

情報システム実験 I

コンパイラ

伊澤侑祐

目次

1	実験目的	3
2	テキスト	3
3	コンパイラ	3
4	While 言語と While 言語コンパイラ	4
4.1	While 言語の仕様	4
4.2	While 言語コンパイラの構造	6
5	仮想スタック機械の仕様	6
5.1	具体例	7
6	WebAssembly の概要	8
6.1	WebAssembly とは	8
6.2	特徴	8
6.3	Wasm の実行モデル	8
6.4	WAT (WebAssembly Text Format)	9
6.5	WebAssembly 命令リファレンス (抜粋)	9
7	準備	12
7.1	資料	12
7.2	環境構築	12
7.3	OCaml の実行方法	13
8	演習	14
8.1	予習: OCaml 入門	14
8.2	1 日目: レキサ・パーサジェネレータによる電卓アプリケーションの作成	14
8.3	2 日目～3 日目: 仮想スタック機械への簡易コンパイラの作成	15
8.4	3 日目: 2 日目の続き + WebAssembly コンパイラの作成	18

9	ocamllex/ocamlyacc 入門	19
9.1	ocamllex について	19
9.2	ocamlyacc について	20
10	参考文献	22

1 実験目的

本実験の目的は以下の通りです。

1. Pascal 風の高級言語 (While 言語) を仮想的なスタック機械の命令コードに翻訳する仕組みを学ぶ。
2. 仮想的なスタック機械の命令コードを経由して WebAssembly へ翻訳する仕組みを学ぶ。
3. While 言語コンパイラが生成したコードが実際に動作することを確認する。
4. Visual Studio Code に慣れる。

2 テキスト

以下の本 (Pascal 以外) をテキストとして、それぞれを 1 人 1 冊貸し出します。必要なら各自の責任の元に、貸し出し帳に記入の上持ち帰っても構いません。テキストの参照箇所を示す時、テキスト名を **コンパイラ I** のように略して表記しています。OCaml については、五十嵐淳教授 (京都大学) の「OCaml 爆速入門」を「手を動かしながら」読んでください。最初の授業でも解説します。

OCaml 爆速入門 「OCaml 爆速入門」、五十嵐淳、2019 年

コンパイラ I 「コンパイラ I 言語・技法・ツール」、A.V. エイホ他著、サイエンス社、1990 年

コンパイラ II 「コンパイラ II 言語・技法・ツール」、A.V. エイホ他著、サイエンス社、1990 年

Pascal 「Pascal」、K. イェンゼン他著、培風館、1993 年

3 コンパイラ

コンパイラとは、ある言語で書かれたソースコードを読み込んで、コンピュータが実行できる機械語に翻訳するプログラムです。多くの場合、高級言語と呼ばれる C 言語や Pascal など人間が理解しやすい言語で記述されたソースコードを CPU (中央演算処理装置) が実行できる命令コードに変換するプログラムを指します。

具体的には、コンパイラはユーザによって書かれたプログラムから動作させたい機械 (CPU などの計算装置) が実行できるプログラムへ変換します。コンパイラの入力言語は**ソース言語**、ソース言語で書かれたプログラムを**ソースプログラム**と呼びます。一方、動作させたい機械のことを**ターゲット機械**、最終的に変換されるプログラムを**ターゲットプログラム**などと呼びます。

図 1 は、一般的なコンパイラのコンパイルフローを表しています。コンパイラはソースプログラムを一気にターゲットプログラムへ変換するのではなく、何段階かのコード変換フェーズを経ることによって変換しています。

次に、コンパイラのコンパイルフローの概要を説明します。コンパイラは、まず、ユーザが記述した While 言語プログラム (ソースプログラム) を入力として受けとります。次に、**字句解析器**がソースプログラムを**字句** (トークン、token) へ分割し、字句の種類を識別する**字句解析** (Lexical Analysis) を行います。次に、**構文解析器**が字句の列を整理し文構造を把握する**構文解析** (Syntax Analysis) を行い**構文木** (シンタックス・ツリー、syntax tree) へ変換します。次に、変換された構文木に意味的な誤りがないかチェックする**意味解析** (Semantic Analysis) を行います (本実験では意味解析の実装は時間の都合上スキップします)。意

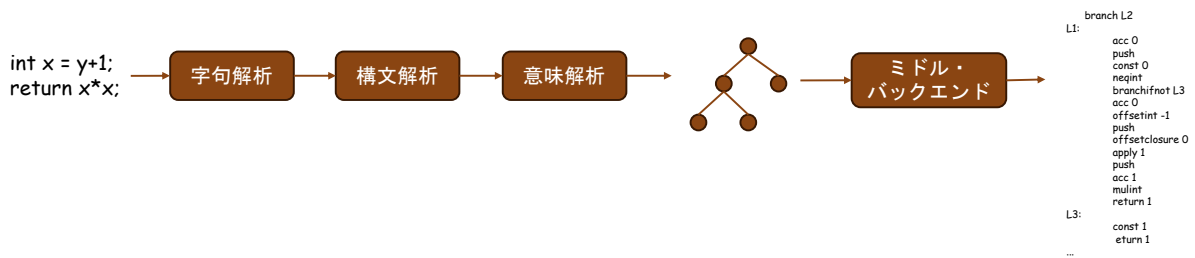


図 1: 一般的なコンパイラのコンパイルフロー図

意味解析が完了し誤りがないことが分かったら、構文木を**中間表現 (Intermediate Representation)** へ変換します。中間表現を対象に、プログラムを高速に動かすため、未使用定義の削除や関数呼出の展開といった**最適化 (Optimization)** を行います。最適化が終わったら、最後にターゲットプログラムを生成 (**コード生成、Code Generation**) します。各フェーズの詳しい説明は**コンパイラ**第 2 章あるいは第 3 章以降の該当ページを参照してください。

