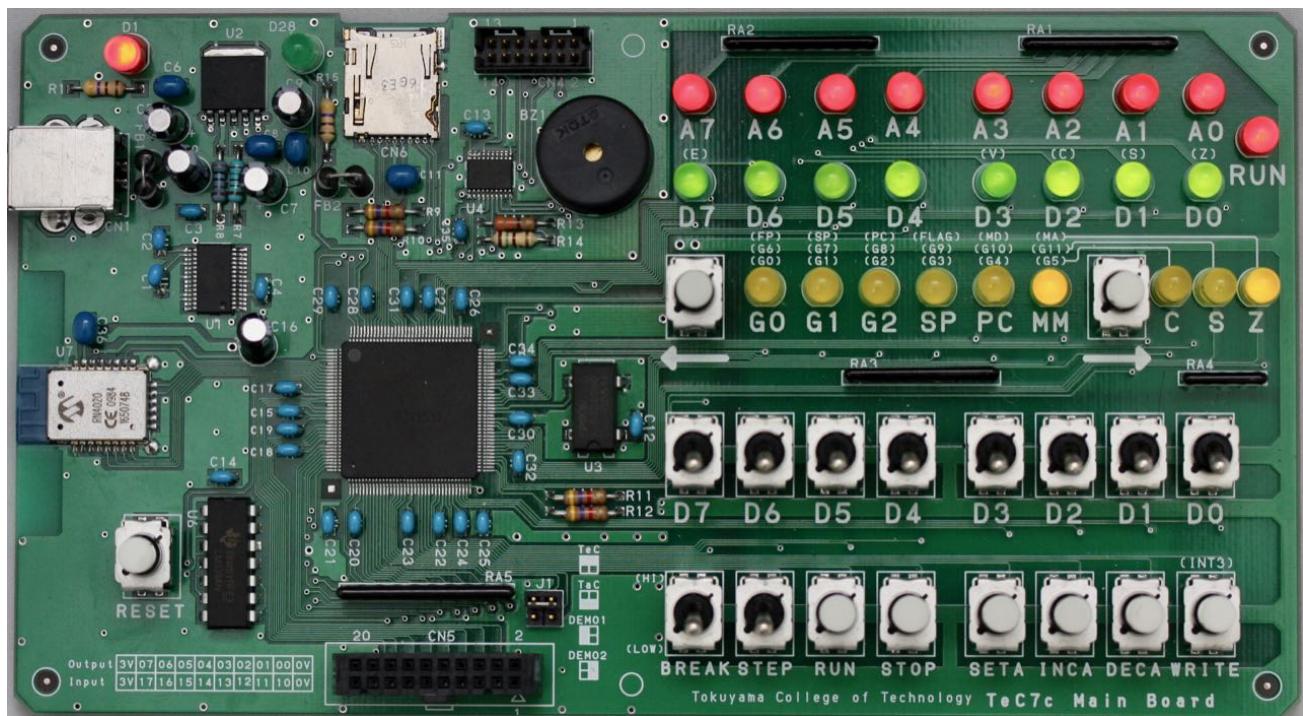


TeC教科書



徳山工業高等専門学校 情報電子工学科
<https://github.com/tctsigemura/TeC7>

TeC 教科書

Ver. 4.3.0

徳山工業高等専門学校

情報電子工学科

TeC プロジェクト

<https://github.com/tctsigemura/TeC7>

Copyright © 2017 - 2025 by
Dept. of Computer Science and Electronic Engineering,
Tokuyama College of Technology, JAPAN

本書の一部は、JSPS 科研費 22500833 および 16K0099 の助成を受けて作成しました。

本書の最新版は、以下からダウンロード可能です。

<https://github.com/tctsigemura/TecTextBook/blob/master/tec.pdf>

本書の講義用スライドは、以下からダウンロード可能です。

<https://github.com/tctsigemura/TecTextBook/tree/master/Sld>

本書は CC-BY-SA ライセンスによって許諾されています。ライセンスの全文は、以下で確認できます。

<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.ja>

本書を授業などにご使用の節は、次のアドレスにご連絡いただければ幸いです。

sigemura@tokuyama.ac.jp

目次

第1章	はじめに	1
1.1	この科目で学ぶこと	1
1.2	勉強の進め方	1
1.3	教材用コンピュータ	1
1.4	TeC の種類	2
第2章	情報の表現	3
2.1	コンピュータ内部の情報表現	3
2.1.1	電気を用いた情報の表現	3
2.1.2	ビット	3
2.1.3	より複雑な情報の表現	3
2.2	数値の表現	4
2.2.1	2進数	4
2.2.2	基数変換	5
2.2.3	16進数	5
2.3	負数の表現	6
2.3.1	符号付き絶対値表現	6
2.3.2	補数表現	6
2.3.3	1の補数による負数の表現	6
2.3.4	2の補数による負数の表現	7
2.3.5	2の補数を求める手順	8
2.3.6	2の補数から元の数を求める手順	8
2.4	2進数の計算	8
2.4.1	正の数の計算	8
2.4.2	負の数を含む計算	8
2.5	小数の表現	10
2.5.1	2進数による小数の表現	10
2.5.2	10進数との相互変換	10
2.6	文字の表現	11
2.6.1	文字コード	11
2.6.2	ASCII コード	11
2.6.3	JIS 文字コード	11
2.7	補助単位	11

2.8	コンピュータの基本回路	12
2.8.1	論理演算と論理回路	12
2.8.2	基本的な論理回路	12
2.8.3	演算回路	12
2.8.4	記憶回路	13
2.9	まとめ	14
第3章 組み立て		15
3.1	ハンダ付け	15
3.2	部品の取り付け	15
3.2.1	抵抗器	15
3.2.2	積層セラミック・コンデンサ	15
3.2.3	IC	16
3.2.4	フェライトビーズ	16
3.2.5	ジャンパ	16
3.2.6	圧電スピーカ	17
3.2.7	電解コンデンサ	17
3.2.8	JTAG コネクタ	17
3.2.9	電源コネクタ	17
3.2.10	集合抵抗器とラダー抵抗器	18
3.2.11	LED (ランプ)	18
3.2.12	スイッチ	18
3.2.13	入出力ポートコネクタ	19
3.2.14	ゴム足の取り付け	19
3.2.15	プッシュスイッチの頭の取り付け	19
3.3	完成	19
3.3.1	命令表の貼り付け	19
3.3.2	目視確認	19
3.3.3	設計データの書き込み	20
第4章 マイコンの操作		21
4.1	各部の名称	21
4.2	コンソールパネル	21
4.2.1	コンソールパネルの構成	21
4.2.2	コンソールパネルの操作方法	23
4.3	リセットスイッチ	25
4.4	操作音を小さくする	25
4.5	モード	25
第5章 機械語プログラミング		27
5.1	コンピュータの構成	27
5.1.1	一般的なコンピュータの構成	27
5.1.2	TeC の構成	28

5.1.3	TeC 内部の記憶装置	28
5.2	機械語プログラミング	29
5.2.1	機械語命令	29
5.2.2	ノイマン型コンピュータの特徴	29
5.2.3	機械語プログラミング	29
5.3	特殊な命令	29
5.3.1	NO (No Operation) 命令	29
5.3.2	HALT (Halt) 命令	29
5.4	データ転送命令	30
5.4.1	LD (Load) 命令	30
5.4.2	ST (Store) 命令	31
5.5	算術演算命令	32
5.5.1	ADD (Add) 命令	32
5.5.2	SUB (Subtract) 命令	32
5.6	ジャンプ命令	33
5.6.1	JMP (Jump) 命令	33
5.6.2	JZ (Jump on Zero) 命令	34
5.6.3	JC (Jump on Carry) 命令	35
5.6.4	JM (Jump on Minus) 命令	35
5.6.5	ジャンプ命令の利用	35
5.6.6	JNZ (Jump on Not Zero) 命令	38
5.6.7	JNC (Jump on Not Carry) 命令	38
5.6.8	JNM (Jump on Not Minus) 命令	38
5.7	比較命令	39
5.7.1	CMP (Compare) 命令	39
5.8	シフト (桁ずらし) 命令	40
5.8.1	SHLA (Shift Left Arithmetic) 命令	40
5.8.2	SHLL (Shift Left Logical) 命令	40
5.8.3	SHRA (Shift Right Arithmetic) 命令	41
5.8.4	SHRL (Shift Right Logical) 命令	41
5.9	論理演算命令	43
5.9.1	AND (Logical AND) 命令	43
5.9.2	OR (Logical OR) 命令	45
5.9.3	XOR (Logical XOR) 命令	45
5.10	アドレッシングモード	46
5.10.1	ダイレクト (直接) モード	46
5.10.2	インデクスト (指標) モード	46
5.10.3	イミディエイト (即値) モード	47
5.10.4	アドレッシングモードの使用例	47
5.11	入出力	48
5.11.1	I/O マップ	48
5.11.2	IN (Input) 命令	48

5.11.3 OUT (Output) 命令	49
5.12 TeC パラレル入出力 (PIO)	50
5.13 TeC アナログ入力 (AIN)	51
5.14 TeC シリアル入出力 (SIO)	51
5.14.1 シリアル入出力	51
5.14.2 パソコンとの USB 接続	51
5.14.3 パソコンとの Bluetooth 接続	52
5.14.4 シリアル入出力回路の仕組み	52
5.14.5 I/O ポート	52
5.14.6 シリアル出力プログラム	53
5.14.7 シリアル入力プログラム	53
5.14.8 シリアル入出力データ	53
5.15 まとめ	56
第6章 高度なプログラミング	57
6.1 クロス開発	57
6.1.1 TeC クロス開発環境	57
6.1.2 アセンブラー	57
6.1.3 ダウンロード	58
6.2 スタック	59
6.2.1 仕組み	59
6.2.2 PUSH 命令	60
6.2.3 POP 命令	60
6.3 サブルーチン	61
6.3.1 仕組み	61
6.3.2 CALL 命令	61
6.3.3 RET (Return) 命令	62
6.4 時間の計測	65
6.4.1 マシンステート	65
6.4.2 1ms タイマ (マシンステートの応用)	65
6.4.3 0.2 秒タイマ (入れ子サブルーチンの利用)	65
6.4.4 1 秒タイマ (多重ループの利用)	66
6.5 数値の入出力	67
6.5.1 2 進数の出力	67
6.5.2 16 進数の出力	67
6.5.3 10 進数の出力	68
6.5.4 10 進数の入力	68
6.6 符号付数の入出力	70
6.6.1 符号付 10 進数の出力	70
6.6.2 符号付 10 進数の入力	70
6.7 アドレスデータ	71
6.7.1 TeC のアドレスデータ	71

6.7.2	文字列出力サブルーチン	71
6.7.3	ジャンプテーブル	71
6.8	割込み (Interrupt)	73
6.8.1	TeC の割込み種類	73
6.8.2	TeC の割込み動作	73
6.8.3	EI (Enable Interrupt) 命令	73
6.8.4	DI (Disable Interrupt) 命令	74
6.8.5	RETI (Return from Interrupt) 命令	74
6.9	タイマ割込み	75
6.9.1	インターバルタイマ割込み	75
6.9.2	プログラミング例	75
6.10	コンソール割込み	77
6.11	入出力割込み	78
6.11.1	TeC の入出力割込み	78
6.11.2	入出力割込みの使用例	78
6.12	マシンステートとスピーカ	80
6.12.1	スピーカーの仕組み	80
6.12.2	スピーカ駆動プログラム	80
6.12.3	電子オルゴールプログラム	81
6.13	まとめ	82
付録 A	TeC クロス開発環境	83
A.1	始めに	83
A.2	アセンブルコマンド	83
A.3	ダウンロードプログラム	83
A.4	アセンブラーの文法	83
A.4.1	行フォーマット	83
A.4.2	ラベル	84
A.4.3	疑似命令	84
A.4.4	機械語命令	85
A.5	アセンブラーの文法まとめ	86
A.6	プログラム例	88
A.7	アセンブラーの実行例	88
A.8	機械語プログラムファイル形式	89
付録 B	命令表	91
付録 C	参考資料	93
C.1	TeC7c 基板回路図	93
C.2	TeC7c ピン配置表	93
C.3	TeC7d 基板回路図	93
C.4	TeC7d ピン配置表	93

第1章

はじめに

1.1 この科目で学ぶこと

現代、コンピュータと呼ばれているものはスーパーコンピュータと呼ばれる高価で高性能なものから、マイコンと呼ばれ炊飯器やエアコンに組み込まれている小型のものまで、全て同じ原理に基づき動作しています。

この原理は、1946年に米国の数学学者フォン・ノイマン (Von Neumann) が提案したと言われています。現代のコンピュータの、ほぼ、全てのものは、ノイマンの提案した同じ原理を使用しており「ノイマン型コンピュータ」と呼ばれます。

「ノイマン型コンピュータ」が出現して既に約80年の時間が経過しましたが、未だにこれを上回る「自動機械」の構成方法は発明されていません。だから、パソコンのような一般の人がコンピュータだと考えている装置だけでなく、炊飯器やエアコンの制御装置のようなコンピュータらしくない装置まで、「自動機械」が必要なところには全て「ノイマン型コンピュータ」が使用されているのです。この先も、しばらく「ノイマン型コンピュータ」の時代が続くでしょう。

この教科書は、教育用コンピュータ (TeC) を用いて、ノイマン型コンピュータの動作原理をしっかりと勉強できるようになっています。ここでしっかりと勉強しておけば、将来、どんな新型のコンピュータに出会ったとしても、恐れることはありません。所詮、「ノイマン型コンピュータ」の一種ですから、皆さんはその正体を簡単に見抜くことができるはずです。

「ノイマン型コンピュータ」の原理をきちんと理解しておくことは、皆さんにとって、寿命の長いエンジニアになるための大切なステップとなります。しっかりと、がんばって下さい。

1.2 勉強の進め方

この教科書は、高専や工業高校の1年生と2年生が、教育用コンピュータ TeC を教材に、ノイマン型コンピュータの基本を学ぶことを想定して作っています。1章から5章までを1年で学び、残りを2年生(半年～1年間)で学びます。

1年生では、(1) コンピュータの内部で情報を表現する方法、(2) TeC の組み立て、(3) TeC の基本的なプログラミングを学びます。2年生では、TeC を用いた高度なプログラミングを学びます。

1.3 教材用コンピュータ

私達の身近にあるパーソナルコンピュータ(パソコン)やスマートフォン(スマホ)のようなコンピュータシステムは、高度で複雑すぎて「ノイマン型コンピュータ」の原理を学ぶための教材としては適していません。

原理を学ぶのに適した単純で小さなコンピュータ(マイコン)を、専用に開発しました。このマイコンは TeC(Tokuyama Educational Computer : 徳山高専教育用コンピュータ、図 1.1) と呼ばれます。

TeC の特徴は単純で小さなことです。単純で小さなことで、次のようなメリットがあります。

単純 ノイマン型コンピュータの本質的な部分だけを勉強しやすい。現代のパソコン等は、勉強するには難しすぎる。

小型 自宅に持ち帰り宿題ができる。授業時間外でも、納得がいくまで色々と試してみることができる。

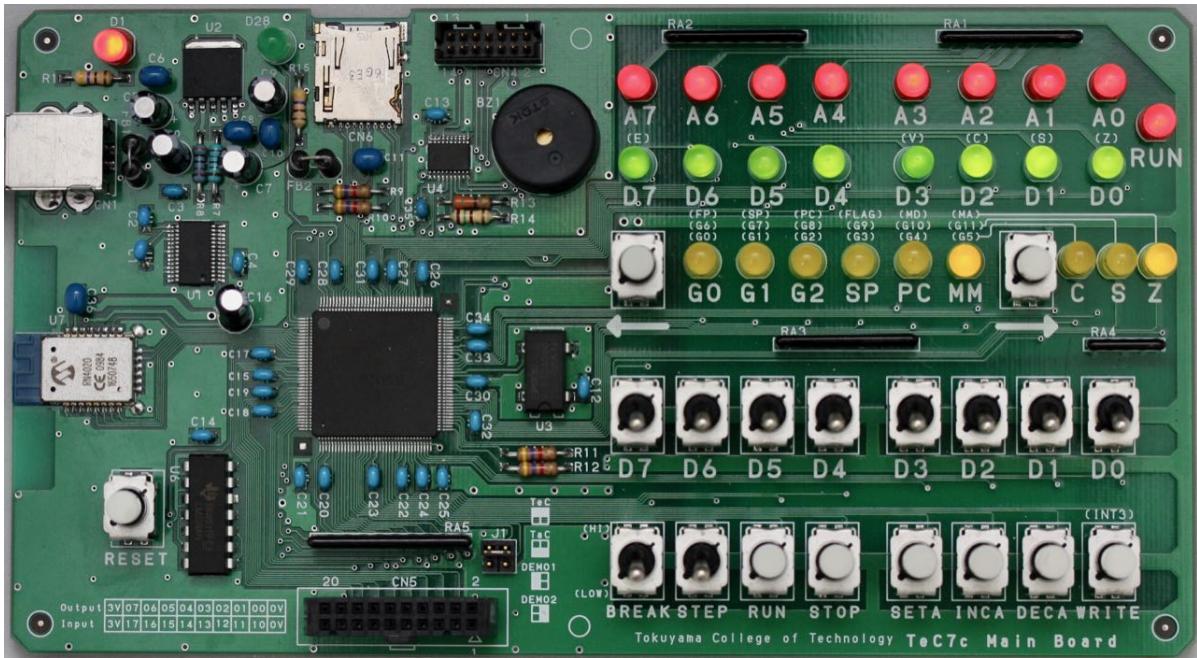


図 1.1 教育用コンピュータ TeC7c

1.4 TeC の種類

TeC は 2003 年から現在まで 20 年以上使用されてきました。その間に色々な改良がされました。現在では大きく四種類の TeC があります。

- TeC6

2003 年から使用を開始しました。TeC の基本的な機能は現在と変わりません。

- TeC7a

2011 年から使用を開始しました。TeC で使用できる機能が少し増えました。大きな変更は、ジャンパーを切り替えることで TaC という名前の別のコンピュータに切換えることができるようになったことです。TaC は高学年や専攻科で使用します。TaC モードでは PC 用のキーボードやディスプレイを接続して PC のように使用できます。

