトオブジェクト化して SelectBox と Button を追加できます。それから Screen インスタンスに対して run メソッドを呼び出すことができ、そうすると各コンポーネントの draw が呼び出されます。リスト 17-9 は、この実装を示しています:

ファイル名: src/main.rs

```
use gui::{Screen, Button};

fn main() {
    let screen = Screen {
```

```
components: vec![
    Box::new(SelectBox {
        width: 75,
        height: 10,
        options: vec![
            // はい
            String::from("Yes"),
            // 多分
            String::from("Maybe"),
            // いいえ
            String::from("No")
        ],
    }),
    Box::new(Button {
        width: 50,
        height: 10,
        // 了解
        label: String::from("OK"),
    }),
],
};

screen.run();
}
```

リスト 17-9: トレイトオブジェクトを使って同じトレイトを実装する異なる型の値を格納する

ライブラリを記述した時点では、誰かが `SelectBox` 型を追加する可能性があるなんて知りませんが、`Screen` の実装は、新しい型を処理し、描画することができました。何故なら、`SelectBox` は `Draw` 型、つまり、`draw` メソッドを実装しているからです。

この値の具体的な型ではなく、値が応答したメッセージにのみ関係するという概念は、動的型付け言語の**ダックタイピング**に似た概念です: アヒルのように歩き、鳴くならば、アヒルに違いないのです! リスト 17-5 の `Screen` の `run` の実装では、`run` は、各コンポーネントの実際の型がなんであるか知る必要はありません。コンポーネントが、`Button` や `SelectBox` のインスタンスであるかを確認することはなく、コンポーネントの `draw` メソッドを呼び出すだけです。components ベクタで `Box<Draw>` を値の型として指定することで、`Screen` を、`draw` メソッドを呼び出せる値を必要とするように定義できたのです。

17.2.2.1 注釈: ダックタイピングについて

ご存知かもしれませんが、ダックタイピングについて補足です。ダックタイピングとは、動的型付け言語や C++ のテンプレートで使用される、特定のフィールドやメソッドがあることを想定してコンパイルを行い、実行時に実際にあることを確かめるというプログラミング手法です。ダック・テストという思考法に由来するそうです。

ダックタイピングの利点は、XML や JSON など、厳密なスキーマがないことが多い形式を扱

いやすくなること、欠点は、実行してみるまで動くかどうか分からないことです。

トレイトオブジェクトと Rust の型システムを使用してダックタイピングを活用したコードに似たコードを書くことの利点は、実行時に値が特定のメソッドを実装しているか確認したり、値がメソッドを実装していない時にエラーになることを心配したりする必要は絶対になく、とにかく呼び出せることです。コンパイラは、値が、トレイトオブジェクトが必要としているトレイトを実装していなければ、コンパイルを通さないのです。

例えば、リスト 17-10 は、コンポーネントに String のある Screen を作成しようとした時に起こることを示しています:

ファイル名: src/main.rs

```
extern crate gui;
use gui::Screen;

fn main() {
    let screen = Screen {
        components: vec![
            Box::new(String::from("Hi")),
        ],
    };

    screen.run();
}
```

リスト 17-10: トレイトオブジェクトのトレイトを実装しない型の使用を試みる

String は Draw トレイトを実装していないので、このようなエラーが出ます:

```
error[E0277]: the trait bound `std::string::String: gui::Draw` is not satisfied
--> src/main.rs:7:13
   |
 7 |             Box::new(String::from("Hi")),
   |             ^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^ the trait gui::Draw is not
   |             implemented for `std::string::String`
   |
   = note: required for the cast to the object type `gui::Draw`
```

このエラーは、渡すことを意図していないものを Screen に渡しているので、異なる型を渡すべきか、Screen が draw を呼び出せるように String に Draw を実装するべきのどちらかであることを知らせてくれています。

17.2.3 トレイトオブジェクトは、ダイナミックディスパッチを行う

第 10 章の「ジェネリクスを使用したコードのパフォーマンス」節でジェネリクスに対してトレイト境界を使用した時に、コンパイラが行う単相化過程の議論を思い出してください: コンパイラは、

関数やメソッドのジェネリックでない実装を、ジェネリックな型引数の箇所に使用している具体的な型に対して生成するのです。単相化の結果吐かれるコードは、**スタティックディスパッチ**を行い、これは、コンパイル時にコンパイラがどのメソッドを呼び出しているかわかる時のことです。これは、**ダイナミックディスパッチ**とは対照的で、この時、コンパイラは、コンパイル時にどのメソッドを呼び出しているのかわかりません。ダイナミックディスパッチの場合、コンパイラは、どのメソッドを呼び出すか実行時に弾き出すコードを生成します。

トレイトオブジェクトを使用すると、コンパイラはダイナミックディスパッチを使用しなければなりません。コンパイラは、トレイトオブジェクトを使用しているコードで使用される可能性のある型全てを把握しないので、どの型に実装されたどのメソッドを呼び出すかわからないのです。代わりに実行時に、トレイトオブジェクト内でポインタを使用して、コンパイラは、どのメソッドを呼ぶか知ります。スタティックディスパッチでは行われないこの検索が起きる時には、実行時コストがあります。また、ダイナミックディスパッチは、コンパイラがメソッドのコードをインライン化することも妨げ、そのため、ある種の最適化が不可能になります。ですが、リスト 17-5 で記述し、リスト 17-9 ではサポートできたコードで追加の柔軟性を確かに得られたので、考慮すべき代償です。

17.2.4 トレイトオブジェクトには、オブジェクト安全性が必要

トレイトオブジェクトには、**オブジェクト安全**なトレイトしか作成できません。トレイトオブジェクトを安全にする特性全てを司る複雑な規則がありますが、実際には、2 つの規則だけが関係があります。トレイトは、トレイト内で定義されているメソッド全てに以下の特性があれば、オブジェクト安全になります。

- 戻り値の型が `Self` でない。
- ジェネリックな型引数がない。

`Self` キーワードは、トレイトやメソッドを実装しようとしている型の別名です。トレイトオブジェクトは、一旦、トレイトオブジェクトを使用したら、コンパイラにはそのトレイトを実装している具体的な型を知りようがないので、オブジェクト安全でなければなりません。トレイトメソッドが具体的な `Self` 型を返すのに、トレイトオブジェクトが `Self` の具体的な型を忘れてしまったら、メソッドが元の具体的な型を使用できる手段はなくなってしまいます。同じことがトレイトを使用する時に具体的な型引数で埋められるジェネリックな型引数に対しても言えます: 具体的な型がトレイトを実装する型の一部になるのです。トレイトオブジェクトの使用を通して型が忘却されたら、そのジェネリックな型引数を埋める型がなんなのか知る術はないのです。

メソッドがオブジェクト安全でないトレイトの例は、標準ライブラリの `Clone` トレイトです。`Clone` トレイトの `clone` メソッドのシグニチャは以下のような感じです:

```
pub trait Clone {  
    fn clone(&self) -> Self;  
}
```

String 型は Clone トレイトを実装していて、String のインスタンスに対して clone メソッドを呼び出すと、String のインスタンスが返ってきます。同様に、Vec<T> のインスタンスに対して clone を呼び出すと、Vec<T> のインスタンスが返ってきます。clone のシグニチャは、Self の代わりに入る型を知る必要があります。それが、戻り値の型になるからです。

コンパイラは、トレイトオブジェクトに関していつオブジェクト安全の規則を侵害するようなことを試みているかを示唆します。例えば、リスト 17-4 で Screen 構造体を実装して Draw トレイトではなく、Clone トレイトを実装した型を保持しようとしたとしましょう。こんな感じで:

```
pub struct Screen {  
    pub components: Vec<Box<Clone>>,  
}
```

こんなエラーになるでしょう:

```
error[E0038]: the trait `std::clone::Clone` cannot be made into an object  
(エラー: `std::clone::Clone` トレイトは、オブジェクトにすることはできません)  
--> src/lib.rs:2:5  
  |  
2 |     pub components: Vec<Box<Clone>>,  
  |     ^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^ the trait `std::clone::Clone` cannot be  
made into an object  
  |  
  = note: the trait cannot require that `Self : Sized`  
(注釈: このトレイトは、`Self : Sized` を満たせません)
```

このエラーは、このようにこのトレイトをトレイトオブジェクトとして使用することはできないことを意味しています。オブジェクト安全性についての詳細に興味があるのなら、Rust RFC 255 を参照されたい。

17.3 オブジェクト指向デザインパターンを実装する

ステートパターンは、オブジェクト指向デザインパターンの 1 つです。このパターンの肝は、値が一連のステートオブジェクトで表されるなんらかの内部状態を持ち、その内部の状態に基づいて値の振る舞いに変化するというものです。ステートオブジェクトは、機能を共有します: Rust では、もちろん、オブジェクトと継承ではなく、構造体とトレイトを使用します。各ステートオブジェクトは、自身の振る舞いと別の状態に変化すべき時を司ることに責任を持ちます。ステートオブジェクトを保持する値は、状態ごとの異なる振る舞いや、いつ状態が移行するかについては何も知りません。

ステートパターンを使用することは、プログラムの業務要件が変わる時、状態を保持する値のコードや、値を使用するコードを変更する必要はないことを意味します。ステートオブジェクトの 1 つのコードを更新して、規則を変更したり、あるいはおそらくステートオブジェクトを追加する必要しか

ないのです。ステートデザインパターンの例と、その Rust での使用方法を見ましょう。

ブログ記事のワークフローを少しずつ実装していきます。ブログの最終的な機能は以下のような感じになるでしょう：

1. ブログ記事は、空の草稿から始まる。
2. 草稿ができたら、査読が要求される。
3. 記事が承認されたら、公開される。
4. 公開されたブログ記事だけが表示する内容を返すので、未承認の記事は、誤って公開されない。

それ以外の記事に対する変更は、効果を持つべきではありません。例えば、査読を要求する前にブログ記事の草稿を承認しようとしたら、記事は、非公開の草稿のままになるべきです。

リスト 17-11 は、このワークフローをコードの形で示しています：これは、blog というライブラリクレートに実装する API の使用例です。まだ blog クレートを実装していないので、コンパイルはできません。

ファイル名: src/main.rs

```
extern crate blog;
use blog::Post;

fn main() {
    let mut post = Post::new();

    // 今日はお昼にサラダを食べた
    post.add_text("I ate a salad for lunch today");
    assert_eq!("", post.content());

    post.request_review();
    assert_eq!("", post.content());

    post.approve();
    assert_eq!("I ate a salad for lunch today", post.content());
}
```

リスト 17-11: blog クレートに欲しい振る舞いをデモするコード

ユーザが `Post::new` で新しいブログ記事の草稿を作成できるようにしたいです。それから、草稿状態の間にブログ記事にテキストを追加できるようにしたいです。承認前に記事の内容を即座に得ようとしたら、記事はまだ草稿なので、何も起きるべきではありません。デモ目的でコードに `assert_eq!` を追加しました。これに対する素晴らしい単体テストは、ブログ記事の草稿が `content` メソッドから空の文字列を返すことをアサートすることでしょうが、この例に対してテストを書くつもりはありません。

次に、記事の査読を要求できるようにしたく、また査読を待機している間は `content` に空の文字列を返してほしいです。記事が承認を受けたら、公開されるべきです。つまり、`content` を呼んだ時に

記事のテキストが返されるということです。

クレートから相互作用している唯一の型は、Post だけであることに注意してください。この型はステートパターンを使用し、記事がなり得る種々の状態を表す 3 つのステートオブジェクトのうちの 1 つになる値を保持します。草稿、査読待ち、公開中です。1 つの状態から別の状態への変更は、Post 型内部で管理されます。Post インスタンスのライブラリ使用者が呼び出すメソッドに呼応して状態は変化しますが、状態の変化を直接管理する必要はありません。また、ユーザは、査読前に記事を公開するなど状態を誤ることはありません。

17.3.1 Post を定義し、草稿状態で新しいインスタンスを生成する

ライブラリの実装に取り掛かりましょう！ なんらかの内容を保持する公開の Post 構造体が必要なのはわかるので、構造体の定義と、関連する公開の Post インスタンスを生成する new 関数から始めましょう。リスト 17-12 のようにですね。また、非公開の State トレイトも作成します。それから、Post は state という非公開のフィールドに、Option で Box<State> のトレイトオブジェクトを保持します。Option が必要な理由はすぐわかります。

ファイル名: src/lib.rs

```
pub struct Post {
    state: Option<Box<State>>,
    content: String,
}

impl Post {
    pub fn new() -> Post {
        Post {
            state: Some(Box::new(Draft {})),
            content: String::new(),
        }
    }
}

trait State {}

struct Draft {}

impl State for Draft {}
```

リスト 17-12: Post 構造体、新規 Post インスタンスを生成する new 関数、State トレイト、Draft 構造体の定義

State トレイトは、異なる記事の状態で共有される振る舞いを定義し、Draft、PendingReview、Published 状態は全て、State トレイトを実装します。今は、トレイトにメソッドは何もなく、Draft が記事の初期状態にしたい状態なので、その状態だけを定義することから始めます。

新しい Post を作る時、state フィールドは、Box を保持する Some 値にセットします。この Box が Draft 構造体の新しいインスタンスを指します。これにより、新しい Post を作る度に、草稿から始まることが保証されます。Post の state フィールドは非公開なので、Post を他の状態で作成する方法はないのです！ Post::new 関数では、content フィールドを新しい空の String にセットしています。

17.3.2 記事の内容のテキストを格納する

リスト 17-11 は、add_text というメソッドを呼び出し、ブログ記事のテキスト内容に追加される &str を渡せるようにしたいことを示しました。これを content フィールドを pub にして晒すのではなく、メソッドとして実装しています。これは、後ほど content フィールドデータの読まれ方を制御するメソッドを実装できることを意味しています。add_text メソッドは非常に素直なので、リスト 17-13 の実装を impl Post ブロックに追加しましょう：

ファイル名: src/lib.rs

```
# pub struct Post {
#     content: String,
# }
#
impl Post {
    // --snip--
    pub fn add_text(&mut self, text: &str) {
        self.content.push_str(text);
    }
}
```

リスト 17-13: 記事の content にテキストを追加する add_text メソッドを実装する

add_text メソッドは、self への可変参照を取ります。というのも、add_text を呼び出した Post インスタンスを変更しているからです。それから content の String に対して push_str を呼び出し、text 引数を渡して保存された content に追加しています。この振る舞いは、記事の状態によらないので、ステートパターンの一部ではありません。add_text メソッドは、state フィールドと全く相互作用しませんが、サポートしたい振る舞いの一部ではあります。

17.3.3 草稿の記事の内容は空であることを保証する

add_text を呼び出して記事に内容を追加した後でさえ、記事はまだ草稿状態なので、それでも content メソッドには空の文字列スライスを返してほしいです。リスト 17-11 の 8 行目で示したようにですね。とりあえず、この要求を実現する最も単純な方法で content メソッドを実装しましょう：常に空の文字列スライスを返すことです。一旦、記事の状態を変更する能力を実装したら、公開できるように、これを後ほど変更します。ここまで、記事は草稿状態にしかなり得ないので、記事の内容は常に空のはずです。リスト 17-14 は、この仮の実装を表示しています：

ファイル名: src/lib.rs

```
# pub struct Post {  
#     content: String,  
# }  
#  
impl Post {  
    // --snip--  
    pub fn content(&self) -> &str {  
        ""  
    }  
}
```

リスト 17-14: Post に常に空の文字列スライスを返す content の仮の実装を追加する

この追加された content メソッドとともに、リスト 17-11 の 8 行目までのコードは、想定通り動きます。

17.3.4 記事の査読を要求すると、状態が変化する

次に、記事の査読を要求する機能を追加する必要があり、これをする、状態が Draft から PendingReview に変わるはずです。リスト 17-15 はこのコードを示しています:

ファイル名: src/lib.rs

```
# pub struct Post {  
#     state: Option<Box<State>>,  
#     content: String,  
# }  
#  
impl Post {  
    // --snip--  
    pub fn request_review(&mut self) {  
        if let Some(s) = self.state.take() {  
            self.state = Some(s.request_review())  
        }  
    }  
}  
  
trait State {  
    fn request_review(self: Box<Self>) -> Box<State>;  
}  
  
struct Draft {}  
  
impl State for Draft {  
    fn request_review(self: Box<Self>) -> Box<State> {  
        Box::new(PendingReview {})  
    }  
}
```

```
}

struct PendingReview {}

impl State for PendingReview {
    fn request_review(self: Box<Self>) -> Box<State> {
        self
    }
}
```

リスト 17-15: Post と State トレイトに request_review メソッドを実装する

Post に self への変参照を取る request_review という公開メソッドを与えます。それから、Post の現在の状態に対して内部の request_review メソッドを呼び出し、この 2 番目の request_review が現在の状態を消費し、新しい状態を返します。

State トレイトに request_review メソッドを追加しました; このトレイトを実装する型は全て、これで request_review メソッドを実装する必要があります。メソッドの第 1 引数に self、&self、&mut self ではなく、self: Box<Self> としていることに注意してください。この記法は、型を保持する Box に対して呼ばれた時のみ、このメソッドが合法になることを意味しています。この記法は、Box<Self> の所有権を奪い、古い状態を無効化するので、Post の状態値は、新しい状態に変形できます。

古い状態を消費するために、request_review メソッドは、状態値の所有権を奪う必要があります。ここで Post の state フィールドの Option が問題になるのです: take メソッドを呼び出して、state フィールドから Some 値を取り出し、その箇所に None を残します。なぜなら、Rust は、構造体に未代入のフィールドを持たせてくれないからです。これにより、借用するのではなく、Post の state 値をムーブすることができます。それから、記事の state 値をこの処理の結果にセットするのです。

self.state = self.state.request_review(); のようなコードで直接 state 値の所有権を得るよう設定するのではなく、一時的に None に state をセットする必要があります。これにより、新しい状態に変形した後に、Post が古い state 値を使えないことが保証されるのです。

Draft の request_review メソッドは、新しい PendingReview 構造体の新しいボックスのインスタンスを返す必要があります、これが、記事が査読待ちの時の状態を表します。PendingReview 構造体も request_review メソッドを実装しますが、何も変形はしません。むしろ、自身を返します。というのも、既に PendingReview 状態にある記事の査読を要求したら、PendingReview 状態に留まるべきだからです。

ようやくステートパターンの利点が見えてき始めました: state 値が何であれ、Post の request_review メソッドは同じです。各状態は、独自の規則にのみ責任を持ちます。

Post の content メソッドを空の文字列スライス返してそのままにします。これで Post は PendingReview と Draft 状態になり得ますが、PendingReview 状態でも、同じ振る舞いが欲しいです。もうリスト 17-11 は 11 行目まで動くようになりました！

17.3.5 content の振る舞いを変化させる approve メソッドを追加する

approve メソッドは、request_review メソッドと類似するでしょう：状態が承認された時に、現在の状態があるべきと言う値に state をセットします。リスト 17-16 のようにですね：

ファイル名: src/lib.rs

```
# pub struct Post {
#     state: Option<Box<State>>,
#     content: String,
# }
#
impl Post {
    // --snip--
    pub fn approve(&mut self) {
        if let Some(s) = self.state.take() {
            self.state = Some(s.approve())
        }
    }
}

trait State {
    fn request_review(self: Box<Self>) -> Box<State>;
    fn approve(self: Box<Self>) -> Box<State>;
}

struct Draft {}

impl State for Draft {
#     fn request_review(self: Box<Self>) -> Box<State> {
#         Box::new(PendingReview {})
#     }
#
    // --snip--
    fn approve(self: Box<Self>) -> Box<State> {
        self
    }
}

struct PendingReview {}

impl State for PendingReview {
#     fn request_review(self: Box<Self>) -> Box<State> {
#         self
#     }
#
    // --snip--
    fn approve(self: Box<Self>) -> Box<State> {
        Box::new(Published {})
    }
}
```

```

}

struct Published {}

impl State for Published {
    fn request_review(self: Box<Self>) -> Box<State> {
        self
    }

    fn approve(self: Box<Self>) -> Box<State> {
        self
    }
}

```

リスト 17-16: Post と State トレイトに approve メソッドを実装する

State トレイトに approve メソッドを追加し、Published 状態という State を実装する新しい構造体を追加します。

request_review のように、Draft に対して approve メソッドを呼び出したら、self を返すので、何も効果はありません。PendingReview に対して approve を呼び出すと、Published 構造体の新しいボックス化されたインスタンスを返します。Published 構造体は State トレイトを実装し、request_review メソッドと approve メソッド両方に対して、自身を返します。そのような場合に記事は、Published 状態に留まるべきだからです。

さて、Post の content メソッドを更新する必要が出てきました: 状態が Published なら、記事の content フィールドの値を返したいのです; それ以外なら、空の文字列スライスを返したいです。リスト 17-17 のようにですね:

ファイル名: src/lib.rs

```

# trait State {
#     fn content<'a>(&self, post: &'a Post) -> &'a str;
# }
# pub struct Post {
#     state: Option<Box<State>>,
#     content: String,
# }
#
impl Post {
    // --snip--
    pub fn content(&self) -> &str {
        self.state.as_ref().unwrap().content(&self)
    }
    // --snip--
}

```

リスト 17-17: Post の content メソッドを更新して State の content メソッドに委譲する

目的は、これらの規則全てを `State` を実装する構造体の内部に押し留めることなので、`state` の値に対して `content` メソッドを呼び出し、記事のインスタンス (要するに、`self`) を引数として渡します。そして、`state` 値の `content` メソッドを使用したことから返ってきた値を返します。

`Option` に対して `as_ref` メソッドを呼び出します。値の所有権ではなく、`Option` 内部の値への参照が欲しいからです。`state` は `Option<Box<State>>` なので、`as_ref` を呼び出すと、`Option<&Box<State>>` が返ってきます。`as_ref` を呼ばなければ、`state` を関数引数の借用した `&self` からムーブできないので、エラーになるでしょう。

さらに `unwrap` メソッドを呼び出し、これは絶対にパニックしないことがわかっています。何故なら、`Post` のメソッドが、それらのメソッドが完了した際に `state` は常に `Some` 値を含んでいることを保証するからです。これは、コンパイラには理解不能であるものの、`None` 値が絶対にあり得ないといわれる第 9 章の「コンパイラよりも情報を握っている場合」節で語った一例です。

この時点で、`&Box<State>` に対して `content` を呼び出すと、参照外し型強制が `&` と `Box` に働くので、究極的に `content` メソッドが `State` トレイトを実装する型に対して呼び出されることになります。つまり、`content` を `State` トレイト定義に追加する必要があり、そこが現在の状態に応じてどの内容を返すべきかというロジックを配置する場所です。リスト 17-18 のようにですね:

ファイル名: `src/lib.rs`

```
# pub struct Post {
#     content: String
# }
trait State {
    // --snip--
    fn content<'a>(&self, post: &'a Post) -> &'a str {
        ""
    }
}

// --snip--
struct Published {}

impl State for Published {
    // --snip--
    fn content<'a>(&self, post: &'a Post) -> &'a str {
        &post.content
    }
}
```

リスト 17-18: `State` トレイトに `content` メソッドを追加する

空の文字列スライスを返すデフォルト実装を `content` メソッドに追加しています。これにより、`Draft` と `PendingReview` 構造体に `content` を実装する必要はありません。`Published` 構造体は、`content` メソッドをオーバーライドし、`post.content` の値を返します。

第 10 章で議論したように、このメソッドにはライフタイム注釈が必要なことに注意してください。

post への参照を引数として取り、その post の一部への参照を返しているの、返却される参照のライフタイムは、post 引数のライフタイムに関連します。

出来上がりました。要するに、リスト 17-11 はもう動くようになったのです！ ブログ記事ワークフローの規則でステートパターンを実装しました。その規則に関連するロジックは、Post 中に散乱するのではなく、ステートオブジェクトに息づいています。

17.3.6 ステートパターンの代償

オブジェクト指向のステートパターンを実装して各状態の時に記事がなり得る異なる種類の振る舞いをカプセル化する能力が、Rust にあることを示してきました。Post のメソッドは、種々の振る舞いについては何も知りません。コードを体系化する仕方によれば、公開された記事が振る舞うことのある様々な方法を知るには、1 箇所のみを調べればいいのです：Published 構造体の State トレイトの実装です。

ステートパターンを使用しない対立的な実装を作ることになったら、代わりに Post のメソッドか、あるいは記事の状態を確認し、それらの箇所（編注：Post のメソッドのことか）の振る舞いを変更する main コードでさえ、match 式を使用したかもしれません。そうすると、複数箇所を調べて記事が公開状態にあることの裏の意味全てを理解しなければならなくなります！ これは、追加した状態が増えれば、さらに上がるだけでしょう：各 match 式には、別のアームが必要になるのです。

ステートパターンでは、Post のメソッドと Post を使用する箇所で、match 式が必要になることはなく、新しい状態を追加するのにも、新しい構造体を追加し、その 1 つの構造体にトレイトメソッドを実装するだけでいいわけです。

ステートパターンを使用した実装は、拡張して機能を増やすことが容易です。ステートパターンを使用するコードの管理の単純さを確認するために、以下の提言を試してみてください：

- 記事の状態を PendingReview から Draft に戻す reject メソッドを追加する。
- 状態が Published に変化させられる前に approve を 2 回呼び出す必要があるようにする。
- 記事が Draft 状態の時のみテキスト内容をユーザが追加できるようにする。ヒント：ステートオブジェクトに内容について変わる可能性のあるものの責任を持たせつつも、Post を変更することには責任を持たせない。

ステートパターンの欠点の 1 つは、状態が状態間の遷移を実装しているの、状態の一部が密に結合した状態になってしまうことです。PendingReview と Published の間に、Scheduled のような別の状態を追加したら、代わりに PendingReview のコードを Scheduled に遷移するように変更しなければならいでしょう。状態が追加されても PendingReview を変更する必要がなければ、作業が減りますが、そうすれば別のデザインパターンに切り替えることになるでしょう。

別の欠点は、ロジックの一部を重複させてしまうことです。重複を除くためには、State トレイトの request_review と approve メソッドに self を返すデフォルト実装を試みる可能性があります；ですが、これはオブジェクト安全性を侵害するでしょう。というのも、具体的な self が一体なんなの

かトレイトには知りようがないからです。State をトレイトオブジェクトとして使用できるようにしたいので、メソッドにはオブジェクト安全になってもらう必要があります。

他の重複には、Post の request_review と approve メソッドの実装が似ていることが含まれます。両メソッドは Option の state の値に対する同じメソッドの実装に委譲していて、state フィールドの新しい値を結果にセットします。このパターンに従う Post のメソッドが多くあれば、マクロを定義して繰り返しを排除することも考慮する可能性があります (マクロについては付録 D を参照)。

オブジェクト指向言語で定義されている通り忠実にステートパターンを実装することで、Rust の強みをできるだけ発揮していません。blog クレートに対して行える無効な状態と遷移をコンパイルエラーにできる変更に向けてみましょう。

17.3.6.1 状態と振る舞いを型としてコード化する

ステートパターンを再考して別の代償を得る方法をお見せします。状態と遷移を完全にカプセル化して、外部のコードに知らせないようにするよりも、状態を異なる型にコード化します。結果的に、Rust の型検査システムが、公開記事のみが許可される箇所で草稿記事の使用を試みることをコンパイルエラーを発して阻止します。

リスト 17-11 の main の最初の部分を考えましょう：

ファイル名: src/main.rs

```
fn main() {  
    let mut post = Post::new();  
  
    post.add_text("I ate a salad for lunch today");  
    assert_eq!("", post.content());  
}
```

それでも、Post::new で草稿状態の新しい記事を生成することと記事の内容にテキストを追加する能力は可能にします。しかし、空の文字列を返す草稿記事の content メソッドを保持する代わりに、草稿記事は、content メソッドを全く持たないようにします。そうすると、草稿記事の内容を得ようとしたら、メソッドが存在しないというコンパイルエラーになるでしょう。その結果、誤ってプロダクションコードで草稿記事の内容を表示することが不可能になります。そのようなコードは、コンパイルさえできないからです。リスト 17-19 は Post 構造体、DraftPost 構造体、さらにメソッドの定義を示しています：

ファイル名: src/lib.rs

```
pub struct Post {  
    content: String,  
}  
  
pub struct DraftPost {  
    content: String,
```

```

}

impl Post {
    pub fn new() -> DraftPost {
        DraftPost {
            content: String::new(),
        }
    }

    pub fn content(&self) -> &str {
        &self.content
    }
}

impl DraftPost {
    pub fn add_text(&mut self, text: &str) {
        self.content.push_str(text);
    }
}

```

リスト 17-19: content メソッドのある Post と content メソッドのない DraftPost

Post と DraftPost 構造体どちらにもブログ記事のテキストを格納する非公開の content フィールドがあります。状態のコード化を構造体の型に移動したので、この構造体は最早 state フィールドを持ちません。Post は公開された記事を表し、content を返す content メソッドがあります。

それでも Post::new 関数はありますが、Post のインスタンスを返すのではなく、DraftPost のインスタンスを返します。content は非公開であり、Post を返す関数も存在しないので、現状 Post のインスタンスを生成することは不可能です。

DraftPost 構造体には、以前のようにテキストを content に追加できるよう add_text メソッドがありますが、DraftPost には content メソッドが定義されていないことに注目してください！ 従って、これでプログラムは、全ての記事が草稿記事から始まり、草稿記事は表示できる内容がないことを保証します。この制限をかいくぐる試みは、全てコンパイルエラーに落ちてくでしょう。

17.3.6.2 遷移を異なる型への変形として実装する

では、どうやって公開された記事を得るのでしょうか？ 公開される前に草稿記事は査読され、承認されなければならないという規則を強制したいです。査読待ち状態の記事は、それでも内容を表示すべきではありません。別の構造体 PendingReviewPost を追加し、DraftPost に PendingReviewPost を返す request_review メソッドを定義し、PendingReviewPost に Post を返す approve メソッドを定義してこれらの制限を実装しましょう。リスト 17-20 のようにですね:

ファイル名: src/lib.rs

```

# pub struct Post {
#     content: String,

```

```
# }
#
# pub struct DraftPost {
#     content: String,
# }
#
impl DraftPost {
    // --snip--

    pub fn request_review(self) -> PendingReviewPost {
        PendingReviewPost {
            content: self.content,
        }
    }
}

pub struct PendingReviewPost {
    content: String,
}

impl PendingReviewPost {
    pub fn approve(self) -> Post {
        Post {
            content: self.content,
        }
    }
}
```

リスト 17-20: DraftPost の request_review を呼び出すことで生成される PendingReviewPost と、PendingReviewPost を公開された Post に変換する approve メソッド

request_review と approve メソッドは self の所有権を奪い、故に DraftPost と PendingReviewPost インスタンスを消費し、それぞれ PendingReviewPost と公開された Post に変形します。このように、DraftPost インスタンスに request_review を呼んだ後には、DraftPost インスタンスは生きながらえず、以下同様です。PendingReviewPost 構造体には、content メソッドが定義されていないので、DraftPost 同様に、その内容を読もうとするとコンパイルエラーに落ち着きます。content メソッドが確かに定義された公開された Post インスタンスを得る唯一の方法が、PendingReviewPost に対して approve を呼び出すことであり、PendingReviewPost を得る唯一の方法が、DraftPost に request_review を呼び出すことなので、これでブログ記事のワークフローを型システムにコード化しました。

ですが、さらに main にも多少小さな変更を行わなければなりません。request_review と approve メソッドは、呼ばれた構造体を変更するのではなく、新しいインスタンスを返すので、let post = というシャドーイング代入をもっと追加し、返却されたインスタンスを保存する必要があります。また、草稿と査読待ち記事の内容を空の文字列でアサートすることも、する必要ありません: 最早、その状態にある記事の内容を使用しようとするコードはコンパイル不可能だからです。main の更新された

コードは、リスト 17-21 に示されています:

ファイル名: src/main.rs

```
extern crate blog;
use blog::Post;

fn main() {
    let mut post = Post::new();

    post.add_text("I ate a salad for lunch today");

    let post = post.request_review();

    let post = post.approve();

    assert_eq!("I ate a salad for lunch today", post.content());
}
```

リスト 17-21: ブログ記事ワークフローの新しい実装を使う main の変更

post を再代入するために main に行う必要のあった変更は、この実装がもう、全くオブジェクト指向のステートパターンに沿っていないことを意味します: 状態間の変形は最早、Post 実装内に完全にカプセル化されていません。ですが、型システムとコンパイル時に起きる型チェックのおかげでもう無効な状態があり得なくなりました。これにより、未公開の記事の内容が表示されるなどの特定のバグが、プロダクションコードに移る前に発見されることが保証されます。

blog クレートに関してこの節の冒頭で触れた追加の要求に提言される作業をそのままリスト 17-20 の後に試してみて、このバージョンのコードについてどう思うか確かめてください。この設計では、既に作業の一部が達成されている可能性があることに注意してください。

Rust は、オブジェクト指向のデザインパターンを実装する能力があるものの、状態を型システムにコード化するなどの他のパターンも、Rust では利用可能なことを確かめました。これらのパターンには、異なる代償があります。あなたが、オブジェクト指向のパターンには非常に馴染み深い可能性があるものの、問題を再考して Rust の機能の強みを活かすと、コンパイル時に一部のバグを回避できるなどの利益が得られることもあります。オブジェクト指向のパターンは、オブジェクト指向言語にはない所有権などの特定の機能により Rust では、必ずしも最善の解決策ではないでしょう。

17.4 まとめ

この章読了後に、あなたが Rust はオブジェクト指向言語であると考えるかどうかに関わらず、もうトレイトオブジェクトを使用して Rust でオブジェクト指向の機能の一部を得ることができると知っています。ダイナミックディスパッチは、多少の実行時性能と引き換えにコードに柔軟性を齎(もたら)してくれます。この柔軟性を利用してコードのメンテナンス性に寄与するオブジェクト指向パ

ターンを実装することができます。Rust にはまた、オブジェクト指向言語にはない所有権などの他の機能もあります。オブジェクト指向パターンは、必ずしも Rust の強みを活かす最善の方法にはありませんが、利用可能な選択肢の 1 つではあります。

次は、パターンを見ます。パターンも多くの柔軟性を可能にする Rust の別の機能です。本全体を通して僅かに見かけましたが、まだその全能力は目の当たりにしていません。さあ、行きましょう！

第 18 章

パターンとマッチング

パターンは、複雑であれ、単純であれ、**Rust** で型の構造に一致する特別な記法です。`match` 式や他の構文と組み合わせてパターンを使用すると、プログラムの制御フローをよりコントロールできます。パターンは、以下を組み合わせることで構成されます：

- リテラル
- 分配された配列、`enum`、構造体、タプル
- 変数
- ワイルドカード
- プレースホルダー

これらの要素が取り組んでいるデータの形を説明し、それから値に対してマッチを行い、プログラムに正しい値があって特定のコードを実行し続けられるかどうかを決定します。

パターンを使用するには、なんらかの値と比較します。パターンが値に合致したら、コードで値の部分を使用します。コイン並び替えマシンの例のような第 6 章でパターンを使用した `match` 式を思い出してください。値がパターンの形に当てはまったら、名前のある部品を使用できます。当てはまらなければ、パターンに紐づいたコードは実行されません。

この章は、パターンに関連するあらゆるものの参考文献です。パターンを使用するのが合法的箇所、論駁(ろんぱく)可能と論駁不可能なパターンの違い、目撃する可能性のある色々な種類のパターン記法を講義します。章の終わりまでに、パターンを使用して多くの概念をはっきり表現する方法を知りましょう。

18.1 パターンが使用されることのある箇所全部

Rust において、パターンはいろんな箇所に出現し、そうと気づかないうちにたくさん使用してきました！ この節は、パターンが合法的箇所全部を議論します。

18.1.1 match アーム

第 6 章で議論したように、パターンを match 式のアームで使います。正式には、match 式はキーワード match、マッチ対象の値、パターンとそのアームのパターンに値が合致したら実行される式からなる 1 つ以上のマッチアームとして定義されます。以下のように:

```
match VALUE {  
    PATTERN => EXPRESSION,  
    PATTERN => EXPRESSION,  
    PATTERN => EXPRESSION,  
}
```

match 式の必須事項の 1 つは、match 式の値の可能性全てが考慮されなければならないという意味で網羅的である必要があることです。全可能性をカバーしていると保証する 1 つの手段は、最後のアームに包括的なパターンを入れることです: 例えば、どんな値にも合致する変数名は失敗することがあり得ないので、故に残りの全ケースをカバーできます。

_ という特定のパターンは何にでもマッチしますが、変数には束縛されないので、よく最後のマッチアームに使用されます。例えば、_ パターンは、指定されていないあらゆる値を無視したい時に有用です。_ パターンについて詳しくは、この章の後ほど、「パターンで値を無視する」節で講義します。

18.1.2 条件分岐 if let 式

第 6 章で主に if let 式を 1 つの場合にしか合致しない match と同様のものを書く省略法として使用する方法を議論しました。オプションとして、if let には if let のパターンが合致しない時に走るコードを含む対応する else も用意できます。

リスト 18-1 は、if let、else if、else if let 式を混ぜてマッチさせることもできることを示しています。そうすると、パターンと 1 つの値しか比較することを表現できない match 式よりも柔軟性が高くなります。また、一連の if let、else if、else if let アームの条件は、お互いに関連している必要はありません。

リスト 18-1 のコードは、背景色が何になるべきかを決定するいくつかの条件を連なって確認するところを示しています。この例では、実際のプログラムではユーザ入力を受け付ける可能性のある変数をハードコードされた値で生成しています。

ファイル名: src/main.rs

```
fn main() {  
    let favorite_color: Option<&str> = None;  
    let is_tuesday = false;  
    let age: Result<u8, _> = "34".parse();  
  
    if let Some(color) = favorite_color {  
        // あなたのお気に入りの色、{}を背景色に使用します
```

```
println!("Using your favorite color, {}, as the background", color);
} else if is_tuesday {
    // 火曜日は緑の日!
    println!("Tuesday is green day!");
} else if let Ok(age) = age {
    if age > 30 {
        // 紫を背景色に使用します
        println!("Using purple as the background color");
    } else {
        // オレンジを背景色に使用します
        println!("Using orange as the background color");
    }
} else {
    // 青を背景色に使用します
    println!("Using blue as the background color");
}
}
```

