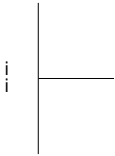


DARK FORTH

松本幸大 著

2019-09-15 版 発行



まえがき

FORTH は不思議なプログラミング言語だ。低レイヤでの手続きを記述するための至極単純な構文 (文法・表現) をもち、実行時に自らの意味論^{*1}を拡張できる。その特性ゆえに、ドメイン固有言語^{*2}(domain-specific language、DSL) を開発するための汎用言語として機能する。

FORTH は 1970 年頃から開発され、多くのプログラミング言語^{*3}に影響を与えながら、その仕様を洗練させてきた。処理系が非常にコンパクトであり、メモリ効率が良いため、現在も組み込み系やロボット制御において活用されている。

本書では、すでに何かしらの言語を用いてプログラミングを経験している人に向けて、FORTH による「スタック指向」プログラミングの基礎やメタプログラミングの初歩について解説していく。

FORTH の多彩な意味論と計算機の織りなす世界に足を踏み入れるあなたに、一体何が待ち受けているのだろう。本書が、あなたにとって良い旅の道しるべとなることを願っている。

FORTH と共にあらんことを。

*1 ここでは、プログラムがどのような動作・結果を持つかを定式化したものを指す。

*2 特定のタスク向けに設計されたコンピュータ言語

*3 日本語プログラミング言語「Mind」、オブジェクト指向言語「Mops」「Factor」など



目次

まえがき	iii
第 1 章 はじめに	1
1.1 推奨する読み方	1
1.2 Gforth のインストール作業	2
1.3 FORTH の歴史と標準	4
1.4 役立つリファレンス	5
第 2 章 FORTH 序論	7
2.1 ワードとインタプリタ	7
2.2 基本的な算術	10
2.3 スタック操作ワード	11
2.4 コメント	12
2.5 セル	13
2.6 文字列・印字	14
2.7 スタック表記法	16
2.8 比較・論理演算	16
2.9 ワード定義の基本	18
2.10 ソースファイルの利用	19
2.11 練習問題	20

目次

第 3 章	制御構造	21
3.1	条件分岐	21
3.2	繰り返し	24
3.3	再帰	29
3.4	リターンスタック	29
3.5	練習問題	32
第 4 章	データ・辞書	33
4.1	辞書	33
4.2	匿名ワードと XT	36
4.3	DOES>	37
4.4	練習問題	38
第 5 章	コンパイラ変形	39
5.1	IMMEDIATE / POSTPONE	39
5.2	EVALUATE	39
5.3	パーサの利用	39
5.4	コンパイル中断	40
5.5	練習問題	40
付録 A	forth-jp について	41
付録 B	練習問題の解答・解説	43
	あとがき	47

第 1 章

はじめに

この章では、まず本書で推奨する読み方と、本文中での記法に関してのいくつかの約束事について紹介する。その後、処理系のインストールなどの準備について述べる。最後に FORTH の略史や役立つリファレンスを紹介する。

1.1 推奨する読み方

FORTH における用語はできる限り説明した上で導入するようにしているが、逐次実行・条件分岐・繰り返しといった手続き型プログラミングの基礎的な概念や、配列・スタックといった基本的なデータ構造については説明を省いている。2 章からはそれぞれ練習問題を設けている。本文中の内容を確認するために、実際に頭と手を動かすことを推奨する。

本書での具体的な目的は「FORTH の特徴的な言語機能とその活用方法を理解して、これから Forth Standard を参照しながら探求していく土台をつくること」である。この目的のために、あえて FORTH の算術・文字列操作などの雑多な API には深入りせず、よりコアな言語機能の説明を優先している。その関係上、はじめは辞書的な読み方ではなく連続したチュートリアルとして、先頭の章から順番に読み進めることを推奨する。

1.2 Gforth のインストール作業

本書では、FORTH 処理系のひとつである GNU forth (以降、Gforth) を使用する。著者が使用している Gforth のバージョンは 0.7.9 である。<http://gforth.org> (図 1.1) でインストール方法に関する情報やチュートリアル (英語) が提供されている。



図 1.1: Gforth 公式サイト

Windows

<http://www.complang.tuwien.ac.at/forth/gforth/> から、「Win32 self installing」と記載されたインストーラを入手し、それを実行して指示に従ってインストールする。

macOS

Homebrew 経由で導入できる。

```
brew install gforth
```

Ubuntu

apt コマンドでインストールできる。

```
sudo apt install gforth
```

Arch linux

AUR ^{*1}で提供されているので、yay 等を利用してインストールする。

^{*1} パッケージ詳細ページ: <https://aur.archlinux.org/packages/gforth/>

```
yay -S gforth
```

1.3 FORTH の歴史と標準

FORTH は、1958 年からチャールズ・ムーアが個人開発していたプログラミングシステムから考案された。1968 年に、このソフトウェアをミニコンピュータ上で FORTRAN で実装したものが FORTH の原型とされている。FORTH が他のプログラマに最初に公開されたのは 1970 年代で、アメリカ国立天文台 (NARO) にいたエリザベス・ラザーによって始められたものである。NARO にいた 2 人は制御用ソフト開発において FORTH を完成させ、後に FORTH, Inc. を設立した (1973 年)。ムーアの仕事の関係上、言語開発の初期段階では移植性の高さが求められていた。当時の FORTH は現在のスクリプト言語のような立ち位置ではなく、FORTH 処理系自体が軽量 OS として用いられていた。そういった処理系のひとつである MacFORTH は、アップル Macintosh の最初の常駐開発システムとして採用されていた。