- TeC7c

2018 年から使用を開始した TeC7a の改良版です。Bluetooth を用いて接続したスマホなどをキーボードやディスプレイの代替として使用できるようになりました。

- TeC7d

2019 年から使用を開始した TeC7c の改良版です。ケースに入れたまま使用できるように電源コネクタを垂直型に変更した他に、電源を入れた状態でもマイクロ SD カードを交換できるような改良がされました。

本書は TeC7c と TeC7d を基本に解説します。TeC6 について知りたい場合は本書の古いバージョン「TeC 教科書 Ver. 3.2.2」(<https://github.com/tctsigemura/TecTextBook/blob/v3.2.2/tec.pdf>) を、TeC7a について知りたい場合は「TeC 教科書 Ver. 4.0.5」(<https://github.com/tctsigemura/TecTextBook/blob/v4.0.5/tec.pdf>) を見て下さい。

第2章

情報の表現

この章では、コンピュータ内部でどのように情報が表現されているのか、その情報をどのような回路で扱うことができるのか、簡単に紹介します。

2.1 コンピュータ内部の情報表現

人は、情報を音声や文字、絵等で表現することができます。コンピュータも表面的には音声や文字、絵を扱うことができますが、コンピュータの内部は電子回路で構成されているので、最終的には電圧や電流で情報を表現せざるを得ません。

$$\text{情報の表現} = \begin{pmatrix} \text{人: 音声, 文字, 絵, ...} \\ \text{コンピュータ: 電圧, 電流} \end{pmatrix}$$

2.1.1 電気を用いた情報の表現

電圧や電流で情報表現する方法には、いろいろなアイデアがあります。しかし、現代のコンピュータは、電圧が「ある/ない」か、電流が「流れている/流れていない」のような、「ON/OFF」二つの状態だけを用いて情報を表現する方法を使っています。二つの状態だけを考えれば良いので回路が作りやすいからです。

図 2.1 を見て下さい。電気の「ON/OFF」で「おおかみが来たか/来ていないか」のどちらの状態なのかを伝達できる「情報の表示装置」を実現することができます。電気の「ON/OFF」を用いて情報を表現することができました。

2.1.2 ビット

前の例では、ランプの「ON/OFF」を用いて「二つの状態のどちらなのか」を表しました。このような、「二つのどちらか」を表す情報が「情報の最小単位」になります。情報の最小単位のことを「ビット (bit)」と呼びます。

on/off のどちらか → 情報の最小単位 (ビット)

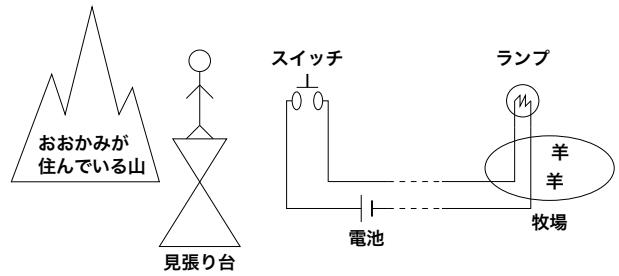


図 2.1 おおかみが来た情報表示装置

表 2.1 おおかみが来た情報

ビット値	意味
0 (off)	おおかみは来ていない
1 (on)	おおかみが来た！！！

通常、ビットの値は「ON/OFF」ではなく、「1/0」で書きます。

$$\begin{pmatrix} ON & : 1 \\ OFF & : 0 \end{pmatrix}$$

「おおかみが来た情報」は、ビットの値に表 2.1 のように対応付けできます。

2.1.3 より複雑な情報の表現

二つの状態では表現できない、もっと複雑な情報はどうやって表現したら良いでしょうか。

前の例で、やって来たおおかみの頭数により牧場の人気が対応を変化させたい場合が考えられます。そのためには「来たか/来なかったか」だけの情報では不十分です。「たくさん来た」ことも知らせる必要があります。

より多くの状態を表現するために複数のビットを組み合わせます。表 2.2 に複数のビットの組み合わせて表現した「拡張おおかみが来た情報」を、図 2.2 に「拡張おおかみが来た情報表示装置」を示します。

表 2.2 拡張おおかみが来た情報

ビット値	意味
00	おおかみはきていない（平気）
01	おおかみが1頭来た（戦う）
10	おおかみが2頭来た（？）
11	おおかみがたくさん来た（逃げる）

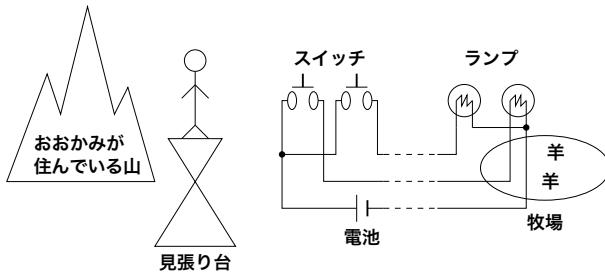


図 2.2 拡張おおかみが来た情報表示装置

表 2.4 4 ビットの2進数

b_3	b_2	b_1	b_0	意味
0	0	0	0	0
0	0	0	1	1
0	0	1	0	2
0	0	1	1	3
0	1	0	0	4
0	1	0	1	5
0	1	1	0	6
0	1	1	1	7
1	0	0	0	8
1	0	0	1	9
1	0	1	0	10
1	0	1	1	11
1	1	0	0	12
1	1	0	1	13
1	1	1	0	14
1	1	1	1	15

表 2.3 ビットの組合せの数

ビット数	ビットの組合せ	組合せ数
1	0 1	$2^1 (= 2)$
2	00 01 10 11	$2^2 (= 4)$
3	000 001 010 011 100 101 110 111	$2^3 (= 8)$
...	...	2^n

このように2ビット用いれば4種類の情報を表現することができます。表 2.3 はビット数と表現できる組合せの関係を示したもので、一般に、nビットを用いると 2^n 種類の情報を表現することができます。システム内で必要なビット数を決めて、その組合せに意味付けをすれば、どんな情報だって表現できます。

ビットだけでは情報の単位として小さすぎるの、4ビットまとめたもの、8ビットまとめたものにも名前があります。「4ビット」を「1ニブル」、「8ビット」を「1バイト」と呼びます。

問題

1. 32ビットは何バイトになりますか？
2. 3バイトは何ビットになりますか？
3. 4ビットで何種類の情報を表現できますか？
4. 1バイトで何種類の情報を表現できますか？

2.2 数値の表現

ビットの組合せをどのように意味付けするかは、前節の例のように「システムが扱う必要のある情報」により、毎回、約束すればよいのです。しかし、どのコンピュータでも同じ方法で意味付けされている情報もあります。それ一つが数値の表現方法です。

2.2.1 2進数

コンピュータの内部では、数値を2進数で表すのが普通です。我々が普段使用している10進数と、2進数の特徴比較を次に示します。

- 10進数の特徴

- (1) 0～9の10種類の数字を使用する。
- (2) 1桁毎に10倍の重みをもつ。

- 2進数の特徴

- (1) 0と1の2種類の数字を使用する。
- (2) 1桁毎に2倍の重みをもつ。

コンピュータの内部では、ビットが情報の表現に使用されています。そこで、ビット値の0/1をそのまま2進数の1桁と考えれば数値が表現できます。

例えば、4ビット用いると0～15の数が表 2.4 のように表現できます。一般にnビットで0～ $2^n - 1$ の範囲の数を表現することができます。

$$\begin{array}{rcl}
 10_{10} & = & 1010_2 \\
 \div 2 \downarrow & & \\
 5_{10}^{..0} & = & 0101_2^{..0} \\
 \div 2 \downarrow & & \\
 2_{10}^{..1} & = & 0010_2^{..1} \\
 \div 2 \downarrow & & \\
 1_{10}^{..0} & = & 0001_2^{..0} \\
 \div 2 \downarrow & & \\
 0_{10}^{..1} & = & 0000_2^{..1}
 \end{array}$$

図 2.3 数値を 2 で割った時の余り

$$\begin{array}{r}
 2) \overline{10} \\
 2) \overline{5 \cdots 0} \\
 2) \overline{2 \cdots 1} \\
 2) \overline{1 \cdots 0} \\
 0 \cdots 1
 \end{array}$$

余りを右から順に並べる
と 1010_2

図 2.4 10 を 2 進数に変換する例

表 2.5 2 進数, 16 進数, 10 進数対応表

2 進数	16 進数	10 進数
0000 ₂	0 ₁₆	0 ₁₀
0001 ₂	1 ₁₆	1 ₁₀
0010 ₂	2 ₁₆	2 ₁₀
0011 ₂	3 ₁₆	3 ₁₀
0100 ₂	4 ₁₆	4 ₁₀
0101 ₂	5 ₁₆	5 ₁₀
0110 ₂	6 ₁₆	6 ₁₀
0111 ₂	7 ₁₆	7 ₁₀
1000 ₂	8 ₁₆	8 ₁₀
1001 ₂	9 ₁₆	9 ₁₀
1010 ₂	A ₁₆	10 ₁₀
1011 ₂	B ₁₆	11 ₁₀
1100 ₂	C ₁₆	12 ₁₀
1101 ₂	D ₁₆	13 ₁₀
1110 ₂	E ₁₆	14 ₁₀
1111 ₂	F ₁₆	15 ₁₀

2.2.2 基数変換

進数を変換することを「基数変換」と呼びます。ここでは 2 進数と 10 進数の間での基数変換を学びます。

2 進から 10 進への変換

2 進数の桁ごとの重みは、桁の番号を n とすると 2^n になります。

$$\begin{array}{cccc}
 b_3 & b_2 & b_1 & b_0 \\
 2^3 = 8 & 2^2 = 4 & 2^1 = 2 & 2^0 = 1
 \end{array}$$

2 進数の数値は、その桁の重みと桁の値を掛け合わせたものの合計です。例えば 2 進数の 1010_2 は、 2^3 の桁が 1, 2^2 の桁が 0, 2^1 の桁が 1, 2^0 の桁が 0 ですから、次のように計算できます。

$$\begin{aligned}
 1010_2 &= 2^3 \times 1 + 2^2 \times 0 + 2^1 \times 1 + 2^0 \times 0 \\
 &= 8 \times 1 + 4 \times 0 + 2 \times 1 + 1 \times 0 \\
 &= 8 + 0 + 2 + 0 \\
 &= 10_{10}
 \end{aligned}$$

10 進から 2 進への変換

次に、10 進数を 2 進数に変換する方法を考えます。ここで着目するのは桁の移動です。

図 2.3 に例を示すように、2 進数を 2 で割ると右に 1 桁移動します。その時の余りは最下位の桁からはみ出した数になります。同じ値の 10 進数を 2 で割っても余りは同じです。

つまり、数値を 2 で割った時の余りは 2 進数を右に 1 桁移動したときはみ出してきた数を表しています。そこで図 2.4 のように、2 で割る操作を繰り返しながらはみ出して来た数を記録すれば、もとの数を 2 進数で表したときの 0/1 の並びが分かります。

2.2.3 16 進数

2 進数は、桁数が多くなり書き表すのに不便です。そこで、表 2.5 のように 2 進数 4 桁をまとめて 16 進数一

桁で書き表します。9 より大きな数字が無いので、16 進数ではアルファベットを数字の代用にします。

何進数で書いてあるのかをはっきりさせるために、表 2.5 のように数値の右に小さな字で何進数かを書き加えます。ときには、数字の代わりに'H'を加えることもあります。例えば、「64₁₆ を 64H」のように書きます。

問題

- 表 2.5 の内容を暗記しなさい。
- 10 進数の 16, 50, 100, 127, 130 を、2 進数(8 桁), 16 進数(2 桁)で書き表しなさい。
- 2 進数の 00011100, 00111000, 11100000 を 16 進数(2 桁), 10 進数で書き表しなさい。
- 16 進数の 1F と AA を 2 進数(8 桁)で書き表しなさい。また、10 進数で書き表しなさい。

表 2.6 符号付き絶対値表現 (4 ビット)

負数	2進数	正数	2進数
-7	1111 ₂	+7	0111 ₂
-6	1110 ₂	+6	0110 ₂
-5	1101 ₂	+5	0101 ₂
...
-1	1001 ₂	+1	0001 ₂
-0	1000 ₂	+0	0000 ₂

$$\begin{array}{l}
 b = 10\text{進数} \\
 n = 2\text{桁} \quad 100 \\
 b^n = 100 \quad -25 \quad 75 \text{は } 25 \text{に対する } 10 \text{の補数} \\
 x = 25 \quad \underline{-} \quad 75 \\
 \\
 b = 10\text{進数} \\
 n = 2\text{桁} \quad 99 \\
 b^n - 1 = 99 \quad -25 \quad 74 \text{は } 25 \text{に対する } 9 \text{の補数} \\
 x = 25 \quad \underline{-} \quad 74
 \end{array}$$

図 2.5 2桁の10進数で補数の例

2.3 負数の表現

拡張おおかみが来た情報表示装置では、「表示装置の二つのランプ（2ビット）の読み方」を約束しました。つぎに、数値の場合は、「n個のビットを2進数として読む」ことを約束しました。

今度は、負の数が必要になりました。そこで、ビットの新しい読み方を約束します。この節で出てくるビットは「符号付き数値」を表しています。以下では、「符号付き数値を表すビット」をどのように読むかを説明します。

2.3.1 符号付き絶対値表現

使用できるビットのうち一つを符号を表すために使用します。これを「符号ビット」と呼ぶことにします。通常、符号ビットには最上位（左端）のビットを使用します。

表 2.6 のように4ビット使用して、-7～+7の範囲を表すことができます。この表現方法は分かりやすくて都合が良いのですが、実際に使われることはあまりありません。

2.3.2 補数表現

n桁のb進数において b^n からxを引いた数yをxに対する「bの補数」と言います。n桁のb進数でにおいて $b^n - 1$ からxを引いた数zをxに対する「(b-1)の補数」と言います。

$$y = b^n - x \quad (y \text{は } x \text{に対する } b \text{の補数})$$

$$z = b^n - 1 - x \quad (z \text{は } x \text{に対する } (b-1) \text{の補数})$$

10進数の例を図 2.5 に、2進数の例を図 2.6 に示します。

2.3.3 1の補数による負数の表現

「図 2.6 4桁の2進数で補数の例」にあるように、 $11\dots1_2$ からもとの数(x)を引いた数をxに対する「1の補数」と呼びます。表 2.7 は0～7に対する1の補数

$$\begin{array}{l}
 b = 2\text{進数} \quad 0110_2 \text{は} \\
 n = 4\text{桁} \quad 10000_2 \quad 1010_2 \text{に} \\
 b^n = 10000_2 \quad -1010_2 \quad \text{対する} \\
 x = 1010_2 \quad \underline{-} \quad 0110_2 \quad 2 \text{の補数} \\
 \\
 b = 2\text{進数} \quad 0101_2 \text{は} \\
 n = 4\text{桁} \quad 1111_2 \quad 1010_2 \text{に} \\
 b^n - 1 = 1111_2 \quad -1010_2 \quad \text{対する} \\
 x = 1010_2 \quad \underline{-} \quad 0101_2 \quad 1 \text{の補数}
 \end{array}$$

図 2.6 4桁の2進数で補数の例

表 2.7 4ビット2進数の1補数

もとの数	補数へ変換	補数
0	$1111_2 - 0000_2 =$	1111_2
1	$1111_2 - 0001_2 =$	1110_2
2	$1111_2 - 0010_2 =$	1101_2
3	$1111_2 - 0011_2 =$	1100_2
4	$1111_2 - 0100_2 =$	1011_2
5	$1111_2 - 0101_2 =$	1010_2
6	$1111_2 - 0110_2 =$	1001_2
7	$1111_2 - 0111_2 =$	1000_2

を計算したものです。

「 0001_2 に対する1の補数を -0001_2 を表現するため使用する.」、「 0010_2 に対する1の補数を -0010_2 を表現するために使用する.」つまり、「1の補数を負の数を表現するために使用する.」と約束すれば、図 2.7 のように-7～+7の範囲の数を表現できます。一般に、1の補数表現を用いたnビット符号付き2進数が表現できる数値の範囲は次の式で計算できます。

$$-(2^{n-1} - 1) \sim 2^{n-1} - 1$$

図 2.7 で+7と-7が結んであるのは、「互いに1の補数」であることを表すためです。また、「互いに1の補数」の2数を見比べるとビットの0/1が入れ替わった関

-7	1000 ₂	-	-	-	-	-	-	-	+
-6	1001 ₂	-	-	-	-	-	-	+	
-5	1010 ₂	-	-	-	-	-	+		
-4	1011 ₂	-	-	-	-	+			
-3	1100 ₂	-	-	-	-	+			
-2	1101 ₂	-	-	-	+				
-1	1110 ₂	-	-	+					
-0	1111 ₂	+							
+0	0000 ₂	+							
+1	0001 ₂	-	+						
+2	0010 ₂	-	-	+					
+3	0011 ₂	-	-	-	+				
+4	0100 ₂	-	-	-	-	+			
+5	0101 ₂	-	-	-	-	-	+		
+6	0110 ₂	-	-	-	-	-	-	+	
+7	0111 ₂	-	-	-	-	-	-	-	+