リスト 18-1: if let、else if、else if let、else を混ぜる

ユーザがお気に入りの色を指定したら、その色が背景色になります。今日が火曜日なら、背景色は緑です。ユーザが年齢を文字列で指定し、数値として解析することができたら、背景色は、その数値の値によって紫かオレンジになります。どの条件も適用できなければ、背景色は青になります:

この条件分岐構造により、複雑な要件をサポートさせてくれます。ここにあるハードコードされた値では、この例は Using purple as the background color と出力するでしょう。

match アームのように if let もシャドーイングされた変数を導入できることがわかります: if let Ok(age) = age の行は、Ok 列挙子の中の値を含むシャドーイングされた新しい age 変数を導入します。つまり、if age > 30 という条件は、そのブロック内に配置する必要があります: これら 2 つの条件を組み合わせると、if let Ok(age) = age && age > 30 とすることはできません。30 と比較したいシャドーイングされた age は、波括弧で新しいスコープが始まるまで有効にならないのです。

if let 式を使うことの欠点は、コンパイラが網羅性を確認してくれないことです。一方で match 式ではしてくれます。最後の else ブロックを省略して故に、扱い忘れたケースがあっても、コンパイラは、ロジックバグの可能性を指摘してくれないでしょう。

18.1.3 while let 条件分岐ループ

if let と構成が似て、while let 条件分岐ループは、パターンが合致し続ける限り、while ループを走らせます。リスト 18-2 の例は、ベクタをスタックとして使用する while let ループを示し、ベクタの値をプッシュしたのとは逆順に出力します:

```
let mut stack = Vec::new();

stack.push(1);
stack.push(2);
```

```
stack.push(3);

while let Some(top) = stack.pop() {
    println!("{}", top);
}
```

リスト 18-2: while let ループを使って stack.pop() が Some を返す限り値を出力する

この例は、3, 2, そして 1 と出力します。pop メソッドはベクタの最後の要素を取り出して Some(value) を返します。ベクタが空なら、pop は None を返します。while ループは pop が Some を返す限り、ブロックのコードを実行し続けます。pop が None を返すと、ループは停止します。while let を使用してスタックから全ての要素を取り出せるのです。

18.1.4 for ループ

第 3 章で、Rust コードにおいては、for ループが最もありふれたループ構造だと述べましたが、for が取るパターンについてはまだ議論していませんでした。for ループにおいて、直接キーワード for に続く値がパターンなので、for x in y では、x がパターンになります。

リスト 18-3 は for ループでパターンを使用して for ループの一部としてタプルを分配あるいは、分解する方法をデモしています。

```
let v = vec!['a', 'b', 'c'];

for (index, value) in v.iter().enumerate() {
    println!("{}", value, index);
}
```

リスト 18-3: for ループでパターンを使用してタプルを分配する

リスト 18-3 のコードは、以下のように出力するでしょう：

```
a is at index 0
b is at index 1
c is at index 2
```

enumerate メソッドを使用してイテレータを改造し、値とその値のイテレータでの添え字をタプルに配置して生成しています。enumerate の最初の呼び出しは、タプル (0, 'a') を生成します。この値がパターン (index, value) とマッチさせられると、index は 0、value は 'a' になり、出力の最初の行を出力するのです。

18.1.5 let 文

この章に先駆けて、match と if let でパターンを使用することだけ明示的に議論してきましたが、実は let 文を含む他の箇所でもパターンを使用してきたのです。例として、この let での率直な変数代入を考えてください：

```
let x = 5;
```

この本を通してこのような let を何百回も使用してきて、お気付きではなかったかもしれませんが、パターンを使用していたのです！ より正式には、let 文はこんな見た目をしています：

```
let PATTERN = EXPRESSION;
```

let x = 5; のような変数名が PATTERN スロットにある文で、変数名は、ただ特に単純な形態のパターンなのです。Rust は式をパターンと比較し、見つかったあらゆる名前を代入します。故に、let x = 5; の例では、x は「ここでマッチしたものを変数 x に束縛する」ことを意味するパターンです。名前 x がパターンの全容なので、このパターンは実質的に「値が何であれ、全てを変数 x に束縛しろ」を意味します。

let のパターンマッチングの観点をよりはっきり確認するためにリスト 18-4 を考えてください。これは let でパターンを使用し、タプルを分配します。

```
let (x, y, z) = (1, 2, 3);
```

リスト 18-4: パターンを使用してタプルを分配し、3 つの変数を一度に生成する

ここでタプルに対してパターンをマッチさせています。Rust は値 (1, 2, 3) をパターン (x, y, z) と比較し、値がパターンに合致すると確認するので、1 を x に、2 を y に、3 を z に束縛します。このタプルパターンを個別の 3 つの変数パターンが内部にネストされていると考えることもできます。

パターンの要素数がタプルの要素数と一致しない場合、全体の型が一致せず、コンパイルエラーになるでしょう。例えば、リスト 18-5 は、3 要素のタプルを 2 つの変数に分配しようとしているところを表示していて、動きません。

```
let (x, y) = (1, 2, 3);
```

リスト 18-5: 変数がタプルの要素数と一致しないパターンを間違って構成する

このコードのコンパイルを試みると、このような型エラーに落ち着きます：

```
error[E0308]: mismatched types
--> src/main.rs:2:9
|
```

```

2 |     let (x, y) = (1, 2, 3);
  |           ^^^^^^ expected a tuple with 3 elements, found one with 2 elements
  |           (3要素のタプルを予期したのに、2要素のタプルが見つかりました)
  |
  = note: expected type `({integer}, {integer}, {integer})`
           found type `(_, _)`

```

タプルの値のうち 1 つ以上を無視したかったら、「パターンで値を無視する」節で見かけるように、`_` か `..` を使用できるでしょう。パターンに変数が多すぎるというのが問題なら、変数の数がタプルの要素数と一致するように変数を減らすことで、型を一致させることが解決策です。

18.1.6 関数の引数

関数の引数もパターンにできます。リスト 18-6 のコードは、型 `i32` の `x` という引数 1 つを取る `foo` という関数を宣言していますが、これまでに馴染み深くなっているはずです。

```

fn foo(x: i32) {
    // コードがここに来る
    // code goes here
}

```

リスト 18-6: 関数シグニチャが引数にパターンを使用している

`x` の部分がパターンです！ `let` のように、関数の引数でパターンにタプルを合致させられるでしょう。リスト 18-7 では、タプルを関数に渡したのでその中の値を分離しています。

ファイル名: `src/main.rs`

```

fn print_coordinates(&(x, y): &(i32, i32)) {
    // 現在の位置: ({}, {})
    println!("Current location: ({}, {})", x, y);
}

fn main() {
    let point = (3, 5);
    print_coordinates(&point);
}

```

リスト 18-7: タプルを分配する引数を伴う関数

このコードは `Current location: (3, 5)` と出力します。値 `&(3, 5)` はパターン `&(x, y)` と合致するので、`x` は値 3、`y` は値 5 になります。

また、クロージャの引数リストでも、関数の引数リストのようにパターンを使用することができます。第 13 章で議論したように、クロージャは関数に似ているからです。

この時点で、パターンを使用する方法をいくつか見てきましたが、パターンを使用できる箇所全部

で同じ動作をするわけではありません。パターンが論駁不可能でなければならない箇所もあります。他の状況では、論駁可能にもなり得ます。この 2 つの概念を次に議論します。

18.2 論駁可能性: パターンが合致しないかどうか

パターンには 2 つの形態があります: 論駁可能なものと論駁不可能なものです。渡される可能性のあるあらゆる値に合致するパターンは、**論駁不可能**なものです。文 `let x = 5;` の `x` は一例でしょう。`x` は何にでも合致し、故に合致に失敗することがあり得ないからです。なんらかの可能性のある値に対して合致しないことがあるパターンは、**論駁可能**なものです。一例は、式 `if let Some(x) = a_value` の `Some(x)` になるでしょう; `a_value` 変数の値が `Some` ではなく、`None` なら、`Some(x)` パターンは合致しないでしょうから。

関数の引数、`let` 文、`for` ループは、値が合致しなかったら何も意味のあることをプログラムが実行できないので、論駁不可能なパターンしか受け付けられません。`if let` と `while let` 式は、定義により失敗する可能性を処理することを意図したもので、論駁可能なパターンのみを受け付けます: 条件式の機能は、成功か失敗によって異なる振る舞いをする能力にあるのです。

一般的に、論駁可能と論駁不可能なパターンの差異について心配しなくてもいいはずですが; しかしながら、エラーメッセージで見かけた際に対応できるように、論駁可能性の概念に確かに慣れておく必要があります。そのような場合には、コードの意図した振る舞いに応じて、パターンかパターンを使用している構文を変える必要があるでしょう。

コンパイラが論駁不可能なパターンを必要とする箇所でも論駁可能なパターンを使用しようとしたら、何が起きるかとその逆の例を見ましょう。リスト 18-8 は `let` 文を示していますが、パターンには `Some(x)` と指定し、論駁可能なパターンです。ご想像通りかもしれませんが、このコードはコンパイルできません。

```
let Some(x) = some_option_value;
```

リスト 18-8: `let` で論駁可能なパターンを使用しようとする

`some_option_value` が `None` 値だったなら、パターン `Some(x)` に合致しないことになり、パターンが論駁可能であることを意味します。ですが、`let` 文は論駁不可能なパターンしか受け付けられません。`None` 値に対してコードができる合法的ことは何もないからです。コンパイル時にコンパイラは、論駁不可能なパターンが必要な箇所に論駁可能なパターンを使用しようとしたと文句を言うでしょう:

```
error[E0005]: refutable pattern in local binding: `None` not covered
(エラー: ローカル束縛に論駁可能なパターン: `None` がカバーされていません)
-->
|
3 | let Some(x) = some_option_value;
|     ^^^^^^^ pattern `None` not covered
```


パターン `Some(x)` で全ての合法的な値をカバーしなかった (できませんでした!) ので、コンパイラは当然、コンパイルエラーを生成します。

論駁不可能なパターンが必要な箇所に論駁可能なパターンがある問題を修正するには、パターンを使用するコードを変えればいいのです: `let` の代わりに `if let` を使用できます。そして、パターンが合致しなかったら、コードは合法に継続する手段を残して、波括弧内のコードを飛ばすだけでしょう。リスト 18-9 は、リスト 18-8 のコードの修正方法を示しています。

```
# let some_option_value: Option<i32> = None;
if let Some(x) = some_option_value {
    println!("{}", x);
}
```

リスト 18-9: `let` ではなく、`if let` と論駁可能なパターンを含むブロックを使用する

コードに逃げ道を与えました! このコードは完全に合法ですが、エラーを受け取らないで論駁不可能なパターンを使用することはできないことを意味します。リスト 18-10 のように、`x` のような常にマッチするパターンを `if let` に与えたら、コンパイルできないでしょう。

```
if let x = 5 {
    println!("{}", x);
};
```

リスト 18-10: `if let` で論駁不可能なパターンを使用してみる

コンパイラは、論駁不可能なパターンと `if let` を使用するなんて道理が通らないと文句を言います:

```
error[E0162]: irrefutable if-let pattern
(エラー: 論駁不可能なif-letパターン)
--> <anon>:2:8
   |
 2 | if let x = 5 {
   |           ^ irrefutable pattern
```

このため、マッチアームは、論駁不可能なパターンで残りのあらゆる値に合致すべき最後のアームを除いて、論駁可能なパターンを使用しなければなりません。コンパイラは、たった 1 つしかアームのない `match` で論駁不可能なパターンを使用させてくれますが、この記法は特別有用なわけではなく、より単純な `let` 文に置き換えることもできるでしょう。

今やパターンを使用すべき箇所と論駁可能と論駁不可能なパターンの違いを知ったので、パターンを生成するために使用できる全ての記法を講義しましょう。

18.3 パターン記法

本全体で、多くの種類のパターンの例を見かけてきました。この節では、パターンで合法的な記法全てを集め、それぞれを使用したくなる可能性がある理由について議論します。

18.3.1 リテラルにマッチする

第 6 章で目撃したように、パターンを直接リテラルに合致させられます。以下のコードが例を挙げています:

```
let x = 1;

match x {
  1 => println!("one"),      // 1
  2 => println!("two"),      // 2
  3 => println!("three"),    // 3
  _ => println!("anything"), // なんでも
}
```

このコードは、`x` の値が `1` なので、`one` を出力します。この記法は、コードが特定の具体的な値を得た時に行動を起こしてほしい時に有用です。

18.3.2 名前付き変数にマッチする

名前付き変数はどんな値にも合致する論駁不可能なパターンであり、この本の中で何度も使用してきました。ですが、名前付き変数を `match` 式で使うと、厄介な問題があります。`match` は新しいスコープを開始するので、`match` 式内のパターンの一部として宣言された変数は、あらゆる変数同様に `match` 構文外部の同じ名前の変数を覆い隠します。リスト 18-11 で、値 `Some(5)` の `x` という変数と値 `10` の変数 `y` を宣言しています。それから値 `x` に対して `match` 式を生成します。マッチアームのパターンと最後の `println!` を見て、このコードを実行したり、先まで読み進める前にこのコードが何を出力するか推測してみてください。

ファイル名: `src/main.rs`

```
fn main() {
  let x = Some(5);
  let y = 10;

  match x {
    // 50 だったよ
    Some(50) => println!("Got 50"),
    // マッチしたよ
    Some(y) => println!("Matched, y = {:?}", y),
  }
}
```

```

        // 既定のケース
        _ => println!("Default case, x = {:?}", x),
    }

    // 最後には x = {}, y = {}
    println!("at the end: x = {:?}", y = {:?}", x, y);
}

```

リスト 18-11: シャドーイングされた変数 *y* を導入するアームのある `match` 式

`match` 式を実行した時に起こることを見ていきましょう。最初のマッチアームのパターンは、*x* の定義された値に合致しないので、コードは継続します。

2 番目のマッチアームのパターンは、`Some` 値内部のあらゆる値に合致する新しい *y* という変数を導入します。`match` 式内の新しいスコープ内にいるので、これは新しい *y* 変数であり、最初に値 `10` で宣言した *y* ではありません。この新しい *y* 束縛は、`Some` 内のあらゆる値に合致し、*x* にあるものはこれです。故に、この新しい *y* は、*x* の中身の値に束縛されます。その値は `5` なので、そのアームの式が実行され、`Matched, y = 5` と出力されます。

x が `Some(5)` ではなく `None` 値だったなら、最初の 2 つのアームのパターンはマッチしなかったので、値はアンダースコアに合致したでしょう。アンダースコアのアームのパターンでは *x* 変数を導入しなかったので、その式の *x* は、まだシャドーイングされない外側の *x* のままです。この架空の場合、`match` は `Default case, x = None` と出力するでしょう。

`match` 式が完了すると、スコープが終わるので、中の *y* のスコープも終わります。最後の `println!` は `at the end: x = Some(5), y = 10` を生成します。

シャドーイングされた変数を導入するのではなく、外側の *x* と *y* の値を比較する `match` 式を生成するには、代わりにマッチガード条件式を使用する必要がありますでしょう。マッチガードについては、後ほど、「マッチガードで追加の条件式」節で語ります。

18.3.3 複数のパターン

`match` 式で `|` 記法で複数のパターンに合致させることができ、これは **or** を意味します。例えば、以下のコードは *x* の値をマッチアームに合致させ、最初のマッチアームには **or** 選択肢があり、*x* の値がそのアームのどちらかの値に合致したら、そのアームのコードが走ることを意味します：

```

let x = 1;

match x {
    // 1か2
    1 | 2 => println!("one or two"),
    // 3
    3 => println!("three"),
    // なんでも
    _ => println!("anything"),
}

```

このコードは、one or two を出力します。

18.3.4 `..=`で値の範囲に合致させる

`..=` 記法により、限度値を含む値の範囲にマッチさせることができます。以下のコードでは、パターンが範囲内のどれかの値に合致すると、そのアームが実行されます：

```
let x = 5;

match x {
  // 1から5まで
  1..=5 => println!("one through five"),
  // それ以外
  _ => println!("something else"),
}
```

`x` が 1、2、3、4 か 5 なら、最初のアームが合致します。この記法は、`|` 演算子を使用して同じ考えを表現するより便利です；`1..=5` ではなく、`|` を使用したら、`1 | 2 | 3 | 4 | 5` と指定しなければならないでしょう。範囲を指定する方が遥かに短いのです。特に 1 から 1000 までの値と合致させたいとかなら！

範囲は、数値か `char` 値でのみ許可されます。コンパイラがコンパイル時に範囲が空でないことを確認しているからです。範囲が空かそうでないかコンパイラにわかる唯一の型が `char` か数値なのです。

こちらは、`char` 値の範囲を使用する例です：

```
let x = 'c';

match x {
  // ASCII文字前半
  'a'..='j' => println!("early ASCII letter"),
  // ASCII文字後半
  'k'..='z' => println!("late ASCII letter"),
  // それ以外
  _ => println!("something else"),
}
```

コンパイラには `'c'` が最初のパターンの範囲にあることがわかり、early ASCII letter と出力されます。

18.3.5 分配して値を分解する

また、パターンを使用して構造体、`enum`、タプル、参照を分配し、これらの値の異なる部分を使用することもできます。各値を見ていきましょう。

18.3.5.1 構造体を分配する

リスト 18-12 は、`let` 文でパターンを使用して分解できる 2 つのフィールド `x` と `y` のある `Point` 構造体を示しています。

ファイル名: `src/main.rs`

```
struct Point {  
    x: i32,  
    y: i32,  
}  
  
fn main() {  
    let p = Point { x: 0, y: 7 };  
  
    let Point { x: a, y: b } = p;  
    assert_eq!(0, a);  
    assert_eq!(7, b);  
}
```

リスト 18-12: 構造体のフィールドを個別の変数に分配する

このコードは、`p` 変数の `x` と `y` フィールドの値に合致する変数 `a` と `b` を生成します。この例は、パターンの変数の名前は、構造体のフィールド名と合致する必要はないことを示しています。しかし、変数名をフィールド名と一致させてどの変数がどのフィールド由来のものなのか覚えやすくしたくなることは一般的なことです。

変数名をフィールドに一致させることは一般的であり、`let Point{ x: x, y: y } = p;` と書くことは多くの重複を含むので、構造体のフィールドと一致するパターンには省略法があります: 構造体のフィールドの名前を列挙するだけで、パターンから生成される変数は同じ名前になるのです。リスト 18-13 は、リスト 18-12 と同じ振る舞いをするコードを表示していますが、`let` パターンで生成される変数は `a` と `b` ではなく、`x` と `y` です。

ファイル名: `src/main.rs`

```
struct Point {  
    x: i32,  
    y: i32,  
}  
  
fn main() {  
    let p = Point { x: 0, y: 7 };  
  
    let Point { x, y } = p;  
    assert_eq!(0, x);  
    assert_eq!(7, y);  
}
```

リスト 18-13: 構造体フィールド省略法で構造体のフィールドを分配する

このコードは、`p` 変数の `x` と `y` フィールドに一致する変数 `x` と `y` を生成します。結果は、変数 `x` と `y` が `p` 構造体の値を含むというものです。

また、全フィールドに対して変数を生成するのではなく、リテラル値を構造体パターンの一部にして分配することもできます。そうすることで他のフィールドは分配して変数を生成しつつ、一部のフィールドは特定の値と一致するか確認できます。

リスト 18-14 は、`Point` 値を 3 つの場合に区別する `match` 式を表示しています: `x` 軸上の点 (`y = 0` ならそうなる)、`y` 軸上の点 (`x = 0`)、あるいはどちらでもありません。

ファイル名: `src/main.rs`

```
# struct Point {
#     x: i32,
#     y: i32,
# }
#
fn main() {
    let p = Point { x: 0, y: 7 };

    match p {
        // x軸上の{}
        Point { x, y: 0 } => println!("On the x axis at {}", x),
        // y軸上の{}
        Point { x: 0, y } => println!("On the y axis at {}", y),
        // どちらの軸上でもない: ({}), ({}))
        Point { x, y } => println!("On neither axis: ({}), ({})", x, y),
    }
}
```

リスト 18-14: 分配とリテラル値との一致を 1 つのパターンで

最初のアームは、`y` フィールドの値がリテラル `0` と一致するならマッチすると指定することで、`x` 軸上にあるどんな点とも一致します。このパターンはそれでも、このアームのコードで利用できる `x` 変数を生成します。

同様に、2 番目のアームは、`x` フィールドが `0` ならマッチすると指定することで `y` 軸上のどんな点とも一致し、`y` フィールドの値には変数 `y` を生成します。3 番目のアームは何もリテラルを指定しないので、それ以外のあらゆる `Point` に合致し、`x` と `y` フィールド両方に変数を生成します。

この例で、値 `p` は `0` を含む `x` の力で 2 番目のアームに一致するので、このコードは `On the y axis at 7` と出力します。

18.3.5.2 enum を分配する

例えば、第 6 章のリスト 6-5 で `Option<i32>` を分配するなどこの本の前半で `enum` を分配しました。明示的に触れなかった詳細の 1 つは、`enum` を分配するパターンは、`enum` 内に格納されているデータが定義されている手段に対応すべきということです。例として、リスト 18-15 では、リスト 6-2 から `Message` `enum` を使用し、内部の値それぞれを分配するパターンを伴う `match` を書いています。

ファイル名: `src/main.rs`

```
enum Message {
    Quit,
    Move { x: i32, y: i32 },
    Write(String),
    ChangeColor(i32, i32, i32),
}

fn main() {
    let msg = Message::ChangeColor(0, 160, 255);

    match msg {
        Message::Quit => {
            // Quit 列挙子には分配すべきデータがない
            println!("The Quit variant has no data to destructure.")
        },
        Message::Move { x, y } => {
            println!(
                // x 方向に {}, y 方向に {} だけ動く
                "Move in the x direction {} and in the y direction {}",
                x,
                y
            );
        }
        // テキストメッセージ: {}
        Message::Write(text) => println!("Text message: {}", text),
        Message::ChangeColor(r, g, b) => {
            println!(
                // 色を赤 {}, 緑 {}, 青 {} に変更
                "Change the color to red {}, green {}, and blue {}",
                r,
                g,
                b
            )
        }
    }
}
```

リスト 18-15: 異なる種類の値を保持する `enum` の列挙子を分配する

このコードは、Change the color to red 0, green 160, blue 255 と出力します。試しに msg の値を変更して、他のアームのコードが走る場所を確認してください。

Message::Quit のようなデータの無い **enum** 列挙子については、それ以上値を分配することができません。リテラル Message::Quit 値にマッチするだけで、変数はそのパターンに存在しません。

Message::Move のような構造体に似た **enum** の列挙子については、構造体と一致させるために指定するパターンと似たパターンを使用できます。列挙子の名前の後に波括弧を配置し、それから変数とともにフィールドを列挙するので、部品を分解してこのアームのコードで使います。ここでは、リスト 18-13 のように省略形態を使用しています。

1 要素タプルを保持する Message::Write や、3 要素タプルを保持する Message::ChangeColor のようなタプルに似た **enum** の列挙子について、パターンは、タプルと一致させるために指定するパターンと類似しています。パターンの変数の数は、マッチ対象の列挙子の要素数と一致しなければなりません。

18.3.5.3 参照を分配する

パターンとマッチさせている値に参照が含まれる場合、値から参照を分配する必要があり、パターンに & を指定することでそうすることができます。そうすることで参照を保持する変数を得るのではなく、参照が指している値を保持する変数が得られます。このテクニックは、参照を走査するイテレータがあるクロージャで特に役に立ちますが、そのクロージャで参照ではなく、値を使用したいです。

リスト 18-16 の例は、ベクタの Point インスタンスへの参照を走査し、x と y 値に簡単に計算を行えるように、参照と構造体を分配します。

```
# struct Point {
#   x: i32,
#   y: i32,
# }
#
let points = vec![
  Point { x: 0, y: 0 },
  Point { x: 1, y: 5 },
  Point { x: 10, y: -3 },
];

let sum_of_squares: i32 = points
  .iter()
  .map(|&Point { x, y }| x * x + y * y)
  .sum();
```

リスト 18-16: 構造体への参照を構造体のフィールド値に分配する

このコードは、値 135 を保持する変数 sum_of_squares を返してきて、これは、x 値と y 値を 2 乗し、足し合わせ、points ベクタの Point それぞれの結果を足して 1 つの数値にした結果です。

&Point { x, y } に & が含まれていなかったら、型不一致エラーが発生していたでしょう。iter は

そうすると、実際の値ではなく、ベクタの要素への参照を走査するからです。そのエラーはこんな見た目でしょう：

```
error[E0308]: mismatched types
-->
|
14 |         .map(|Point { x, y }| x * x + y * y)
|           ^^^^^^^^^^^^^^^^^ expected &Point, found struct `Point`
|
= note: expected type `&Point`
       found type `Point`
```

このエラーは、コンパイラがクロージャに `&Point` と一致することを期待しているのに、`Point` への参照ではなく、`Point` 値に直接一致させようとしたことを示唆しています。

18.3.5.4 構造体とタプルを分配する

分配パターンをさらに複雑な方法で混ぜてマッチさせ、ネストすることができます。以下の例は、構造体とタプルをタプルにネストし、全ての基本的な値を取り出している複雑な分配を表示しています：

```
# struct Point {
#     x: i32,
#     y: i32,
# }
#
let ((feet, inches), Point {x, y}) = ((3, 10), Point { x: 3, y: -10 });
```

このコードは、複雑な型を構成する部品に分配させてくれるので、興味のある値を個別に使用できます。

パターンで分配することは、構造体の各フィールドからの値のように、複数の値をお互いに区別して使用する便利な方法です。

18.3.6 パターンの値を無視する

`match` の最後のアームのように、パターンの値を無視して実際には何もしないけれども、残りの全ての値の可能性を考慮する包括的なものを得ることは、時として有用であると認識しましたね。値全体やパターンの一部の値を無視する方法はいくつかあります： `_` パターンを使用すること（もう見かけました）、他のパターン内で `_` パターンを使用すること、アンダースコアで始まる名前を使用すること、`..` を使用して値の残りの部分を無視することです。これらのパターンそれぞれを使用する方法と理由を探究しましょう。

18.3.6.1 `_` で値全体を無視する

どんな値にも一致するけれども、値を束縛しないワイルドカードパターンとしてアンダースコア、`_` を使用してきました。アンダースコア、`_` パターンは特に `match` 式の最後のアームとして役に立ちま

すが、関数の引数も含めてあらゆるパターンで使えます。リスト 18-17 に示したようにですね。

ファイル名: src/main.rs

```
fn foo(_: i32, y: i32) {  
    // このコードは、y 引数を使うだけです: {}  
    println!("This code only uses the y parameter: {}", y);  
}  
  
fn main() {  
    foo(3, 4);  
}
```

リスト 18-17: 関数シグニチャで `_` を使用する

このコードは、最初の引数として渡された値 3 を完全に無視し、This code only uses the y parameter: 4 と出力します。

特定の関数の引数が最早必要ないほとんどの場合、未使用の引数が含まれないようにシグニチャを変更するでしょう。関数の引数を見捨てるのが特に有用なケースもあり、例えば、トレイトを実装する際、特定の型シグニチャが必要だけれども、自分の実装の関数本体では引数の 1 つが必要ない時などです。そうすれば、代わりに名前を使った場合のように、未使用関数引数についてコンパイラが警告することはないでしょう。

18.3.6.2 ネストされた `_` で値の一部を見捨てる

また、他のパターンの内部で `_` を使用して、値の一部だけを見捨てることもでき、例えば、値の一部だけを確認したいけれども、走らせたい対応するコードでは他の部分を使用することがない時などです。リスト 18-18 は、設定の値を管理する責任を負ったコードを示しています。業務要件は、ユーザが既存の設定の変更を上書きすることはできないべきだけれども、設定を解除し、現在設定がされていなければ設定に値を与えられるというものです。

```
let mut setting_value = Some(5);  
let new_setting_value = Some(10);  
  
match (setting_value, new_setting_value) {  
    (Some(_), Some(_)) => {  
        // 既存の値の変更を上書きできません  
        println!("Can't overwrite an existing customized value");  
    }  
    _ => {  
        setting_value = new_setting_value;  
    }  
}  
  
// 設定は{:?}です  
println!("setting is {:?}", setting_value);
```

リスト 18-18: `Some` 内の値を使用する必要がない時に `Some` 列挙子と合致するパターンでアンダースコアを使用する

このコードは、`Can't overwrite an existing customized value`、そして `setting is Some(5)` と出力するでしょう。最初のマッチアームで、どちらの `Some` 列挙子内部の値にも合致させたり、使用する必要はありませんが、`setting_value` と `new_setting_value` が `Some` 列挙子の場合を確かに確認する必要があります。その場合、何故 `setting_value` を変更しないかを出力し、変更しません。

2 番目のアームの `_` パターンで表現される他のあらゆる場合 (`setting_value` と `new_setting_value` どちらかが `None` なら) には、`new_setting_value` に `setting_value` になってほしいです。

また、1 つのパターンの複数箇所でアンダースコアを使用して特定の値を無視することもできます。リスト 18-19 は、5 要素のタプルで 2 番目と 4 番目の値を無視する例です。

```
let numbers = (2, 4, 8, 16, 32);

match numbers {
  (first, _, third, _, fifth) => {
    // 何らかの数値: {}, {}, {}
    println!("Some numbers: {}, {}, {}", first, third, fifth)
  },
}
```

リスト 18-19: タプルの複数の部分を無視する

このコードは、`Some numbers: 2, 8, 32` と出力し、値 `4` と `16` は無視されます。

18.3.6.3 名前を `_` で始めて未使用の変数を無視する

変数を作っているのにどこでも使用していなければ、バグかもしれないのでコンパイラは通常、警告を発します。しかし時として、まだ使用しない変数を作るのが有用なこともあります。プロトタイプを開発していたり、プロジェクトを始めた直後だったりなどです。このような場面では、変数名をアンダースコアで始めることで、コンパイラに未使用変数について警告しないよう指示することができます。リスト 18-20 で 2 つの未使用変数を生成していますが、このコードを実行すると、そのうちの 1 つにしか警告が出ないはずです。

ファイル名: `src/main.rs`

```
fn main() {
  let _x = 5;
  let y = 10;
}
```

リスト 18-20: アンダースコアで変数名を始めて未使用変数警告が出るのを回避する

ここで、変数 `y` を使用していないことに対して警告が出ていますが、アンダースコアが接頭辞になっている変数には、使用していないという警告が出ていません。

`_` だけを使うのとアンダースコアで始まる名前を使うことには微妙な違いがあることに注意してください。`_x` 記法はそれでも、値を変数に束縛する一方で、`_` は全く束縛しません。この差異が問題になる場合を示すために、リスト 18-21 はエラーを提示するでしょう。

```
// こんにちは!  
let s = Some(String::from("Hello!"));  
  
if let Some(_s) = s {  
    // 文字列が見つかりました  
    println!("found a string");  
}  
  
println!("{:?}", s);
```

リスト 18-21: それでも、アンダースコアで始まる未使用の変数は値を束縛し、値の所有権を奪う可能性がある

それでも `s` 値は `_s` にムーブされ、再度 `s` を使用できなくなるので、エラーを受け取るでしょう。ですが、アンダースコアを単独で使用すれば、値を束縛することは全くありません。`s` が `_` にムーブされないので、リスト 18-22 はエラーなくコンパイルできます。

```
let s = Some(String::from("Hello!"));  
  
if let Some(_) = s {  
    println!("found a string");  
}  
  
println!("{:?}", s);
```

リスト 18-22: アンダースコアを使用すると、値を束縛しない

このコードは、`s` を何にも束縛しないので、ただ単に上手く動きます。つまり、ムーブされないのです。

18.3.6.4 ... で値の残りの部分を無視する

多くの部分がある値では、`..` 記法を使用していくつかの部分だけを使用して残りを無視し、無視する値それぞれにアンダースコアを列挙する必要性を回避できます。`..` パターンは、パターンの残りで明示的にマッチさせていない値のどんな部分も無視します。リスト 18-23 では、3 次元空間で座標を保持する `Point` 構造体があります。`match` 式で `x` 座標のみ処理し、`y` と `z` フィールドの値は無視したいです。

```
struct Point {
```

```
x: i32,  
y: i32,  
z: i32,  
}  
  
let origin = Point { x: 0, y: 0, z: 0 };  
  
match origin {  
    Point { x, .. } => println!("x is {}", x),  
}
```

リスト 18-23: `..` で `x` 以外の `Point` のフィールド全てを無視する

`x` 値を列挙し、それから `..` パターンを含んでいるだけです。これは、`y: _` や `z: _` と列挙しなければいけないのに比べて、手っ取り早いです。特に 1 つや 2 つのフィールドのみが関連する場面で多くのフィールドがある構造体に取り掛かっている時には。

`..` 記法は、必要な数だけ値に展開されます。リスト 18-24 は、タプルで `..` を使用する方法を表示しています。

ファイル名: `src/main.rs`

```
fn main() {  
    let numbers = (2, 4, 8, 16, 32);  
  
    match numbers {  
        (first, .., last) => {  
            println!("Some numbers: {}, {}", first, last);  
        },  
    }  
}
```

リスト 18-24: タプルの最初と最後の値にだけ合致し、他の値を無視する

このコードにおいて、最初と最後の値は `first` と `last` に合致します。`..` は、途中のものの全部に合致し、無視します。

しかしながら、`..` を使うのは明確でなければなりません。どの値がマッチしてどの値が無視されるべきかが不明瞭なら、コンパイラはエラーを出します。リスト 18-25 は、`..` を曖昧に使用する例なので、コンパイルできません。

ファイル名: `src/main.rs`

```
fn main() {  
    let numbers = (2, 4, 8, 16, 32);  
  
    match numbers {  
        (.., second, ..) => {
```

```
println!("Some numbers: {}", second)
    },
    }
}
```

リスト 18-25: .. を曖昧に使用しようとする試み

この例をコンパイルすると、こんなエラーが出ます:

```
error: `..` can only be used once per tuple or tuple struct pattern
(エラー: `..` は、タプルやタプル構造体パターン1つにつき、1回しか使用できません)
--> src/main.rs:5:22
   |
5 |         (... , second, ..) => {
   |                        ^^
```

コンパイラが、second の値に合致する前にタプルの幾つの値を無視し、それからそれによってさらに幾つの値を無視するかを決めることは不可能です。このコードは、2 を無視し、second に 4 を束縛し、それから 8、16、32 を無視したり、2 と 4 を無視して second に 8 を束縛し、それから 16 と 32 を無視するなどを意味することもあるでしょう。変数名の second は、コンパイラにとってなんの特別な意味もなく、このように 2 箇所でも .. を使うのは曖昧なので、コンパイルエラーになります。

18.3.7 ref と ref mut でパターンに参照を生成する

ref を使用して値の所有権がパターンの変数にムーブされないように、参照を生成することに目を向けましょう。通常、パターンにマッチさせると、パターンで導入された変数は値に束縛されます。Rust の所有権規則は、その値が match などパターンを使用しているあらゆる場所にムーブされることを意味します。リスト 18-26 は、変数があるパターンとそれから match の後に値全体を println! 文で後ほど使用する match の例を示しています。このコードはコンパイルに失敗します。robot_name 値の一部の所有権が、最初の match アームのパターンの name 変数に移るからです。

```
let robot_name = Some(String::from("Bors"));

match robot_name {
    // 名前が見つかりました: {}
    Some(name) => println!("Found a name: {}", name),
    None => (),
}

// robot_name は: {:?}
println!("robot_name is: {:?}", robot_name);
```

リスト 18-26: match アームパターンで変数を生成すると、値の所有権が奪われる

robot_name の一部の所有権が name にムーブされたので、robot_name に最早所有権がないために、

match の後に println! で最早 robot_name を使用することは叶いません。

このコードを修正するために、Some(name) パターンに所有権を奪わせるのではなく、robot_name のその部分を借用させたいです。パターンの外なら、値を借用する手段は、& で参照を生成することだと既にご認識でしょうから、解決策は Some(name) を Some(&name) に変えることだとお考えかもしれませんね。

しかしながら、「分配して値を分解する」節で見かけたように、パターンにおける & 記法は参照を生成せず、値の既存の参照にマッチします。パターンにおいて & には既にその意味があるので、& を使用してパターンで参照を生成することはできません。

その代わりに、パターンで参照を生成するには、リスト 18-27 のように、新しい変数の前に ref キーワードを使用します。

```
let robot_name = Some(String::from("Bors"));

match robot_name {
    Some(ref name) => println!("Found a name: {}", name),
    None => (),
}

println!("robot_name is: {:?}", robot_name);
```

リスト 18-27: パターンの変数が値の所有権を奪わないように参照を生成する

robot_name の Some 列挙子の値が match にムーブされないので、この例はコンパイルできます; match はムーブするのではなく、robot_name のデータへの参照を取っただけなのです。

パターンで合致した値を可変化できるように可変参照を生成するには、&mut の代わりに ref mut を使用します。理由は今度も、パターンにおいて、前者は既存の可変参照にマッチするためにあり、新しい参照を生成しないからです。リスト 18-28 は、可変参照を生成するパターンの例です。

```
let mut robot_name = Some(String::from("Bors"));

match robot_name {
    // 別の名前
    Some(ref mut name) => *name = String::from("Another name"),
    None => (),
}

println!("robot_name is: {:?}", robot_name);
```

リスト 18-28: ref mut を使用して、パターンの一部として値への可変参照を生成する

この例はコンパイルが通り、robot_name is: Some("Another name") と出力するでしょう。name は可変参照なので、値を可変化するためにマッチアーム内で * 演算子を使用して参照外しする必要があります。

18.3.8 マッチガードで追加の条件式

マッチガードは、match アームのパターンの後に指定されるパターンマッチングとともに、そのアームが選択されるのにマッチしなければならない追加の if 条件です。マッチガードは、1 つのパターン単独でできるよりも複雑な考えを表現するのに役に立ちます。

この条件は、パターンで生成された変数を使用できます。リスト 18-29 は、最初のアームにパターン `Some(x)` と `if x < 5` というマッチガードもある `match` を示しています。

```
let num = Some(4);

match num {
    // 5未満です: {}
    Some(x) if x < 5 => println!("less than five: {}", x),
    Some(x) => println!("{}", x),
    None => (),
}
```

