

ceForth_33

Dr. Chen-Hanson Ting, July, 2019

Chapter 1. How to Write Forth in C

1990年、Bill Muenchと私がマイクロコントローラ用のeForthモデルを開発したとき、メモリは乏しく、eForthを実装する唯一の方法はアセンブラでした。当時、C言語で書かれたForthのシステムはいくつかあり、その代表的なものはWil BadenのthisForthとMitch BradleyのForthmacsでした。しかし、しかし、この2つの実装は、Unix環境をベースにした大型コンピュータ向けのもので、勉強はしたものの、その複雑なmake処理については理解することができなかった。eForthをゼロから作るには、C言語とUnixの知識が足りなかったのです。

シリコンバレーForth Interest Groupでは、C言語でForthをどう書くかという議論が断続的に行われていて、C言語のエキスパートでもあるJohn Harboldは、C言語でForthを書くことは可能だと断言し、その方法をコードで示してくれた。でも、それは私の頭のずっと上を飛び交っていました。

2009年、C言語についての私自身の問題点、そしてC言語でForthを書くことの問題点を真剣に考え始めました。そして、Virtual Forth Machine(VFM)は、他のアセンブリ言語と同じようにC言語で簡単に書くことができることに気づきました。VFMは単にForthの原始的な言葉の集合で、特定のマイクロコントローラのアセンブリで書くのも、理想化された汎用CPU用に設計されたC言語で算術演算をエミュレートするのも非常に簡単であった。私が問題にしたのは、Forth辞書の構築である。Forth辞書は、Forthのワードをリンクしたリストで、レコードという形式になっている。各レコードは、固定長のリンクフィールド、可変長の名前フィールド、固定長のコードフィールド、可変長のパラメータフィールドの4つのフィールドを持っている。私が理解したところでは、初級Cコンパイラは、これらのレコードの構築とリンクのためのデータ構造を持っていなかった。このレコードの構築とリンクには、thisForthやForthmacにあるような複雑な方法が必要だったのだ。

Chuck Mooreは私にアセンブラの書き方と、メタコンパイラでMuP21の辞書を構築する方法を教えてくださいました。私は彼のメタコンパイラを使って、P8、P24、eP16、eP32チップ用のeForthシステムを構築したことがありました。Forthのメタコンパイラは、マクロアセンブラやC言語よりもずっと強力でした。私がしなければならなかったのは、巨大なデータ配列を割り当てて、すべてのレコードを含む辞書を構築することだけでした。このデータ配列は、アセンブリファイルやCのヘッダーファイルの中でVFMのコードにコピーすることができる。VFMをバイトコードで定義すると、辞書の中身はデータだけとなり、実行可能なCコードはない。バイトコードの優れた点は、Forthシステムを基盤となるマイクロコントローラから完全に分離し、CコンパイラがあればどんなマイクロコントローラにもForthシステムを移植できることだ。

直接スレッド型Forthモデルでは、プリミティブワードのレコードはバイトコードのみを含む。コロソワードは、コードフィールドにバイトコードのセルを1つ持ち、パラメータフィールドにトークンリストを持つ。トークンは、他のワードのコードフィールド・アドレスである。

Forthの辞書をデータ配列に埋め込むことは、C言語の基本的なプログラミングモデル、すなわち実行可能なCコードはコードセグメントに、データと変数はデータセグメントにコンパイルされる、ということにうまく適合する。C言語はコンパイル言語であるため、データセグメントでコードを実行することではなく、コードセグメントへのコードやデータの書き込みは違法とみなされます。Forthはインタプリタ型言語であり、コードとデータを区別せず、ユーザが新しいコードを辞書に追加することを推奨している。そこで、VFMのこ

ードをコードセグメントに、Forthのワードをデータセグメントに書き込むという妥協策をとりました。VFMには新しい疑似命令を追加しないが、Forthの辞書には新しいコロソワードを自由に追加できる、という制限を受け入れた。

Forthシステムの設計は、Cを含む各種マイクロコントローラをターゲットとしたVFMマシンの構築と、Forth辞書の構築の2つの独立したタスクに分離できるようになりました。その際、それぞれの作業に最適な独立したツールを使用することができます。Forth辞書の構築には、長年使ってきたF#を選びました。現在、私の理解では、C、C++、C#には、VFMと一緒に辞書を構築するのに必要なツールはありません。

2009年、私はC言語で2種類のeForthを書きました。64プリミティブのceForth 1.0と、32プリミティブのceForth 1.1です。これらはcygwinの下でgccによってコンパイルされました。私は、自分のエゴのために、自分ができることを示すために、これらを実行しました。実用に耐えるとは思っていませんでした。

2011年、Arduino Uno Kitに惹かれ、eForthを328eForthとして移植しました。この実装の問題点は、一般的なArduino IDEのツールチェーンと互換性がないことでした。フラッシュメモリ内の辞書に新しいForthのワードを追加する必要があったのです。Arduinoでは、実行時にフラッシュメモリに書き込むことは許可されていませんでした。フラッシュメモリに書き込む特権を得るためには、Arduino IDEが独占しているブートロード部を置き換えてフラッシュメモリに書き込む必要がありました。

Arduinoに対応するため、ceForth 1.1をArduino Unoにスケッチ形式で移植しました。ceForth_328.cppは、基本的にはC言語プログラムです。フラッシュメモリには何も書き込めないという制約の中、RAMメモリにForth辞書を拡張した。すると、うまくいった。しかし、新しいForth語のために残されたRAMメモリは1.5KBしかなく、電源が落ちる前に新しいワードを保存することはできなかった。このとき述べたように、これはArduino UnoでForthを試してみようという新しい人々を誘うためのお誘いにすぎませんでした。実際のアプリケーションでは、328eForthを使う必要があったのです。

2016年、台湾のFIGグループの友人、Derek Laiが、彼と彼の息子Rickyが作ったWiFiBoy Kitsをいくつかくれました。それは、WiFi無線機を内蔵したESP8266チップを使用していました。同じチップを使ったもっとシンプルなキットNodeMCUが、eBayでわずか3.18ドルで売られているのを発見しました。160MHzの32ビットCPU、150KBのRAM、4MBのフラッシュ、多数のIOデバイスを搭載した、これまでで最も安価で強力なマイクロコントローラキットだったのです。これらに加えて、802.11のWiFiに対応しています。

ESP8266の製造元である中国上海のEspressif Systems社は、多数のソフトウェア開発キットをリリースし、このチップに対するソフトウェアのサポートをユーザーコミュニティに委ねました。多くのエンジニアがこの課題に取り組み、コミュニティ向けにさまざまなプログラミングツールを提供しました。Espressifはその後、ロシアのエンジニアIvan Grokhotkovを雇い、ESP8266のコードをコンパイルできるようにArduino IDEを拡張させました。この新しいArduino IDEの拡張により、私のようなホビーユーザーでもIoTの実験ができるようになりました。ESP8266の大容量メモリは、私がArduino UnoのATmega328で抱えていた問題を解決し、ESP8266をForthの良いホストにしてくれました。

数時間でceForthがNodeMCU Kitにうまく移植されたのには、とても驚かされました。ESP8266に適合させるための変更はごくわずかで、Forthの辞書も全く変更する必要がありませんでした。全てはC言語のコードで移植できたからです。一般的に、新しいマイクロコントローラにForthを移植するには、だいたい2週間くらいかかりました。この時間のほとんどは、特定のアセンブラの癖に対処したり、頑固なCPUアーキテクチャにVFMを無理やり合わせ込むために浪費されていた。ところが、C言語がまるで万能アセンブラのように振る舞ってくれるのだ。

Arduino IDE上でC言語で書かれたForthを使って、いくつかのNodeMCUキットをWiFiネットワーク上で互いに会話させることができました。私はまだESP8266に内蔵されているTensilicaのL106チップを全く理解して

いませんでしたし、WiFiやそのプロトコルも全て理解していませんでした。私がしたことは、いくつかのことをするために必要なライブラリ関数を調べることでした。IoT for Dummies! です。C言語で書かれたシンプルなForthには価値があるようです。そこで、ceForth 1.0をceForth 2.3に更新し、人々が何らかの利用法を見出すことを期待します。スタックのための循環バッファや、VFMを実行するためのストリームライン化されたFinite State Machineのような、いくつかの重要な改良が行われました。

Microsoft Visual Studio Community 2017の下でC++に移行し、最新のWindows PCでコンパイルとテストができるようになりました。espForth for ESP8266は2017 Bay Area Maker FaireでSVFIGブースで展示されました。

最近、ESP8266がESP32にアップグレードされ、3つのCPUコアとはるかに大きなRAMメモリを持つようになりました。SVFIGのRon GoldingがAIR(AIロボット)に使うことになったので、espForthを移植し、esp32forthとしました。2019年のBay Area Maker Faireでデモを行いました。

ちょうどフェアの準備をしているときに、妻が脳梗塞で倒れ、救急車で搬送されました。フェアの後、彼女はカリフォルニア・パシフィック・リージョナル・リハビリテーション・センターに送られました。私は、コンピュータを持ってくるのを忘れて、彼女の病院のベッドで泊まり込みました。私は、コンピュータがなくても生きていけることを彼女に証明したのです。私は、彼女が当然受けるべき、私の関心を一心に集めました。私は、自分のForth in Cについて考える時間がたくさんあった。

私は、私の美しく作られたForthの有限状態マシンについて熟考した。

```
{ primitives[cData[P++]](); }
```

これは、連続したバイトコードを読み込んで、順番に実行するものだ。データ配列から連続したバイトを読むことができれば、データ配列に連続したバイトを書き戻すことができるはずだ。Cには可変長配列が組み込まれていないが、可変長レコードを大きなデータ配列に書き込むことを妨げるものではない。

2週間後、娘が私のパソコンを持ってきてくれたので、私は自分でデータレコードを書いてみるようになった。最初に試したのはPythonで、大きな配列にいろいろと書き込んで、それを読み出すことができた。まず、配列にバイトを追加する`writeByte(c)`と、整数を追加する`writeInteger(n)`を用意しました。そこから、Forthの原始的なワードを組み立てる`CODE()`、コロンのワードを組み立てる`COLON()`、コロンのワードにトークンリストを付加する`LABEL()`というマクロ関数を定義しました。これらはマクロアセンブラと同じような働きをする。他にやることもないので、esp32forth_54の辞書を全部作り、esp32forth_54のForthメタコンパイラが生成するヘッダファイルrom_54.hとバイト単位で比較した。

妻がリハビリセンターから退院した後、私はNodeMCU ESP32S Kitに戻り、esp32forthにマクロアセンブラを追加し、rom_54.hのヘッダファイルを取り除いたのです。この新しいesp32forth_61システムでは、すべてが1つのesp32forth_61.inoファイルに収められています。1つのCファイルには、ESP32キット上で完全なForthシステムを立ち上げるために必要なすべての情報が含まれていました。しかし、トークン・リストのラベルを使用して分岐やループのターゲット・アドレスに印を付けて前方参照を手動で解決しなければならないため、満足できるものではありませんでした。マクロアセンブラを拡張して、すべての前方参照を自動的に解決して、制御構造を1回のパスで構築できるようにしました。これが esp32forth_62 です。

その後、ceForth_23は新しいマクロアセンブラを搭載してceForth_33にバージョンアップしました。Forthシステムを試してもらうのに、1つのファイルを配布するだけで良いのはとても良いことです。また、F#のメタコンパイラをドキュメント化し、Forthに詳しくない人に説明する手間も省ける。ForthをForthで説明する

のは愚かなことです。Forthを説明するためには、C言語やアセンブリなど、他の言語を使わなければならないのです。これが、当初のeForth Modelの意図でした。

Chapter 2. Running ceForth

2年前、私の以前の本やForthの実装の入手状況を尋ねられたことがあります。紙の本はほとんどなくなっていた。コンピュータに保存してある電子的なコピーは時代遅れになっているようでした。それらはすべて、新しいコンピュータで新しいフォーマットで、新しい命を求めて声高に叫んでいたのです。

私の86eForth 1.0は最悪でした。これは1990年にPC-DOSコンピュータ上でMASMによってコンパイルされたものです。MASMはとっくに製造中止になっていたのも、私はそれを復活させるためのより良い方法を見つけなければなりません。そんなとき、MASMはまだ使えるが、Visual StudioのC++の陰に隠れていることを知りました。

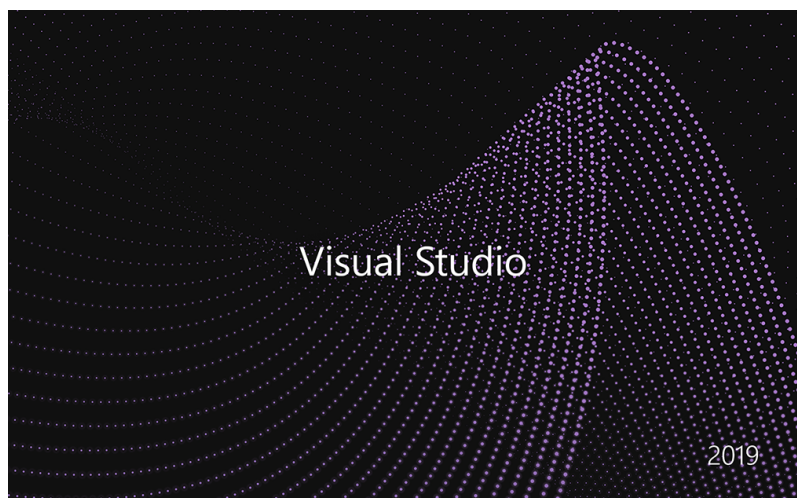
ceForth 1.0と1.1はcygwin上のgccで開発されました。CygwinはPC上で動く不自由なLinuxでしたが、Windowsとは異質なシステムでした。コンパイルや実行の仕方をすっかり忘れていた。Visual Studioに移行する時期が来ました。

Install Visual Studio 2019 Community

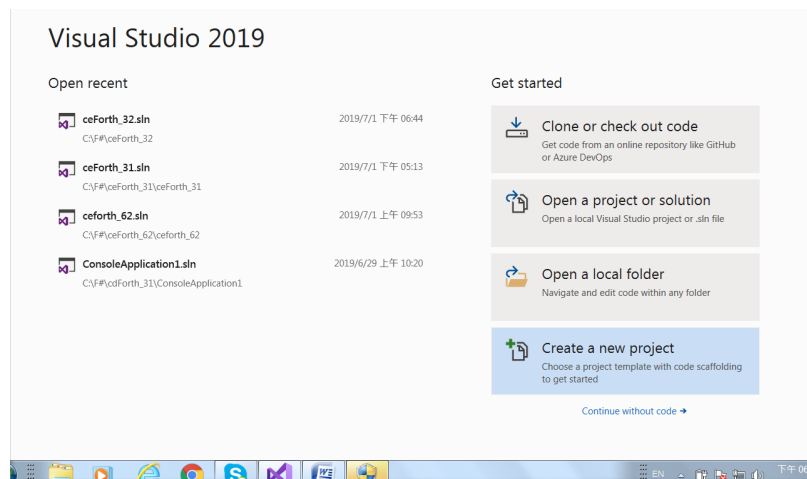
ceForth 1.0は、Visual Studio 2017 CommunityでceForth_23にバージョンアップされました。その後、Visual Studio 2019 CommunityでceForth_33にバージョンアップしています。

ceForth_33.cppは、Visual Studio C++のWindows Console Applicationです。Visual Studio C++でコンパイルし、Windows上で実行するための合理的なC言語プログラムです。ceForthを実行するには、まずVisual Studio IDEをインストールする必要があります。その後、ceForth_33.cppをコピーして、実行させることができます。

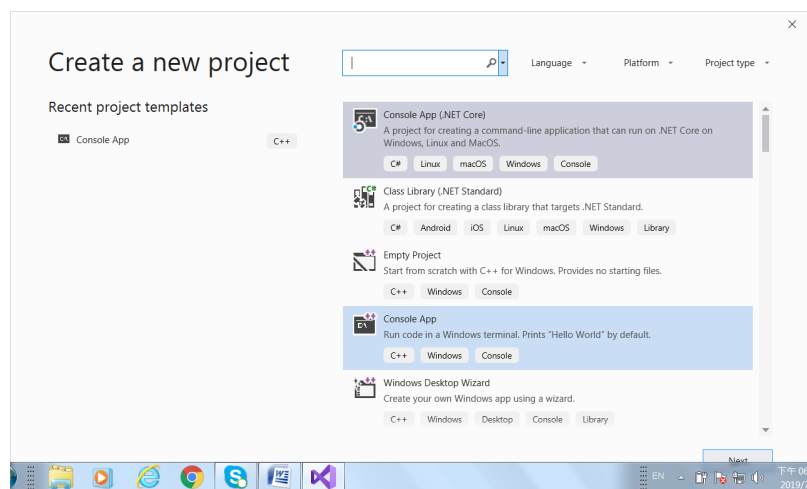
Visual Studio 2019 Communityをwww.microsoft.com からダウンロードし、PCにインストールします。Visual Studioを開くと、そのロゴページが表示されます。



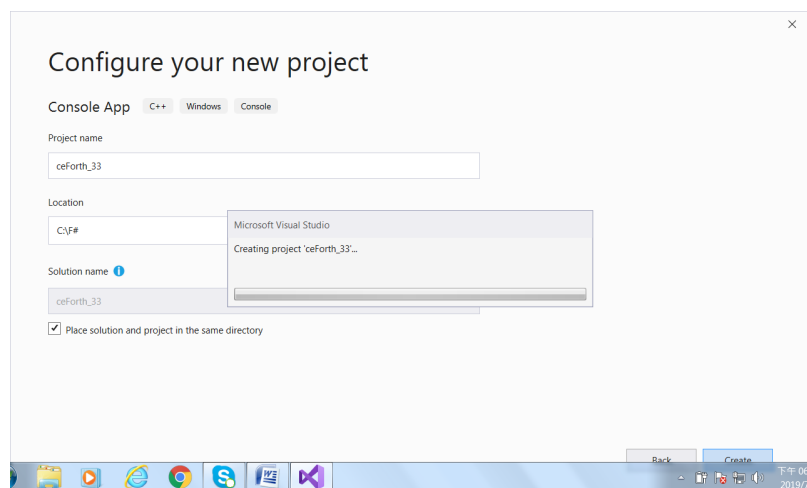
しばらくすると、そのスタートページが表示されます。



"新しいプロジェクトを作成する"をクリックします。



新しいプロジェクトを作成するパネルで、Console Appを選択します。すると、プロジェクトの設定ページが表示されます。



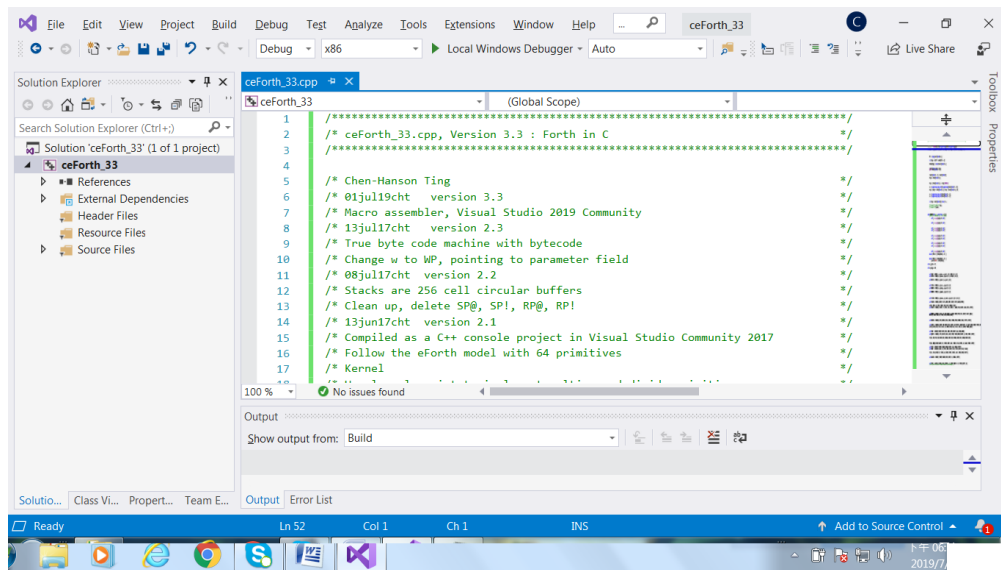
[プロジェクト名]ボックスに、ceForth_33と入力します。Locationボックスで、プロジェクトを保存するファイルフォルダを選択するか、または任意のフォルダをブラウズしてください。

右下の作成ボタンをクリックすると、新しいceForth_33プロジェクトが作成されます。

Visual Studioはあなたのために新しいプロジェクトを作成し、テンプレートファイルceForth_33.cppを提供します。 ceForth_33.zipファイルに入っているceForth_33.cppの内容をコピーし、ceForth_33.cpp編集パネルに貼り付けてください。

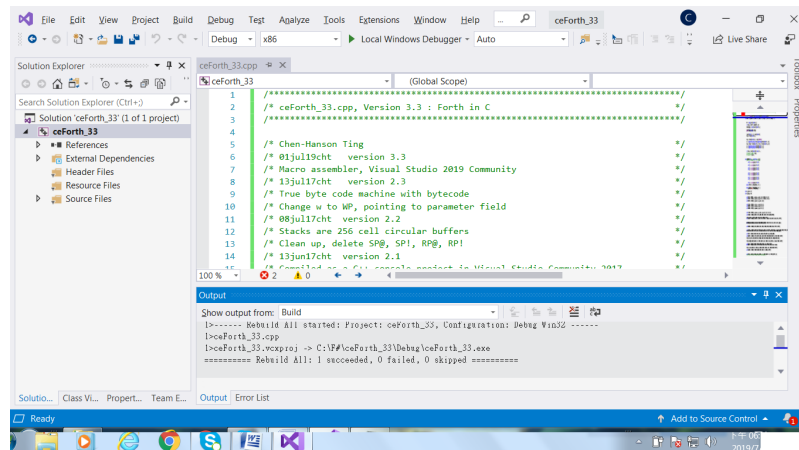
Compile ceForth

これで、ceForth_33.cppがEdit Panelに表示されました。



Build>Rebuild Solution をクリックすると、Visual Studio は作業を開始します。しばらくすると、出力パネルに進捗状況が数行表示され、このメッセージで終了します。

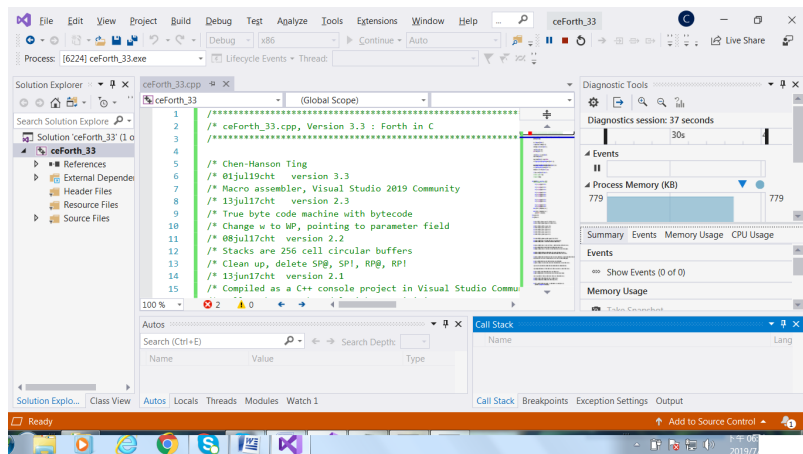
===== Rebuild All, 1 succeeded, 0 failed, 0 skipped =====