その後も FORTH は様々な環境に移植され、1979 年に言語仕様の標準化が始まった。1979 年に成分化された FORTH-79、1983 年に成分化された FORTH-83 は「事実上の標準^{*2}」である。これらの標準は 1994 年に ANSI によって統合され、ANS Forth と名付けられた。1979 年には ISO/IEC においても標準化されている^{*3}。

本書で扱う Gforth は Forth 2012 Standard という規格に沿って現在も盛んに開発されており、Forth 2012 Standard は Forth 200x 標準化委員会によって策定されている。

^{*2} デファクトスタンダードとも呼ばれる。標準化機関等が定めた規格ではなく、市場における競争や広く採用された結果として「事実上標準化した基準」を指している。

^{*3} ISO/IEC 15145:1997 <https://www.iso.org/standard/26479.html>

1.4 役立っリファレンス

Gforth Manual

<http://gforth.org/manual/>

FORTH と Gforth の仕様を学べるマニュアル

Forth Standard

<https://forth-standard.org/>

Forth 2012 Standard に関する情報が共有され、さらなる技術仕様 (プロポーザル) がまとめられている。

Starting FORTH

<https://forth.com/starting-forth>

FORTH 入門者向けに、基本からコンパイラ変形まで網羅的に解説している本



第 2 章

FORTH 序論

この章では、FORTH の学習を始める上で把握しておくべき周辺の基礎概念と、FORTH の中核をなす諸概念について扱っていく。

2.1 ワードとインタプリタ

FORTH のシンタックスは、要は「文字列を空白文字で区切って並べただけ」だ。この極限まで単純化されたシンタックスが、後述する多彩な意味論と相まって、高い融通性を発揮する。

これから少しの間、Gforth を「電卓」として使っていく。Gforth を起動し、リスト 2.1 を書き写してみよう。入力が終わったら、改行してみてほしい。

リスト 2.1: はじめての FORTH プログラム

```
6 3 4 + * .
```

正しく動いていれば、たった今書き込んだコードのすぐ左に 42 ok 0 と表示されたはずだ。これは、Gforth が入力されたコードをすべて解釈実行

し終わったことを示している。Gforth は、この瞬間にどんな流れで、どうリスト 2.1 を解釈したのだろうか。

Gforth は手続きに必要なパラメータをスタック上で管理しながら、ソースコードを先頭から一直線に解釈する。リスト 2.1 を構成している文字列は 6, 3, 4, +, *, . の 6 つだ。

- 最初の 3 つは 32 ビット符号付き整数値として解釈され、それぞれ順番にスタックにプッシュされる。
- あと 3 つの、数値として認識できない文字列は「ワード (word)」として解釈される。

ワードは、簡単に言えば手続きに名前をつけたものだ。これは、他の言語における関数やサブルーチンのようなものとして理解される。

FORTH 処理系がインタプリタとして動作しているときにワードを認識すると、対応する**解釈時意味論** (interpretation semantics) に従って呼び出しが発生する。後述するが、「～時意味論」のようにワードには複数の意味論が存在し、呼び出し時の処理系の状態によって、ワードの挙動は異なる (ように作為的にワードを定義できる)。

FORTH 処理系はデフォルトではインタプリタとして動作しており、この段階では解釈時意味論だけ考慮していれば問題ない。

リスト 2.1 の説明に戻るが、インタプリタの挙動は以下ようになる。

1. 6 3 4 まで解釈した直後には、スタックにはそのまま底から 6, 3, 4 が積まれている。
2. + を読み込んだインタプリタは、ワード名とその定義を紐付けて保存している「辞書 (dictionary)*¹」からその定義を見つけ出し、呼び出す。+ ワードはスタックの一番上に積まれている 2 つの数 3, 4 を

*¹ 辞書は、実際には「ワードの定義が書き込まれたメモリ領域の先頭番地」を保存しているものだ。

ポップし、和 7 をプッシュする。

3. * を読み込んだインタプリタは同様に定義を見つけ出して呼び出す。
* ワードはスタックの一番上に積まれている 2 つの数 6, 7 をポップし、積 42 をプッシュする。
4. . ワードの解釈時意味論は「スタックの一番上の要素をポップして出力すること」であるから、スタックは空になり、42 が出力される。

つまり、リスト 2.1 は $(3 + 4) \times 6$ を評価させて、結果を出力させるプログラムだったわけだ。FORTH において算術式の評価を表現すると、自然に「被演算子を先に並べて、最後に演算子を書く記法」になる。この記法は一般的には逆ポーランド記法と呼ばれており、スタックとの相性が良い。

今後は、特に指定のない限り、Gforth を起動した直後の状態を想定してサンプルコードを扱っていく。BYE ワードを呼び出せば Gforth を終了できる。

スタックの要素数と各要素の値を出力する .S ワードと、改行コードを出力する CR ワードも使用して、リスト 2.1 でのスタックの変化を探ってみよう。(リスト 2.2)

リスト 2.2: スタックの変化を探る

```
CR .S 6 3 4 CR .S + CR .S * CR .S
```

結果は リスト 2.3 のようになるはずだ。スタック上で正しく計算されていることがわかる。

リスト 2.3: 実行結果

```
<0>  
<3> 6 3 4  
<2> 6 7
```

<1> 42

2.2 基本的な算術

+ ワードや * ワードと同様に、以下のワードを用いて基本的な算術を行う。

- (マイナス)