4 While 言語と While 言語コンパイラ

4.1 While 言語の仕様

本実験では、図 2 の仕様を持つ While 言語のコンパイラを実装します。仕様の中にある変数の意味は、図 2 右側の定義一覧を参照してください。この書き換え規則により、例えば代入文 “ $i := i + 1$ ” が生成できます (図 3a)。また、図 3b に 9 の階乗を計算するプログラムの例を示します。

文	S	$::=$	$x := a$ skip $S_1; S_2$ $\text{if } P \text{ then } S_1 \text{ else } S_2$ $\text{while } P \text{ begin } S \text{ end}$	
算術式	a	$::=$	x n (a) $a_1 \text{ op}_a a_2$	
算術演算	op_a	$::=$	$+$ $-$ $*$ $/$	
真偽値	P	$::=$	true false $\text{not } P$ $P_1 \text{ op}_b P_2$ $a_1 \text{ op}_r a_2$	
真偽演算	op_b	$::=$	and or	S 文 (statements)
比較演算	op_r	$::=$	$<$ $>$ \leq \geq $==$	a 算術式 (arithmetic expressions, arith) x,y 変数 (program variables) n 数値 (number literals) P 真偽値 (boolean variables)

図 2: ソース言語の仕様

$S \rightarrow x := a$
 $\rightarrow i := a$
 $\rightarrow i := a + a$
 $\rightarrow i := x + a$
 $\rightarrow i := i + a$
 $\rightarrow i := i + n$
 $\rightarrow i := i + 1$

(a) 文の生成例

```

1      a := 1;
2      i := 2;
3      while i < 10 do
4      begin
5          a := a * 1;
6          i := i + 1;
7      end

```

(b) プログラム例

4.2 While 言語コンパイラの構造

本実験で実装する While 言語 (詳しい解説は第 4 節を参照) コンパイラのコンパイルフロー (コンパイルの段階を段階ごとに示したもの) です。

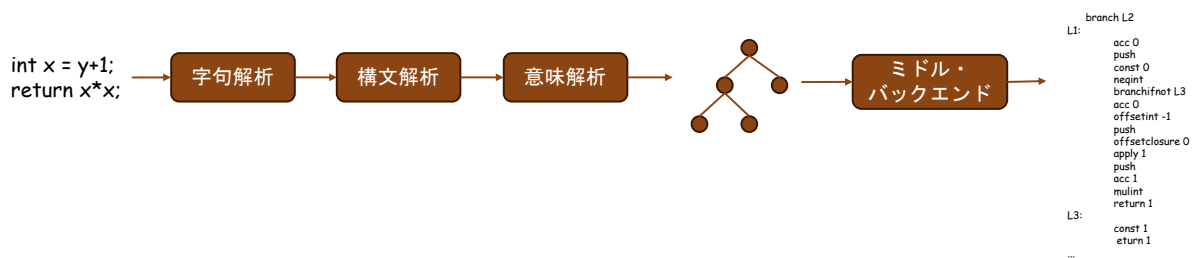


図 4: 本実験で実装するコンパイラのコンパイルフロー図

5 仮想スタック機械の仕様

本実験では中間表現としては仮想的なスタック機械 (仮想機械) の仮想命令を利用します。仮想機械とは、Intel CPU や Ryzen CPU といった具体的な機械ではなく、それらを抽象化した機械のことです。VirtualBox のような仮想環境ではなく、Java や Python などの処理系を思い浮かべてください。それらがいわゆる仮想機械を用いて実現されています。仮想的なスタック機械の詳細は**コンパイラ I** の 2 章 2.8 節を参照して下さい。表 1 にスタック機械の命令セットを示します。なお、Python バイトコードへの変換のため、教科書にある命令セットを一部変更しています。