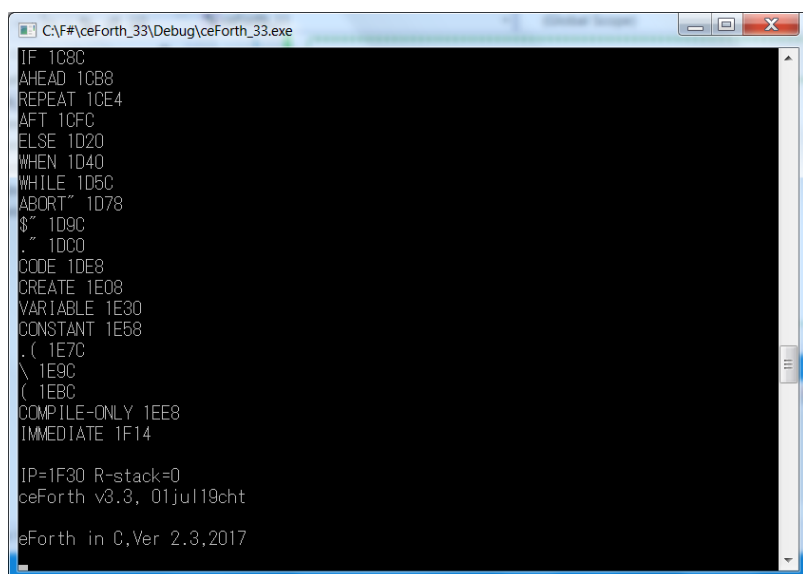
すべて順調です。テストの準備ができました。

Test ceForth

Debug>Start without debuggingをクリック。もう少し待ちます。最後に、Debug ウィンドウが表示されます。

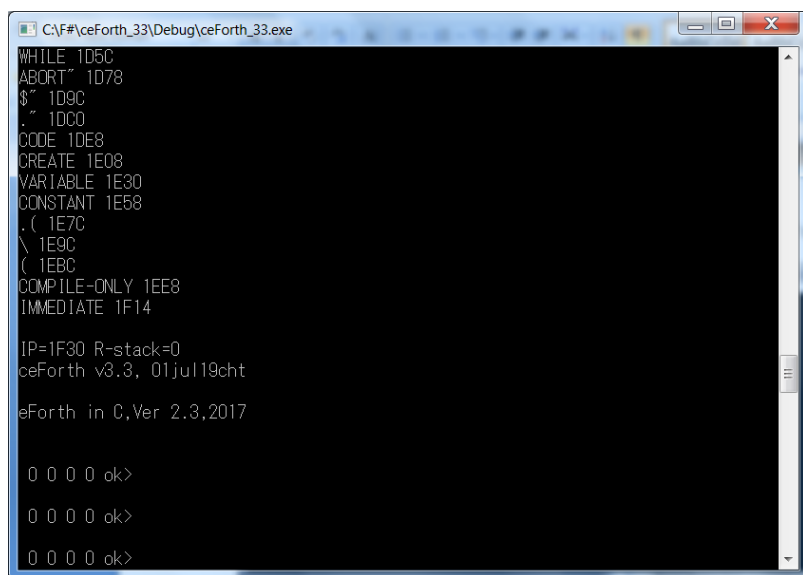


その上に、Console Windowがあります。



成功！ceForthは実行されています。

Enterキーを何回か押すと、ceForthは空のスタックを表示し、'ok>'のプロンプトを表示します。



WORDSと入力すると、ceForthの完全なシステムを表すワード名の画面が表示されます。


```

C:\F#\ceForth_33\Debug\ceForth_33.exe
0 0 0 0 ok>
0 0 0 0 ok>
0 0 0 0 ok>words
words
IMMEDIATE COMPILER-ONLY ( \ .( CONSTANT VARIABLE CREATE CODE ." $"
ABORT" WHILE WHEN ELSE AFT REPEAT AHEAD IF AGAIN UNTIL NEXT
BEGIN FOR THEN COLD FORGET WORDS .ID >NAME DUMP dm+ ;
: ] OVERT $COMPILE COMPILE [COMPILE] ' $.n ?UNIQUE $. ALLOT
LITERAL . QUIT EVAL .OK [ $INTERPRET ERROR abort" ABORT QUERY
EXPECT ACCEPT kTAP TAP ^H NAME? find SAME? NAME> WORD TOKEN
PARSE PACK$ (parse) ? . U. U.R .R ."| $"| do$
CR TYPE SPACES CHARS SPACE NUMBER? DIGIT? >upper wupper DECIMAL HEX
str #> SIGN #S # HOLD <# EXTRACT DIGIT FILL MOVE
CMOVE @EXECUTE TIB PAD HERE ALIGNED >CHAR WITHIN EMIT KEY ?KEY
DOVAR 1- 1+ CELL/ CELLS CELL- CELL+ CELL BL MIN MAX
COUNT 2@ 2! +! PICK */ */MOD M* * UM* /
MOD /MOD M/MOD UM/MOD < U< = ABS - DNEGATE NEGATE
NOT + 2DUP 2DROP ROT ?DUP NEXT UM+ XOR OR AND
O< OVER SWAP DUP DROP >R R@ R> C@ C! @
! BRANCH OBRANCH DONEXT EXECUTE EXIT DOLIST DOLIT DOCON TX! ?RX
BYE NOP tmp 'ABORT 'EVAL LAST CP CONTEXT BASE 'TIB #TIB
>IN SPAN HLD
0 0 0 0 ok>

```

さて、この世界共通の挨拶語を入力してください。

```
: TEST CR ." HELLO, WORLD!" ;
```

と入力し、TESTと入力します。

```

C:\F#\ceForth_33\Debug\ceForth_33.exe
words
IMMEDIATE COMPILER-ONLY ( \ .( CONSTANT VARIABLE CREATE CODE ." $"
ABORT" WHILE WHEN ELSE AFT REPEAT AHEAD IF AGAIN UNTIL NEXT
BEGIN FOR THEN COLD FORGET WORDS .ID >NAME DUMP dm+ ;
: ] OVERT $COMPILE COMPILE [COMPILE] ' $.n ?UNIQUE $. ALLOT
LITERAL . QUIT EVAL .OK [ $INTERPRET ERROR abort" ABORT QUERY
EXPECT ACCEPT kTAP TAP ^H NAME? find SAME? NAME> WORD TOKEN
PARSE PACK$ (parse) ? . U. U.R .R ."| $"| do$
CR TYPE SPACES CHARS SPACE NUMBER? DIGIT? >upper wupper DECIMAL HEX
str #> SIGN #S # HOLD <# EXTRACT DIGIT FILL MOVE
CMOVE @EXECUTE TIB PAD HERE ALIGNED >CHAR WITHIN EMIT KEY ?KEY
DOVAR 1- 1+ CELL/ CELLS CELL- CELL+ CELL BL MIN MAX
COUNT 2@ 2! +! PICK */ */MOD M* * UM* /
MOD /MOD M/MOD UM/MOD < U< = ABS - DNEGATE NEGATE
NOT + 2DUP 2DROP ROT ?DUP NEXT UM+ XOR OR AND
O< OVER SWAP DUP DROP >R R@ R> C@ C! @
! BRANCH OBRANCH DONEXT EXECUTE EXIT DOLIST DOLIT DOCON TX! ?RX
BYE NOP tmp 'ABORT 'EVAL LAST CP CONTEXT BASE 'TIB #TIB
>IN SPAN HLD
0 0 0 0 ok>: TEST CR ." HELLO, WORLD!" ;
: TEST CR ." HELLO, WORLD!" ;
0 0 0 0 ok>TEST
TEST
HELLO, WORLD!
0 0 0 0 ok>

```

これでceForthは完全に機能するようになりました。

Chapter 3. ceForth Virtual Forth Engine

ceForth_33.cpp

ファイルceForth_33.cppは、Visual Studio IDEでコンパイルし、Windowsコンソールアプリケーションとして実行することができるC++プログラムです。このファイルは、Virtual Forth Engineの仕様として、C関数の観点から完璧に機能しています。

ceForthに直接入る前に、Virtual Firth Machine (VFM)を配したForthシステムの概要を説明し、全体がどのように実装されているかをより良く理解していただきたいと思います。

- VFMは、バイトコード形式の擬似命令群を実行します。
- すべてのForthのワードやコマンドは、辞書と呼ばれる大きなデータ配列に格納されています。
- 各ワードはレコードを持つ。すべてのレコードは、辞書内でリンクされています。
- 各ワードのレコードは、リンクフィールド、名前フィールド、コードフィールド、パラメータフィールドの4つのフィールドを含んでいます。リンクフィールドと名前フィールドは、そのASCII名から辞書を検索することができる。コードフィールドは、実行可能なバイトコードを含む。パラメータフィールドには、そのワードが必要とするオプションのコードやデータが入ります。
- ワードには、実行可能なバイトコードを含むプリミティブワードと、トークン・リストを含むコロンのワードの2種類があります。トークンは、ワードのコードフィールドを指すコードフィールドアドレスです。
- シーケンサは、プリミティブ・ワードのコード・フィールドに格納されたバイト・コード・シーケンスを実行します。
- 内部インタプリタは、プリミティブ・ワードを終了させ、トークン・リストの次のトークンを実行する。
- アドレスインタプリタは、ネストされたトークンリストを実行する。
- トークンリストの入れ子処理には、リターンスタックが必要です。
- ワード間のパラメータ受け渡しにデータスタックが必要
- テキストインタプリタは、ターミナルから入力されたワードリストを処理する。
- コンパイラはワードリストを新しいForthワードに変換します。

テキストインタプリタは、スペースで区切られたForth語のリストを解釈または実行します。

```
<list of words>
```

また、ワードのリストを置き換えるために新しいワードを作成するコンパイラのような機能もあります。

```
: <name> <list of words> ;
```

コンパイルはコロン「:」で始まり、セミコロン「;」で終わるので、これらの新しいワードはコロンワードと呼ばれます。コロン「:」とセミコロン「;」もまたForthのワードである。計算可能な問題はすべて、既存のワードのリストを置き換えるために新しいワードを繰り返し作ることによって解くことができる。これは自然言語と非常によく似ている。新しいワードは、既存のワードのリストを置き換えるために作られる。思考やアイデアはこのようにしてより高いレベルへと抽象化される。本当の知性は、深くネストされたリストで表現するのが一番です。Forthは、人工知能とは対照的に、本物の知能である。また、Forthは、あらゆる計算可能な問題に対して、解の空間を広く探索し、最適な解に到達するための最も単純で最も効率的な方法である。では、このVFMが実際にどのように実装されているのか、ceForth_33.cppのソースコードを読んでみましょう。

Preamble

ceForth_33.cppの冒頭には、ceForthの実装の進捗を記録するために、いくつかのコメント行を入れました。コメントの後に、ヘッダーファイルを取り込むためのinclude命令と、残りのCコードのコンパイルを容易にするためのマクロがいくつかあります。

```
//Preamble
#include <stdlib.h>
#include <stdio.h>
#include <tchar.h>
#include <stdarg.h>
#include <string.h>
# define FALSE 0
# define TRUE -1
# define LOGICAL ? TRUE : FALSE
# define LOWER(x,y) ((unsigned long)(x)<(unsigned long)(y))
# define pop top = stack[(char) S--]
# define push stack[(char) ++S] = top; top =
# define popR rack[(unsigned char)R--]
# define pushR rack[(unsigned char)++R]
```

`<stdlib.h>`、`<tchar.h>`、`<stdio.h>`は、ceForthが必要とする標準ライブラリのヘッダーファイルです。`<stdarg.h>`は、可変パラメータリストを持つマクロ関数のために必要です。`<string.h>`は、文字列の長さを決定する`strlen()`に必要なファイルである。

FALSEフラグのデフォルトは0、TRUEフラグのデフォルトは-1です。ただし、フラグを生成するすべてのceForthワードは、TRUEの場合は-1を返します。LOGICALは、論理語に対して上記の方針を強制し、正しいTRUEとFALSEのフラグを返すようにしたマクロです。

`LOWER(x,y)` は `x<y` ならば TRUE フラグを返します。

`pop`は、データスタックをレジスタやメモリ位置にポップするためによく使われる操作をストリームライン化したマクロです。データタックの先頭要素はレジスタ `top` にキャッシュされるため、`pop` はより複雑になりますが、`pop` マクロは私の意図を明確にするのに役立ちます。

同様に、`push`はレジスタやメモリ上のコンテンツをデータスタックにプッシュするマクロです。実際には、トップ・レジスタの内容をデータ・スタックにプッシュし、ソース・データをトップ・レジスタにコピーする必要があります。

`pushR` はレジスタやメモリ上のコンテンツをリターンスタックにプッシュするマクロで、`popR` はその逆を行います。リターンスタックは、コンパイル時にコロンワードのトークンリストにある制御構造をコンパイルしやすくするために作成されました。実行時には、トークンがネストしたトークンを呼び出すことができるように、リターンスタックはネストしたリターンアドレスをホストしています。

Registers and Arrays

ceForthは、ワードの辞書を保持するために大きなデータ配列を使っています。この配列には、たくさんの変数やバッファが宣言されています。このデータ配列の他に、VFMはすべての操作をサポートするために、データを保持する多くのレジスタと配列を必要とします。以下は、これらのレジスタと配列のリストです。

```
long rack[256] = { 0 };
long stack[256] = { 0 };
long long int d, n, m;
unsigned char R = 0;
unsigned char S = 0;
```

```
long top = 0;
long P, IP, WP, thread, len;
unsigned char c;
long data[16000] = {};
unsigned char* cData = (unsigned char*)data;
```

これらのレジスタおよび配列の機能を次の表で説明します。

Register/Array	Functions
P	プログラムカウンタ、data[]内の疑似命令を指し示す。
IP	アドレス・インタプリタ用の命令ポインタ
WP	作業レジスタ。通常はパラメータ・フィールドを指します。
rack[]	リターンスタック(256セルの循環バッファ)
stack[]	データスタック(256セルの循環バッファ)
R	1バイトのリターン・スタック・ポインタ
S	1バイトのデータスタックポインタ
top	データスタックのキャッシュされたトップエレメント
c	8ビットスクラッチレジスタ
data[]	16000個の整数からなる巨大なデータ配列
cData[]	バイトアクセスするための data[] 配列のエイリアス

ceForth_33 では、`stack[256]` と `rack[256]` にそれぞれ 1KB のメモリを割り当て、`S` と `R` にそれぞれバイトポインタを使用しました。しかし、Cコンパイラは、スタックポインタが8ビット値であり、整数にリークしてはならないことを常に注意する必要がある。`R` と `S` のポインタは常に (unsigned char) 指定を前置しなければならない。このため、スタックが境界を越えることはありません。スタックオーバーフロー、スタックアンダーフローは生じません。

ceForth_33インタープリタは、データスタックの上位4要素を表示します。常にこの4つの要素を見ることができるので、データスタックをダンプしたり、調べたりするユーティリティは必要ありません。スタックに循環バッファを使うことで、4バイトのコード、約10個のスタック管理語、そして1トンの心配を省くことができました。

Forthのワードはすべて`data[16000]`配列にリンクリストとして格納されており、一般に辞書と呼ばれる。このリストの各レコードは、32ビットのリンクフィールド、可変長の名前フィールド、32ビットのコードフィールド、可変長のパラメータフィールドの4つのフィールドを含んでいます。プリミティブワードでは、パラメータフィールドは追加のバイトコードを含むことができる。高レベルのコロンワードでは、コードフィールドは、後続のパラメータフィールドのトークンリストを入れ子にするためのバイトコード6を持つ。トークンはコードフィールドのアドレスであり、他のForthワードを指します。

`data[]` 配列の辞書は、マクロアセンブラによって埋められます。マクロアセンブラは可変長のバイトフィールドと可変長の整数フィールドの両方を埋める必要があるため、バイト配列の別名として`cData[]`を持つ

ています。**P**はバイトコードプログラムカウンタであり、バイト配列**cData[]**のインデックスに使用されます。**IP**は命令ポインタまたは整数ポインタであり、整数配列**data[]**のインデックスに使用される。

後ほど、マクロアセンブラを説明するとともに、この辞書がどのように構築されるかを説明します。

Virtual Forth Machine (VFM)

次に、C言語の関数としてコード化されたすべてのVFM疑似命令が出てきます。それぞれの疑似命令には、バイトコードが割り当てられます。バイトコードシーケンサや有限状態機械は、辞書にあるプリミティブワードのコードフィールドに置かれたバイトコードを実行するように設計されています。バイトコードはVFMの機械命令であり、実際のコンピュータの機械命令と同じである。

// Virtual Forth Machine

bye (--) ForthからWindowsに制御を戻す。Forth用に開いたWindowsコンソールを閉じます。

```
void bye(void)
{
    exit(0);
}
```

qrx (-- c T|F) 文字と、その文字が受信された場合の真フラグを返す。文字を受信しなかった場合、falseフラグを返す

```
void qrx(void)
{
    push(long) getchar();
    if (top != 0) push TRUE;
}
```

txsto (c --) シリアルターミナルに文字を送信する。

```
void txsto(void)
{
    putchar((char)top);
    pop;
}
```

next() は、Virtual Forth Machineの内部インタプリタである。トークンリストの次のトークンを実行する。これはコード・フィールド・アドレスである次のトークンを読み、それをプログラム・カウンタ **P** にデポジットします。また、**P+4**をワークレジスタ**WP**に格納し、このワードのパラメータフィールドを指し示す。**WP**は、コロンワードのトークンリストやパラメータフィールドに格納されているデータを取り出すのに役立つ。

```
void next(void)
{
    P = data[IP >> 2];
    WP = P + 4;
    IP += 4;
}
```

dovar (-- a) WP レジスタに保存されているパラメータフィールドアドレスを返します。

```
void dovar(void)
{
    push WP;
}
```

docon (-- n) 定数ワードのパラメータフィールドに格納されている整数を返す。

```
void docon(void)
{
    push data[WP >> 2];
}
```

dolit (-- w) 次のトークンを整数リテラルとしてデータスタックにプッシュします。これにより、数値はインラインリテラルとしてコンパイルされ、実行時にデータスタックにデータを供給することができる。

```
void dolit(void)
{
    push data[IP >> 2];
    IP += 4;
    next();
}
```

dolist (--) 現在の命令ポインタ(IP)をリターンスタックにプッシュし、データスタックからIPにプログラムカウンタPをポップする。next()が実行されると、リスト内のトークンが連続実行される。

```
void dolist(void)
{
    rack[(char)++R] = IP;
    IP = WP;
    next();
}
```

exit (--) コロン・ワードのトークン・リストをすべて終了させる。EXITは、リターンスタックに保存された実行アドレスをIPレジスタにポップバックし、コロンワードが入力される前の状態を復元する。呼

び出したトークンリストの実行は継続される。

```
void exitt(void)
{
    IP = (long)rack[(char)R--];
    next();
}
```

execu (a --) データスタックから実行アドレスを取り出し、そのトークンを実行する。この強力なワードを使えば、トークン・リストにないトークンでも実行できる。

```
void execu(void)
{
    P = top;
    WP = P + 4;
    pop;
}
```

donext (--) FOR-NEXTループを終了させる。ループカウンタはリターンスタックにプッシュされ、donextによってデクリメントされる。カウンタが負でなければ、donext に続くアドレスにジャンプし、そうでなければ、リターンスタックからカウンタをポップして、ループを抜ける。

```
void donext(void)
{
    if (rack[(char)R]) {
        rack[(char)R] -= 1;
        IP = data[IP >> 2];
    }
    else {
        IP += 4;
        R--;
    }
    next();
}
```

qbran (f --) topをデータスタック上のフラグとしてテストする。0であればqbranに続くアドレスに分岐し、そうでなければそのアドレスに続くトークンリストの実行を継続する。

```
void qbran(void)
{
    if (top == 0) IP = data[IP >> 2];
    else IP += 4;
    pop;
    next();
}
```

bran (--) bran の次のアドレスに分岐します。

```
void bran(void)
{
    IP = data[IP >> 2];
    next();
}
```

store (n a --) 整数nをメモリ位置aに格納する。

```
void store(void)
{
    data[top >> 2] = stack[(char)S--];
    pop;
}
```

at (a -- n) メモリアドレスaを、この位置から取り出した整数の内容で置き換える。

```
void at(void)
{
    top = data[top >> 2];
}
```

cstor (c b --) バイト値cをメモリ位置bに格納する。

```
void cstor(void)
{
    cData[top] = (char)stack[(char)S--];
    pop;
}
```

cat (b -- n) バイトメモリアドレスbを、この場所から取り出したバイトの内容で置き換える。

```
void cat(void)
{
    top = (long)cData[top];
}
```

rfrom (n --) データスタックから数値をポップし、リターンスタックにプッシュします。


```
void rfrom(void)
{
    push rack[(char)R--];
}
```

rat (-- n) リターンスタックから数値をコピーして、リターンスタックにプッシュします。

```
void rat(void)
{
    push rack[(char)R];
}
```

tor (-- n) リターンスタックから数値をポップし、データスタックにプッシュします。

```
void tor(void)
{
    rack[(char)++R] = top;
    pop;
}
```

drop (w --) スタックの一番上のアイテムを破棄します。

```
void drop(void)
{
    pop;
}
```

dup (w -- w w) スタックの先頭の項目を複製する。

```
void dup(void)
{
    stack[(char) ++S] = top;
}
```

swap (w1 w2 -- w2 w1) スタックの上位2項目を交換する。

```
void swap(void)
{
    WP = top;
    top = stack[(char)S];
    stack[(char)S] = WP;
}
```

`over (w1 w2 -- w1 w2 w1)` 2 番目のスタックアイテムを先頭にコピーする。

```
void over(void)
{
    push stack[(char)S - 1];
}
```

`zless (n - f)` データスタックの一番上の項目が負であるかどうかを調べる。負の場合は -1 を返す。0 または正の場合は、0を返して偽とする。

```
void zless(void)
{
    top = (top < 0) LOGICAL;
}
```

`andd (w w -- w)` ビット単位のAND。

```
void andd(void)
{
    top &= stack[(char)S--];
}
```

`orr (w w -- w)` ビット単位の包括的論理和。

```
void orr(void)
{
    top |= stack[(char)S--];
}
```

`xorr (w w -- w)` ビット単位の排他的論理和。

```
void xorr(void)
{
    top ^= stack[(char)S--];
}
```

`uplus (w w -- w cy)` 2つの数値を加算し、その和とキャリーフラグを返します。

```
void uplus(void)
{
```

```
    stack[(char)S] += top;
    top = LOWER(stack[(char)S], top);
}
```

nop (--) 操作なし。

```
void nop(void)
{
    next();
}
```

qdup (w -- w w | 0) スタックの先頭が0でなければ、Dupする。

```
void qdup(void)
{
    if (top) stack[(char) ++S] = top;
}
```

rot (w1 w2 w3 -- w2 w3 w1) 3番目の項目を一番上に回転させる。

```
void rot(void)
{
    WP = stack[(char)S - 1];
    stack[(char)S - 1] = stack[(char)S];
    stack[(char)S] = top;
    top = WP;
}
```

ddrop (w w --) スタック上のアイテムを2つ捨てる。

```
void ddrop(void)
{
    drop(); drop();
}
```

ddup (w1 w2 -- w1 w2 w1 w2) 上位2項目を複製する。

```
void ddup(void)
{
    over(); over();
}
```

plus (w w -- sum) 上2つの項目を追加する。

```
void plus(void)
{
    top += stack[(char)S--];
}
```

inver (w -- w) topの1の補数。

```
void inver(void)
{
    top = -top - 1;
}
```

negat (n -- -n) topの2の補数。

```
void negat(void)
{
    top = 0 - top;
}
```

dnega (d -- -d) トップダブルの2の補数。

```
void dnega(void)
{
    inver();
    tor();
    inver();
    push 1;
    uplus();
    rfrom();
    plus();
}
```

subb (n1 n2 -- n1-n2) 減算。

```
void subb(void)
{
    top = stack[(char)S--] - top;
}
```

abss (n -- n) nの絶対値を返す。

```
void abss(void)
{
    if (top < 0)
        top = -top;
}
```

great (n1 n2 -- t) 上位 2 項目の符号付き比較。n1>n2 ならば真を返す。

```
void great(void)
{
    top = (stack[(char)S--] > top) LOGICAL;
}
```

less (n1 n2 -- t) 上位 2 項目の符号付き比較。n1<n2 ならば真を返す。

```
void less(void)
{
    top = (stack[(char)S--] < top) LOGICAL;
}
```

equal (w w -- t) 上の二つが等しいとき、true を返す。

```
void equal(void)
{
    top = (stack[(char)S--] == top) LOGICAL;
}
```

unless (u1 u2 -- t) 上位 2 項目の符号なし比較。

```
void unless(void)
{
    top = LOWER(stack[(char)S], top) LOGICAL; (char)S--;
}
```

ummod (ud1 udh u -- ur uq) 符号無しで double を single で割ったもの。modと商を返す。

```
void ummod(void)
{
    d = (long long int)((unsigned long)top);
    m = (long long int)((unsigned long)stack[(char)S]);
    n = (long long int)((unsigned long)stack[(char)S - 1]);
    n += m << 32;
```

```

    pop;
    top = (unsigned long)(n / d);
    stack[(char)S] = (unsigned long)(n % d);
}