減算

/ (スラッシュ)

除算

MOD

剰余

/MOD

「剰余」「商」を順にプッシュする

NEGATE

符号を反転する

ABS

絶対値


```
23 8 - 3 / .  
7 4 MOD .  
7 4 /MOD .S  
2 NEGATE .
```

2.3 スタック操作ワード

FORTH にはスタックの内容を操作するための組み込みワードが用意されている。その 1 つが DUP ^{*2} ワードだ。スタックの一番上に積まれている要素を複製する。

リスト 2.5: DUP ワードの利用

```
8 DUP * .
```

リスト 2.5 を実行すると、すぐ右側に 64 ok 0 と表示される。.(ドット) ワードを呼び出すと、スタックの一番上の要素をポップして出力する。つまり DUP ワードによって複製が行われスタックにはふたつの 8 が残り、それらは * ワードによってポップされ 2 数の積 64 が残る。

他にもいろいろなスタック操作のワードが用意されている。

DROP

一番上の要素を破棄する。

NIP

一番上から 2 つ目の要素を破棄する。

SWAP

^{*2} アルファベットの太文字小文字の区別はないため、dup と入力しても構わない。

一番上の 2 つの要素の順序を入れ替える。

OVER

一番上から 2 つ目の要素をコピーして、それをプッシュする。

ROT

一番上から 3 つの要素を逆順にする。

スタック上の 2 つの要素をまとめて操作するためのワードも用意されている。

2DROP

一番上から 2 つの要素を破棄する。

2SWAP

スタック上の (底の方から) a b c d を、c d a b に並び替える。

2OVER

スタック上の a b c d のうち a b をコピーしてプッシュする。プッシュ操作が完了すると a b c d a b のようになっている。

2DUP

一番上から 2 つの要素をコピーして、同じ順でプッシュする。

2SWAP ワードと 2OVER ワードの説明では、スタック上の要素に識別名をつけた上で、呼び出しの前後でそれがどう変化するかを示している。こういった記法については、後の「2.7 スタック表記法」でより厳密に定義して使っていくことにする。

2.4 コメント

リスト 2.6: コメントの書き方

```
\ コメント  
( コメント )
```

上のような書き方をすれば、コメントの部分は無視される。`\` と `(` はそれぞれひとつのワードとして独立に定義されており、これら呼び出すために、後ろに空白文字が必要になる。`\` ワードは、後続するソースコードを行末まで読み飛ばす。`(` ワードは、後続するソースコードを `)` まで読み飛ばす。この 2 つのワードのように、後ろに続いているソースコードをパースして引数に取ることが可能なワードも存在している。後述するが、そのようなワードをユーザが定義することも可能である。

2.5 セル

FORTH で扱われるデータのサイズの最小単位は**セル** (cell) である。スタックに積まれる要素のサイズもすべて 1 セルとなっている。1 セルあたりの実際のサイズは処理系依存だが、標準仕様に含まれている `CELLS` ワードを用いて、使用中の処理系でのサイズを知ることができる。

リスト 2.7: 1 セルあたりのバイト数を調べる

```
1 CELLS .
```

`CELLS` ワードは、スタックに積まれている整数値 1 つをポップし、それに 1 セルあたりのバイト数を掛けてプッシュする。例えば 64 ビット OS 向けの Gforth では 1 セル = 8 バイトなので、リスト 2.7 を実行すると 8 と出力されるはずだ。

2.6 文字列・印字

FORTH においては、文字列は「書き込み先の先頭アドレス」「文字数」の 2 つの値で表現される。メモリ上に文字列を書き込んでこの 2 つをスタックに積む役割をもつのが S" ワードだ。書き込まれる文字列はソースコード上に直接記述し、" をデリミタとしている。スタック上の 2 値をポップして文字列として出力するには TYPE ワードを用いる。

```
S" HELLO WORLD" TYPE
```

ダブルクォートやタブ文字、バックスペース文字といった文字も扱いたい場合、エスケープシーケンスに対応している S\ " ワードを用いる。

```
S\ " \l"Hello,\lFORTH\x21\l"
```

扱えるエスケープシーケンスは 表 2.1 にまとめてある。

単にソースコード中の文字列を切り出して出力するだけの ." ワードもある。いわゆる printf デバッグに用いられることが多い。

表 2.1: エスケープシーケンス一覧

記号	意味
\a	アラート
\b	バックスペース
\e	エスケープ
\f	改ページ
\l	改行 (LF)
\m	改行 (CR/LF)
\q または \"	ダブルクォート
\x[16 進数]	ASCII 文字 (16 進数で ASCII コードを指定)
\\	バックスラッシュ

```
. "DEBUG"
```

実際にメモリ上に文字列が格納されていることを確認するには、DUMPワードが便利だ。「先頭アドレス」と「バイト数」をスタックからポップし、その領域の内容をダンプしてくれる。出力形式については規定されておらず処理系依存となる。以下に、筆者の環境でテストした結果を載せておく。