図 2.7 1 の補数を用いた符号付き数値

係になっていることが分かります。1 の補数は引算だけではなく「ビット反転」でも計算できます。

次に1の補数からもとの数を求める計算を考えてみましょう。以下のように1の補数(z)を求める式を $x =$ の形に変形しても同じ形になるので、 x と z は「互いに1の補数」です。1の補数からもとの数を求める計算は、もとの数から1の補数を求める計算と同じです。(ビット反転のビット反転で元に戻る。)

$$z = 2^n - 1 - x \quad (z \text{は } x \text{に対する1の補数})$$

$$x = 2^n - 1 - z \quad (x \text{は } z \text{に対する1の補数})$$

1の補数を使用した方法も、実際に使われることはあまりありません。コンピュータの内部で実際に使用されるのは、次に説明する2の補数による表現です。

2.3.4 2の補数による負数の表現

「図 2.6 4桁の2進数で補数の例」にあるように、 $100\dots_2$ からもとの数(x)を引いた数を x に対する「2の補数」と呼びます。表 2.8 は $0 \sim 8$ に対する2の補数を計算したものです。5ビットで表現されている部分もありますが、四角で囲んだ4ビットに注目してください。

「 0001_2 に対する2の補数を -0001_2 を表現するために使用する。」「 0010_2 に対する2の補数を -0010_2 を表現するために使用する。」つまり「2の補数を負の数を表すために使用する。」と約束すれば、図 2.8 のように $-8 \sim +7$ の範囲の数を表現できます。(ただし 1000_2 は -8 を表現することとします。4ビットでは $+8$ を表

表 2.8 4ビット2進数の2補数

もとの数	補数へ変換		補数
	0	1	
0	$1\boxed{0000}_2$	-0000_2	$= 1\boxed{0000}_2$
1	$1\boxed{0000}_2$	-0001_2	$= 1\boxed{1111}_2$
2	$1\boxed{0000}_2$	-0010_2	$= 1\boxed{1110}_2$
3	$1\boxed{0000}_2$	-0011_2	$= 1\boxed{1101}_2$
4	$1\boxed{0000}_2$	-0100_2	$= 1\boxed{1100}_2$
5	$1\boxed{0000}_2$	-0101_2	$= 1\boxed{1011}_2$
6	$1\boxed{0000}_2$	-0110_2	$= 1\boxed{1010}_2$
7	$1\boxed{0000}_2$	-0111_2	$= 1\boxed{1001}_2$
8	$1\boxed{0000}_2$	-1000_2	$= 1\boxed{0000}_2$

-8	1000 ₂
-7	1001 ₂
-6	1010 ₂
-5	1011 ₂
-4	1100 ₂
-3	1101 ₂
-2	1110 ₂
-1	1111 ₂
0	0000 ₂
1	0001 ₂
2	0010 ₂
3	0011 ₂
4	0100 ₂
5	0101 ₂
6	0110 ₂
7	0111 ₂

図 2.8 2の補数を用いた符号付き数値

現することはできません。)

一般に、2の補数表現を用いたnビット符号付き2進数が表現できる数値の範囲は次の式で計算できます。

$$-2^{n-1} \sim 2^{n-1} - 1$$

次に2の補数からもとの数を求める計算を考えてみましょう。以下のように2の補数(z)を求める式を $x =$ の形に変形しても同じ形になるので、 x と z は「互いに2の補数」です。2の補数からもとの数を求める計算は、もとの数から2の補数を求める計算と同じです。

$$z = 2^n - x \quad (z \text{は } x \text{に対する2の補数})$$

$$x = 2^n - z \quad (x \text{は } z \text{に対する2の補数})$$

現代のコンピュータは、ほとんどの機種で2の補数表現を採用しています。2の補数表現を用いると2進数の足し算・引き算が、正負のどちらの数でも同じ手順で計算できます(詳しくは後述)。「手順が同じ=演算回路が

同じ」ことになりますので、コンピュータを製作する上では非常に都合がよいのです。

2.3.5 2の補数を求める手順

$-x$ を n ビット 2 の補数表現 (y) で表します。2 の補数の定義より、 y は次のように計算できます。

$$\begin{aligned}y &= 2^n - x \\&= (2^n - 1 - x) + 1 \\&= (x \text{に対する } 1 \text{ の補数}) + 1\end{aligned}$$

「 x に対する 1 の補数」はビット反転で簡単に求めることができます。「 x に対する 2 の補数」は「 x をビット反転した後、1 を加える」ことにより簡単に求めることができます。

ビット反転した後、1 を加える。

2.3.6 2の補数から元の数を求める手順

次に、逆変換について考えます。既に 2.3.4 で触れたように 2 の補数と元の数は互いに「2 の補数」ですから、2 の補数を求めるのと同じ計算で、2 の補数から元の数を求めることができます。

ビット反転した後、1 を加える。

問題

- 次の数を「2 の補数表現を用いた 4 ビット符号付き 2 進数」で書き表しなさい。
 $3_{10}, -3_{10}, 5_{10}, -5_{10}, 6_{10}, -6_{10}$
- 次の数を「2 の補数表現を用いた 8 ビット符号付き 2 進数」で書き表しなさい。
 $3_{10}, -3_{10}, 8_{10}, -8_{10}, 30_{10}, -30_{10}, 100_{10}, -100_{10}$
- 次の「2 の補数表現を用いた 4 ビット符号付き 2 進数」を 10 進数で書き表しなさい。
 $1100_2, 1011_2, 0100_2, 1101_2$

10 進数	2 進数
$\begin{array}{r} 07 \\ + 05 \\ \hline 12 \end{array}$	$\begin{array}{r} 0111_2 \\ + 0101_2 \\ \hline 1100_2 \end{array}$
	(10 進の 7) (10 進の 5) (10 進の 12)

10 進数	2 進数
$\begin{array}{r} 12 \\ - 05 \\ \hline 07 \end{array}$	$\begin{array}{r} 1100_2 \\ - 0101_2 \\ \hline 0111_2 \end{array}$
	(10 進の 12) (10 進の 5) (10 進の 7)

何進数で計算しても同じ結果になる。

図 2.9 2 進数と 10 進数の計算を比較

2.4 2 進数の計算

ここでは、2 進数の和と差の計算方法を学びます。

2.4.1 正の数の計算

2 進数の計算も 10 進数と同じ要領です。桁上がりが 10 ではなく、2 で発生することに注意してください。図 2.9 に例を示します。2 進数で計算しても 10 進数で計算しても同じ計算結果になります。

2.4.2 負の数を含む計算

2 の補数表現を用いると、正の数だけのときと同じ要領で負の数を含む計算ができます。ここでは和の計算を例に説明します。

正の数と負の数の和

正の数 (X) と負の数 ($-A$) (A の 2 の補数 (B)) の和の計算を考えます。

$X + B$ の計算 ($X + (-A)$)

- 結果が負の場合 ($|A| > |X|$)
 解は $-(A - X)$ になるはず！

$$\begin{aligned}X + B &= X + (2^n - A) \\&= 2^n - (A - X)\end{aligned}\tag{2.1}$$

(2.1) 式は、正解 $-(A - X)$ の 2 の補数表現になっています。図 2.10 に計算例を示します。

- 結果が正またはゼロの場合 ($|X| \geq |A|$)
 解は $(X - A)$ になるはず！

$$\begin{aligned}X + B &= X + (2^n - A) \\&= 2^n + (X - A) \\&= X - A\end{aligned}\tag{2.2}$$

(2.2) 式の 2^n は、桁あふれにより結果に残らないので、正解 $(X - A)$ となります。図 2.11 に計算例を示します。

$$3 + (-5) = -2 \text{ (4ビット2の補数表現)}$$

3を2進数に変換すると 0011_2

-5 を2進数に変換すると 1011_2

「和を計算する」

$$0011_2 + 1011_2 = 1110_2 = -2_{10}$$

図 2.10 結果が負になる足し算の例

$$5 + (-3) = 2 \text{ (4ビット2の補数表現)}$$

5を2進数に変換すると 0101_2

-3 を2進数に変換すると 1101_2

「和を計算する」

$$0101_2 + 1101_2 = \boxed{1}0010_2 = 2_{10}$$

(5ビット目の1は桁あふれで消滅)

図 2.11 結果が正になる足し算の例

$$(-1) + (-3) = (-4) \text{ (4ビット2の補数表現)}$$

-1 を2進数に変換すると 1111_2

-3 を2進数に変換すると 1101_2

「和を計算する」

$$1111_2 + 1101_2 = \boxed{1}1100_2 = -4_{10}$$

(5ビット目の1は桁あふれで消滅)

図 2.12 負の数と負の数の足し算の例

問題

次の2進数は「2の補数表現を用いた符号付き2進数」です。空欄を埋めなさい。

1)	$0011\ 1100_2$	\rightarrow	$+$	<input type="text"/> $_{10}$
	$+ 0010\ 1101_2$		\rightarrow	<input type="text"/> $_{10}$
		\hline		$_{10}$
	$\boxed{\quad}_2$			
2)	$0110\ 0100_2$	\rightarrow	$+$	<input type="text"/> $_{10}$
	$+ 1000\ 0001_2$		\rightarrow	<input type="text"/> $_{10}$
		\hline		$_{10}$
	$\boxed{\quad}_2$			
3)	$1110\ 0100_2$	\rightarrow	$+$	<input type="text"/> $_{10}$
	$+ 0100\ 0001_2$		\rightarrow	<input type="text"/> $_{10}$
		\hline		$_{10}$
	$\boxed{\quad}_2$			
4)	$1110\ 0100_2$	\rightarrow	$+$	<input type="text"/> $_{10}$
	$+ 1100\ 0001_2$		\rightarrow	<input type="text"/> $_{10}$
		\hline		$_{10}$
	$\boxed{\quad}_2$			
5)	$1110\ 0100_2$	\rightarrow	$-$	<input type="text"/> $_{10}$
	$- 1100\ 0001_2$		\rightarrow	<input type="text"/> $_{10}$
		\hline		$_{10}$
	$\boxed{\quad}_2$			

負の数と負の数の和

負の数 $(-A_1)(2\text{の補数}(B_1))$ と

負の数 $(-A_2)(2\text{の補数}(B_2))$ の和

$B_1 + B_2$ の計算 $((-A_1) + (-A_2))$

解は $-(A_1 + A_2)$ になるはず！

$$\begin{aligned} B_1 + B_2 &= (2^n - A_1) + (2^n - A_2) \\ &= 2^n + (2^n - (A_1 + A_2)) \quad (2.3) \\ &= 2^n - (A_1 + A_2) \quad (2.4) \end{aligned}$$

(2.3)式の最初の 2^n は、桁あふれにより消滅するので
(2.4)式は正解 $-(A_1 + A_2)$ の2の補数表現になって
います。図 2.12 に計算例を示します。

以上のように、2の補数表現を使用すると負の数を含んだ足し算が簡単に計算できます。ここでは省略しますが、引き算も同様に正負の区別をすることなく計算できます。

MSB と LSB

「2の補数表現を用いると、最上位ビットが1なら負の数と分かります。」のように「最上位ビット」と言う言葉をよく使います。

「最上位ビット」と言うのは長いので、これを英語にした「Most Significant Bit」の頭文字を取り MSB と略すことがあります。憶えておいて下さい。

同様に「最下位ビット」のことは英語で「Least Significant Bit」なので、略して LSB と呼びます。これも、憶えておきましょう。

2.5 小数の表現

この節では、小数を2進数で表現する方法を紹介します。

2.5.1 2進数による小数の表現

コンピュータ内部で、2進数を用いて、小数を含む数を表現する方法は何種類かあります。ここでは、その中でも最も基本的な固定小数点形式を紹介します。

これまでの2進数は、暗黙のうちに小数点が右端にあると考えました。小数点の位置を右端以外だと約束すれば、小数を含む数の表現も可能になります。以下に4ビットの2桁目に小数点があると考えた場合の例を示します。

$$00.00_2 = 0.0_{10}$$

$$00.01_2 = 0.25_{10}$$

$$00.10_2 = 0.5_{10}$$

$$00.11_2 = 0.75_{10}$$

$$01.00_2 = 1.0_{10}$$

$$01.01_2 = 1.25_{10}$$

$$01.10_2 = 1.5_{10}$$

$$01.11_2 = 1.75_{10}$$

$$10.00_2 = 2.0_{10}$$

...

$$11.11_2 = 3.75_{10}$$

小数点を中心に、左は1桁毎に2倍、右は1桁毎に1/2倍になります。（10進数では、左は1桁毎に10倍、右は1桁毎に1/10倍になりましたね。）

2.5.2 10進数との相互変換

1. 2進数から10進数への基数変換

整数の場合と同様に桁の重みを加算すれば10進数に変換できます。次に例を示します。

$$10.01_2 = 2 + 1/4 = 2.25_{10}$$

2. 10進数から2進数への基数変換

整数の場合は、1/2倍することで右にシフト（桁移動）し、小数点を横切った0/1を判定しました。（小数点を1が横切ると、余りが出ていました。）

図2.13に例を示すように、小数点以下の数値は、2倍することで左にシフトし、小数点を横切った0/1を判定すれば2進数に変換できます。

3. 整数部と小数部の両方がある場合

整数部分と小数部分を分離して、別々に計算します。

$$\begin{array}{r} \text{2進数} & \times 2 \text{ は} & \text{10進数} \\ 0.101_2 & \swarrow \text{左シフ} & 0.625 \\ & \text{トと同じ} & \times 2 \\ 1.010_2 & & \underline{1.250} \end{array}$$

$$\begin{array}{r} \text{2進数} & \times 2 \text{ は} & \text{10進数} \\ 0.010_2 & \swarrow \text{左シフ} & 0.250 \\ & \text{トと同じ} & \times 2 \\ 0.100_2 & & \underline{0.500} \end{array}$$

$$\begin{array}{r} \text{2進数} & \times 2 \text{ は} & \text{10進数} \\ 0.100_2 & \swarrow \text{左シフ} & 0.500 \\ & \text{トと同じ} & \times 2 \\ 1.000_2 & & \underline{1.000} \end{array}$$

10進数で計算したとき、小数点を横切って整数部に出てきた数を小数点の右に順番に並べると $0.\underline{101}_2$ になる。

図2.13 小数を表す10進数から2進数への変換例

問題

1. 次の2進数を10進数に変換しなさい。
 - (a) 0.1001_2
 - (b) 0.0101_2
 - (c) 11.11_2
2. 次の10進数を2進数に変換しなさい。
 - (a) 0.0625_{10}
 - (b) 0.1875_{10}
 - (c) 0.4375_{10}
3. 次の10進数を2進数に変換しなさい。（難問）
 - (a) 0.8_{10}
 - (b) 0.7_{10}

(下位 4 ビット)

(上位 3 ビット)							
	0	1	2	3	4	5	6
0	NUL	DLE	(SP)	0	@	P	`
1	SOH	DC1	!	1	A	Q	a
2	STX	DC2	"	2	B	R	b
3	ETX	DC3	#	3	C	S	c
4	EOT	DC4	\$	4	D	T	d
5	ENQ	NAK	%	5	E	U	e
6	ACK	SYN	&	6	F	V	f
7	BEL	ETB	'	7	G	W	g
8	BS	CAN	(8	H	X	h
9	HT	EM)	9	I	Y	i
A	LF	SUB	*	:	J	Z	z
B	VT	ESC	+	;	K	[k
C	FF	FS	,	<	L	\	l
D	CR	GS	-	=	M]	m
E	SO	RS	.	>	N	^	n
F	SI	US	/	?	0	_	o
							DEL

図 2.14 ASCII 文字コード表

2.6 文字の表現

この節では、文字を 2 進数で表現する方法を紹介します。（文字情報を表しているビットの読み方を約束する。）

2.6.1 文字コード

文字の場合、数値のような規則性を期待することはできません。そこで、使用する文字の一覧表を作成し、1 文字毎に対応する 2 進数（コード）を決めます。この一覧表のことを「文字コード表」と呼びます。文字コード表を各自（コンピュータメーカー等）が勝手に定義すると、コンピュータの間でのデータ交換に不便です。そこで、規格として制定してあります。

2.6.2 ASCII コード

ASCII (American Standard Code for Information Interchange) コードは、1963 年にアメリカ規格協会 (ANSI) が定めた情報交換用の文字コードです。英字、数字、記号等が含まれます。現代のパーソナルコンピュータ等で使用される文字コードは、ASCII コードが基本になっています。図 2.14 に ASCII 文字コード表を示します。

文字コード表で 00H ~ 1FH と 7FH は、機能（改行等）を表す特殊な文字になっています。20H (SP) は空白を表す文字です。

ASCII 文字コードは 7 ビットで表現されます。しか

表 2.9 補助単位まとめ

一般的に			記憶容量		
値	記号	読み方	値	記号	読み方
10^3	<i>k</i>	キロ	2^{10}	<i>Ki</i>	キビ
10^6	<i>M</i>	メガ	2^{20}	<i>Mi</i>	メビ
10^9	<i>G</i>	ギガ	2^{30}	<i>Gi</i>	ギビ
10^{12}	<i>T</i>	テラ	2^{40}	<i>Ti</i>	テビ