```

msmod (d n -- r q) 符号付き打ち切り除算(signed floored divide)によるdoubleのsingleによる除算。
modと商を返す。

```

void msmod(void)
{
    d = (signed long long int)((signed long)top);
    m = (signed long long int)((signed long)stack[(char)S]);
    n = (signed long long int)((signed long)stack[(char)S - 1]);
    n += m << 32;
    pop;
    top = (signed long)(n / d);
    stack[(char)S] = (signed long)(n % d);
}

```

slmod (n1 n2 -- r q) 符号付き除算。modと商を返す。

```

void slmod(void)
{
    if (top != 0) {
        WP = stack[(char)S] / top;
        stack[(char)S] %= top;
        top = WP;
    }
}

```

mod (n n -- r) 符号付き除算。modのみを返す。

```

void mod(void)
{
    top = (top) ? stack[(char)S--] % top : stack[(char)S--];
}

```

slash (n n -- q) 符号付き除算。商のみを返す。

```

void slash(void)
{
    top = (top) ? stack[(char)S--] / top : (stack[(char)S--], 0);
}

```

umsta (u1 u2 -- ud) 符号なし乗算。double の積を返す。

```
void umsta(void)
{
    d = (unsigned long long int)top;
    m = (unsigned long long int)stack[(char)S];
    m *= d;
    top = (unsigned long)(m >> 32);
    stack[(char)S] = (unsigned long)m;
}
```

star (n n -- n) 符号付き乗算。単長の積を返します。

```
void star(void)
{
    top *= stack[(char)S--];
}
```

mstar (n1 n2 -- d) 符号付き乗算。double の積を返します。

```
void mstar(void)
{
    d = (signed long long int)top;
    m = (signed long long int)stack[(char)S];
    m *= d;
    top = (signed long)(m >> 32);
    stack[(char)S] = (signed long)m;
}
```

ssmod (n1 n2 n3 -- r q) n1 と n2 を掛け、n3 で割る。modと商を返す。

```
void ssmod(void)
{
    d = (signed long long int)top;
    m = (signed long long int)stack[(char)S];
    n = (signed long long int)stack[(char)S - 1];
    n *= m;
    pop;
    top = (signed long)(n / d);
    stack[(char)S] = (signed long)(n % d);
}
```

stas1 (n1 n2 n3 -- q) n1 を n2 で乗算し、n3 で除算する。商のみを返す。


```
void stasl(void)
{
    d = (signed long long int)top;
    m = (signed long long int)stack[(char)S];
    n = (signed long long int)stack[(char)S - 1];
    n *= m;
    pop; pop;
    top = (signed long)(n / d);
}
```

pick (... +n -- ... w) スタックのn番目の項目を先頭にコピーします。

```
void pick(void)
{
    top = stack[(char)S - (char)top];
}
```

pstor (n a --) Add n to the contents at address a.

```
void pstor(void)
{
    data[top >> 2] += stack[(char)S--], pop;
}
```

dstor (d a --) Store the double integer to address a.

```
void dstor(void)
{
    data[(top >> 2) + 1] = stack[(char)S--];
    data[top >> 2] = stack[(char)S--];
    pop;
}
```

dat (a -- d) Fetch double integer from address a.

```
void dat(void)
{
    push data[top >> 2];
    top = data[(top >> 2) + 1];
}
```

count (b -- b+1 +n) 文字列のバイト数を返し、バイト・アドレスに1を加える。

```
void count(void)
{
    stack[(char) ++S] = top + 1;
    top = cData[top];
}
```

maxx (n1 n2 -- n) スタックの先頭の2つの項目のうち、大きい方を返す。

```
void max(void)
{
    if (top < stack[(char)S]) pop;
    else (char)S--;
}
```

minn (n1 n2 -- n) スタックの上位2項目のうち小さい方を返す。

```
void min(void)
{
    if (top < stack[(char)S]) (char) S--;
    else pop;
}
```

Byte Code Array

VFMには、先に示したように64個の関数が定義されています。これらの関数にはそれぞれ固有のバイトコードが割り当てられており、これがこのVFMの擬似命令となる。辞書には、このバイトコードをコードフィールドに持つプリミティブワードが存在します。このバイトコードは、プリミティブワードが非常に複雑な場合、後続のパラメータフィールドに波及することがあります。VFMには、後述するバイトコードシーケンサがあり、バイトコードリストを順番に表示します。primitives[]配列の中のバイトコードの番号付けは、順序を意識していません。

バイトコードは64個だけ定義されています。必要であれば256まで拡張することができます。VFMを拡張するためにC言語でさらに関数を書くか、後述するメタコンパイラを使ってさらにプリミティブワードを組み立てるか、あるいは、さらに簡単なやり方としてForthでコロワードを組み立てるという選択肢があります。異なる方法で定義された同じ関数は、同じように動作するはずです。ただ、実行速度が違うだけで、プログラミングの労力に反比例する。

```
void(*primitives[64])(void) = {
    /* case 0 */ nop,
    /* case 1 */ bye,
    /* case 2 */ qrx,
    /* case 3 */ txsto,
    /* case 4 */ docon,
    /* case 5 */ dolit,
    /* case 6 */ dolist,
```

```
/* case 7 */ exitt,  
/* case 8 */ execu,  
/* case 9 */ donext,  
/* case 10 */ qbran,  
/* case 11 */ bran,  
/* case 12 */ store,  
/* case 13 */ at,  
/* case 14 */ cstor,  
/* case 15 */ cat,  
/* case 16 rpat, */ nop,  
/* case 17 rpsto, */ nop,  
/* case 18 */ rfrom,  
/* case 19 */ rat,  
/* case 20 */ tor,  
/* case 21 spat, */ nop,  
/* case 22 spsto, */ nop,  
/* case 23 */ drop,  
/* case 24 */ dup,  
/* case 25 */ swap,  
/* case 26 */ over,  
/* case 27 */ zless,  
/* case 28 */ andd,  
/* case 29 */ orr,  
/* case 30 */ xorr,  
/* case 31 */ uplus,  
/* case 32 */ next,  
/* case 33 */ qdup,  
/* case 34 */ rot,  
/* case 35 */ ddrop,  
/* case 36 */ ddup,  
/* case 37 */ plus,  
/* case 38 */ inver,  
/* case 39 */ negat,  
/* case 40 */ dnegat,  
/* case 41 */ subb,  
/* case 42 */ abss,  
/* case 43 */ equal,  
/* case 44 */ uless,  
/* case 45 */ less,  
/* case 46 */ ummod,  
/* case 47 */ msmod,  
/* case 48 */ slmod,  
/* case 49 */ mod,  
/* case 50 */ slash,  
/* case 51 */ umsta,  
/* case 52 */ star,  
/* case 53 */ mstar,  
/* case 54 */ ssmod,  
/* case 55 */ stasl,  
/* case 56 */ pick,  
/* case 57 */ pstor,  
/* case 58 */ dstor,  
/* case 59 */ dat,  
/* case 60 */ count,
```

```
/* case 61 */ dovar,
/* case 62 */ max,
/* case 63 */ min,
};
```

マクロアセンブラとそれが構築する辞書のすべてをceForth_33.cppの終わりまで飛ばして、Virtual Forth Machineがどのように実行を開始するかを見てみましょう。次のコードは、起動ベクタを設定しています。

```
IP = 0;
int RESET = LABEL(2, 6, COLD);
```

基本的にはVFMにForthのCOLDワードを実行するように指示し、COLDワードはForthインタプリタを起動させます。VFMの実行を開始するには、Visual Studioが要求するmain()関数内で、レジスタP、WP、IP、S、R、topを初期化する必要があります。Pは0に設定されているので、仮想メモリ位置0に格納されているバイトコードを実行することで実行が開始されます。

```
/*
 * Main Program
 */
int main(int ac, char* av[])
{
    P = 0;
    WP = 4;
    IP = 0;
    S = 0;
    R = 0;
    top = 0;
    printf("\nceForth v2.3, 13jul17cht\n");
    while (TRUE) {
        primitives[(unsigned char)cData[P++]()];
    }
}
```

while(TRUE)ループは永遠にループする。各ループを通過するごとに、有限状態マシンはPが指す次のバイトコードを読み込みます。次のバイトコードが読み込まれ、実行される。といった具合です。これは、メモリに格納された機械命令を順番に実行していく本物のコンピュータと同じように動作します。

Chapter 3. Forth Dictionary

Forthはコンピュータをプログラムするためのプログラミング言語ですが、英語のような自然言語に非常によく似ています。Forthには、英語のワードと同じようなワードがあります。したがって、Forthのワードはワードと呼ばれます。Forthの文法規則は非常に単純で、ワードは空白で区切られます。Forthのコンピュータは、ワードのリストを処理し、左から右へワードを実行していく。英語と同じで、文章を左から右へ読んでいくのです。

Forthは自然言語のようなもので、新しいワードは既存のワードに基づき定義されます。新しいワードを追加することで言語が拡張され、より高い抽象度へと押し上げられ、最終的にはすべての計算可能な問題を解決することができるのです。これは最も単純で最も強力な知性の形態であり、本質的に人間が思考し、推論し、コミュニケーションし、知識を蓄積する方法なのである。

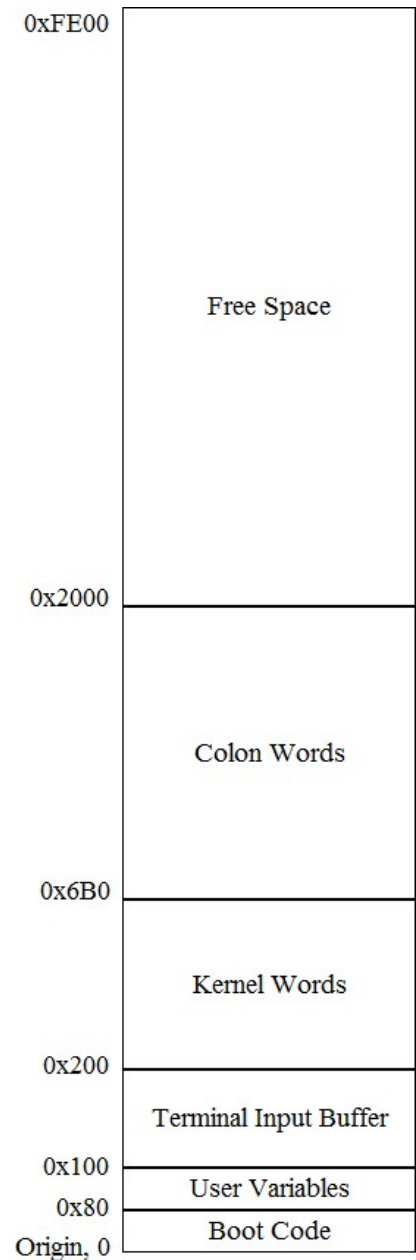
Forthをより詳しく、正確に説明すると、以下のようになります。

- Forthは、ワードや言葉のセットを持ちます。
- Forthのワードは、辞書と呼ばれるコンピュータのメモリ領域に格納されたレコードである。
- Forthのワードは、ASCII文字による名前という外部表現と、メモリに格納された実行コードを呼び出すトークン形式という内部表現の2つの表現を持っています。
- Forthのワードには、機械命令を含むプリミティブワードと、トークンリストを含むコロンワードの2つの主要なタイプがあります。
- Forthは、ワードのリストをスキャンし、ワードのトークンを見つけ、左から右の順序でトークンを実行するテキストインタプリタを備えています。
- Forthにはコンパイラがあり、トークンのリストを新しいワードに置き換えるようにコンパイルします。
- トークンはしばしばネストされたトークンリストになる。このため、トークンリストのネスト処理やアンネスト処理のために、リターンスタックが必要である。
- Forthのワードは、数値パラメータを先入れ先出しのデータスタックまたはパラメータスタックで暗黙的に渡すので、言語構文が大幅に簡素化される。

多くのForthシステムにおいて、トークンは実行可能なコードのアドレスです。しかし、トークンは実装によって他の形式をとることができます。ceForth_33では、トークンはForthワードを指す32ビットコードフィールドアドレスです。

Forthの辞書(Forth Dictionary)

ceForth_33 は、Virtual Forth Engine が使用する大きな配列 `data[16000]` を割り当てています。この配列は主にForth辞書を格納するために使用され、他の情報のためにいくつかのバッファがあります。このデータ配列の中で最も重要な領域は、次の図のとおりです。



Forth Dictionary

アドレス0にはリセットベクタが格納され、128バイトはユーザが独自のシステム初期化コードを格納するために確保されています。そして、128バイトはユーザ変数の格納に使用され、Forthテキストインタプリタが実行するために必要なポインタを格納します。0x100から0c1FFまでは、大きな端末入力バッファが割り当てられています。以前はパンチカード1枚を読み込むのに80バイトを使用していた。

0x200付近は、Forthの辞書です。最初にプリミティブカーネルワードが来て、その後にすべてのコロンワードが来ます。この実装では、プリミティブワードが80個、コロンワードが110個です。辞書は7984バイトあります。

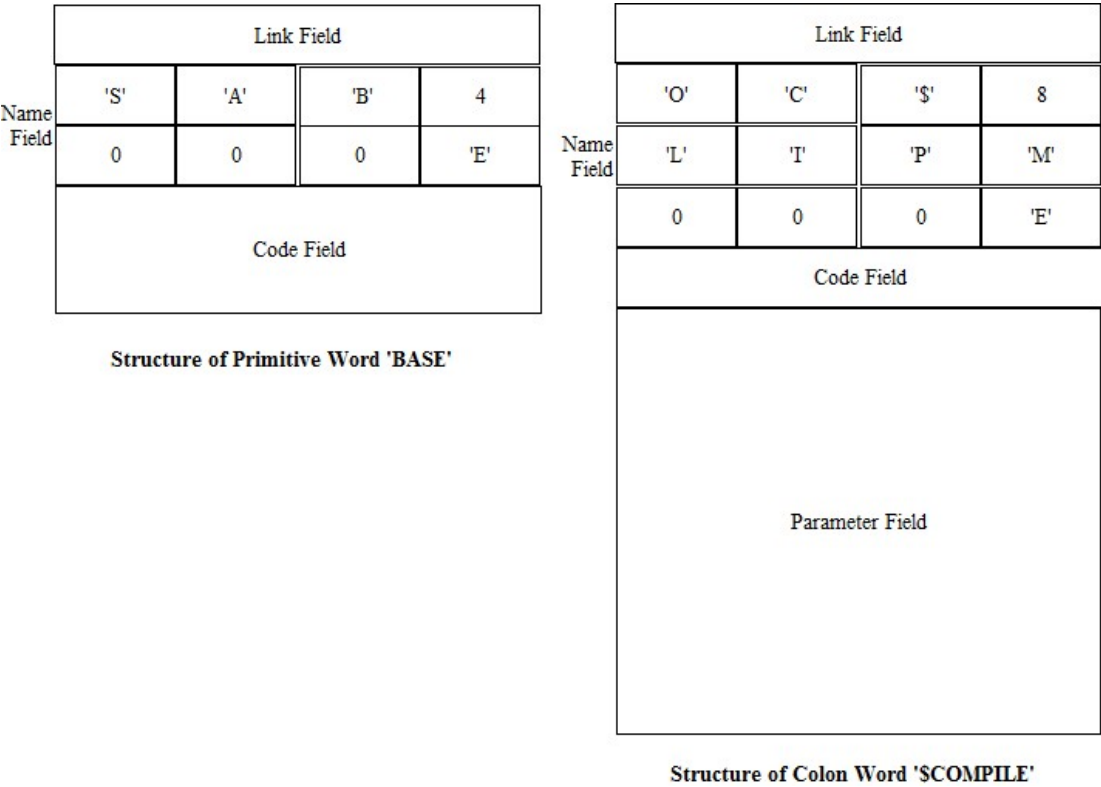
Word Records

プリミティブワードとコロンワードの両方を含む定義済みForthワードは、メモリ上で線形にリンクされた辞書に組み立てられる。新しいコロンワードはこの辞書に追加され、Forthシステムの機能を拡張する。

各ワードは4つのフィールドからなるレコードである。

フィールド	長さ	機能
リンク	4バイト	前のワードの名前フィールド
名前	可変長	ワードの変数名と辞書バイト
コード	4バイト	実行可能バイトコード
パラメータ	可変長	命令、トークン、データ

コロンワードにおいて、パラメータフィールドはトークンの列を保持している。原始的な言い方をすれば、コードフィールドを拡張したものがパラメータフィールドである。下図は、ワードレコードの構造を示している。

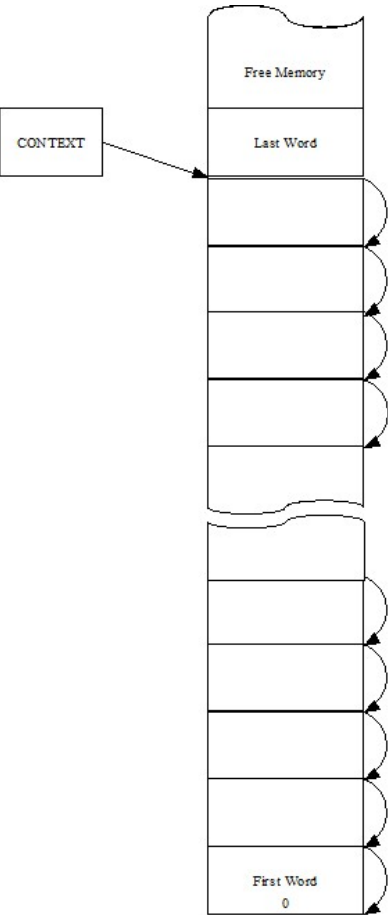


これらのフィールドの先頭バイトのアドレスをそれぞれ、リンクフィールドアドレス(lfa)、ネームフィールドアドレス(nfa)、コードフィールドアドレス(cfa)、パラメータフィールドアドレス(pfa)と呼ぶ。本書では、これらのフィールドアドレスの略称を使用します。

ワードは可変長の名前を持つ。名前フィールドは32ビットのワード境界までヌルフィルされます。コードフィールドも可変長のバイトコードを持つことができ、コードフィールドもワード境界までヌルフィルされる。トークンは32ビット整数であるため、パラメータフィールドは常にワード境界で終端される。

すべてのワードレコードは、一方向リンクリストにリンクされ、辞書と呼ばれる。リンクフィールドには、前のワードの名前フィールドを指すポインタが含まれる。リンクリストは、辞書に最後に組まれたワードIMMEDIATEから始まる。これは、ユーザ変数CONTEXTによって指される。

ワード検索もここから始まる。最初のワードHLDは、リンクフィールドの値が、そのリストの終了を意味する0であり、リストを終了させ辞書検索を停止させる。辞書内のレコードのスレッドは、次の図に示すとおりである。



ceForth_33は 'ダイレクト・スレッド・モデル' を使用している。各ワードは、そのレコードにコードフィールドを持つ。コードフィールドのアドレス(cfa)は、このワードのトークンとみなされる。コードフィールドには、実行可能なバイトコードが格納されています。プリミティブワードでは、コードフィールドは、パラメータフィールドに伸びる可能性のあるバイトコードのリストを含み、特別なバイトコードnextで終了し、そのトークンリストから次のトークンをフェッチすることによりそのトークンを実行する。

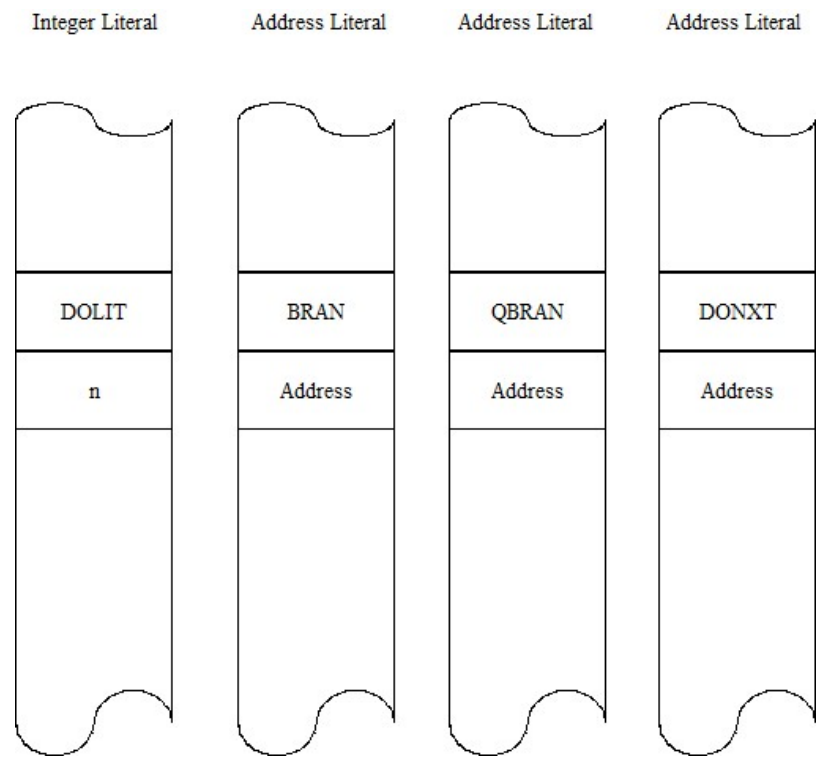
コロンワードでは、コードフィールドはDOLSTバイトコードを含み、これはパラメータフィールドの内容をトークンリストとして処理します。トークンリストは一般にプリミティブワードEXITで終了し、DOLSTで開始したトークンリストをアンネストする。これらのワードのコードフィールドとパラメータフィールドは、次の図のようになる。