表 1: スタック機械の命令セット

<code>push v</code>	<code>v</code> をスタックに積む。
<code>pop</code>	スタックの最上段の要素を取り去る。
<code>+</code>	最上段とその下にある要素を取り出して加算し、結果をスタックに積む。
<code>-</code>	最上段とその下にある要素を取り出して下の値から上の値を引き、結果をスタックに積む。
<code>*</code>	最上段とその下にある要素を取り出して掛け算し、結果をスタックに積む。
<code>></code>	最上段とその下にある要素を取り出し、下の値が上の値より大きい場合は <code>1(true)</code> 、そうでない場合は <code>0(false)</code> をスタックに積む。
<code><</code>	最上段とその下にある要素を取り出し、下の値が上の値より小さい場合は <code>1(true)</code> 、そうでない場合は <code>0(false)</code> をスタックに積む。
<code>==</code>	最上段とその下にある要素を取り出し、下の値が上の値と等しい場合は <code>1(true)</code> 、そうでない場合は <code>0(false)</code> をスタックに積む。
<code>rvalue l</code>	データの格納場所 <code>l</code> の内容をスタックに積む。
<code>lpush l</code>	最上段の要素を取り出しデータの格納場所 <code>l</code> に代入する。
<code>copy</code>	最上段の値を複写してスタックに積む。
<code>label l</code>	飛先 <code>l</code> を示す。それ以外の効果はない。
<code>goto l</code>	次はラベル <code>l</code> をもつ命令から実行を続ける。
<code>gofalse l</code>	スタックの最上段から値を取り去り、その値が <code>0</code> なら飛越しをする。
<code>gotrue l</code>	スタックの最上段から値を取り去り、その値が <code>1</code> なら飛越しをする。

5.1 具体例

目的のコンパイラはソース言語で書かれたプログラムをスタック機械の命令コードに変換します。代入文、begin-end 文、while 文の具体例と図 3b のプログラムの翻訳結果を以下に示します。

1. 代入文

入力 `a := a * 2;`
出力

```
1 rvalue a
2 push 2
3 *
4 lpush a
```

2. begin-end 文

入力 `begin a := a * i; i := i + 1; end;`

出力

```
1 rvalue a
2 rvalue i
3 *
4 lpush a
5 rvalue i
6 push 1
7 lpush i
```

3. while 文

入力 while i < 10 do i := i + 1;

出力

```
1 label L.0
2 rvalue i
3 push 10
4 <
5 gofalse L.1
6 rvalue i
7 push 1
8 +
9 lpush i
10 goto L.0
11 label L.1
```

6 WebAssembly の概要

6.1 WebAssembly とは

WebAssembly (Wasm) は、Web ブラウザ上で高性能に実行できるバイナリ形式の命令セットアーキテクチャです。Wasm は従来の JavaScript に比べて実行速度が速く、C/C++ や Rust といった言語からコンパイルして利用できます。現在ではブラウザのみならず、サーバサイドや組み込み環境でも利用が広がっています。

6.2 特徴

- **バイナリ形式:** 人間が読むよりも機械で効率的に処理できる形式。
- **スタックマシンベース:** 命令はオペランドスタックを操作する形で記述される。
- **安全性:** メモリ境界のチェックが標準で行われ、セキュリティが保証される。
- **移植性:** プラットフォーム非依存であり、同じバイナリが異なる環境でも動作可能。

6.3 Wasm の実行モデル

Wasm は**仮想スタックマシン**として動作します。すべての命令はスタックから値を取り出し、演算を行い、結果を再びスタックに積みみます。

命令	動作例
<code>i32.const 5</code>	スタックに整数 5 を積む
<code>i32.const 7</code>	スタックに整数 7 を積む
<code>i32.add</code>	スタック上の 2 つを加算し、結果 12 を積む

6.4 WAT (WebAssembly Text Format)

Wasm のバイナリ形式は人間が直接読むのは困難です。そこで、対応するテキスト形式として **WAT (WebAssembly Text format)** が用意されています。

Listing 1: 簡単な WAT プログラム

```

1 (module
2   (func $add (param $x i32) (param $y i32) (result i32)
3     local.get $x
4     local.get $y
5     i32.add)
6   (export "add" (func $add)))

```

上記は「2つの整数を受け取り、その和を返す」関数 `add` を定義し、外部から利用できるようにエクスポートしている例です。

6.5 WebAssembly 命令リファレンス (抜粋)

この資料は、授業でコンパイラを作成する際に最低限必要となる WebAssembly (Wasm) の命令をまとめたものである。Wasm には多くの命令が存在するが、ここでは整数演算と制御構造に関するものを中心に示す。

6.5.1 基本的な命令

- `i32.const <n>` 32ビット整数 `n` をスタックに積む。
- `local.get <idx>` ローカル変数 `idx` をスタックに積む。
- `local.set <idx>` スタックの先頭の値をローカル変数 `idx` に格納する。
- `local.tee <idx>` 値をローカル変数に格納しつつ、そのままスタックに残す。

6.5.2 算術演算命令

- `i32.add` 2つの整数を加算する。
- `i32.sub` 2つの整数を減算する。
- `i32.mul` 2つの整数を乗算する。
- `i32.div_s` 符号付き整数の除算を行う。

6.5.3 比較命令

- `i32.eq` 等しいなら 1、そうでなければ 0 を返す。
- `i32.ne` 等しくないなら 1、そうでなければ 0 を返す。
- `i32.lt_s` 左が右より小さいなら 1。

- `i32.gt_s` 左が右より大きいなら 1。
- `i32.le_s / i32.ge_s` 以下 / 以上。

6.5.4 制御構造

- `block { ... }` 命令列をブロックとしてまとめる。
- `loop { ... }` 繰り返し構造を作る。
- `br <n>` 外側から数えて `n` 番目のブロックにジャンプする。
- `br_if <n>` スタックの先頭が非 0 なら `br <n>` と同じ動作。
- `if { ... } else { ... }` 条件分岐。