し、コンピュータの内部では 1 バイト（8 ビット）単位の方が扱いやすいので、最上位に 0₂ を補って 8 ビットで扱うことがほとんどです。

2.6.3 JIS 文字コード

日本では JIS (Japan Industrial Standard : 日本工業規格) の一部として、8 ビットコード（英数記号+カナ）と、16 ビットコード（英数記号+カナ+ひらがな+カタカナ+漢字...）が定められています。

JIS 8 ビットコードは、ASCII コードに半角カタカナを追加したものです。記号、数字、英字の部分は、ぼ ぼ 、同じ並びになっています。

2.7 補助単位

長さや重さを書くとき、1,000m を 1km、1,000g を 1kg のように書きました。この k のような記号を補助単位と呼びます。

コンピュータの世界でよく使用される補助単位には、k (キロ=10³)、M (メガ=10⁶)、G (ギガ=10⁹)、T (テラ=10¹²) 等があります。（1,000 倍毎に補助単位があります。）パソコンのカタログに「CPU のクロックは 1GHz」のような記述を見かけますね。よく使う補助単位を表 2.9 にまとめます。

記憶容量を表す場合の補助単位は、1,000 の代わりに $2^{10} = 1,024$ を使用します。1,000 も 1,024 も k で表現すると紛らわしいので、k の代わりに Ki と書き表すこともあります。つまり、 $1kB = 1KiB = 2^{10}B = 1,024B$ 、 $1MB = 1MiB = 2^{20}B = 1,048,576B$ となります。（「B」はバイトを表す。）

「H.D.D. の容量は 500GB」のように表示されている場合は、記憶容量を表しているので $G = 2^{30}$ で表示されています。同じことを「H.D.D. の容量は 500GiB」のように表示することもあります。

2.8 コンピュータの基本回路

前の節までで、コンピュータ内部での情報の表現方法を勉強しました。コンピュータの内部では、どんな情報も電気の「ON/OFF」で表現しているのでしたね。

この節では、電気の「ON/OFF」を使用して、計算や記憶をする回路を勉強します。

2.8.1 論理演算と論理回路

論理（Yes/No, 真/偽, True/False）を対象とする演算（計算）のことを「論理演算」と呼びます。論理の「真/偽」をビットの「1/0」に対応させることにより、論理も電気の「ON/OFF」で表現することができます。

ここでは、論理演算と、論理演算をする回路を紹介します。論理演算をする回路のことを「論理回路」と呼びます。ここで紹介する論理回路が、コンピュータを構成する基本回路になります。

2.8.2 基本的な論理回路

基本的な論理回路を4種類、組合せてできたものを2種類、紹介します。

論理積（AND）

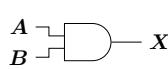
二つのビットを入力し、両方が1のときだけ出力が1になるような論理演算です。

入力		出力
A	B	X
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

AND の真理値表

$$X = A \cdot B$$

AND の論理式



AND の回路記号

論理和（OR）

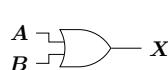
二つのビットを入力し、どちらかが1のとき出力が1になるような論理演算です。

入力		出力
A	B	X
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

OR の真理値表

$$X = A + B$$

OR の論理式



OR の回路記号

否定（NOT）

一つのビットを入力し、入力と逆の論理を出力する論理演算です。

入力	出力
A	X
0	1
1	0

NOT の真理値表

$$X = \overline{A}$$

NOT の論理式

$A \rightarrowtail X$

$A \circlearrowleft X$

NOT の回路記号

排他的論理和（XOR）

二つのビットを入力し、二つが異なるとき出力が1になるような論理演算です。

入力		出力
A	B	X
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

XOR の真理値表

$$X = A \oplus B$$

XOR の論理式

$A \boxplus B \rightarrowtail X$

$A \boxplus B \circlearrowleft X$

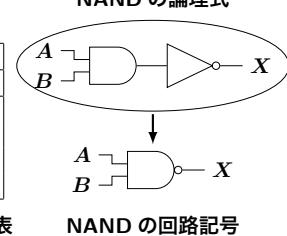
XOR の回路記号

NAND

否定（NOT）と論理積（AND）を組み合わせた演算です。

入力		出力
A	B	X
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

NAND の真理値表



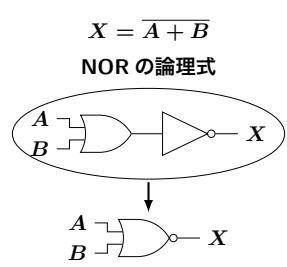
NAND の回路記号

NOR

否定（NOT）と論理和（OR）を組み合わせた演算です。

入力		出力
A	B	X
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

NOR の真理値表



NOR の回路記号

2.8.3 演算回路

「基本的な論理回路」を組み合わせることにより、足し算／引き算等の複雑な演算を行う回路を実現できます。

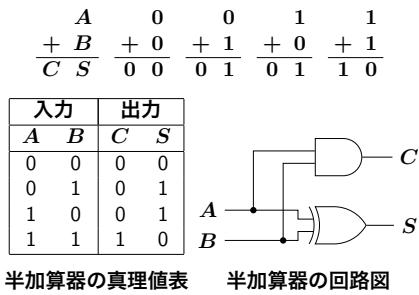


図 2.15 1 ビット半加算器

入力		出力		
A	B	I	C	S
0	0	0	0	0
0	0	1	0	1
0	1	0	0	1
0	1	1	1	0
1	0	0	0	1
1	0	1	1	0
1	1	0	1	0
1	1	1	1	1

全加算器の真理値表

A : 計算の入力
B : 計算の入力
I : 衔上がりの入力

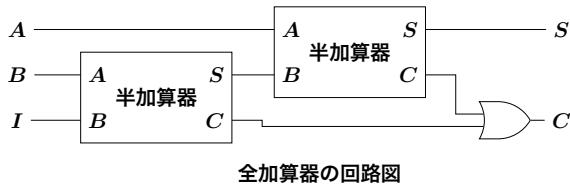


図 2.16 1 ビット全加算器

半加算器

例えば、1 ビットの足し算回路は図 2.15 ように実現できます。この例は A, B の 2 ビットを入力し、和 (S) と上の桁への桁上がり (C) を出力する回路です。この回路を「半加算器」と呼びます。

全加算器

半加算器は桁上がりを出力しますが、自分自身は下の桁からの桁上がりを入力することができません。桁上がりの入力を備えた1ビット足し算器を「全加算器」と呼び、図 2.16 のように実現することができます。

n ビット加算器

図 2.17 のように半加算器と全加算器を組み合わせることで、任意ビットの加算器を実現することができます。

n ビット1の補数器

1の補数を作る回路です。1の補数はビット反転によってできるので、NOT でできます。図 2.18 に4ビット

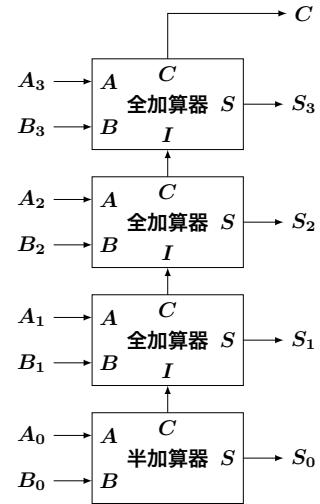


図 2.17 4 ビット加算器

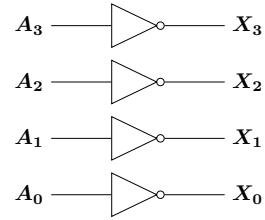


図 2.18 4 ビット1の補数器

トの例を示します。簡単ですね。

n ビット2の補数器

2の補数を作る回路です。2の補数は、1の補数に1足すとできるので、1の補数器の出力に半加算器を組み合わせるとできます。図 2.19 に4ビットの例を示します。

演算回路を数種類紹介しました。ここでは紹介しませんでしたが、引き算回路等も同様に製作可能です。

2.8.4 記憶回路

「基本的な論理回路」を組み合わせることにより、記憶機能を実現することもできます。ここでは、最も簡単な RS-FF (RS フリップフロップ) を紹介します。

図 2.20 に RS フリップフロップの真理値表と回路図を示します。RS-FF は S (Set) と R (Reset) の二つの入力と、状態 (Q, \bar{Q}) の出力を持つ回路です。S=0, R=1 を入力することにより、回路はリセットされ出力 Q は 0 になります。S=1, R=0 を入力することにより、回路はセットされ出力 Q は 1 になります。 \bar{Q} には、常に Q の否定が出力されます。

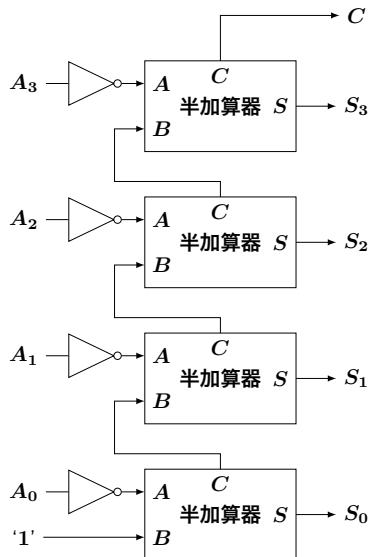
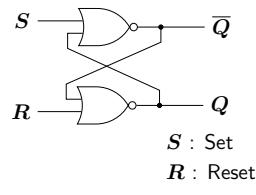


図 2.19 4 ビット 2 の補数器

入力	出力	
S	R	Q
0	0	記憶
0	1	0
1	0	1
1	1	禁止

RS-FF の動作



RS-FF の回路

図 2.20 RS フリップフロップ

$S=0, R=0$ を入力すると、回路は直前の値を「記憶」します。 $S=1, R=1$ は入力してはいけない組合せです。RS-FF は、回路をリセット／セットした後で「記憶」状態にすることにより、「値を記憶する回路（＝記憶回路）」として働きます。

2.9 まとめ

この章では、まず、ノイマン型コンピュータの内部では、情報が電気（電子）回路で扱いやすい 2 進数で表現されていることを学びました。次に、数値が 2 進数で表現できることや計算方法、文字データの表現法を学びました。最後に、コンピュータの基本回路である論理回路について学びました。

論理回路素子

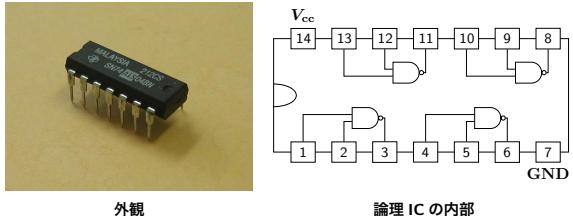
回路を製作するには、基本的な論理回路を内蔵した集積回路（論理 IC）を用いることができます。

様々な論理 IC が販売されていますが、ここでは、74 シリーズのものを紹介します。下の例に示したのは、NAND ゲートを四つ内蔵した 7400 と呼ばれる IC です。同様な IC で、AND, OR, XOR, NOT 等の回路を内蔵したものがあります。

このような IC 同士を配線して組み合わせることにより、本文で紹介した演算回路や記憶回路を実現することができます。

論理 IC

V_{cc} : 5V 電源の「+」を配線する。
GND : 5V 電源の「-」を配線する。



外観

論理 IC の内部

FPGA (field-programmable gate array)

大量の論理回路素子を内蔵した LSI (Large Scale Integrated Circuit) の一種です。半導体メーカーが製造した FPGA は、FPGA を利用する装置の設計者によって内部の回路をプログラムされ、最終製品に組み込まれます。

TeC も FPGA を利用した製品の一つです。図 4.1 で「マイコン本体」と紹介されている LSI は、Xilinx 社の Spartan-6 という名前の FPGA です。これに、徳山高専で設計した TeC マイコンの回路をプログラミし TeC として動作させています。

TeC7 が利用している Xilinx Spartan-6 FPGA (XC6LX9-2TQG144C) には、74 シリーズの論理 IC 換算で数万個分程度（かなり幅がありますが）の回路をプログラムすることができます。

第3章

組み立て

この章では、TeC7d の組み立て方を説明します。何年間も使用するマイコンなので、慎重に組み立てて下さい。作業を始める前に組み立て手順を解説したビデオ^{*1}で手順や要領を確認して下さい。

3.1 ハンダ付け

マイコン本体は基板に部品をハンダ付けして組み立てます。ハンダ付けの要領を図 3.1 に示します。上手なハンダ付けができると、ハンダが富士山型になります。次のような部品から順にハンダ付けします。

1. 背の低い部品
2. 基板中心の部品
3. 壊れにくい部品

3.2 部品の取り付け

組み立ては、部品をハンダ付けして基板に取り付ける作業です。以下の説明では、取り付ける部品が表になっています。表の部品の「記号」と同じ「記号」が、基板の上に白い文字で書いてあるので、その場所に部品をハンダ付けします。

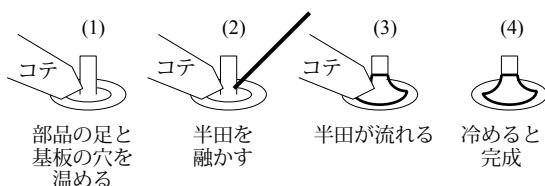


図 3.1 ハンダ付け手順

^{*1} TeC7a の組み立て手順全体を説明するビデオが <https://youtu.be/w010SzEqmOM> に公開してあります。TeC7d も概略は同じです。

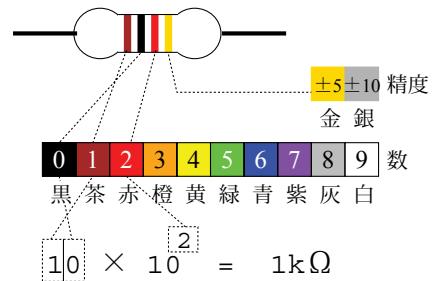


図 3.2 抵抗器

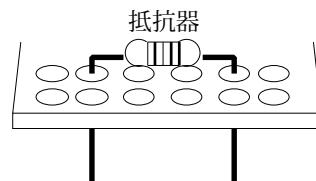


図 3.3 抵抗器の実装

3.2.1 抵抗器

抵抗器は図 3.2 のような外観をした部品です。抵抗値は、部品のカラーコードで見分けます。正しい抵抗値の抵抗器を選んで、図 3.3 のように足を曲げて基板に差し込みます。このとき、部品と基板の間に隙間ができないように気を付けて下さい。

抵抗器の一覧を表 3.1 に示します。カラーコードを良く確認して、間違えないように部品を選択して下さい。抵抗器に向きはありませんが、カラーコードの読みやすさを考えて方向を統一する方が良いでしょう。

3.2.2 積層セラミック・コンデンサ

積層セラミックコンデンサは 4 種類、合計 32 個あります。そのうち、25 個は同じ部品です。一覧を表 3.2 に示します。向きはありませんが、完成したとき表面の文字が読みやすい方向に取り付けると良いでしょう。

表 3.1 抵抗器

記号	カラーコード	説明
R1,15	黄紫茶金	470 Ω 1/4W カーボン
R7	茶緑黒茶茶	1.5k Ω 1/4W 金属皮膜
R8	橙黒黒茶茶	3.0k Ω 1/4W 金属皮膜
R9-12	黄紫赤金	4.7k Ω 1/4W カーボン
R13	橙橙茶金	330 Ω 1/4W カーボン
R14	茶緑茶金	150 Ω 1/4W カーボン
R16	茶黒橙金	10k Ω 1/4W カーボン

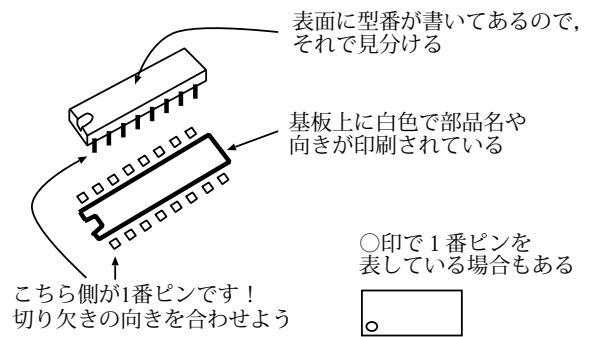


図 3.5 IC 取付の説明図

表 3.2 積層セラミック・コンデンサ

記号	型番	説明
C1,2	47	47pF
C3,4,12-15,17-34,37	104	0.1μF
C35	101	100pF
C6,8,10,36	475	4.7μF

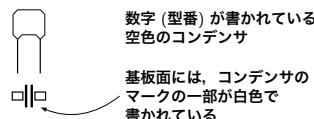


図 3.4 積層セラミック・コンデンサ

表 3.3 IC

記号	型番	説明
U3	K516	水晶発振 IC
U6	LM339	電圧比較 IC

図 3.4 を良く見て、ハンダ付けして下さい。

3.2.3 IC

表 3.3 の部品を基板にハンダ付けします。IC には向きがありますので、間違えないように注意して下さい。図 3.5 の説明を良く読んで、方向を間違えないように取り付けて下さい。この時、図 3.6 のように「IC の足を修正して」基板の穴に差し込んで下さい。

部品が傾いたり、浮き上がったりしないようにするには、IC の足 2 カ所程度を「仮にハンダ付けし、問題が無いか確認して」から他の足をハンダ付けすると良いでしょう。足の多い部品を間違ってハンダ付けしてしまうと、取り外すのが絶望的に大変ですので、くれぐれも間違えないように注意して下さい。

表 3.4 フェライトビーズ

記号	型番	説明
FB1,2	なし	なし



図 3.7 フェライトビーズ

3.2.4 フェライトビーズ

フェライトビーズは電源のノイズを弱くする働きのある部品です。図 3.7 の部品をハンダ付けします。この部品は向きはありません。リード線の先を基板に差し込んでハンダ付けします。