Primitive Word		
Byte Code		next

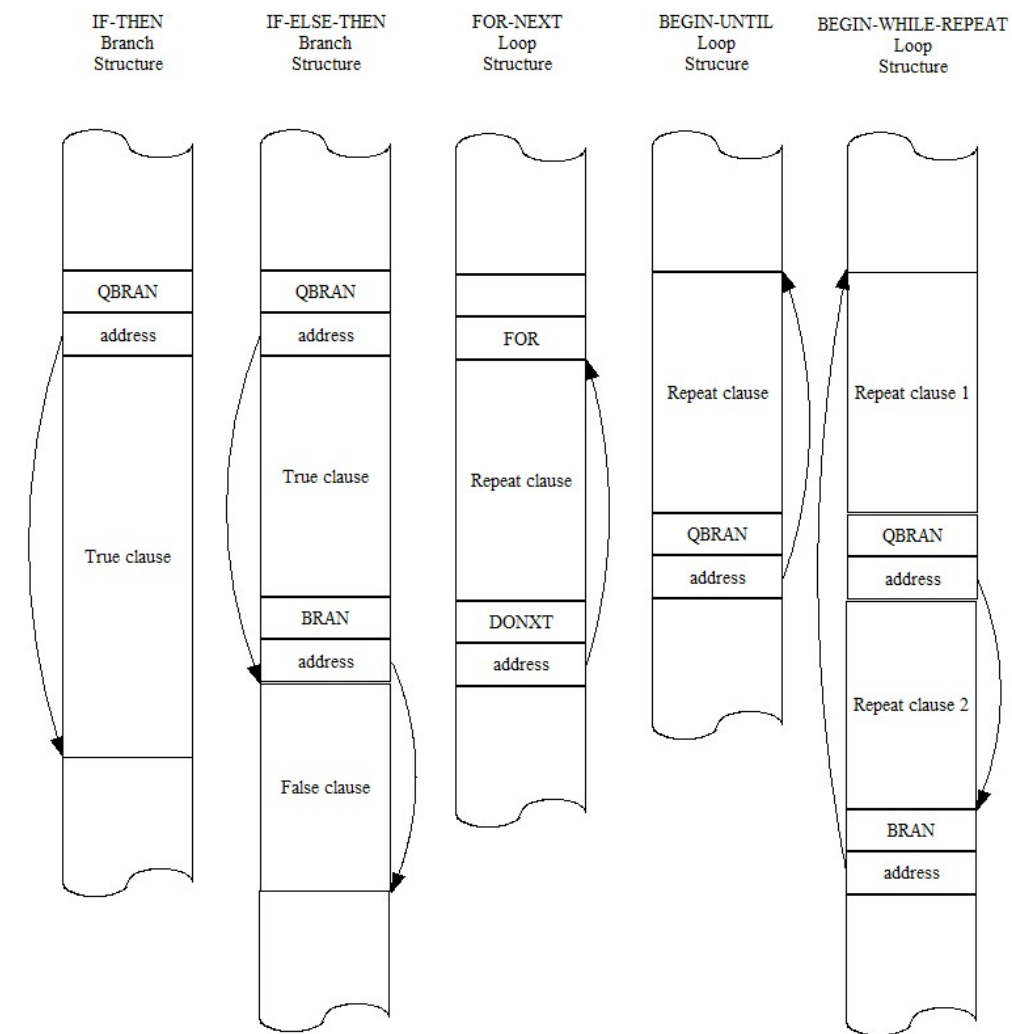
Colon Word		
DOLST	Token List	EXIT

コロンワードのパラメータフィールドには、一般に他のワードの32ビットコードフィールドアドレスであるトークンが含まれる。しかし、トークン・リストには、他の多くの種類の情報が埋め込まれている。ceForth_33では、整数リテラル、アドレスリテラル、文字列リテラルがある。整数リテラルは、トークンDOLITの後に32ビットの整数値が続くものである。この整数は、実行時にデータスタックにプッシュされる。アドレスリテラルは、BRAN、QBRAN、DONXTのいずれかのトークンと、32ビットアドレスで始まります。このアドレスは、BRAN、QBRAN、DONXTによって、これらの分岐トークンを含むトークンリスト内の新しい場所に分岐するために使用されます。

整数リテラルとアドレスリテラルを次の図に示します。



アドレス・リテラルは、トークン・リスト内の制御構造を構築するために使用される。次の図は、IF-ELSE-THEN や BEGIN-WHILE-REPEAT などの構造で使われる様子を示しています。

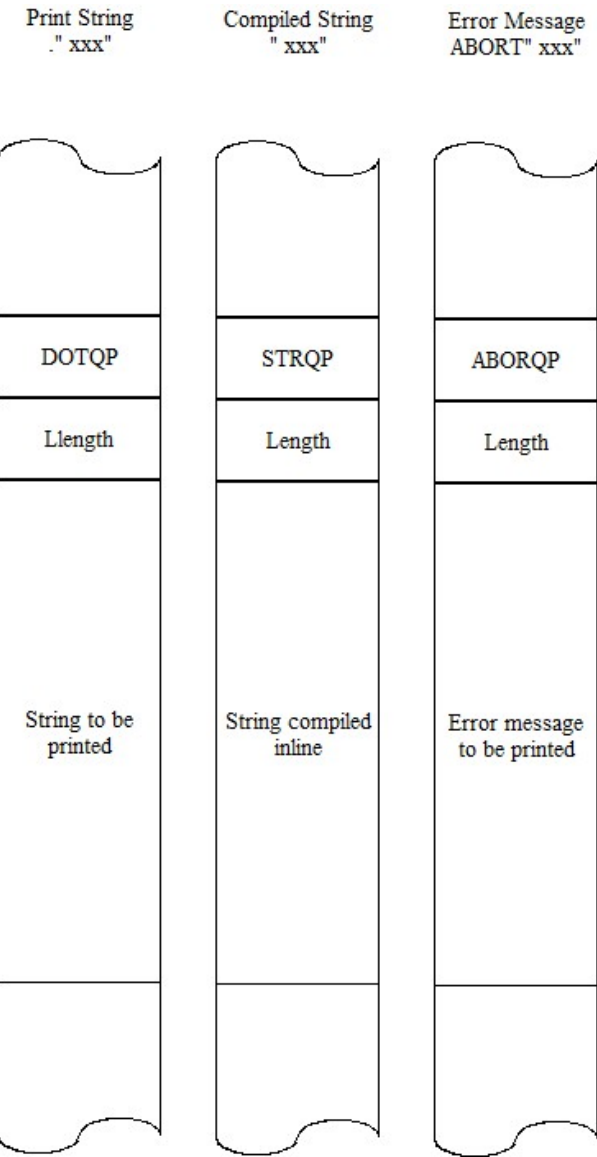


文字列リテラルは、DOTQP、STRQP、ABORQPのいずれかのトークンで始まり、その後にASCII文字のカウンタ付き文字列が続き、ワード境界までヌルフィルされています。これらは、実行時に文字列を表示した

り、他のワードが使用できるように文字列を作成するために使用されます。これらは次のように使用される。

```
. " print this message"
$ " push address of this string on stack"
ABORT " compile only"
```

これらの文字列リテラルを下図に示します。



ceForth_33では、Virtual Forth Machineで動作できるようなForth辞書全体を構築する必要があります。ネイティブのCコンパイラは、Forthのようなインタプリタ型システムで必要とされる可変長フィールドを構築するための優れたツールを提供しません。しかし、C言語では、一連のマクロを定義することにより、すべてのForth語のすべてのフィールドを組み立て、それらをすべて検索可能な辞書にリンクする機能を実現できます。次のChapterでは、これらのマクロを確認しながら、Visual Studio 2019 Communityで実行するVirtual Forth Machineの辞書を構築する方法を紹介します。

Chapter 4. Macro Assembler for Forth in C

長い間、私のForth in Cは、Forthの辞書をヘッダファイルとしてインポートしなければなりませんでした。このヘッダファイルは、Forthのメタコンパイラが生成したもので、Cプログラムで辞書を生成する方法がわからなかったからです。C言語では、可変長や可変長のパラメータフィールドのデータ構造は提供されていないが、任意のバイトや整数の値をデータ配列に配置するC言語のコードを書くことができる。バイトや整数を配列の連続した位置に配置することで、辞書にさまざまなフィールドやレコードを構築することができる。

昔、Windowsの前に、MicrosoftはMASMというマクロアセンブラを提供していたので、私はそれを使って最初のeForth Modelを作りました。私はいくつかのマクロでワードレコードの4つのフィールドをすべて構築し、すべてのワードレコードをリンク辞書にリンクしていました。このマクロアセンブラの仕組みはC言語で実現でき、私のForth辞書を構築することができます。Pythonは対話的で、辞書を構築しながら見ることができるので、私はまずPythonでこのアイデアを試してみました。プリミティブワード、コロワールド、ラベル部分のみからなるトークンリストの3つのマクロを書き、分岐やループを可能にしました。Pythonで検証した後、これらのマクロは素直にCに移植しました。

ラベルマクロは分岐やループを可能にする。しかし、前方参照を正しく動作させるのは困難でした。MASMは他の多くのコンパイラと同様、前方参照を解決するために2パスを使っていました。一方、Chuck Mooreは美しい1パスコンパイラでForthを設計しました。私のマクロアセンブラを拡張して、すべてが1パスでコンパイルされるようにするのは難しいことではありませんでした。これは、私がceForth_33のCコードを見ていくときに見るマクロアセンブラです。

Macro Assembler

Virtual Forth Machineでは、辞書は整数配列`data[IP]`に格納されます。これはバイト配列`cData[P]`にエリヤスされており、`IP`は整数ポインタ、`P`はバイトポインタである。辞書の同じ位置を指すには、`IP=P/4`である。連続したバイトを辞書に書き込むには、次のようにすればよい。

```
cData[P++]= char c;
```

連続した整数を書くには、次のようにします。

```
data[IP++]=int n;
```

`IP=P/4`のように`IP`と`P`を同期させれば、Forthの辞書を構築するために何を書いてもよい。

私はまず、Forth辞書のワードレコードを構築するための簡単なマクロアセンブラをコーディングした。それは、4つのマクロで構成されていた。`HEADER()`はリンクフィールドと名前フィールドを、`CODE()`は原始語のコードフィールドを、`COLON()`はコロワールドのコードとパラメータフィールドを、`LABEL()`はコロワールドのトークンリストを分岐やループのために拡張するためのものである。これら4つのマクロは次の通りである。

```
// Macro Assembler
int IMEDD = 0x80;
int COMPO = 0x40;
```

IMEDDと**COMPO**は、名前フィールドの長さバイトの辞書ビットを指定する。**IMEDD**はビット7として即時ビットと呼ばれ、Forthコンパイラにそのトークンを辞書にコンパイルする代わりに、このワードを実行するように強制します。制御構造を構築するすべてのForth語は即時ワードである。第6ビットの**COMPO**は、コンパイル専用ビットと呼ばれる。多くのForth語は危険である。Forthインタプリタによって実行されると、システムをクラッシュさせる可能性があります。これらのワードは、COMPOによってコンパイル専用とマークされ、Forthコンパイラによってのみ使用されます。

```
int BRAN=0, QBRAN=0, DONXT=0, DOTQP=0, STRQP=0, TOR=0, ABORQP=0;
```

BRAN、**QBRAN**、**DONXT**、**DOTQP**、**STRQP**、**ABRQP**、**TOR**は、マクロアセンブラがコロンワードで制御構造や文字列構造を構築するために必要なプリミティブワードへの前方参照である。ここでは0に初期化されていますが、これらのプリミティブがアセンブルされるときに解決されます。

HEADER()はプリミティブまたはコロンワードのリンクフィールドとネームフィールドを構築する。グローバル変数**thread**には、辞書にある先行ワードの名前フィールドアドレス(nfa)が格納される。このアドレスは、まず**data[IP++]=thread;**で32ビット整数として組み立てられる。さて、**P**は現在のワードの名前フィールドを指している。この**P**は、**thread**に戻して保存される。**name**フィールドでは、最初のバイトがレキシコンバイトで、下位5ビットが名前の長さ、ビット6がコンパイル専用ワード、ビット7が即時ワードを格納します。このレキシコンバイトをまず名前フィールドに組み入れてから、名前文字列を作成する。そして、**name**フィールドは次の32ビットワード境界までヌルフィルされます。さて、**P**はコードフィールドを指しており、バイトコードをアセンブルする準備ができています。

```
void HEADER(int lex, const char seq[]) {
    IP = P >> 2;
    int i;
    int len = lex & 31;
    data[IP++] = thread;
    P = IP << 2;
    //printf("\n%X",thread);
    //for (i = thread >> 2; i < IP; i++)
    //{ printf(" %X",data[i]); }
    thread = P;
    cData[P++] = lex;
    for (i = 0; i < len; i++)
    {
        cData[P++] = seq[i];
    }
    while (P & 3) { cData[P++] = 0; }
    printf("\n");
    printf(seq);
    printf(" %X", P);
}
```

CODE()は、プリミティブワードのコードフィールドを構築する。**HEADER()**が名前フィールドを構築し終わると、**P**はコードフィールドアドレス(cfa)を持つ。このcfaは整数値として返され、マクロ**COLON()**のパラメータとしてトークンとして使用されることになる。これで、**cData[P++]=c;**でバイトコード列を組み立てることができる。**CODE()**はパラメータとして可変長のバイトコードを持っています。この数は、最初のパ

ラメータ `int len` で指定しなければならない。この実装では、長さ `len` は4または8のいずれかである。コードフィールドは、常に4バイト長または8バイト長であり、常に32ビットワード境界に整合される。

`CODE()` は、`HEADER()` と共に、Forth辞書にプリミティブワードのレコードを構築する。これは、コロンのトークンリストを構築するための整数トークンとして割り当てられる `cfa` を返します。

```
int CODE(int len, ...) {
    int addr = P;
    va_list argList;
    va_start(argList, len);
    for (; len; len--) {
        int j = va_arg(argList, int);
        cData[P++] = j;
        //printf(" %X",j);
    }
    va_end(argList);
    return addr;
}
```

`COLON()` は、コロンのコードフィールドとパラメータフィールドを構築する。Pはコード・フィールド・アドレス(`cfa`)を持つ。この`cfa`は整数として保存され、他の`COLON()` マクロでトークンとしてパラメータに使われる。値6の`DOLIST` バイトコードは、`data[IP++] = 6;` で整数として組み込まれる。そして、パラメータとして可変数の整数トークンを組み込む。トークンの数は、最初のパラメータ `int len` として指定しなければならない。

`COLON()` は、`HEADER()` と共に、Forth辞書にコロンのレコードを構築する。これは、後のコロンのトークンリストを構築するための整数トークンとして割り当てられる `cfa` を返します。

```
int COLON(int len, ...) {
    int addr = P;
    IP = P >> 2;
    data[IP++] = 6; // dolist
    va_list argList;
    va_start(argList, len);
    //printf(" %X ",6);
    for (; len; len--) {
        int j = va_arg(argList, int);
        data[IP++] = j;
        //printf(" %X",j);
    }
    P = IP << 2;
    va_end(argList);
    return addr;
}
```

`LABEL()` は、分岐やループのために、コロンのワードの中に部分的なトークン・リストを構築する。Pは現在のトークンアドレスを持つ。このアドレスは戻り値で整数として保存され、分岐トークンに続くアドレス

として使用される。そして、可変数の整数のトークンをパラメータとして組み立てます。この数は最初のパラメータint lenでなければなりません。

LABEL()は、コロン・ワードの中で部分的なトークンリストを構築します。**LABEL()**は、トークンを分岐させるためのアドレスをターゲットアドレスとして返す。

LABEL()は、前方参照を扱うことができない。**LABEL()**のパラメータリストに含まれる全ての参照は有効でなければならない。マクロアセンブラの最初のパスの後、すべての参照は解決され、有効なアドレスは最初に割り当てられた0を置き換えるためにコピーされる必要があります。この2回目のパスは手動で行う必要があります。

```
int LABEL(int len, ...) {
    int addr = P;
    IP = P >> 2;
    va_list argList;
    va_start(argList, len);
    //printf("\n%X ",addr);
    for (; len; len--) {
        int j = va_arg(argList, int);
        data[IP++] = j;
        //printf(" %X",j);
    }
    P = IP << 2;
    va_end(argList);
    return addr;
}
```

LABEL()を使って、分岐とループのためのすべての場所をマークし、私はesp32Forth_61をビルドしてテストしました。私は、それが生成した辞書をespForth_54によって生成された辞書と1バイトずつチェックしました。CプログラムがForth辞書を正しく構築できることを確認しました。しかし、前方参照を手動で解決することは満足できるものではなく、Forth辞書を自動的に組み立てるためのより良いマクロのセットが必要である。この新しい方式はesp32forth_62で試され、ceForth_33で適応された。

Macros for Structured Programming

Forth辞書がCで構築できることを示すために、私自身はラベルを扱うことができたが、ユーザーが前方参照を手動で解決することは期待しない。Chuck Mooreは、すべてのネストされた制御構造が1回のパスで正しくコンパイルできることを実証しました。このマクロアセンブラでそれを行うことは確かに可能である。その方法は、Forthのすべての即値ワードをマクロで記述して、分岐やループ構造を設定し、前方や後方へのすべての参照を解決することだ。

必要なマクロは、次のような構造を構築するために使用されます。

```
BEGIN...AGAIN
BEGIN...UNTIL
BEGIN...WHILE...REPEAT
IF...ELSE...THEN
FOR...AFT...THEN...NEXT
```


いくつかのマクロは、一般に分岐トークンを分岐アドレスでアセンブルし、その後に可変数のトークンが続く。他のマクロは、前方参照を解決する。構造体は入れ子にすることができるので、アドレスフィールドの位置、および解決されたアドレスが利用可能な場合はそれを渡すためにスタックが必要である。私は、アドレスパラメータ渡しを実現するために、リターンスタック機構を書き起こした。

以前、リターンスタックの操作を明確にするために、2つの置換マクロを定義した。

```
# define popR rack[(unsigned char)R--]
# define pushR rack[(unsigned char)++R]
```

BEGIN()は不定回数ループを開始します。ループを終了する分岐トークンが正しいリターンアドレスを組み立てられるように、まず、現在のワードアドレス**IP**をリターンスタックにプッシュします。次に、**BEGIN()**マクロに渡すパラメータでトークンリストを組み立てる。パラメータの数は、最初のパラメータ `int len` で示されます。

```
void BEGIN(int len, ...) {
    IP = P >> 2;
    //printf("\n%X BEGIN ",P);
    pushR = IP;
    va_list argList;
    va_start(argList, len);
    for (; len; len--) {
        int j = va_arg(argList, int);
        data[IP++] = j;
        //printf(" %X",j);
    }
    P = IP << 2;
    va_end(argList);
}
```

AGAIN()は不定回数ループを閉じる。まず、**BRAN** トークンを書き込み、リターンスタックに残っている **BEGIN()** アドレスを書き込んでループ構造を完成させる。そして、**AGAIN()**マクロに渡すパラメータでトークンリストを組み立てる。パラメータの数は、最初のパラメータ `int len` で示されます。

```
void AGAIN(int len, ...) {
    IP = P >> 2;
    //printf("\n%X AGAIN ",P);
    data[IP++] = BRAN;
    data[IP++] = popR << 2;
    va_list argList;
    va_start(argList, len);
    for (; len; len--) {
        int j = va_arg(argList, int);
        data[IP++] = j;
        //printf(" %X",j);
    }
}
```

```

    P = IP << 2;
    va_end(argList);
}

```

UNTIL()は不定回数ループを閉じる。最初に**QBRAN**トークンを書き込み、次にリターンスタックに残されたアドレス**BEGIN()**を書き込んでループ構造を完成させる。そして、**AGAIN()**マクロに渡すパラメータでトークンリストを組み立てる。パラメータの数は、最初のパラメータ `int len` で示されます。

```

void UNTIL(int len, ...) {
    IP = P >> 2;
    //printf("\n%X UNTIL ",P);
    data[IP++] = QBRAN;
    data[IP++] = popR << 2;
    va_list argList;
    va_start(argList, len);
    for (; len; len--) {
        int j = va_arg(argList, int);
        data[IP++] = j;
        //printf(" %X",j);
    }
    P = IP << 2;
    va_end(argList);
}

```

WHILE()は、`always`節を閉じ、`true`節を開始する不定回数ループである。これは最初にヌルアドレスを持つ**QBRAN**トークンを組み立てる。ヌルアドレスの後のワードアドレスは、リターンスタックの**BEGIN()**によって残されたアドレスの下にプッシュされる。リターンスタックのこの2つのアドレスは、ループを閉じるために**REPEAT()**マクロによって使用され、**QBRAN()**の後のアドレスを解決する。そして、**WHILE()**マクロに渡すパラメータでトークンリストを組み立てる。パラメータの数は、最初のパラメータ `int len` で示されます。

```

void WHILE(int len, ...) {
    IP = P >> 2;
    int k;
    //printf("\n%X WHILE ",P);
    data[IP++] = QBRAN;
    data[IP++] = 0;
    k = popR;
    pushR = (IP - 1);
    pushR = k;
    va_list argList;
    va_start(argList, len);
    for (; len; len--) {
        int j = va_arg(argList, int);
        data[IP++] = j;
        //printf(" %X",j);
    }
    P = IP << 2;
}

```

```

    va_end(argList);
}

```

REPEAT()は、BEGIN-WHILE-REPEATの不定回数ループを閉じます。まず、**BEGIN()**が残したアドレスで**BRAN**トークンを組み立てる。**BEGIN**アドレスの後のワードアドレスは、リターンスタック上の**WHILE()**によって残されたアドレスの場所に格納されるようになりました。次に、**REPEAT()**マクロに渡すパラメータでトークンリストを組み立てる。パラメータの数は、最初のパラメータ `int len` で示されます。

```

void REPEAT(int len, ...) {
    IP = P >> 2;
    //printf("\n%X REPEAT ",P);
    data[IP++] = BRAN;
    data[IP++] = popR << 2;
    data[popR] = IP << 2;
    va_list argList;
    va_start(argList, len);
    for (; len; len--) {
        int j = va_arg(argList, int);
        data[IP++] = j;
        //printf(" %X",j);
    }
    P = IP << 2;
    va_end(argList);
}

```

IF()は、分岐構造内のtrue節を開始する。それは最初にヌルアドレスを持つ**QBRAN**トークンを書き込む。このとき、ヌルアドレスフィールドのワードアドレスはリターンスタックにプッシュされています。ヌルアドレスフィールドは、**ELSE()**または**THEN()**が分岐アドレスを解決するときに埋められる。次に、**IF()**マクロに渡すパラメータでトークンリストを書き込んでゆきます。パラメータの数は、最初のパラメータ `int len` で示されます。

```

void IF(int len, ...) {
    IP = P >> 2;
    //printf("\n%X IF ",P);
    data[IP++] = QBRAN;
    pushR = IP;
    data[IP++] = 0;
    va_list argList;
    va_start(argList, len);
    for (; len; len--) {
        int j = va_arg(argList, int);
        data[IP++] = j;
        //printf(" %X",j);
    }
    P = IP << 2;
    va_end(argList);
}

```

ELSE()は、IF-ELSE-THEN分岐構造のtrue節を閉じ、false節を開始します。まず、ヌルアドレスを持つ **BRAN** トークンを組み立てる。ヌル・アドレスの後のワード・アドレスは、**IF()** で組み立てられたブランチ・アドレスを解決するために使用されます。ヌルアドレスフィールドのアドレスは、**THEN()** で使用するために、リターンスタックにプッシュされる。そして、**ELSE()** マクロに渡すパラメータでトークンリストを組み立てる。パラメータの数は、最初のパラメータ `int len` で示されます。

```
void ELSE(int len, ...) {
    IP = P >> 2;
    //printf("\n%X ELSE ",P);
    data[IP++] = BRAN;
    data[IP++] = 0;
    data[popR] = IP << 2;
    pushR = IP - 1;
    va_list argList;
    va_start(argList, len);
    for (; len; len--) {
        int j = va_arg(argList, int);
        data[IP++] = j;
        //printf(" %X",j);
    }
    P = IP << 2;
    va_end(argList);
}
```

THEN()は、IF-THENまたはIF-ELSE-THEN分岐構造を閉じます。**IF()** または **ELSE()** で書き込んだNULLアドレスの位置に、**THEN()** の後の現在のワードアドレスを書き込んで解決する。そして、**THEN()** マクロに渡すパラメータでトークンリストを組み立てる。パラメータの数は、最初のパラメータ `int len` で示されます。

```
void THEN(int len, ...) {
    IP = P >> 2;
    //printf("\n%X THEN ",P);
    data[popR] = IP << 2;
    va_list argList;
    va_start(argList, len);
    for (; len; len--) {
        int j = va_arg(argList, int);
        data[IP++] = j;
        //printf(" %X",j);
    }
    P = IP << 2;
    va_end(argList);
}
```