リスト 18-29: パターンにマッチガードを追記する

この例は、`less than five: 4` と出力します。`num` が最初のアームのパターンと比較されると、`Some(4)` は `Some(x)` に一致するので、マッチします。そして、マッチガードが `x` の値が 5 未満か確認し、そうなっているのが、最初のアームが選択されます。

代わりに `num` が `Some(10)` だったなら、最初のアームのマッチガードは偽になったでしょう。**10** は 5 未満ではないからです。Rust はそうしたら 2 番目のアームに移動し、マッチするでしょう。2 番目のアームにはマッチガードがなく、それ故にあらゆる `Some` 列挙子に一致するからです。

パターン内で `if x < 5` という条件を表現する方法はありませんので、マッチガードにより、この論理を表現する能力が得られるのです。

リスト 18-11 において、マッチガードを使用すれば、パターンがシャドーイングする問題を解決できると述べました。`match` の外側の変数を使用するのではなく、`match` 式のパターン内部では新しい変数が作られることを思い出してください。その新しい変数は、外側の変数の値と比較することができないことを意味しました。リスト 18-30 は、マッチガードを使ってこの問題を修正する方法を表示しています。

ファイル名: `src/main.rs`

```
fn main() {
    let x = Some(5);
    let y = 10;

    match x {
        Some(50) => println!("Got 50"),
        Some(n) if n == y => println!("Matched, n = {:?}", n),
    }
}
```



```

        _ => println!("Default case, x = {:?}", x),
    }

    println!("at the end: x = {:?}", y = {:?}", x, y);
}

```

リスト 18-30: マッチガードを使用して外側の変数と等しいか確認する

このコードは今度は、Default case, x = Some(5) と出力するでしょう。2 番目のマッチアームのパターンは、外側の y を覆い隠してしまう新しい変数 y を導入せず、マッチガード内で外側の y を使用できることを意味します。外側の y を覆い隠してしまう Some(y) としてパターンを指定するのではなく、Some(n) を指定しています。これにより、何も覆い隠さない新しい変数 n が生成されます。match の外側には n 変数は存在しないからです。

マッチガードの if n == y はパターンではなく、故に新しい変数を導入しません。この y は、新しいシャドーイングされた y ではなく、外側の y **であり**、n と y を比較することで、外側の y と同じ値を探することができます。

また、マッチガードで **or** 演算子の | を使用して複数のパターンを指定することもできます; マッチガードの条件は全てのパターンに適用されます。リスト 18-31 は、| を使用するパターンとマッチガードを組み合わせる優先度を示しています。この例で重要な部分は、if y は 6 にしか適用されないように見えるのに、if y マッチガードが 4、5、**そして** 6 に適用されることです。

```

let x = 4;
let y = false;

match x {
    // はい
    4 | 5 | 6 if y => println!("yes"),
    // いいえ
    _ => println!("no"),
}

```

リスト 18-31: 複数のパターンとマッチガードを組み合わせる

マッチの条件は、x の値が 4、5、6 に等しく**かつ** y が true の場合だけにアームがマッチすると宣言しています。このコードが走ると、最初のアームのパターンは x が 4 なので、合致しますが、マッチガード if y は偽なので、最初のアームは選ばれません。コードは 2 番目のアームに移動して、これがマッチし、このプログラムは no と出力します。理由は、if 条件が最後の値の 6 だけでなく、パターン全体 4 | 5 | 6 に適用されるからです。言い換えると、パターンと関わるマッチガードの優先度は、以下のように振る舞います:

```
(4 | 5 | 6) if y => ...
```

以下のようにではありません:

```
4 | 5 | (6 if y) => ...
```

コードを実行後には、優先度の動作は明らかになります: マッチガードが | 演算子で指定される値のリストの最後の値にしか適用されないなら、アームはマッチし、プログラムは yes と出力したでしょう。

18.3.9 @束縛

at 演算子 (@) により、値を保持する変数を生成すると同時にその値がパターンに一致するかを調べることができます。リスト 18-32 は、`Message::Hello` の `id` フィールドが範囲 `3..=7` にあるかを確かめたいという例です。しかし、アームに紐づいたコードで使えるように変数 `id_variable` に値を束縛もしたいです。この変数をフィールドと同じ、`id` と名付けることもできますが、この例では異なる名前にします。

```
enum Message {
    Hello { id: i32 },
}

let msg = Message::Hello { id: 5 };

match msg {
    Message::Hello { id: id_variable @ 3..=7 } => {
        // 範囲内のidが見つかりました: {}
        println!("Found an id in range: {}", id_variable)
    },
    Message::Hello { id: 10..=12 } => {
        // 別の範囲内のidが見つかりました
        println!("Found an id in another range")
    },
    Message::Hello { id } => {
        // それ以外のidが見つかりました
        println!("Found some other id: {}", id)
    },
}
```

@ を使用してテストしつつ、パターンの値に束縛する

この例は、`Found an id in range: 5` と出力します。範囲 `3..=7` の前に `id_variable @` と指定することで、値が範囲パターンに一致することを確認しつつ、範囲にマッチしたどんな値も捕捉しています。

パターンで範囲しか指定していない 2 番目のアームでは、アームに紐づいたコードに `id` フィールドの実際の値を含む変数はありません。`id` フィールドの値は `10`、`11`、`12` だった可能性があるでしょうが、そのパターンに来るコードは、どれなのかわかりません。パターンのコードは `id` フィールドの値を使用することは叶いません。`id` の値を変数に保存していないからです。

範囲なしに変数を指定している最後のアームでは、確かにアームのコードで使用可能な値が `id` という変数にあります。理由は、構造体フィールド省略記法を使ったからです。しかし、このアームで `id` フィールドの値に対して、最初の 2 つのアームのように、確認を行っていません: どんな値でも、このパターンに一致するでしょう。

`@` を使用することで、値を検査しつつ、1 つのパターン内で変数に保存させてくれるのです。

18.4 まとめ

Rust のパターンは、異なる種類のデータを区別するのに役立つという点でとても有用です。`match` 式で使用されると、コンパイラはパターンが全ての可能性を網羅しているか保証し、そうでなければプログラムはコンパイルできません。`let` 文や関数の引数のパターンは、その構文をより有用にし、値を分配して小さな部品にすると同時に変数に代入できるようにしてくれます。単純だったり複雑だったりするパターンを生成してニーズに合わせることができます。

次の本書の末尾から 2 番目の章では、**Rust** の多彩な機能の高度な視点に目を向けます。

第 19 章

高度な機能

今までに、Rust プログラミング言語の最もよく使われる部分を学んできました。第 20 章でもう 1 つ別のプロジェクトを行う前に、時折遭遇する言語の側面をいくつか見ましょう。この章は、Rust を使用する際に知らないことに遭遇した時に参考にすることができます。この章で使用することを学ぶ機能は、かなり限定的な場面でしか役に立ちません。あまり頻繁には手を伸ばすことがない可能性はありますが、Rust が提供しなければならない機能全ての概要を確かに把握してもらいたいです。

この章で講義するのは：

- **Unsafe Rust:** Rust の保証の一部を抜けてその保証を手動で保持する責任を負う方法
- 高度なトレイト：関連型、デフォルト型引数、フルパス記法、スーパートレイト、トレイトに関連するニュータイプパターン
- 高度な型：ニュータイプパターンについてもっと、型エイリアス、**never** 型、動的サイズ決定型
- 高度な関数とクロージャ：関数ポインタとクロージャの返却
- マクロ：コンパイル時に、より多くのコードを定義するコードを定義する方法

皆さんのための何かがある Rust の機能の盛大な儀式です！ さあ、飛び込みましょう！

19.1 Unsafe Rust

ここまで議論してきたコードは全て、Rust のメモリ安全保証がコンパイル時に強制されていました。しかしながら、Rust には、これらのメモリ安全保証を強制しない第 2 の言語が中に隠されています：それは **unsafe Rust** と呼ばれ、普通の Rust のように動きますが、おまけの強大な力を与えてくれます。

静的解析は原理的に保守的なので、**unsafe Rust** が存在します。コードが保証を保持しているかコンパイラが決定しようとする際、なんらかの不正なプログラムを受け入れるよりも合法的なプログラムを拒否したほうがいいのです。コードは大丈夫かもしれないけれど、コンパイラにわかる範囲ではダ

メなのです！このような場合、`unsafe` コードを使用してコンパイラに「信じて！何をしているかわかってるよ」と教えられます。欠点は、自らのリスクでを使用することです: `unsafe` コードを誤って使用したら、`null` ポインタ参照外しなどのメモリ非安全に起因する問題が起こることもあるのです。

`Rust` に `unsafe` な分身がある別の理由は、根本にあるコンピュータのハードウェアが本質的に `unsafe` だからです。`Rust` が `unsafe` な処理を行わせてくれなかったら、特定の仕事を行えないでしょう。`Rust` は、低レベルなシステムプログラミングを許可する必要があります。直接 OS と相互作用したり、独自の OS を書くことさえもそうです。低レベルなシステムプログラミングに取り組むことは、言語の目標の 1 つなのです。`unsafe Rust` でできることとその方法を探究しましょう。

19.1.1 `unsafe` の強大な力 (superpower)

`unsafe Rust` に切り替えるには、`unsafe` キーワードを使用し、それから `unsafe` コードを保持する新しいブロックを開始してください。`safe Rust` では行えない 4 つの行動を `unsafe Rust` では行え、これは **`unsafe superpowers`** と呼ばれます。その `superpower` には、以下の能力が含まれています:

- 生ポインタを参照外しすること
- `unsafe` な関数やメソッドを呼ぶこと
- 可変で静的な変数にアクセスしたり変更すること
- `unsafe` なトレイトを実装すること

`unsafe` は、借用チェッカーや他の `Rust` の安全性チェックを無効にしないことを理解するのは重要なことです: `unsafe` コードで参照を使用しても、チェックはされます。`unsafe` キーワードにより、これら 4 つの機能にアクセスできるようになり、その場合、コンパイラによってこれらのメモリ安全性は確認されないのです。`unsafe` ブロック内でも、ある程度の安全性は得られます。

また、`unsafe` は、そのブロックが必ずしも危険だったり、絶対メモリ安全上の問題を抱えていることを意味するものではありません: その意図は、プログラマとして `unsafe` ブロック内のコードがメモリに合法的にアクセスすることを保証することです。

人間は失敗をするもので、間違いも起きますが、これら 4 つの `unsafe` な処理を `unsafe` で注釈されたブロックに入れる必要があることで、メモリ安全性に関するどんなエラーも `unsafe` ブロック内にあるに違いないと知ります。`unsafe` ブロックは小さくしてください; メモリのバグを調査するときに感謝することになるでしょう。

`unsafe` なコードをできるだけ分離するために、`unsafe` なコードを安全な抽象の中に閉じ込め、安全な API を提供するのが最善です。これについては、後ほど `unsafe` な関数とメソッドを調査する際に議論します。標準ライブラリの一部は、検査された `unsafe` コードの安全な抽象として実装されています。安全な抽象に `unsafe` なコードを包むことで、`unsafe` が、あなたやあなたのユーザが `unsafe` コードで実装された機能を使いたがる可能性のある箇所全部に漏れ出ることを防ぎます。安全な抽象を使用することは、安全だからです。

4 つの `unsafe` な `superpower` を順に見ていきましょう。`unsafe` なコードへの安全なインターフェイスを提供する一部の抽象化にも目を向けます。

19.1.2 生ポインタを参照外にする

第 4 章の「ダングリング参照」節で、コンパイラは、参照が常に有効であることを保証することに触れました。`unsafe Rust` には参照に類似した**生ポインタ**と呼ばれる 2 つの新しい型があります。参照同様、生ポインタも不変や可変になり得て、それぞれ `*const T` と `*mut T` と表記されます。このアスタリスクは、参照外し演算子ではありません; 型名の一部です。生ポインタの文脈では、**不変**は、参照外し後に直接ポインタに代入できないことを意味します。

参照やスマートポインタと異なり、生ポインタは:

- 同じ場所への不変と可変なポインタや複数の可変なポインタが存在することで借用規則を無視できる
- 有効なメモリを指しているとは保証されない
- `null` の可能性がある
- 自動的な片付けは実装されていない

これらの保証をコンパイラに強制させることから抜けることで、保証された安全性を諦めてパフォーマンスを向上させたり、`Rust` の保証が適用されない他の言語やハードウェアとのインターフェイスの能力を得ることができます。

リスト 19-1 は、参照から不変と可変な生ポインタを生成する方法を示しています。

```
let mut num = 5;

let r1 = &num as *const i32;
let r2 = &mut num as *mut i32;
```

リスト 19-1: 参照から生ポインタを生成する

このコードには `unsafe` キーワードを含めていないことに注意してください。`safe` コードで生ポインタを生成できます; もうすぐわかるように、`unsafe` ブロックの外では、生ポインタを参照外しできないだけです。

`as` を使って不変と可変な参照を対応する生ポインタの型にキャストして生ポインタを生成しました。有効であることが保証される参照から直接生ポインタを生成したので、これらの特定の生ポインタは有効であることがわかりますが、その前提をあらゆる生ポインタに敷くことはできません。

次に、有効であることが確信できない生ポインタを生成します。リスト 19-2 は、メモリの任意の箇所を指す生ポインタの生成法を示しています。任意のメモリを使用しようとすることは未定義です: そのアドレスにデータがある可能性もあるし、ない可能性もあり、コンパイラがコードを最適化してメモリアクセスがなくなる可能性もあるし、プログラムがセグメンテーションフォールトでエラーに

なる可能性もあります。通常、このようなコードを書くいい理由はありませんが、可能ではあります。

```
let address = 0x012345usize;
let r = address as *const i32;
```

リスト 19-2: 任意のメモリアドレスへの生ポインタを生成する

`safe` コードで生ポインタを生成できるけれども、生ポインタを参照外しして指しているデータを読むことはできないことを思い出してください。リスト 19-3 では、`unsafe` ブロックが必要になる参照外し演算子の `*` を生ポインタに使っています。

```
let mut num = 5;

let r1 = &num as *const i32;
let r2 = &mut num as *mut i32;

unsafe {
    println!("r1 is: {}", *r1);
    println!("r2 is: {}", *r2);
}
```

リスト 19-3: `unsafe` ブロック内で生ポインタを参照外しする

ポインタの生成は害を及ぼしません; 問題が起こり得るのはポインタが指している値にアクセスしようとするときのみで、この際に無効な値を扱うことになる可能性があります。

また、リスト 19-1 とリスト 19-3 では、`num` が格納されている同じメモリ上の場所を両方とも指す `*const i32` と `*mut i32` の生ポインタを生成したことに注目してください。代わりに `num` への変数と可変な参照を生成しようとしたら、コードはコンパイルできなかったでしょう。Rust の所有権規則により、不変参照と可変参照を同時に存在させられないからです。生ポインタなら、同じ場所への可変なポインタと不変なポインタを生成でき、可変なポインタを通してデータを変更し、データ競合を引き起こす可能性があります。気を付けてください！

これらの危険がありながら、一体何故生ポインタを使うのでしょうか？ 主なユースケースの 1 つは、次の節「`unsafe` な関数やメソッドを呼ぶ」で見えるように、C コードとのインターフェイスです。別のユースケースは、借用チェッカーには理解できない安全な抽象を構成する時です。`unsafe` な関数を導入し、それから `unsafe` コードを使用する安全な抽象の例に目を向けます。

19.1.3 `unsafe` な関数やメソッドを呼ぶ

`unsafe` ブロックが必要になる 2 番目の処理は、`unsafe` 関数の呼び出しです。`unsafe` な関数やメソッドも見た目は、普通の関数やメソッドと全く同じですが、残りの定義の前に追加の `unsafe` があります。この文脈での `unsafe` キーワードは、この関数を呼ぶ際に保持しておく必要のある要求が関数にあることを示唆します。コンパイラには、この要求を満たしているか保証できないからです。

`unsafe` ブロックで `unsafe` な関数を呼び出すことで、この関数のドキュメンテーションを読み、関数の契約を守っているという責任を取ると宣言します。

こちらは、本体で何もしない `dangerous` という `unsafe` な関数です:

```
unsafe fn dangerous() {}

unsafe {
    dangerous();
}
```

個別の `unsafe` ブロックで `dangerous` 関数を呼ばなければなりません。`unsafe` ブロックなしで `dangerous` を呼ぼうとすれば、エラーになるでしょう:

```
error[E0133]: call to unsafe function requires unsafe function or block
(エラー: unsafe関数の呼び出しには、unsafeな関数かブロックが必要です)
-->
|
4 |     dangerous();
|       ^^^^^^^^^^^^^ call to unsafe function
```

`dangerous` への呼び出しの周りに `unsafe` ブロックを挿入することで、コンパイラに関数のドキュメンテーションを読み、適切に使用方法を理解したことをアサートし、関数の契約を満たしていると実証しました。

`unsafe` 関数の本体は、実効的に `unsafe` ブロックになるので、`unsafe` 関数内で `unsafe` な別の処理を行うのに、別の `unsafe` ブロックは必要ないのです。

19.1.3.1 `unsafe` コードに安全な抽象を行う

関数が `unsafe` なコードを含んでいるだけで関数全体を `unsafe` でマークする必要があることにはなりません。事実、安全な関数で `unsafe` なコードをラップすることは一般的な抽象化です。例として、なんらかの `unsafe` コードが必要になる標準ライブラリの関数 `split_at_mut` を学び、その実装方法を探究しましょう。この安全なメソッドは、可変なスライスに定義されています: スライスを 1 つ取り、引数で与えられた添え字でスライスを分割して 2 つにします。リスト 19-4 は、`split_at_mut` の使用法を示しています。

```
let mut v = vec![1, 2, 3, 4, 5, 6];

let r = &mut v[..];

let (a, b) = r.split_at_mut(3);

assert_eq!(a, &mut [1, 2, 3]);
assert_eq!(b, &mut [4, 5, 6]);
```

リスト 19-4: 安全な `split_at_mut` 関数を使用する

この関数を **safe Rust** だけを使用して実装することはできません。試みは、リスト 19-5 のようになる可能性があります、コンパイルできません。簡単のため、`split_at_mut` をメソッドではなく関数として実装し、ジェネリックな型 `T` ではなく、`i32` のスライス用に実装します。

```
fn split_at_mut(slice: &mut [i32], mid: usize) -> (&mut [i32], &mut [i32]) {
    let len = slice.len();

    assert!(mid <= len);

    (&mut slice[..mid],
     &mut slice[mid..])
}
```

リスト 19-5: **safe Rust** だけを使用した `split_at_mut` の未遂の実装

この関数はまず、スライスの全体の長さを得ます。それから引数で与えられた添え字が長さ以下であるかを確認してスライス内にあることをアサートします。このアサートは、スライスを分割する添え字よりも大きい添え字を渡したら、その添え字を使用しようとする前に関数がパニックすることを意味します。

そして、2 つの可変なスライスをタプルで返します: 1 つは元のスライスの最初から `mid` 添え字まで、もう一方は、`mid` からスライスの終わりまでです。

リスト 19-5 のコードのコンパイルを試みると、エラーになるでしょう。

```
error[E0499]: cannot borrow `*slice` as mutable more than once at a time
(エラー: 一度に2回以上、`*slice`を可変で借用できません)
-->
|
6 |     (&mut slice[..mid],
|       ----- first mutable borrow occurs here
7 |     &mut slice[mid..])
|       ^^^^^^ second mutable borrow occurs here
8 | }
| - first borrow ends here
```

Rust の借用チェッカーには、スライスの異なる部分を借用していることが理解できないのです; 同じスライスから 2 回借用していることだけ知っています。2 つのスライスが被らないので、スライスの異なる部分を借用することは、根本的に大丈夫なのですが、コンパイラはこれを知れるほど賢くありません。プログラマにはコードが大丈夫とわかるのに、コンパイラにはわからないのなら、**unsafe** コードに手を伸ばすタイミングです。

リスト 19-6 は **unsafe** ブロック、生ポインタ、**unsafe** 関数への呼び出しをして `split_at_mut` の実装が動くようにする方法を示しています。

```
use std::slice;

fn split_at_mut(slice: &mut [i32], mid: usize) -> (&mut [i32], &mut [i32]) {
```

```

let len = slice.len();
let ptr = slice.as_mut_ptr();

assert!(mid <= len);

unsafe {
    (slice::from_raw_parts_mut(ptr, mid),
     slice::from_raw_parts_mut(ptr.offset(mid as isize), len - mid))
}
}

```

リスト 19-6: split_at_mut 関数の実装で unsafe コードを使用する

第 4 章の「スライス型」節から、スライスはなんらかのデータへのポインタとスライスの長さであることを思い出してください。len メソッドを使用してスライスの長さを得て、as_mut_ptr メソッドを使用してスライスの生ポインタにアクセスしています。この場合、i32 値の可変スライスがあるので、as_mut_ptr は型 `*mut i32` の生ポインタを返し、これを変数 `ptr` に格納しました。

`mid` 添え字がスライス内にあるかというアサートを残しています。そして、unsafe コードに到達します: `slice::from_raw_parts_mut` 関数は、生ポインタと長さを取り、スライスを生成します。この関数を使って、`ptr` から始まり、`mid` の長さのスライスを生成しています。それから `ptr` に `mid` を引数として `offset` メソッドを呼び出し、`mid` で始まる生ポインタを得て、そのポインタと `mid` の後の残りの要素数を長さとして使用してスライスを生成しています。

関数 `slice::from_raw_parts_mut` は、unsafe です。何故なら、生ポインタを取り、このポインタが有効であることを信用しなければならないからです。生ポインタの `offset` メソッドも unsafe です。オフセット位置もまた有効なポインタであることを信用しなければならないからです。故に、`slice::from_raw_parts_mut` と `offset` を呼べるように、その呼び出しの周りに unsafe ブロックを置かなければならなかったのです。コードを眺めて `mid` が `len` 以下でなければならないとするアサートを追加することで、unsafe ブロック内で使用されている生ポインタが全てスライス内のデータへの有効なポインタであることがわかります。これは、受け入れられ、適切な unsafe の使用法です。

できあがった `split_at_mut` 関数を unsafe でマークする必要はなく、この関数を safe Rust から呼び出せることに注意してください。unsafe コードを安全に使用する関数の実装で、unsafe コードへの安全な抽象化を行いました。この関数がアクセスするデータからの有効なポインタだけを生成するからです。

対照的に、リスト 19-7 の `slice::from_raw_parts_mut` の使用は、スライスが使用されるとクラッシュする可能性が高いでしょう。このコードは任意のメモリアドレスを取り、10,000 要素の長さのスライスを生成します:

```

use std::slice;

let address = 0x012345usize;
let r = address as *mut i32;

```

```
let slice = unsafe {
    slice::from_raw_parts_mut(r, 10000)
};
```

リスト 19-7: 任意のメモリアドレスからスライスを生成する

この任意の場所のメモリは所有していない、このコードが生成するスライスに有効な `i32` 値が含まれる保証もありません。`slice` を有効なスライスであるかのように使用しようとすると、未定義動作に陥ります。

19.1.3.2 extern 関数を使用して、外部のコードを呼び出す

時として、自分の Rust コードが他の言語で書かれたコードと相互作用する必要がある可能性があります。このために、Rust には `extern` というキーワードがあり、これは、**FFI(Foreign Function Interface: 外部関数インターフェイス)** の生成と使用を容易にします。FFI は、あるプログラミング言語に関数を定義させ、異なる (外部の) プログラミング言語にそれらの関数を呼び出すことを可能にする方法です

リスト 19-8 は、C の標準ライブラリから `abs` 関数を統合するセットアップ方法をデモしています。`extern` ブロック内で宣言された関数は、常に Rust コードから呼ぶには `unsafe` になります。理由は、他の言語では、Rust の規則や保証が強制されず、コンパイラもチェックできないので、安全性を保証する責任はプログラマに降りかかるのです。

ファイル名: `src/main.rs`

```
extern "C" {
    fn abs(input: i32) -> i32;
}

fn main() {
    unsafe {
        // -3の絶対値は、Cによると{}
        println!("Absolute value of -3 according to C: {}", abs(-3));
    }
}
```

リスト 19-8: 他の言語で定義された `extern` 関数を宣言し、呼び出す

`extern "C"` ブロック内で他の言語から呼び出した関数の名前とシグニチャを列挙します。`"C"` の部分は、外部関数がどの **ABI(application binary interface: アプリケーション・バイナリ・インターフェイス)** を使用しているか定義します: ABI は関数の呼び出し方法をアセンブリレベルで定義します。`"C"` ABI は最も一般的で C プログラミング言語の ABI に従っています。

19.1.3.3 他の言語から Rust の関数を呼び出す

また、`extern` を使用して他の言語に Rust の関数を呼ばせるインターフェイスを生成することもできます。`extern` ブロックの代わりに、`extern` キーワードを追加し、`fn` キーワードの直前に使用する ABI を指定します。さらに、`#[no_mangle]` 注釈を追加して Rust コンパイラに関数名をマングルしないように指示する必要もあります。**マングル**とは、コンパイラが関数に与えた名前を他のコンパイル過程の情報をより多く含むけれども、人間に読みにくい異なる名前にすることです。全ての言語のコンパイラは、少々異なる方法でマングルを行うので、Rust の関数が他の言語で名前付けできるように、Rust コンパイラの名前マングルをオフにしなければならないのです。

以下の例では、共有ライブラリにコンパイルし、C からリンクした後に `call_from_c` 関数を C コードからアクセスできるようにしています:

```
#[no_mangle]
pub extern "C" fn call_from_c() {
    // CからRust関数を呼び出したばかり!
    println!("Just called a Rust function from C!");
}
```

この `extern` の用法では、`unsafe` は必要ありません。

19.1.4 可変で静的な変数にアクセスしたり、変更する

今までずっと、**グローバル変数**について語りませんでした。グローバル変数を Rust は確かにサポートしていますが、Rust の所有権規則で問題になることもあります。2 つのスレッドが同じ可変なグローバル変数にアクセスしていたら、データ競合を起こすこともあります。

Rust では、グローバル変数は、**static**(静的) 変数と呼ばれます。リスト 19-9 は、値として文字列スライスのある静的変数の宣言例と使用を示しています。

ファイル名: `src/main.rs`

```
static HELLO_WORLD: &str = "Hello, world!";

fn main() {
    // 名前は: {}
    println!("name is: {}", HELLO_WORLD);
}
```

リスト 19-9: 不変で静的な変数を定義し、使用する

静的変数は、定数に似ています。定数については、第 3 章の「変数と定数の違い」節で議論しました。静的変数の名前は慣習で `SCREAMING_SNAKE_CASE` (直訳: 叫ぶスネークケース) になり、変数の型

を注釈しなければなりません。この例では `&'static str` です。静的変数は、`'static` ライフタイムの参照のみ格納でき、これは、Rust コンパイラがライフタイムを推量できることを意味します; 明示的に注釈する必要はありません。不変で静的な変数にアクセスすることは安全です。

定数と不変で静的な変数は、類似して見える可能性がありますが、微妙な差異は、静的変数の値は固定されたメモリアドレスになることです。値を使用すると、常に同じデータにアクセスします。一方、定数は使用される度にデータを複製させることができます。

定数と静的変数の別の違いは、静的変数は可変にもなることです。可変で静的な変数にアクセスし変更することは、**unsafe** です。リスト 19-10 は、`COUNTER` という可変で静的な変数を宣言し、アクセスし、変更する方法を表示しています。

ファイル名: `src/main.rs`

```
static mut COUNTER: u32 = 0;

fn add_to_count(inc: u32) {
    unsafe {
        COUNTER += inc;
    }
}

fn main() {
    add_to_count(3);

    unsafe {
        println!("COUNTER: {}", COUNTER);
    }
}
```

リスト 19-10: 可変で静的な変数を読んだり、書き込むのは **unsafe** である

普通の変数同様、`mut` キーワードを使用して可変性を指定します。`COUNTER` を読み書きするコードはどれも、**unsafe** ブロックになければなりません。シングルスレッドなので、このコードは想定通り、コンパイルでき、`COUNTER: 3` と出力します。複数のスレッドに `COUNTER` にアクセスさせると、データ競合になる可能性が高いでしょう。

グローバルにアクセス可能な可変なデータがあると、データ競合がないことを保証するのは難しくなり、そのため、Rust は可変で静的な変数を **unsafe** と考えるのです。可能なら、コンパイラが、データが異なるスレッドからアクセスされることが安全に行われているかを確認するように、第 16 章で議論した並行性テクニックとスレッド安全なスマートポインタを使用するのが望ましいです。

19.1.5 unsafe なトレイトを実装する

unsafe でのみ動く最後の行動は、**unsafe** なトレイトを実装することです。少なくとも、1 つのメソッドにコンパイラが確かめられないなんらかの不変条件があると、トレイトは **unsafe** になります。

trait の前に `unsafe` キーワードを追加し、トレイトの実装も `unsafe` でマークすることで、トレイトが `unsafe` であると宣言できます。リスト 19-11 のようにですね。

```
unsafe trait Foo {  
    // methods go here  
    // メソッドがここに来る  
}  
  
unsafe impl Foo for i32 {  
    // method implementations go here  
    // メソッドの実装がここに来る  
}
```

リスト 19-11: `unsafe` なトレイトを定義して実装する

`unsafe impl` を使用することで、コンパイラが確かめられない不変条件を守ることが約束されています。

例として、第 16 章の「`Sync` と `Send` トレイトで拡張可能な並行性」節で議論した `Sync` と `Send` マーカートレイトを思い出してください: 型が完全に `Send` と `Sync` 型だけで構成されていたら、コンパイラはこれらのトレイトを自動的に実装します。生ポインタなどの `Send` や `Sync` でない型を含む型を実装し、その型を `Send` や `Sync` でマークしたいなら、`unsafe` を使用しなければなりません。コンパイラは、型がスレッド間を安全に送信できたり、複数のスレッドから安全にアクセスできるという保証を保持しているか確かめられません; 故に、そのチェックを手動で行い、`unsafe` でそのように示唆する必要があります。

19.1.6 いつ `unsafe` コードを使用すべきか

`unsafe` を使って議論したばかりの 4 つの行動 (強大な力) のうちの 1 つを行うのは間違っていたり、認められさえもしないものではありません。ですが、`unsafe` コードを正しくするのは、より巧妙なことでしょう。コンパイラがメモリ安全性を保持する手助けをできないからです。`unsafe` コードを使用する理由があるなら、そうすることができ、明示的に `unsafe` 注釈をすることで問題が起きたら、その原因を追求するのが容易になります。

19.2 高度なトレイト

最初にトレイトについて講義したのは、第 10 章の「トレイト: 共通の振る舞いを定義する」節でしたが、ライフタイム同様、より高度な詳細は議論しませんでした。今や、**Rust** に詳しくなったので、核心に迫れるでしょう。

19.2.1 関連型でトレイト定義においてプレースホルダーの型を指定する

関連型は、トレイトのメソッド定義がシグニチャでプレースホルダーの型を使用できるように、トレイトと型のプレースホルダーを結び付けます。トレイトを実装するものがこの特定の実装で型の位置に使用される具体的な型を指定します。そうすることで、なんらかの型を使用するトレイトをトレイトを実装するまでその型が一体なんであるかを知る必要なく定義できます。

この章のほとんどの高度な機能は、稀にしか必要にならないと解説しました。関連型はその中間にあります: 本の他の部分で説明される機能よりは使用されるのが稀ですが、この章で議論される他の多くの機能よりは頻繁に使用されます。

関連型があるトレイトの一例は、標準ライブラリが提供する `Iterator` トレイトです。その関連型は `Item` と名付けられ、`Iterator` トレイトを実装している型が走査している値の型の代役を務めます。第 13 章の「`Iterator` トレイトと `next` メソッド」節で、`Iterator` トレイトの定義は、リスト 19-20 に示したようなものであることに触れました。

```
pub trait Iterator {
    type Item;

    fn next(&mut self) -> Option<Self::Item>;
}
```

リスト 19-20: 関連型 `Item` がある `Iterator` トレイトの定義

型 `Item` はプレースホルダー型で `next` メソッドの定義は、型 `Option<Self::Item>` の値を返すことを示しています。`Iterator` トレイトを実装するものは、`Item` の具体的な型を指定し、`next` メソッドは、その具体的な型の値を含む `Option` を返します。

関連型は、ジェネリクスにより扱う型を指定せずに関数を定義できるという点でジェネリクスに似た概念のように思える可能性があります。では、何故関連型を使用するのでしょうか？

2つの概念の違いを第 13 章から `Counter` 構造体に `Iterator` トレイトを実装する例で調査しましょう。リスト 13-21 で、`Item` 型は `u32` だと指定しました:

ファイル名: `src/lib.rs`

```
impl Iterator for Counter {
    type Item = u32;

    fn next(&mut self) -> Option<Self::Item> {
        // --snip--
    }
}
```

この記法は、ジェネリクスと比較可能に思えます。では、何故単純にリスト 19-21 のように、`Iterator` トレイトをジェネリクスで定義しないのでしょうか？

```
pub trait Iterator<T> {  
    fn next(&mut self) -> Option<T>;  
}
```

リスト 19-21: ジェネリクスを使用した架空の `Iterator` トレイトの定義

差異は、リスト 19-21 のようにジェネリクスを使用すると、各実装で型を注釈しなければならないことです; `Iterator<String>` for `Counter` や他のどんな型にも実装することができるので、`Counter` の `Iterator` の実装が複数できるでしょう。換言すれば、トレイトにジェネリックな引数があると、毎回ジェネリックな型引数の具体的な型を変更してある型に対して複数回実装できるということです。`Counter` に対して `next` メソッドを使用する際に、どの `Iterator` の実装を使用したいか型注釈をつけなければならないでしょう。

関連型なら、同じ型に対してトレイトを複数回実装できないので、型を注釈する必要はありません。関連型を使用する定義があるリスト 19-20 では、`Item` の型は 1 回しか選択できませんでした。1 つしか `impl Iterator for Counter` がないからです。`Counter` に `next` を呼び出す度に、`u32` 値のイテレータが欲しいと指定しなくてもよいわけです。

19.2.2 デフォルトのジェネリック型引数と演算子オーバーロード

ジェネリックな型引数を使用する際、ジェネリックな型に対して既定の具体的な型を指定できます。これにより、既定の型が動くのなら、トレイトを実装する側が具体的な型を指定する必要を排除します。ジェネリックな型に既定の型を指定する記法は、ジェネリックな型を宣言する際に `<PlaceholderType=ConcreteType>` です。

このテクニックが有用になる場面の好例が、演算子オーバーロードです。演算子オーバーロードとは、特定の状況で演算子 (+ など) の振る舞いをカスタマイズすることです。

`Rust` では、独自の演算子を作ったり、任意の演算子をオーバーロードすることはできません。しかし、演算子に紐づいたトレイトを実装することで `std::ops` に列挙された処理と対応するトレイトをオーバーロードできます。例えば、リスト 19-22 で + 演算子をオーバーロードして 2 つの `Point` インスタンスを足し合わせています。`Point` 構造体に `Add` トレイトを実装することでこれを行なっています。

ファイル名: `src/main.rs`

```
use std::ops::Add;  
  
#[derive(Debug, PartialEq)]  
struct Point {  
    x: i32,  
    y: i32,  
}  
  
impl Add for Point {
```



```

type Output = Point;

fn add(self, other: Point) -> Point {
    Point {
        x: self.x + other.x,
        y: self.y + other.y,
    }
}

fn main() {
    assert_eq!(Point { x: 1, y: 0 } + Point { x: 2, y: 3 },
               Point { x: 3, y: 3 });
}

```

リスト 19-22: Add トrait を実装して Point インスタンス用に + 演算子をオーバーロードする

add メソッドは 2 つの Point インスタンスの x 値と 2 つの Point インスタンスの y 値を足します。Add Trait には、add メソッドから返却される型を決定する Output という関連型があります。このコードの既定のジェネリック型は、Add Trait 内にあります。こちらがその定義です:

```

trait Add<RHS=Self> {
    type Output;

    fn add(self, rhs: RHS) -> Self::Output;
}

```

このコードは一般的に馴染みがあるはずです: 1 つのメソッドと関連型が 1 つある Trait です。新しい部分は、RHS=Self です: この記法は、**デフォルト型引数**と呼ばれます。RHS というジェネリックな型引数 (“right hand side”: 右辺の省略形) が、add メソッドの rhs 引数の型を定義しています。Add Trait を実装する際に RHS の具体的な型を指定しなければ、RHS の型は標準で Self になり、これは Add を実装している型になります。

Point に Add を実装する際、2 つの Point インスタンスを足したかったので、RHS の規定を使用しました。既定を使用するのではなく、RHS の型をカスタマイズしたくなる Add Trait の実装例に目を向けましょう。

異なる単位で値を保持する構造体、Millimeters と Meters (それぞれ ミリメートル と メートル) が 2 つあります。ミリメートルの値をメートルの値に足し、Add の実装に変換を正しくしてほしいです。Add を RHS に Meters のある Millimeters に実装することができます。リスト 19-23 のように:

ファイル名: src/lib.rs

```

use std::ops::Add;

struct Millimeters(u32);
struct Meters(u32);

```

```
impl Add<Meters> for Millimeters {
    type Output = Millimeters;

    fn add(self, other: Meters) -> Millimeters {
        Millimeters(self.0 + (other.0 * 1000))
    }
}
```

リスト 19-23: Millimeters に Add トレイトを実装して、Meters に Millimeters を足す

Millimeters を Meters に足すため、Self という既定を使う代わりに impl Add<Meters> を指定して、RHS 型引数の値をセットしています。

主に 2 通りの方法でデフォルト型引数を使用します:

- 既存のコードを破壊せずに型を拡張する
- ほとんどのユーザは必要としない特定の場でカスタマイズを可能にする

標準ライブラリの Add トレイトは、2 番目の目的の例です: 通常、2 つの似た型を足しますが、Add トレイトはそれ以上にカスタマイズする能力を提供します。Add トレイト定義でデフォルト型引数を使用することは、ほとんどの場合、追加の引数を指定しなくてもよいことを意味します。つまり、トレイトを使いやすくして、ちょっとだけ実装の定型コードが必要なくなるのです。