3.2.5 ジャンパ

表 3.5 の部品をハンダ付けします（1 個だけです）。熱に弱い部品なので手早くハンダ付けしてください。ハンダ付けができたら、図 3.8 のように上半分の部品を差し込みます。図をよく見て上下を間違えないように注意してください。

差し込む位置は TeC の位置です。図 3.8 を確認して下さい。

表 3.5 ジャンパ

記号	型番	説明
J1	なし	なし

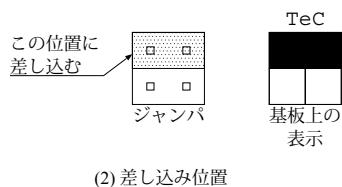
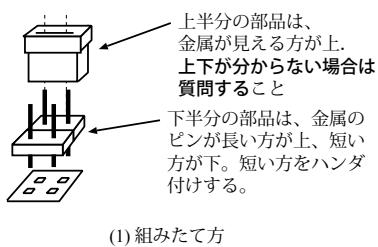


図 3.8 ジャンパ

表 3.6 圧電スピーカ

記号	型番	説明
BZ1	なし	圧電スピーカ



3.2.6 圧電スピーカ

圧電スピーカは TeC が音を出すためのスピーカの役割をします。表 3.6、図 3.9 の部品です。向きはありません。基板との隙間ができるないように気を付けて下さい。

3.2.7 電解コンデンサ

表 3.7 の部品をハンダ付けします。部品の形状は図 3.10 のようなものです。この部品も、向きがありますので取り付け方向に注意が必要です。長い足の方が「+」になります。図 3.10 を良く見て、向きを間違えないようにしてください。

3.2.8 JTAG コネクタ

マイコン内部の回路を書き換えるときに使用するコネクタです。表 3.8 の部品を使用します。この部品にも向

表 3.7 電解コンデンサ

記号	型番	説明
C0,C5,C7,C9,C16	47μF16V	47μF
C11	220μF10V	220μF

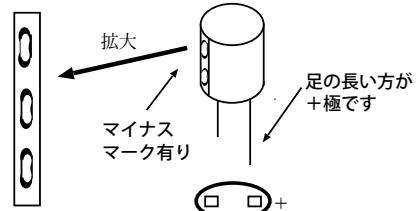
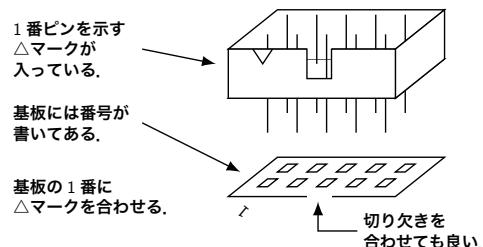


表 3.8 JTAG コネクタ

記号	型番	説明
CN4	なし	小さい 14 ピンのコネクタ



きがあります。図 3.11 を良く見て、向きを間違えないように取り付けて下さい。

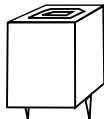
3.2.9 電源コネクタ

表 3.9 の電源コネクタは、図 3.12 (1) のような形状の部品です。このコネクタからマイコンに電源を供給します。パソコンの USB ポートと接続してパソコンとの通信に使用することもあります。図 3.12 (2) に示す基板上の取り付け穴にハンダ付けします。このコネクタの取り付けでは、失敗するとひどい火傷をする恐れがあります。以下の手順を良く読んで慎重に作業してください。

1. 穴にしっかり差し込む。
2. 大きな穴とコネクタの端子を十分熱する。
3. 大きな穴が塞がるまで、ハンダを融かし込む。

表 3.9 電源コネクタ

記号	型番	説明
CN1	なし	USB-B コネクタ



(1)形状



(2)取り付け穴

図 3.12 電源コネクタ

表 3.10 集合抵抗器

記号	型番	説明
RA1,2	M9-1-471 (L91S 471)	470 Ω (8 素子)
RA3	M9-1-391 (L91S 391)	390 Ω (8 素子)
RA4	M5-1-391 (L51S 391)	390 Ω (4 素子)
RA5	8L103	ラダー抵抗器

4. 十分に冷めるのを待つ。

5. 部品が傾いていないか確認する。
6. 小さな穴に部品の足をハンダ付けする。

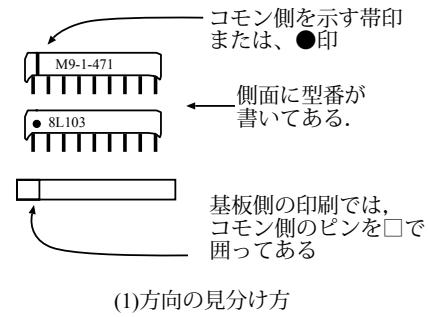
3.2.10 集合抵抗器とラダー抵抗器

集合抵抗器とラダー抵抗器は図 3.13 のような部品です。一覧を表 3.10 に示します。この部品にも向きがありますので、注意して下さい。IC と同じ要領で、傾きや浮き上がりが無いよう注意深くハンダ付けしましょう。

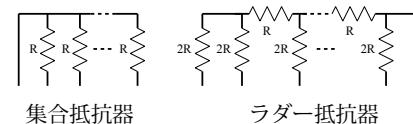
3.2.11 LED (ランプ)

LED (ランプ) は、マイコンを使用するとき、いつも注視する部品です。傾いていたりすると、とても気になりますので綺麗に取り付けて下さい。アノード (+)，カソード (-) の見分け方は図 3.14 の通りです。方向を間違えないように注意しましょう。LED は、赤、緑、黄の3色があります。3色のLED は図 3.15 のように配置します。LED をハンダ付けする要領は次の通りです。

1. 同じ色を一斉に、アノード (+) だけハンダ付けする。(黄→緑→赤の順に中心から取り付ける。)
2. LED が垂直になっているか確認する。(垂直になっ



(1)方向の見分け方



これらの部品の内部構造は上図のようになっている。それぞれ、一番左のピンがコモンと呼ばれ、部品のマークがある側である。

(2)内部の構造

図 3.13 集合抵抗器とラダー抵抗器

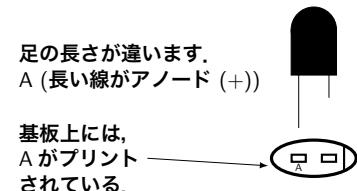


図 3.14 LED の向きの見方

ていない場合は、再度温めて修正する。)

3. LED が奥までささっているか確認する。
4. カソードをハンダ付けする。
5. リード線を切る。

3.2.12 スイッチ

スイッチには、「トグルスイッチ」と「プッシュスイッチ」の2種類があります。トグルスイッチは上下に倒すタイプのスイッチ、プッシュスイッチは押しボタンになったスイッチです(図 3.16 参照)。

スイッチは、マイコンを操作するときいつも触る部品です。スイッチが傾いていると操作性が悪くなりますので、まっすぐになるよう慎重にハンダ付けしてください。また、スイッチは温まりにくいので、ハンダ付けするときは少し余計に熱するようにしてください。

スイッチの配置は図 3.17 の通りです。間違えないよ

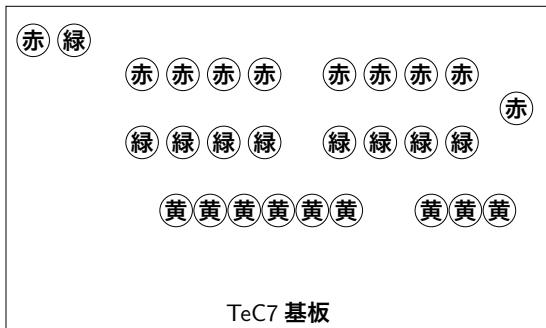


図 3.15 LED の配置

表 3.11 入出力ポートコネクタ

記号	型番	説明
CN5	なし	大きい 20 ピンのコネクタ

コネクタの凹凸がある側を、基板の表示に凸の印がある方に向けてます。

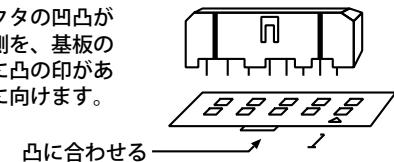


図 3.18 入出力ポートコネクタ

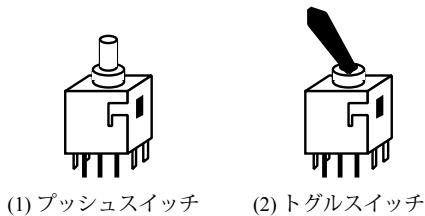


図 3.16 スイッチ

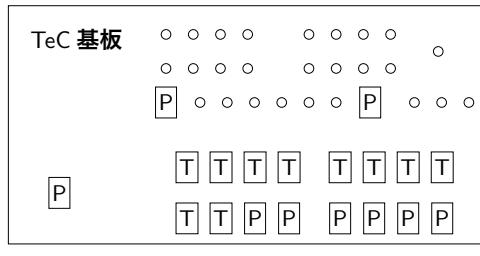


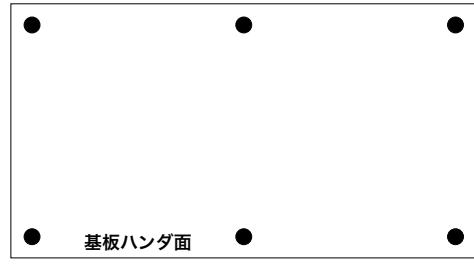
図 3.17 スイッチの配置

うに配置してください。スイッチをハンダ付けする手順は以下の通りです。

- 足を穴にしっかりと差し込み、ハンダ面に 7 本の足が均等に出ていることを確認する。
- 足のうち 1 本をハンダ付けする。
- スイッチが傾いていないか確認する。
(傾いていた場合は、温め直して修正する。)
- 他の足をハンダ付けする。

3.2.13 入出力ポートコネクタ

マイコンの外部に追加の回路を接続するときに使用するコネクタです。表 3.11 の部品を使用します。この部品にも向きがあります。図 3.18 を良く見て、向きを間



● ゴム足取り付け位置

図 3.19 ゴム足の取り付け位置

違えないように取り付けて下さい。

3.2.14 ゴム足の取り付け

基板の裏側に足をつけます。足は、両面テープの付いた黒い円盤状の部品です。足を取り付ける場所は、図 3.19 の通りです。取り付け場所の裏側（基板の表側）に○印が付いています。

まず、アルコールで周辺をきれいに拭いてから、鉄板とシールを剥がして、両面テープで指定の場所に貼り付けて下さい。

3.2.15 プッシュスイッチの頭の取り付け

最後に、プッシュスイッチに頭を取り付けます。図 3.20 を良く見て取り付けて下さい。

3.3 完成

3.3.1 命令表の貼り付け

ケースのフタの裏に、命令表を貼り付けて下さい。

3.3.2 目視確認

ご苦労さまでした。これでマイコンが完成しました。でも、もう一度、部品の種類、向きが間違っていないか目視確認して下さい。

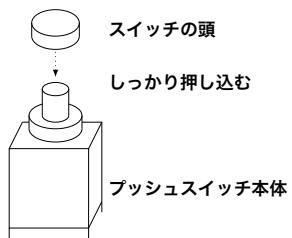


図 3.20 プッシュスイッチの頭の取り付け方

3.3.3 設計データの書き込み

間違いがなかったら、教員に頼んでマイコンの設計データを書き込んでもらって下さい。（設計データの書き込みに JTAG コネクタが使用されます。）これで、マイコンとして動作するようになったはずです。

第4章

マイコンの操作

この章では、マイコン（TeC）の操作方法を学習します。併せてマイコンの内部にあるレジスタや記憶装置も憶えましょう。操作方法を解説したビデオ^{*1}も参考にして下さい。

4.1 各部の名称

図 4.1 に、マイコン各部の名称（または役割り）を示します。各部の役割りは次の通りです。

1. コンソールパネル

マイコンにプログラムを入力したり、マイコンの内部を観察したり、プログラムの実行を指示したりするためには使用する部分です。データの入力や表示は2進数を用います。本マイコンの顔です。

2. リセットスイッチ

マイコンをリセットする押しボタンスイッチです。

3. ジャンパ

マイコンのモードを切替えます。通常は、「TeC」の位置にジャンパーを挿して「TeC モード」で使用します。高学年で「TaC モード」を使用します。「DEMO1 モード」、「DEMO2 モード」は、電子オルゴルのデモプログラムが予め入力された状態になるモードです。

4. スピーカー

コンソールパネルを操作したとき、操作を確認するための音を出します。また、マイコンに入力したプログラムで音を出すこともできます。

5. 電源コネクタ

マイコンに電力を供給するコネクタです。付属のア

ダプタに USB ケーブルを用いて接続します。USB ケーブルでパソコンと接続して通信させることも可能です。

6. マイクロ SD スロット

携帯電話などで使用するマイクロ SD カードを挿入します。この機能は、「TaC モード」で使用します。

7. JTAG コネクタ

マイコン本体の回路を変更するとき使用します。

8. 入出力ポートコネクタ

マイコンの外部に追加の回路を接続するために使用します。

9. Bluetooth モジュール

スマホ、タブレットや PC と Bluetooth を用いた通信ができます。

4.2 コンソールパネル

図 4.2 にコンソールパネルの様子を示します。この図を見ながら以下を読んで下さい。

4.2.1 コンソールパネルの構成

コンソールパネルは、以下のランプやスイッチにより構成されています。コンソールパネルが、マイコンボードの約半分の面積を使用していますが、これは、操作性を考慮した結果です。これ以上、小さくするとスイッチの間隔が狭くなり過ぎ、操作性が悪くなります。

アドレスランプ

最上段の 8 個の赤ランプはアドレスランプです。アドレスランプは、主記憶を操作するとき、操作対象となる主記憶の番地（アドレス）を表示します。ランプは点灯している状態が 2 進数の ‘1’、消灯している状態が 2 進数の ‘0’ を表現しています。

TeC の操作方法を詳しく説明したビデオが
*1 <https://youtu.be/dJyAiVjx9mA> に公開されています。



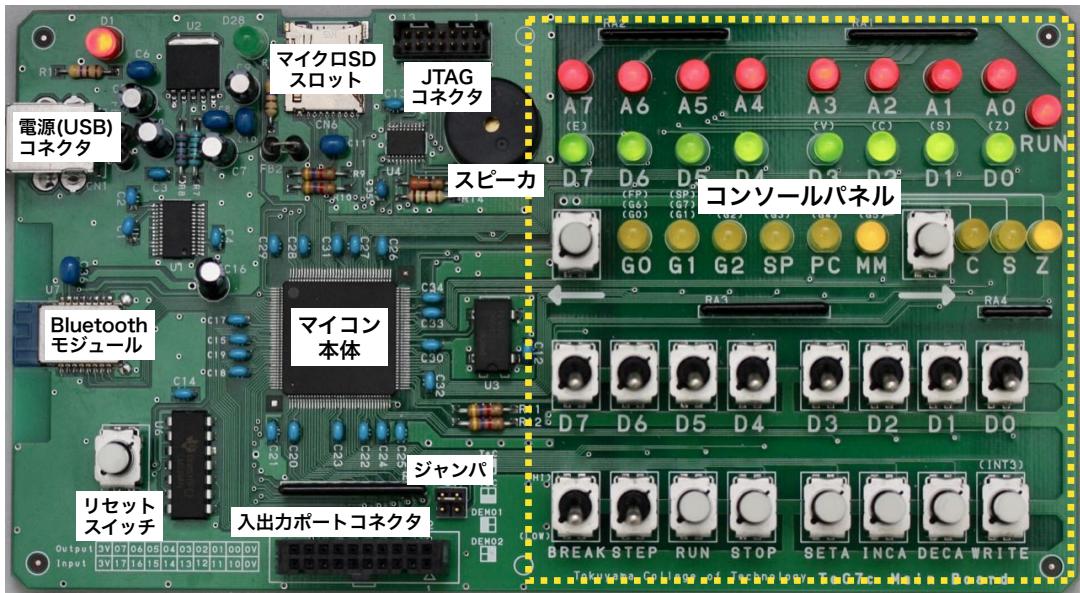


図 4.1 各部の名称

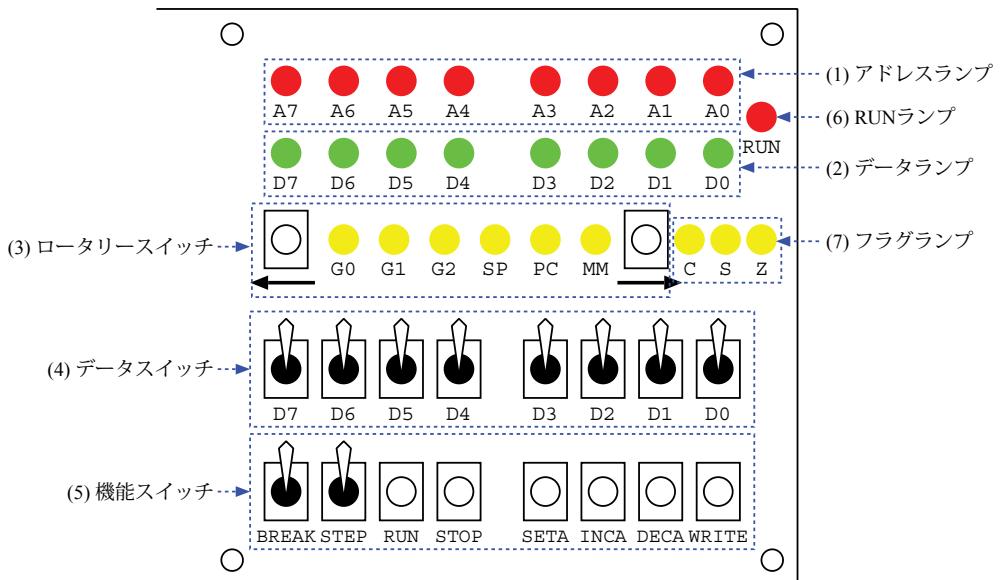


図 4.2 コンソールパネル

データランプ

上から 2 段目の 8 個の緑ランプは、ロータリースイッチで選択されたレジスタ等のデータを表示します。

ロータリースイッチ

上から 3 段目の 6 個の黄色ランプと左右の押しボタンスイッチは、ロータリースイッチの代用です。左右の押しボタンスイッチ (\leftarrow , \rightarrow) によって、データランプに何を表示するか切り替えます。