FOR()は定回数ループ構造を開始する。最初にTORトークンを組み立て、現在のアドレス・フィールドのアドレスをリターン・スタックにプッシュします。こうして保存されたアドレスは、**NEXT()** でループの戻りアドレスとして使用されます。次に、**FOR()** マクロに渡すパラメータでトークンリストを作成する。パラメータの数は、最初のパラメータ `int len` で示されます。

```

void FOR(int len, ...) {
    IP = P >> 2;
    //printf("\n%X FOR ",P);
    data[IP++] = TOR;
    pushR = IP;
    va_list argList;
    va_start(argList, len);
    for (; len; len--) {
        int j = va_arg(argList, int);
        data[IP++] = j;
        //printf(" %X",j);
    }
    P = IP << 2;
    va_end(argList);
}

```

NEXT()は、定回数ループを閉じます。まず、**DONXT**トークンを書き込み、リターンスタックに残っている**FOR()**のアドレスを書き込みループ構造を完成させる。次に、**NEXT()**マクロに渡すパラメータでトークンリストを作成する。パラメータの数は、最初のパラメータ `int len` で示されます。

```

void NEXT(int len, ...) {
    IP = P >> 2;
    //printf("\n%X NEXT ",P);
    data[IP++] = DONXT;
    data[IP++] = popR << 2;
    va_list argList;
    va_start(argList, len);
    for (; len; len--) {
        int j = va_arg(argList, int);
        data[IP++] = j;
        //printf(" %X",j);
    }
    P = IP << 2;
    va_end(argList);
}

```

AFT()は、always節を閉じ、定回数ループのskip-once-only節を開始する。まず、**BRAN**トークンをヌルアドレスとともに書き込みます。ヌルアドレスの後のワードアドレスは、**FOR()**によって残されたアドレスに代わって、リターンスタックにプッシュされる。ヌルアドレスフィールドのアドレスは、リターンスタックにプッシュされます。リターンスタックの先頭アドレスは、**THEN()**マクロがskip-once-only節を閉じるために使用し、**AFT()**の後のアドレスを解決するために使用されます。次に、**AFT()**マクロに渡すパラメータでトークンリストを組み立てる。パラメータの数は、最初のパラメータ `int len` で示されます。

```

void AFT(int len, ...) {
    IP = P >> 2;
    int k;
    //printf("\n%X AFT ",P);

```

```

    data[IP++] = BRAN;
    data[IP++] = 0;
    k = popR;
    pushR = IP;
    pushR = IP - 1;
    va_list argList;
    va_start(argList, len);
    for (; len; len--) {
        int j = va_arg(argList, int);
        data[IP++] = j;
        //printf(" %X",j);
    }
    P = IP << 2;
    va_end(argList);
}

```

コロンワードのトークン・リストには、主にトークン、すなわち他のワードのcfaが含まれる。しかし、リテラルのようなその他の情報をトークンリストに埋め込むことができる。制御構造を構築するために、**BRAN**、**QBRAN**、**DONXT**に続くアドレスリテラルをたくさん見てきました。**DOLIT**に続く整数リテラルがあります。整数リテラルは、トークンリストが実行されるときに、実行時のデータ・スタックにプッシュされる。もう一つのリテラルのクラスは、トークンリストに文字列を埋め込むための文字列リテラルである。文字列構造を構築するために、さらに3つのマクロが必要である。

```

." <string"
$" <string>"
ABORT" <string>"

```

DOTQ()は、実行時に印字される文字列リテラルを開始します。これは最初に**DOTQP**トークンを書き込みます。次に、もう1つの二重引用符で終端された文字列が、カウント付きの文字列として書き込まれる。文字列は、**HEADER()**が行うのと同様に、32ビットのワード境界までヌルフィルされます。

```

void DOTQ(const char seq[]) {
    IP = P >> 2;
    int i;
    int len = strlen(seq);
    data[IP++] = DOTQP;
    P = IP << 2;
    cData[P++] = len;
    for (i = 0; i < len; i++) {
        cData[P++] = seq[i];
    }
    while (P & 3) { cData[P++] = 0; }
    //printf("\n%X ",P);
    //printf(seq);
}

```

STRQ()は、実行時にアクセスできる文字列リテラルを開始します。実行時に、この文字列のカウントバイトを指すアドレスをデータ・スタックに残します。他のForthワードは、この文字列のカウントバイトのアドレスを知って、この文字列を使用します。まず、**STRQP**トークンをアセンブルします。次に、2つめの二重引用符で終端された文字列が、カウント付きの文字列として書き込まれる。文字列は、**HEADER()**が行うのと同様に、32ビットのワード境界までヌルフィルされます。

```
void STRQ(const char seq[]) {
    IP = P >> 2;
    int i;
    int len = strlen(seq);
    data[IP++] = STRQP;
    P = IP << 2;
    cData[P++] = len;
    for (i = 0; i < len; i++) {
        cData[P++] = seq[i];
    }
    while (P & 3) { cData[P++] = 0; }
    //printf("\n%X ",P);
    //printf(seq);
}
```

ABORQ()は、Forthが中断されたときに出力される警告メッセージとして、文字列リテラルを開始します。これはまず**ABORQP**トークンを書き込む。次に、2つ目の二重引用符で終端された文字列が、カウント付きの文字列として書き込まれる。文字列は、**HEADER()**が行うのと同様に、32ビットのワード境界までヌルフィルされます。

```
void ABORQ(const char seq[]) {
    IP = P >> 2;
    int i;
    int len = strlen(seq);
    data[IP++] = ABORQP;
    P = IP << 2;
    cData[P++] = len;
    for (i = 0; i < len; i++) {
        cData[P++] = seq[i];
    }
    while (P & 3) { cData[P++] = 0; }
    //printf("\n%X ",P);
    //printf(seq);
}
```

Checksum()は、32バイトのメモリをシリアルターミナルにダンプします。おおよそIntelダンプ形式です。最初に4バイトのアドレスとスペースが表示されます。次に32バイトのデータを、1バイトに16進数で2文字表示します。最後にこれら32バイトの合計が16進数2文字で表示される。このチェックサムは、このマクロアセンブラで組まれた辞書と、私が以前作ったF#メタコンパイラで作られた辞書を比較するのに非常に便利である。

```
void CheckSum() {
    int i;
    char sum = 0;
    printf("\n%4X ", P);
    for (i = 0; i < 16; i++) {
        sum += cData[P];
        printf("%2X", cData[P++]);
    }
    printf(" %2X", sum & 0xFF);
}
```

以上によりマクロアセンブラが完成しました。こうして定義されたマクロは、プリミティブワードやコロニワードを構成して、VFMが実行するための完全なForth辞書を形成するために使用されます。

Chapter 5. Primitive Words

Byte Code Mnemonic

マクロアセンブラが連続したバイトコードをアセンブルしやすいように、個々のバイトコードにニモニック名をつけて、難しい数字を使わなくても済むようにしています。ニモニック名は、対応するプリミティブ・ルーチンの名前に、アセンブラのニモニックであることを示すために "as_" を付けただけのものです。

```
// Byte Code Assembler
int as_nop = 0;
int as_bye = 1;
int as_qrx = 2;
int as_txsto = 3;
int as_docon = 4;
int as_dolit = 5;
int as_dolist = 6;
int as_exit = 7;
int as_execu = 8;
int as_donext = 9;
int as_qbran = 10;
int as_bran = 11;
int as_store = 12;
int as_at = 13;
int as_cstor = 14;
int as_cat = 15;
int as_rpat = 16;
int as_rpsto = 17;
int as_rfrom = 18;
int as_rat = 19;
int as_tor = 20;
int as_spat = 21;
int as_spsto = 22;
int as_drop = 23;
int as_dup = 24;
int as_swap = 25;
```



```
int as_over = 26;
int as_zless = 27;
int as_andd = 28;
int as_orr = 29;
int as_xorr = 30;
int as_uplus = 31;
int as_next = 32;
int as_qdup = 33;
int as_rot = 34;
int as_ddrop = 35;
int as_ddup = 36;
int as_plus = 37;
int as_inver = 38;
int as_negat = 39;
int as_dnega = 40;
int as_subb = 41;
int as_abss = 42;
int as_equal = 43;
int as_uless = 44;
int as_less = 45;
int as_ummod = 46;
int as_msmod = 47;
int as_slmod = 48;
int as_mod = 49;
int as_slash = 50;
int as_umsta = 51;
int as_star = 52;
int as_mstar = 53;
int as_ssmod = 54;
int as_stasl = 55;
int as_pick = 56;
int as_pstor = 57;
int as_dstor = 58;
int as_dat = 59;
int as_count = 60;
int as_dovar = 61;
int as_max = 62;
int as_min = 63;
```

Assembling Forth Dictionary

マクロアセンブラは、Visual Studioが要求する`main()`ループの中で最初に実行されます。

```
/*
 * Main Program
 */
int main(int ac, char* av[])
{
    cData = (unsigned char*)data;
    P = 512;
    R = 0;
```

`cData[]` バイト配列は、整数の `data[]` 配列でバイトをアクセスできるようにするために、`data[]` 配列にアライメントする必要があります。

マクロアセンブラで先に定義したマクロ `HEADER()` と `CODE()` を使って、プリミティブワードを辞書にアセンブルするようになりました。辞書は2つのセクションに分けられ、最初はFVMのカーネルとしてのプリミティブワード、次はForth辞書の大部分を構成するすべてのコロンワードである。

辞書の最初の512バイトは、端末入力バッファ (terminal input buffer) とユーザー変数の初期値を格納する領域に割り当てられている。スレッドはすでに0に初期化されており、最初のForth語のリンクレコードを構築する準備ができています。

User Variables

ユーザー変数は、0x80-0xACの間の領域にあります。Forthインタプリタが正しく動作するための重要な情報が含まれています。

User Variable	Address	Initial Value	Function
HLD	0x80	0	Pointer to text buffer for number output.
SPAN	0x84	0	Number of input characters.
>IN	0x88	0	Pointer to next character to be interpreted.
#TIB	0x8C	0	Number of characters received in terminal input buffer.
'TIB	0x90	0	Pointer to Terminal Input Buffer.
BASE	0x94	0x10	Number base for hexadecimal numeric conversions.
CONTEXT	0a98	0x1DDC	Pointer to name field of last word in dictionary.
CP	0x9C	0x1DE8	Pointer to top of dictionary, first free memory location to add new words. It is saved by " <code>h forth_@</code> " on top of the source code page.
LAST	0xA0	0x1DDC	Pointer to name field of last word.
'EVAL	0xA4	0x13D4	Execution vector of text interpreter, initialized to point to <code>\$INTERPRET</code> . It may be changed to point to <code>\$COMPILE</code> in compiling mode.
'ABORT	0xA8	0x1514	Pointer to <code>QUIT</code> word to handle error conditions.
tmp	0xAC	0	Scratch pad.

```
// Kernel
HEADER(3, "HLD");
int HLD = CODE(8, as_docon, as_next, 0, 0, 0x80, 0, 0, 0);
HEADER(4, "SPAN");
int SPAN = CODE(8, as_docon, as_next, 0, 0, 0x84, 0, 0, 0);
HEADER(3, ">IN");
```

```

int INN = CODE(8, as_docon, as_next, 0, 0, 0X88, 0, 0, 0);
HEADER(4, "#TIB");
int NTIB = CODE(8, as_docon, as_next, 0, 0, 0X8C, 0, 0, 0);
HEADER(4, "'TIB");
int TTIB = CODE(8, as_docon, as_next, 0, 0, 0X90, 0, 0, 0);
HEADER(4, "BASE");
int BASE = CODE(8, as_docon, as_next, 0, 0, 0X94, 0, 0, 0);
HEADER(7, "CONTEXT");
int CNTXT = CODE(8, as_docon, as_next, 0, 0, 0X98, 0, 0, 0);
HEADER(2, "CP");
int CP = CODE(8, as_docon, as_next, 0, 0, 0X9C, 0, 0, 0);
HEADER(4, "LAST");
int LAST = CODE(8, as_docon, as_next, 0, 0, 0XA0, 0, 0, 0);
HEADER(5, "'EVAL");
int TEVAL = CODE(8, as_docon, as_next, 0, 0, 0XA4, 0, 0, 0);
HEADER(6, "'ABORT");
int TABRT = CODE(8, as_docon, as_next, 0, 0, 0XA8, 0, 0, 0);
HEADER(3, "tmp");
int TEMP = CODE(8, as_docon, as_next, 0, 0, 0XAC, 0, 0, 0);

```

Kernel Words

Forthワードは、リンクフィールド、名前フィールド、コードフィールド、オプションのパラメータフィールドを持ちます。リンクフィールドと名前フィールドは、**HEADER()**マクロで構築される。プリミティブワードは可変長のコードフィールドを持ち、**CODE()**マクロでアセンブルされる。**CODE()**は、ワードのコードフィールドアドレス(cfa)を返す。このcfaはある整数に割り当てられ、**COLON()**マクロによって呼び出され、コロンワードのパラメータフィールドのトークンリストにトークンを組み入れます。

カーネルワードは、このVFMがエミュレートしているeP32マイクロコントローラの32ビット的な性質を表しています。ほとんどのカーネルワードは、1バイトのコードを実行し、その後にリターンバイトのコードnext()を実行します。2つの空のバイトがヌルフィルされて32ビットワードを構成しています。上記のすべてのユーザー変数ワード、および定数のみを返す他の多くのワードでは、バイトコードはdocon()とnext()で、その後に2つのヌルバイトが続きます。定数値は次の32ビットワードに格納されます。docon()は、次の32ビットワードに格納されている定数値を読まなければなりません。

// primitive words

NOP (--) 何もしない。FVMを解除し、Arduinoのloop()に戻る。

```

HEADER(3, "NOP");
int NOP = CODE(4, as_next, 0, 0, 0);

```

BYE (--) Visual Studio OSに戻る。

```

HEADER(3, "BYE");
int BYE = CODE(4, as_bye, as_next, 0, 0);

```

?RX (-- c t | f) 端末入力デバイスから文字を読み込む。文字cと、利用可能な場合はtrueフラグを返す。そうでなければ、偽フラグを返す。

```
HEADER(3, "?RX");
int QRX = CODE(4, as_qrx, as_next, 0, 0);
```

TX! (c --) Windows コンソールに文字を送信します。

```
HEADER(3, "TX!");
int TXSTO = CODE(4, as_txsto, as_next, 0, 0);
```

DOCON (-- w) 次のトークンを定数としてデータスタックにプッシュする。

```
HEADER(5, "DOCON");
int DOCON = CODE(4, as_docon, as_next, 0, 0);
```

DOLIT (-- w) 次のトークンを整数リテラルとしてデータスタックにプッシュします。これにより、数値はインラインリテラルとしてコンパイルされ、実行時にデータスタックにデータを供給することができる。

```
HEADER(5, "DOLIT");
int DOLIT = CODE(4, as_dolit, as_next, 0, 0);
```

DOLIST (--) 現在の命令ポインタ(IP)をリターンスタックにプッシュし、プログラムカウンタPをデータスタックからIPにポップする。**next()**が実行されると、リスト内のトークンが連続実行されます。**DOLIST**は、すべてのコロンワードのコードフィールドに存在します。コロンワードのトークンリストは、**EXIT**で終了させなければならない。

```
HEADER(6, "DOLIST");
int DOLST = CODE(4, as_dolist, as_next, 0, 0);
```

EXIT (--) コロンワードのトークンリストをすべて終了させる。**EXIT**は、リターンスタックに保存された実行アドレスをIPレジスタにポップバックし、コロンワードが入力される前の状態に復元する。呼び出した側のトークンリストの実行は継続される。

```
HEADER(4, "EXIT");
int EXITT = CODE(4, as_exit, as_next, 0, 0);
```

EXECUTE (a --) データスタックから実行アドレスを取り出し、そのトークンを実行する。この強力なワードにより、トークンリストの一部ではない任意のトークンを実行することができる。

```
HEADER(7, "EXECUTE");
int EXECU = CODE(4, as_execu, as_next, 0, 0);
```

DONEXT (--) FOR-NEXTループを終了させる。ループのカウントは、リターンスタックにプッシュされ、**DONEXT**によってデクリメントされる。カウントが負でなければ、**DONEXT**の次のアドレスにジャンプし、そうでなければ、カウントをリターンスタックから取り出して、ループを抜ける。**DONEXT**は、**NEXT**でコンパイルされる。

```
HEADER(6, "DONEXT");
DONXT = CODE(4, as_donext, as_next, 0, 0);
```

QBRANCH (f --) データスタックのトップの要素をフラグとしてテストする。0であれば、**QBRANCH**に続くアドレスに分岐し、そうでなければ、そのアドレスに続くトークンリストの実行を継続する。**QBRANCH**は、**IF**、**WHILE**、**UNTIL**でコンパイルされます。

```
HEADER(7, "QBRANCH");
QBRAN = CODE(4, as_qbran, as_next, 0, 0);
```

BRANCH (--) **BRANCH**の次のアドレスに分岐する。**BRANCH**は**AFT**、**ELSE**、**REPEAT**、**AGAIN**でまとめられる。

```
HEADER(6, "BRANCH");
BRAN = CODE(4, as_bran, as_next, 0, 0);
```

! (n a --) 整数nをメモリ位置aに格納する。

```
HEADER(1, "!");
int STORE = CODE(4, as_store, as_next, 0, 0);
```

@ (a -- n) (データスタックトップの)メモリアドレス a を、このアドレスが指す場所から取得した整数の内容で置き換える。

```
HEADER(1, "@");
int AT = CODE(4, as_at, as_next, 0, 0);
```

C! (c b --) バイト値cをメモリ位置bに格納する。

```
HEADER(2, "C!");  
int CSTORE = CODE(4, as_cstore, as_next, 0, 0);
```

C@ (b -- n) バイトメモリアドレスbを、このアドレスが指す位置から取り出したバイトの内容に置き換える。

```
HEADER(2, "C@");  
int CAT = CODE(4, as_cat, as_next, 0, 0);
```

R> (n --) データスタックから数値をポップし、リターンスタックにプッシュします。

```
HEADER(2, "R>");  
int RFROM = CODE(4, as_rfrom, as_next, 0, 0);
```

R@ (-- n) リターンスタックから数値をコピーして、リターンスタックにプッシュします。

```
HEADER(2, "R@");  
int RAT = CODE(4, as_rat, as_next, 0, 0);
```

>R(-- n) リターンスタックから数値をポップし、データスタックにプッシュする。

```
HEADER(2, ">R");  
TOR = CODE(4, as_tor, as_next, 0, 0);
```

DROP (w --) スタックの一番上のアイテムを破棄します。

```
HEADER(4, "DROP");  
int DROP = CODE(4, as_drop, as_next, 0, 0);
```

DUP (w -- w w) スタック最上段のアイテムを複製する。

```
HEADER(3, "DUP");  
int DUPP = CODE(4, as_dup, as_next, 0, 0);
```

SWAP (w1 w2 -- w2 w1) 上位2つのスタックアイテムを交換する。

```
HEADER(4, "SWAP");  
int SWAP = CODE(4, as_swap, as_next, 0, 0);
```

OVER (w1 w2 -- w1 w2 w1) 2 番目のスタックアイテムを先頭にコピーする。

```
HEADER(4, "OVER");  
int OVER = CODE(4, as_over, as_next, 0, 0);
```

0< (n - f) データスタックの先頭の項目が負であるかどうかを調べる。負の場合は-1を返す。0または正の場合は、0を返して偽とする。

```
HEADER(2, "0<");  
int ZLESS = CODE(4, as_zless, as_next, 0, 0);
```

AND (w w -- w) ビット毎に論理積を取る。

```
HEADER(3, "AND");  
int ANDD = CODE(4, as_andd, as_next, 0, 0);
```

OR (w w -- w) ビット単位の包括的論理和を取る。

```
HEADER(2, "OR");  
int ORR = CODE(4, as_orr, as_next, 0, 0);
```

XOR (w w -- w) ビットごとに排他的論理和を散る。

```
HEADER(3, "XOR");  
int XORR = CODE(4, as_xorr, as_next, 0, 0);
```

UM+ (w w -- w cy) 2つの数値を加算し、和とキャリーフラグを返す。

```
HEADER(3, "UM+");  
int UPLUS = CODE(4, as_uplus, as_next, 0, 0);
```

NEXT (--) 処理中のトークンリストの次のトークンにジャンプします。

```
HEADER(4, "NEXT");  
int NEXTT = CODE(4, as_next, as_next, 0, 0);
```

?DUP (w -- w w | 0) スタックの先頭が0でなければdupする。

```
HEADER(4, "?DUP");
int QDUP = CODE(4, as_qdup, as_next, 0, 0);
```

ROT (w1 w2 w3 -- w2 w3 w1) 3番目の項目を先頭に回転させる。

```
HEADER(3, "ROT");
int ROT = CODE(4, as_rot, as_next, 0, 0);
```

2DROP (w w --) スタック上のアイテムを2つ破棄する。

```
HEADER(5, "2DROP");
int DDROP = CODE(4, as_ddrop, as_next, 0, 0);
```

2DUP (w1 w2 -- w1 w2 w1 w2) 上位 2 項目を複写する。

```
HEADER(4, "2DUP");
int DDUP = CODE(4, as_ddup, as_next, 0, 0);
```

+ (w w -- sum) 上位2項目を加算する。

```
HEADER(1, "+");
int PLUS = CODE(4, as_plus, as_next, 0, 0);
```

NOT (w -- w) topの1の補数。

```
HEADER(3, "NOT");
int INVER = CODE(4, as_inver, as_next, 0, 0);
```

NEGATE (n -- -n) トップの2の補数。

```
HEADER(6, "NEGATE");
int NEGAT = CODE(4, as_negat, as_next, 0, 0);
```

DNEGATE (d -- -d) トップダブルの2の補数。


```
HEADER(7, "DNEGATE");  
int DNEGA = CODE(4, as_dnega, as_next, 0, 0);
```

- (n1 n2 -- n1-n2) 減算。

```
HEADER(1, "-");  
int SUBBB = CODE(4, as_subb, as_next, 0, 0);
```

ABS (n -- n) n の絶対値を返す。

```
HEADER(3, "ABS");  
int ABSS = CODE(4, as_abss, as_next, 0, 0);
```

= (w w -- t) 上位2つが等しいとき、trueを返す。

```
HEADER(1, "=");  
int EQUAL = CODE(4, as_equal, as_next, 0, 0);
```

U< (u1 u2 -- t) 上位 2 項目の符号なし比較。

```
HEADER(2, "U<");  
int ULESS = CODE(4, as_uless, as_next, 0, 0);
```

< (n1 n2 -- t) 上位 2 項目の符号付き比較。

```
HEADER(1, "<");  
int LESS = CODE(4, as_less, as_next, 0, 0);
```

UM/MOD(ud1 udh u -- ur uq) double を single で符号無し除算する。剰余と商を返す。

```
HEADER(6, "UM/MOD");  
int UMMOD = CODE(4, as_ummod, as_next, 0, 0);
```

M/MOD (d n -- r q) doubleをsingleで符号付き階数付き除算する。剰余と商を返す。

```
HEADER(5, "M/MOD");  
int MSMOD = CODE(4, as_msmod, as_next, 0, 0);
```

`/MOD (n1 n2 -- r q)` 符号付き除算。剰余(mod)と商(quotient)を返す。

```
HEADER(4, "/MOD");  
int SLMOD = CODE(4, as_slmod, as_next, 0, 0);
```

`MOD (n n -- r)` 符号付き除算。剰余のみを返す。

```
HEADER(3, "MOD");  
int MODD = CODE(4, as_mod, as_next, 0, 0);
```

`/ (n n -- q)` 符号付き除算。商のみを返す。

```
HEADER(1, "/");  
int SLASH = CODE(4, as_slash, as_next, 0, 0);
```

`UM* (u1 u2 -- ud)` 符号なし乗算。double の積を返す。

```
HEADER(3, "UM*");  
int UMSTA = CODE(4, as_umsta, as_next, 0, 0);
```

`* (n n -- n)` 符号付き乗算。singleの積を返す。

```
HEADER(1, "*");  
int STAR = CODE(4, as_star, as_next, 0, 0);
```

`M* (n1 n2 -- d)` 符号付き乗算。doubleの積を返します。

```
HEADER(2, "M*");  
int MSTAR = CODE(4, as_mstar, as_next, 0, 0);
```

`*/MOD (n1 n2 n3 -- r q)` n1 と n2 を乗算し、n3 で除算する。剰余と商を返す。

```
HEADER(5, "*/MOD");  
int SSMOD = CODE(4, as_ssmod, as_next, 0, 0);
```

`*/ (n1 n2 n3 -- q)` n1 を n2 で乗算し、n3 で除算する。商のみを返す。

```
HEADER(2, "*/");
int STASL = CODE(4, as_stasl, as_next, 0, 0);
```

PICK (... +n -- ... w) スタックの n 番目の項目を先頭にコピーします。

```
HEADER(4, "PICK");
int PICK = CODE(4, as_pick, as_next, 0, 0);
```

+! (n a --) アドレスaの指す内容にnを加算する。

```
HEADER(2, "+!");
int PSTOR = CODE(4, as_pstor, as_next, 0, 0);
```

2! (d a --) アドレス a にdoubleの整数を格納する。

```
HEADER(2, "2!");
int DSTOR = CODE(4, as_dstor, as_next, 0, 0);
```

2@ (a -- d) Fetch double integer from address a.