リスト 2.11: 文字列 ABC を書き込み、ダンプさせるサンプル

S" ABC" 2DUP DUMP TYPE

実行結果

—

ABC

```
ABC
```

3 バイトの領域に、A, B, C それぞれの ASCII コードが書き込まれていることがわかる。

2.7 スタック表記法

ワードを呼び出した際のスタックへの影響を記述するための記法を紹介する。これは、FORTH のリファレンス等でワードの挙動を説明する際に多用される。基本的には、以下のようなフォーマットになっている。

リスト 2.12: スタック表記法

```
( before -- after )
```

1
6

`before`, `after` の部分には、スペース区切りでシンボルが 0 個以上並ぶ。シンボルは、FORTH におけるデータ型や、その値のサイズを表現するための記号である。Forth 2012 Standard において用いられているシンボルについて、表 2.2 にまとめておく。現段階では扱っていない言語機能に関するシンボルも含まれているが、今後参照する資料として一旦読み流しておいてほしい。

2.8 比較・論理演算

先にスタックに積んだ 2 つの数値をポップして比較・論理演算を行うためのワードが用意されている。ただし、FORTH において偽は 0、真は 0 以外の数で表されるので注意が必要だ。真を表す値としては、-1 がよく用

表 2.2: スタック表記法で用いられるシンボル

シンボル	データ型	サイズ
flag	フラグ	1 セル
char	文字	1 セル
n	符号付き整数	1 セル
u	符号無し整数	1 セル
x	指定のない 1 セル分のデータ	1 セル
xt	エグゼキューショントークン	1 セル
addr	アドレス	1 セル
a-addr	アラインメントされた領域のアドレス	1 セル
c-addr	文字用にアライメントされた領域のアドレス	1 セル
d	2 セル符号付き整数	2 セル
ud	2 セル符号無し整数	2 セル
i * x, j * x, k * x	任意	0 セル以上

いられる*³。

=

(x1 x2 -- flag)

2 数が等しいなら真、等しくないなら偽を返す

<>

(x1 x2 -- flag)

2 数が等しくないなら真、等しければ偽を返す

<, >, <=, >=

(n1 n2 -- flag)

大小比較

AND, OR, XOR

(x1 x2 -- x3)

³ -1 をビット反転すると 0 になる。0 をビット反転すると -1 になる。

ビットごとの論理積 / 論理和 / 排他的論理和を求める

INVERT

(x1 -- x2)

ビットを反転する

2.9 ワード定義の基本

ユーザがワード定義する、つまり辞書に新たな項目を追加する方法を紹介する。基本的には、`:` ワードを使用する。

リスト 2.13: ワード定義

```
: square ( n -- n ) DUP * ;
```

リスト 2.13 では、新たに `square` というワードを定義している。(`n -- n`) の部分はコメントとして扱われ、プログラマに対して `square` ワードの挙動をスタック表記法で示す「ドキュメント」としての役割を担っている。

リスト 2.14: `square` ワードの利用

```
8 square .
```

`square` ワードの解釈時意味論は「スタックの一番上の要素を複製し、上 2 つの要素を掛け合わせること」となるため、実際に `square` ワードを呼び出す リスト 2.14 を実行すると 64 が出力される。

`:` ワードは、呼び出されるとまず後続するソースコードを空白文字の直前まで読み込む。それを名前として保存した後、処理系を**コンパイル状態** (compilation state) に移行させる。コンパイル状態のときにワードを認識

すると、先述した解釈時意味論ではなくコンパイル時意味論 (compilation semantics) に従って呼び出しが発生する。

一部のワードを除いて、多くのワードのコンパイル時意味論は「自らの解釈時意味論を定義に追加すること」である。ただし、解釈時意味論と「他のワードの呼び出し中に間接的に呼び出されたときとで挙動」が異なる場合には、後者を特に**実行時意味論** (execution semantics) と呼ぶ。

2.10 ソースファイルの利用

Gforth でソースファイルを指定して実行する

ソースファイルに書き込まれたソースコードを Gforth で実行することができる。例えば `file1.4th` というソースファイルと、`file2.4th` というソースファイルを順に実行したい場合、次のようなコマンドとなる。

```
gforth file1.4th file2.4th
```

■コラム: ソースファイルの拡張子

一般的には `.fs`, `.fth`, `.4th`, `.forth` などが用いられる。筆者は `.4th` を用いることが多い。(`.fs` だと F# のソースファイルの拡張子と被ってしまう)

実行中に別のソースファイルを読み込む

先にソースファイルを文字列で指定し、INCLUDED ワード (`i * x` `c-addr u -- j * x`) を呼び出すことで、そのソースファイルを読み込むことができる。

リスト 2.15: `file.4th` を読み込む

```
S" file.4th" INCLUDED
```

2.11 練習問題

1. $6 - 7 \times 8 + 9$ を Gforth 上で計算せよ。
2. 2SWAP ワードのスタック表記を示せ。
3. スタック上の x, y をポップし、 $y \times 2 + x$ をプッシュするワード `word2-3` を定義せよ。
4. スタック上の x, y をポップし、 $x \bmod 3 - y/4$ をプッシュするワード `word2-4` を定義せよ。
5. NIP ワードと同じ挙動のワード `word2-5` を定義せよ。ただし、定義に「NIP ワードの呼び出し」を含めてはいけない。

第 3 章

制御構造

FORTH では、通常「条件分岐」や「繰り返し」はコンパイル状態でのスタックを活用して実現される。この章では、コンパイル状態で利用できる制御フロー関連の機能に触れていく。