データスイッチ

8 個のトグルスイッチはデータやアドレスの値を入力するためのものです。トグルスイッチを上に倒して 2 進数の '1' を、下に倒して 2 進数の '0' を入力します。

機能スイッチ

一番下の列の 8 個のスイッチには、様々な機能が割り当てられています。左から順に、ブレークポイントモード (BREAK), ステップ実行モード (STEP), プログラ

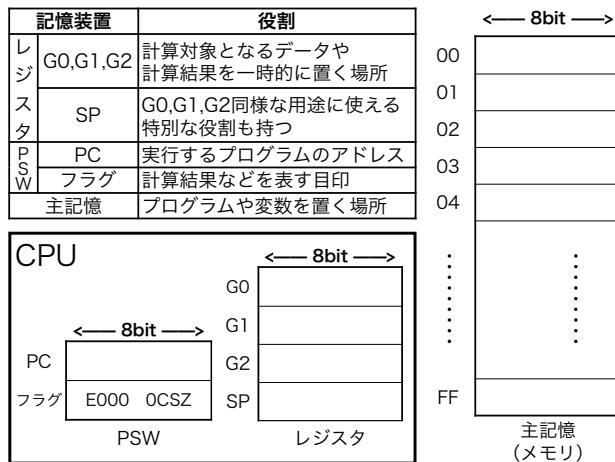


図 4.3 TeC の記憶装置

ム実行する (RUN), プログラム停止する (STOP), アドレスをセットする (SETA), アドレスを進める (INCA), アドレスを戻す (DECA), 書き込む (WRITE) の機能を持ちます。押しボタンスイッチは、長押しでリピート機能が働きます。

実行ランプ

右上の RUN ランプは、CPU がプログラムを実行中であることを表します。CPU が正しくない命令を実行した場合は点滅して異常を知らせます。

フラグランプ

実行ランプ下の三つの黄色ランプ C (Carry), S (Sign), Z (Zero) は、フラグの値を表示します。

4.2.2 コンソールパネルの操作方法

コンソールパネルからプログラムを実行させたり実行を途中で止めたりすることができます。また、図 4.3 に示す TeC 内部の情報にアクセスすることができます。

TeC の内部には、プログラムカウンタ (PC), フラグ (E000 OCSZ), レジスタ (G0, G1, G2, SP), 256 バイトの主記憶 (メモリ) が内蔵されています。以下では、コンソールパネルの操作方法を目的別に説明します。

フラグの表示

フラグの中で計算結果を表すビット (C, S, Z) はフラグランプに常時表示されています。以下で説明する方法で、E フラグを含む全てのフラグをデータランプに表示することができます。

PSW とレジスタの表示

PSW (PC, フラグ) とレジスタ (G0, G1, G2, SP) の値は緑色のデータランプに表示されます。8個のランプで8ビットの情報を表現します。データランプに表示するものはロータリースイッチで選択します。ロータリースイッチの黄色いランプで G0, G1, G2, SP, PC を選択することができます。PC の位置から更に [→] ボタンを2回押すと全てのランプが点灯します。このときデータランプにフラグが表示されます。

PSW とレジスタの書き換え

値を書き換える手順は、次の通りです。

1. ロータリースイッチで目的のものを選択する.
 2. 書き込むデータをデータスイッチにセットする.
 3. WRITE スイッチを押す.

主記憶（メモリ）のアドレス指定

図 4.3 を見ると分かるように、メモリには $00_{16} \sim FF_{16}$ (2進数で表現すると $0000\ 0000_2 \sim 1111\ 1111_2$) の番地（アドレス）が付けられています。メモリに対する表示や書き換え等の操作は 1 アドレス (8 ビット) 每に行います。メモリ・アドレスは、アドレスランプにセットすることで指定します。アドレスランプにアドレスをセットする方法は次の通りです。

1. ロータリースイッチを MM に合わせる.
 2. アドレスをデータスイッチにセットする.
 3. SETA (Set Address) スイッチを押す.
(アドレスがアドレスランプに表示される.)
 4. アドレスを次の番地に進めたいときは,
INCA (Increment Address) スイッチを押す.
 5. アドレスを前の番地に戻したいときは,
DECA (Decrement Address) スイッチを押す

主記憶（メモリ）の表示

アドレスランプにアドレスをセットするだけです

1. ロータリースイッチを MM に合わせる。
 2. 目的のアドレスをアドレスランプで指定する。
 3. データランプにメモリの内容が表示される。

主記憶（メモリ）の書き換え

アドレスを指定して書き換えます。

1. 上の手順で目的のメモリ番地の内容を表示する.
2. データスイッチに書き込みたい値をセットする.
3. WRITE スイッチを押す.
4. メモリにデータが書き込まれる.

なお、WRITE スイッチを押したとき、アドレスが自動的に次の番地に変化します。これは、連続したデータの書き込みに便利だからです。

プログラムの実行

プログラムはメモリにデータと同様に書き込みます。プログラムの開始番地を PC にセットすることで TeC がプログラムの場所を認識します。以下にプログラムを実行する手順を、例 4-1 に実行例を示します。

1. プログラムをメモリに書き込む.
2. プログラムの開始番地を PC に書き込む.
3. BREAK, STEP スイッチを下に倒す.
4. RUN スイッチを押す。(RUN ランプ点灯)
5. プログラムの実行終了。(RUN ランプ消灯)

プログラムのステップ実行

プログラム中の命令を 1 命令ずつ実行することをステップ実行と言います。作ったプログラムが予定通りに動かないとき原因を調べるために使用します。(このような作業をデバッグと言います。) 以下にステップ実行の手順を、例 4-2 にステップ実行の例を示します。

1. プログラムをメモリに書き込む.
2. プログラムの開始番地を PC に書き込む.
3. STEP スイッチが上に倒れていることを確認する。
(倒れていなかった場合は倒す。)
4. RUN スイッチを押す.
5. PC にセットしてあった番地の 1 命令が実行され、
プログラムが停止する.
6. レジスタやメモリの状態が予想通りか確認する.
7. 確認が終わったら RUN スイッチを押して、次の命令を実行させる.
8. プログラムの終わりまで以上の操作を繰り返す.

ブレークポイントを使用した実行

デバッグをするときに目的の命令まで一気に進んでから、ステップ実行をしたい場合があります。そのとき、一気に目的の命令まで進むためにブレークポイントを使用できます。ブレークポイントとは、プログラムの実行

例 4-1 最も簡単なプログラムの実行

何もしない命令 (NO 命令) を三つ実行した後、停止命令 (HALT 命令) を実行して停止するプログラムを打ち込んで実行します。

最も簡単なプログラムのリスト

番地	命令	命令の種類
00 ₁₆	00 ₁₆	NO
01 ₁₆	00 ₁₆	NO
02 ₁₆	00 ₁₆	NO
03 ₁₆	FF ₁₆	HALT

プログラムの打ち込み手順

1. ロータリースイッチを MM に合わせる.
2. アドレスランプに 00₁₆ をセットする.
3. データスイッチに 00₁₆ をセットする.
4. WRITE スイッチを 3 回押しメモリ 00₁₆ 番地～02₁₆ 番地に 00₁₆ を書き込む.
5. データスイッチに FF₁₆ をセットする.
6. WRITE スイッチを押しメモリ 03₁₆ 番地に FF₁₆ を書き込む.

プログラムの実行手順

1. ロータリースイッチを PC に合わせる.
2. データスイッチに 00₁₆ をセットする.
3. WRITE スイッチを押し PC を 00₁₆ にする.
4. BREAK, STEP スイッチを下に倒す.
5. RUN スイッチを押し実行を開始する.
6. 一瞬でプログラム実行が終了する.
7. PC は、HALT 命令実行後なので、その次の番地 04₁₆ を指している.
8. 何もしない命令と停止命令しか実行していないので、PC 以外のフラグ、レジスタ、メモリに変化はない。

を停止する場所（アドレス）のことです。以下にブレークポイントモードでの実行手順を、例 4-3 にブレークポイントモードでの実行例を示します。

1. プログラムをメモリに書き込む.
2. プログラムの開始番地を PC レジスタに書き込む.
3. BREAK スイッチが上に STEP スイッチが下に倒れていることを確認する。

例 4-2 プログラムのステップ実行

前の例と同じプログラムをステップ実行モードで実行してみます。

プログラムの実行手順

1. 前の例と同様にプログラムを打ち込む。
2. STEP スイッチを上に倒して（ステップ実行モードにして），前の例と同様にプログラムの実行を開始する。
3. ステップ実行モードなので 00_{16} 番地の命令だけを実行し停止する。このとき，PC は次命令の番地 01_{16} を指している。
4. 再度 RUN スイッチを押すと， 01_{16} 番地の命令を実行し PC が 02_{16} を指して停止する。
5. 以後，RUN スイッチを押す度に，1 命令実行しては停止する。

例 4-3 ブレークポイントモードでの実行

前の例と同じプログラムをブレークポイントモードで実行してみます。

プログラムの実行手順

1. 前の例と同様にプログラムを打ち込む。
2. 実行を停止したい命令のアドレス（今回は， 01_{16} ）をデータスイッチにセットする。
3. STEP スイッチを下に，BREAK スイッチを上に倒して（ブレークポイントモードにして），前の例と同様にプログラムの実行を開始する。
4. ブレークポイントモードなので 01_{16} 番地の命令を実行したら停止する。このとき，PC は次命令の番地 02_{16} を指している。
5. 再度 RUN スイッチを押すと 02_{16} 番地からプログラムの実行を再開する。
6. 03_{16} 番地には HALT 命令が格納されているので実行が停止する。

（倒れていなかった場合は倒す。）

4. プログラムの実行を停止させる命令のアドレスをデータスイッチにセットする。
5. RUN スイッチを押す。
6. データスイッチで指定したアドレスの命令を実行後，停止する。

4.3 リセットスイッチ

基板の左下にある RESET と書かれた押しボタンスイッチのことです。TeC をリセットしたいときに使用します。リセットスイッチを押すと，PC，フラグ，レジスタ，アドレスランプ，TeC に内蔵された入出力装置の状態が（‘0’に）クリアされます。メモリの内容と，ロータリースイッチの位置はクリアされません。

4.4 操作音を小さくする

押しボタンスイッチを押すと，ボタンが押されたことが確認できるように，「ピッ」と短い電子音が鳴るようになっています。しかし，静かな部屋で使用する場合，この音が邪魔になります。

このようなときは，STOP スイッチを押しながら RESET スイッチを押して下さい。電子音が，かすかに聞こえる「プッ」という音に変わります。

4.5 モード

これまで操作方法を説明してきたマイコンボード（TeC7 と呼びます。）は，TeC として使用できるだけではなく，2進数の入力練習用に楽譜を打込める電子オルゴールとして使用したり，もっと高度な学習をするためにパソコンのように使用したりすることができます。以下のようにジャンパの設定を変更してから電源を入れることでモードを切替えることができます。

TeC モード

ジャンパを TeC の位置（上側）に挿入してから電源を入れます。TeC7 を TeC として使用できる通常のモードです。

DEMO1 モード

ジャンパを DEMO1 の位置（左側）に挿入してから電源を入れます。このモードは TeC モードの変形バージョンです。予め電子オルゴールプログラムを TeC の主記憶の $80H$ 番地から書き込んだ状態になります。音楽データを $00H$ 番地から打ち込んで RESET，RUN の順にボタンを押すと演奏が始まります。2進数データを TeC に入力する練習用に使用します。

電子オルゴール音データ

ド 0100 0001 1110 1000	1000 0011 1110 1000	ソ 0110 0010 1001 1100	1100 0100 1001 1100
レ 0100 1001 1101 0001	1001 0011 1101 0001	ラ 0110 1110 1000 1011	1101 1100 1000 1011
ミ 0101 0010 1011 1010	1010 0101 1011 1010	シ 0111 1011 0111 1100	1111 0111 0111 1100
ファ 0101 0111 1010 1111	1010 1111 1010 1111	ド 0111 1111 0111 0101	1111 1111 0111 0101

図 4.4 電子オルゴールデータ

DEMO2 モード

ジャンパを DEMO2 の位置（右側）に挿入してから電源を入れます。このモードも TeC モードの変形バージョンです。予め電子オルゴールプログラムと音楽データを TeC の主記憶の 00H 番地から書き込んだ状態になります。RESET, RUN の順にボタンを押すと予め書き込まれた音楽データの演奏が始まります。

TaC モード

ジャンパを TaC の位置（下側）に挿入してから電源を入れます。このモードでは、TeC7 が 16 ビット版 TeC として動作します。16 ビット版 TeC のことを TaC と呼びます。TaC は TacOS (<https://github.com/tctsigemura/TacOS>) を実行できるパソコンのようなコンピュータです。

演習

電子オルゴールのデータを TeC に打ち込みなさい。手順は次の通りです。

アドレス	データ
0000 0000	1000 0011
0000 0001	1110 1000
0000 0010	1001 0011
0000 0011	1101 0001
0000 0100	1010 0101
0000 0101	1011 1010
0000 0110	0000 0000
...	...
1111 1111	0000 0000

ド
レ
ミ
終了

3. RESET, RUN の順にボタンを押し演奏を試す。
4. 演習が終わったらジャンパーを TeC の位置に戻す。

1. ジャンパを DEMO1 の位置に差し込んで電源を投入し TeC を DEMO1 モードにする。
2. 電子オルゴールデータは図 4.4 を参照し自分の好きな曲を入力する。例えば、4 分音符の「ド」、「レ」、「ミ」を連続して入力する場合は、次の表のように主記憶にデータを打込む。

第 5 章

機械語プログラミング

この章では、TeC のプログラミングを学習します。まず、TeC の内部構成を勉強し、ノイマン型コンピュータの例として、TeC が適切であることを確認します。次に、TeC の命令と、それを使用したプログラムの作成を勉強します。この章の内容をマスターすれば、ノイマン型コンピュータがどのようなもので、何ができるか何ができないのか分かってきます。

5.1 コンピュータの構成

プログラミングの対象となるコンピュータの構成を確認します。ここでは、一般のコンピュータの構成と、TeC の構成の両方を説明します。TeC の構成は一般的なコンピュータの構成を簡単化したもので、原理的には同じものだと分かります。

5.1.1 一般的なコンピュータの構成

一般的にパソコン等の構成は、図 5.1 のようになっています。各部分の役割は次の通りです。

1. CPU (Central Processing Unit: 中央処理装置)

命令を読み込んで、命令に従い計算をするコンピュータの心臓部です。計算機能、制御機能を持っていて、CPU が他の部分に積極的に働きかけることにより、コンピュータが働きます。

2. 主記憶装置 (メモリ)

プログラムやデータを記憶する記憶装置です。CPU が高速に読み書きすることができます。

3. 入出力インターフェース

入出力装置をコンピュータに接続するための回路です。入出力装置の種類毎に専用のインターフェース回路が必要になります。

4. 入出力装置

時計やコンピュータの外部とデータのやりとりをする装置のことです。タイマ、キーボード、マウス、

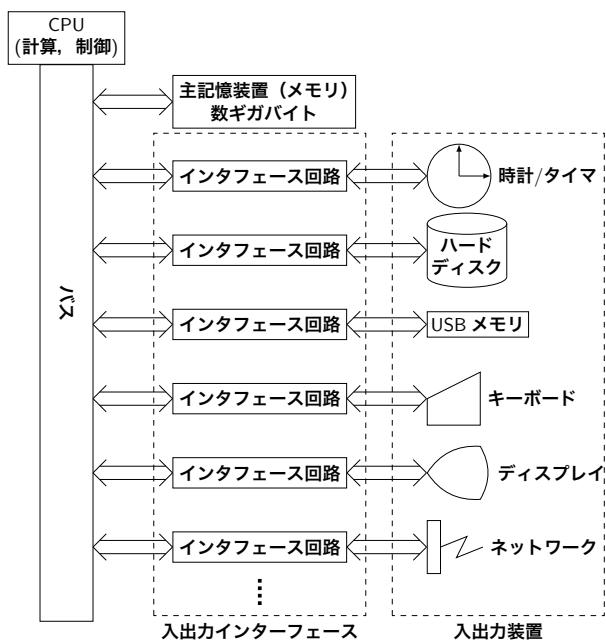


図 5.1 一般的なコンピュータの構成

ディスプレイ、プリンタや通信装置等がこれにあたります。ハードディスクドライブや USB メモリ等も入出力装置の仲間ですが、データを記憶する装置なので少し性格が異なります。そこで、これらは補助記憶装置と呼ばれることがあります。

5. バス

CPU と主記憶装置や入出力インターフェースを接続する配線のことです。アドレスやデータ、制御信号等がバスで伝達されます。CPU はバスを制御することにより、バスに接続された装置とデータのやりとりをします。