2@ (a -- d) アドレス a から doubleの整数を取得する。

```
HEADER(2, "2@");
int DAT = CODE(4, as_dat, as_next, 0, 0);
```

COUNT (b -- b+1 +n) 文字列のカウンタバイトを返し、バイトアドレスに1を加える(カウンタ付き文字列の2値を返す)。

```
HEADER(5, "COUNT");
int COUNT = CODE(4, as_count, as_next, 0, 0);
```

MAX (n1 n2 -- n) スタックの先頭の2つの項目のうち大きい方を返す。

```
HEADER(3, "MAX");
int MAX = CODE(4, as_max, as_next, 0, 0);
```

MIN (n1 n2 -- n) スタックの上位2項目のうち、小さい方を返す。

```
HEADER(3, "MIN");  
int MIN = CODE(4, as_min, as_next, 0, 0);
```

BL (-- 32) 空白文字のASCIIコード32を返す。

```
HEADER(2, "BL");  
int BLANK = CODE(8, as_docon, as_next, 0, 0, 32, 0, 0, 0);
```

CELL (-- 4) 32ビット整数のバイト数を返す。

```
HEADER(4, "CELL");  
int CELL = CODE(8, as_docon, as_next, 0, 0, 4, 0, 0, 0);
```

CELL+ (n - n+4) n に 4 を加える。

```
HEADER(5, "CELL+");  
int CELLP = CODE(8, as_docon, as_plus, as_next, 0, 4, 0, 0, 0);
```

CELL- (n - n-4) n から 4 を引く。

```
HEADER(5, "CELL-");  
int CELLM = CODE(8, as_docon, as_subb, as_next, 0, 4, 0, 0, 0);
```

CELLS (n - n*4) nに4を乗じる。

```
HEADER(5, "CELLS");  
int CELLS = CODE(8, as_docon, as_star, as_next, 0, 4, 0, 0, 0);
```

CELL/ (n - n+4) nを4で割る。

```
HEADER(5, "CELL/");  
int CELLD = CODE(8, as_docon, as_slash, as_next, 0, 4, 0, 0, 0);
```

1+ (n - n+1) nをインクリメントする。

```
HEADER(2, "1+");  
int ONEP = CODE(8, as_docon, as_plus, as_next, 0, 1, 0, 0, 0);
```

1- (n - n-1) nを減じる。

```
HEADER(2, "1-");
int ONEM = CODE(8, as_docon, as_subb, as_next, 0, 1, 0, 0, 0);
```

DOVAR (- a) 変数のアドレスを返す。

```
HEADER(5, "DOVAR");
int DOVAR = CODE(4, as_dovar, as_next, 0, 0);
```

Chapter 7. Colon Words

HEADER()は、リンクフィールドと名前フィールドをコロンワードに組み立てる。COLON()は、DOLSTバイトコードを書き込んでコードフィールドを形成する。COLON() は、可変長のトークンリストを作成する。トークンは、他のワードのcfaである。

複雑なコロンワードには、制御構造、整数リテラル、文字列リテラルが含まれます。マクロアセンブラは、これらの構造を自動的にトークンリストに構築するためのマクロをすべて備えている。これらのマクロのおかげで、ほとんど文字通りオリジナルのForthのコードをCのリストに書き写すことができた。

一般的なワード

// Common Colon Words

?KEY (-- c T|F) 文字が受信された場合、その文字とtrueフラグを返す。文字を受信していない場合は、falseフラグを返す

```
HEADER(4, "?KEY");
int QKEY = COLON(2, QRX, EXITT);
```

KEY (-- c) コンソールが文字cを受信するのを待ちます。

```
HEADER(3, "KEY");
int KEY = COLON(0);
BEGIN(1, QKEY);
UNTIL(1, EXITT);
```

TX! (c --) Windows コンソールに文字を送信します。

```
HEADER(4, "EMIT");
int EMIT = COLON(2, TXST0, EXITT);
```

WITHIN (u ul uh -- t) は、データスタックの3番目の項目が、データスタックの上位2つの数値で指定された範囲内にあるかどうかをチェックします。範囲は、下限を含み、上限を除く。3番目の項目が範囲内であれば、データスタックに真のフラグが返される。そうでなければ、偽フラグが返される。すべての数値は符号なし整数であると仮定される。

```
HEADER(6, "WITHIN");
int WITHI = COLON(7, OVER, SUBBB, TOR, SUBBB, RFROM, ULESS, EXITT);
```

>CHAR (c -- c) は、非印字可能文字を無害なアンダースコア文字(ASCII 95)に変換する際に非常に重要です。ForthはシリアルI/Oデバイスを通して通信するように設計されているので、Forthが制御文字をホストに出して、ホストコンピュータで予期せぬ動作を引き起こさないようにすることが重要なのです。**>CHAR** は、**TYPE**で送出される前に文字をフィルタリングします。

```
HEADER(5, ">CHAR");
int TCHAR = COLON(8, DOLIT, 0x7F, ANDD, DUPP, DOLIT, 0x7F, BLANK, WITHI);
IF(3, DROP, DOLIT, 0x5F);
THEN(1, EXITT);
```

ALIGNED (b -- a) は、次のセル境界にアドレスを変更し、メモリ内の32ビットワードのアドレスに使用できるようにします。

```
HEADER(7, "ALIGNED");
int ALIGN = COLON(7, DOLIT, 3, PLUS, DOLIT, 0xFFFFFFFFC, ANDD, EXITT);
```

HERE (-- a) は、新しいワードがコンパイルされた場所で、コード辞書の上の最初の空き場所のアドレスを返します。

```
HEADER(4, "HERE");
int HERE = COLON(3, CP, AT, EXITT);
```

PAD (-- a) は、数値を構成する場所であり、また、テキスト文字列が一時的に格納される場所であるテキストバッファのアドレスを返します。

```
HEADER(3, "PAD");
int PAD = COLON(5, HERE, DOLIT, 0x50, PLUS, EXITT);
```

TIB (-- a) は、入力文字列が保持されている端末入力バッファ(terminal input buffer)を返します。

```
HEADER(3, "TIB");
int TIB = COLON(3, TTIB, AT, EXITT);
```

@EXECUTE (a --) は、Forthのベクタ実行ワードをサポートする特別なワードです。トークンのコードフィールドアドレスをフェッチし、トークンを実行する。

```
HEADER(8, "@EXECUTE");
int ATEXE = COLON(2, AT, QDUP);
IF(1, EXECU);
THEN(1, EXITT);
```

CMOVE (b b u --) は、メモリ配列をある位置から別の位置へコピーします。一度に1バイトずつコピーします。

```
HEADER(5, "CMOVE");
int CMOVEE = COLON(0);
FOR(0);
AFT(8, OVER, CAT, OVER, CSTOR, TOR, ONEP, RFROM, ONEP);
THEN(0);
NEXT(2, DDROP, EXITT);
```

MOVE (b b u --) は、メモリ配列をある位置から別の位置へコピーします。一度に1ワードずつコピーします。

```
HEADER(4, "MOVE");
int MOVE = COLON(1, CELLD);
FOR(0);
AFT(8, OVER, AT, OVER, STORE, TOR, CELLP, RFROM, CELLP);
THEN(0);
NEXT(2, DDROP, EXITT);
```

FILL(b u c --) は、メモリ配列に同じバイトcを埋める。

```
HEADER(4, "FILL");
int FILL = COLON(1, SWAP);
FOR(1, SWAP);
AFT(3, DDUP, CSTOR, ONEP);
THEN(0);
NEXT(2, DDROP, EXITT);
```

Numeric Output

Forthは、マン・マシン・インターフェース上で数字を扱う特別な機能を備えているのが興味深いところです。Forthは、機械と人間が非常に異なった数字の表現を好むことを認識している。機械は2進数表現を好みますが、人間は10進数のアラビア数字表現を好みます。しかし、状況によっては、16進数、8進数、時には2進数など、他の基数で数字を表現してほしい場合もあります。

Forthは、CPUやメモリ上ではすべての数字を2進数で表現することにこだわり、この内部(機械)対外部(人間)の数字表現の問題を解決している。人間が使用するために数値をインポートまたはエクスポートするときだけ、外部のASCII表現に変換されます。外部表現の基数は、変数BASEに格納されている基数値で制御される。

BASEはシステム変数なので、コンピュータに数値を入力したり、表示される数値をフォーマットしたりする際に、合理的な基数を選択することができる。ほとんどのプログラミング言語では、10進数、8進数、16進数、2進数のように、明示的な接頭辞や接尾辞で基数を表す限られた数の基数セットを扱うことができます。Forthでは、数値変換のための基数は暗黙のうちにBASEに格納されています。これは、経験豊富なForthプログラマーでさえも、BASEに何が入っているかを知らなければ、数の真の値を知ることができないため、限りなく悲嘆に暮れることになった。

BASEは、Forth言語を作ったチャック・ムーアによる非常に重要な発明の一つであり、私たちに、その時々
の目的に応じた自由な数値表現を与えてくれる。

// Number Conversions

DIGIT (u -- c) は、整数をASCIIの数字1桁に変換します。

```
HEADER(5, "DIGIT");
int DIGIT = COLON(12, DOLIT, 9, OVER, LESS, DOLIT, 7, ANDD, PLUS, DOLIT,
0X30, PLUS, EXITT);
```

EXTRACT(n base -- n c) は、数値 n から最下位桁を抽出し、n を BASE の基数で割ってスタックに返します。

```
HEADER(7, "EXTRACT");
int EXTRC = COLON(7, DOLIT, 0, SWAP, UMOD, SWAP, DIGIT, EXITT);
```

<# (--) は、PADバッファのアドレスを変数HLDに格納し、次の数字が格納される場所を指すようにして、出力数字の変換処理を開始します。

```
HEADER(2, "<#");
int BDIGS = COLON(4, PAD, HLD, STORE, EXITT);
```

HOLD (c --) は、パラメータスタックのトップにあるコードを持つ ASCII 文字を、HLD にある数値出力文字列に追加します。HLDは、次の桁を受け取るためにデクリメントされます。


```
HEADER(4, "HOLD");
int HOLD = COLON(8, HLD, AT, ONEM, DUPP, HLD, STORE, CSTOR, EXITT);
```

#(dig) (u -- u) は、パラメータスタックのトップの整数から、BASEの基数に従って1桁ずつ抜き出して、出力する数値文字列に追加する。

```
HEADER(1, "#");
int DIG = COLON(5, BASE, AT, EXTRC, HOLD, EXITT);
```

#S (digs) (u -- 0) パラメータスタックの先頭の整数が0になるまで、すべての桁を出力文字列に抽出します。

```
HEADER(2, "#S");
int DIGS = COLON(0);
BEGIN(2, DIG, DUPP);
WHILE(0);
REPEAT(1, EXITT);
```

SIGN (n --) は、パラメータスタックの先頭の整数が負であれば、数値出力文字列に - を挿入する。

```
HEADER(4, "SIGN");
int SIGN = COLON(1, ZLESS);
IF(3, DOLIT, 0X2D, HOLD);
THEN(1, EXITT);
```

#> (w -- b u) は数値変換を終了し、出力される数値文字列のアドレスと長さをパラメータスタックにプッシュします。

```
HEADER(2, "#>");
int EDIGS = COLON(7, DROP, HLD, AT, PAD, OVER, SUBBB, EXITT);
```

str (n -- b u) は、データスタックの先頭にある符号付き整数を数値出力文字列に変換する。

```
HEADER(3, "str");
int STRR = COLON(9, DUPP, TOR, ABSS, BDIGS, DIGS, RFROM, SIGN, EDIGS, EXITT);
```

HEX (--) は、BASE の数値変換基数を 16 に設定し、16 進数変換を行います。

```
HEADER(3, "HEX");
int HEXX = COLON(5, DOLIT, 16, BASE, STORE, EXITT);
```

DECIMAL (--) は、BASE の数値変換基数を 10 に設定し、10 進数変換を行います。

```
HEADER(7, "DECIMAL");
int DECIM = COLON(5, DOLIT, 10, BASE, STORE, EXITT);
```

wupper (w -- w') は、ワード内の4バイトを大文字に変換する。

```
HEADER(6, "wupper");
int UPPER = COLON(4, DOLIT, 0x5F5F5F5F, ANDD, EXITT);
```

>upper (c -- UC) は、文字を大文字に変換します。

```
HEADER(6, ">upper");
int TOUPP = COLON(6, DUPP, DOLIT, 0x61, DOLIT, 0x7B, WITHI);
IF(3, DOLIT, 0x5F, ANDD);
THEN(1, EXITT);
```

DIGIT? (c base -- u t) は数字1桁を現在の基数に従って数値に変換し、**NUMBER?** は数値文字列を1つの整数に変換する。

```
HEADER(6, "DIGIT?");
int DIGTQ = COLON(9, TOR, TOUPP, DOLIT, 0x30, SUBBB, DOLIT, 9, OVER, LESS);
IF(8, DOLIT, 7, SUBBB, DUPP, DOLIT, 10, LESS, ORR);
THEN(4, DUPP, RFROM, ULESS, EXITT);
```

NUMBER? (a -- n T | a F) は、数字文字列を1つの整数に変換する。最初の文字が\$記号の場合、数値は16進数であるとみなされます。それ以外の場合は、**BASE**に格納されている基数を用いて変換されます。負の数の場合、最初の文字は-記号でなければならない。文字列中に他の文字は許されない。数字以外の文字に遭遇した場合、その文字列のアドレスとfalseフラグが返される。変換に成功した場合は、整数値とtrueフラグが返される。数値が 2^n (nは1つの整数のビット幅)より大きい場合、 2^n までの剰余のみが保持される。

```
HEADER(7, "NUMBER?");
int NUMBQ = COLON(12, BASE, AT, TOR, DOLIT, 0, OVER, COUNT, OVER, CAT,
DOLIT, 0x24, EQUAL);
IF(5, HEXX, SWAP, ONEP, SWAP, ONEM);
THEN(13, OVER, CAT, DOLIT, 0x2D, EQUAL, TOR, SWAP, RAT, SUBBB, SWAP, RAT,
PLUS, QDUP);
```

```
IF(1, ONEM);
FOR(6, DUPP, TOR, CAT, BASE, AT, DIGTQ);
WHILE(7, SWAP, BASE, AT, STAR, PLUS, RFROM, ONEP);
NEXT(2, DROP, RAT);
IF(1, NEGAT);
THEN(1, SWAP);
ELSE(6, RFROM, RFROM, DDROP, DDROP, DOLIT, 0);
THEN(1, DUPP);
THEN(6, RFROM, DDROP, RFROM, BASE, STORE, EXITT);
```

Number Output

出力される数値列は、'PAD'バッファの下に構築される。データスタックの最上位にある整数から最下位桁を抽出し、BASEの現在の基数で割る。こうして抽出された1桁の数字は出力文字列に対して、PADから下位メモリへ逆方向に追加されます。整数を除算してゼロになったとき、変換は終了する。数値文字列のアドレスと長さは、**#>**が出力に利用できるようになる。

出力する数値変換は、**<#**で開始され、**#>**で終了する。この間、**#**は1桁ずつ変換し、**#S**は全桁を変換し、**HOLD**と**SIGN**は構築中の文字列に特殊文字を挿入する。このトークンのセットは非常に汎用性が高く、多くの異なる出力形式を扱うことができる。

// Terminal Output

SPACE (--) は、空白文字を出力します。

```
HEADER(5, "SPACE");
int SPACE = COLON(3, BLANK, EMIT, EXITT);
```

CHARS (+n c --) は、cをn文字出力します。

```
HEADER(5, "CHARS");
int CHARS = COLON(4, SWAP, DOLIT, 0, MAX);
FOR(0);
AFT(2, DUPP, EMIT);
THEN(0);
NEXT(2, DROP, EXITT);
```

SPACES (+n --) は、空白を n 文字出力します。

```
HEADER(6, "SPACES");
int SPACS = COLON(3, BLANK, CHARS, EXITT);
```

TYPE (b u --) は、メモリ上の文字列からn文字を出力する。非 ASCII 文字はアンダースコア文字に置き換えられます。

```

HEADER(4, "TYPE");
int TYPES = COLON(0);
FOR(0);
AFT(3, COUNT, TCHAR, EMIT);
THEN(0);
NEXT(2, DROP, EXITT);

```

CR (--) は、キャリッジリターンとラインフィードを出力します。

```

HEADER(2, "CR");
int CR = COLON(7, DOLIT, 10, DOLIT, 13, EMIT, EMIT, EXITT);

```

do\$ (-- \$adr) は、リターンスタックの2番目の項目として格納されている文字列のアドレスを取得します。**do\$**が少しわかりにくいのは、次の文字列の開始アドレスがリターンスタックの2番目の項目であることです。このアドレスは、文字列にアクセスできるように、データスタックにプッシュされます。このアドレスは、アドレスインタプリタがコンパイルされた文字列の直後のトークンに戻るように変更する必要があります。このアドレスによって、アドレスインタープリタは文字列リテラルをスキップして、意図したとおりにトークン・リストを実行し続けることができるようになります。**\$"|** と **."|** は両方とも **do\$** というワードを使用します。

```

HEADER(3, "do$");
int DOSTR = COLON(10, RFROM, RAT, RFROM, COUNT, PLUS, ALIGN, TOR, SWAP,
TOR, EXITT);

```

\$"| (-- a) は、次の文字列のアドレスをスタックにプッシュします。他のワードはこのアドレスを使って、この文字列に格納されているデータにアクセスすることができます。この文字列は、カウントされた文字列です。最初のバイトはバイト数です。

```

HEADER(3, "$\"|");
int STRQP = COLON(2, DOSTR, EXITT);

```

"| (--) は、スタック上の次の文字列を表示します。これは、実行時にヘルプメッセージを送るのに非常に便利な方法です。

```

HEADER(3, ".\"|");
DOTQP = COLON(4, DOSTR, COUNT, TYPES, EXITT);

```

.R (u +n --) は、パラメータスタックの2番目の項目である符号付き整数nを、+n文字のフィールドに右寄せで表示します。+nはパラメータスタックの最上位にあるものです。

```
HEADER(2, ".R");
int DOTR = COLON(8, TOR, STRR, RFROM, OVER, SUBBB, SPACS, TYPES, EXITT);
```

U.R (u +n --) は符号なし整数 n を右寄せで +n 文字のフィールドに表示します。

```
HEADER(3, "U.R");
int UDOTR = COLON(10, TOR, BDIGS, DIGS, EDIGS, RFROM, OVER, SUBBB, SPACS,
TYPES, EXITT);
```

U. (u --) は、符号なし整数 u をフリーフォーマットで表示し、その後にスペースを表示します。

```
HEADER(2, "U.");
int UDOT = COLON(6, BDIGS, DIGS, EDIGS, SPACE, TYPES, EXITT);
```

. (ドット) (n --) 符号付き整数 n をフリーフォーマットで表示し、その後にスペースを表示します。

```
HEADER(1, ".");
int DOT = COLON(5, BASE, AT, DOLIT, 0XA, XORR);
IF(2, UDOT, EXITT);
THEN(4, STRR, SPACE, TYPES, EXITT);
```

? (a --) パラメータスタックの先頭のアドレス a が指すメモリに格納されている符号付き整数をフリーフォーマットで表示し、その後にスペースを表示します。

```
HEADER(1, "?");
int QUEST = COLON(3, AT, DOT, EXITT);
```

Parsing

構文解析はコンピュータサイエンスにおいて非常に高度なトピックであると常に考えられています。しかし、Forthは非常にシンプルな構文規則を使用しているため、構文解析は容易です。Forthのソースコードは、ワードから構成されます。ワードは、ASCII文字列を、スペースやタブ、キャリッジリターン、ラインフィードなどの空白文字で区切ったものです。テキストインタプリタは、ソースコードをスキャンしてワードを分離し、順番に解釈していく。入力テキストストリームからワードが解析された後、テキストインタプリタはそれを「解釈」します。それがトークンであれば実行し、テキストインタプリタがコンパイルモードであればコンパイルし、そのワードがForthトークンでなければ数値に変換します。

PARSE は、端末の入力バッファ内のソース文字列を **>IN** が指す位置からバッファの終わりまで走査して、文字 c で区切られたワードを探します。**PARSE** は (**parse**) を呼び出して汚れ仕事をさせます。

```
// Parser
```

(parse) (b1 u1 c --b2 u2 n) b1 で始まり u1 文字の長さのソース文字列から、文字 c で区切られた最初のワードをパースアウトします。先頭の区切り文字は読み飛ばされます。(parse)はPARSEで使用されます。

```
HEADER(7, "(parse)");
int PARS = COLON(5, TEMP, CSTOR, OVER, TOR, DUPP);
IF(5, ONEM, TEMP, CAT, BLANK, EQUAL);
IF(0);
FOR(6, BLANK, OVER, CAT, SUBBB, ZLESS, INVER);
WHILE(1, ONEP);
NEXT(6, RFROM, DROP, DOLIT, 0, DUPP, EXITT);
THEN(1, RFROM);
THEN(2, OVER, SWAP);
FOR(9, TEMP, CAT, OVER, CAT, SUBBB, TEMP, CAT, BLANK, EQUAL);
IF(1, ZLESS);
THEN(0);
WHILE(1, ONEP);
NEXT(2, DUPP, TOR);
ELSE(5, RFROM, DROP, DUPP, ONEP, TOR);
THEN(6, OVER, SUBBB, RFROM, RFROM, SUBBB, EXITT);
THEN(4, OVER, RFROM, SUBBB, EXITT);
```

PACK\$ (b u a -- a) は、ソース文字列 (b u) をターゲットアドレス a にコピーする。ターゲット文字列は、セル境界まで null 埋めされる。ターゲットアドレスaが返される。

```
HEADER(5, "PACK$");
int PACKS = COLON(18, DUPP, TOR, DDUP, PLUS, DOLIT, 0xFFFFFFFFFC, ANDD,
DOLIT, 0, SWAP, STORE, DDUP, CSTOR, ONEP, SWAP, CMOVEE, RFROM, EXITT);
```

PARSE (c -- b u ; <string>) は、端末の入力バッファの >IN が指す位置からバッファの終わりまで、文字 c で区切られたワードのソース文字列をスキャンします。PARSE は (parse) を呼び出して汚れ仕事をさせます。

```
HEADER(5, "PARSE");
int PARSE = COLON(15, TOR, TIB, INN, AT, PLUS, NTIB, AT, INN, AT, SUBBB,
RFROM, PARS, INN, PSTOR, EXITT);
```