3.1 条件分岐

条件分岐を作り出すためには IF, ELSE, THEN ワードを用いる。他のプログラミング言語の具象構文と見比べて語順が異なっている。この 3 つのワードはコンパイル状態でしか呼び出すことができず、解釈時意味論は未定義である。その代わり、それぞれ実行時意味論が定義されている。

リスト 3.1 を見てほしい。これは、スタックに積まれた 1 つの数が 2 の倍数の場合に Multiple of 2 と出力するワード word3-1 の定義だ。

リスト 3.1: IF THEN による条件分岐

```
: word3-1 ( n -- ) 2 MOD 0 = IF ." Multiple of 2" THEN ;
```

IF, THEN ワードの組が特別扱いされているわけではなく、それぞれ独立

第 3 章 制御構造

3.1 条件分岐

したワードとして定義されている。IF ワードは「先にスタックに積まれた 1 つの数を条件として、それが偽だった場合のジャンプ先を定めないまま、真だった場合のコンパイルを開始する」という役割を持つ。そして THEN ワードは「未解決だったジャンプ先を解決する」という役割を持つ。リスト 3.2 では、実際に word3-1 ワードを解釈させて挙動を確認している。1 行目を解釈させても何も主力されないが、2 行目を解釈させると Multiple of 2 と出力されたはずだ。

リスト 3.2: word3-1 の動作確認

```
3 word3-1
4 word3-1
```

IF, THEN ワードは、「コンパイル状態で呼び出されるとコンパイラに働きかけて、実際に定義されるワードの挙動に特別な影響を与える」ワードである。このようなワードによって実現される意味論を**走行時意味論** (runtime semantics) という。

ELSE ワードは「未解決だった『条件が偽の場合のジャンプ先』を解決し、『条件が真の状態で ELSE ワードに達したときのジャンプ先』を未解決にしたままコンパイルを続行する」という役割を持つ。リスト 3.3 で定義している word3-2 ワードは、スタック上の 2 数のうち小さい方をスタックに残して、もう一方をスタックから取り除く。

リスト 3.3: ELSE を用いた条件分岐

```
: word3-2 ( n1 n2 -- n3 ) 2DUP < IF DROP ELSE NIP THEN ;
7 10 word3-2 .
10 7 word3-2 .
```

スタック上の値の違いに応じた多方向への分岐を実現するには、CASE,

22

OF, ENDOF, ENDCASE ワードを用いる。リスト 3.4 で定義している word3-3 ワードでは、先にスタックに積まれていた数が 1, 2, 3 の場合に、それぞれ異なる文字列を出力する。それ以外の値の場合には、Other number: [数値] の形式で出力する。

リスト 3.4: CASE による多方向への分岐

```
: word3-3 ( n1 n2 -- n3 )
CASE
  1 OF ." It is one." ENDOF
  2 OF ." It is two." ENDOF
  3 OF ." It is three." ENDOF
  ." Other number: " DUP .
ENDCASE
;
1 word3-3
2 word3-3
3 word3-3
4 word3-3
```

CASE ワードまでにスタックの一番上に積まれた値 (以下、「入力値」) が、OF ワードの前に積んだ値 (以下、「基準値」) と一致した場合には、その後の ENDOF ワードまでを実行して ENDCASE ワードまでジャンプする。OF, ENDOF ワードを用いないことで、それまで挙げたどの基準値にも一致しなかった場合の処理を記述できる。

OF ワードの走行時意味論は「直前に積まれた入力値と基準値のうち、基準値だけをポップすること」であり、ENDCASE ワードの走行時意味論は「入力値をポップして実行を続けること」である。そのため、スタック上の入力値を消費する操作をする場合には、入力値を複製しておくことが必要となる。word3-3 ワードでも、Other number: を出力した後に入力値を出力するために、予め DUP ワードを呼び出している。

3.2 繰り返し

ループ

本書では回数を指定してループを発生させる方法について述べる。確定ループを作り出すには DO, LOOP ワードを用いる。DO (n1 n2 --) ワードの走行時意味論としては、スタックから 2 数を取り出し、順番にループの「境界値 n1」「初期値 n2」とする。ループカウンタの値は I ワードを用いて取得する。ネストする場合は J ワードを用いて内側のループでのカウンタの値を取得できるが、そもそも一つのワード定義のなかでネストした制御構造をまとめて記述することは推奨しない。可読性に欠けるからだ。

これから、確定ループを扱う練習としてインクリメンタルに「スタックに積まれた数の階乗を求める」ワードを定義していく。まずは「1 から 10 までの数を出力する」1to10 ワードと、「0 から 9 までの数を出力する」0to9 ワードを リスト 3.5 で定義してみる。

リスト 3.5: 1 から 10 までの数を出力する

```
: 1to10 ( -- )
  11 1 DO I . LOOP
;

: 0to9 ( -- )
  10 0 DO I . LOOP
;
```

LOOP ワードに達してループカウンタを更新したときに、境界値と初期値が一致していればループは終了する。そのため 10 回確定でループさせたい場合は「境界値 - 初期値 = 10」となるように境界値と初期値を設定すればいい。

次は 1, 2, 3 の階乗を求める `fact-1`, `fact-2`, `fact-3` ワードを定義する。

リスト 3.6: 1, 2, 3 の階乗を求める

```
: fact-1 ( -- n )
  1 2 1 DO I * LOOP
;
: fact-2 ( -- n )
  1 3 1 DO I * LOOP
;
: fact-3 ( -- n )
  1 4 1 DO I * LOOP
;
fact-1 .
fact-2 .
fact-3 .
```