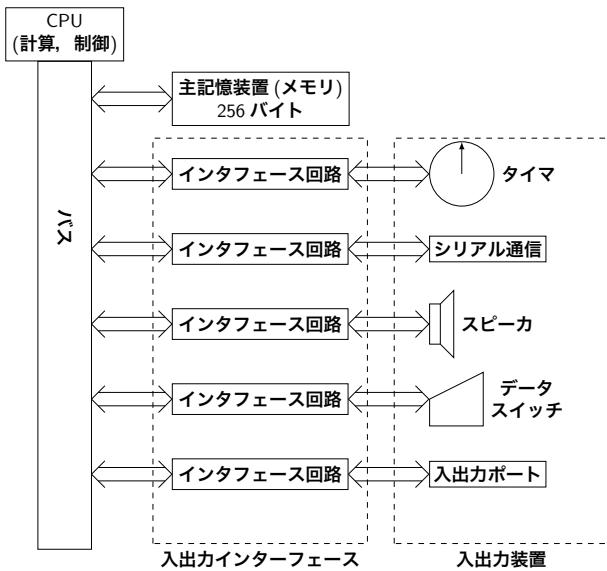


図 5.2 TeC の構成

5.1.2 TeC の構成

TeC の構成は図 5.2 のようになっています。接続されている入出力装置が少ない、主記憶装置（メモリ）の容量が小さい等の違いはありますが、基本的には一般的なコンピュータの構成と同じです。

1. CPU

命令を読み込んで命令に従い計算をする TeC の心臓部です。計算機能、制御機能を持っています。TeC の CPU は約 30 種類の命令を理解できます。

2. 主記憶装置（メモリ）

TeC のメモリは、8 ビット構成、256 アドレスのものです。一つのアドレスに 8 ビットの情報を記憶することができます。0～255 (00_{16} ～ FF_{16}) の範囲でアドレスを指定するために、アドレス情報も 8 ビットです。

3. 入出力インターフェース

インターフェース回路を通してバスと入出力装置が接続されます。

4. 入出力装置

入出力装置として、タイマ、シリアル通信回路、スピーカ、コンソールパネルのデータスイッチ、入出力ポートが搭載されています。

5. バス

CPU と主記憶装置や入出力インターフェースの間で

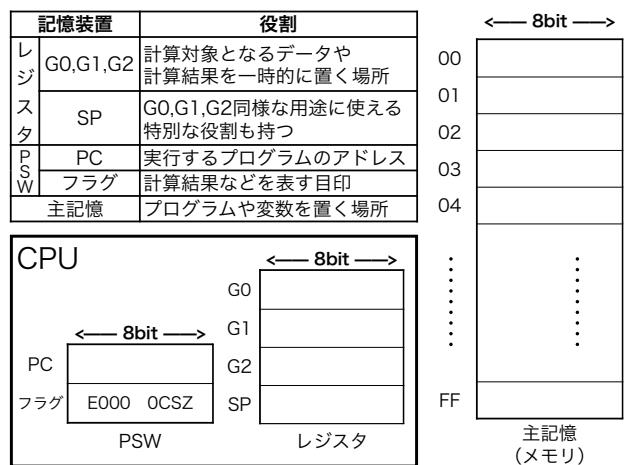


図 5.3 TeC の記憶装置

次の情報を伝達します。

- (a) 8 ビットのアドレス
- (b) 8 ビットのデータ
- (c) いくつかの制御情報

5.1.3 TeC 内部の記憶装置

コンピュータはプログラムを実行するために内部に 2 進数で情報を記憶します。TeC が内部に持っている記憶装置を図 5.3 にまとめます。プログラムは主記憶（メモリ）に記憶されます。CPU は主記憶（メモリ）からプログラム中の命令を読み込んで、PSW やレジスタを使用しながら計算をします。

1. PSW(Program Status Word)

図 5.2 の「CPU」内部にあります。PSW は次に実行すべき命令のアドレス (PC) と CPU の状態 (フラグ) を記憶しています。フラグは、常にゼロで変化しないビットと、E, C, S, Z のビットからなります。C, S, Z の 3 ビットは、直前の計算結果の特徴（ゼロだった等）を表します。E は 6.8 で学ぶ「割込み」を許可するかどうかを制御します。

2. レジスタ

図 5.2 の「CPU」内部にあります。各レジスタの役割は図中の表に示した通りです。

3. 主記憶（メモリ）

図 5.2 の「主記憶装置（メモリ）」のことです。256 アドレス（256 バイト）の容量があります。ここにプログラムやデータを記憶します。

5.2 機械語プログラミング

機械語命令の羅列が機械語プログラムです。機械語プログラムを作る作業が機械語プログラミングです。

5.2.1 機械語命令

コンピュータのCPUは、メモリから命令を取り出し、取り出した命令を解釈し、決められた計算等を行います。CPUが解釈できる状態の命令を、「CPU = 機械」が解釈できる命令なので「機械語命令」と呼びます。機械語命令は2進数でメモリに書き込みます。

2進数を用いた機械語の表現方法だけでは人間にとつて分かり難いので、命令を意味する英語を簡略化した短い綴で表します。これを「ニーモニック」と呼びます。

機械語命令	ニーモニック	意味
0000 0000 ₂	NO	No Operation
1111 1111 ₂	HALT	Halt

5.2.2 ノイマン型コンピュータの特徴

TeCもノイマン型コンピュータの一種です。ノイマン型コンピュータの特徴として次の3点があげられます。これは、TeCにも当てはまります。

1. プログラム内蔵（ストアードプログラム）方式
データだけでなく、プログラムもメモリに記憶する方式です。TeCでもプログラムはメモリに書き込んで実行します。
2. 逐次実行
プログラムの命令をメモリのアドレス順に一つ一つ順番に実行することを言います。
3. 2進法
プログラムやデータの表現に2進数を使います。

5.2.3 機械語プログラミング

ノイマン型コンピュータ上での機械語プログラミングとは、逐次実行により実行される順に機械語命令の羅列を作る作業のことです。作ったプログラムは、2進数にしてメモリに書き込んで実行します。

TeCにどのような機械語命令があるかを、次の節から種類別に説明します。

命令表

TeCでどんな機械語命令が使用できるかは、本体のケースに張り付けた命令表（または、「図 B.1 TeC7 命令表」）により確認することができます。これまでに出てきたNO, HALT命令について、命令表を確認して下さい。ニーモニックと命令の名前、命令のフォーマットが分かりますね。

その他にも、まだ習っていない情報がたくさん掲載されています。一通り勉強が終わったら、この命令表だけでTeCを自由にプログラムできるようになります。

5.3 特殊な命令

TeCの機械語命令の中で特別なものから説明します。

5.3.1 NO (No Operation) 命令

意味： 何もしない命令です。

ニーモニック： NO

命令フォーマット： NO命令は1バイト長の命令です。

命令フォーマットは、次の図の通りです。

第1バイト	
OP	GR XR
0000 ₂	00 ₂ 00 ₂

命令フォーマットの図は、その機械語命令が2進数でどのように表現されるかを表しています。NO命令の場合、機械語が1バイトであること、その1バイトの内容が、OPフィールド4ビットが0000₂、GRフィールド2ビットが00₂、XRフィールド2ビットが00₂であることが、図から分かります。NO命令以外の命令も、各フィールドのビット数は同じです。

5.3.2 HALT (Halt) 命令

意味： プログラムの実行を停止します。

ニーモニック： HALT

命令フォーマット： 1バイト長の命令です。

第1バイト	
OP	GR XR
1111 ₂	11 ₂ 11 ₂

表5.1 GRフィールドの値と意味

GR	意味
00 ₂	G0
01 ₂	G1
10 ₂	G2
11 ₂	SP

RUNランプが点滅したら

CPUが機械語命令として解釈できない命令を実行しようとしたことを表します。PCが解釈できなかった命令の次の番地を指した状態でCPUが停止します。PCの値からおかしな命令を見付けて訂正してください。

5.4 データ転送命令

TeCのCPUとメモリの間でデータを転送する機械語命令を説明します。

5.4.1 LD (Load) 命令

Loadは、「荷物等を積み込む」と言う意味の英語です。LDは、Loadの綴を縮めたものです。

意味： 主記憶（メモリ）からレジスタへデータを転送します。（メモリからレジスタへ値をコピーします。メモリの値は変化しません。）

フラグ： 変化しません。

ニーモニック： LD GR,EA

GRは、転送先レジスタを表します。EAはデータの置いてあるメモリのアドレス（番地）を表します。

命令フォーマット： LD命令は2バイトの長さを持ちます。命令の各ビットは次の通りです。

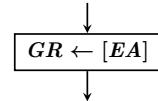
第1バイト		第2バイト
OP	GR XR	
0001 ₂	GR XR	aaaa aaaa

- OPフィールド（4ビット）はLD命令を示す0001₂にします。
- GRフィールド（2ビット）はデータを格納するレジスタを表します。GRフィールド意味を表5.1にまとめます。
- XRフィールド（2ビット）は、第2バイトと合わせてEA（メモリアドレス）を表しますが、将来、詳しく説明するまでは常に00₂にします。
- 第2バイト（aaaa aaaa）は、XRフィールドと合わせてEA（メモリアドレス）を表しますが、今のところ、直接にメモリアドレスを表していると考えて下さい。

フローチャート： フローチャートでは、LD命令を次のように描きます。[と]を書き忘れないように、注意して下さい。

RUNランプに注意

RUNランプはプログラム実行中に点灯しています。プログラムが暴走し終了しない時は、RUNランプが点灯したままになります。プログラム実行中でも、コンソールパネルを操作してメモリやレジスタの値を表示できるので、プログラムが暴走していることに気づかないことがあります。RUNランプを常に気にするようにして下さい。

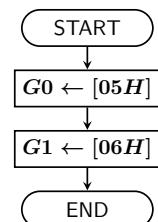


使用例： LD命令を使用したプログラムの例を示します。

番地	機械語	ラベル	ニーモニック
00 ₁₆	10 ₁₆ 05 ₁₆		LD G0,05H
02 ₁₆	14 ₁₆ 06 ₁₆		LD G1,06H
04 ₁₆	FF ₁₆		HALT

例の中で機械語は16進数で書いてありますが、2進数に変換すると0番地の命令は0001 0000₂, 0000 0101₂です。上の命令フォーマットと対応を確認してください。

このプログラムをフローチャートで表現すると、次のようにになります。



5.4.2 ST (Store) 命令

Store は、「倉庫に保管する」と言う意味の英語です。ST は、Store の綴を縮めたものです。

意味： レジスタからメモリへデータを転送します。（レジスタの値は変化しません。）

フラグ： 変化しません。

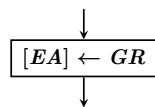
ニーモニック： ST GR,EA

GR は、転送元レジスタを表します。EA はデータを保管するメモリのアドレス（番地）を表します。

命令フォーマット： ST 命令は 2 バイトの長さを持ちます。命令のフォーマットは次の通りです。各フィールドの意味は、LD 命令と同様です。

第1バイト		第2バイト
OP	GR XR	
0010 ₂	GR XR	aaaa aaaa

フローチャート： フローチャートでは、ST 命令を次のように描きます。[と]を書き忘れないように、注意して下さい。



使用例： 5 番地のデータを 6 番地にコピーして停止するプログラムの例を示します。番地と機械語の欄はいつも 16 進数で書くので、この例から小さく 16 と書くのを止めます。

番地	機械語	ラベル	ニーモニック
00	10 05		LD G0,05H
02	20 06		ST G0,06H
04	FF		HALT

問題

- 11₁₆ 番地のデータを 12₁₆ 番地に、10₁₆ 番地のデータを 11₁₆ 番地にコピーして停止するプログラムを書きなさい。
- 10₁₆ 番地のデータと 11₁₆ 番地のデータを交換して停止するプログラム書きなさい。
- これらのプログラムを、実際に TeC で実行して正しく動くことを確認しなさい。

プログラムの作成手順

ST 命令の使用例のように、表を作成しながらプログラムを書きます。手順は次の通りです。

- 表の枠を書く。
- ニーモニックでプログラムを書く。プログラムに間違いが無いか、この段階で良く考える。
- 機械語命令の長さを考えながら番地欄を記入する。（これは、機械的な作業。ミスをしないよう慎重に。）
- 機械語欄を記入する。（これも、機械的な作業。ミスをしないように。）
- 全部記入したら、TeC に打ち込んで実行してみる。
- うまく動かなかったら、全てのステップを再度確認し間違いを探す。
- うまく動いたら完成！！！（うまく動いたかどうかの確認も慎重に！）

表に記入したら終わりではありません。TeC に打ち込んで実際に動くことを確認してください。動くはずなのに動かないことが多い（まず、動かないと考えた方が良い）です。

実際に動かし正しく動作することを確認できるまでは、プログラムは完成していません。

うまく動かない場合

プログラムが正しく動かない人は、1 命令ずつ実行しながら、メモリやレジスタの値が予想通りに変化するか調べて下さい。1 命令ずつ実行する方法は、「プログラムのステップ実行」(p.24) に説明しています。

面倒くさいと思わないで、地道に問題点を捜しましょう。問題点を見つけるコツが分かってきたら、演習がすごく楽になります。慣れるまで少し辛抱して下さい。

5.5 算術演算命令

名前の通り算術計算（普通の計算）をするための命令です。TeCは足算と引算だけができます。

5.5.1 ADD (Add) 命令

ADD命令は、名前の通り、加算（足算）をします。

意味： レジスタの値とメモリデータの和を計算し、結果を元のレジスタに格納します。（メモリの値は変化しません。）

フラグ： 計算の結果により変化します。

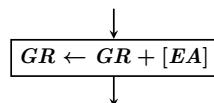
ニーモニック： ADD GR,EA

GRは、足し算の対象になるレジスタを表します。このレジスタの値とEAで表されるメモリの値が足し合わされ、結果がこのレジスタに格納されます。

命令フォーマット： ADD命令は2バイトの長さを持ちます。命令の各フィールドの意味は、LD命令と同様です。

第1バイト		第2バイト
OP	GR XR	
0011 ₂	GR XR	aaaa aaaa

フローチャート： フローチャートでは、ADD命令を次のように描きます。[と]を書き忘れないように、注意して下さい。



使用例： 7番地のデータと8番地のデータの和を計算し、9番地に格納するプログラムの例を示します。

番地	機械語	ラベル	ニーモニック
00	10 07		LD G0,07H
02	30 08		ADD G0,08H
04	20 09		ST G0,09H
06	FF		HALT

このプログラムを実行するときは、予め7番地、8番地に足し合わせるデータを格納しておく必要があります。例えば、7番地に1、8番地に2を格納した状態でこのプログラムを実行すると、計算結果の3が9番地に格納されます。

5.5.2 SUB (Subtract) 命令

Subtractは、「引き算をする」と言う意味の英語です。SUBはSubtractの綴を縮めたものです。

意味： レジスタの値とメモリデータの差を計算し、結果を元のレジスタに格納します。（メモリの値は変化しません。）

フラグ： 計算結果により変化します。

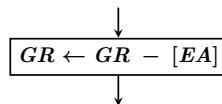
ニーモニック： SUB GR,EA

GRは、引き算の対象になるレジスタを表します。このレジスタの値からEAで表されるメモリの値が引かれ、結果がこのレジスタに格納されます。

命令フォーマット： SUB命令は2バイトの長さを持ちます。命令の各フィールドの意味は、LD命令と同様です。

第1バイト		第2バイト
OP	GR XR	
0100 ₂	GR XR	aaaa aaaa

フローチャート： SUB命令は次のように描きます。[と]を書き忘れないように、注意して下さい。



使用例： 7番地のデータから8番地のデータを引いた結果を9番地に格納するプログラムの例を示します。

番地	機械語	ラベル	ニーモニック
00	10 07		LD G0,07H
02	40 08		SUB G0,08H
04	20 09		ST G0,09H
06	FF		HALT

このプログラムを実行するときは、予め7番地に引かれる数、8番地に引く数を格納しておく必要があります。

問題

10₁₆番地のデータと11₁₆番地のデータの和を12₁₆番地に、差を13₁₆番地に格納するプログラムを作成し、TeCで実行して正しく実行できたことを確かめなさい。

5.6 ジャンプ命令

ノイマン型コンピュータの特徴は逐次実行です。命令を番地の順に一つ一つ実行します。プログラムの実行が進んで行く流れを「プログラムの流れ」と言います。プログラムの流れは PC (Program Counter) によって管理され、通常は PC が順次増加します。

しかし、プログラムの同じ部分を繰り返したり、条件によりプログラムの動きを変更する目的で、流れを別の場所に飛ばすこと (Jump) も必要です。

ジャンプ命令はこのような目的で PC の値を変更し、プログラムの流れを別の番地へ飛ばすものです。プログラムの流れは飛んで行った先にあるプログラムを順番に実行する流れになります。もとに戻って来ることはできません。

5.6.1 JMP (Jump) 命令

この命令を実行するとプログラムの流れが、必ず指定の番地にジャンプします。

意味： プログラムの流れをジャンプさせます。

フラグ： 変化しません。

ニーモニック： JMP EA

EA はジャンプ先のアドレス（番地）を表します。

命令フォーマット： JMP 命令は 2 バイトの長さを持ちます。OP フィールドは必ず 00_2 にします。XR フィールドと第 2 バイトでジャンプ先アドレス(EA) を表します。