6.5.5 サンプル: 加算関数

Listing 2: 2つの整数を加算する関数

```

1 (module
2   (func $add (param $x i32) (param $y i32) (result i32)
3     local.get $x    ;; スタックにを積む  $x$ 
4     local.get $y    ;; スタックにを積む  $y$ 
5     i32.add)        ;; 加算して返す
6   (export "add" (func $add)))

```

6.5.6 サンプル: if 文

Listing 3: x と y を比較し、大きい方を返す関数

```

1 (module
2   (func $max (param $x i32) (param $y i32) (result i32)
3     local.get $x
4     local.get $y
5     i32.gt_s
6     if (result i32)
7       local.get $x
8     else
9       local.get $y
10    end)
11   (export "max" (func $max)))

```

6.5.7 サンプル: while ループ

Listing 4: 0 から n までを加算するループ

```

1 (module
2   (func $sum (param $n i32) (result i32)
3     (local $i i32)    ;; カウンタ  $i$ 
4     (local $acc i32)  ;; 累積和

```

```
5      i32.const 0
6      local.set $i
7      i32.const 0
8      local.set $acc
9      loop $loop
10         local.get $i
11         local.get $n
12         i32.gt_s
13         br_if 1          ;; i > n ならループ終了
14         local.get $acc
15         local.get $i
16         i32.add
17         local.set $acc
18         local.get $i
19         i32.const 1
20         i32.add
21         local.set $i
22         br $loop
23     end
24     local.get $acc)
25 (export "sum" (func $sum)))
```

7 準備

7.1 資料

本演習では、[GitHub Organization](#) を通じて資料を提供します。[GitHub リポジトリ](#) からファイルをダウンロードできるか確認してください。

7.2 環境構築

7.2.1 仮想開発環境のインストール

本演習では、自前の Windows PC では Windows Subsystem Linux 2 (WSL 2) の使用を前提とします。WSL 2 は Windows OS で Linux を動作させることのできる便利なツールです。今後の演習や研究で使用する機会も増えるので、今のうちから慣れましょう。

インストールは非常に単純です。PowerShell を **管理者 (Administrator)** モードで開き、以下のコマンドを打ち込むだけです。

```
1 wsl --install
```

このコマンドで Ubuntu がインストールされます。次回以降、トレイやターミナルから Ubuntu を選択し実行してください。

7.2.2 OCaml のインストール

プログラミング言語に OCaml を用いるため、OCaml のインストールが必要です。各プラットフォームごとにインストール方法を説明します。

■macOS macOS ではターミナルを使用します。

1. [Homebrew](#) をインストールする
 - 出来なかったら[初心者向けガイド](#)も確認する
2. `brew install ocaml` を実行する
3. ターミナル で `ocaml` と打ち REPL が立ち上がるか確認

■Windows WSL 2 では `apt` を使用します。

```
1 sudo apt install -y ocaml
```

7.2.3 Visual Studio Code のインストール

Visual Studio Code (VS code) とは、2024 年現在最も人気のエディタです。様々な開発支援ツールをプラグインとしてインストールできるため、生産性が高いです。VS code 以外のエディタも使用して OK ですが、本演習は VS code をお勧めします。

[ダウンロードページ](#) から適切なインストーラをダウンロードし展開してください。

7.3 OCaml の実行方法

OCaml には様々な処理系が存在します。まず 1 番簡単な方法がインタプリタ実行する方法です。プログラムを `ocaml` コマンドで実行します。

■WSL, macOS の場合 コマンドをターミナルに入力することで OCaml プログラムを実行できます。

```
1 $ ocaml <your program name>.ml # <your program name> は任意の文字列に変更
```

また、OCaml にはバイトコードコンパイラとネイティブコードコンパイラも用意されています。これらを使う場合は以下のコマンドを用います。

```
1 # バイトコードコンパイラを用いる場合
2 $ ocamlc -o <outputname> <your program name>.ml
3
4 # ネイティブコードコンパイラを用いる場合
5 $ ocamlopt -o <outputname> <your program name>.ml
```

その後、`<outputname>` という名前で実行バイナリが生成されますので、`./<outputname>` というコマンドで実行してください。

■演習室の場合 コマンドプロンプトを起動し、授業で配布されたディレクトリに移動します。そして、`setup.bat` を実行してください。実行は 1 度だけで OK です。win64ocaml というリポジトリをダウンロードします。

```
1 > .\bin\setup.bat
```

実行が終了したら、次のコマンドを実行してください。

```
1 > .\bin\run.bat .\win64ocaml\bin\ocaml.exe <your program name>.ml
```

バイトコードコンパイラとネイティブコードコンパイラは次のコマンドで実行してください。

```
1 > .\bin\run.bat .\win64ocaml\bin\ocamlc.byte.exe <your program name>.ml
2
3 > .\bin\run.bat .\win64ocaml\bin\ocamlopt.byte.exe <your program name>.ml
```