実行結果

```
1 2 6
```

n の階乗を求めるために、1 から $n + 1$ までの確定ループのなかで、最初に積んだ 1 に対して毎回ループカウンタを掛けていっている。先にスタックのトップに積まれた数を求めるには、それがここでの n として扱われるようにすればいい。それを実装したものが リスト 3.7 の `fact-n` ワードである。DO ワードを呼び出す直前に、スタックに「ループカウンタを掛けられる数」「境界値」「初期値」を積んでおく必要があるので、SWAP ワードを用いて順序を直している。

第 3 章 制御構造

3.2 繰り返し

リスト 3.7: 1 以上の数の階乗を求める

```
: fact-n ( n1 -- n2 )
  1 SWAP 1 + 1 D0 I * LOOP
;
```

しかし `fact-n` ワードには欠陥がある。0 以下の数をスタックのトップに積んだ状態で呼び出すと無限ループが発生する。この問題は、`D0` ループのカウンタがずっと境界値に一致しないことに起因する。

これを解決するには `D0` ワードの代わりに `?D0` ワードを使用する。`?D0` ワードは基本的には `D0` ワードと同じ挙動だが、初期値が境界値以下だった場合 1 度もループしない、という特徴がある。これを使って、0 以下の数値の入力に対しては 1 を返すように定義すればいい。最終的に、「スタックに積まれた数の階乗を求める」ワード `fact` の定義はリスト 3.8 のようになった。

リスト 3.8: 階乗を求める

```
: fact ( n1 -- n2 )
  1 SWAP 1 + 1 ?D0 I * LOOP
;
fact 1 .
fact 2 .
fact 3 .
fact 4 .
```

実行結果

```
1 1 2 6 24
```


ループからの脱出

「ワードの呼び出しを終了する」という走行時意味論を持った EXIT ワードを用いると、どこからでも定義内容の最後までジャンプすることができる。IF ワードと EXIT ワードを組み合わせることで、特定の条件を満たさない場合に呼び出しを終了し、満たしていた場合は続行するという挙動を定義できる。これは可読性を向上させる上で有効な手段であり、一般的には「早期リターン」と呼ばれている。早期リターンを用いた一例を リスト 3.9 に示す。

リスト 3.9: 早期リターン

```
: word-for-pos ( n -- )
  DUP 0 <
  IF
    DROP EXIT
  THEN
    ." positive number: " . CR
;

-2 word-for-pos
-1 word-for-pos
1 word-for-pos
2 word-for-pos
```

実行結果

```
positive number: 1
positive number: 2
```

EXIT ワードの注意点として、「DO, ?DO, LOOP ワードによるループからの

脱出のために EXIT ワード単体で使用してはいけない」ということが挙げられる。その理由については 3.4 節「リターンスタック」で述べる。代替策として UNLOOP ワードが用意されており、EXIT ワードを呼び出す直前に呼び出すことでループから正常に脱出できる。ループがネストしている場合は、その個数分だけ UNLOOP ワードを呼び出す必要がある。

リスト 3.10: UNLOOP ワードの使用例

```
: less-than-4 ( n -- )
  CR 1 + 1
  DO
    I DUP ." Checked: " . CR 4 =
    IF
      ." Equal to or greater than 4" CR UNLOOP EXIT
    THEN
  LOOP
  ." Less than 4" CR
;

2 less-than-4
10 less-than-4
```

実行結果

```
Checked: 1
Checked: 2
Less than 4

Checked: 1
Checked: 2
Checked: 3
Checked: 4
Equal to or greater than 4
```

リスト 3.10 で定義している `less-than-4` ワードでは、スタックから取り出した数に応じて `DO` ループを発生させ、ループカウンタが 4 まで増加するとその時点で `UNLOOP EXIT` によってループを脱出する。

3.3 再帰

`RECURSE` ワードを用いると、呼び出されている最中に自らの呼び出しを行うようなワードを定義できる。リスト 3.11 では、`RECURSE` ワードを用いて先述した階乗関数を再定義している。当然 `RECURSE` ワードは `:` によるワード定義の最中にしか使うことができない。

リスト 3.11: `RECURSE` ワードを用いて階乗関数を定義する

```
: fact ( n1 -- n2 )
  DUP 0 <=
  IF
    DROP 1
  ELSE
    DUP 1 - RECURSE *
  THEN
  ;
```

3.4 リターンスタック

今まで「スタックは 1 つだけ」のように説明してきたが、実はもう 1 つある。リターンスタックという、「ワードの呼び出しが完了した後にジャンプする先」を記録するためのスタックである。今まで扱ってきたスタックは、今後リターンスタックと区別してデータスタックと呼ぶことにする。

実は `FORTH` では、このリターンスタックの内容を操作することが可能である。以下ではリターンスタックの操作に関する組み込みワードである

第 3 章 制御構造

3.4 リターンスタック

>R, R>, R@ ワードを紹介しているが、データスタックのスタック表記に加えて、(R: before -- after) の形式でリターンスタックのスタック表記も記述している。

>R

解釈時: 未定義動作

実行時: (x --) (R: -- x)

データスタックから 1 つ要素をポップし、それをリターンスタックにプッシュする。

R>

解釈時: 未定義動作

実行時: (-- x) (R: x --)