最初の目的は 2 番目に似ていますが、逆です: 既存のトレイトに型引数を追加したいなら、既定を与えて、既存の実装コードを破壊せずにトレイトの機能を拡張できるのです。

19.2.3 明確化のためのフルパス記法: 同じ名前のメソッドを呼ぶ

Rust において、別のトレイトのメソッドと同じ名前のメソッドがトレイトにあったり、両方のトレイトを 1 つの型に実装することを妨げるものは何もありません。トレイトのメソッドと同じ名前のメソッドを直接型に実装することも可能です。

同じ名前のメソッドを呼ぶ際、コンパイラにどれを使用したいのか教える必要があるでしょう。両方とも fly というメソッドがある 2 つのトレイト、Pilot と Wizard (訳注: パイロットと魔法使い) を定義したリスト 19-24 のコードを考えてください。それから両方のトレイトを既に fly というメソッドが実装されている型 Human (訳注: 人間) に実装します。各 fly メソッドは異なることをします。

ファイル名: src/main.rs

```
trait Pilot {
    fn fly(&self);
}

trait Wizard {
    fn fly(&self);
}
```

```
struct Human;

impl Pilot for Human {
    fn fly(&self) {
        // キャプテンのお言葉
        println!("This is your captain speaking.");
    }
}

impl Wizard for Human {
    fn fly(&self) {
        // 上がれ!
        println!("Up!");
    }
}

impl Human {
    fn fly(&self) {
        // *激しく腕を振る*
        println!("*waving arms furiously*");
    }
}
```

リスト 19-24: 2 つのトレイトに fly があるように定義され、Human に実装されつつ、fly メソッドは Human に直接にも実装されている

Human のインスタンスに対して fly を呼び出すと、コンパイラは型に直接実装されたメソッドを標準で呼び出します。リスト 19-25 のようにですね:

ファイル名: src/main.rs

```
# trait Pilot {
#     fn fly(&self);
# }
#
# trait Wizard {
#     fn fly(&self);
# }
#
# struct Human;
#
# impl Pilot for Human {
#     fn fly(&self) {
#         println!("This is your captain speaking.");
#     }
# }
#
# impl Wizard for Human {
#     fn fly(&self) {
#         println!("Up!");
#     }
# }
```

```
# }  
# }  
#  
# impl Human {  
#     fn fly(&self) {  
#         println!("✳waving arms furiously✳");  
#     }  
# }  
#  
fn main() {  
    let person = Human;  
    person.fly();  
}
```

リスト 19-25: Human のインスタンスに対して fly を呼び出す

このコードを実行すると、✳waving arms furiously✳ と出力され、コンパイラが Human に直接実装された fly メソッドを呼んでいることを示しています。

Pilot トレイトか、Wizard トレイトの fly メソッドを呼ぶためには、より明示的な記法を使用して、どの fly メソッドを意図しているか指定する必要があります。リスト 19-26 は、この記法をデモしています。

ファイル名: src/main.rs

```
# trait Pilot {  
#     fn fly(&self);  
# }  
#  
# trait Wizard {  
#     fn fly(&self);  
# }  
#  
# struct Human;  
#  
# impl Pilot for Human {  
#     fn fly(&self) {  
#         println!("This is your captain speaking.");  
#     }  
# }  
#  
# impl Wizard for Human {  
#     fn fly(&self) {  
#         println!("Up!");  
#     }  
# }  
#  
# impl Human {  
#     fn fly(&self) {  
#         println!("✳waving arms furiously✳");  
#     }  
# }
```

```
# }
#
fn main() {
    let person = Human;
    Pilot::fly(&person);
    Wizard::fly(&person);
    person.fly();
}
```

リスト 19-26: どのトレイトの fly メソッドを呼び出したいか指定する

メソッド名の前にトレイト名を指定すると、コンパイラにどの fly の実装を呼び出したいか明確化できます。また、Human::fly(&person) と書くこともでき、リスト 19-26 で使用した person.fly() と等価ですが、こちらの方は明確化する必要がないなら、ちょっと記述量が増えます。

このコードを実行すると、こんな出力がされます:

```
This is your captain speaking.
Up!
✧waving arms furiously✧
```

fly メソッドは self 引数を取るので、1 つのトレイトを両方実装する型が 2 つあれば、コンパイラには、self の型に基づいてどのトレイトの実装を使うべきかわかるでしょう。

しかしながら、トレイトの一部になる関連関数には self 引数がありません。同じスコープの 2 つの型がそのトレイトを実装する場合、フルパス記法 (fully qualified syntax) を使用しない限り、どの型を意図しているかコンパイラは推論できません。例えば、リスト 19-27 の Animal トレイトには、関連関数 baby_name、構造体 Dog の Animal の実装、Dog に直接定義された関連関数 baby_name があります。

ファイル名: src/main.rs

```
trait Animal {
    fn baby_name() -> String;
}

struct Dog;

impl Dog {
    fn baby_name() -> String {
        // スポット (Wikipediaによると、飼い主の事故死後もその人の帰りを待つ忠犬の名前の模様)
        String::from("Spot")
    }
}

impl Animal for Dog {
    fn baby_name() -> String {
        // 子犬
```

```

        String::from("puppy")
    }
}

fn main() {
    // 赤ちゃん犬は{}と呼ばれる
    println!("A baby dog is called a {}", Dog::baby_name());
}

```

リスト 19-27: 関連関数のあるトレイトとそのトレイトも実装し、同じ名前の関連関数がある型

このコードは、全ての子犬をスポットと名付けたいアニマル・シェルター（訳注：身寄りのないペットを保護する保健所みたいなところ）用で、Dog に定義された baby_name 関連関数で実装されています。Dog 型は、トレイト Animal も実装し、このトレイトは全ての動物が持つ特徴を記述します。赤ちゃん犬は子犬と呼ばれ、それが Dog の Animal トレイトの実装の Animal トレイトと紐づいた base_name 関数で表現されています。

main で、Dog::baby_name 関数を呼び出し、直接 Dog に定義された関連関数を呼び出しています。このコードは以下のような出力をします:

```
A baby dog is called a Spot
```

この出力は、欲しかったものではありません。Dog に実装した Animal トレイトの一部の baby_name 関数を呼び出したいので、コードは A baby dog is called a puppy と出力します。リスト 19-26 で使用したトレイト名を指定するテクニックは、ここでは役に立ちません; main をリスト 19-28 のようなコードに変更したら、コンパイルエラーになるでしょう。

ファイル名: src/main.rs

```

fn main() {
    println!("A baby dog is called a {}", Animal::baby_name());
}

```

リスト 19-28: Animal トレイトの baby_name 関数を呼び出そうとするも、コンパイラにはどの実装を使うべきかわからない

Animal::baby_name はメソッドではなく関連関数であり、故に self 引数がないので、どの Animal::baby_name が欲しいのか、コンパイラには推論できません。こんなコンパイルエラーが出るでしょう:

```

error[E0283]: type annotations required: cannot resolve `_: Animal`
(エラー: 型注釈が必要です: `_: Animal`を解決できません)
--> src/main.rs:20:43
    |
20 |     println!("A baby dog is called a {}", Animal::baby_name());

```

```
|
|
= note: required by `Animal::baby_name`
(注釈: `Animal::baby_name`に 必要です)
```

Dog に対して Animal 実装を使用したいと明確化し、コンパイラに指示するには、フルパス記法を使う必要があります。リスト 19-29 は、フルパス記法を使用する方法をデモしています。

ファイル名: src/main.rs

```
# trait Animal {
#     fn baby_name() -> String;
# }
#
# struct Dog;
#
# impl Dog {
#     fn baby_name() -> String {
#         String::from("Spot")
#     }
# }
#
# impl Animal for Dog {
#     fn baby_name() -> String {
#         String::from("puppy")
#     }
# }
#
fn main() {
    println!("A baby dog is called a {}", <Dog as Animal>::baby_name());
}
```

リスト 19-29: フルパス記法を使って Dog に実装されているように、Animal トレイトからの baby_name 関数を呼び出したいと指定する

コンパイラに山カッコ内で型注釈を提供し、これは、この関数呼び出しでは Dog 型を Animal として扱いたいと宣言することで、Dog に実装されたように、Animal トレイトの baby_name メソッドを呼び出したいと示唆しています。もうこのコードは、望み通りの出力をします:

```
A baby dog is called a puppy
```

一般的に、フルパス記法は、以下のように定義されています:

```
<Type as Trait>::function(receiver_if_method, next_arg, ...);
```

関連関数では、receiver がないでしょう: 他の引数のリストがあるだけでしょう。関数やメソッドを呼び出す箇所全部で、フルパス記法を使用することもできるでしょうが、プログラムの他の情報か

らコンパイラが推論できるこの記法のどの部分も省略することが許容されています。同じ名前を使用する実装が複数あり、どの実装を呼び出したいかコンパイラが特定するのに助けが必要な場合だけにこのより冗長な記法を使用する必要があるのです。

19.2.4 スーパートレイトを使用して別のトレイト内で、あるトレイトの機能を必要とする

時として、あるトレイトに別のトレイトの機能を使用させる必要がある可能性があります。この場合、依存するトレイトも実装されることを信用する必要があります。信用するトレイトは、実装しているトレイトのスーパートレイトです。

例えば、アスタリスクをフレームにする値を出力する `outline_print` メソッドがある `OutlinePrint` トレイトを作りたくなつたとしましょう。つまり、`Display` を実装し、`(x, y)` という結果になる `Point` 構造体が与えられて、`x` が 1、`y` が 3 の `Point` インスタンスに対して `outline_print` を呼び出すと、以下のような出力をするはずで:

```
*****
*      *
* (1, 3) *
*      *
*****
```

`outline_print` の実装では、`Display` トレイトの機能を使用したいです。故に、`Display` も実装する型に対してだけ `OutlinePrint` が動くように指定し、`OutlinePrint` が必要とする機能を提供する必要があります。トレイト定義で `OutlinePrint: Display` と指定することで、そうすることができます。このテクニックは、トレイトにトレイト境界を追加することに似ています。リスト 19-30 は、`OutlinePrint` トレイトの実装を示しています。

ファイル名: `src/main.rs`

```
use std::fmt;

trait OutlinePrint: fmt::Display {
    fn outline_print(&self) {
        let output = self.to_string();
        let len = output.len();
        println!("{}", "*".repeat(len + 4));
        println!("*{}*", " ".repeat(len + 2));
        println!("* {} *", output);
        println!("*{}*", " ".repeat(len + 2));
        println!("{}", "*".repeat(len + 4));
    }
}
```

リスト 19-30: `Display` からの機能を必要とする `OutlinePrint` トレイトを実装する

OutlinePrint は Display トレイトを必要とすると指定したので、Display を実装するどんな型にも自動的に実装される to_string 関数を使えます。トレイト名の後にコロンと Display トレイトを追加せずに to_string を使おうとしたら、現在のスコープで型 &Self に to_string というメソッドは存在しないというエラーが出るでしょう。

Display を実装しない型、Point 構造体などに OutlinePrint を実装しようとしたら、何が起きるか確認しましょう：

ファイル名: src/main.rs

```
# trait OutlinePrint {}
struct Point {
    x: i32,
    y: i32,
}

impl OutlinePrint for Point {}
```

Display が必要だけれども、実装されていないというエラーが出ます：

```
error[E0277]: the trait bound `Point: std::fmt::Display` is not satisfied
--> src/main.rs:20:6
|
20 | impl OutlinePrint for Point {}
|      ^^^^^^^^^^^^^^^^^ `Point` cannot be formatted with the default formatter;
|      try using `:?` instead if you are using a format string
|
= help: the trait `std::fmt::Display` is not implemented for `Point`
```

これを修正するために、Point に Display を実装し、OutlinePrint が必要とする制限を満たします。こんな感じで：

ファイル名: src/main.rs

```
# struct Point {
#     x: i32,
#     y: i32,
# }
#
# use std::fmt;

impl fmt::Display for Point {
    fn fmt(&self, f: &mut fmt::Formatter) -> fmt::Result {
        write!(f, "{}, {}", self.x, self.y)
    }
}
```

そうすれば、Point に OutlinePrint トレイトを実装してもコンパイルは成功し、Point インスタンス

スに対して `outline_print` を呼び出し、アスタリスクのふちの中に表示することができます。

19.2.5 ニュータイプパターンを使用して外部の型に外部のトレイトを実装する

第 10 章の「型にトレイトを実装する」節で、トレイトか型がクレートにローカルな限り、型にトレイトを実装できると述べるオーファンルールについて触れました。ニュータイプパターンを使用してこの制限を回避することができ、タプル構造体に新しい型を作成することになります。(タプル構造体については、第 5 章の「異なる型を生成する名前付きフィールドのないタプル構造体を使用する」節で講義しました。) タプル構造体は 1 つのフィールドを持ち、トレイトを実装したい型の薄いラップになるでしょう。そして、ラップの型はクレートにローカルなので、トレイトをラップに実装できます。ニュータイプという用語は、Haskell プログラミング言語に端を発しています。このパターンを使用するのに実行時のパフォーマンスを犠牲にすることはなく、ラップ型はコンパイル時に省かれます。

例として、`Vec<T>` に `Display` を実装したいとしましょう。`Display` トレイトも `Vec<T>` 型もクレートの外で定義されているので、直接それを行うことはオーファンルールにより妨げられます。`Vec<T>` のインスタンスを保持する `Wrapper` 構造体を作成できます; そして、`Wrapper` に `Display` を実装し、`Vec<T>` 値を使用できます。リスト 19-31 のように。

ファイル名: `src/main.rs`

```
use std::fmt;

struct Wrapper(Vec<String>);

impl fmt::Display for Wrapper {
    fn fmt(&self, f: &mut fmt::Formatter) -> fmt::Result {
        write!(f, "[{}]", self.0.join(", "))
    }
}

fn main() {
    let w = Wrapper(vec![String::from("hello"), String::from("world")]);
    println!("w = {}", w);
}
```

リスト 19-31: `Vec<String>` の周りに `Wrapper` を作成して `Display` を実装する

`Display` の実装は、`self.0` で中身の `Vec<T>` にアクセスしています。`Wrapper` はタプル構造体で、`Vec<T>` がタプルの添え字 `0` の要素だからです。それから、`Wrapper` に対して `Display` 型の機能を使用できます。

このテクニックを使用する欠点は、`Wrapper` が新しい型なので、保持している値のメソッドがないことです。`self.0` に委譲して、`Wrapper` を `Vec<T>` と全く同様に扱えるように、`Wrapper` に直接 `Vec<T>` の全てのメソッドを実装しなければならないでしょう。内部の型が持つ全てのメソッドを新しい型に

持たせたいなら、Deref トレイト (第 15 章の「Deref トレイトでスマートポインタを普通の参照のように扱う」節で議論しました) を Wrapper に実装して、内部の型を返すことは解決策の 1 つでしょう。内部の型のメソッド全部を Wrapper 型に持たせたくない (例えば、Wrapper 型の機能を制限するなど) なら、本当に欲しいメソッドだけを手動で実装しなければならないでしょう。

もう、トレイトに関してニュータイプパターンが使用される方法を知りました; トレイトが関連しなくても、有用なパターンでもあります。焦点を変更して、Rust の型システムと相互作用する一部の高度な方法を見ましょう。

19.3 高度な型

Rust の型システムには、この本で触れたけれども、まだ議論していない機能があります。ニュータイプが何故型として有用なのかを調査するため、一般化してニュータイプを議論することから始めます。そして、型エイリアスに移ります。ニュータイプに類似しているけれども、多少異なる意味を持つ機能です。また、! 型と動的サイズ決定型も議論します。

注釈: 次の節は、前節「外部の型に外部のトレイトを実装するニュータイプパターン」を読了済みであることを前提にしています。

19.3.1 型安全性と抽象化を求めてニュータイプパターンを使用する

ここまで議論した以上の作業についてもニュータイプパターンは有用で、静的に絶対に値を混同しないことを強制したり、値の単位を示すことを含みます。ニュータイプを使用して単位を示す例をリスト 19-23 で見かけました: Millimeters と Meters 構造体は、u32 値をニュータイプにラップしていたことを思い出してください。型 Millimeters を引数にする関数を書いたら、誤ってその関数を型 Meters や普通の u32 で呼び出そうとするプログラムはコンパイルできないでしょう。

型の実装の詳細を抽象化する際にニュータイプパターンを使用しましょう: 例えば、新しい型を直接使用して、利用可能な機能を制限したら、非公開の内部の型の API とは異なる公開 API を新しい型は露出できます。

ニュータイプはまた、内部の実装を隠匿 (いんとく) することもできます。例を挙げれば、People 型を提供して、人の ID と名前を紐づけて格納する `HashMap<i32, String>` をラップすることができるでしょう。People を使用するコードは、名前の文字列を People コレクションに追加するメソッドなど、提供している公開 API とだけ相互作用するでしょう; そのコードは、内部で i32 ID を名前に代入していることを知る必要はないでしょう。ニュータイプパターンは、カプセル化を実現して実装の詳細を隠匿する軽い方法であり、実装の詳細を隠匿することは、第 17 章の「カプセル化は実装詳細を隠蔽する」節で議論しましたね。

19.3.2 型エイリアスで型同義語を生成する

ニュータイプパターンに付随して、Rust では、既存の型に別の名前を与える**型エイリアス** (type alias: 型別名) を宣言する能力が提供されています。このために、type キーワードを使用します。例えば、以下のように i32 に対して Kilometers というエイリアスを作れます。

```
type Kilometers = i32;
```

これで、別名の Kilometers は i32 と**同義語**になりました; リスト 19-23 で生成した Millimeters と Meters とは異なり、Kilometers は個別の新しい型ではありません。型 Kilometers の値は、型 i32 の値と同等に扱われます。

```
type Kilometers = i32;

let x: i32 = 5;
let y: Kilometers = 5;

println!("x + y = {}", x + y);
```

Kilometers と i32 が同じ型なので、両方の型の値を足し合わせたり、Kilometers の値を i32 引数を取る関数に渡せたりします。ですが、この方策を使用すると、先ほど議論したニュータイプパターンで得られる型チェックの利便性は得られません。

型同義語の主なユースケースは、繰り返しを減らすことです。例えば、こんな感じの長い型があるかもしれません:

```
Box<Fn() + Send + 'static>
```

この長ったらしい型を関数シグニチャや型注釈としてコードのあちこちで記述するのは、面倒で間違いも起きやすいです。リスト 19-32 のそのようなコードで溢れかえったプロジェクトがあることを想像してください。

```
let f: Box<Fn() + Send + 'static> = Box::new(|| println!("hi"));

fn takes_long_type(f: Box<Fn() + Send + 'static>) {
    // --snip--
}

fn returns_long_type() -> Box<Fn() + Send + 'static> {
    // --snip--
    #    Box::new(|| ())
}
```

リスト 19-32: 長い型を多くの場所で使用する

型エイリアスは、繰り返しを減らすことでこのコードをより管理しやすくしてくれます。リスト 19-33 で、冗長な型に `Thunk` (注釈: 塊) を導入し、その型の使用全部をより短い別名の `Thunk` で置き換えることができます。

```
type Thunk = Box<Fn() + Send + 'static>;

let f: Thunk = Box::new(|| println!("hi"));

fn takes_long_type(f: Thunk) {
    // --snip--
}

fn returns_long_type() -> Thunk {
    // --snip--
    # Box::new(|| ())
}
```

リスト 19-33: 型エイリアスの `Thunk` を導入して繰り返しを減らす

このコードの方が遥かに読み書きしやすいです！ 型エイリアスに意味のある名前を選択すると、意図を伝えるのにも役に立つことがあります (**think** は後ほど評価されるコードのための単語なので、格納されるクロージャータには適切な名前です)。

型エイリアスは、繰り返しを減らすために `Result<T, E>` 型ともよく使用されます。標準ライブラリの `std::io` モジュールを考えてください。I/O 処理はしばしば、`Result<T, E>` を返して処理がうまく動かなかった時を扱います。このライブラリには、全ての可能性のある I/O エラーを表す `std::io::Error` 構造体があります。`std::io` の関数の多くは、`Write` トレイトの以下の関数のように `E` が `std::io::Error` の `Result<T, E>` を返すでしょう:

```
use std::io::Error;
use std::fmt;

pub trait Write {
    fn write(&mut self, buf: &[u8]) -> Result<usize, Error>;
    fn flush(&mut self) -> Result<(), Error>;

    fn write_all(&mut self, buf: &[u8]) -> Result<(), Error>;
    fn write_fmt(&mut self, fmt: fmt::Arguments) -> Result<(), Error>;
}
```

`Result<..., Error>` が何度も繰り返されています。そんな状態なので、`std::io` にはこんな類のエイリアス宣言があります:

```
type Result<T> = Result<T, std::io::Error>;
```

この宣言は `std::io` モジュール内にあるので、フルパスエイリアスの `std::io::Result<T>` を使用

できます。つまり、E が `std::io::Error` で埋められた `Result<T, E>` です。その結果、Write トレイトの関数シグニチャは、以下のような見た目になります:

```
pub trait Write {
    fn write(&mut self, buf: &[u8]) -> Result<usize>;
    fn flush(&mut self) -> Result<()>;

    fn write_all(&mut self, buf: &[u8]) -> Result<()>;
    fn write_fmt(&mut self, fmt: Arguments) -> Result<()>;
}
```

型エイリアスは、2 通りの方法で役に立っています: コードを書きやすくすることと `std::io` を通して首尾一貫したインターフェイスを与えてくれることです。別名なので、ただの `Result<T, E>` であり、要するに `Result<T, E>` に対して動くメソッドはなんでも使えるし、? 演算子のような特殊な記法も使えます。

19.3.3 never 型は絶対に返らない

Rust には、! という名前の特別な型があります。それは型理論の専門用語では **Empty 型** と呼ばれ値なしを表します。私たちは、関数が値を返すことが決して (**never**) ない時に戻り値の型を記す場所に使われるので、**never type**(訳注: 日本語にはできないので、**never 型** と呼ぶしかないか) と呼ぶのが好きです。こちらが例です:

```
fn bar() -> ! {
    // --snip--
}
```

このコードは、「関数 bar は **never** を返す」と解釈します。**never** を返す関数は、**発散する関数 (diverging function)** と呼ばれます。型 ! の値は生成できないので、bar からリターンする (呼び出し元に制御を戻す) ことは決してできません。

ですが、値を絶対に生成できない型をどう使用するのでしょうか? リスト 2-5 のコードを思い出してください; リスト 19-34 に一部を再掲します。

```
# let guess = "3";
# loop {
    let guess: u32 = match guess.trim().parse() {
        Ok(num) => num,
        Err(_) => continue,
    };
    # break;
# }
```

リスト 19-34: continue になるアームがある match

この時点では、このコードの詳細の一部を飛ばしました。第 6 章の「match 制御フロー演算子」節で、match アームは全て同じ型を返さなければならないと議論しました。従って、例えば以下のコードは動きません：

```
let guess = match guess.trim().parse() {
    Ok(_) => 5,
    Err(_) => "hello",
}
```

このコードの guess は整数かつ文字列にならなければならないでしょうが、Rust では、guess は 1 つの型にしかならないことを要求されます。では、continue は何を返すのでしょうか？ どうやってリスト 19-34 で 1 つのアームからは u32 を返し、別のアームでは、continue で終わっていたのでしょうか？

もうお気づきかもしれませんが、continue は ! 値です。つまり、コンパイラが guess の型を計算する時、両方の match アームを見て、前者は u32 の値、後者は ! 値となります。! は絶対に値を持ち得ないので、コンパイラは、guess の型は u32 と決定するのです。

この振る舞いを解説する公式の方法は、型 ! の式は、他のどんな型にも型強制され得るということです。この match アームを continue で終えることができます。何故なら、continue は値を返さないからです；その代わりに制御をループの冒頭に戻すので、Err の場合、guess には絶対に値を代入しないのです。

never 型は、panic! マクロとも有用です。Option<T> 値に対して呼び出して、値かパニックを生成した unwrap 関数を覚えていますか？ こちらがその定義です：

```
impl<T> Option<T> {
    pub fn unwrap(self) -> T {
        match self {
            Some(val) => val,
            None => panic!("called `Option::unwrap()` on a `None` value"),
        }
    }
}
```

このコードにおいて、リスト 19-34 の match と同じことが起きています：コンパイラは、val の型は T で、panic! の型は ! なので、match 式全体の結果は T と確認します。panic! は値を生成しないので、このコードは動きます。つまり、プログラムを終了するのです。None の場合、unwrap から値は返さないで、このコードは合法なのです。

型が ! の最後の式は、loop です：

```
// 永遠に
print!("forever ");

loop {
    // さらに永遠に
```

```
    print!("and ever ");  
}
```

ここで、ループは終わりませんので、`!` が式の値です。ところが、`break` を含んでいたら、これは真実にはならないでしょう。`break` に到達した際にループが終了してしまうからです。

19.3.4 動的サイズ決定型と Sized トレイト

コンパイラが特定の型の値 1 つにどれくらいのスペースのメモリを確保するのかなどの特定の詳細を知る必要があるために、**Rust** の型システムには混乱を招きやすい細かな仕様があります: **動的サイズ決定型** の概念です。時として **DST** や **サイズなし型** とも称され、これらの型により、実行時にしかサイズを知ることのできない値を使用するコードを書かせてくれます。

`str` と呼ばれる動的サイズ決定型の詳細を深掘りしましょう。本を通して使用してきましたね。そうですね。`&str` ではなく、`str` は単独で **DST** なのです。実行時までには文字列の長さを知ることができず、これは、型 `str` の変数を生成したり、型 `str` を引数に取ることはできないことを意味します。動かない以下のコードを考えてください:

```
// こんにちは  
let s1: str = "Hello there!";  
// 調子はどう?  
let s2: str = "How's it going?";
```

コンパイラは、特定の型のどんな値に対しても確保するメモリ量を知る必要があり、ある型の値は全て同じ量のメモリを使用しなければなりません。**Rust** でこのコードを書くことが許容されたら、これら 2 つの `str` 値は、同じ量のスペースを消費する必要があったでしょう。ですが、長さが異なります: `s1` は、12 バイトのストレージが必要で、`s2` は 15 バイトです。このため、動的サイズ決定型を保持する変数を生成することはできないのです。

では、どうすればいいのでしょうか? この場合、もう答えはご存知です: `s1` と `s2` の型を `str` ではなく、`&str` にすればいいのです。第 4 章の「文字列スライス」節でスライスデータ構造は、開始地点とスライスの長さを格納していると述べたことを思い出してください。

従って、`&T` は、`T` がどこにあるかのメモリアドレスを格納する単独の値だけれども、`&str` は **2 つ** の値なのです: `str` のアドレスとその長さです。そのため、コンパイル時に `&str` のサイズを知ることができます: `usize` の長さの 2 倍です。要するに、参照している文字列の長さによらず、常に `&str` のサイズがわかります。通常、このようにして **Rust** では動的サイズ決定型が使用されます: 動的情報のサイズを格納する追加のちょっとしたメタデータがあるのです。動的サイズ決定型の黄金規則は、常に動的サイズ決定型の値をなんらかの種類のポインタの背後に配置しなければならないということです。

`str` を全ての種類のポインタと組み合わせられます: 例を挙げれば、`Box<str>` や `Rc<str>` などです。実際、これまでに見かけましたが、異なる動的サイズ決定型でした: **トレイト** です。全てのトレ

イトは、トレイト名を使用して参照できる動的サイズ決定型です。第 17 章の「トレイトオブジェクトで異なる型の値を許容する」節で、トレイトをトレイトオブジェクトとして使用するには、`&Trait` や `Box<Trait>` (`Rc<Trait>` も動くでしょう) など、ポインタの背後に配置しなければならないことに触れました。

DST を扱うために、Rust には `Sized` トレイトと呼ばれる特定のトレイトがあり、型のサイズがコンパイル時にわかるかどうかを決定します。このトレイトは、コンパイル時にサイズの判明する全てのものに自動的に実装されます。加えて、コンパイラは暗黙的に全てのジェネリックな関数に `Sized` の境界を追加します。つまり、こんな感じのジェネリック関数定義は:

```
fn generic<T>(t: T) {  
    // --snip--  
}
```

実際にはこう書いたかのように扱われます:

```
fn generic<T: Sized>(t: T) {  
    // --snip--  
}
```

既定では、ジェネリック関数はコンパイル時に判明するサイズがある型に対してのみ動きます。ですが、以下の特別な記法を用いてこの制限を緩めることができます:

```
fn generic<T: ?Sized>(t: &T) {  
    // --snip--  
}
```

`?Sized` のトレイト境界は、`Sized` のトレイト境界の逆になります: これを「`T` は `Sized` かもしれないし、違うかもしれない」と解釈するでしょう。この記法は、`Sized` にのみ利用可能で、他のトレイトにはありません。

また、`t` 引数の型を `T` から `&T` に切り替えたことにも注目してください。型は `Sized` でない可能性があるため、なんらかのポインタの背後に使用する必要があります。今回は、参照を選択しました。

次は、関数とクロージャについて語ります!

19.4 高度な関数とクロージャ

最後に関数とクロージャに関連する高度な機能の一部を探究し、これには関数ポインタとクロージャの返却が含まれます。

19.4.1 関数ポインタ

クロージャを関数に渡す方法について語りました; 普通の関数を関数に渡すこともできるのです! 新しいクロージャを定義するのではなく、既に定義した関数を渡したい時にこのテクニックは有用です。これを関数ポインタで行うと、関数を引数として他の関数に渡して使用できます。関数は、型 `fn` (小文字の `f` です) に型強制されます。Fn クロージャトレイトと混同すべきではありません。fn 型は、**関数ポインタ**と呼ばれます。引数が関数ポインタであると指定する記法は、クロージャのものと似ています。リスト 19-35 のように。

ファイル名: `src/main.rs`

```
fn add_one(x: i32) -> i32 {
    x + 1
}

fn do_twice(f: fn(i32) -> i32, arg: i32) -> i32 {
    f(arg) + f(arg)
}

fn main() {
    let answer = do_twice(add_one, 5);

    // 答えは{}
    println!("The answer is: {}", answer);
}
```

リスト 19-35: `fn` 型を使用して引数として関数ポインタを受け入れる

このコードは、`The answer is: 12` と出力します。`do_twice` の引数 `f` は、型 `i32` の 1 つの引数を取り、`i32` を返す `fn` と指定しています。それから、`do_twice` の本体で `f` を呼び出すことができます。`main` では、関数名の `add_one` を最初の引数として `do_twice` に渡せます。

クロージャと異なり、`fn` はトレイトではなく型なので、トレイト境界として `Fn` トレイトの 1 つでジェネリックな型引数を宣言するのではなく、直接 `fn` を引数の型として指定します。

関数ポインタは、クロージャトレイト 3 つ全て (`Fn`、`FnMut`、`FnOnce`) を実装するので、常に関数ポインタを引数として、クロージャを期待する関数に渡すことができます。関数が関数とクロージャどちらも受け入れられるように、ジェネリックな型とクロージャトレイトの 1 つを使用して関数を書くのが最善です。

クロージャではなく `fn` だけを受け入れたいところの一例は、クロージャのない外部コードとのインターフェイスです: `C` 関数は引数として関数を受け入れられますが、`C` にはクロージャがありません。

インラインでクロージャが定義されるか、名前付きの関数を使用できるであろう箇所の例として、`map` の使用に目を向けましょう。`map` 関数を使用して数字のベクタを文字列のベクタに変換するには、

このようにクロージャを使用できるでしょう:

```
let list_of_numbers = vec![1, 2, 3];
let list_of_strings: Vec<String> = list_of_numbers
    .iter()
    .map(|i| i.to_string())
    .collect();
```

あるいは、このようにクロージャの代わりに `map` に引数として関数を名指しできるでしょう:

```
let list_of_numbers = vec![1, 2, 3];
let list_of_strings: Vec<String> = list_of_numbers
    .iter()
    .map(ToString::to_string)
    .collect();
```

先ほど「高度なトレイト」節で語ったフルパス記法を使わなければならないことに注意してください。というのも、`to_string` という利用可能な関数は複数あるからです。ここでは、`ToString` トレイトで定義された `to_string` 関数を使用していて、このトレイトは標準ライブラリが、`Display` を実装するあらゆる型に実装しています。

このスタイルを好む方もいますし、クロージャを使うのを好む方もいます。どちらも結果的に同じコードにコンパイルされるので、どちらでも、自分にとって明確な方を使用してください。

19.4.2 クロージャを返却する

クロージャはトレイトによって表現されます。つまり、クロージャを直接は返却できないのです。トレイトを返却したい可能性のあるほとんどの場合、代わりにトレイトを実装する具体的な型を関数の戻り値として使用できます。ですが、クロージャではそれはできません。返却可能な具体的な型がないからです; 例えば、関数ポインタの `fn` を戻り値の型として使うことは許容されていません。

以下のコードは、クロージャを直接返そうとしています、コンパイルできません:

```
fn returns_closure() -> Fn(i32) -> i32 {
    |x| x + 1
}
```

コンパイルエラーは以下の通りです:

```
error[E0277]: the trait bound `std::ops::Fn(i32) -> i32 + 'static`:  
std::marker::Sized` is not satisfied  
-->  
|  
1 | fn returns_closure() -> Fn(i32) -> i32 {  
|                                     ^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^ `std::ops::Fn(i32) -> i32 + 'static`  
does not have a constant size known at compile-time  
|
```

```
= help: the trait `std::marker::Sized` is not implemented for
`std::ops::Fn(i32) -> i32 + 'static`
= note: the return type of a function must have a statically known size
```

エラーは、再度 `Sized` トレイトを参照しています！ コンパイラには、クロージャを格納するのに必要なスペースがどれくらいかわからないのです。この問題の解決策は先ほど見かけました。トレイトオブジェクトを使えます：

```
fn returns_closure() -> Box<Fn(i32) -> i32> {
    Box::new(|x| x + 1)
}
```

このコードは、問題なくコンパイルできます。トレイトオブジェクトについて詳しくは、第 17 章の「トレイトオブジェクトで異なる型の値を許容する」節を参照してください。

次は、マクロを見てみましょう！

19.5 マクロ

本全体を通じて `println!` のようなマクロを使用してきましたが、マクロがなんなのかや、どう動いているのかということは完全には探究していませんでした。Rust において、**マクロ**という用語はある機能の集合のことを指します：`macro_rules!` を使った**宣言的 (declarative)** マクロと、3 種類の手続き的 (**procedural**) マクロ：

- 構造体と `enum` に `derive` 属性を使ったときに追加されるコードを指定する、カスタムの `#[derive]` マクロ
- 任意の要素に使えるカスタムの属性を定義する、属性風のマクロ
- 関数のように見えるが、引数として指定されたトークンに対して作用する関数風のマクロ

です。

それぞれについて一つずつ話していきますが、その前にまず、どうして関数がすでにあるのにマクロなんてものが必要なのか見てみましょう。

19.5.1 マクロと関数の違い

基本的に、マクロは、他のコードを記述するコードを書く術であり、これは**メタプログラミング**として知られています。付録 C で、`derive` 属性を議論し、これは、色々なトレイトの実装を生成してくれるのでした。また、本を通して `println!` や `vec!` マクロを使用してきました。これらのマクロは全て、**展開**され、手で書いたよりも多くのコードを生成します。

メタプログラミングは、書いて管理しなければならないコード量を減らすのに有用で、これは、関数の役目の一つでもあります。ですが、マクロには関数にはない追加の力があります。

関数シグニチャは、関数の引数の数と型を宣言しなければなりません。一方、マクロは可変長の引

数を取れます: `println!("hello")` のように 1 引数で呼んだり、`println!("hello {}", name)` のように 2 引数で呼んだりできるのです。また、マクロは、コンパイラがコードの意味を解釈する前に展開されるので、例えば、与えられた型にトレイトを実装できます。関数ではできません。何故なら、関数は実行時に呼ばれ、トレイトはコンパイル時に実装される必要があるからです。

関数ではなくマクロを実装する欠点は、**Rust** コードを記述する **Rust** コードを書いているので、関数定義よりもマクロ定義は複雑になることです。この間接性のために、マクロ定義は一般的に、関数定義よりも、読みにくく、わかりにくく、管理しづらいです。

マクロと関数にはもう一つ、重要な違いがあります: ファイル内で呼び出す**前**にマクロは定義したりスコープに導入しなければなりません、一方で関数はどこにでも定義でき、どこでも呼び出せます。

19.5.2 一般的なメタプログラミングのために `macro_rules!` で宣言的なマクロ

Rust において、最もよく使用される形態のマクロは、**宣言的なマクロ**です。これらは時として、**例によるマクロ**、**`macro_rules!` マクロ**、あるいはただ単に**マクロ**とも称されます。核となるのは、宣言的なマクロは、**Rust** の `match` 式に似た何かを書けるということです。第 6 章で議論したように、`match` 式は、式を取り、式の結果の値をパターンと比較し、それからマッチしたパターンに紐づいたコードを実行する制御構造です。マクロも、あるコードと紐付けられたパターンと値を比較します。ここで、値とはマクロに渡されたリテラルの **Rust** のソースコードそのもののこと。パターンがそのソースコードの構造と比較されます。各パターンに紐づいたコードは、それがマッチしたときに、マクロに渡されたコードを置き換えます。これは全て、コンパイル時に起きます。

マクロを定義するには、`macro_rules!` 構文を使用します。`vec!` マクロが定義されている方法を見て、`macro_rules!` を使用する方法を探究しましょう。`vec!` マクロを使用して特定の値で新しいベクタを生成する方法は、第 8 章で講義しました。例えば、以下のマクロは、3 つの整数を持つ新しいベクタを生成します:

```
let v: Vec<u32> = vec![1, 2, 3];
```

また、`vec!` マクロを使用して 2 整数のベクタや、5 つの文字列スライスのベクタなども生成できます。同じことを関数を使って行うことはできません。予め、値の数や型がわかっているからです。