8 演習

8.1 予習: OCaml 入門

演習に臨む前に、OCaml に入門しましょう。まず、授業配布スライド「OCaml Crash Course」を読み、内容を一通りターミナルに打ち込んで感覚を掴んでください。余裕があれば、「[OCaml 爆速入門](#)」を読みながら OCaml プログラムの書き方を学びましょう。プログラムは、`ocaml` コマンドで REPL を起動した後その中に打ち込むか、`tutorial.ml` というファイルに記述し、`ocaml` コマンドを実行して結果を確認してください。具体的には、以下の内容に取り組んでください。

1. 「OCaml 爆速入門」を読みながら OCaml について勉強する。特に、以下の章を読み練習問題を解く。
 - [OCaml 爆速入門 \(その 1\)](#)
 - [OCaml 爆速入門 \(その 2\) – データ構造の基本](#) の「ヴァリエント」、「再帰ヴァリエント」
 - [OCaml 爆速入門 \(その 3\) – 変更可能データ構造](#) の「制御構造」

8.2 1 日目: レキサ・パーサジェネレータによる電卓アプリケーションの作成

1 日目では、まず OCaml の解説を行います。「OCaml Crash Course」と「OCaml 爆速入門」を実演しながら解説します。次に、簡単にコンパイラの仕組みについて解説します。その後、今回のコンパイラ実装演習で核となるレキサ・パーサジェネレータについて学びます。OCaml コンパイラには、`ocamllex/ocamlyacc` というレキサ・パーサジェネレータが付属します。今回はこれらを利用し、簡単な電卓アプリケーションを作成します。雛形は `lexer.mll`、`parser.mly`、そして `calc.ml` に定義されています。

実装を開始する前に、まず、[GitHub リポジトリ](#)からソースコードをダウンロードしてください。次に、`ocamllex/ocamlyacc` 入門 (9 節) を通読してください。通読が終わったら、雛形を拡張して電卓アプリケーションを実装してください。雛形には足し算とかけ算が定義されていますが、引き算と割り算が定義されていません。他の実装を参考に実装してみましょう。

8.2.1 レポート

課題 1 「OCaml 爆速入門 (その 1、2、3)」の中で面白いと思ったプログラムを 3 つ選び、それぞれコード例を示しながらなぜ面白いと思ったか言葉で説明してください。

課題 2 作成した電卓アプリケーションの実装と動作例をまとめてレポートで提出してください。

8.2.2 演習室での実行方法

演習室の環境では、一般的な実行方法とはやり方が異なります。以下に簡単に整理します。コマンドプロンプト上で実行してください。

```
1 cd compiler-day1
2
3 # プロジェクトのビルド
4 .\bin\build.bat
5
```

```
6 # 中間ファイルの消去
7 .\bin\clean.bat
8
9 # バイナリの実行
10 .\bin\run.bat .\calc
```

8.3 2日目～3日目: 仮想スタック機械への簡易コンパイラの作成

2・3日目は、While 言語から仮想スタック機械へのコンパイラを製作します。まず、本日の演習で使用する雛形を GitHub からダウンロードし、ダウンロードしたディレクトリに移動します。

```
1 git clone https://github.com/tmu-compiler-info-sys-exp-I/while_lang2025.git
2
3 cd while_lang2025
```

ディレクトリに移動した後、VS Code で `while_lang2025` を開けたら準備完了です。

今回の実装の対象とする制御構造は、`begin - end` 文、`while` 文です。`if` 式の実装は時間が余った場合に組みめますので、課題には組み込んでいません。

配布するソースコードは大部分が実装されていますが、パーサーが足し算と `<` 以外の演算を認識しません。また、`begin - end` 文 と `while` 文を認識しません。

課題 1 次の算術二項演算子を実装してください。具体的には、`syntax.ml`、`parser.mly` と `lexer.mll` を改造し、上記の演算を認識できるようにしてください。

- 引き算 (Subtract, Sub)
- かけ算 (Multiply, Mul)
- 割り算 (Division, Div)

課題 2 次の比較二項演算子を実装してください。具体的には、`syntax.ml`、`parser.mly` と `lexer.mll` を改造し、上記の演算を認識できるようにしてください。

- `>` (Greater Than, GT)
- `>=` (Greater or Equal, GE)
- `<=` (Less or Equal, LE)
- `==` (Equal, EQ)

課題 3 `begin - end` 文 と `while` 文を実装してください。`begin - end` は Block 型、`while` 文は While 型という名前を用い文法上で表現します。具体的には、`syntax.ml`、`parser.mly` と `lexer.mll` を改造し、上記の文を認識できるよう改良してください。場合によっては示された補足資料を参考に実装してください。

課題 4 (時間があれば) 追加した演算や文を、対応する仮想スタック命令へ翻訳するプログラムを `virtual_stack.ml` に実装してください。場合によっては示された補足資料を参考に実装してください。