リターンスタックから 1 つ要素をポップし、それをデータスタックにプッシュする。

R@

解釈時: 未定義動作

実行時: (-- x) (R: x -- x)

リターンスタックの一番上の要素をコピーして、データスタックにプッシュする。

リターンスタックは「1 ワード定義内に限って利用可能な、値の仮置場」として使われることを想定して、アクセス可能になっている。裏を返せば、それ以外の使い方をした場合の挙動は保証されていない。リスト 3.12 では、FORTH における禁忌を犯している。

リスト 3.12: 2 重になったワード呼び出しの順序を変更する

```
: don't-do ( -- ) ( R: n1 n2 -- n2 n1 )  
  R> R> SWAP >R >R  
;
```

```
: foo ( -- ) CR ." FOO-BEGIN" don't-do CR ." FOO-END" ;  
: bar ( -- ) CR ." BAR-BEGIN" foo CR ." BAR-END" ;  
  
bar
```

実行結果

```
BAR-BEGIN  
FOO-BEGIN  
BAR-END  
FOO-END
```

3
1

呼び出し順序が変わっていることがわかる。まず `bar` ワードの呼び出しが始まった直後に、リターンスタックには「`bar` ワードの呼び出し後のジャンプ先アドレス」が積まれる。その後 `foo` ワードの呼び出しが始まり、「`foo` ワードの呼び出し後のジャンプ先アドレス」が積まれる。同様に `don't-do` ワードの呼び出し後のジャンプ先アドレスが積まれるわけだが、リターンスタックが操作されてトップの 2 つの要素が入れ替わる。つまり `don't-do` ワードの呼び出しが終わると、もともと `foo` ワードのために積まれていたアドレスにジャンプしてしまう。その結果 `CR ." BAR-END"` が実行され、もともと `don't-do` ワードのために積まれていたアドレスにジャンプし、`CR ." FOO-END"` が実行される。

安全にリターンスタックを「値の仮置場」として扱うには、「1 ワード定義中での `>R` ワードの使用回数と `R>` ワードの使用回数を一致させること」を意識する必要がある。リスト 3.13 では、この考え方に従って `2SWAP` ワードを実装している。

リスト 3.13: リターンスタックの安全な使い方

```
: 2swap' ( n1 n2 n3 n4 -- n3 n4 n1 n2 )  
  ROT >R ROT R>  
;
```

3.2 節「繰り返し」で挙げた「DO ループから抜け出すときに EXIT ワードを単体で使ってはいけない」という問題は、まさにこの節で扱っているリターンスタックに起因する。Forth Standard での DO ワードの解説^{*1}にある通り、DO ワードは走行時意味論としてリターンスタックに値をひとつプッシュする。そして LOOP ワードの走行時意味論では、リターンスタックからひとつ値をポップする。DO ワードがすでに呼び出されていて LOOP ワードがまだ呼び出されていないという状況で EXIT すると、リターンスタックに (元々は DO ワードがプッシュした) 余分な要素が残ってしまい、処理系がクラッシュしてしまう。

3
2

3.5 練習問題

1. データスタックに積んだ 1 セル整数の回数だけ、FizzBuzz を実行するワードを定義せよ。
2. フィボナッチ数を求めるワード fib (n1 -- n2) を定義せよ。
3. リターンスタック操作のワードを利用して、OVER ワードを実装せよ。

^{*1} <https://forth-standard.org/standard/core/DO>

第 4 章

データ・辞書

ここまではスタック上のデータの操作や制御構造について触れてきたが、この章では「データを保存する手段」に関して解説していく。

4.1 辞書

辞書は「すでに定義されたワードのデータとコードの置き場所」である。実際には辞書はメモリ中にロードされており、FORTH インタプリタ・コンパイラに関わるコアなワードの定義も含めて、そこに書き込まれている。辞書に名前とコードを対にして登録すれば、当然それ以降は名前をワードとして扱える。辞書は、定数や変数を管理するグローバル環境としても利用される。

ここからは、実際に定数や変数、ワードを辞書に書き込ませて辞書の内容の変化を追いながら、辞書の扱い方や意義について探っていくことにしよう。

定数

FORTH において定数は、呼び出されると値を積むワードとして表現される。そのようなワードを定義するには、`CONSTANT (x --)` ワードを用いる。先に初期値をスタックに積んでおいて、直後のソースコード中に定数名を記述する。`CONSTANT` ワードには、後ろの 1 単語を切り出すパーサとしての挙動もあわせて定義されている。

リスト 4.1: 定数定義

```
100 CONSTANT foo
foo 2 * .
```

実行結果

```
200
```

変数

FORTH において変数は、呼び出されるとスタックに参照先アドレスを積むワードとして表現される。そのようなワードを定義するには、`VALUE (x --)` ワードを用いる。`CONSTANT` ワードと同様に、スタックのトップの要素を初期値、直後のソースコード中の 1 単語を変数名として変数を宣言・初期化する。「スタックのトップの要素をアドレスとしてポップして、書き込まれている値をプッシュする」`@ (a-addr -- x)` ワードを通じて、代入されている値を取得できる。

リスト 4.2 では、270 を初期値として変数 `bar` を宣言・初期化している。

代入には ! (x a-addr --) ワードを用いる。! ワードは、a-addr で指定したメモリ番地に x で指定した値を書き込む。

リスト 4.2: VALUE ワードによる変数宣言と初期化

```
270 VALUE bar
bar @ . \ 変数 bar の値を出力
42 bar ! \ 変数 bar に 42 を代入
bar @ .
```