リスト 19-28 で些 (いささ) か簡略化された `vec!` マクロの定義を見かけましょう。

ファイル名: `src/lib.rs`

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch19-advanced-features/listing-19-28/src/lib.rs}}
```

リスト 19-28: `vec!` マクロ定義の簡略化されたバージョン

標準ライブラリの `vec!` マクロの実際の定義は、予め正確なメモリ量を確保するコードを含み

ます。その最適化コードは、ここでは簡略化のために含みません。

`#[macro_export]` 注釈は、マクロを定義しているクレートがスコープに持ち込まれたなら、無条件でこのマクロが利用可能になるべきことを示しています。この注釈がなければ、このマクロはスコープに導入されることができません。

それから、`macro_rules!` でマクロ定義と定義しているマクロの名前をピックリマークなしで始めています。名前はこの場合 `vec` であり、マクロ定義の本体を意味する波括弧が続いています。

`vec!` 本体の構造は、`match` 式の構造に類似しています。ここではパターン `($($x:expr),*)` の 1 つのアーム、`=>` とこのパターンに紐づくコードのブロックが続きます。パターンが合致すれば、紐づいたコードのブロックが発されます。これがこのマクロの唯一のパターンであることを踏まえると、合致する合法的な方法は一つしかありません；それ以外は、全部エラーになるでしょう。より複雑なマクロには、2 つ以上のアームがあるでしょう。

マクロ定義で合法的なパターン記法は、第 18 章で講義したパターン記法とは異なります。というのも、マクロのパターンは値ではなく、Rust コードの構造に対してマッチされるからです。リスト 19-28 のパターンの部品がどんな意味か見ていきましょう；マクロパターン記法全ては参考文献をご覧ください。

まず、1 組のカッコがパターン全体を囲んでいます。次にドル記号 `($)`、そして 1 組のカッコが続き、このかっことは、置き換えるコードで使用するたにかっこ内でパターンにマッチする値をキャプチャします。`$()` の内部には、`$x:expr` があり、これは任意の Rust 式にマッチし、その式に `$x` という名前を与えます。

`$()` に続くカンマは、`$()` にキャプチャされるコードにマッチするコードの後に、区別を意味するリテラルのカンマ文字が現れるという選択肢もあることを示唆しています。`*` は、パターンが `*` の前にあるもの 0 個以上にマッチすることを指定しています。

このマクロを `vec![1, 2, 3]`；と呼び出すと、`$x` パターンは、3 つの式 1、2、3 で 3 回マッチします。

さて、このアームに紐づくコードの本体のパターンに目を向けましょう：`$()*` 部分内部の `temp_vec.push()` コードは、パターンがマッチした回数に応じて 0 回以上パターン内で `$()` にマッチする箇所ごとに生成されます。`$x` はマッチした式それぞれに置き換えられます。このマクロを `vec![1, 2, 3]`；と呼び出すと、このマクロ呼び出しを置き換え、生成されるコードは以下のようになるでしょう：

```
{
    let mut temp_vec = Vec::new();
    temp_vec.push(1);
    temp_vec.push(2);
    temp_vec.push(3);
    temp_vec
}
```

任意の型のあらゆる数の引数を取り、指定した要素を含むベクタを生成するコードを生成できるマクロを定義しました。

`macro_rules!` には、いくつかの奇妙なコーナーケースがあります。将来、Rust には別種の宣言的マクロが登場する予定です。これは、同じように働くけれども、それらのコーナーケースのうちいくつかを修正します。そのアップデート以降、`macro_rules!` は事実上非推奨 (deprecated) となる予定です。この事実と、ほとんどの Rust プログラマーはマクロを書くよりも使うことが多いということを考えて、`macro_rules!` についてはこれ以上語らないことにします。もしマクロの書き方についてもっと知りたければ、オンラインのドキュメントや、“The Little Book of Rust Macros” のようなその他のリソースを参照してください。

19.5.3 属性からコードを生成する手続き的マクロ

2 つ目のマクロの形は、**手続き的マクロ**と呼ばれ、より関数のように働きます（そして一種の手続ききです）。宣言的マクロがパターンマッチングを行い、マッチしたコードを他のコードで置き換えていたのとは違い、手続き的マクロは、コードを入力として受け取り、そのコードに対して作用し、出力としてコードを生成します。

3 種の手続き的マクロ (カスタムの `derive` マクロ、属性風マクロ、関数風マクロ) はみな同じような挙動をします。

手続き的マクロを作る際は、その定義はそれ専用の特殊なクレート内に置かれる必要があります。これは複雑な技術的理由によるものであり、将来的には解消したいです。手続き的マクロを使うと Listing 19-29 のコードのようになります。`some_attribute` がそのマクロを使うためのプレースホルダーです。

ファイル名: `src/lib.rs`

```
use proc_macro;

#[some_attribute]
pub fn some_name(input: TokenStream) -> TokenStream {
}
```

Listing 19-29: 手続き的マクロの使用例

手続き的マクロを定義する関数は `TokenStream` を入力として受け取り、`TokenStream` を出力として生成します。`TokenStream` 型は Rust に内蔵されている `proc_macro` クレートで定義されており、トークンの列を表します。ここがマクロの一番重要なところなのですが、マクロが作用するソースコードは、入力の `TokenStream` へと変換され、マクロが生成するコードが出力の `TokenStream` なのです。この関数には属性もつけられていますが、これはどの種類の手続き的マクロを作っているのかを指定します。同じクレート内に複数の種類の手続き的マクロを持つことも可能です。

様々な種類の手続き的マクロを見てみましょう。カスタムの `derive` マクロから始めて、そのあと他の種類との小さな相違点を説明します。

19.5.4 カスタムの derive マクロの書き方

hello_macro という名前のクレートを作成してみましょう。このクレートは、hello_macro という関連関数が 1 つある HelloMacro というトレイトを定義します。クレートの使用者に使用者の型に HelloMacro トレイトを実装することを強制するのではなく、使用者が型を `#[derive(HelloMacro)]` で注釈して hello_macro 関数の既定の実装を得られるように、手続き的マクロを提供します。既定の実装は、`Hello, Macro! My name is TypeName!` (訳注: こんにちは、マクロ! 僕の名前は **TypeName** だよ!) と出力し、ここで `TypeName` はこのトレイトが定義されている型の名前です。言い換えると、他のプログラマに我々のクレートを使用して、リスト 19-30 のようなコードを書けるようにするクレートを記述します。

ファイル名: `src/main.rs`

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch19-advanced-features/listing-19-30/src/main.rs
}}
```

リスト 19-30: 我々の手続き的マクロを使用した時にクレートの使用者が書けるようになるコード

このコードは完成したら、`Hello, Macro! My name is Pancakes!` (`Pancakes`: ホットケーキ) と出力します。最初の手順は、新しいライブラリクレートを作成することです。このように:

```
$ cargo new hello_macro --lib
```

次に `HelloMacro` トレイトと関連関数を定義します:

ファイル名: `src/lib.rs`

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch19-advanced-features/no-listing-20-impl-
hellomacro-for-pancakes/hello_macro/src/lib.rs}}
```

トレイトと関数があります。この時点でクレートの使用者は、以下のように、このトレイトを実装して所望の機能を達成できるでしょう。

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch19-advanced-features/no-listing-20-impl-
hellomacro-for-pancakes/pancakes/src/main.rs}}
```

しかしながら、使用者は、hello_macro を使用したい型それぞれに実装ブロックを記述する必要があります; この作業をしなくても済むようにしたいです。

さらに、まだ hello_macro 関数にトレイトが実装されている型の名前を出力する既定の実装を提供することはできません: **Rust** にはリフレクションの能力がないので、型の名前を実行時に検索することができないのです。コンパイル時にコード生成するマクロが必要です。

注釈: リフレクションとは、実行時に型名や関数の中身などを取得する機能のことです。言語によって提供されていたりいなかったりしますが、実行時にメタデータがないと取得できないので、Rust や C++ のようなアセンブリコードに翻訳され、パフォーマンスを要求される高級言語では、提供されないのが一般的と思われます。

次の手順は、手続き的マクロを定義することです。これを執筆している時点では、手続き的マクロは、独自のクレートに存在する必要があります。最終的には、この制限は持ち上げられる可能性があります。クレートとマクロクレートを構成する慣習は以下の通りです: foo というクレートに対して、カスタムの **derive** 手続き的マクロクレートは `foo_derive` と呼ばれます。hello_macro プロジェクト内に、`hello_macro_derive` と呼ばれる新しいクレートを開始しましょう:

```
$ cargo new hello_macro_derive --lib
```

2 つのクレートは緊密に関係しているので、hello_macro クレートのディレクトリ内に手続き的マクロクレートを作成しています。hello_macro のトレイト定義を変更したら、hello_macro_derive の手続き的マクロの実装も変更しなければならないでしょう。2 つのクレートは個別に公開される必要があります、これらのクレートを使用するプログラマは、両方を依存に追加し、スコープに導入する必要があります。hello_macro クレートに依存として、hello_macro_derive を使用させ、手続き的マクロのコードを再エクスポートすることもできるかもしれませんが、このようなプロジェクトの構造にすることで、プログラマが **derive** 機能を使用しなくても、hello_macro を使用することが可能になります。

hello_macro_derive クレートを手続き的マクロクレートとして宣言する必要があります。また、すぐにわかるように、`syn` と `quote` クレートの機能も必要になるので、依存として追加する必要があります。以下を hello_macro_derive の **Cargo.toml** ファイルに追加してください:

ファイル名: `hello_macro_derive/Cargo.toml`

```
{{#include ../listings/ch19-advanced-features/listing-19-31/hello_macro/  
hello_macro_derive/Cargo.toml:7:12}}
```

手続き的マクロの定義を開始するために、hello_macro_derive クレートの **src/lib.rs** ファイルにリスト 19-31 のコードを配置してください。impl_hello_macro 関数の定義を追加するまでこのコードはコンパイルできないことに注意してください。

ファイル名: `hello_macro_derive/src/lib.rs`

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch19-advanced-features/listing-19-31/hello_macro/  
hello_macro_derive/src/lib.rs}}
```

リスト 19-31: Rust コードを処理するためにほとんどの手続き的マクロクレートに必要なコード

TokenStream をパースする役割を持つ `hello_macro_derive` 関数と、構文木を変換する役割を持つ `impl_hello_macro` 関数にコードを分割したことに注目してください：これにより手続き的マクロを書くのがより簡単になります。外側の関数（今回だと `hello_macro_derive`）のコードは、あなたが見かけたり作ったりするであろうほとんどすべての手続き的マクロのクレートで同じです。内側の関数（今回だと `impl_hello_macro`）の内部に書き込まれるコードは、手続き的マクロの目的によって異なってくるでしょう。

3 つの新しいクレートを導入しました： `proc_macro`、`syn`、`quote` です。`proc_macro` クレートは、Rust に付随してくるので、**Cargo.toml** の依存に追加する必要はありませんでした。`proc_macro` クレートはコンパイラの API で、私達のコードから Rust のコードを読んだり操作したりすることを可能にします。

`syn` クレートは、文字列から Rust コードを構文解析し、処理を行えるデータ構造にします。`quote` クレートは、`syn` データ構造を取り、Rust コードに変換し直します。これらのクレートにより、扱いたい可能性のあるあらゆる種類の Rust コードを構文解析するのがはるかに単純になります：Rust コードの完全なパーサを書くのは、単純な作業ではないのです。

`hello_macro_derive` 関数は、ライブラリの実用者が型に `#[derive(HelloMacro)]` を指定した時に呼び出されます。それが可能な理由は、ここで `hello_macro_derive` 関数を `proc_macro_derive` で注釈し、トレイト名に一致する `HelloMacro` を指定したからです；これは、ほとんどの手続き的マクロが倣う慣習です。

この関数はまず、TokenStream からの `input` をデータ構造に変換し、解釈したり操作したりできるようにします。ここで `syn` が登場します。`syn` の `parse` 関数は TokenStream を受け取り、パースされた Rust のコードを表現する `DeriveInput` 構造体を返します。**Listing 19-32** は `struct Pancakes`；という文字列をパースすることで得られる `DeriveInput` 構造体の関係ある部分を表しています。

```
DeriveInput {  
    // --snip--  
  
    ident: Ident {  
        ident: "Pancakes",  
        span: #0 bytes(95..103)  
    },  
    data: Struct(  
        DataStruct {  
            struct_token: Struct,  
            fields: Unit,  
            semi_token: Some(  
                Semi  
            )  
        }  
    )  
}
```

Listing 19-32: このマクロを使った属性を持つ Listing 19-30 のコードをパースしたときに得られ

る `DeriveInput` インスタンス

この構造体のフィールドは、構文解析した **Rust** コードが `Pancakes` という `ident` (識別子、つまり名前) のユニット構造体であることを示しています。この構造体には **Rust** コードのあらゆる部分を記述するフィールドがもっと多くあります; `DeriveInput` の `syn` ドキュメンテーションで詳細を確認してください。

まもなく `impl_hello_macro` 関数を定義し、そこにインクルードしたい新しい **Rust** コードを構築します。でもその前に、私達の `derive` マクロのための出力もまた `TokenStream` であることに注目してください。返された `TokenStream` をクレートの使用者が書いたコードに追加しているので、クレートをコンパイルすると、我々が修正した `TokenStream` で提供している追加の機能を得られます。

ここで、`unwrap` を呼び出すことで、`syn::parse` 関数が失敗したときに `hello_macro_derive` 関数をパニックさせていることにお気づきかもしれません。エラー時にパニックするのは、手続き的マクロコードでは必要なことです。何故なら、`proc_macro_derive` 関数は、手続き的マクロの **API** に従うために、`Result` ではなく `TokenStream` を返さなければならないからです。この例については、`unwrap` を使用して簡略化することを選択しました; プロダクションコードでは、`panic!` か `expect` を使用して何が間違っていたのかより具体的なエラーメッセージを提供すべきです。

今や、`TokenStream` からの注釈された **Rust** コードを `DeriveInput` インスタンスに変換するコードができたので、Listing 19-33 のように、注釈された型に `HelloMacro` トレイトを実装するコードを生成しましょう:

ファイル名: `hello_macro_derive/src/lib.rs`

```
{{#rustdoc_include ../listings/ch19-advanced-features/listing-19-33/hello_macro/
hello_macro_derive/src/lib.rs:here}}
```

Listing 19-33: パースされた **Rust** コードを用いて `HelloMacro` トレイトを実装する

`ast.ident` を使って、注釈された型の名前 (識別子) を含む `Ident` 構造体インスタンスを得ています。Listing 19-32 の構造体を見ると、`impl_hello_macro` 関数を Listing 19-30 のコードに実行したときに私達の得る `ident` は、フィールド `ident` の値として `"Pancakes"` を持つだろうとわかります。従って、Listing 19-33 における変数 `name` は構造体 `Ident` のインスタンスをもちます。このインスタンスは、`print` された時は文字列 `"Pancakes"`、即ち Listing 19-30 の構造体の名前となります。

`quote!` マクロを使うことで、私達が返したい **Rust** コードを定義することができます。ただ、コンパイラが期待しているものは `quote!` マクロの実行結果とはちょっと違うものです。なので、`TokenStream` に変換してやる必要があります。マクロの出力する直接表現を受け取り、必要とされている `TokenStream` 型の値を返す `into` メソッドを呼ぶことでこれを行います。

このマクロはまた、非常にかっこいいテンプレート機構も提供してくれます; `#name` と書くと、`quote!` はそれを `name` という変数の値と置き換えます。普通のマクロが動作するのと似た繰り返しさえ行えます。本格的に入門したいなら、`quote` クレートの `doc` をご確認ください。

手続き的マクロには使用者が注釈した型に対して `HelloMacro` トレイトの実装を生成してほしいですが、これは `#name` を使用することで得られます。トレイトの実装には 1 つの関数 `hello_macro` があり、この本体に提供したい機能が含まれています: `Hello, Macro! My name is`、そして、注釈した型の名前を出力する機能です。

ここで使用した `stringify!` マクロは、言語に組み込まれています。`1 + 2` などのような **Rust** の式を取り、コンパイル時に `"1 + 2"` のような文字列リテラルにその式を変換します。これは、`format!` や `println!` のような、式を評価し、そしてその結果を `String` に変換するマクロとは異なります。`#name` 入力が文字通り出力されるべき式という可能性もあるので、`stringify!` を使用しています。`stringify!` を使用すると、コンパイル時に `#name` を文字列リテラルに変換することで、メモリ確保しなくても済みます。

この時点で、`cargo build` は `hello_macro` と `hello_macro_derive` の両方で成功するはずです。これらのクレートをリスト 19-30 のコードにフックして、手続き的マクロが動くところを確認しましょう! `cargo new pancakes` であなたのプロジェクトのディレクトリ (訳注: これまでに作った 2 つのクレート内ではないということ) に新しいバイナリプロジェクトを作成してください。`hello_macro` と `hello_macro_derive` を依存として `pancakes` クレートの **Cargo.toml** に追加する必要があります。自分のバージョンの `hello_macro` と `hello_macro_derive` を `crates.io` に公開しているなら、普通の依存になるでしょう; そうでなければ、以下のように `path` 依存として指定すればよいです:

```
{{#include ../listings/ch19-advanced-features/no-listing-21-pancakes/pancakes/
Cargo.toml:7:9}}
```

リスト 19-30 のコードを **src/main.rs** に配置し、`cargo run` を実行してください: `Hello, Macro! My name is Pancakes` と出力するはずです。手続き的マクロの `HelloMacro` トレイトの実装は、`pancakes` クレートが実装する必要なく、包含されました; `#[derive(HelloMacro)]` がトレイトの実装を追加したのです。

続いて、他の種類の手続き的マクロがカスタムの `derive` マクロとどのように異なっているか見てみましょう。

19.5.5 属性風マクロ

属性風マクロはカスタムの `derive` マクロと似ていますが、`derive` 属性のためのコードを生成するのではなく、新しい属性を作ることができます。また、属性風マクロはよりフレキシブルでもあります: `derive` は構造体と `enum` にしか使えませんでした、属性は関数のような他の要素に対しても使えるのです。属性風マクロを使った例を以下に示しています: **web** アプリケーションフレームワークを使っているときに、`route` という関数につける属性名があるとしたす:

```
#[route(GET, "/")]
fn index() {
```

この `#[route]` 属性はそのフレームワークによって手続き的マクロとして定義されたものなのでしょう。マクロを定義する関数のシグネチャは以下のようになっているでしょう：

```
#[proc_macro_attribute]
pub fn route(attr: TokenStream, item: TokenStream) -> TokenStream {
```

ここで、2 つ `TokenStream` 型の引数がありますね。1 つ目は属性の中身：`GET`、`"/` に対応しており、2 つ目は属性が付けられた要素の中身に対応しています。今回だと `fn index() {}` と関数の本体の残りですね。

それ以外において、属性風マクロはカスタムの `derive` マクロと同じ動きをします：クレートタイプとして `proc-macro` を使ってクレートを作り、あなたのほしいコードを生成してくれる関数を実装すればよいです！

19.5.6 関数風マクロ

関数風マクロは、関数呼び出しのように見えるマクロを定義します。これらは、`macro_rules!` マクロのように、関数よりフレキシブルです。たとえば、これらは任意の数の引数を取ることができます。しかし、一般的なメタプログラミングのために `macro_rules!` で宣言的なマクロで話したように、`macro_rules!` マクロは `match` 風の構文を使ってのみ定義できたのでした。関数風マクロは引数として `TokenStream` をとり、その `TokenStream` を定義に従って操作します。操作には、他の 2 つの手続き的マクロと同じように、`Rust` コードが使われます。例えば、`sql!` マクロという関数風マクロで、以下のように呼び出されるものを考えてみましょう：

```
let sql = sql!(SELECT * FROM posts WHERE id=1);
```

このマクロは、中に入れられた `SQL` 文をパースし、それが構文的に正しいことを確かめます。これは `macro_rules!` マクロが可能とするよりも遥かに複雑な処理です。`sql!` マクロは以下のように定義することができるでしょう：

```
#[proc_macro]
pub fn sql(input: TokenStream) -> TokenStream {
```

この定義はカスタムの `derive` マクロのシグネチャと似ています：カッコの中のトークンを受け取り、生成したいコードを返すのです。

19.6 まとめ

ふう！あなたがいま手にした `Rust` の機能はあまり頻繁に使うものではありませんが、非常に特殊な状況ではその存在を思い出すことになるでしょう。たくさんの難しいトピックを紹介しましたが、これは、もしあなたがエラー時の推奨メッセージや他の人のコードでそれらに遭遇した時、その概念

と文法を理解できるようになってほしいからです。この章を、解決策にたどり着くためのリファレンスとして活用してください。

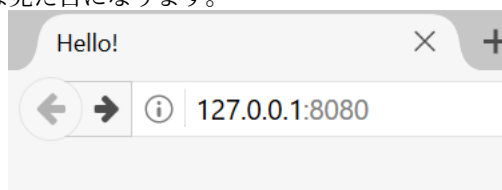
次は、この本で話してきたすべてのことを実際に使って、もう一つプロジェクトをやってみましょう！

第 20 章

最後のプロジェクト：マルチスレッドの Web サーバを構築する

長い旅でしたが、本の末端に到達しました。この章では、共にもう一つプロジェクトを構築して最後の方の章で講義した概念の一部をデモしつつ、それより前の方で学習した内容を思い出してもらいます。

最後のプロジェクトでは、hello と話す Web サーバを作り、Web ブラウザでは、図 20-1 のような見た目になります。



Hello!

Hi from Rust

図 20-1: 最後の共有されたプロジェクト

こちらが Web サーバを構築するプランです:

1. TCP と HTTP について少し学ぶ。
2. ソケットで TCP 接続をリッスンする。
3. 少量の HTTP リクエストを構文解析する。
4. 適切な HTTP レスポンスを生成する。

5. スレッドプールでサーバのスループットを強化する。

ですが、取り掛かる前に、ある小さな事実に触れなければなりません：わたしたちがこれから行うやり方は、Rust で Web サーバを構築する最善の方法ではないだろうということです。これから構築するよりもより完全な Web サーバとスレッドプールの実装を提供する製品利用可能な多くのクレートが、<https://crates.io/> で利用可能なのです。

しかしながら、この章での意図は、学習を手助けすることであり、簡単なやり方を選ぶことはありません。Rust はシステムプログラミング言語なので、取りかかる抽象度を選ぶことができ、他の言語で可能だったり実践的だったりするよりも低レベルまで行くことができます。一般的な考えと将来使う可能性のあるクレートの背後にある技術を学べるように、手動で基本的な HTTP サーバとスレッドプールを書きます。

20.1 シングルスレッドの Web サーバを構築する

シングルスレッドの Web サーバを動かすところから始めます。始める前に、Web サーバ構築に関係するプロトコルをさっと一覧しましょう。これらのプロトコルの詳細は、この本の範疇を超えていますが、さっと眺めることで必要な情報が得られるでしょう。

主に 2 つのプロトコルが Web サーバに関係し、**Hypertext Transfer Protocol (HTTP)**(注釈：ハイパーテキスト転送プロトコル)と、**Transmission Control Protocol (TCP)**(注釈：伝送制御プロトコル)です。両者のプロトコルは、リクエスト・レスポンスプロトコルであり、つまり、クライアントがリクエスト(要求)を初期化し、サーバはリクエストをリッスンし、クライアントにレスポンス(応答)を提供するということです。それらのリクエストとレスポンスの中身は、プロトコルで規定されています。

TCP は、情報がとあるサーバから別のサーバへどう到達するかの詳細を記述するものの、その情報がなんなのかは指定しない、より低レベルのプロトコルです。HTTP はリクエストとレスポンスの中身を定義することで TCP の上に成り立っています。技術的には HTTP を他のプロトコルとともに使用することができますが、大抵の場合、HTTP は TCP の上にデータを送信します。TCP と HTTP のリクエストとレスポンスの生のバイトを取り扱います。

20.1.1 TCP 接続をリッスンする

Web サーバは TCP 接続をリッスンするので、そこが最初に取り掛かる部分になります。標準ライブラリは、`std::net` というこれを行うモジュールを用意しています。通常通り、新しいプロジェクトを作りましょう：

```
$ cargo new hello --bin
   Created binary (application) `hello` project
$ cd hello
```


さて、リスト 20-1 のコードを **src/main.rs** に入力して始めてください。このコードは、TCP ストリームを受信するため 127.0.0.1:7878 というアドレスをリッスンします。入力ストリームを得ると、Connection established! と出力します。

ファイル名: src/main.rs

```
use std::net::TcpListener;

fn main() {
    let listener = TcpListener::bind("127.0.0.1:7878").unwrap();

    for stream in listener.incoming() {
        let stream = stream.unwrap();

        // 接続が確立しました
        println!("Connection established!");
    }
}
```

リスト 20-1: 入力ストリームをリッスンし、ストリームを受け付けた時にメッセージを出力する

TcpListener により、アドレス 127.0.0.1:7878 で TCP 接続をリッスンできます。アドレス内で、コロンの前の区域は、自分のコンピュータを表す IP アドレスで (これはどんなコンピュータでも同じで、特に著者のコンピュータを表すわけではありません)、7878 はポートです。このポートを選択した理由は 2 つあります: HTTP は通常このポートで受け付けられることと、7878 は電話で “rust” と入力されるからです。

この筋書きでの bind 関数は、新しい TcpListener インスタンスを返すという点で new 関数のような働きをします。この関数が bind と呼ばれている理由は、ネットワークにおいて、リッスンすべきポートに接続することは、「ポートに束縛する」(binding to a port) こととして知られているからです。

bind 関数は Result<T, E> を返し、束縛が失敗することもあることを示しています。例えば、ポート 80 に接続するには管理者権限が必要なので (管理者以外はポート 1024 以上しかリッスンできません) 管理者にならずにポート 80 に接続を試みたら、束縛はうまくいかないでしょう。また、別の例として自分のプログラムを 2 つ同時に立ち上げて 2 つのプログラムが同じポートをリッスンしたら、束縛は機能しないでしょう。学習目的のためだけに基本的なサーバを記述しているので、この種のエラーを扱う心配はしません; その代わり、unwrap を使用してエラーが発生したら、プログラムを停止します。

TcpListener の incoming メソッドは、一連のストリームを与えるイテレータを返します (具体的には、型 TcpStream のストリーム)。単独のストリームがクライアント・サーバ間の開かれた接続を表します。接続 (connection) は、クライアントがサーバに接続し、サーバがレスポンスを生成し、サーバが接続を閉じるというリクエストとレスポンス全体の過程の名前です。そのため、TcpStream は自身を読み取って、クライアントが送信したことを確認し、それからレスポンスをストリームに記

述させてくれます。総括すると、この for ループは各接続を順番に処理し、我々が扱えるように一連のストリームを生成します。

とりあえず、ストリームの扱いは、`unwrap` を呼び出してストリームにエラーがあった場合にプログラムを停止することから構成されています; エラーがなければ、プログラムはメッセージを出力します。次のリストで成功した時にさらに多くの機能を追加します。クライアントがサーバに接続する際に `incoming` メソッドからエラーを受け取る可能性がある理由は、実際には接続を走査していないからです。代わりに**接続の試行**を走査しています。接続は多くの理由で失敗する可能性があり、そのうちの多くは、OS 特有です。例を挙げれば、多くの OS には、サポートできる同時に開いた接続数に上限があります; 開かれた接続の一部が閉じられるまでその数字を超えた接続の試行はエラーになります。

このコードを試しに実行してみましょう! 端末で `cargo run` を呼び出し、それから Web ブラウザで **127.0.0.1:7878** をロードしてください。ブラウザは、「接続がリセットされました」などのエラーメッセージを表示するはずですが。サーバが現状、何もデータを返してこないからです。ですが、端末に目を向ければ、ブラウザがサーバに接続した際にいくつかメッセージが出力されるのを目の当たりにするはずです。

```
Running `target/debug/hello`  
Connection established!  
Connection established!  
Connection established!
```

時々、1 回のブラウザリクエストで複数のメッセージが出力されるのを目の当たりにするでしょう; その理由は、ブラウザがページだけでなく、ブラウザのタブに出現する **favicon.ico** アイコンなどの他のリソースにもリクエストを行なっているということかもしれません。

サーバが何もデータを送り返してこないの、ブラウザがサーバに何度も接続を試みているということである可能性もあるでしょう。`stream` がスコープを抜け、ループの最後でドロップされると、接続は `drop` 実装の一部として閉じられます。ブラウザは、再試行することで閉じられた接続を扱うことがあります。問題が一時的なものである可能性があるからです。重要な要素は、TCP 接続へのハンドルを得ることに成功したということです!

特定のバージョンのコードを走らせ終わった時に `ctrl-c` を押して、プログラムを止めることを忘れないでください。そして、一連のコード変更を行った後に `cargo run` を再起動し、最新のコードを実行していることを確かめてください。

20.1.2 リクエストを読み取る

ブラウザからリクエストを読み取る機能を実装しましょう! まず接続を得、それから接続に対して何らかの行動を行う責任を分離するために、接続を処理する新しい関数を開始します。この新しい `handle_connection` 関数において、TCP ストリームからデータを読み取り、ブラウザからデータが送られていることを確認できるように端末に出力します。コードをリスト 20-2 のように変更してくだ

さい。

ファイル名: src/main.rs

```
use std::io::prelude::*;
use std::net::TcpStream;
use std::net::TcpListener;

fn main() {
    let listener = TcpListener::bind("127.0.0.1:7878").unwrap();

    for stream in listener.incoming() {
        let stream = stream.unwrap();

        handle_connection(stream);
    }
}

fn handle_connection(mut stream: TcpStream) {
    let mut buffer = [0; 1024];

    stream.read(&mut buffer).unwrap();

    println!("Request: {}", String::from_utf8_lossy(&buffer[..]));
}
```

リスト 20-2: TcpStream から読み取り、データを出力する

`std::io::prelude` をスコープに導入して、ストリームから読み書きさせてくれる特定のトレイトにアクセスできるようにしています。main 関数内の for ループで、接続を確立したというメッセージを出力する代わりに、今では、新しい `handle_connection` 関数を呼び出し、`stream` を渡しています。

`handle_connection` 関数において、`stream` 引数を可変にしました。理由は、`TcpStream` インスタンスが内部で返すデータを追いかけているからです。要求した以上のデータを読み取り、次回データを要求した時のためにそのデータを保存する可能性があります。故に、内部の状態が変化する可能性があるので、`mut` にする必要があるのです; 普通、「読み取り」に可変化は必要ないと考えてしまいますが、この場合、`mut` キーワードが必要です。

次に、実際にストリームから読み取る必要があります。これを 2 つの手順で行います: まず、スタックに読み取ったデータを保持する `buffer` を宣言します。バッファのサイズは 1024 バイトにしました。これは、基本的なリクエストには十分な大きさでこの章の目的には必要十分です。任意のサイズのリクエストを扱いたければ、バッファの管理はもっと複雑にする必要があります; 今は、単純に保っておきます。このバッファを `stream.read` に渡し、これが `TcpStream` からバイトを読み取ってバッファに置きます。

2 番目にバッファのバイトを文字列に変換し、その文字列を出力します。`String::from_utf8_lossy` 関数は、`&[u8]` を取り、`String` を生成します。名前の “lossy” の箇所は、無効な

UTF-8 シーケンスを目の当たりにした際のこの関数の振る舞いを示唆しています: 無効なシーケンスを `U+FFFD REPLACEMENT CHARACTER` で置き換えます。リクエストデータによって埋められなかったバッファの部分 (訳注 バッファとして 1024 バイトの領域を用意しているが、リクエストデータは 1024 バイト存在しないことがほとんどなので変数 `buffer` の後ろ部分が埋められないまま放置されることを意図していると思われる) は、置換文字が表示される場合があります。

このコードを試しましょう! プログラムを開始して Web ブラウザで再度リクエストを送ってください。ブラウザではそれでも、エラーページが得られるでしょうが、端末のプログラムの出力はこんな感じになっていることに注目してください:

```
$ cargo run
  Compiling hello v0.1.0 (file:///projects/hello)
    Finished dev [unoptimized + debuginfo] target(s) in 0.42 secs
    Running `target/debug/hello`
Request: GET / HTTP/1.1
Host: 127.0.0.1:7878
User-Agent: Mozilla/5.0 (Windows NT 10.0; WOW64; rv:52.0) Gecko/20100101
Firefox/52.0
Accept: text/html,application/xhtml+xml,application/xml;q=0.9,*/*;q=0.8
Accept-Language: en-US,en;q=0.5
Accept-Encoding: gzip, deflate
Connection: keep-alive
Upgrade-Insecure-Requests: 1
????????????????????????????????????????
```

ブラウザによって、少し異なる出力になる可能性があります。今やリクエストデータを出力しているので、`Request: GET` の後のパスを見ることで 1 回のブラウザリクエストから複数の接続が得られる理由が確認できます。繰り返される接続が全て `/` を要求しているなら、ブラウザは、我々のプログラムからレスポンスが得られないので、繰り返し `/` をフェッチしようとしていることがわかります。

このリクエストデータを噛み砕いて、ブラウザが我々のプログラムに何を要求しているかを理解しましょう。

20.1.3 HTTP リクエストを詳しく見る

HTTP はテキストベースのプロトコルで、1 つの要求はこのようなフォーマットに則っています:

```
Method Request-URI HTTP-Version CRLF
headers CRLF
message-body
```

1 行目は、クライアントが要求しているものがなんなのかについての情報を保持するリクエスト行です。リクエスト行の最初の部分は使用されている `GET` や `POST` などのメソッドを示し、これは、どのようにクライアントがこの要求を行なっているかを記述します。クライアントは `GET` リクエストを使用しました。

リクエスト行の次の部分は `/` で、これはクライアントが要求している **Uniform Resource Identifi-**

URI (Uniform Resource Identifier)(注釈：統一資源識別子)を示します。URI はほぼ **Uniform Resource Locator (URL)**(注釈：統一資源位置指定子)と同じですが、完全に同じではありません。URI と URL の違いは、この章の目的には重要ではありませんが、HTTP の規格は URI という用語を使用しているので、ここでは脳内で URI を URL と読み替えられます。

最後の部分は、クライアントが使用している HTTP のバージョンで、それからリクエスト行は **CRLF** で終了します。(CRLF は **carriage return** と **line feed**(無理に日本語でいえば、キャリッジ(紙を固定するシリンダー)が戻ることと行を(コンピュータに)与えること)を表していて、これはタイプライター時代からの用語です！)CRLF は `\r\n` とも表記され、`\r` がキャリッジ・リターンで `\n` がライン・フィードです。CRLF により、リクエスト行がリクエストデータの残りとは区別されています。CRLF を出力すると、`\r\n` ではなく、新しい行が開始されることに注意してください。

ここまでプログラムを実行して受け取ったリクエスト行のデータをみると、GET がメソッド、/ が要求 URI、HTTP/1.1 がバージョンであることが確認できます。

リクエスト行の後に、Host: 以下から始まる残りの行は、ヘッダです。GET リクエストには、本体(訳注：message-body のこと)がありません。

試しに他のブラウザからリクエストを送ったり、**127.0.0.1:7878/test** などの異なるアドレスを要求してみて、どうリクエストデータが変わるか確認してください。

さて、ブラウザが要求しているものがわかったので、何かデータを返しましょう！

20.1.4 レスポンスを記述する

さて、クライアントのリクエストに対する返答としてデータの送信を実装します。レスポンスは、以下のようなフォーマットです：

```
HTTP-Version Status-Code Reason-Phrase CRLF
headers CRLF
message-body
```

最初の行は、レスポンスで使用される HTTP バージョン、リクエストの結果を要約する数値ステータス・コード、そしてステータス・コードのテキスト記述を提供する理由句を含む**ステータス行**です。CRLF シーケンスの後には、任意のヘッダ、別の CRLF シーケンス、そしてレスポンスの本体が続きます。

こちらが HTTP バージョン 1.1 を使用し、ステータスコードが 200 で、OK フレーズ、ヘッダと本体なしの例のレスポンスです：

```
HTTP/1.1 200 OK\r\n\r\n
```

ステータスコード 200 は、一般的な成功のレスポンスです。テキストは、矮小(わいしょう)な成功の HTTP レスポンスです。これを成功したリクエストへの返答としてストリームに書き込みましょう！ `handle_connection` 関数から、リクエストデータを出力していた `println!` を除去し、リスト 20-3 のコードと置き換えてください。

ファイル名: src/main.rs

```
# use std::io::prelude::*;
# use std::net::TcpStream;
fn handle_connection(mut stream: TcpStream) {
    let mut buffer = [0; 1024];

    stream.read(&mut buffer).unwrap();

    let response = "HTTP/1.1 200 OK\r\n\r\n";

    stream.write(response.as_bytes()).unwrap();
    stream.flush().unwrap();
}
```

リスト 20-3: ストリームに矮小な成功の HTTP レスポンスを書き込む

新しい最初の行に成功したメッセージのデータを保持する `response` 変数を定義しています。そして、`response` に対して `as_bytes` を呼び出し、文字列データをバイトに変換します。`stream` の `write` メソッドは、`&[u8]` を取り、接続に直接そのバイトを送信します。

`write` 処理は失敗することもあるので、以前のようにエラーの結果には `unwrap` を使用します。今回も、実際のアプリでは、エラー処理をここに追加するでしょう。最後に `flush` は待機し、バイトが全て接続に書き込まれるまでプログラムが継続するのを防ぎます; `TcpStream` は内部にバッファを保持して、元となる OS への呼び出しを最小化します。

これらの変更とともに、コードを実行し、リクエストをしましょう。最早、端末にどんなデータも出力していないので、Cargo からの出力以外には何も出力はありません。Web ブラウザで **127.0.0.1:7878** をロードすると、エラーではなく空のページが得られるはずです。HTTP リクエストとレスポンスを手で実装したばかりなのです！

20.1.5 本物の HTML を返す

空のページ以上のものを返す機能を実装しましょう。新しいファイル **hello.html** を **src** ディレクトリではなく、プロジェクトのルートディレクトリに作成してください。お好きなように HTML を書いてください; リスト 20-4 は、一つの可能性を示しています。

ファイル名: hello.html

```
<!DOCTYPE html>
<html lang="en">
  <head>
    <meta charset="utf-8">
    <title>Hello!</title>
  </head>
  <body>
<!--
```