8.3.1 課題に取り組む手順

具体的には、以下の手順で取り組んでください。

課題 1・2

1. `syntax.ml` に `Sub`, `Div`, `Mul`, `EQ`などを定義
 - `Add` や `Sub` などの算術演算子は `type a = ...` に追加する形で実装
 - `EQ` や `LT` などの比較演算子は `type p = ...` に追加する形で実装
 - デバッグ用の補助関数である `string_of_arith`, `string_of_predicate` 関数のパターンマッチに、構文木から文字列の変換パターンを追加
2. `parser.mly` で引き算、割り算、等号などのトークンを定義する
3. `lexer.mly` で定義した文字列からトークンへ翻訳するルールを定義する
4. `parser.mly` で引き算、割り算、等号などのトークンから `Syntax.t` への翻訳を定義する

課題 3

1. `syntax.ml` に `Seq` 型、`Block` 型、そして `While` 型を追加する
2. `parser.mly` で `begin - end`、そして `while` を認識するためのトークンを定義
3. `lexer.mll` で文字列から定義したトークンへ翻訳するためのルールを定義
4. `parser.mly` でトークンから `syntax.ml` で定義した `Assign`, `Seq`, `While` へ翻訳するルールを定義

■ **begin - end 文の定義の仕方** `begin - end` 文は、`i := 1; j := 2` といった文の連続を表します。今回、`begin - end` は `Block` 型にコンパイルするとします。したがって、文の連続を `Seq` 型で表し、`Seq` 型を `Block` 型で包めば実現できます。`Seq` 型は文と文の連続なので文 (`statement, s`) のペア (`Seq of s * s`) で表現し、`Block` 型は、文の連続を表す `Seq` を要素に `Block of s` と定義すればよいでしょう。

そもそも、文の連続 `Seq` はどのように表現すればよいでしょうか。文の連続は、パーサジェネレータのレベルで補足することができます。具体的には、`parser.mly` に文の連続をパースできるルールを追加すれば実現できます。以下の `ocamlyacc` のテクニックを用い、連続した文を `Seq` 型へ変換します。

```
1 statement :
2 | BEGIN statements END { ... }
3
4 /* 連続する statement 文() をパースするための記号 */
5 statements :
6 | statement SEMICOLON { ... }
7 | statement SEMICOLON statements { ... }
```

このとき、`statements` ルールは次のように読みます。まず、`statements` にマッチしたとき、一文しかなかったら `statement` を評価する (評価する所は ... になっています)。一方、文の終わりを表す `SEMICOLON` の後ろに連続する `statements` が来た場合、`Seq` 型に対応させる (対応の仕方は自分で考えてみてください)。

■ **while 文の定義の仕方** `While` 型は条件式 (`predicate`) と文 (`statement`) のペアを要素に持つため、`syntax.ml` に定義する `While` 型は `While of p * s` となります。

`while` 文のパースは、`while` 文の構成要素を洗い出すことができれば簡単です。`while` 文は、次のトークン列から構成されます：

```
1 WHILE predicate DO
2   statement
```


これは、次のように読むことができます：WHILE が来たら `predicate` をパースする。その次に `D0` が来て、最後に `statement` が来る。この読み方に従ってパースし `While` 型に変換する定義を `parser.mly` の `statement` のルールに追加します。

課題 4

認識するための改良が終わったら、仮想スタック機械へのコンパイラを実装してください。大部分が実装されていますが、パーサと同様に、仮想命令生成器 (`virtual_stack.ml`) が代入文、`begin - end` 文、そして `while` 文を認識しません。これらを正しく仮想スタック機械の命令へ翻訳できるように `virtual_stack.ml` を改良してください。具体的には、以下の手順で取り組んでください。

1. `virtual_stack.ml` で引き算、割り算、等号などを適切な仮想機械命令へ翻訳する
 - `Add` や `LT` のパターンを真似して実装する
2. `virtual_stack.ml` で `Seq`, `While` を適切な仮想機械命令へ翻訳する
 - `Assign` のパターンを真似して実装する

8.3.2 レポート

自分が改良した内容をレポートにまとめて提出してください。レポートにまとめる際、実行した `While` 言語ソースコードと実行結果を含めることが望ましい。

■2日目のレポートに関する注意 2日目のレポートですが、最終的な評価は

- 1日目のレポート
- 2日目のレポート (課題 1~3、途中までで OK)
- 3日目のレポート (課題 1~4、実装課題)

に対して行うため、2日目の課題が最後まで終わらない状態で、つまり、出来たところまで含めた形で提出して OK です。できれば課題 3 まで解けていることが望ましいですが、課題 3 が途中の状態でも評価します。

2日目と3日目は地続きになっているので、3日目は2日目に引き続き同じ内容に取り組みます。2日目の課題で出来なかった・分からなかった所を明らかにして、3日目に質問してください。ちなみに、3日目に示している課題は発展課題の想定です。演習時間内に発展課題の説明を行います。取り組むかは自由となっています。

8.3.3 演習室での実行方法

演習室の環境では、一般的な実行方法とはやり方が異なります。以下に簡単に整理します。コマンドプロンプト上で実行してください。

```
1 cd while_lang2025
2
3 # プロジェクトのビルド
4 .\bin\build.bat
5
6 # 中間ファイルの消去
7 .\bin\clean.bat
8
```

```
9 # バイナリの実行
10 .\bin\run.bat .\while_lang
```