実行結果

```
270 42
```

```
VARIABLE baz
80 baz !
baz @ .
```

```
[DEFINED]
FIND
HERE UNUSED
, C,
ALIGN ALLIGNED
```

4.2 匿名ワードと XT

定義済みのワードをデータとして扱い、識別するためのフォーマットが XT (eXecution Token) だ。' (ティック) ワードを用いて既定義ワードの XT を取得できる。XT をもとに実際に呼び出しを発生させるには EXECUTE ワードを用いる。

リスト 4.5: XT の取得と間接的な呼び出し

```
: hello ( -- ) ." HELLO!" ;

' hello EXECUTE
```

実行結果

```
HELLO!
```

、ワードの実行時意味論は「後続するソースコードから 1 単語をパースして、その名前がついたワードの XT をプッシュすること」であるから、リスト 4.6 のような高等的なワードを定義することが可能である。

リスト 4.6: 間接的な呼び出しを複数回発生させる

```
: hello ." HELLO!" ;

: 2times ( xt -- i * x )
  DUP EXECUTE EXECUTE
;

: ntimes ( xt n -- i * x )
  0 ?DO DUP EXECUTE LOOP DROP
;

' hello 2times CR
' hello 4 ntimes
```

実行結果

```
HELLO!HELLO!
HELLO!HELLO!HELLO!HELLO!
```

```
:NONAME
DEFER
'
ACTION-OF
IS
```

4.3 DOES>

CREATE DOES>

4.4 練習問題

第 5 章

コンパイラ変形

5.1 IMMEDIATE / POSTPONE

IMMEDIATE POSTPONE

5.2 EVALUATE

EVALUATE

5.3 パーサの利用

PARSE WORD

5.4 コンパイル中断

[] LITERAL SLITERAL STATE

5.5 練習問題

付録 A

forth-jp について

筆者は、「FORTH 言語に興味がある技術者同士で情報を共有する場所」としてコミュニティ「forth-jp」を運営している。活動場所・内容は以下の通りである。

Slack ワークスペース

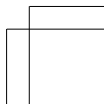
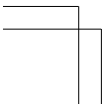
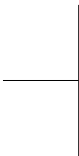
参加メンバー同士で、FORTH 言語の仕様や作成したプログラム、参考になるサイトなどについて共有する場所として使用している。

Scrapbox プロジェクト

<https://scrapbox.io/forth-jp>

FORTH に関する知見を蓄積していく場所として使用している。

参加するには、招待リンク (<https://bit.ly/2ZzTiYf>) から直接 Slack ワークスペースに入るか、または筆者の Twitter アカウント (@0918nobita) に連絡をとってほしい。



付録 B

練習問題の解答・解説

第 2 章

問題 1

6 7 8 * - 9 +

問題 2

(x1 x2 x3 x4 -- x3 x4 x1 x2)

問題 3

付録 B 練習問題の解答・解説

```
: word2-3 ( n1 n2 -- n3 ) * + ;
```

問題 4

解答例 1

```
: word2-4 ( n1 n2 -- n3 ) SWAP 3 MOD SWAP 4 / - ;
```

解答例 2

```
: word2-4 ( n1 n2 -- n3 ) -4 / SWAP 3 MOD + ;
```

問題 5

```
: word2-5 ( x1 x2 -- x2 ) SWAP DROP ;
```

第 3 章

問題 2

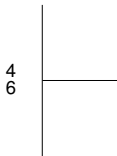
```
: fib ( n1 -- n2 )  
  CASE  
    0 OF 0 ENDOF  
    1 OF 1 ENDOF
```

付録 B 練習問題の解答・解説

```
0 1 ROT 0 DO 2DUP + ROT DROP LOOP  
ENDCASE  
;
```

問題 3

```
: OVER >R DUP R> SWAP ;
```





あとかき



$\frac{4}{7}$



索引

* (アスタリスク), 9
+, 8
· (ドット), 11
.", 14
.S, 9
/ (スラッシュ), 10
/MOD, 10
: (コロン), 18
<, 17
<=, 17
<>, 17
=, 17
>, 17
>=, 17
>R, 30
\a, 15
\b, 15
\e, 15
\f, 15
\l, 15
\m, 15
\q, 15
\x, 15
- (マイナス), 10
2DROP, 12
2DUP, 12
2OVER, 12
2SWAP, 12

a-addr, 17
ABS, 10
addr, 17
AND, 17

BYE, 9

c-addr, 17

48

CELLS, 13
char, 17
CR, 9

d, 17
DROP, 11
DUMP, 15
DUP, 11

EXECUTE, 36

flag, 17

INCLUDED, 20
INVERT, 18

MOD, 10

n, 17
NEGATE, 10
NIP, 11

OR, 17
OVER, 12

R>, 30
R@, 30
ROT, 12

S", 14
SWAP, 11

u, 17
ud, 17

x, 17
XOR, 17

索引

XT, 36

xt, 17

解釈時意味論, 8

逆ポーランド記法, 9

コンパイル時意味論, 19

コンパイル状態, 18

実行時意味論, 19

シンボル, 16

セル, 13

走行時意味論, 22

データスタック, 29

リターンスタック, 29

DARK FORTH

2019 年 9 月 15 日 発行

著 者 松本幸大

(C) 2019 Kodai Matsumoto