```
やあ!  
-->  
    <h1>Hello!</h1>  
<!--  
Rustからやあ  
-->  
    <p>Hi from Rust</p>  
    </body>  
</html>
```

リスト 20-4: レスポンスで返すサンプルの HTML ファイル

これは、ヘッドとテキストのある最低限の HTML5 ドキュメントです。リクエストを受け付けた際にこれをサーバから返すには、リスト 20-5 のように `handle_connection` を変更して HTML ファイルを読み込み、本体としてレスポンスに追加して送ります。

ファイル名: `src/main.rs`

```
# use std::io::prelude::*;  
# use std::net::TcpStream;  
use std::fs::File;  
// --snip--  
  
fn handle_connection(mut stream: TcpStream) {  
    let mut buffer = [0; 1024];  
    stream.read(&mut buffer).unwrap();  
  
    let mut file = File::open("hello.html").unwrap();  
  
    let mut contents = String::new();  
    file.read_to_string(&mut contents).unwrap();  
  
    let response = format!("HTTP/1.1 200 OK\r\n\r\n{}", contents);  
  
    stream.write(response.as_bytes()).unwrap();  
    stream.flush().unwrap();  
}
```

リスト 20-5: レスポンスの本体として **hello.html** の中身を送る

先頭に行を追加して標準ライブラリの `File` をスコープに導入しました。ファイルを開き、中身を読み込むコードは、馴染みがあるはずです; リスト 12-4 で I/O プロジェクト用にファイルの中身を読み込んだ時に第 12 章で使用しましたね。

次に `format!` でファイルの中身を成功したレスポンスの本体として追記しています。

このコードを `cargo run` で走らせ、**127.0.0.1:7878** をブラウザでロードしてください; HTML が描画されるのが確認できるはずです!

現時点では、`buffer` 内のリクエストデータは無視し、無条件で HTML ファイルの中身を送り返し

ているだけです。これはつまり、ブラウザで **127.0.0.1:7878/something-else** をリクエストしても、この同じ HTML レスポンスが得られるということです。我々のサーバはかなり限定的で、多くの Web サーバとは異なっています。リクエストに基づいてレスポンスをカスタマイズし、/ への合法的なリクエストに対してのみ HTML ファイルを送り返したいです。

20.1.6 リクエストにバリデーションをかけ、選択的にレスポンスを返す

現状、この Web サーバはクライアントが何を要求しても、このファイルの HTML を返します。HTML ファイルを返却する前にブラウザが/ をリクエストしているか確認し、ブラウザが他のものを要求していたらエラーを返す機能を追加しましょう。このために、`handle_connection` をリスト 20-6 のように変更する必要があります。この新しいコードは、/ への要求がどんな見た目になるのか我々が知っていることに対して受け取ったリクエストの中身を検査し、`if` と `else` ブロックを追加して、リクエストを異なる形で扱います。

ファイル名: `src/main.rs`

```
# use std::io::prelude::*;
# use std::net::TcpStream;
# use std::fs::File;
// --snip--

fn handle_connection(mut stream: TcpStream) {
    let mut buffer = [0; 1024];
    stream.read(&mut buffer).unwrap();

    let get = b"GET / HTTP/1.1\r\n";

    if buffer.starts_with(get) {
        let mut file = File::open("hello.html").unwrap();

        let mut contents = String::new();
        file.read_to_string(&mut contents).unwrap();

        let response = format!("HTTP/1.1 200 OK\r\n\r\n{}", contents);

        stream.write(response.as_bytes()).unwrap();
        stream.flush().unwrap();
    } else {
        // 何か他の要求
        // some other request
    }
}
```

リスト 20-6: リクエストをマッチさせ、/ へのリクエストを他のリクエストとは異なる形で扱う

まず、/ リクエストに対応するデータを `get` 変数にハードコードしています。生のバイトをバッ

ファーに読み込んでいるので、`b""` バイト文字列記法を中身のデータの先頭に追記することで、`get` をバイト文字列に変換しています。そして、`buffer` が `get` のバイトから始まっているか確認します。もしそうなら、`/` への合法的なリクエストを受け取ったことを意味し、これが、HTML ファイルの中身を返す `if` ブロックで扱う成功した場合にはなります。

`buffer` が `get` のバイトで始まらないのなら、何か他のリクエストを受け取ったことになります。この後すぐ、`else` ブロックに他のリクエストに対応するコードを追加します。

さあ、このコードを走らせて **127.0.0.1:7878** を要求してください; **hello.html** の HTML が得られるはずですが、**127.0.0.1:7878/something-else** などの他のリクエストを行うと、リスト 20-1 や 20-2 のコードを走らせた時に見かけた接続エラーになるでしょう。

では、`else` ブロックにリスト 20-7 のコードを追記して、ステータスコード **404** のレスポンスを返しましょう。これは、リクエストの中身が見つからなかったことを通知します。エンドユーザへのレスポンスを示し、ページをブラウザに描画するよう、何か HTML も返します。

ファイル名: `src/main.rs`

```
# use std::io::prelude::*;
# use std::net::TcpStream;
# use std::fs::File;
# fn handle_connection(mut stream: TcpStream) {
# if true {
// --snip--
} else {
    let status_line = "HTTP/1.1 404 NOT FOUND\r\n\r\n";
    let mut file = File::open("404.html").unwrap();
    let mut contents = String::new();

    file.read_to_string(&mut contents).unwrap();

    let response = format!("{}", status_line, contents);

    stream.write(response.as_bytes()).unwrap();
    stream.flush().unwrap();
}
# }
```

リスト 20-7: `/` 以外の何かが要求されたら、ステータスコード **404** とエラーページで応答する

ここでは、レスポンスにはステータスコード **404** と理由フレーズ `NOT FOUND` のステータス行があります。それでもヘッダは返さず、レスポンスの本体は、ファイル **404.html** の HTML になります。エラーページのために、**hello.html** の隣に **404.html** ファイルを作成する必要があります; 今回も、ご自由にお好きな HTML にしたり、リスト 20-8 の例の HTML を使用したりしてください。

ファイル名: `404.html`

```
<!DOCTYPE html>
<html lang="en">
  <head>
    <meta charset="utf-8">
    <title>Hello!</title>
  </head>
  <body>
    <!--
    ああ!
    -->
    <h1>Oops!</h1>
    <!--
    すいません。要求しているものが理解できません
    -->
    <p>Sorry, I don't know what you're asking for.</p>
  </body>
</html>
```

リスト 20-8: あらゆる 404 レスポンスでページが送り返す中身のサンプル

これらの変更とともに、もう一度サーバを実行してください。127.0.0.1:7878 を要求すると、**hello.html** の中身が返り、127.0.0.1:7878/foo などの他のリクエストには **404.html** からのエラー HTML が返るはずです。

20.1.7 リファクタリングの触り

現在、if と else ブロックには多くの繰り返しがあります: どちらもファイルを読み、ファイルの中身をストリームに書き込んでいます。唯一の違いは、ステータス行とファイル名だけです。それらの差異を、ステータス行とファイル名の値を変数に代入する個別の if と else 行に引っ張り出して、コードをより簡潔にしましょう; そうしたら、それらの変数を無条件にコードで使用し、ファイルを読んでレスポンスを書き込めます。リスト 20-9 は、大きな if と else ブロックを置き換えた後の結果のコードを示しています。

ファイル名: src/main.rs

```
# use std::io::prelude::*;
# use std::net::TcpStream;
# use std::fs::File;
// --snip--

fn handle_connection(mut stream: TcpStream) {
#   let mut buffer = [0; 1024];
#   stream.read(&mut buffer).unwrap();
#
#   let get = b"GET / HTTP/1.1\r\n";
  // --snip--
```

```
let (status_line, filename) = if buffer.starts_with(get) {
    ("HTTP/1.1 200 OK\r\n\r\n", "hello.html")
} else {
    ("HTTP/1.1 404 NOT FOUND\r\n\r\n", "404.html")
};

let mut file = File::open(filename).unwrap();
let mut contents = String::new();

file.read_to_string(&mut contents).unwrap();

let response = format!("{}", status_line, contents);

stream.write(response.as_bytes()).unwrap();
stream.flush().unwrap();
}
```

リスト 20-9: 2 つの場合で異なるコードだけを含むように、if と else ブロックをリファクタリングする

これで、if と else ブロックは、タプルにステータス行とファイル名の適切な値を返すだけになりました; それから、分配を使用してこれら 2 つの値を第 18 章で議論したように、let 文のパターンで status_line と filename に代入しています。

前は重複していたコードは、今では if と else ブロックの外に出て、status_line と filename 変数を使用しています。これにより、2 つの場合の違いがわかりやすくなり、ファイル読み取りとレスポンス記述の動作法を変更しなくなった際に、1 箇所だけコードを更新すればいいようになったことを意味します。リスト 20-9 のコードの振る舞いは、リスト 20-8 と同じです。

素晴らしい! もう、およそ 40 行の Rust コードで、あるリクエストには中身のあるページで応答し、他のあらゆるリクエストには 404 レスポンスで応答する単純な Web サーバができました。

現状、このサーバは、シングルスレッドで実行されます。つまり、1 回に 1 つのリクエストしか捌けないということです。何か遅いリクエストをシミュレーションすることで、それが問題になる可能性を調査しましょう。それから 1 度にサーバが複数のリクエストを扱えるように修正します。

20.2 シングルスレッドサーバをマルチスレッド化する

現状、サーバはリクエストを順番に処理します。つまり、最初の接続が処理し終わるまで、2 番目の接続は処理しないということです。サーバが受け付けるリクエストの量が増えるほど、この連続的な実行は、最適ではなくなるでしょう。サーバが処理するのに長い時間がかかるリクエストを受け付けたら、新しいリクエストは迅速に処理できても、続くリクエストは長いリクエストが完了するまで待たなければならなくなるでしょう。これを修正する必要がありますが、まずは、実際に問題が起こっているところを見ます。

20.2.1 現在のサーバの実装で遅いリクエストをシミュレーションする

処理が遅いリクエストが現在のサーバ実装に対して行われる他のリクエストにどう影響するかに目を向けます。リスト 20-10 は、応答する前に 5 秒サーバをスリープさせる遅いレスポンスをシミュレーションした `/sleep` へのリクエストを扱う実装です。

ファイル名: `src/main.rs`

```
use std::thread;
use std::time::Duration;
# use std::io::prelude::*;
# use std::net::TcpStream;
# use std::fs::File;
// --snip--

fn handle_connection(mut stream: TcpStream) {
#   let mut buffer = [0; 1024];
#   stream.read(&mut buffer).unwrap();
  // --snip--

  let get = b"GET / HTTP/1.1\r\n";
  let sleep = b"GET /sleep HTTP/1.1\r\n";

  let (status_line, filename) = if buffer.starts_with(get) {
    ("HTTP/1.1 200 OK\r\n\r\n", "hello.html")
  } else if buffer.starts_with(sleep) {
    thread::sleep(Duration::from_secs(5));
    ("HTTP/1.1 200 OK\r\n\r\n", "hello.html")
  } else {
    ("HTTP/1.1 404 NOT FOUND\r\n\r\n", "404.html")
  };

  // --snip--
}
```

リスト 20-10: `/sleep` を認識して 5 秒間スリープすることで遅いリクエストをシミュレーションする

このコードはちょっと汚いですが、シミュレーション目的には十分です。2 番目のリクエスト `sleep` を作成し、そのデータをサーバは認識します。if ブロックの後に `else if` を追加し、`/sleep` へのリクエストを確認しています。そのリクエストが受け付けられると、サーバは成功の HTML ページを描画する前に 5 秒間スリープします。

我々のサーバがどれだけ基礎的か見て取れます: 本物のライブラリは、もっと冗長でない方法で複数のリクエストの認識を扱うでしょう!

`cargo run` でサーバを開始してください。それから 2 つブラウザのウィンドウを開いてください:

1 つは、**http://localhost:7878/** 用、そしてもう 1 つは **http://localhost:7878/sleep** 用です。以前のように **/ URI** を数回入力したら、素早く応答するでしょう。しかし、**/sleep** を入力し、それから **/** をロードしたら、**sleep** がロードする前にきっかり 5 秒スリープし終わるまで、**/** は待機するのを目撃するでしょう。

より多くのリクエストが遅いリクエストの背後に回ってしまうのを回避するよう Web サーバが動く方法を変える方法は複数あります;これから実装するのは、スレッドプールです。

20.2.2 スレッドプールでスループットを向上させる

スレッドプールは、待機し、タスクを処理する準備のできた一塊りの大量に生成されたスレッドです。プログラムが新しいタスクを受け取ったら、プールのスレッドのどれかをタスクにあてがい、そのスレッドがそのタスクを処理します。プールの残りのスレッドは、最初のスレッドが処理中にやってくる他のあらゆるタスクを扱うために利用可能です。最初のスレッドがタスクの処理を完了したら、アイドル状態のスレッドプールに戻り、新しいタスクを処理する準備ができます。スレッドプールにより、並行で接続を処理でき、サーバのスループットを向上させます。

プール内のスレッド数は、小さい数字に制限し、**DoS(Denial of Service; サービスの拒否)** 攻撃から保護します; リクエストが来た度に新しいスレッドをプログラムに生成させたら、**1000 万** リクエストをサーバに行う誰かが、サーバのリソースを使い尽くし、リクエストの処理を停止に追い込むことで、大混乱を招くことができってしまうでしょう。

無制限にスレッドを大量生産するのではなく、プールに固定された数のスレッドを待機させます。リクエストが来る度に、処理するためにプールに送られます。プールは、やって来るリクエストのキューを管理します。プールの各スレッドがこのキューからリクエストを取り出し、リクエストを処理し、そして、別のリクエストをキューに要求します。この設計により、**N** リクエストを並行して処理でき、ここで **N** はスレッド数です。各スレッドが実行に時間のかかるリクエストに応答していたら、続くリクエストはそれでも、キュー内で待機させられてしまうこともあります; その地点に到達する前に扱える時間のかかるリクエスト数を増加させました。

このテクニックは、**Web** サーバのスループットを向上させる多くの方法の 1 つに過ぎません。探究する可能性のある他の選択肢は、**fork/join** モデルと、シングルスレッドの非同期 I/O モデルです。この話題にご興味があれば、他の解決策についてもっと読み、**Rust** で実装を試みることができます; **Rust** のような低レベル言語であれば、これらの選択肢全部が可能なのです。

スレッドプールを実装し始める前に、プールを使うのはどんな感じになるはずなのかについて語りましょう。コードの設計を試みる際、クライアントのインターフェイスをまず書くことは、設計を導く手助けになることがあります。呼び出したいように構成されるよう、コードの **API** を記述してください; そして、機能を実装してから公開 **API** の設計をするのではなく、その構造内で機能を実装してください。

第 12 章のプロジェクトで **TDD** を使用したように、ここでは **Compiler Driven Development(コンパイラ駆動開発)** を使用します。欲しい関数を呼び出すコードを書き、それからコンパイラの出す

エラーを見てコードが動くように次に何を変更すべきかを決定します。

20.2.2.1 各リクエストに対してスレッドを立ち上げられる場合のコードの構造

まず、全接続に対して新しいスレッドを確かに生成した場合にコードがどんな見た目になるかを探究しましょう。先ほど述べたように、無制限にスレッドを大量生産する可能性があるという問題のため、これは最終的な計画ではありませんが、開始点です。リスト 20-11 は、新しいスレッドを立ち上げて for ループ内で各ストリームを扱うために main に行う変更を示しています。

ファイル名: src/main.rs

```
# use std::thread;
# use std::io::prelude::*;
# use std::net::TcpListener;
# use std::net::TcpStream;
#
fn main() {
    let listener = TcpListener::bind("127.0.0.1:7878").unwrap();

    for stream in listener.incoming() {
        let stream = stream.unwrap();

        thread::spawn(|| {
            handle_connection(stream);
        });
    }
}
# fn handle_connection(mut stream: TcpStream) {}
```

リスト 20-11: 各ストリームに対して新しいスレッドを立ち上げる

第 16 章で学んだように、`thread::spawn` は新しいスレッドを生成し、それからクロージャ内のコードを新しいスレッドで実行します。このコードを実行してブラウザで **/sleep** をロードし、それからもう 2 つのブラウザのタブで **/** をロードしたら、確かに **/** へのリクエストは、**/sleep** が完了するのを待機しなくても済むことがわかるでしょう。ですが、前述したように、無制限にスレッドを生成することになるので、これは最終的にシステムを参らせてしまうでしょう。

20.2.2.2 有限数のスレッド用に似たインターフェイスを作成する

スレッドからスレッドプールへの変更に API を使用するコードへの大きな変更が必要ないように、スレッドプールには似た、馴染み深い方法で動作してほしいです。リスト 20-12 は、`thread::spawn` の代わりに使用したい `ThreadPool` 構造体の架空のインターフェイスを表示しています。

ファイル名: src/main.rs

```
# use std::thread;
```

```

# use std::io::prelude::*;
# use std::net::TcpListener;
# use std::net::TcpStream;
# struct ThreadPool;
# impl ThreadPool {
#     fn new(size: u32) -> ThreadPool { ThreadPool }
#     fn execute<F>(&self, f: F)
#         where F: FnOnce() + Send + 'static {}
# }
#
fn main() {
    let listener = TcpListener::bind("127.0.0.1:7878").unwrap();
    let pool = ThreadPool::new(4);

    for stream in listener.incoming() {
        let stream = stream.unwrap();

        pool.execute(|| {
            handle_connection(stream);
        });
    }
}
# fn handle_connection(mut stream: TcpStream) {}

```

リスト 20-12: ThreadPool の理想的なインターフェイス

ThreadPool::new を使用して設定可能なスレッド数で新しいスレッドプールを作成し、今回の場合は 4 です。それから for ループ内で、pool.execute は、プールが各ストリームに対して実行すべきクロージャを受け取るという点で、thread::spawn と似たインターフェイスです。pool.execute を実装する必要があるのですが、これはクロージャを取り、実行するためにプール内のスレッドに与えます。このコードはまだコンパイルできませんが、コンパイラがどう修正したらいいかガイドできるように試してみます。

20.2.2.3 コンパイラ駆動開発で ThreadPool 構造体を構築する

リスト 20-12 の変更を **src/main.rs** に行い、それから開発を駆動するために cargo check からのコンパイラエラーを活用しましょう。こちらが得られる最初のエラーです:

```

$ cargo check
Compiling hello v0.1.0 (file:///projects/hello)
error[E0433]: failed to resolve. Use of undeclared type or module `ThreadPool`
(エラー: 解決に失敗しました。未定義の型またはモジュール`ThreadPool`を使用しています)
--> src/main.rs:10:16
   |
10 |     let pool = ThreadPool::new(4);
   |                  ^^^^^^^^^^^^^^^^^ Use of undeclared type or module
   |                  `ThreadPool`

```

```
error: aborting due to previous error
```

よろしい!このエラーは ThreadPool 型かモジュールが必要なことを教えてくれているので、今構築します。ThreadPool の実装は、Web サーバが行う仕事の種類とは独立しています。従って、hello クレートをバイナリクレートからライブラリクレートに切り替え、ThreadPool の実装を保持させましょう。ライブラリクレートに変更後、個別のスレッドプールライブラリを Web リクエストを提供するためだけではなく、スレッドプールでしたいあらゆる作業にも使用できます。

以下を含む **src/lib.rs** を生成してください。これは、現状存在できる最も単純な ThreadPool の定義です:

ファイル名: **src/lib.rs**

```
pub struct ThreadPool;
```

それから新しいディレクトリ、**src/bin** を作成し、**src/main.rs** に根付くバイナリクレートを **src/bin/main.rs** に移動してください。そうすると、ライブラリクレートが **hello** ディレクトリ内で主要クレートになります; それでも、cargo run で **src/bin/main.rs** のバイナリを実行することはできます。**main.rs** ファイルを移動後、編集してライブラリクレートを持ち込み、以下のコードを **src/bin/main.rs** の先頭に追記して ThreadPool をスコープに導入してください:

ファイル名: **src/bin/main.rs**

```
extern crate hello;
use hello::ThreadPool;
```

このコードはまだ動きませんが、再度それを確認して扱う必要のある次のエラーを手に入れましょう:

```
$ cargo check
Compiling hello v0.1.0 (file:///projects/hello)
error[E0599]: no function or associated item named `new` found for type
`hello::ThreadPool` in the current scope
(エラー: 現在のスコープで型`hello::ThreadPool`の関数または関連アイテムに`new`と
いうものが見つかりません)
--> src/bin/main.rs:13:16
   |
13 |     let pool = ThreadPool::new(4);
   |                        ^^^^^^^^^ function or associated item not found in
   |                        `hello::ThreadPool`
```

このエラーは、次に、ThreadPool に対して new という関連関数を作成する必要があることを示唆しています。また、new には 4 を引数として受け入れる引数 1 つがあり、ThreadPool インスタンスを返すべきということも知っています。それらの特徴を持つ最も単純な new 関数を実装しましょう:

ファイル名: `src/lib.rs`

```
pub struct ThreadPool;

impl ThreadPool {
    pub fn new(size: usize) -> ThreadPool {
        ThreadPool
    }
}
```

`size` 引数の型として、`usize` を選択しました。何故なら、マイナスのスレッド数は、何も筋が通らないことを知っているからです。また、この 4 をスレッドのコレクションの要素数として使用し、第 3 章の「整数型」節で議論したように、これは `usize` のあるべき姿であることも知っています。

コードを再度確認しましょう:

```
$ cargo check
  Compiling hello v0.1.0 (file:///projects/hello)
warning: unused variable: `size`
(警告: 未使用の変数: `size`)
--> src/lib.rs:4:16
|
4 |     pub fn new(size: usize) -> ThreadPool {
|                      ^^^^^
|
= note: #[warn(unused_variables)] on by default
= note: to avoid this warning, consider using `_size` instead

error[E0599]: no method named `execute` found for type `hello::ThreadPool` in
the current scope
--> src/bin/main.rs:18:14
|
18 |         pool.execute(|| {
|                   ^^^^^^^^^
```

今度は、警告とエラーが出ました。一時的に警告は無視して、`ThreadPool` に `execute` メソッドがないためにエラーが発生しました。「有限数のスレッド用に似たインターフェイスを作成する」節で我々のスレッドプールは、`thread::spawn` と似たインターフェイスにするべきと決定したことを思い出してください。さらに、`execute` 関数を実装するので、与えられたクロージャを取り、実行するようにプールの待機中のスレッドに渡します。

`ThreadPool` に `execute` メソッドをクロージャを引数として受け取るように定義します。第 13 章の「ジェネリック引数と `Fn` トレイトを使用してクロージャを保存する」節から、3 つの異なるトレイトでクロージャを引数として取ることができることを思い出してください: `Fn`、`FnMut`、`FnOnce` です。ここでは、どの種類のクロージャを使用するか決定する必要があります。最終的には、標準ライブラリの `thread::spawn` 実装に似たことをすることがわかっているので、`thread::spawn` のシグニチャで引数にどんな境界があるか見ることができます。ドキュメンテーションは、以下のものを示してい

ます:

```
pub fn spawn<F, T>(f: F) -> JoinHandle<T>
  where
    F: FnOnce() -> T + Send + 'static,
    T: Send + 'static
```

F 型引数がここで関心のあるものです; T 型引数は戻り値と関係があり、関心はありません。spawn は、F のトレイト境界として FnOnce を使用していることが確認できます。これはおそらく、我々が欲しているものでもあるでしょう。というのも、最終的には execute で得た引数を spawn に渡すからです。さらに FnOnce は使用したいトレイトであると自信を持つことができます。リクエストを実行するスレッドは、そのリクエストのクロージャを 1 回だけ実行し、これは FnOnce の Once に合致するからです。

F 型引数にはまた、トレイト境界の Send とライフタイム境界の 'static もあり、この状況では有用です: あるスレッドから別のスレッドにクロージャを移動するのに Send が必要で、スレッドの実行にどれくらいかかるかわからないので、'static も必要です。ThreadPool にこれらの境界のジェネリックな型 F の引数を取る execute メソッドを生成しましょう:

ファイル名: src/lib.rs

```
# pub struct ThreadPool;
impl ThreadPool {
  // --snip--

  pub fn execute<F>(&self, f: F)
    where
      F: FnOnce() + Send + 'static
  {
  }
}
```

それでも、FnOnce の後に () を使用しています。この FnOnce は引数を取らず、値も返さないクロージャを表すからです。関数定義同様に、戻り値の型はシングニチャから省略できますが、引数がないても、カッコは必要です。

またもや、これが execute メソッドの最も単純な実装です: 何もしませんが、コードがコンパイルできるようにしようとしているだけです。再確認しましょう:

```
$ cargo check
  Compiling hello v0.1.0 (file:///projects/hello)
warning: unused variable: `size`
--> src/lib.rs:4:16
|
4 |     pub fn new(size: usize) -> ThreadPool {
|                   ^^^^^
```

```
|
= note: #[warn(unused_variables)] on by default
= note: to avoid this warning, consider using `_size` instead

warning: unused variable: `f`
--> src/lib.rs:8:30
|
8 |         pub fn execute<F>(&self, f: F)
|                               ^
|
= note: to avoid this warning, consider using `_f` instead
```

これで警告を受け取るだけになり、コンパイルできるようになりました！しかし、`cargo run`を試して、ブラウザでリクエストを行うと、章の冒頭で見かけたエラーがブラウザに現れることに注意してください。ライブラリは、まだ実際に `execute` に渡されたクロージャを呼び出していないのです！

注釈: Haskell や Rust などの厳密なコンパイラがある言語についての格言として「コードがコンパイルできたら、動作する」というものをお聴きになったことがある可能性があります。ですが、この格言は普遍的に当てはまるものではありません。このプロジェクトはコンパイルできますが、全く何もしません！本物の完璧なプロジェクトを構築しようとしているのなら、ここが単体テストを書き始めて、コードがコンパイルでき、**かつ**欲しい振る舞いを保持していることを確認するのに良い機会でしょう。

20.2.2.4 new でスレッド数を検査する

`new` と `execute` の引数で何もしていないので、警告が出続けます。欲しい振る舞いでこれらの関数の本体を実装しましょう。まずはじめに、`new` を考えましょう。先刻、`size` 引数に非負整数型を選択しました。負のスレッド数のプールは、全く道理が通らないからです。しかしながら、**0** スレッドのプールも全く意味がわかりませんが、**0** も完全に合法的な `usize` です。ThreadPool インスタンスを返す前に `size` が **0** よりも大きいことを確認するコードを追加し、リスト 20-13 に示したように、`assert!` マクロを使用することで **0** を受け取った時にプログラムをパニックさせます。

ファイル名: `src/lib.rs`

```
# pub struct ThreadPool;
impl ThreadPool {
    /// 新しいThreadPoolを生成する。
    ///
    /// sizeがプールのスレッド数です。
    ///
    /// # パニック
    ///
    /// sizeが0なら、`new`関数はパニックします。
    ///
    /// Create a new ThreadPool.
    ///
```

```

    /// The size is the number of threads in the pool.
    ///
    /// # Panics
    ///
    /// The `new` function will panic if the size is zero.
    pub fn new(size: usize) -> ThreadPool {
        assert!(size > 0);

        ThreadPool
    }

    // --snip--
}

```

リスト 20-13: `ThreadPool::new` を実装して `size` が 0 ならパニックする

`doc comment` で `ThreadPool` にドキュメンテーションを追加しました。第 14 章で議論したように、関数がパニックすることもある場面を声高に叫ぶセクションを追加することで、いいドキュメンテーションの実践に倣(なら)っていることに注意してください。試しに `cargo doc --open` を実行し、`ThreadPool` 構造体をクリックして、`new` の生成されるドキュメンテーションがどんな見た目か確かめてください！

ここでしたように `assert!` マクロを追加する代わりに、リスト 12-9 の I/O プロジェクトの `Config::new` のように、`new` に `Result` を返させることもできるでしょう。しかし、今回の場合、スレッドなしでスレッドプールを作成しようとするのは、回復不能なエラーであるべきと決定しました。野心を感じるのなら、以下のシグニチャの `new` も書いてみて、両者を比較してみてください:

```
pub fn new(size: usize) -> Result<ThreadPool, PoolCreationError> {
```

20.2.2.5 スレッドを格納するスペースを生成する

今や、プールに格納する合法的スレッド数を知る方法ができたので、`ThreadPool` 構造体を返す前にスレッドを作成して格納できます。ですが、どのようにスレッドを「格納」するのでしょうか？ もう一度、`thread::spawn` シグニチャを眺めてみましょう:

```
pub fn spawn<F, T>(f: F) -> JoinHandle<T>
where
    F: FnOnce() -> T + Send + 'static,
    T: Send + 'static

```

`spawn` 関数は、`JoinHandle<T>` を返し、ここで `T` は、クロージャが返す型です。試しに同じように `JoinHandle` を使ってみて、どうなるか見てみましょう。我々の場合、スレッドプールに渡すクロージャは接続を扱い、何も返さないなので、`T` はユニット型 `()` になるでしょう。

リスト 20-14 のコードはコンパイルできますが、まだスレッドは何も生成しません。`ThreadPool` の

定義を変更して、`thread::JoinHandle<()>` インスタンスのベクタを保持し、`size` キャパシティのベクタを初期化し、スレッドを生成する何らかのコードを実行する `for` ループを設定し、それらを含む `ThreadPool` インスタンスを返します。

ファイル名: `src/lib.rs`

```
use std::thread;

pub struct ThreadPool {
    threads: Vec<thread::JoinHandle<()>>,
}

impl ThreadPool {
    // --snip--
    pub fn new(size: usize) -> ThreadPool {
        assert!(size > 0);

        let mut threads = Vec::with_capacity(size);

        for _ in 0..size {
            // スレッドを生成してベクタに格納する
            // create some threads and store them in the vector
        }

        ThreadPool {
            threads
        }
    }

    // --snip--
}
```

リスト 20-14: `ThreadPool` にスレッドを保持するベクタを生成する

ライブラリクレート内で `std::thread` をスコープに導入しました。`ThreadPool` のベクタの要素の型として、`thread::JoinHandle` を使用しているからです。

一旦、合法的なサイズを受け取ったら、`ThreadPool` は `size` 個の要素を保持できる新しいベクタを生成します。この本ではまだ、`with_capacity` 関数を使用したことはありませんが、これは `Vec::new` と同じ作業をしつつ、重要な違いがあります: ベクタに予めスペースを確保しておくのです。ベクタに `size` 個の要素を格納する必要があることはわかっているのです、このメモリ確保を前もってしておく、`Vec::new` よりも少しだけ効率的になります。`Vec::new` は、要素が挿入されるにつれて、自身のサイズを変更します。

再び `cargo check` を実行すると、もういくつか警告が出るものの、成功するはずです。

20.2.2.6 ThreadPool からスレッドにコードを送信する責任を負う Worker 構造体

リスト 20-14 の for ループにスレッドの生成に関するコメントを残しました。ここでは、実際にスレッドを生成する方法に目を向けます。標準ライブラリはスレッドを生成する手段として `thread::spawn` を提供し、`thread::spawn` は、生成されるとすぐにスレッドが実行すべき何らかのコードを得ることを予期します。ところが、我々の場合、スレッドを生成して、後ほど送信するコードを待機してほしいです。標準ライブラリのスレッドの実装は、それをするいかなる方法も含んでいません; それを手動で実装しなければなりません。

この新しい振る舞いを管理するスレッドと `ThreadPool` 間に新しいデータ構造を導入することでこの振る舞いを実装します。このデータ構造を `Worker` と呼び、プール実装では一般的な用語です。レストランのキッチンで働く人々を思い浮かべてください: 労働者は、お客さんからオーダーが来るまで待機し、それからそれらのオーダーを取り、満たすことに責任を負います。

スレッドプールに `JoinHandle<>` インスタンスのベクタを格納する代わりに、`Worker` 構造体のインスタンスを格納します。各 `Worker` が単独の `JoinHandle<>` インスタンスを格納します。そして、`Worker` に実行するコードのクロージャを取り、既に走っているスレッドに実行してもらうために送信するメソッドを実装します。ログを取ったり、デバッグする際にプールの異なるワーカーを区別できるように、各ワーカーに `id` も付与します。

`ThreadPool` を生成する際に発生することに以下の変更を加えましょう。このように `Worker` をセットアップした後に、スレッドにクロージャを送信するコードを実装します:

1. `id` と `JoinHandle<>` を保持する `Worker` 構造体を定義する。
2. `ThreadPool` を変更し、`Worker` インスタンスのベクタを保持する。
3. `id` 番号を取り、`id` と空のクロージャで大量生産されるスレッドを保持する `Worker` インスタンスを返す `Worker::new` 関数を定義する。
4. `ThreadPool::new` で for ループカウンタを使用して `id` を生成し、その `id` で新しい `Worker` を生成し、ベクタにワーカーを格納する。

挑戦に積極的ならば、リスト 20-15 のコードを見る前にご自身でこれらの変更を実装してみてください。

いいですか? こちらが先ほどの変更を行う 1 つの方法を行ったリスト 20-15 です。

ファイル名: `src/lib.rs`

```
use std::thread;

pub struct ThreadPool {
    workers: Vec<Worker>,
}

impl ThreadPool {
    // --snip--
```

```
pub fn new(size: usize) -> ThreadPool {
    assert!(size > 0);

    let mut workers = Vec::with_capacity(size);

    for id in 0..size {
        workers.push(Worker::new(id));
    }

    ThreadPool {
        workers
    }
}
// --snip--

struct Worker {
    id: usize,
    thread: thread::JoinHandle<()>,
}

impl Worker {
    fn new(id: usize) -> Worker {
        let thread = thread::spawn(|| {});

        Worker {
            id,
            thread,
        }
    }
}
```

リスト 20-15: ThreadPool を変更してスレッドを直接保持するのではなく、Worker インスタンスを保持する

ThreadPool のフィールド名を threads から workers に変更しました。JoinHandle<()> インスタンスではなく、Worker インスタンスを保持するようになったからです。for ループのカウンタを Worker::new への引数として使用し、それぞれの新しい Worker を workers というベクタに格納します。

外部のコード (src/bin/main.rs のサーバなど) は、ThreadPool 内で Worker 構造体を使用していることに関する実装の詳細を知る必要はないので、Worker 構造体とその new 関数は非公開にしています。Worker::new 関数は与えた id を使用し、空のクロージャを使って新しいスレッドを立ち上げることで生成される JoinHandle<()> インスタンスを格納します。

このコードはコンパイルでき、ThreadPool::new への引数として指定した数の Worker インスタンスを格納します。ですがそれでも、execute で得るクロージャを処理してはいません。次は、それをする方法に目を向けましょう。

20.2.2.7 チャンネル経由でスレッドにリクエストを送信する

さて、`thread::spawn` に与えられたクロージャが全く何もしないという問題に取り組みましょう。現在、`execute` メソッドで実行したいクロージャを得ています。ですが、`ThreadPool` の生成中、`Worker` それぞれを生成する際に、実行するクロージャを `thread::spawn` に与える必要があります。

作ったばかりの `Worker` 構造体に `ThreadPool` が保持するキューから実行するコードをフェッチして、そのコードをスレッドが実行できるように送信してほしいです。

第 16 章でこのユースケースにぴったりであろう **チャンネル (2 スレッド間コミュニケーションをとる単純な方法)** について学びました。チャンネルをキューの仕事として機能させ、`execute` は `ThreadPool` から `Worker` インスタンスに仕事を送り、これが仕事をスレッドに送信します。こちらが計画です:

1. `ThreadPool` はチャンネルを生成し、チャンネルの送信側に就く。
2. `Worker` それぞれは、チャンネルの受信側に就く。
3. チャンネルに送信したいクロージャを保持する新しい `Job` 構造体を生成する。
4. `execute` メソッドは、実行したい仕事をチャンネルの送信側に送信する。
5. スレッド内で、`Worker` はチャンネルの受信側をループし、受け取ったあらゆる仕事のクロージャを実行する。

`ThreadPool::new` 内でチャンネルを生成し、`ThreadPool` インスタンスに送信側を保持することから始めましょう。リスト 20-16 のようにですね。今の所、`Job` 構造体は何も保持しませんが、チャンネルに送信する種類の要素になります。

ファイル名: `src/lib.rs`

```
# use std::thread;
// --snip--
use std::sync::mpsc;

pub struct ThreadPool {
    workers: Vec<Worker>,
    sender: mpsc::Sender<Job>,
}

struct Job;

impl ThreadPool {
    // --snip--
    pub fn new(size: usize) -> ThreadPool {
        assert!(size > 0);

        let (sender, receiver) = mpsc::channel();

        let mut workers = Vec::with_capacity(size);
```



```

        for id in 0..size {
            workers.push(Worker::new(id));
        }

        ThreadPool {
            workers,
            sender,
        }
    }
    // --snip--
}
#
# struct Worker {
#     id: usize,
#     thread: thread::JoinHandle<()>,
# }
#
# impl Worker {
#     fn new(id: usize) -> Worker {
#         let thread = thread::spawn(|| {});
#
#         Worker {
#             id,
#             thread,
#         }
#     }
# }

```

リスト 20-18: `ThreadPool` を変更して `Job` インスタンスを送信するチャンネルの送信側を格納する

`ThreadPool::new` 内で新しいチャンネルを生成し、プールに送信側を保持させています。これはコンパイルに成功しますが、まだ警告があります。

スレッドプールがワーカーを生成する際に各ワーカーにチャンネルの受信側を試しに渡してみましょう。受信側はワーカーが大量生産するスレッド内で使用したいことがわかっているので、クロージャ内で `receiver` 引数を参照します。リスト 20-17 のコードはまだ完璧にはコンパイルできません。

ファイル名: `src/lib.rs`

```

impl ThreadPool {
    // --snip--
    pub fn new(size: usize) -> ThreadPool {
        assert!(size > 0);

        let (sender, receiver) = mpsc::channel();

        let mut workers = Vec::with_capacity(size);

        for id in 0..size {

```

```

        workers.push(Worker::new(id, receiver));
    }

    ThreadPool {
        workers,
        sender,
    }
}
// --snip--
}

// --snip--

impl Worker {
    fn new(id: usize, receiver: mpsc::Receiver<Job>) -> Worker {
        let thread = thread::spawn(|| {
            receiver;
        });

        Worker {
            id,
            thread,
        }
    }
}

```

リスト 20-17: チャンネルの受信側をワーカーに渡す

多少些細で単純な変更を行いました: チャンネルの受信側を `Worker::new` に渡し、それからクロージャの内側で使用しています。

このコードのチェックを試みると、このようなエラーが出ます:

```

$ cargo check
Compiling hello v0.1.0 (file:///projects/hello)
error[E0382]: use of moved value: `receiver`
--> src/lib.rs:27:42
|
|
27 |         workers.push(Worker::new(id, receiver));
|                                     ^^^^^^^^^^ value moved here in
previous iteration of loop
|
= note: move occurs because `receiver` has type
`std::sync::mpsc::Receiver<Job>`, which does not implement the `Copy` trait

```

このコードは、`receiver` を複数の `Worker` インスタンスに渡そうとしています。第 16 章を思い出そうに、これは動作しません: Rust が提供するチャンネル実装は、複数の**生成者**、単独の**消費者**です。要するに、チャンネルの消費側をクローンするだけでこのコードを修正することはできません。たとえできたとしても、使用したいテクニックではありません; 代わりに、全ワーカー間で単独の `receiver` を共有することで、スレッド間に仕事を分配したいです。

さらに、チャンネルキューから仕事を取り出すことは、receiver を可変化することに関連するので、スレッドには、receiver を共有して変更する安全な方法が必要です; さもなくば、競合状態に陥る可能性があります (第 16 章で講義しました)。

第 16 章で議論したスレッド安全なスマートポインタを思い出してください: 複数のスレッドで所有権を共有しつつ、スレッドに値を可変化させるためには、Arc<Mutex<T>> を使用する必要があります。Arc 型は、複数のワーカーに受信者を所有させ、Mutex により、1 度に受信者から 1 つの仕事をたった 1 つのワーカーが受け取ることを保証します。リスト 20-18 は、行う必要のある変更を示しています。

ファイル名: src/lib.rs

```
# use std::thread;
# use std::sync::mpsc;
use std::sync::Arc;
use std::sync::Mutex;
// --snip--

# pub struct ThreadPool {
#     workers: Vec<Worker>,
#     sender: mpsc::Sender<Job>,
# }
# struct Job;
#
impl ThreadPool {
    // --snip--
    pub fn new(size: usize) -> ThreadPool {
        assert!(size > 0);

        let (sender, receiver) = mpsc::channel();

        let receiver = Arc::new(Mutex::new(receiver));

        let mut workers = Vec::with_capacity(size);

        for id in 0..size {
            workers.push(Worker::new(id, Arc::clone(&receiver)));
        }

        ThreadPool {
            workers,
            sender,
        }
    }

    // --snip--
}

# struct Worker {
#     id: usize,
```

```

#     thread: thread::JoinHandle<()>,
# }
#
impl Worker {
    fn new(id: usize, receiver: Arc<Mutex<mpsc::Receiver<Job>>>) -> Worker {
        // --snip--
        let thread = thread::spawn(|| {
            receiver;
        });
        Worker {
            id,
            thread,
        }
    }
}

```

リスト 20-18: Arc と Mutex を使用してワーカー間でチャンネルの受信側を共有する

ThreadPool::new で、チャンネルの受信側を Arc と Mutex に置いています。新しいワーカーそれぞれに対して、Arc をクローンして参照カウントを跳ね上げているので、ワーカーは受信側の所有権を共有することができます。

これらの変更でコードはコンパイルできます！ ゴールはもうすぐそこです！

20.2.2.8 execute メソッドを実装する

最後に ThreadPool に execute メソッドを実装しましょう。Job も構造体から execute が受け取るクロージャの型を保持するトレイトオブジェクトの型エイリアスに変更します。第 19 章の「型エイリアスで型同義語を生成する」節で議論したように、型エイリアスにより長い型を短くできます。リスト 20-19 をご覧ください。

ファイル名: src/lib.rs

```

// --snip--
# pub struct ThreadPool {
#     workers: Vec<Worker>,
#     sender: mpsc::Sender<Job>,
# }
# use std::sync::mpsc;
# struct Worker {}

type Job = Box<FnOnce() + Send + 'static>;

impl ThreadPool {
    // --snip--

    pub fn execute<F>(&self, f: F)
        where

```

```

        F: FnOnce() + Send + 'static
    {
        let job = Box::new(f);

        self.sender.send(job).unwrap();
    }
}

// --snip--

```

リスト 20-19: 各クロージャを保持する Box に対して Job 型エイリアスを生成し、それからチャンネルに仕事を送信する

execute で得たクロージャを使用して新しい Job インスタンスを生成した後、その仕事をチャンネルの送信側に送信しています。送信が失敗した時のために send に対して unwrap を呼び出しています。これは例えば、全スレッドの実行を停止させるなど、受信側が新しいメッセージを受け取るのをやめてしまったときなどに起こる可能性があります。現時点では、スレッドの実行を止めることはできません: スレッドは、プールが存在する限り実行し続けます。unwrap を使用している理由は、失敗する場合が起こらないとわかっているからですが、コンパイラにはわかりません。

ですが、まだやり終えたわけではありませんよ! ワーカー内で thread::spawn に渡されているクロージャは、それでもチャンネルの受信側を参照しているだけです。その代わりに、クロージャには永遠にループし、チャンネルの受信側に仕事を要求し、仕事を得たらその仕事を実行してもらう必要があります。リスト 20-20 に示した変更を Worker::new に行いましょう。

ファイル名: src/lib.rs

```

// --snip--

impl Worker {
    fn new(id: usize, receiver: Arc<Mutex<mpsc::Receiver<Job>>>) -> Worker {
        let thread = thread::spawn(move || {
            loop {
                let job = receiver.lock().unwrap().recv().unwrap();

                // ワーカー{}は仕事を得ました; 実行します
                println!("Worker {} got a job; executing.", id);

                (★job)();
            }
        });

        Worker {
            id,
            thread,
        }
    }
}

```

リスト 20-20: ワーカーのスレッドで仕事を受け取り、実行する

ここで、まず `receiver` に対して `lock` を呼び出してミューテックスを獲得し、それから `unwrap` を呼び出して、エラーの際にはパニックします。ロックの獲得は、ミューテックスが**毒された状態**なら失敗する可能性があり、これは、他のどれかのスレッドがロックを保持している間に、解放するのではなく、パニックした場合に起き得ます。この場面では、`unwrap` を呼び出してこのスレッドをパニックさせるのは、取るべき正当な行動です。この `unwrap` をあなたにとって意味のあるエラーメッセージを伴う `expect` に変更することは、ご自由に行なってください。

ミューテックスのロックを獲得できたら、`recv` を呼び出してチャンネルから `Job` を受け取ります。最後の `unwrap` もここであらゆるエラーを超えていき、これはチャンネルの送信側を保持するスレッドが閉じた場合に発生する可能性があり、受信側が閉じた場合に `send` メソッドが `Err` を返すのと似ています。

`recv` の呼び出しはブロックするので、まだ仕事があれば、現在のスレッドは、仕事を利用可能になるまで待機します。`Mutex<T>` により、ただ 1 つの `Worker` スレッドのみが一度に仕事の要求を試みることを保証します。

理論的には、このコードはコンパイルできるはずです。残念ながら、**Rust** コンパイラはまだ完全ではなく、このようなエラーが出ます:

```
error[E0161]: cannot move a value of type std::ops::FnOnce() +
std::marker::Send: the size of std::ops::FnOnce() + std::marker::Send cannot be
statically determined
(エラー: std::ops::FnOnce() + std::marker::Sendの値をムーブできません:
std::ops::FnOnce() + std::marker::Sendのサイズを静的に決定できません)
--> src/lib.rs:63:17
   |
63 |             (*job)();
   |             ^^^^^^^
```

問題が非常に謎めいているので、エラーも非常に謎めいています。`Box<T>` に格納された `FnOnce` クロージャを呼び出すためには (`Job` 型エイリアスがそう)、呼び出す際にクロージャが `self` の所有権を奪うので、クロージャは自身を `Box<T>` からムーブする必要があります。一般的に、**Rust** は `Box<T>` から値をムーブすることを許可しません。コンパイラには、`Box<T>` の内側の値がどれほどの大きさなのか見当がつかないからです: 第 15 章で `Box<T>` に格納して既知のサイズの値を得たい未知のサイズの何かがあるために `Box<T>` を正確に使用したことを思い出してください。

リスト 17-15 で見かけたように、記法 `self: Box<Self>` を使用するメソッドを書くことができ、これにより、メソッドは `Box<T>` に格納された `Self` 値の所有権を奪うことができます。それがまさしくここで行いたいことですが、残念ながらコンパイラはさしてくれませんが: クロージャが呼び出された際に振る舞いを実装する **Rust** の一部は、`self: Box<Self>` を使用して実装されていないのです。故に、コンパイラはまだこの場面において `self: Box<Self>` を使用してクロージャの所有権を奪い、ク

ロージャを `Box<T>` からムーブできることを理解していないのです。

Rust はまだコンパイラの改善途上にあり、リスト 20-20 のコードは、将来的にうまく動くようになるべきです。まさしくあなたのような方がこれや他の問題を修正しています！ この本を完了したら、是非ともあなたにも参加していただきたいです。

ですがとりあえず、手頃なトリックを使ってこの問題を回避しましょう。この場合、`self: Box<Self>` で、`Box<T>` の内部の値の所有権を奪うことができることをコンパイラに明示的に教えてあげます；そして、一旦クロージャの所有権を得たら、呼び出せます。これには、シグニチャに `self: Box<Self>` を使用する `call_box` というメソッドのある新しいトレイト `FnBox` を定義すること、`FnOnce()` を実装する任意の型に対して `FnBox` を定義すること、型エイリアスを新しいトレイトを使用するように変更すること、`Worker` を `call_box` メソッドを使用するように変更することが関連します。これらの変更は、リスト 20-21 に表示されています。

ファイル名: `src/lib.rs`

```
trait FnBox {
    fn call_box(self: Box<Self>);
}

impl<F: FnOnce()> FnBox for F {
    fn call_box(self: Box<F>) {
        (*self)()
    }
}

type Job = Box<FnBox + Send + 'static>;

// --snip--

impl Worker {
    fn new(id: usize, receiver: Arc<Mutex<mpsc::Receiver<Job>>>)) -> Worker {
        let thread = thread::spawn(move || {
            loop {
                let job = receiver.lock().unwrap().recv().unwrap();

                println!("Worker {} got a job; executing.", id);

                job.call_box();
            }
        });

        Worker {
            id,
            thread,
        }
    }
}
```

リスト 20-21: 新しいトレイト `FnBox` を追加して `Box<FnOnce()>` の現在の制限を回避する

まず、`FnBox` という新しいトレイトを作成します。このトレイトには `call_box` という 1 つのメソッドがあり、これは、`self: Box<Self>` を取って `self` の所有権を奪い、`Box<T>` から値をムーブする点を除いて、他の `Fn*` トレイトの `call` メソッドと類似しています。

次に、`FnOnce()` トレイトを実装する任意の型 `F` に対して `FnBox` トレイトを実装します。実質的にこれは、あらゆる `FnOnce()` クロージャが `call_box` メソッドを使用できることを意味します。`call_box` の実装は、`(*_self)()` を使用して `Box<T>` からクロージャをムーブし、クロージャを呼び出します。

これで `Job` 型エイリアスには、新しいトレイトの `FnBox` を実装する何かの `Box` である必要がでてきました。これにより、クロージャを直接呼び出す代わりに `Job` 値を得た時に `Worker` の `call_box` を使えます。任意の `FnOnce()` クロージャに対して `FnBox` トレイトを実装することは、チャンネルに送信する実際の値は何も変えなくてもいいことを意味します。もうコンパイラは、我々が行おうとしていることが平気なことであると認識できます。

このトリックは非常にこそこそしていて複雑です。完璧に筋が通らなくても心配しないでください; いつの日か、完全に不要になるでしょう。

このトリックの実装で、スレッドプールは動く状態になります! `cargo run` を実行し、リクエストを行なってください:

```
$ cargo run
   Compiling hello v0.1.0 (file:///projects/hello)
warning: field is never used: `workers`
--> src/lib.rs:7:5
   |
 7 |     workers: Vec<Worker>,
   |     ^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^
   |
   = note: #[warn(dead_code)] on by default

warning: field is never used: `id`
--> src/lib.rs:61:5
   |
61 |     id: usize,
   |     ^^^^^^^
   |
   = note: #[warn(dead_code)] on by default

warning: field is never used: `thread`
--> src/lib.rs:62:5
   |
62 |     thread: thread::JoinHandle<()>,
   |     ^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^
   |
   = note: #[warn(dead_code)] on by default

Finished dev [unoptimized + debuginfo] target(s) in 0.99 secs
Running `target/debug/hello`
```



```
Worker 0 got a job; executing.
Worker 2 got a job; executing.
Worker 1 got a job; executing.
Worker 3 got a job; executing.
Worker 0 got a job; executing.
Worker 2 got a job; executing.
Worker 1 got a job; executing.
Worker 3 got a job; executing.
Worker 0 got a job; executing.
Worker 2 got a job; executing.
```

成功！もう非同期に接続を実行するスレッドプールができました。絶対に 4 つ以上のスレッドが生成されないで、サーバが多くのリクエストを受け取っても、システムは過負荷にならないでしょう。**/sleep** にリクエストを行なっても、サーバは他のスレッドに実行させることで他のリクエストを提供できるでしょう。

第 18 章で `while let` ループを学んだ後で、なぜリスト 20-22 に示したようにワーカースレッドのコードを記述しなかったのか、不思議に思っている可能性があります。

ファイル名: `src/lib.rs`

```
// --snip--

impl Worker {
    fn new(id: usize, receiver: Arc<Mutex<mpsc::Receiver<Job>>>) -> Worker {
        let thread = thread::spawn(move || {
            while let Ok(job) = receiver.lock().unwrap().recv() {
                println!("Worker {} got a job; executing.", id);

                job.call_box();
            }
        });

        Worker {
            id,
            thread,
        }
    }
}
```

リスト 20-22: `while let` を使用したもう 1 つの `Worker::new` の実装

このコードはコンパイルでき、動きますが、望み通りのスレッドの振る舞いにはなりません: 遅いリクエストがそれでも、他のリクエストが処理されるのを待機させてしまうのです。理由はどこか捉えがたいものです: `Mutex` 構造体には公開の `unlock` メソッドがありません。ロックの所有権が、`lock` メソッドが返す `LockResult<MutexGuard<T>>` 内の `MutexGuard<T>` のライフタイムに基づくからです。コンパイル時には、ロックを保持していない限り、借用チェッカーはそうしたら、`Mutex` に保護されるリソースにはアクセスできないという規則を強制できます。しかし、この実装は、`MutexGuard<T>`

のライフタイムについて熟考しなければ、意図したよりもロックが長い間保持される結果になり得ます。while 式の値がブロックの間中スコープに残り続けるので、ロックは `job.call_box` の呼び出し中保持されたままになり、つまり、他のワーカーが仕事を受け取れなくなるのです。

代わりに `loop` を使用し、ロックと仕事をブロックの外ではなく、内側で獲得することで、`lock` メソッドが返す `MutexGuard` は `let job` 文が終わると同時にドロップされます。これにより、複数のリクエストを並行で提供し、ロックは `recv` の呼び出しの間は保持されるけれども、`job.call_box` の呼び出しの前には解放されることを保証します。

20.3 正常なシャットダウンと片付け

リスト 20-21 のコードは、意図した通り、スレッドプールの使用を通してリクエストに非同期に応答できます。直接使用していない `workers`、`id`、`thread` フィールドについて警告が出ます。この警告は、現在のコードは何も片付けていないことを思い出させてくれます。優美さに欠ける `ctrl-c` を使用してメインスレッドを停止させる方法を使用すると、リクエストの処理中であっても、他のスレッドも停止します。

では、閉じる前に取り掛かっているリクエストを完了できるように、プールの各スレッドに対して `join` を呼び出す `Drop` トレイトを実装します。そして、スレッドに新しいリクエストの受付を停止し、終了するように教える方法を実装します。このコードが動いているのを確かめるために、サーバを変更して正常にスレッドプールを終了する前に 2 つしかリクエストを受け付けないようにします。

20.3.1 ThreadPool に Drop トレイトを実装する

スレッドプールに `Drop` を実装するところから始めましょう。プールがドロップされると、スレッドは全て `join` して、作業を完了するのを確かめるべきです。リスト 20-23 は、`Drop` 実装の最初の試みを表示しています; このコードはまだ完全には動きません。

ファイル名: `src/lib.rs`

```
impl Drop for ThreadPool {
    fn drop(&mut self) {
        for worker in &mut self.workers {
            // ワーカー{}を終了します
            println!("Shutting down worker {}", worker.id);

            worker.thread.join().unwrap();
        }
    }
}
```

リスト 20-23: スレッドプールがスコープを抜けた時にスレッドを `join` させる

まず、スレッドプール `workers` それぞれを走査します。`self` は可変参照であり、`worker` を可変化

できる必要もあるので、これには `&mut` を使用しています。ワーカーそれぞれに対して、特定のワーカーを終了する旨のメッセージを出力し、それから `join` をワーカースレッドに対して呼び出しています。`join` の呼び出しが失敗したら、`unwrap` を使用して **Rust** をパニックさせ、正常でないシャットダウンに移行します。

こちらが、このコードをコンパイルする際に出るエラーです:

```
error[E0507]: cannot move out of borrowed content
--> src/lib.rs:65:13
   |
65 |             worker.thread.join().unwrap();
   |             ^^^^^^^ cannot move out of borrowed content
```

各 worker の可変参照しかなく、`join` は引数の所有権を奪うためにこのエラーは `join` を呼び出せないと教えてくれています。この問題を解決するには、`join` がスレッドを消費できるように、`thread` を所有する `Worker` インスタンスからスレッドをムーブする必要があります。これをリスト 17-15 では行いました: `Worker` が代わりに `Option<thread::JoinHandle<()>>` を保持していれば、`Option` に対して `take` メソッドを呼び出し、`Some` 列挙子から値をムーブし、その場所に `None` 列挙子を残すことができます。言い換えれば、実行中の `Worker` には `thread` に `Some` 列挙子があり、`Worker` を片付けたい時には、ワーカーが実行するスレッドがないように `Some` を `None` で置き換えるのです。

従って、`Worker` の定義を以下のように更新したいことがわかります:

ファイル名: `src/lib.rs`

```
# use std::thread;
struct Worker {
    id: usize,
    thread: Option<thread::JoinHandle<()>>,
}
```

さて、コンパイラを頼りにして他に変更する必要がある箇所を探しましょう。このコードをチェックすると、2つのエラーが出ます:

```
error[E0599]: no method named `join` found for type
`std::option::Option<std::thread::JoinHandle<()>>` in the current scope
--> src/lib.rs:65:27
   |
65 |             worker.thread.join().unwrap();
   |                             ^^^^^
error[E0308]: mismatched types
--> src/lib.rs:89:13
   |
89 |             thread,
   |             ^^^^^^
   |             |
   |             expected enum `std::option::Option`, found struct
```

```

`std::thread::JoinHandle`
|             help: try using a variant of the expected type: `Some(thread)`
|
= note: expected type `std::option::Option<std::thread::JoinHandle<()>>`
       found type `std::thread::JoinHandle<_>`

```

2 番目のエラーを扱しましょう。これは、Worker::new の最後のコードを指しています; 新しい Worker を作成する際に、Some に thread の値を包む必要があります。このエラーを修正するために以下の変更を行なってください:

ファイル名: src/lib.rs

```

impl Worker {
    fn new(id: usize, receiver: Arc<Mutex<mpsc::Receiver<Job>>>) -> Worker {
        // --snip--

        Worker {
            id,
            thread: Some(thread),
        }
    }
}

```

最初のエラーは Drop 実装内にあります。先ほど、Option 値に対して take を呼び出し、thread を worker からムーブする意図があることに触れました。以下の変更がそれを行います:

ファイル名: src/lib.rs

```

impl Drop for ThreadPool {
    fn drop(&mut self) {
        for worker in &mut self.workers {
            println!("Shutting down worker {}", worker.id);

            if let Some(thread) = worker.thread.take() {
                thread.join().unwrap();
            }
        }
    }
}

```

第 17 章で議論したように、Option の take メソッドは、Some 列挙子を取り出し、その箇所に None を残します。if let を使用して Some を分配し、スレッドを得ています; そして、スレッドに対して join を呼び出します。ワーカーのスレッドが既に None なら、ワーカーはスレッドを既に片付け済みであることがわかるので、その場合には何も起きません。

20.3.2 スレッドに仕事をリッスンするのを止めるよう通知する

これらの変更によって、コードは警告なしでコンパイルできます。ですが悪い知らせは、このコードが期待したようにはまだ機能しないことです。鍵は、Worker インスタンスのスレッドで実行されるクロージャのロジックです: 現時点で join を呼び出していますが、仕事を求めて永遠に loop するので、スレッドを終了しません。現在の drop の実装で ThreadPool をドロップしようとしたら、最初のスレッドが完了するのを待機してメインスレッドは永遠にブロックされるでしょう。

この問題を修正するには、スレッドが、実行すべき Job か、リッスンをやめて無限ループを抜ける通知をリッスンするように、変更します。Job インスタンスの代わりに、チャンネルはこれら 2 つの enum 列挙子の一方を送信します。

ファイル名: src/lib.rs

```
# struct Job;
enum Message {
    NewJob(Job),
    Terminate,
}
```

この Message enum はスレッドが実行すべき Job を保持する NewJob 列挙子か、スレッドをループから抜けさせ、停止させる Terminate 列挙子のどちらかになります。

チャンネルを調整し、型 Job ではなく、型 Message を使用するようにする必要があります。リスト 20-24 のようにですね。

ファイル名: src/lib.rs

```
pub struct ThreadPool {
    workers: Vec<Worker>,
    sender: mpsc::Sender<Message>,
}

// --snip--

impl ThreadPool {
    // --snip--

    pub fn execute<F>(&self, f: F)
        where
            F: FnOnce() + Send + 'static
    {
        let job = Box::new(f);

        self.sender.send(Message::NewJob(job)).unwrap();
    }
}
```

```
// --snip--

impl Worker {
    fn new(id: usize, receiver: Arc<Mutex<mpsc::Receiver<Message>>>) ->
        Worker {

        let thread = thread::spawn(move ||{
            loop {
                let message = receiver.lock().unwrap().recv().unwrap();

                match message {
                    Message::NewJob(job) => {
                        println!("Worker {} got a job; executing.", id);

                        job.call_box();
                    },
                    Message::Terminate => {
                        // ワーカー{}は停止するよう指示された
                        println!("Worker {} was told to terminate.", id);

                        break;
                    },
                }
            }
        });

        Worker {
            id,
            thread: Some(thread),
        }
    }
}
```

リスト 20-24: Message 値を送受信し、Worker が Message::Terminate を受け取ったら、ループを抜ける

Message enum を具体化するために、2 箇所で Job を Message に変更する必要があります: ThreadPool の定義と Worker::new のシグニチャです。ThreadPool の execute メソッドは、仕事を Message::NewJob 列挙子に包んで送信する必要があります。それから、Message がチャンネルから受け取られる Worker::new で、NewJob 列挙子が受け取られたら、仕事が処理され、Terminate 列挙子が受け取られたら、スレッドはループを抜けます。

これらの変更と共に、コードはコンパイルでき、リスト 20-21 の後と同じように機能し続けます。ですが、Terminate のメッセージを何も生成していないので、警告が出るでしょう。Drop 実装をリスト 20-25 のような見た目に変更してこの警告を修正しましょう。

ファイル名: src/lib.rs

```
impl Drop for ThreadPool {
    fn drop(&mut self) {
        println!("Sending terminate message to all workers.");

        for _ in &mut self.workers {
            self.sender.send(Message::Terminate).unwrap();
        }

        // 全ワーカーを閉じます
        println!("Shutting down all workers.");

        for worker in &mut self.workers {
            // ワーカー{}を閉じます
            println!("Shutting down worker {}", worker.id);

            if let Some(thread) = worker.thread.take() {
                thread.join().unwrap();
            }
        }
    }
}
```

リスト 20-25: 各ワーカースレッドに対して `join` を呼び出す前にワーカーに `Message::Terminate` を送信する

今では、ワーカーを 2 回走査しています: 各ワーカーに `Terminate` メッセージを送信するために 1 回と、各ワーカースレッドに `join` を呼び出すために 1 回です。メッセージ送信と `join` を同じループで即座に行おうとすると、現在の繰り返しのワーカーがチャンネルからメッセージを受け取っているものであるか保証できなくなってしまいます。

2 つの個別のループが必要な理由をよりよく理解するために、2 つのワーカーがある筋書きを想像してください。単独のループで各ワーカーを走査すると、最初の繰り返してチャンネルに停止メッセージが送信され、`join` が最初のワーカースレッドで呼び出されます。その最初のワーカーが現在、リクエストの処理で忙しければ、2 番目のワーカーがチャンネルから停止メッセージを受け取り、閉じます。最初のワーカーの終了待ちをしまままですが、2 番目のスレッドが停止メッセージを拾ってしまったので、終了することは絶対にありません。デッドロックです!

この筋書きを回避するために、1 つのループでまず、チャンネルに対して全ての `Terminate` メッセージを送信します;そして、別のループで全スレッドの `join` を待ちます。一旦停止メッセージを受け取ったら、各ワーカーはチャンネルからのリクエストの受付をやめます。故に、存在するワーカーと同じ数だけ停止メッセージを送れば、`join` がスレッドに対して呼び出される前に、停止メッセージを各ワーカーが受け取ると確信できるわけです。

このコードが動いているところを確認するために、`main` を変更してサーバを正常に閉じる前に 2 つしかリクエストを受け付けないようにしましょう。リスト 20-26 のようにですね。

ファイル名: `src/bin/main.rs`

```
fn main() {  
    let listener = TcpListener::bind("127.0.0.1:7878").unwrap();  
    let pool = ThreadPool::new(4);  
  
    for stream in listener.incoming().take(2) {  
        let stream = stream.unwrap();  
  
        pool.execute(|| {  
            handle_connection(stream);  
        });  
    }  
  
    println!("Shutting down.");  
}
```

リスト 20-26: ループを抜けることで、2 つのリクエストを処理した後にサーバを閉じる

現実世界の Web サーバには、たった 2 つリクエストを受け付けた後にシャットダウンしてほしくはないでしょう。このコードは、単に正常なシャットダウンとクリーンアップが正しく機能することを示すだけです。

take メソッドは、Iterator トレイトで定義されていて、最大でも繰り返しを最初の 2 つの要素だけに制限します。ThreadPool は main の末端でスコープを抜け、drop 実装が実行されます。

cargo run でサーバを開始し、3 つリクエストを行なってください。3 番目のリクエストはエラーになるはずで、端末にはこのような出力が目撃できるはずです:

```
$ cargo run  
Compiling hello v0.1.0 (file:///projects/hello)  
Finished dev [unoptimized + debuginfo] target(s) in 1.0 secs  
Running `target/debug/hello`  
Worker 0 got a job; executing.  
Worker 3 got a job; executing.  
Shutting down.  
Sending terminate message to all workers.  
Shutting down all workers.  
Shutting down worker 0  
Worker 1 was told to terminate.  
Worker 2 was told to terminate.  
Worker 0 was told to terminate.  
Worker 3 was told to terminate.  
Shutting down worker 1  
Shutting down worker 2  
Shutting down worker 3
```

ワーカーとメッセージの順番は異なる可能性があります。どうやってこのコードが動くのかメッセージからわかります: ワーカー 0 と 3 が最初の 2 つのリクエストを受け付け、そして 3 番目のリクエストではサーバは接続の受け入れをやめます。main の最後で ThreadPool がスコープを抜ける際、Drop 実装が割り込み、プールが全ワーカーに停止するよう指示します。ワーカーはそれぞれ、停止

メッセージを確認した時にメッセージを出力し、それからスレッドプールは各ワーカースレッドを閉じる `join` を呼び出します。

この特定の実行のある面白い側面に注目してください: `ThreadPool` はチャンネルに停止メッセージを送信しますが、どのワーカーがそのメッセージを受け取るよりも前に、ワーカー 0 の `join` を試みています。ワーカー 0 はまだ停止メッセージを受け取っていなかったなので、メインスレッドはワーカー 0 が完了するまで待機してブロックされます。その間に、各ワーカーは停止メッセージを受け取ります。ワーカー 0 が完了したら、メインスレッドは残りのワーカーが完了するのを待機します。その時点で全ワーカーは停止メッセージを受け取った後で、閉じることができたのです。

おめでとうございます! プロジェクトを完成させました; スレッドプールを使用して非同期に応答する基本的な Web サーバができました。サーバの正常なシャットダウンを行うことができ、プールの全スレッドを片付けます。

参考までに、こちらが全コードです:

ファイル名: `src/bin/main.rs`

```
extern crate hello;
use hello::ThreadPool;

use std::io::prelude::*;
use std::net::TcpListener;
use std::net::TcpStream;
use std::fs::File;
use std::thread;
use std::time::Duration;

fn main() {
    let listener = TcpListener::bind("127.0.0.1:7878").unwrap();
    let pool = ThreadPool::new(4);

    for stream in listener.incoming().take(2) {
        let stream = stream.unwrap();

        pool.execute(|| {
            handle_connection(stream);
        });
    }

    // 閉じます
    println!("Shutting down.");
}

fn handle_connection(mut stream: TcpStream) {
    let mut buffer = [0; 1024];
    stream.read(&mut buffer).unwrap();

    let get = b"GET / HTTP/1.1\r\n";
    let sleep = b"GET /sleep HTTP/1.1\r\n";
```

```

let (status_line, filename) = if buffer.starts_with(get) {
    ("HTTP/1.1 200 OK\r\n\r\n", "hello.html")
} else if buffer.starts_with(sleep) {
    thread::sleep(Duration::from_secs(5));
    ("HTTP/1.1 200 OK\r\n\r\n", "hello.html")
} else {
    ("HTTP/1.1 404 NOT FOUND\r\n\r\n", "404.html")
};

let mut file = File::open(filename).unwrap();
let mut contents = String::new();

file.read_to_string(&mut contents).unwrap();

let response = format!("{}", status_line, contents);

stream.write(response.as_bytes()).unwrap();
stream.flush().unwrap();
}

```

ファイル名: src/lib.rs

```

use std::thread;
use std::sync::mpsc;
use std::sync::Arc;
use std::sync::Mutex;

enum Message {
    NewJob(Job),
    Terminate,
}

pub struct ThreadPool {
    workers: Vec<Worker>,
    sender: mpsc::Sender<Message>,
}

trait FnBox {
    fn call_box(self: Box<Self>);
}

impl<F: FnOnce()> FnBox for F {
    fn call_box(self: Box<F>) {
        (*self)()
    }
}

type Job = Box<FnBox + Send + 'static>;

impl ThreadPool {
    /// Create a new ThreadPool.

```

```
///
/// The size is the number of threads in the pool.
///
/// # Panics
///
/// The `new` function will panic if the size is zero.
pub fn new(size: usize) -> ThreadPool {
    assert!(size > 0);

    let (sender, receiver) = mpsc::channel();

    let receiver = Arc::new(Mutex::new(receiver));

    let mut workers = Vec::with_capacity(size);

    for id in 0..size {
        workers.push(Worker::new(id, Arc::clone(&receiver)));
    }

    ThreadPool {
        workers,
        sender,
    }
}

pub fn execute<F>(&self, f: F)
    where
        F: FnOnce() + Send + 'static
{
    let job = Box::new(f);

    self.sender.send(Message::NewJob(job)).unwrap();
}

impl Drop for ThreadPool {
    fn drop(&mut self) {
        println!("Sending terminate message to all workers.");

        for _ in &mut self.workers {
            self.sender.send(Message::Terminate).unwrap();
        }

        println!("Shutting down all workers.");

        for worker in &mut self.workers {
            println!("Shutting down worker {}", worker.id);

            if let Some(thread) = worker.thread.take() {
                thread.join().unwrap();
            }
        }
    }
}
```

```
}

struct Worker {
    id: usize,
    thread: Option<thread::JoinHandle<()>>,
}

impl Worker {
    fn new(id: usize, receiver: Arc<Mutex<mpsc::Receiver<Message>>>) ->
        Worker {

        let thread = thread::spawn(move ||{
            loop {
                let message = receiver.lock().unwrap().recv().unwrap();

                match message {
                    Message::NewJob(job) => {
                        println!("Worker {} got a job; executing.", id);

                        job.call_box();
                    },
                    Message::Terminate => {
                        println!("Worker {} was told to terminate.", id);

                        break;
                    },
                }
            }
        });

        Worker {
            id,
            thread: Some(thread),
        }
    }
}
```

ここでできることはまだあるでしょう！ よりこのプロジェクトを改善したいのなら、こちらがアイデアの一部です：

- `ThreadPool` とその公開メソッドにもっとドキュメンテーションを追加する。
- ライブラリの機能のテストを追加する。
- `unwrap` の呼び出しをもっと頑健なエラー処理に変更する。
- `ThreadPool` を使用して Web リクエスト以外のなんらかの作業を行う。
- <https://crates.io> でスレッドプールのクレートを探して、そのクレートを代わりに使用して似た Web サーバを実装する。そして、API と頑健性を我々が実装したものと比較する。

20.4 まとめ

よくやりました！本の最後に到達しました！ Rust のツアーに参加していただき、感謝の辞を述べたいです。もう、ご自身の Rust プロジェクトや他の方のプロジェクトのお手伝いをする準備ができています。あなたがこれからの Rust の旅で遭遇する、あらゆる困難の手助けを是非とも行いたい Rustacean たちの温かいコミュニティがあることを心に留めておいてくださいね。

付録

以下の節は、Rust の旅で役に立つと思えるかもしれない参考資料を含んでいます。

付録 A: キーワード

以下のリストは、現在、あるいは将来 Rust 言語により使用されるために予約されているキーワードです。そのため、識別子として使用することはできません。識別子には、関数名、変数名、引数名、構造体のフィールド名、モジュール名、クレート名、定数名、マクロ名、静的な値の名前、属性名、型名、トレイト名、ライフタイム名などがあります。ただし、生識別子のところで議論する生識別子は例外です。

現在使用されているキーワード

以下のキーワードは、解説された通りの機能が現状あります。

- `as` - 基礎的なキャストの実行、要素を含む特定のトレイトの明確化、`use` や `extern crate` 文の要素名を変更する
- `async` - 現在のスレッドをブロックする代わりに `Future` を返す
- `await` - `Future` の結果が準備できるまで実行を停止する
- `break` - 即座にループを抜ける
- `const` - 定数要素か定数の生ポインタを定義する
- `continue` - 次のループの繰り返しに継続する
- `crate` - 外部のクレートかマクロが定義されているクレートを表すマクロ変数をリンクする
- `else` - `if` と `if let` 制御フロー構文の規定
- `enum` - 列挙型を定義する
- `extern` - 外部のクレート、関数、変数をリンクする
- `false` - `bool` 型の `false` リテラル
- `fn` - 関数か関数ポインタ型を定義する
- `for` - イテレータの要素を繰り返す、トレイトの実装、高階ライフタイムの指定
- `if` - 条件式の結果によって条件分岐

- `impl` - 固有の機能やトレイトの機能を実装する
- `in` - `for` ループ記法の一部
- `let` - 変数を束縛する
- `loop` - 無条件にループする
- `match` - 値をパターンとマッチさせる
- `mod` - モジュールを定義する
- `move` - クロージャにキャプチャした変数全ての所有権を奪わせる
- `mut` - 参照、生ポインタ、パターン束縛で可変性に言及する
- `pub` - 構造体フィールド、`impl` ブロック、モジュールで公開性について言及する
- `ref` - 参照で束縛する
- `return` - 関数から帰る
- `Self` - 定義しようとしている・実装 (**implement**) しようとしている型の型エイリアス
- `self` - メソッドの主題、または現在のモジュール
- `static` - グローバル変数、またはプログラム全体に渡るライフタイム
- `struct` - 構造体を定義する
- `super` - 現在のモジュールの親モジュール
- `trait` - トレイトを定義する
- `true` - `bool` 型の `true` リテラル
- `type` - 型エイリアスか関連型を定義する
- `unsafe` - **unsafe** なコード、関数、トレイト、実装に言及する
- `use` - スコープにシンボルを持ち込む
- `where` - 型を制限する節に言及する
- `while` - 式の結果に基づいて条件的にループする

将来的な使用のために予約されているキーワード

以下のキーワードには機能が何もないものの、将来的に使用される可能性があるので、**Rust** により予約されています。

- `abstract`
- `become`
- `box`
- `do`
- `final`
- `macro`
- `override`
- `priv`

- try
- typeof
- unsized
- virtual
- yield

生識別子

生識別子とは、普段は使うことが許されないキーワードを使わせてくれる構文です。生識別子はキーワードの前に `r#` を置いて使うことができます。

たとえば、`match` はキーワードです。次の、名前が `match` である関数をコンパイルしようとする：

ファイル名: `src/main.rs`

```
fn match(needle: &str, haystack: &str) -> bool {
    haystack.contains(needle)
}
// 訳注：引数名は、"a needle in a haystack" すなわち「干し草の中の針」という、
// 「見つかりそうにない捜し物」を意味する成句からもじった命名。
// 検索をする関数でよく使われる。
```

次のエラーを得ます：

```
error: expected identifier, found keyword `match`
--> src/main.rs:4:4
   |
 4 | fn match(needle: &str, haystack: &str) -> bool {
   |     ^^^^^ expected identifier, found keyword
```

このエラーは `match` というキーワードを関数の識別子としては使えないと示しています。`match` を関数名として使うには、次のように、生識別子構文を使う必要があります。

ファイル名: `src/main.rs`