TOKEN (-- a ;; <string>) は、入力バッファから次のワードを解析し、カウントされた文字列を名前辞書の先頭にコピーする。このカウントされた文字列のアドレスを返す。

```
HEADER(5, "TOKEN");
int TOKEN = COLON(9, BLANK, PARSE, DOLIT, 0x1F, MIN, HERE, CELLP, PACKS,
EXITT);
```

WORD (c -- a ; <string>)は、ASCII文字cで区切られた次のワードを解析し、そのワードをコード辞書の先頭にコピーし、このカウントされた文字列のアドレスを返します。

```
HEADER(4, "WORD");
int WORDD = COLON(5, PARSE, HERE, CELLP, PACKS, EXITT);
```

Dictionary Search

Forthでは、ワードレコードは辞書にリンクされ、検索して有効なワードを見つけることができる。ヘッダは、前のヘッダの名前フィールドのアドレスを保持するリンクフィールド、名前をカウントした文字列を保持する名前フィールド、ワードの実行アドレスを保持するコードフィールド、および処理するデータを保持するパラメータフィールドの4つのフィールドを含む。辞書は、リンクフィールドと名前フィールドを経由してリンクされたリストである。**find**はリンクリストを走査して入力文字列と一致する名前を探し、一致するものがあればコードフィールドのアドレスと実行トークンの名前フィールドのアドレスを返すという基本的な検索機能を持つ。

NAME> (nfa - cfa) ワードの名前フィールドアドレスからコードフィールドアドレスを返す。

```
HEADER(5, "NAME>");
int NAMET = COLON(7, COUNT, DOLIT, 0x1F, ANDD, PLUS, ALIGN, EXITT);
```

SAME? (a1 a2 n - a1 a2 f) a1 と a2 の文字列中の n/4 個のワードを比較する。もし文字列が同じなら0を返す。もしa1の文字列がa2の文字列より大きければ正の数を返し、そうでなければ負の数を返す。

FINDは、入力文字列の1語目と名前を比較する。この2つのワードが同じであれば、**SAME?** が呼ばれ、残りの2つの文字列が比較される。

```
HEADER(5, "SAME?");
int SAMEQ = COLON(4, DOLIT, 0x1F, ANDD, CELLD);
FOR(0);
AFT(14, OVER, RAT, CELLS, PLUS, AT, UPPER, OVER, RAT, CELLS, PLUS, AT,
UPPER, SUBBB, QDUP);
IF(3, RFROM, DROP, EXITT);
THEN(0);
THEN(0);
NEXT(3, DOLIT, 0, EXITT);
```

find (a va -- cfa nfa, a F) は、辞書からあるワードを検索する。aの指すカウント付き文字列は、辞書で検索するトークンの名前である。辞書の最後の名前フィールドのアドレスは、場所vaに格納される。文字列が見つかった場合、コードフィールドのアドレスと名前フィールドのアドレスの両方が返される。文字列がトークンの名前でない場合、文字列自身のアドレスとfalseフラグが返される。

```
HEADER(4, "find");
int FIND = COLON(10, SWAP, DUPP, AT, TEMP, STORE, DUPP, AT, TOR, CELLP,
SWAP);
```

```
BEGIN(2, AT, DUPP);
IF(9, DUPP, AT, DOLIT, 0xFFFFFFFF3F, ANDD, UPPER, RAT, UPPER, XORR);
IF(3, CELLP, DOLIT, 0xFFFFFFFF);
ELSE(4, CELLP, TEMP, AT, SAMEQ);
THEN(0);
ELSE(6, RFROM, DROP, SWAP, CELLM, SWAP, EXITT);
THEN(0);
WHILE(2, CELLM, CELLM);
REPEAT(9, RFROM, DROP, SWAP, DROP, CELLM, DUPP, NAMET, SWAP, EXITT);
```

(NAME?の説明が抜けている?)

```
HEADER(5, "NAME?");
int NAMEQ = COLON(3, CNTXT, FIND, EXITT);
```

Terminal Input

テキストインタプリタは、端末の入力バッファに格納された入力テキストストリームを解釈する。私たちは誰も完璧にタイプすることはできない。誤入力を許容し、バックアップや訂正の機会を与えなければならない。最低限の編集を可能にするために、このように受け取ったバックスペースとキャリッジリターンを処理するための3つの特別な言葉が必要である。**^H**、**TAP**、**KTAP**である。これらのワードはデータスタック上の3つのアドレスを操作するため、理解するのは難しい。**bot**は端末バッファの底、**eot**は端末バッファの終端、**cur**はカレントポインタである。

// Terminal Input

^H (**bot eot cur -- bot eot cur**) バックスペース文字を処理する。最後の文字を消去し、**cur**をデクリメントする。**cur=bot** の場合は、入力バッファの先頭から先にはバックアップできないので、何もしない。

```
HEADER(2, "^H");
int HATH = COLON(6, TOR, OVER, RFROM, SWAP, OVER, XORR);
IF(9, DOLIT, 8, EMIT, ONEM, BLANK, EMIT, DOLIT, 8, EMIT);
THEN(1, EXITT);
```

TAP (**bot eot cur c -- bot eot cur**) 出力デバイスに **c** をエコーし、**c** を **cur** に格納し、**cur** をバンプする。

```
HEADER(3, "TAP");
int TAP = COLON(6, DUPP, EMIT, OVER, CSTOR, ONEP, EXITT);
```

KTAP (**bot eot cur c -- bot eot cur**) 入力バッファ内の文字**c**を処理します。**bot**は入力バッファの開始アドレス、**eot**は入力バッファの終了アドレス、**cur**は現在の文字ポインタです。通常、文字**c**は**cur**

に格納され、**cur**は1つインクリメントされる。**c**がキャリッジリターンの場合、スペースをエコーし、**eot=cur**とする。**c**がバックスペースの場合、最後の文字を消去し、**cur**をデクリメントする。

```
HEADER(4, "kTAP");
int KTAP = COLON(9, DUPP, DOLIT, 0XD, XORR, OVER, DOLIT, 0XA, XORR, ANDD);
IF(3, DOLIT, 8, XORR);
IF(2, BLANK, TAP);
ELSE(1, HATH);
THEN(1, EXITT);
THEN(5, DROP, SWAP, DROP, DUPP, EXITT);
```

ACCEPT (b u1 --b u2) b に u1 個の文字を受ける。返し値u2は実際に受け取った文字数である。

```
HEADER(6, "ACCEPT");
int ACCEP = COLON(3, OVER, PLUS, OVER);
BEGIN(2, DDUP, XORR);
WHILE(7, KEY, DUPP, BLANK, SUBBB, DOLIT, 0X5F, ULESS);
IF(1, TAP);
ELSE(1, KTAP);
THEN(0);
REPEAT(4, DROP, OVER, SUBBB, EXITT);
```

EXPECT (b u1 --) accepts u1 characters to b. Number of characters accepted is stored in SPAN.

EXPECT (b u1 --) は、b に u1 文字を受け入れる。受け取った文字数は**SPAN**に格納される。

```
HEADER(6, "EXPECT");
int EXPEC = COLON(5, ACCEP, SPAN, STORE, DROP, EXITT);
```

QUERYは、入力デバイスから最大80文字までのテキスト入力を受け付け、そのテキスト文字を端末入力バッファにコピーするワードである。また、**#TIB**に受信文字数を設定し、**>IN**をクリアすることで、端末入力バッファを解析する準備をします。

```
HEADER(5, "QUERY");
int QUERY = COLON(12, TIB, DOLIT, 0X50, ACCEP, NTIB, STORE, DROP, DOLIT, 0,
INN, STORE, EXITT);
```

Text Interpreter

テキストインタプリタは、Forthの心臓部です。コンピュータのオペレーティングシステムのようなものです。あなたとコンピュータの間の主要なインターフェイスです。Forthでは、ワードはスペースで区切るという非常にシンプルな構文ルールを採用しているので、テキストインタプリタも非常にシンプルなものとなっています。端末のキーボードから入力されたテキスト1行分を受け取り、スペースで区切られたワードを解析し、そのワードのトークンを辞書で検索し、実行する。この処理は、テキスト行を処理し尽くすまで繰り返す。

返される。次に、テキストインタプリタは、別の行のテキストを待って、それを再び解釈する。このサイクルは、あなた自身が疲れ果ててコンピュータの電源を切るまで繰り返される。

Forthでは、テキスト・インタプリタはQUITというワードにコード化されています。QUITは、QUERYとEVALコマンドを繰り返す無限ループを含んでいます。QUERYはターミナルからテキスト行を受け取り、そのテキストをターミナルインプットバッファ(TIB)にコピーします。EVALは、行の終わりまで一度に1ワードずつテキストを解釈する。

Forthのユニークな機能の1つは、そのエラー処理メカニズムです。EVALがテキスト行を解釈している間、多くのエラー状態に遭遇する可能性があります：ワードが辞書で見つからない、ワードが数字でない、コンパイル専用のワードが誤って解釈的に実行された、解釈プロセスがABORTまたはabortというワードによって中断されるかもしれません。どこでエラーが発生しても、テキストインタプリタはリセットされ、ABORTでやり直される。

// Text Interpreter

ABORT (--) はシステムをリセットし、テキストインタプリタループEVALに再突入する。実際に実行されるのは、'ABORT'に格納されたEVALである。

```
HEADER(5, "ABORT");
int ABORT = COLON(2, TABRT, ATEXE);
```

abort"| (f --) エラーメッセージの文字列の前にコンパイルされる実行時文字列のワードです。フラグfが真の場合、以下の文字列を表示し、ABORTにジャンプする。フラグfがfalseの場合、以下の文字列を無視し、エラーメッセージの後のトークンを実行し続ける。

```
HEADER(6, "abort\"");
ABORQP = COLON(0);
IF(4, DOSTR, COUNT, TYPES, ABORT);
THEN(3, DOSTR, DROP, EXITT);
```

ERROR (a --) は a のエラーメッセージと?マークを表示し、ABORT します。

```
HEADER(5, "ERROR");
int ERRORR = COLON(11, SPACE, COUNT, TYPES, DOLIT, 0x3F, EMIT, DOLIT, 0x1B,
EMIT, CR, ABORT);
```

\$INTERPRET (a --) は、スタック上の文字列アドレスのワードを実行します。文字列がワードでない場合は、数値に変換します。数値でない場合は、ABORTします。

```
HEADER(10, "$INTERPRET");
int INTER = COLON(2, NAMEQ, QDUP);
IF(4, CAT, DOLIT, COMPO, ANDD);
ABORQ(" compile only");
int INTER0 = LABEL(2, EXECU, EXITT);
```

```
THEN(1, NUMBQ);
IF(1, EXITT);
ELSE(1, ERRORR);
THEN(0);
```

[(左鍵括弧) (--) は、\$INTERPRETの実行アドレスを変数'EVAL'に格納し、テキストインタプリタがインタプリタモードの時にEVALで実行され、テキストインタプリタを有効にします。

```
HEADER(IMEDD + 1, "[");
int LBRAC = COLON(5, DOLIT, INTER, TEVAL, STORE, EXITT);
```

.OK (--) は、以前は、行末まで実行した後にお馴染みの 'ok' プロンプトを表示するワードでした。ceForth_33 では、データスタックの上位4要素を表示するので、スタック上で何が起きているのかがわかります。単に 'ok' プロンプトを表示するだけよりも情報が多くなります。テキストインタプリタがコンパイルモードのときは、この表示は抑止されます。

```
HEADER(3, ".OK");
int DOTOK = COLON(6, CR, DOLIT, INTER, TEVAL, AT, EQUAL);
IF(14, TOR, TOR, TOR, DUPP, DOT, RFROM, DUPP, DOT, RFROM, DUPP, DOT, RFROM,
DUPP, DOT); DOTQ(" ok>"); THEN(1, EXITT);
```

EVAL (--) は、入力ストリームからトークンをパースし、そのトークンを処理するために 'EVAL' にあるものを呼び出すループを持っています。入力ストリームを使い切った時点でループを終了します。

```
HEADER(4, "EVAL");
int EVAL = COLON(0);
BEGIN(3, TOKEN, DUPP, AT);
WHILE(2, TEVAL, ATEXE);
REPEAT(3, DROP, DOTOK, EXITT);
```

QUIT (--) は、Forth システムのオペレーティング・システム、またはシェルです。QUITは無限ループであり、Forthはそこから抜け出すことはありません。QUERY を使ってターミナルからテキスト1行を受け取り、EVAL にトークンを解析させ、それを実行させます。1行が処理されると、データスタックの先頭を表示し、次のテキスト行を待ちます。実行中にエラーが発生した場合は、エラーの原因となったコマンドをエラーメッセージとともに表示する。エラーを報告すると、ABORTにジャンプしてシステムを再初期化する。'EVAL'に\$INTERPRETまたは\$COMPILEを格納することでEVALの動作を変更できるため、QUITはテキストインタプリタとコンパイラの二面性を持っている。

```
HEADER(4, "QUIT");
int QUITT = COLON(5, DOLIT, 0X100, TTIB, STORE, LBRAC);
BEGIN(2, QUERY, EVAL);
AGAIN(0);
```

Chapter 9. Colon Compiler

テキストインタプリタを一通り眺めた後では、Forthコンパイラは楽勝でしょう。なぜなら、コンパイラはテキストインタプリタが使用するモジュールをほとんどすべて使用しているからです。コンパイルがテキストインタプリタ以上に行うことは、あなたが `.data` セグメントに追加した新しいワードが必要とするさまざまな構造を構築することです。以下は、これらの構造のリストである。

- コロンワード Colon words
- 定数 Constants
- 変数 Variables
- 整数リテラル Integer literals
- 文字列リテラル String literals
- アドレスリテラルと制御構造 Address literals and control structures

即値ワード(immediate words)という概念は、その特殊さゆえに、最初は理解するのが難しい。コロンワードの中に異なるデータや制御構造を構築する必要があるため、即値ワードがコンパイラに必要とされるのです。Forthコンパイラを完全に理解するためには、コンパイル時に行われる動作と実行時に行われる動作を区別し、関連付けることができなければならない。ひとたびこれらの概念が明確になれば、Forthのシステム全体が透明化されます。

Forthコンパイラは、Forthテキストインタプリタの双子の兄弟です。両者は多くの共通特性を持ち、多くの共通コードを使用しています。Forthでは、コンパイラの実装は、この特別な二面性を明確に反映しています。2つの興味深いワード[と]によって、テキストインタプリタはコンパイラモードとインタプリタモードの間を行ったり来たりします。

`EVAL`の中で、テキスト行からパースされたトークンを処理するために'`EVAL @EXECUTE`を使うので、'`EVAL`の内容がテキストインタプリタの動作を決定する。'`EVAL`に`$INTERPRET`を格納すると、[と同様に、トークンが実行または解釈されます。'`EVAL`に`$COMPILE`を格納するために[を呼び出すと、トークンは実行されず、辞書の先頭にコンパイルされます。これはまさに、コロンワードコンパイラが辞書の新しいコロンワードのパラメータ・フィールドにトークンのリストを構築する際に望む動作である。

通常、`$COMPILE`はトークンを辞書に追加します。しかし、2つの例外を処理する必要があります。入力ストリームから解析された文字列が辞書内のワードでない場合、その文字列は数値に変換されます。文字列が整数に変換できる場合、その整数は、特別なトークン`DOLIT`とその次に整数を並べた整数リテラルとして辞書にコンパイルされる。もう1つの例外は、辞書で見つかったトークンが、辞書に書き込まれずにすぐに実行されなければならない即時ワードである可能性があることです。即値ワードは、コロンワードの構造をコンパイルするために使用されます。

// Colon Word Compiler

, (コンマ) (w --) は、データスタックの一番上にあるトークンの実行アドレスをコード辞書に追加します。すなわち、現在構築中のワードのトークンリストにトークンをコンパイルし、リストを成長させます。

```
HEADER(1, ",");
int COMMA = COLON(7, HERE, DUPP, CELLP, CP, STORE, STORE, EXITT);
```

LITERAL (n --) は、現在構築中の複合語に整数リテラルをコンパイルします。整数リテラルはデータスタックから取り出され、その前にトークン**DOLIT**を置きます。この複合語が実行されると、**DOLIT**はトークンリストから整数を取り出し、データスタックにプッシュし戻します。**LITERAL**は、コンパイルされた整数がたまたまトークンの実行アドレスであった場合、アドレスリテラルをコンパイルします。このアドレスは、**DOLIT**によって実行時にデータスタックにプッシュされる。

```
HEADER(IMEDD + 7, "LITERAL");
int LITER = COLON(5, DOLIT, DOLIT, COMMA, COMMA, EXITT);
```

ALLLOT (n --) は、辞書の先頭にnバイトのメモリを確保する。一度割り当てられたら、コンパイラはそのメモリ位置に触れない。この配列の確保と初期化は、**, (コンマ)**というワードを使って行うことができる。

```
HEADER(5, "ALLLOT");
int ALLLOT = COLON(4, ALIGN, CP, PSTOR, EXITT);
```

\$, " (--) は、二重引用符で区切られた次のワードを取り出す。文字列リテラルとしてコンパイルする。

```
HEADER(3, "$, \"");
int STRCQ = COLON(9, DOLIT, 0x22, WORDD, COUNT, PLUS, ALIGN, CP, STORE,
EXITT);
```

?UNIQUE (a -- a) は、新しいワードの名前がすでに辞書に存在することを示す警告メッセージを表示するために使用されます。Forthは、異なるワードに対して同じ名前を再利用することを気にしません。しかし、多くのワードに同じ名前をつけることは、ソフトウェアプロジェクトを維持する上で問題の原因となる可能性があります。可能であれば避けるべきことであり、**?UNIQUE**はそれをチェックしてあなたに教えてくれます。

```
HEADER(7, "?UNIQUE");
int UNIQU = COLON(3, DUPP, NAMEQ, QDUP);
IF(6, COUNT, DOLIT, 0x1F, ANDD, SPACE, TYPES);
DOTQ(" reDef");
THEN(2, DROP, EXITT);
```

\$, n (a --) PACK\$によってすでに辞書の先頭に移動された名前を使用して、辞書に新しい名前フィールドを構築する。リンクフィールドには、**LAST**に格納されたアドレスを埋めます。これで、コード辞書に新しいトークンを構築することができます。

```
HEADER(3, "$, n");
int SNAME = COLON(2, DUPP, AT);
IF(14, UNIQU, DUPP, NAMET, CP, STORE, DUPP, LAST, STORE, CELLM, CNTXT, AT,
```

```
SWAP, STORE, EXITT);
THEN(1, ERRORR);
```

' (tick) (-- cfa) は、入力ストリーム中の次のワードを、辞書中のトークンに対して検索します。成功すれば、トークンのコードフィールドアドレスを返す。そうでなければ、エラーメッセージを表示しアボートする。

```
HEADER(1, "");
int TICK = COLON(2, TOKEN, NAMEQ);
IF(1, EXITT);
THEN(1, ERRORR);
```

[COMPILE] (-- ; <string>) は、次のワードを直ちにコンパイルすることを出いて、同じように動作する。通常なら実行される即時ワードであっても、次のワードをコンパイルする。

```
HEADER(IMEDD + 9, "[COMPILE]");
int BCOMP = COLON(3, TICK, COMMA, EXITT);
```

COMPILE (--) は、複合語の中で使用されます。これは、COMPILEの次のトークンをコード辞書の先頭に追加します。したがって、実行時にトークンを強制的にコンパイルすることになる。

```
HEADER(7, "COMPILE");
int COMPI = COLON(7, RFROM, DUPP, AT, COMMA, CELLP, TOR, EXITT);
```

\$COMPILE (a --) は、新しい複合語のボディを構築します。複合語を完成させるためには、名前辞書のヘッダも必要で、そのコードフィールドはdolistバイトコードで始まらなければなりません。これらの追加作業は： (コロソ) によって行われる。複合語はeForthで最も一般的なタイプのワードである。さらに、eForthには、辞書に他のタイプの新しいワードを作成する定義語がいくつかある。

```
HEADER(8, "$COMPILE");
int SCOMP = COLON(2, NAMEQ, QDUP);
IF(4, AT, DOLIT, IMEDD, ANDD);
IF(1, EXECU);
ELSE(1, COMMA);
THEN(1, EXITT);
THEN(1, NUMBQ);
IF(2, LITER, EXITT);
THEN(1, ERRORR);
```

OVERT (--) は、新しいワードを辞書にリンクし、辞書検索に利用できるようにします。

```
HEADER(5, "OVERT");
int OVERT = COLON(5, LAST, AT, CNTXT, STORE, EXITT);
```

](右括弧) (--) インタプリタをコンパイラに変更します。

```
HEADER(1, "]);
int RBRAC = COLON(5, DOLIT, SCOMP, TEVAL, STORE, EXITT);
```

: (コロン) (-- ; <文字列>) は、新しいヘッダを作成し、新しい複合語を開始します。入力ストリーム中の次の文字列を新しい複合語の名前とし、名前辞書にこの名前を持つ新しいヘッダを構築する。そして、コード辞書のコードフィールドの先頭に **dolist** というバイトコードをコンパイルする。これで、コード辞書はトークンリストを受け入れる準備が整った。ここで、](右括弧) が呼び出されて、テキストインタプリタをコンパイラに変え、入力ストリーム内の次のワードをコード辞書内のトークン リストにコンパイルします。新しい複合語は ; で終了し、トークンリストを終了させるために EXIT をコンパイルし、[(左括弧) を実行してコンパイラをテキストインタプリタに戻す。

```
HEADER(1, "):");
int COLN = COLON(7, TOKEN, SNAME, RBRAC, DOLIT, 0x6, COMMA, EXITT);
```

; (セミコロン) (--) は複合語を終了させる。トークン・リストの最後に **EXIT** をコンパイルし、この新しいワードを辞書にリンクし、インタプリタを再アクティブ化する。

```
HEADER(IMEDD + 1, "):");
int SEMIS = COLON(6, DOLIT, EXITT, COMMA, LBRAC, OVERT, EXITT);
```

Debugging Tools

eForthは非常に小さなシステムであり、システムには非常に小さなツールセットしか提供されていません。とはいえ、このツールセットは、システムに追加した新しい言葉をデバッグするのに十分強力です。また、eForthのワードを使ってどのようにアプリケーションを構築するかについて、非常に興味深いプログラミングの例となっています。

一般に、ツールは、eForthシステム内のワードや自分で定義したワードを実行する際に、その結果がユーザーが検査できるように、メモリの異なる部分に格納されている情報を適切な形式で提示する。このツールには、メモリダンプと辞書ダンプがある。

// Debugging Tools

dm+ (b u - b+u) は、アドレスbから始まるuバイトを端末にダンプする。8個のワードがダンプされます。1行は、最初のバイトのアドレスで始まり、8ワードを16進数で表し、同じデータをASCIIで表します。印字不可能な文字はアンダースコアに置き換えられる。次の行をダンプするために新しいアドレスb+uが返される。


```

HEADER(3, "dm+");
int DMP = COLON(4, OVER, DOLIT, 6, UDOTR);
FOR(0);
AFT(6, DUPP, AT, DOLIT, 9, UDOTR, CELLP);
THEN(0);
NEXT(1, EXITT);

```

DUMP (b u --)は、アドレスbから始まるuバイトを端末にダンプします。1行に8ワードがダンプされます。行は最初のバイトのアドレスで始まり、その後に16進数で示された8ワードが続きます。行の終わりには、ASCIIコードで示された32バイトがあります。

```

HEADER(4, "DUMP");
int DUMP = COLON(10, BASE, AT, TOR, HEXX, DOLIT, 0x1F, PLUS, DOLIT, 0x20,
SLASH);
FOR(0);
AFT(10, CR, DOLIT, 8, DDUP, DMP, TOR, SPACE, CELLS, TYPES, RFROM);
THEN(0);
NEXT(5, DROP, RFROM, BASE, STORE, EXITT);