8.4 3日目: 2日目の続き + WebAssembly コンパイラの作成

ソースコードは2日目と同じものを引き続き使用します。3日目は、追加の実装課題があります。2日目の実装が8割以上完成している人は実装課題に取り組んでください。

8.4.1 実装課題

2日目までに実装した仮想スタック機械コンパイラを WebAssembly 中間表現へコンパイルします。まず、簡単なプログラムを利用して変換してみましょう。を用います。予め用意された `assign.while` という While 言語プログラムを例としたときのコンパイル手順は以下の通りです。

```
1 $ ./while_lang test/assign.while
2
3 # 演習室の場合
4 $ .\bin\run.bat .\while_lang .\test\assign.while
```

すると、`test/assign.wat` というファイルが生成されます。この中には WebAssembly 中間表現が含まれています。テキスト表現になっているので、実際に読んで確認することができます。このファイルを実行する際は、<https://www.yuiza.org/wonline> を開き、`test/assign.wat` をサイトにドラッグ・アンド・ドロップするか、ボタンから読み込ませます。実行に成功すると、何らかの答えが返ってきます。

実装課題では、`emit_wasm.ml` の実装済みのコードを参考に、未実装の演算や文の WebAssembly 命令への翻訳を行ってください。`emit_wasm.ml` は簡単な演算や文ならコンパイルできますが、相変わらず演算などが実装されていないので、それらを実装してください。実装した内容をレポートにまとめて提出してください。

8.4.2 レポート

3日目に取り組んだ課題をレポートにまとめて提出してください。まとめる際、特に実装課題の場合、実行した While 言語ソースコードと実行結果を含めることが望ましい。実行結果はスクリーンショットや Web のコピーアンドペーストで構いません。

9 ocamllex/ocamlyacc 入門

9.1 ocamllex について

ocamllex は、正規表現の集合と、それに対応するセマンティクスから字句解析器を生成します。入力ファイルが `lexer.mll` であるとき、以下のようにして字句解析器の OCaml コードファイル `lexer.ml` を生成することができます。

```
1 ocamllex lexer.mll
```

このファイルでは字句解析器の定義で、エントリーポイントあたり 1 つの関数が定義されています。それぞれの関数名はエントリーポイントの名前と同じです。それぞれの字句解析関数は字句解析バッファを引数に取り、それぞれ関連付けられたエントリーポイントの文法属性を返します。

字句解析バッファは標準ライブラリ `Lexing` モジュール内で抽象データ型 (abstract data type) として実装されています。`Lexing.from_channel`、`Lexing.from_string`、`Lexing.from_function` はそれぞれ入力チャンネル、文字列、読み込み関数を読んで、字句解析バッファを返します

使用する際は `ocamlyacc` で生成されるパーザと結合して、構文解析器で定義されている型 `token` に属する値をセマンティクスに基づいて計算します (`ocamlyacc` については後述)。

9.1.1 字句解析の定義の記述法

字句解析の定義の記述法は以下の通りです。

```
1 { header }
2 let ident = regexp ...
3 rule entrypoint =
4   parse regexp { action }
5   | ...
6   | regexp { action }
7 and entrypoint =
8   parse ...
9 and ...
10 { trailer }
```

header と trailer は省略可能です。

9.1.2 正規表現の記述法

regexp (正規表現は) 次の文法で定義します。

' char ' 文字定数。OCaml の文字定数と同じ文法です。その文字とマッチします。

- (アンダースコア) どんな文字とでもマッチします。

eof 入力終端にマッチします。警告: システムによっては対話式入力において、end-of-file のあとにさらに文字列が続く場合がありますが、ocamllex では eof の後に何かが続く正規表現を正しく扱うことは出来ません。

" string " : 文字列定数。OCaml の文字列定数と同じ文法です。文字列にマッチします。

[`character-set`] 指定された文字集合に属する 1 文字とマッチします。有効な文字集合は、文字定数 1 つの `'c'`、文字幅 `'c1' - 'c2'` (`c1` と `c2` 自身を含むその間の文字すべて)、または 2 つ以上の文字集合を結合したもののどれかです。

[`^character-set`] 指定された文字集合に属さない 1 文字とマッチします。

`regexp *` (反復) `regexp` とマッチする文字列が 0 個以上連なった文字列にマッチします。

`regexp +` (厳しい反復) `regexp` とマッチする文字列が 1 個以上連なった文字列にマッチします。

`regexp ?` (オプション) 空文字列か、`regexp` とマッチする文字列にマッチします。

`regexp1 | regexp2` (どちらか) `regexp1` にマッチする文字列か、`regexp2` にマッチする文字列のどちらかにマッチします。

`regexp1 regexp2` (結合) `regexp1` にマッチする文字列のあとに `regexp2` にマッチする文字列を結合した文字列にマッチします。

(`regexp`) `regexp` と同じです。

`ident` 前もって `let ident = regexp` で定義された `ident` に割り当てられている正規表現になります。演算子の優先順位は、`*` と `+` が最優先、次に `?`、次に結合、最後に `—` になります。