```
fn r#match(needle: &str, haystack: &str) -> bool {
    haystack.contains(needle)
}

fn main() {
    assert!(r#match("foo", "foobar"));
}
```

このコードはなんのエラーもなくコンパイルできます。`r#` は、定義のときも、`main` 内で呼ばれたときにも、関数名の前につけられていることに注意してください。

生識別子を使えば、仮にそれが予約されたキーワードであろうとも、任意の単語を識別子として使えるようになります。更に、あなたのクレートが使っている Rust の **edition** とは異なる **edition** で書かれたライブラリを呼び出すこともできるようになります。たとえば、`try` は **2015 edition** ではキーワードではありませんでしたが、**2018 edition** ではキーワードです。もし、**2015 edition** で書かれており、`try` 関数を持っているライブラリに依存している場合、あなたの **2018 edition** のコードからその関数を呼び出すためには、生識別子構文を使う必要がでてくるでしょう。今回なら `r#try` ですね。**edition** に関して、より詳しくは付録 E をご覧ください。

付録 B: 演算子と記号

この付録は、演算子や、単独で現れたり、パス、ジェネリクス、トレイト境界、マクロ、属性、コメント、タプル、かっこの文脈で現れる他の記号を含む Rust の記法の用語集を含んでいます。

演算子

表 B-1 は、Rust の演算子、演算子が文脈で現れる例、短い説明、その演算子がオーバーロード可能かどうかを含んでいます。演算子がオーバーロード可能ならば、オーバーロードするのに使用する関係のあるトレイトも列挙されています。

表 B-1: 演算子

演算子	例	説明	オーバーロードできる？
!	<code>ident!(...), ident!{...}, ident![...]</code>	マクロ展開	
!	<code>!expr</code>	ビット反転、または論理反転	Not
!=	<code>var != expr</code>	不等価比較	PartialEq
%	<code>expr % expr</code>	余り演算	Rem
%=	<code>var %= expr</code>	余り演算後に代入	RemAssign
&	<code>&expr, &mut expr</code>	借用	
&	<code>&type, &mut type, &'a type, &'a mut type</code>	借用されたポインタ型	
&	<code>expr & expr</code>	ビット AND	BitAnd
&=	<code>var &= expr</code>	ビット AND 後に代入	BitAndAssign
&&	<code>expr && expr</code>	論理 AND	
*	<code>expr * expr</code>	掛け算	Mul
*	<code>*expr</code>	参照外し	
*	<code>*const type, *mut type</code>	生ポインタ	

演算子	例	説明	オーバーロードできる？
<code>*=</code>	<code>var *= expr</code>	掛け算後に代入	MulAssign
<code>+</code>	<code>trait + trait, 'a + trait</code>	型制限の複合化	
<code>+</code>	<code>expr + expr</code>	足し算	Add
<code>+=</code>	<code>var += expr</code>	足し算後に代入	AddAssign
<code>,</code>	<code>expr, expr</code>	引数と要素の区別	
<code>-</code>	<code>- expr</code>	算術否定	Neg
<code>-</code>	<code>expr - expr</code>	引き算	Sub
<code>-=</code>	<code>var -= expr</code>	引き算後に代入	SubAssign
<code>-></code>	<code>fn(...) -> type,</code> <code> ... -> type</code>	関数とクロージャの戻り値型	
<code>.</code>	<code>expr.ident</code>	メンバーアクセス	
<code>..</code>	<code>.., expr.., ..expr,</code> <code>expr..expr</code>	未満範囲リテラル	
<code>..</code>	<code>..expr</code>	構造体リテラル更新記法	
<code>..</code>	<code>variant(x, ..),</code> <code>struct_type { x, .. }</code>	「残り全部」パターン束縛	
<code>...</code>	<code>expr...expr</code>	パターンで: 以下範囲パターン	
<code>/</code>	<code>expr / expr</code>	割り算	Div
<code>/=</code>	<code>var /= expr</code>	割り算後に代入	DivAssign
<code>:</code>	<code>pat: type, ident: type</code>	型制約	
<code>:</code>	<code>ident: expr</code>	構造体フィールド初期化子	
<code>:</code>	<code>'a: loop {...}</code>	ループラベル	
<code>;</code>	<code>expr;</code>	文、要素終端子	
<code>;</code>	<code>[...; len]</code>	固定長配列記法の一部	
<code><<</code>	<code>expr << expr</code>	左シフト	Shl
<code><<=</code>	<code>var <<= expr</code>	左シフト後に代入	ShlAssign
<code><</code>	<code>expr < expr</code>	未満比較	PartialOrd
<code><=</code>	<code>expr <= expr</code>	以下比較	PartialOrd
<code>=</code>	<code>var = expr, ident = type</code>	代入/等価	
<code>==</code>	<code>expr == expr</code>	等価比較	PartialEq
<code>=></code>	<code>pat => expr</code>	match アーム記法の一部	
<code>></code>	<code>expr > expr</code>	より大きい比較	PartialOrd
<code>>=</code>	<code>expr >= expr</code>	以上比較	PartialOrd
<code>>></code>	<code>expr >> expr</code>	右シフト	Shr

演算子	例	説明	オーバーロードできる？
>>=	var >>= expr	右シフト後に代入	ShrAssign
@	ident @ pat	パターン束縛	
^	expr ^ expr	ビット XOR	BitXor
^=	var ^= expr	ビット XOR 後に代入	BitXorAssign
	pat pat	パターン OR	
	... expr	クロージャ	
	expr expr	ビット OR	BitOr
=	var = expr	ビット OR 後に代入	BitOrAssign
	expr expr	論理 OR	
?	expr?	エラー委譲	

演算子以外のシンボル

以下のリストは、演算子として機能しない記号全部を含んでいます; つまり、関数やメソッド呼び出しのようには、振る舞わないということです。

表 B-2 は、単独で出現し、いろんな箇所でも合法になる記号を示しています。

表 B-2: スタンドアローン記法

シンボル	説明
'ident	名前付きのライフタイム、あるいはループラベル
...u8, ...i32, ...f64, ...usize など	特定の型の数値リテラル
"..."	文字列リテラル
r"...", r#"..."#, r##"..."## など	生文字列リテラル、エスケープ文字は処理されません
b"..."	バイト文字列リテラル、文字列の代わりに [u8] を構築します
br"...", br#"..."#, br##"..."## など	生バイト文字列リテラル、生文字列とバイト文字列の組み合わせ
'...'	文字リテラル
b'...'	ASCII バイトリテラル
... expr	クロージャ
!	常に発散関数の空のボトム型

シンボル	説明
<code>_</code>	「無視」パターン束縛: 整数リテラルを見やすくするのに使われる

表 B-3 は、要素へのモジュール階層を通したパスの文脈で出現する記号を示しています。

表 B-3: パス関連記法

シンボル	説明
<code>ident::ident</code>	名前空間パス
<code>::path</code>	クレートリートに相対的なパス (すなわち、明示的な絶対パス)
<code>self::path</code>	現在のモジュールに相対的なパス (すなわち、明示的な相対パス)
<code>super::path</code>	現在のモジュールの親モジュールに相対的なパス
<code>type::ident</code> , <code><type</code> <code>as trait>::ident</code>	関連定数、関数、型
<code><type>::...</code>	直接名前付けできない型の関連要素 (例, <code><&T>::...</code> , <code><[T]>::...</code> など)
<code>trait::method(...)</code>	定義したトレイトを名指ししてメソッド呼び出しを明確化する
<code>type::method(...)</code>	定義されている型を名指ししてメソッド呼び出しを明確化する
<code><type as trait>::</code> <code>method(...)</code>	トレイトと型を名指ししてメソッド呼び出しを明確化する

表 B-4 は、ジェネリックな型引数の文脈で出現する記号を示しています。

表 B-4: ジェネリクス

シンボル	説明
<code>path<...></code>	型の内部のジェネリック型への引数を指定する (例、 <code>Vec<u8></code>)
<code>path::<...></code> , <code>method::<...></code>	式中のジェネリックな型、関数、メソッドへの引数を指定する。しばしばターボ・フィッシュ (turbofish) と称される。(例、 <code>"42".parse::<i32>()</code>)
<code>fn ident<...> ...</code>	ジェネリックな関数を定義する ジェネリックな構造体を定義する
<code>struct ident<...> ...</code>	
<code>enum ident<...> ...</code>	ジェネリックな列挙型を定義する
<code>impl<...> ...</code>	ジェネリックな実装を定義する
<code>for<...> type</code>	高階ライフタイム境界

シンボル	説明
<code>type<ident=type></code>	1 つ以上の関連型に代入されたジェネリックな型 (例、 <code>Iterator<Item=T></code>)

表 B-5 は、ジェネリック型引数をトレイト境界で制約する文脈で出現する記号を示しています。

表 B-5: トレイト境界制約

シンボル	説明
<code>T: U</code>	<code>U</code> を実装する型に制約されるジェネリック引数 <code>T</code>
<code>T: 'a</code>	ライフタイム <code>'a</code> よりも長生きしなければならないジェネリック型 <code>T</code> (型がライフタイムより長生きするとは、 <code>'a</code> よりも短いライフタイムの参照を何も遷移的に含められないことを意味する)
<code>T: 'static</code>	ジェネリック型 <code>T</code> が <code>'static</code> なもの以外の借用された参照を何も含まない
<code>'b: 'a</code>	ジェネリックなライフタイム <code>'b</code> がライフタイム <code>'a</code> より長生きしなければならない
<code>T: ?Sized</code>	ジェネリック型引数が動的サイズ決定型であることを許容する
<code>'a + trait,</code> <code>trait + trait</code>	複合型制約

表 B-6 は、マクロの呼び出しや定義、要素に属性を指定する文脈で出現する記号を示しています。

表 B-6: マクロと属性

シンボル	説明
<code>#[meta]</code>	外部属性
<code>#![meta]</code>	内部属性
<code>\$ident</code>	マクロ代用
<code>\$ident:kind</code>	マクロキャプチャ
<code>\$(...)</code> ...	マクロの繰り返し

表 B-7 は、コメントを生成する記号を示しています。

表 B-7: コメント

シンボル	説明
//	行コメント
//!	内部行 doc コメント
///	外部行 doc コメント
/★...★/	ブロックコメント
/★!...★/	内部ブロック doc コメント
/★★...★/	外部ブロック doc コメント

タプル

表 B-8 は、タプルの文脈で出現する記号を示しています。

表 B-8: タプル

シンボル	説明
()	空のタプル (ユニットとしても知られる)、リテラル、型両方
(expr)	括弧付きの式
(expr,)	1 要素タプル式
(type,)	1 要素タプル型
(expr, ...)	タプル式
(type, ...)	タプル型
expr(expr, ...)	関数呼び出し式; タプル struct やタプル enum 列挙子を初期化するのにも使用される
ident!(...), ident!{...}, ident![...]	マクロ呼び出し
expr.0, expr.1, など	タプル添え字アクセス

表 B-9 は、波括弧が使用される文脈を表示しています。

表 B-9: 波括弧

文脈	説明
{...}	ブロック式
Type {...}	struct リテラル

表 B-10 は、角括弧が使用される文脈を表示しています。

表 B-10: 角括弧

文脈	説明
<code>[...]</code>	配列リテラル
<code>[expr; len]</code>	<code>len</code> 個 <code>expr</code> を含む配列リテラル
<code>[type; len]</code>	<code>len</code> 個の <code>type</code> のインスタンスを含む配列型
<code>expr[expr]</code>	コレクション添え字アクセス。オーバーロード可能 (<code>Index</code> , <code>IndexMut</code>)
<code>expr[..]</code> , <code>expr[a..]</code> , <code>expr[..b]</code> , <code>expr[a..b]</code>	<code>Range</code> 、 <code>RangeFrom</code> 、 <code>RangeTo</code> 、 <code>RangeFull</code> を「添え字」として使用して コレクション・スライシングの振りをするコレクション添え字アクセス

付録 C: 導出可能なトレイト

本のいろんな箇所で `derive` 属性について議論しました。これは構造体や、`enum` 定義に適用できます。`derive` 属性は、`derive` 記法で注釈した型に対して独自の既定の実装でトレイトを実装するコードを生成します。

この付録では、標準ライブラリの `derive` と共に使用できる全トレイトの参照を提供します。各節は以下を講義します:

- このトレイトを導出する演算子やメソッドで可能になること
- `derive` が提供するトレイトの実装がすること
- トレイトを実装することが型についてどれほど重要か
- そのトレイトを実装できたりできなかったりする条件
- そのトレイトが必要になる処理の例

`derive` 属性が提供する以外の異なる振る舞いが欲しいなら、それらを手動で実装する方法の詳細について、各トレイトの標準ライブラリのドキュメンテーションを調べてください。

標準ライブラリで定義されている残りのトレイトは、`derive` で自分の型に実装することはできません。これらのトレイトには知覚できるほどの既定の振る舞いはないので、自分が達成しようしていることに対して、道理が通る方法でそれらを実装するのはあなた次第です。

導出できないトレイトの例は `Display` で、これはエンドユーザ向けのフォーマットを扱います。常に、エンドユーザ向けに型を表示する適切な方法について、考慮すべきです。型のどの部分をエンドユーザは見ることができるべきでしょうか？ どの部分を関係があると考えerのでしょうか？ どんな形式のデータがエンドユーザにとって最も関係があるのでしょうか？ `Rust` コンパイラには、この見識がないため、適切な既定動作を提供してくれないのです。

この付録で提供される導出可能なトレイトのリストは、包括的ではありません: ライブラリは、自身のトレイトに `derive` を実装でき、`derive` と共に使用できるトレイトのリストが実に限りのないも

のになってしまうのです。derive の実装には、プロシージャルなマクロが関連します。マクロについては、付録 D で講義します。

プログラマ用の出力の Debug

Debug トレイトにより、フォーマット文字列でのデバッグ整形が可能になり、`{}` プレースホルダー内に `?:` を追記することで表します。

Debug トレイトにより、デバッグ目的で型のインスタンスを出力できるようになるので、あなたや型を使用する他のプログラマが、プログラムの実行の特定の箇所でインスタンスを調べられます。

Debug トレイトは、例えば、`assert_eq!` マクロを使用する際に必要になります。このマクロは、プログラマがどうして 2 つのインスタンスが等価でなかったのか確認できるように、等価アサートが失敗したら、引数として与えられたインスタンスの値を出力します。

等価比較のための PartialEq と Eq

PartialEq トレイトにより、型のインスタンスを比較して、等価性をチェックでき、`==` と `!=` 演算子の使用を可能にします。

PartialEq を導出すると、`eq` メソッドを実装します。構造体に PartialEq を導出すると、**全**フィールドが等しい時のみ 2 つのインスタンスは等価になり、いずれかのフィールドが等価でなければ、インスタンスは等価ではなくなります。`enum` に導出すると、各列挙子は、自身には等価ですが、他の列挙子には等価ではありません。

PartialEq トレイトは例えば、`assert_eq!` マクロを使用する際に必要になります。これは、等価性のためにとある型の 2 つのインスタンスを比較できる必要があります。

Eq トレイトにはメソッドはありません。その目的は、注釈された型の全値に対して、値が自身と等しいことを通知することです。Eq トレイトは、PartialEq を実装する全ての型が Eq を実装できるわけではないものの、PartialEq も実装する型に対してのみ適用できます。これの一例は、浮動小数点数型です: 浮動小数点数の実装により、非数字 (NaN) 値の 2 つのインスタンスはお互いに等価ではないことが宣言されます。

Eq が必要になる一例が、`HashMap<K, V>` のキーで、`HashMap<K, V>` が、2 つのキーが同じであると判定できます。

順序付き比較のための PartialOrd と Ord

PartialOrd トレイトにより、ソートする目的で型のインスタンスを比較できます。PartialOrd を実装する型は、`<`、`>`、`<=`、`>=` 演算子を使用することができます。PartialEq も実装する型に対してのみ、PartialOrd トレイトを適用できます。

PartialOrd を導出すると、`partial_cmp` メソッドを実装し、これは、与えられた値が順序付けられない時に `None` になる `Option<Ordering>` を返します。その型のほとんどの値は比較できるものの、順

序付けできない値の例として、非数字 (NaN) 浮動小数点値が挙げられます。partial_cmp をあらゆる浮動小数点数と NaN 浮動小数点数で呼び出すと、None が返るでしょう。

構造体に導出すると、フィールドが構造体定義で現れる順番で各フィールドの値を比較することで 2 つのインスタンスを比較します。enum に導出すると、enum 定義で先に定義された列挙子が、後に列挙された列挙子よりも小さいと考えられます。

PartialOrd トレイトが必要になる例には、低い値と高い値で指定される範囲の乱数を生成する rand クレートの gen_range メソッドが挙げられます。

Ord トレイトにより、注釈した型のあらゆる 2 つの値に対して、合法的な順序付けが行えることがわかります。Ord トレイトは cmp メソッドを実装し、これは、常に合法的な順序付けが可能なので、Option<Ordering> ではなく、Ordering を返します。PartialOrd と Eq (Eq は PartialEq も必要とします) も実装している型にしか、Ord トレイトを適用することはできません。構造体と enum で導出したら、PartialOrd で、partial_cmp の導出した実装と同じように cmp は振る舞います。

Ord が必要になる例は、BTreeSet<T> に値を格納する時です。これは、値のソート順に基づいてデータを格納するデータ構造です。

値を複製する Clone と Copy

Clone トレイトにより値のディープコピーを明示的に行うことができ、複製のプロセスは、任意のコードを実行し、ヒープデータをコピーすることに関係がある可能性があります。Clone について詳しくは、第 4 章の「変数とデータの相互作用法: Clone」節を参照されたい。

Clone を導出すると、clone メソッドを実装し、これは型全体に対して実装されると、型の各部品に対して clone を呼び出します。要するに、Clone を導出するには、型のフィールドと値全部も Clone を実装していなければならないということです。

Clone が必要になる例は、スライスに対して to_vec メソッドを呼び出すことです。スライスは、含んでいる型のインスタンスの所有権を持たないが、to_vec で返されるベクタはそのインスタンスを所有する必要があるため、to_vec は各要素に対して clone を呼び出します。故に、スライスに格納される型は、Clone を実装しなければならないのです。

Copy トレイトにより、スタックに格納されたビットをコピーするだけで値を複製できます; 任意のコードは必要ありません。Copy について詳しくは、第 4 章の「スタックのみのデータ: Copy」を参照されたい。

Copy トレイトは、プログラマがメソッドをオーバーロードし、任意のコードが実行されないという前提を侵害することを妨げるメソッドは何も定義しません。そのため、全プログラマは、値のコピーは非常に高速であることを前提にすることができます。

部品すべてが Copy を実装する任意の型に対して Copy を導出することができます。Clone も実装する型に対してのみ、Copy トレイトを適用することができます。何故なら、Copy を実装する型には、Copy と同じ作業を行う Clone の瑣末 (さまつ) な実装があるからです。

Copy トレイトは稀にしか必要になりません; Copy を実装する型では最適化が利用可能になります。

つまり、clone を呼び出す必要がなくなり、コードがより簡潔になるということです。

Copy で可能なこと全てが Clone でも達成可能ですが、コードがより遅い可能性や、clone を使用しなければならない箇所があったりします。

値を固定サイズの値にマップする Hash

Hash トレイトにより、任意のサイズの型のインスタンスを取り、そのインスタンスをハッシュ関数で固定サイズの値にマップできます。Hash を導出すると、hash メソッドを実装します。hash の導出された実装は、型の各部品に対して呼び出した hash の結果を組み合わせます。つまり、Hash を導出するには、全フィールドと値も Hash を実装しなければならないということです。

Hash が必要になる例は、HashMap<K, V> にキーを格納し、データを効率的に格納することです。

既定値のための Default

Default トレイトにより、型に対して既定値を生成できます。Default を導出すると、default 関数を実装します。default 関数の導出された実装は、型の各部品に対して default 関数を呼び出します。つまり、Default を導出するには、型の全フィールドと値も Default を実装しなければならないということです。

Default::default 関数は、第 5 章の「構造体更新記法で他のインスタンスからインスタンスを生成する」節で議論した構造体更新記法と組み合わせてよく使用されます。構造体のいくつかのフィールドをカスタマイズし、それから ..Default::default() を使用して、残りのフィールドに対して既定値を設定し使用することができます。

例えば、Default トレイトは、Option<T> インスタンスに対してメソッド unwrap_or_default を使用する時に必要になります。Option<T> が None ならば、メソッド unwrap_or_default は、Option<T> に格納された型 T に対して Default::default の結果を返します。

付録 D - 便利な開発ツール

この付録では、Rust プロジェクトの提供する便利な開発ツールについていくつかお話しします。自動フォーマット、警告に対する修正をすばやく適用する方法、lint ツール、そして IDE との統合について見ていきます。

rustfmt を使った自動フォーマット

rustfmt というツールは、コミュニティのコードスタイルに合わせてあなたのコードをフォーマットしてくれます。Rust を書くときにどのスタイルを使うかで揉めないように、多くの共同で行われるプロジェクトが rustfmt を使っています：全員がこのツールでコードをフォーマットするのです。

rustfmt をインストールするには、以下を入力してください：

```
$ rustup component add rustfmt
```

これで rustfmt と cargo-fmt が使えるようになります。これは rustc と cargo の両方のコマンドがあるのと似たようなものです。どんな Cargo のプロジェクトも、次を入力するとフォーマットできます：

```
$ cargo fmt
```

このコマンドを実行すると、現在のクレートのあらゆる Rust コードをフォーマットし直します。これを行うと、コードのスタイルのみが変わり、コードの意味は変わりません。rustfmt についてより詳しく知るにはドキュメントを読んでください。

rustfix でコードを修正する

rustfix というツールは Rust をインストールすると同梱されており、コンパイラの警告 (warning) を自動で直してくれます。Rust でコードを書いたことがある人なら、コンパイラの警告を見たことがあるでしょう。たとえば、下のコードを考えます：

Filename: src/main.rs

```
fn do_something() {}

fn main() {
    for i in 0..100 {
        do_something();
    }
}
```

ここで、do_something 関数を 100 回呼んでいます。for ループの内部で変数 i を一度も使っていません。Rust はこれについて警告します：

```
$ cargo build
Compiling myprogram v0.1.0 (file:///projects/myprogram)
warning: unused variable: `i`
--> src/main.rs:4:9
|
4 |     for i in 1..100 {
|         ^ help: consider using `_i` instead
|
= note: #[warn(unused_variables)] on by default

Finished dev [unoptimized + debuginfo] target(s) in 0.50s
```

警告は、変数名に `_i` を使ってはどうかと提案しています：アンダーバーはその変数を使わないという意図を示すのです。cargo fix というコマンドを実行することで、この提案を rustfix ツールで

自動で適用できます。

```
$ cargo fix
  Checking myprogram v0.1.0 (file:///projects/myprogram)
    Fixing src/main.rs (1 fix)
  Finished dev [unoptimized + debuginfo] target(s) in 0.59s
```

src/main.rs をもう一度見てみると、`cargo fix` によってコードが変更されていることがわかります。

Filename: src/main.rs

```
fn do_something() {}

fn main() {
    for _i in 0..100 {
        do_something();
    }
}
```

`for` ループの変数は `_i` という名前になったので、警告はもう現れません。

`cargo fix` コマンドを使うと、異なる Rust edition の間でコードを変換することもできます。edition については付録 E に書いています。

Clippy でもっと lint を

Clippy というツールは、コードを分析することで、よくある間違いを見つけ、Rust のコードを改善してくれる lint を集めたものです（訳注：いわゆる静的解析ツール）。

Clippy をインストールするには、次を入力してください：

```
$ rustup component add clippy
```

Clippy の lint は、次のコマンドでどんな Cargo プロジェクトに対しても実行できます：

```
$ cargo clippy
```

たとえば、下のように、円周率などの数学定数の近似を使ったプログラムを書いているとします。

ファイル名: src/main.rs

```
fn main() {
    let x = 3.1415;
    let r = 8.0;
    println!("the area of the circle is {}", x * r * r);
}
```

cargo clippy をこのプロジェクトに実行すると次のエラーを得ます：

```
error: approximate value of `f{32, 64}::consts::PI` found. Consider using it
directly
--> src/main.rs:2:13
|
2 |         let x = 3.1415;
|           ^^^^^^^
|
= note: #[deny(clippy::approx_constant)] on by default
= help: for further information visit https://rust-lang-nursery.github.io/rust-clippy/master/index.html#approx_constant
```

あなたは、このエラーのおかげで、**Rust** にはより正確に定義された定数がすでにあり、これを代わりに使うとプログラムがより正しくなるかもしれないと気づくことができます。なので、あなたはコードを定数 `PI` を使うように変更するでしょう。以下のコードはもう **Clippy** からエラーや警告は受けません。

ファイル名: `src/main.rs`

```
fn main() {
    let x = std::f64::consts::PI;
    let r = 8.0;
    println!("the area of the circle is {}", x * r * r);
}
```

Clippy についてより詳しく知るには、ドキュメントを読んでもください。

Rust Language Server を使って IDE と統合する

IDE での開発の助けになるよう、Rust プロジェクトは **Rust Language Server (rls)** を配布しています。このツールは、Language Server Protocol という、IDE とプログラミング言語が対話するための仕様に対応しています。Visual Studio Code の Rust プラグインをはじめ、様々なクライアントが `rls` を使うことができます。

`rls` をインストールするには、以下を入力してください：

```
$ rustup component add rls
```

つづけて、あなたの IDE 向けの language server サポートをインストールしてください。すると、自動補完、定義へのジャンプ、インラインのエラー表示などの機能が得られるはずです。

`rls` についてより詳しく知るにはドキュメントを読んでもください。

付録 E：エディション

第 1 章で、`cargo new` がエディションに関するちょっとしたメタデータを **Cargo.toml** に追加しているのを見ましたね。この付録ではその意味についてお話しします！

Rust 言語とコンパイラは 6 週間のリリースサイクルを採用しています。つまり、ユーザにはコンスタントに新しい機能が流れてくるといわけです。他のプログラミング言語は、より少ない回数で、より大きなリリースを行います。Rust は小さなアップデートを頻繁に行います。しばらくすると、これらの小さな変更が溜まっていきます。しかし、これらを振り返って、「Rust 1.10 と Rust 1.31 を比較すると、すごく変わったねえ！」などとリリースごとに言うのは難しいです。

2、3 年ごとに、Rust チームは Rust の新しいエディションを作ります。それぞれのエディションには、それまでに Rust にやってきた新しい機能が、完全に更新されたドキュメントとツール群とともに、一つのパッケージとなってまとめられています。新しいエディションは通常の 6 週間ごとのリリースの一部として配布されます。

それぞれの人々にとってエディションは異なる意味を持ちます。

- アクティブな Rust ユーザにとっては、新しいエディションは、少しずつ増えてきた変更点を理解しやすいパッケージにしてまとめるものです。
- Rust ユーザでない人にとっては、新しいエディションは、何かしら大きな達成がなされたことを示します。Rust には今一度目を向ける価値があると感じさせるかもしれません。
- Rust を開発している人にとっては、新しいエディションは、プロジェクト全体の目標地点となります。

この文書を書いている時点（訳注：原文のコミットは 2021 年 12 月 23 日）では、3 つの Rust のエディションが利用できます。Rust 2015、Rust 2018、Rust 2021 です。この本は Rust 2021 エディションの慣例に従って書かれています。

Cargo.toml における `edition` キーは、コードに対してコンパイラがどのエディションを適用すべきかを示しています。もしキーが存在しなければ、Rust は後方互換性のため 2015 をエディションの値として使います。

標準の 2015 エディション以外のエディションを使うという選択はそれぞれのプロジェクトですることができます。エディションには、コード内の識別子と衝突してしまう新しいキーワードの導入など、互換性のない変更が含まれる可能性があります。しかし、それらの変更を選択しない限り、Rust のコンパイラのバージョンを更新しても、コードは変わらずコンパイルできます。

Rust コンパイラは全バージョンにおいて、そのコンパイラのリリースまでに存在したすべてのエディションをサポートしており、またサポートされているエディションのクレートはすべてリンクできます。エディションの変更はコンパイラが最初にコードを構文解析するときのみ影響します。なので、あなたが Rust 2015 を使っていて、依存先に Rust 2018 を使うものがあっても、あなたのプロジェクトはコンパイルでき、その依存先を使うことができます。逆に、あなたのプロジェク

トが Rust 2018 を、依存先が Rust 2015 を使っていても、同じく問題はありません。

まあ実のところ、ほとんどの機能はすべてのエディションで利用可能でしょう。どの Rust エディションを使っている開発者も、新しい安定リリースが出ると改善したなど感じるのは変わらないでしょう。しかし、場合によって（多くは新しいキーワードが追加されたとき）は、新機能が新しいエディションでしか利用できないことがあるかもしれません。そのような機能を利用したいなら、エディションを切り替える必要があるでしょう。

より詳しく知りたいなら、**エディションガイド**という、エディションに関するすべてを説明している本があります。エディション同士の違いや、`cargo fix` を使って自動的にコードを新しいエディションにアップグレードする方法が書かれています。

訳注：日本語版のエディションガイドはこちらにあります。

付録 F: 本の翻訳

英語以外の言語の資料についてです。ほとんどはまだ翻訳中です。手助けいただける際や、新しい翻訳について教えていただける際は、Translations ラベルを確認してください！

- Português (BR)
- Português (PT)
- 简体中文
- Українська
- Español, alternate
- Italiano
- Русский
- 한국어
- 日本語
- Français
- Polski
- עברית
- Cebuano
- Tagalog
- Esperanto
- ελληνική
- Svenska
- Farsi
- Deutsch

付録 G: Rust の作られ方と “Nightly Rust”

この付録は、Rust のでき方と、それが Rust 開発者としてあなたにどう影響するかについてです。この本の出力は安定版 Rust 1.21.0 で生成されていますが、コンパイルできるいかなる例も、それより新しい Rust のどんな安定版でもコンパイルでき続けられるはずということに触れました。この節は、これが本当のことであると保証する方法を説明します！

停滞なしの安定性

言語として、Rust はコードの安定性について大いに注意しています。Rust には、その上に建築できる岩のように硬い基礎であってほしく、物事が定期的に変わっていたら、それは実現できません。同時に新しい機能で実験できなければ、もはや何も変更できないリリースの時まで、重大な瑕疵 (かし) を発見できなくなるかもしれません。

この問題に対する我々の解決策は「停滞なしの安定性」と呼ばれるもので、ガイドの原則は以下の通りです: 安定版 Rust の新しいバージョンにアップグレードするのを恐れる必要は何もないはずです。各アップグレードは痛みのないもののはずですが、新しい機能、より少ないバグ、高速なコンパイル時間も齎すべきです。

シュボシュボ！ リリースチャンネルと列車に乗ること

Rust 開発は、電車のダイヤに合わせて処理されます。つまり、全開発は Rust リポジトリの master ブランチで行われます。リリースはソフトウェアのリリーストレインモデル (software release train model) に従い、これは Cisco IOS や他のソフトウェアプロジェクトで活用されています。Rust にはリリースチャンネルが 3 つあります:

注釈: software release train model とは、あるバージョンのソフトウェアリリースの順番を列車に見立て、列車のダイヤのように、決まった間隔でリリースに持って行く手法のこの模様。一つの列車は、Rust の場合、ナイトリー、ベータ、安定版の順に「駅」に停車していくものと思われる。

- ナイトリー
- ベータ
- 安定版

多くの Rust 開発者は主に安定版チャンネルを使用しますが、新しい実験的な機能を試したい方は、ナイトリーやベータを使用するかもしれません。

こちらが、開発とリリースプロセスの動き方の例です: Rust チームが Rust1.5 のリリースに取り掛かっていると想定しましょう。そのリリースは、2015 年の 11 月に発生しましたが、現実的なバー

ジョンナンバーを与えてくれるでしょう。新しい機能が Rust に追加されます: 新しいコミットが master ブランチに着地します。毎晩、新しいナイトリ版の Rust が生成されます。毎日がリリース日で、これらのリリースは、リリースインフラにより自動で作成されます。故に、時間が経てばリリースは、毎晩 1 回、以下のような見た目になります:

```
nightly: * - - * - - *
```

6 週間ごとに、新しいリリースを準備するタイミングになります! Rust リポジトリの beta ブランチが、ナイトリで使用する master ブランチから枝分かれします。さて、リリースが二つになりました:

```
nightly: * - - * - - *
          |
beta:    *
```

ほとんどの Rust ユーザはベータリリースを積極的には使用しませんが、自身の CI システム内でベータに対してテストを行い、Rust が不具合の可能性を発見するのを手伝います。その間も、やはりナイトリリリースは毎晩あります:

注釈: CI は Continuous Integration(継続統合といったところか)のことと思われる。開発者のコードを 1 日に何度も、メインのブランチに統合することらしい。

```
nightly: * - - * - - * - - * - - *
          |
beta:    *
```

不具合が見つかったとしましょう。よいことに、不具合が安定版のリリースにこっそり持ち込まれる前にベータリリースをテストする時間がありました! 修正が master に適用されるので、ナイトリは修正され、それから修正が beta ブランチにバックポートされ、ベータの新しいリリースが生成されます:

```
nightly: * - - * - - * - - * - - *
          |
beta:    * - - - - - - - - *
```

最初のベータが作成されてから 6 週間後、安定版のリリースの時間です! stable ブランチが beta ブランチから生成されます:

```
nightly: * - - * - - * - - * - - * - * - *
          |
beta:    * - - - - - - - - *
          |
stable:  *
```

やりました！ Rust1.5 が完了しました！ ですが、1 つ忘れていることがあります： 6 週間が経過したので、次のバージョンの Rust(1.6) の新しいベータも必要です。従って、stable が beta から枝分かれした後に、次のバージョンの beta が nightly から再度枝分かれします：

```
nightly: * - - * - - * - - * - - * - - * - * - *
          |
beta:      * - - - - - - - *
          |
stable:      *
```

これが「トレイン・モデル」と呼ばれます。6 週間ごとにリリースが「駅を出発する」からですが、安定版リリースとして到着する前にベータチャンネルの旅をそれでもしなければなりません。

Rust は 6 週間ごとに時計仕掛けのようにリリースされます。ある Rust リリースの日付を知っていれば、次のリリースの日付もわかります： 6 週間後です。6 週間ごとにリリースを組むことのいい側面は、次の列車がすぐにやってくることです。ある機能が偶然、特定のリリースを逃しても、心配する必要はありません：別のリリースがすぐに起きます！ これにより、リリースの締め切りが近い洗練されていない可能性のある機能をこっそり持ち込むプレッシャーが減る助けになるのです。

このプロセスのおかげで、Rust の次のビルドを常に確認し、アップグレードするのが容易であると自身に対して確かめることができます：ベータリリースが予想した通りに動かなければ、チームに報告して、次の安定版のリリースが起きる前に直してもらうことができるのです！ ベータリリースでの破損はどちらかといえば稀ですが、rustc もソフトウェアの一種であり、バグは確実に存在します。

安定しない機能

このリリースモデルにはもう一つ掴み所があります：安定しない機能です。Rust は「機能フラグ」と呼ばれるテクニックを使用して、あるリリースで有効にする機能を決定します。新しい機能が活発に開発中なら、master に着地し、故にナイトリーでは**機能フラグ**の背後に存在します。ユーザとして、絶賛作業中の機能を試したいとお望みならば、可能ですが、ナイトリリリースの Rust を使用し、ソースコードに適切なフラグを注釈して同意しなければなりません。

ベータか安定リリースの Rust を使用しているなら、機能フラグは使用できません。これが、永遠に安定であると宣言する前に、新しい機能を実用に供することができる鍵になっています。最先端を選択するのをお望みの方はそうすることができ、岩のように硬い経験をお望みの方は、安定版に執着し自分のコードが壊れることはないとわかります。停滞なしの安定性です。

この本は安定な機能についての情報のみ含んでいます。現在進行形の機能は、変化中であり、確実にこの本が執筆された時と安定版ビルドで有効化された時で異なるからです。ナイトリ限定の機能についてのドキュメンテーションは、オンラインで発見できます。

Rustup と Rust ナイトリの役目

`rustup` は、グローバルかプロジェクトごとに Rust のリリースチャンネルを変更しやすくしてくれます。標準では、安定版の Rust がインストールされます。例えば、ナイトリをインストールするには:

```
$ rustup install nightly
```

`rustup` でインストールした全ツールチェーン (Rust のリリースと関連するコンポーネント) も確認できます。こちらは、著者の一人の Windows コンピュータの例です:

```
> rustup toolchain list
stable-x86_64-pc-windows-msvc (default)
beta-x86_64-pc-windows-msvc
nightly-x86_64-pc-windows-msvc
```

おわかりのように、安定版のツールチェーンが標準です。ほとんどの Rust ユーザは、ほとんどの場合、安定版を使用します。あなたもほとんどの場合安定版を使用したい可能性がありますが、最前線の機能が気になるので、特定のプロジェクトではナイトリを使用したいかもしれません。そうするためには、そのプロジェクトのディレクトリで `rustup override` を使用して、そのディレクトリにいる時に、`rustup` が使用するべきツールチェーンとしてナイトリ版のものをセットします。

```
$ cd ~/projects/needs-nightly
$ rustup override set nightly
```

これで `~/projects/needs-nightly` 内で `rustc` や `cargo` を呼び出す度に、`rustup` は既定の安定版の Rust ではなく、ナイトリ Rust を使用していることを確かめます。Rust プロジェクトが大量にある時には、重宝します。

RFC プロセスとチーム

では、これらの新しい機能をどう習うのでしょうか？ Rust の開発モデルは、**Request For Comments (RFC; コメントの要求) プロセス**に従っています。Rust に改善を行いたければ、RFC と呼ばれる提案を書き上げます。

誰もが RFC を書いて Rust を改善でき、提案は Rust チームにより査読され議論され、このチームは多くの話題のサブチームから構成されています。Rust の Web サイトにはチームの完全なリストがあり、プロジェクトの各分野のチームも含みます: 言語設計、コンパイラ実装、インフラ、ドキュメンテーションなどです。適切なチームが提案とコメントを読み、自身のコメントを書き、最終的にその機能を受け入れるか拒否するかの同意があります。

機能が受け入れられれば、Rust リポジトリで `issue` が開かれ、誰かがそれを実装します。うまく実装できる人は、そもそもその機能を提案した人ではないかもしれません! 実装の準備ができれば、「安定しない機能」節で議論したように、機能ゲートの背後の master に着地します。

時間経過後、一旦ナイトリリリースを使用する Rust 開発者が新しい機能を試すことができたなら、チームのメンバーがその機能と、ナイトリでどう機能しているかについて議論し、安定版の Rust に導入すべきかどうか決定します。決定が進行させることだったら、機能ゲートは取り除かれ、その機能はもう安定と考えられます！ Rust の新しい安定版リリースまで、列車に乗っているのです。