```

>NAME (cfa -- nfa | F)は、トークンのコードフィールドアドレスから、トークンの名前フィールドアドレスを見つける。トークンが辞書に存在しない場合、falseフラグを返す。**>NAME**は**NAME>**の鏡像であり、**NAME>**は名前フィールドのアドレスからトークンのコードフィールドのアドレスを返します。コードフィールドは名前フィールドの直後にあり、その長さはレキシコンバイトに格納されているので、**NAME>**は自明ですが、**>NAME**は、名前フィールドのアドレスを特定するために辞書を検索しなければならないので、より複雑です。

```

HEADER(5, ">NAME");
int TNAME = COLON(1, CNTXT);
BEGIN(2, AT, DUPP);
WHILE(3, DDUP, NAME_T, XORR);
IF(1, ONEM);
ELSE(3, SWAP, DROP, EXITT);
THEN(0);
REPEAT(3, SWAP, DROP, EXITT);

```

.ID (a --)は、トークンの名前フィールドのアドレスに対応するトークンの名前を表示します。また、名前に含まれる印字不可能な文字をアンダースコアに置き換えます。

```

HEADER(3, ".ID");
int DOTID = COLON(7, COUNT, DOLIT, 0x1F, ANDD, TYPES, SPACE, EXITT);

```

WORDS (--)は、辞書に登録されているすべての名前を表示します。ワードの順序は、コンパイルされた順序とは逆になる。最後に定義されたワードが最初に表示される。


```

HEADER(5, "WORDS");
int WORDS = COLON(6, CR, CNTXT, DOLIT, 0, TEMP, STORE);
BEGIN(2, AT, QDUP);
WHILE(9, DUPP, SPACE, DOTID, CELLM, TEMP, AT, DOLIT, 0xA, LESS);
IF(4, DOLIT, 1, TEMP, PSTOR);
ELSE(5, CR, DOLIT, 0, TEMP, STORE);
THEN(0);
REPEAT(1, EXITT);

```

FORGET (-- , <name>)は、その後に続く名前を辞書で検索する。有効なワードであれば、このワードの下辞書を切り詰める。有効なワードでない場合は、エラーメッセージを表示する。

```

HEADER(6, "FORGET");
int FORGT = COLON(3, TOKEN, NAMEQ, QDUP);
IF(12, CELLM, DUPP, CP, STORE, AT, DUPP, CNTXT, STORE, LAST, STORE, DROP,
EXITT);
THEN(1, ERRORR);

```

COLD (--)は、電源投入時に実行される上位ワードです。サインオン・メッセージを送り、QUITを経てテキストインタプリタのループに至ります。

```

HEADER(4, "COLD");
int COLD = COLON(1, CR);
DOTQ("eForth in C, Ver 2.3, 2017 ");
int DOTQ1 = LABEL(2, CR, QUITT);

```

Control Structures

Forthでは、コロンワードで制御構造を構築するために、即値ワードのセットが定義されています。Forthで使われる制御構造は以下の通りです。

Conditional branch	IF ... THEN
	IF ... ELSE ... THEN
Finite loop	FOR ... NEXT
	FOR ... AFT ... THEN... NEXT
Infinite loop	BEGIN ... AGAIN
Indefinite loop	BEGIN ... UNTIL
	BEGIN ... WHILE ... REPEAT

これらのワード群は、エラーチェックを行わないため、また、制御構造への入出口を複数持つことができるため、figForthモデルのワード群より強力です。しかし、制御構造を重ねる(overlap)ことはお勧めしません。Forth言語の学習段階では、それを覚えておくといよいでしょう。

Control structures can be nested, but not overlapped.

制御構造は1つ以上のアドレスリテラルを含み、通常の線形シーケンスから実行を分岐させる。制御構造ワードは、アドレスリテラルをコンパイルし、ブランチアドレスを解決する即時ワードです。

注意すべきは、**BEGIN**と**THEN**はコードをコンパイルしないことです。コンパイル時に実行され、アドレスリテラル内の分岐アドレスを設定し、解決します。**IF**、**ELSE**、**WHILE**、**UNTIL**、**AGAIN**は、**BRANCH**と?**BRANCH**トークンとともにアドレスリテラルをコンパイルします。カウントされたループを設定するには、**FOR**はループを開始するために**>R**をコンパイルし、**NEXT**はループを終了するために**DONXT**アドレスリテラルをコンパイルします。**COMPILE**と**[COMPILE]**を使った優れた例はたくさんあり、注目に値します。

このマクロアセンブラは、前方参照と後方参照を解決するために、リターンスタックを使用します。したがって、スタックの絵は、実行時に使用されるデータスタックではなく、リターンスタックを指します。大文字のAは、正しい分岐先アドレスで埋められるべきアドレスリテラルへのポインタを意味します。小文字のaは、アセンブルされる分岐アドレスを意味します。

以下の制御構造ワードのスタックコメントでは、アドレスリテラル内のアドレスフィールドへのポインタを示すために小文字のaを使用することにする。アドレスフィールドは0に初期化され、後でターゲットアドレスが判明したときに埋められる。大文字のAは、アドレスリテラルのアドレスフィールドを埋めるために使用されるターゲットアドレスを示すために使用されます。

// Structure Compiler

THEN (A --) は、条件分岐構造を終了させる。**IF**または**ELSE**によって残されたAのアドレスリテラルを解決するために、次のトークンのアドレスを使用します。

```
HEADER(IMEDD + 4, "THEN");
int THENN = COLON(4, HERE, SWAP, STORE, EXITT);
```

FOR (-- a) は、コロンの定義でFOR-NEXTループ構造を開始します。これは**>R**をコンパイルし、リターンスタックにループカウントをプッシュします。また、次のトークンのアドレスをデータスタックに残し、**NEXT**が正しい分岐アドレスを持つ**DONEXT**アドレスリテラルをコンパイルできるようにします。

```
HEADER(IMEDD + 3, "FOR");
int FORR = COLON(4, COMPI, TOR, HERE, EXITT);
```

BEGIN (-- a) は、不定回数ループ構造または定回数ループ構造を開始します。これは何もコンパイルしませんが、現在のトークンアドレスをデータスタックに残し、後でコンパイルされるアドレスリテラルを解決します。

```
HEADER(IMEDD + 5, "BEGIN");
int BEGIN = COLON(2, HERE, EXITT);
```

NEXT (a --) FOR-NEXTループ構造を終了し、**DONEXT**アドレスリテラルをコンパイルして、データスタック上のAアドレスにジャンプバックします。

```
HEADER(IMEDD + 4, "NEXT");
int NEXT = COLON(4, COMPI, DONXT, COMMA, EXITT);
```

UNTIL (a --) は、BEGIN-UNTILの不定回数ループ構造を終了させる。データスタック上のアドレスを用いて**QBRANCH**アドレスリテラルをコンパイルします。

```
HEADER(IMEDD + 5, "UNTIL");
int UNTIL = COLON(4, COMPI, QBRAN, COMMA, EXITT);
```

AGAIN (a --) BEGIN-AGAIN 無限ループ構造を終了させる。データスタック上のアドレスを使って**BRANCH**アドレスリテラルをコンパイルします。

```
HEADER(IMEDD + 5, "AGAIN");
int AGAIN = COLON(4, COMPI, BRAN, COMMA, EXITT);
```

IF (-- A) は、条件分岐構造を開始します。**QBRANCH**アドレスリテラルをコンパイルし、アドレスフィールドに0を設定します。このアドレスフィールドのアドレスはデータスタックに残されます。このアドレスは、後にELSEまたはTHENによって、分岐構造のtrue節を閉じるときに解決されます。

```
HEADER(IMEDD + 2, "IF");
int IFF = COLON(7, COMPI, QBRAN, HERE, DOLIT, 0, COMMA, EXITT);
```

AHEAD (-- A) は、前方分岐構造を開始します。**BRANCH**アドレスリテラルをコンパイルし、そのアドレスフィールドに0を設定します。このアドレスフィールドのアドレスがデータスタックに残されます。このアドレスは、後に分岐構造を閉じるときに解決されます。

```
HEADER(IMEDD + 5, "AHEAD");
int AHEAD = COLON(7, COMPI, BRAN, HERE, DOLIT, 0, COMMA, EXITT);
```

REPEAT (A a --) は、BEGIN-WHILE-REPEATの不定回数ループ構造を終了させる。**BEGIN**によって残されたアドレスaを持つ**BRANCH**アドレスリテラルをコンパイルし、次のトークンのアドレスを使用してAが指す位置にあるアドレスリテラルを解決します。

```
HEADER(IMEDD + 6, "REPEAT");
int REPEA = COLON(3, AGAIN, THENN, EXITT);
```

AFT (a -- a A) は、FOR-AFT-THEN-NEXTループの1回目で**THEN**にジャンプします。これは、**BRANCH**アドレスリテラルをコンパイルし、そのアドレスフィールドをスタックに残します。このアドレスは**THEN**で解決されます。また、**FOR**が残したアドレス**A**を次のトークンのアドレスで置き換え、**NEXT**が実行時にジャンプしてここに戻るための**DONEXT**アドレスリテラルをコンパイルするようにします。

```
HEADER(IMEDD + 3, "AFT");
int AFT = COLON(5, DROP, AHEAD, HERE, SWAP, EXITT);
```

ELSE (A -- A) は、IF-ELSE-THEN構造で偽の句を開始します。これは、**BRANCH**アドレスリテラルをコンパイルする。現在のトークンアドレスを使用して**A**内の分岐アドレスを解決し、**A**をそのアドレスリテラルのアドレスに置き換える。

```
HEADER(IMEDD + 4, "ELSE");
int ELSEE = COLON(4, AHEAD, SWAP, THENN, EXITT);
```

WHEN (a -- a A a) は、**QBRANCH**アドレスリテラルをコンパイルします。このアドレスリテラルのアドレス**a**は、**A**を越えるコピーです。

```
HEADER(IMEDD + 4, "WHEN");
int WHEN = COLON(3, IFF, OVER, EXITT);
```

WHILE (a -- A a) は、BEGIN-WHILE-REPEATループで**QBRANCH**アドレスリテラルをコンパイルします。このアドレスリテラルのアドレス**A**は、**BEGIN**によって残されたアドレス**a**とスワップされ、**REPEAT**がすべての未解決部分を解決し、ループ構造を正しく構築するようにします。

```
HEADER(IMEDD + 5, "WHILE");
int WHILEE = COLON(3, IFF, SWAP, EXITT);
```

String Literals

文字列は、プログラムがあなたとコミュニケーションをとるための非常に重要なデータ構造です。エラーメッセージ、適切な警告や提案を表示することで、システムを使いやすくする必要があります。文字列は、文字列リテラルとしてコロンワードでコンパイルされます。各文字列リテラルは、コンパイルされた文字列を使用して処理を行う文字列トークンと、カウント付きの文字列から構成されます。カウント付きの文字列の最初のバイトは文字列の長さである。したがって、文字列は0から255文字まで持つことができます。

ABORTはエラーメッセージをコンパイルする。このエラーメッセージは、スタックの先頭の項目が0でない場合に表示される。残りのワードはスキップされ、Forthは**ABORT**にリセットされます。スタックの先頭が0であれば、**ABORT**はエラーメッセージをスキップして、次のトークンリストの実行を継続する。

```
HEADER(IMEDD + 6, "ABORT\");
int ABRTQ = COLON(6, DOLIT, ABORQP, HERE, STORE, STRCQ, EXITT);
```

`$" (-- ; <string>)` は、文字列をコンパイルする。実行されたとき、データスタックには文字列のアドレスだけが残ります。このアドレスを使って、文字列や文字列中の個々の文字に文字列配列としてアクセスすることになります。

```
HEADER(IMEDD + 2, "$\");
int STRQ = COLON(6, DOLIT, STRQP, HERE, STORE, STRCQ, EXITT);
```

`." (dot-quot) (-- ; <string>)` は、それを含むワードがランタイムで実行されたときに表示される文字列をコンパイルします。これはユーザーへのメッセージを表示するのに最適な方法である。

```
HEADER(IMEDD + 2, ".\");
int DOTQQ = COLON(6, DOLIT, DOTQP, HERE, STORE, STRCQ, EXITT);
```

Defining Words

ワードを定義するというコンセプトはForthの非常にユニークな機能で、パラメータフィールドに格納されたデータを特定の用途に使用できる新しいクラスのワードを定義することができます。各ワードのクラスは、そのコードフィールドにエンコードされた同じインタープリタを共有します。

ceForth_33では、次のような定義語を用意しています。 `CODE`、`CREATE`、`CONSTANT`、`VARIABLE`です。`CREATE` と `VARIABLE` は同じ内部インタプリタ `DOVAR` を使用し、`CONSTANT` は `DOCON` を使用します。`CONSTANT` と `VARIABLE` は、パラメータフィールドに4バイトしか割り当てられません。しかし、`CREATE` はパラメータフィールドの大きさを指定することができます。

`CODE (-- ; <string>)` はワードヘッダを作り、新しいプリミティブワードのためのバイトコードを受け入れる準備をします。バイトコードアセンブラがなければ、`,` (`コンマ`) を使ってバイトコードのあるワードを追加することができます。

```
HEADER(4, "CODE");
int CODE = COLON(4, TOKEN, SNAME, OVERT, EXITT);
```

`CREATE (-- ; <string>)` は、メモリを割り当てずに新しい配列を作成します。メモリは`ALLOT`を使って確保します。

```
HEADER(6, "CREATE");
int CREAT = COLON(5, CODE, DOLIT, 0x203D, COMMA, EXITT);
```

VARIABLE (-- ; <string>) は新しい変数を作成し、0に初期化する。

```
HEADER(8, "VARIABLE");  
int VARIA = COLON(5, CREAT, DOLIT, 0, COMMA, EXITT);
```

CONSTANT (n -- ; <string>) 新しい定数を作成し、スタックの一番上の値で初期化します。

```
HEADER(8, "CONSTANT");  
int CONST = COLON(6, CODE, DOLIT, 0x2004, COMMA, COMMA, EXITT);
```

Comments

コメントとは、インタプリタやコンパイラが無視する文字列のことです。これは、私たちが書いたコードについて、私たち自身に注意を喚起する役割を果たします。

.((ドットパレン) (-- ; <string>) は次の文字列を次の **)** までタイプします。

```
HEADER(IMEDD + 2, ".(");  
int DOTPR = COLON(5, DOLIT, 0x29, PARSE, TYPES, EXITT);
```

\ (back-slash) (-- ; <string>) 入力バッファの終わりまですべての文字を無視します。テキストにコメント行を挿入するのに使用します。

```
HEADER(IMEDD + 1, "\\");  
int BKSLA = COLON(5, DOLIT, 0xA, WORDD, DROP, EXITT);
```

((paren) (-- ; <string>) は、次の文字列まで無視する。) ソーステキストにコメントを入れるのに使う。

```
HEADER(IMEDD + 1, "(");  
int PAREN = COLON(5, DOLIT, 0x29, PARSE, DDROP, EXITT);
```

Lexicon Bits

名前フィールドの長さバイトの6ビットと7ビットを覚えていますか？これらはレキシコンビットと呼ばれ、ForthインタプリタとForthコンパイラに特別な扱いを要求するものです。ビット7は即時ビットと呼ばれ、Forthコンパイラに、そのトークンを辞書にコンパイルする代わりに、このワードを実行するように強制します。制御構造を構築するすべてのForthワードは即時ワードです。ビット6はコンパイルオンリービットと呼ばれます。危険なForthワードが多数存在します。Forthインタプリタによって実行されると、システムをクラッシュさせる可能性があります。これらのワードはコンパイル専用とマークされ、Forthコンパイラによってのみ使用することができます。

COMPILE-ONLY (--) は、コンパイルされたばかりの新しいワードの名前フィールドにコンパイル専用レキシコンビットを設定します。インタプリタは、このビットが設定されたワードに遭遇した場合、このワードを実行せず、エラーメッセージを吐き出します。このビットは、複合ワードの外側で構造ワード(structure word)が誤って実行されるのを防ぎます。

```
HEADER(12, "COMPILE-ONLY");
int ONLY = COLON(6, DOLIT, 0x40, LAST, AT, PSTOR, EXITT);
```

IMMEDIATE (--) は、コンパイルされたばかりの新しいワードの名前フィールドに、即時レキシコンビットを設定します。コンパイラは、このビットが設定されたワードに出会ったとき、このワードを構築中のトークン・リストにコンパイルせず、直ちにトークンを実行する。このビットは、構造ワードが複合ワードの中で特別な構造を構築し、コンパイラの実行時に特別な条件を処理することを可能にする。

```
HEADER(9, "IMMEDIATE");
int IMMED = COLON(6, DOLIT, 0x80, LAST, AT, PSTOR, EXITT);
int ENDD = P;
```

Checking Macro Assembler

すべてのマクロ呼び出しが`main()`ループ内に配置され、`main()`の開始時に実行されることにお気づきかもしれません。Forth辞書は実行時に構築され、`data[]`配列にはコンパイルされません。マクロには`printf()`文があり、コメントアウトされています。マクロのアセンブラが`data[]`配列に何を組み込んでいるかを見たい場合は、これらの`printf()`文の一部をアンコメントしてください。私は、これらの`printf()`ステートメントを使用して、マクロが正しく動作することを確認しました。

ceForth_33のリリース版では、`HEADER()`がアセンブルしたワードの名前とcfaを出力させるだけにしています。Forth辞書が完成した後、参考までにそのサイズがプリントされます。また、リターンスタックポインタの値も出力します。これは、すべての制御構造が正しく構築されていれば0になるはずです。

辞書の内容をIntel-Dumpのような形式でダンプするオプションがあり、16バイトのデータごとにチェックサムが計算される。私はこのチェックサムを使って、この辞書がceForth_23システムで使った辞書と同一であることを確認しました。この辞書ダンプを読んで、Forthのワードのレコードと、そのワードのレコードのフィールドを確認するのは、良い練習になります。

// Boot Up

Forth辞書の大きさ、リターンスタックのポインタを出力し、マクロアセンブラが正常に動作することを確認する。

```
printf("\n\nIP=%X R-stack=%X", P, (popR << 2));
```

メモリ位置0にあるリセットベクターを**DOLST COLD**に設定する。

```
P = 0;
int RESET = LABEL(2, 6, COLD);
```

Forthインタプリタが正しく動作するように、メモリ位置0x90～0xACにユーザ変数を設定します。

```
P = 0x90;
int USER = LABEL(8, 0x100, 0x10, IMMED - 12, ENDD, IMMED - 12, INTER,
QUIT, 0);
```

オプションとして、Intel Dump Formatで辞書をダンプし、その内容を確認します。残念ながら、Windowsコンソールはダンプ全体を表示するのに十分な大きさではありません。辞書の後半を表示するには、この操作を行います。前半を見るには、lenを0x100に制限してください。

```
// dump dictionary
//P = 0;
//for (len = 0; len < 0x200; len++) { CheckSum(); }
```

さて、VFMの最も重要なレジスタをすべて初期化し、Finite State MachineはceForthを立ち上げる。

```
P = 0;
WP = 4;
IP = 0;
S = 0;
R = 0;
top = 0;
printf("\nceForth v3.3, 01jul19cht\n");
while (TRUE) {
    primitives[(unsigned char)cData[P++]()];
}
}
```

Finite State Machine

もともとceForthは、32ビットワードしか読み書きできない32ビットForthマイクロコントローラeP32をエミュレートするために設計されました。Finite State Machine(FSM)は、32ビットワードに格納された8ビットマシン命令を実行する。State0では、FSMはメモリから32ビットワードをフェッチする。ステート1～4では、このワードの中の4バイトコードを実行する。CALLとJMP命令はState1でのみ実行され、FSMを強制的にState0にし、メモリから次のプログラムワードをフェッチします。RETはState1-4のいずれでも実行可能であり、FSMを強制的にState0にすることができる。

バイト指向のマシンにceForthを実装すると、VFMは連続したバイトをフェッチして実行できるため、FSMは大幅に簡素化されました。C言語では、FSMは次のように簡単に書くことができる。


```
primitives[cData[P++]()]();
```

このFSMは2つの状態を意味する。State0ではバイトコードがメモリからフェッチされ、State1ではそのバイトコードが実行される。Pはポストインクリメントされますが、これはState0でもState1でもかまいません。しかし、Virtual Forth Machineでは、まずバイトコードをフェッチしてから実行しなければならないので、FSMの概念を残しておくことと便利である。

以前、面白い質問を自分自身に投げかけたことがある。FSMは、既存のプリミティブワードのコードフィールドの外、仮想メモリに存在しないバイトコードをフェッチすることが可能なのだろうか、ということだ。答えは、Never, Ever! 私は、FSMが不正なバイトコードを実行するのを捕らえるトラップを仕掛けたが、一度もキャッチされたことはありません。Forthの辞書が正しく構築されていれば、FSMは必ずいずれかのコードフィールドのバイトコードをフェッチして実行します。FSMにコードフィールドの外に出ることを強制してForthシステムをクラッシュさせることができるのは、非常に経験豊富なForthプログラマか、完全な馬鹿者だけです。

以上で、ceforth_33 システムの全体像を調べ切りました。これはcppファイルではありますが、完全にC言語で記述されています。私たちは64個のバイトコードでVirtual Forth Machineから始めました。このバイトコードを使って、80個のプリミティブワードを組み立てます。このプリミティブワードを使って、110個のコロンワードを構成し、完全なForth言語インタプリタとコンパイラをアセンブラまたはコンパイルしました。これは、プログラミング言語としてのForthと、オペレーティングシステムとしてのForthの完全かつ明確な仕様といえます。C言語で書かれているので、標準的なCコンパイラを備えたコンピュータやマイクロコントローラに簡単に実装することができる。

あとがき(Postlude)

1990年に8086プロセッサ用の最初のeForthを書いて以来、30年が経っています。そして、ceForth v1.0を書いてから10年が経ちました。この間、私は、eForthモデルは、すべての異なるプロセッサやマイクロコントローラ、そしてすべての異なるアプリケーションに有用な良いモデルであるとの考えに至りました。Forthを学びたい人、自分のアプリケーションに使いたい人なら誰でも使える、とてもシンプルなモデルです。

ここで、私が過去10年間にC言語でForthを実装する際に学んだことをまとめてみます。

- C言語で書かれたForthは、現代の高度なマイクロコントローラをプログラミングする上で価値がある。
- 32ビットマイクロコントローラeP32を忠実にエミュレートしている。
- Forthの辞書は、コードセグメントに書き込めない、データセグメントでコードを実行できないというC言語の基本的な制限を回避するために、仮想メモリ配列に格納されています。
- リターンスタックやデータスタックには循環バッファが最適です。オーバーフローやアンダーフローを起こさない。メンテナンスが不要です。
- 仮想Forthマシンは、バイトコードで実装できます。
- VFMのバイトコードを実行する有限状態機械は、次のような1行のCコードに縮小することができる。
`while(TRUE) {primitives[cData[P++]()]();}`
- ワンパスマクロアセンブラをForth辞書のアセンブラとして使用することができます。
- Forthは、大規模なアプリケーションやOSから呼び出し可能なモジュールとして簡単に構成することができる。

私は、唐の詩人・慈道(779～843 AD)の短い詩を詠むのが好きだった。

客 客 Swordsman by Ja Dao

十年磨一 一 I polish this sword for ten years.

霜刃未曾 一 The shining blade has never been tested.

今日把示君, Today I show it to you.

一有不平事? Is there any injustice to avenge?



このceForthシステムに10年間磨きを掛けてきました。面倒なF#メタコンパイラが不要になったという点では、とても満足しています。気に入って活用していただければ幸いです。ご健闘を祈ります。