9.1.3 Action の記述法 (2 日目以降に使用します)

`action` は OCaml の任意な式です。これらの式は `lexbuf` 識別子に現在の字句解析バッファが割り当てられた環境で評価されます。`lexbuf` の主な利用法を、Lexing 標準ライブラリモジュールの字句解析バッファ処理関数と関連付けながら以下に示します。

`Lexing.lexeme lexbuf` マッチした文字列を返します。

`Lexing.lexeme_char lexbuf n` マッチした文字列の `n` 番目の文字を返します。最初の文字は `n = 0` になります。

`Lexing.lexeme_start lexbuf` マッチした文字列の先頭文字が入力文字列全体において何番目の文字であるかを返します。入力文字列の先頭は 0 です。

`Lexing.lexeme_end lexbuf` マッチした文字列の終端文字が入力文字列全体において何番目の文字であるかを返します。入力文字列の先頭は 0 です。

`entrypoint lexbuf` (`entrypoint` には、同じ字句解析器の定義内にある別のエントリーポイント名が入ります) 字句解析器の指定されたエントリーポイントを再帰的に呼びます。入れ子のコメントなどの字句解析に便利です。

9.2 ocaml yacc について

`ocaml yacc` は、文脈自由文法の記述とそれに対応するセマンティクスから構文解析器を生成します。入力ファイルが `parser.mly` であるとき、以下のようにして構文解析器の Caml コードファイル `parser.ml` とそのインターフェイスファイル `parser.mli` を生成することができます (今回はインターフェイスファイルについての説明は省略する)。

```
1 ocaml yacc parser.mly
```

生成されたモジュールには文法で、エントリーポイントあたり 1 つの関数が定義されています。それぞれ

の関数名はエントリーポイントの名前と同じです。構文解析関数は字句解析器と字句解析バッファをとり、対応するエントリーポイントの意味属性を返します。字句解析関数は普通、字句解析記述から `ocamllex` プログラムによって作られたものを用います。字句解析バッファは標準ライブラリ `Lexing` モジュール内で抽象データ型 (abstract data type) として実装されています。トークンは `ocamlyacc` が生成するインターフェイスファイル `parser.mli` 内で定義されている型 `token` の値です。

9.2.1 構文解析定義の記述法

文法定義は以下のようなフォーマットになります。

```
1 %{  
2   header  
3 %}  
4   declarations  
5 %%  
6   rules  
7 %%  
8   trailer
```

`header` と `trailer` は省略可能です。

9.2.2 declaration (宣言) の記述法

宣言は行単位で与えます。すべて `%` で始めます。

`%token symbol ... symbol` 指定されたシンボルをトークン (終端シンボル) として定義します。これらのシンボルは型 `token` に定数コンストラクタとして追加されます。

`%token < type > symbol ... symbol` 指定されたシンボルを、指定された型の属性を持つトークンとして定義します。これらのシンボルは、指定された型を引数に取るコンストラクタとして型 `token` に追加されます。`type` は OCaml の任意な型を置くことが出来ます。

`%start symbol ... symbol` 指定されたシンボルを文法のエントリーポイントとして定義します。それぞれのエントリーポイントは、同名の構文解析関数として出力モジュールに定義されます。エントリーポイントとして定義されない非終端記号は構文解析関数を持ちません。初期シンボルは以下の `%type` 指示語を用いて型を指定する必要があります。

`%left symbol ... symbol`

`%right symbol ... symbol`

`%nonassoc symbol ... symbol` 指定されたシンボルの優先度や関連性を指定します。同じ行にあるシンボルはすべて同じ優先度になります。この行は、すでに現れていた `%left`、`%right`、`%nonassoc` 行のシンボルより高い優先度を、この行より後に現れた `%left`、`%right`、`%nonassoc` 行のシンボルより低い優先度を持ちます。シンボルは `%left` では左に、`%right` では右に関連付けられます。`%nonassoc` では関連付けられません。主にシンボルはトークンですが、ダミーの非終端記号を指定することも出来ます。これは `rules` 内において `%prec` 指示語を用いることで指定できます。

9.2.3 rules (ルール) の記述法

rules の文法は次のようになります。

```
1 nonterminal :  
2     symbol ... symbol { semantic-action }  
3 | ...  
4 | symbol ... symbol { semantic-action }  
5 ;
```

rules では %prec symbol 指示語を置くことで、デフォルトの優先度と関連性を、指定されたシンボルのものに上書き出来ます。

semantic-action は任意の OCaml の式です。この式は定義される非終端記号に対応するセマンティクス属性を生成するために評価されます。semantic-action ではシンボルのセマンティクス属性に \$ (数字) でアクセス出来ます。\$1 で第一シンボル (もっとも左) の属性に、\$2 で第二シンボルに、という具合です。

10 参考文献

1. 「[OCaml 爆速入門 \(2021 年度「プログラミング言語」配布資料 \(3\)\)](#)」、五十嵐淳、2021 年
2. 「[Objective Caml 入門](#)」、五十嵐淳、2007 年
3. 「[Chapter 12: Lexer and parser generators \(ocamllex, ocaml yacc\)](#)」、OCaml 公式ドキュメント、2024 年 8 月閲覧