今のところ、XR フィールドは 00_2 にします。この場合は、第 2 バイトの値がジャンプ先アドレスになります。

第1バイト		第2バイト	
OP	GR XR		
1010_2	00_2 XR	aaaa	aaaa

フローチャート： JMP 命令はフローチャートの線に対応します。次の命令で詳しく説明します。

使用例： 00_{16} 番地の命令をいつまでも繰り返す（止まらない）プログラムの例を示します。

番地	機械語	ラベル	ニーモニック
00	30 04		ADD G0,04H
02	A0 00		JMP 00H

ラベル

JMP 命令の使用例では、ジャンプする先のアドレスをニーモニックの中に数値で書きました。もしも、プログラムに変更があり、ジャンプする先のアドレスが変化したらどうでしょうか。プログラムにアドレスが数値で書いてあると、それを書き直す必要が生じます。

アドレスが変化してもニーモニックで書いたプログラムを変更しなくて良いように、数値の代わりにそのアドレスに付けた記号を使うと便利です。

アドレスに付けた記号のことをラベルと言います。ラベルを用いてプログラムを書き換えると次のようになります。

番地	機械語	ラベル	ニーモニック
00	30 04	LOOP	ADD G0,04H
02	A0 00		JMP LOOP

データの定義 (DC 命令)

ラベルを用いることにより、ニーモニックで書いたプログラムの取扱いが非常に便利になりました。しかし、データの部分はニーモニックに記述できません。これではニーモニックだけでプログラムの全体像が理解できません。

そこで、データを記述するための “DC (Define Constant)” 命令を追加します。DC 命令は、機械語の代わりにオペランドで指定した値のデータを生成します。また、DC 命令の行にラベルを付けることによりデータもラベルで参照できるようになります。

次は、JMP 命令の使用例を DC 命令を用いて書き直したもので、4 番地に値 “1” のデータがあることが、ニーモニックで記述できました。

番地	機械語	ラベル	ニーモニック
00	30 04	LOOP	ADD G0,ONE
02	A0 00		JMP LOOP
04	01	ONE	DC 1

領域の定義 (DS 命令)

DS 命令は DC 命令に良く似た命令です。DC 命令は機械語命令の代わりにデータを生成しました。DS 命令は結果を格納するための領域を生成します。指定された数値は領域の大きさになります。

フラグ

いくつかのプログラムを作成して動かして見ました。そのとき、TeC の C, S, Z ランプが点灯したり消灯したりしたのが分かったでしょうか？

これらのランプは、対応したフラグ (Flag: 旗) の値を表示しています。どんなときランプが点灯し (フラグが 1 になり), どんなときランプが消灯した (フラグが 0 になった) のか説明します。

C (Carry) フラグ Carry は「桁を繰り上げる」と言う意味です。C フラグは、計算中に 8bit の最上位桁からの「桁上がり」や、8bit の最上位桁での「桁借り」が発生したことを表します。つまり、計算結果が 255 を超えてしまったことや、0 より小さくなったことを表します。C フラグは、計算値が符号無しと考えたときのオーバーフローを表しています。

S (Sign) フラグ Sign は、「符号」を意味します。計算の結果を符号付き 2 進数として解釈した場合、負の値になることを表します。つまり、計算結果の 8bit の最上位ビットが 1 のとき 1 になります。

Z (Zero) フラグ Zero は、名前の通り計算の結果がゼロになったことを表します。つまり、計算結果の 8bit の全てのビットが 0 のとき 1 になります。

これら三つのフラグは、命令表 (図 B.1) で「フラグ変化」の欄に「○」印が付いている演算命令を実行する度に計算結果によって変化します。つまり、直前の演算の結果を反映しています。これまでに出てきた命令では、ADD, SUB がフラグを変化させる命令です。

5.6.2 JZ (Jump on Zero) 命令

Z フラグが 1 のとき (計算結果が 0 だったとき) だけジャンプします。

意味： Z フラグが 1 ならジャンプします。

フラグ： 変化しません。

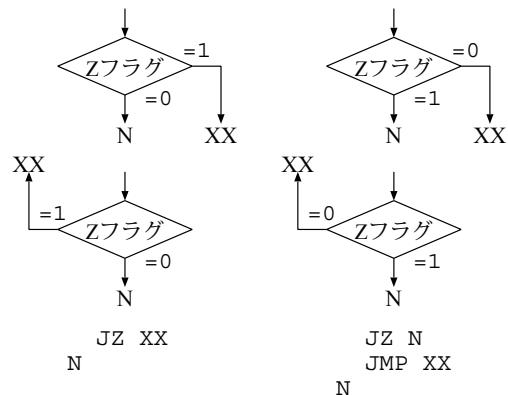
ニーモニック： JZ EA

JMP 命令と同様です。

命令フォーマット： JZ 命令は 2 バイトの長さを持ちます。GR フィールドは必ず 01_2 にします。GR フィールド以外の意味は JMP 命令と同じです。

第1バイト	第2バイト
OP	GR XR
1010_2	$01_2\ XR$
	<i>aaaa aaaa</i>

フローチャート： JZ 命令のフローチャートは、次のように様々な描き方が考えられます。例には、JMP 命令と組合せて菱形一つに対応させたものもありますが、こだわる必要はありません。場合によって、柔軟にアレンジして下さい。



使用例： 結果がゼロだったら停止するプログラムの例を示します。定数の “1” を使用するために DC 命令でメモリの 07_{16} 番地にデータ 01_{16} を置きました。定数を使用するためにはメモリ上に定数データを置く必要があります。

番地	機械語	ラベル	ニーモニック
00	30 07	LOOP	ADD GO,ONE
02	A4 06		JZ STOP
04	A0 00		JMP LOOP
06	FF	STOP	HALT
07	01	ONE	DC 1

C フラグの詳しい説明

C フラグは、計算中に、8bit の最上位桁からの「桁上がり (Carry)」が発生したことや、8bit の最上位桁での「桁借り (Borrow)」が発生したことを表します。例えば、次の計算では最上位桁からの「桁上がり」は発生しませんので、C フラグは “0” になります。

$$\begin{array}{r}
 & 0000 \ 0001_2 & (1) \\
 + & 0000 \ 0011_2 & (3) \\
 \hline
 [0] & 0000 \ 0100_2 & (4) \\
 C
 \end{array}$$

次の計算では最上位桁からの「桁上がり」が発生し、C フラグが“1”になります。C フラグは、計算値が符号無しと考えたときのオーバーフローを表しています。

		符号無	符号付
	1111 1111 ₂	(255)	(-1)
+	0000 0001 ₂	(1)	(+1)
1	0000 0000 ₂	(オーバ フロー)	(0)
C			

また、引き算でも C フラグが 1 になることがあります。例えば、次のように小さな数から大きな数を引いた場合です。機械的に引き算をすると、最上位桁で桁借りが発生します。この時も、C フラグが 1 になります。

		符号無	符号付
	0110 0100 ₂	(100)	(+100)
-	0110 1110 ₂	(110)	(+110)
[1]	1111 0110 ₂	(オーバ フロー)	(-10)
C			

引き算の場合、C フラグは、計算が符号無しと考えたときの、負へのオーバーフローを表しています。

5.6.3 JC (Jump on Carry) 命令

C フラグが 1 のときだけジャンプします。

意味： C フラグが 1 ならジャンプします。

フラグ： 変化しません。

ニーモニック： JC EA

JMP 命令と同様です。

命令フォーマット： JC 命令は 2 バイトの長さを持ちます。GR フィールドは必ず 10_2 にします。GR フィールド以外の意味は JMP 命令と同じです。

第1バイト		第2バイト
OP	GR XR	
1010 ₂	10 ₂ XR	aaaa aaaa

フローチャート： JC 命令のフローチャートは、JZ 命令と同様な考え方で描きます。JZ 命令を参考にして下さい。

5.6.4 JM (Jump on Minus) 命令

S フラグが 1 のとき（計算結果が負だったとき）だけジャンプします。名前が、JS 命令ではなく JM 命令になっているので注意して下さい。

意味： S フラグが 1 ならジャンプします。

フラグ： 変化しません。

ニーモニック： JM EA

JMP 命令と同様です。

命令フォーマット： JM 命令は 2 バイトの長さを持ちます。GR フィールドは必ず 11_2 にします。GR フィールド以外の意味は JMP 命令と同じです。

第1バイト		第2バイト
OP	GR XR	
1010 ₂	11 ₂ XR	aaaa aaaa

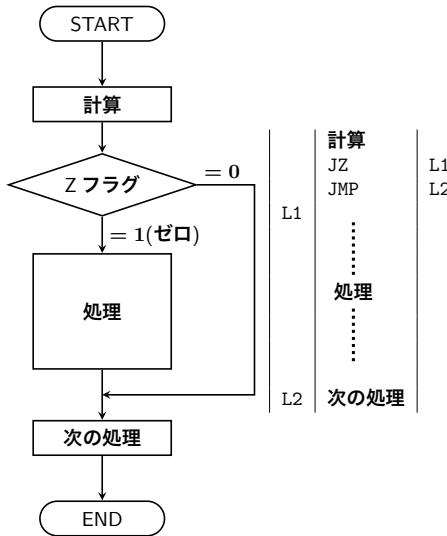
フローチャート： JM 命令のフローチャートも、JZ 命令と同様な考え方で描きます。JZ 命令を参考にして下さい。

5.6.5 ジャンプ命令の利用

以下にジャンプ命令を使用して、「条件判断を行う場合」と「繰り返し処理を行う場合」を説明します。更にその後の例題を理解してから「問題」に挑戦して下さい。

条件判断 1

ジャンプ命令を用いて、条件判断の機能があるプログラムを作ることができます。次のフローチャートとプログラムは、計算結果がゼロだった場合だけ処理をするものです。このように、ある条件の場合だけ処理をするプログラムを作ることができます。

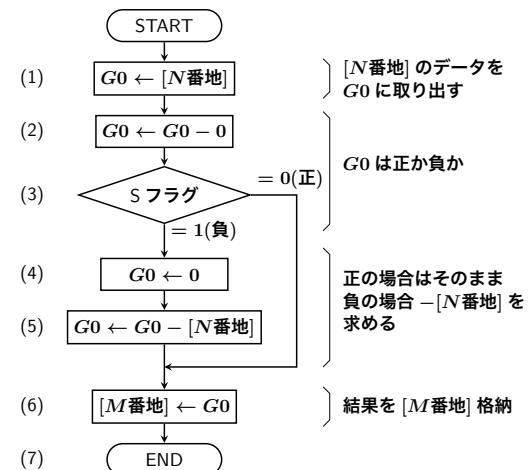


例題 5-1 絶対値を求める。

問題： N番地のデータの絶対値を計算し、M番地に格納するプログラムを作りなさい。

考え方： 値が正なのか負なのかは、値からゼロを（SUB命令で）引き、そのときのフラグの変化で調べます。負の値の絶対値は、ゼロからその値を引くことで求めることができます。

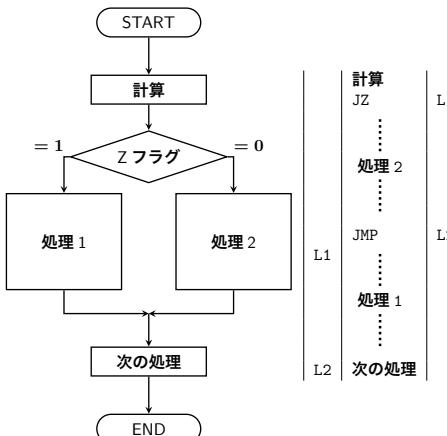
解答： 次のようなプログラムを作ります。



注意：[N番地]は、N番地に格納されているデータのこと

条件判断 2

条件によって、二つの処理のどちらかを選んで実行するプログラムを作ることができます。次のフローチャートとプログラムは、計算結果がゼロだった場合は「処理 1」を、ゼロ以外だった場合は「処理 2」を実行します。



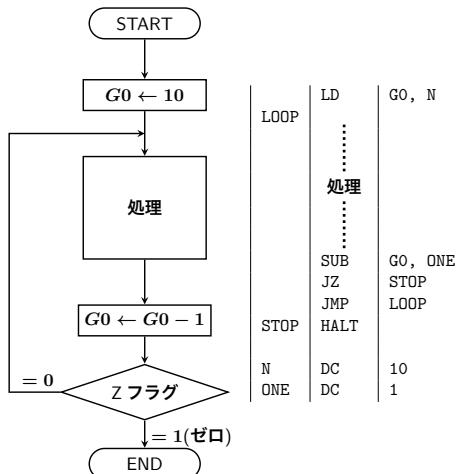
番地	機械語	ラベル	ニーモニック
00	10 10	START	LD G0,N
02	40 0F		SUB G0,ZERO
04	AC 08		JM L1
06	A0 0C		JMP L2
08	10 0F	L1	LD G0,ZERO
0A	40 10		SUB G0,N
0C	20 11	L2	ST G0,M
0E	FF		HALT
0F	00	ZERO	DC 0
10	FF	N	DC -1
11	00	M	DS 1

解説： プログラムの内容を説明します。

- (1) G0 レジスタに値をロードします。
- (2) G0 レジスタから 0 を引きます。計算結果によりフラグが変化します。
- (3) JM 命令は S フラグの値によりジャンプします。
- (4), (5) この部分は、値が負だった場合のみ実行されます。0 - [N番地]を計算し、値の絶対値を G0 に求めます。
- (6) G0 の値を M 番地に格納します。

繰り返し処理 1

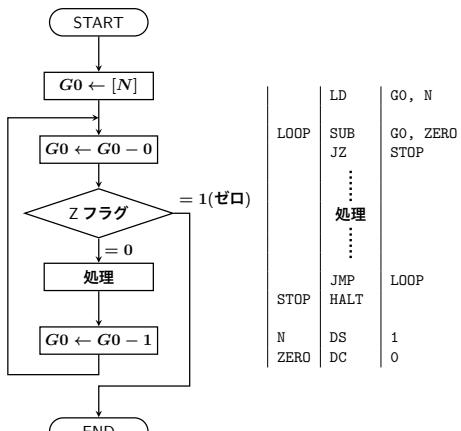
ジャンプ命令を用いて同じ操作を繰り返すプログラムを作ることができます。次のフローチャートとプログラムは、点線部分を 10 回繰り返すためのものです。



LOOP	LD SUB JZ JMP HALT	処理 ... GO, ONE STOP LOOP	GO, N 10 1
STOP	N ONE	DC DC	

繰り返し処理 2

計算結果によって繰り返し回数が決まる場合、繰り返し回数がゼロの場合も考慮しなければならないことがあります。そのような場合は、条件判断を前に移動すると、うまく処理できます。次のフローチャートとプログラムは、点線部分を N 回繰り返すためのものです。条件判断の前の引算は、G0 の値でフラグを強制的に変化させるためのものです。



LOOP	LD SUB JZ JMP HALT	GO, N GO, ZERO STOP ... LOOP	GO, N 10 1
STOP	N ZERO	DS DC	

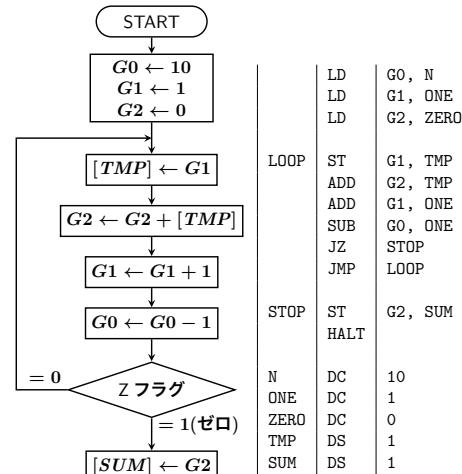
例題 5-2 $1 + 2 + 3 + \dots + 10$ を計算する。

問題： $1 + 2 + 3 + \dots + 10$ を計算し結果を SUM 番地に求めるプログラムを作りなさい。

考え方： TeC では G0, G1, G2, SP の 4 つのレジスタが自由に使用できます。それぞれのレジスタに足す値を記憶する、合計を記憶する等の役割りを分担させ、繰り返し（10 回繰り返す）をうまく利用すると計算できます。

TeC にはレジスタの値同士を足し算する命令がありません。一方のレジスタ値をメモリに格納してから、足し算する必要があります。

解答： G0 を繰り返し回数のカウント、G1 をレジスタに足す数の記憶（1, 2, 3, ..., 10）、G2 を合計の記憶に使用することにしました。SP は使用しませんでした。フローチャートとプログラムは次のようにになります。



問題

1. N 番地の値が 0 なら M 番地に 0 を、そうでなければ M 番地に 1 を格納するプログラムを作りなさい。
2. N 番地と M 番地の値の大きい方を L 番地に格納するプログラムを作りなさい。
3. N 番地と M 番地の値のかけ算を計算し、L 番地に結果を格納するプログラムを作りなさい。

ヒント：かけ算は足し算の繰り返しでできます。

5.6.6 JNZ (Jump on Not Zero) 命令

Z フラグが 0 のとき（計算結果がゼロ以外だったとき）だけジャンプします。

意味： Z フラグが 0 ならジャンプします。

フラグ： 変化しません。

ニーモニック： JNZ EA

命令フォーマット： JNZ 命令は 2 バイトの長さを持

ちます。GR フィールドは必ず 01_2 にします。OP フィールドの値は 1011_2 です。JMP 命令と違いますので注意して下さい。OP フィールド、GR フィールド以外の意味は JMP 命令と同じです。

第1バイト		第2バイト	
OP	GR XR		
1011_2	01_2 XR	aaaa	aaaa

フローチャート： JNZ 命令のフローチャートも、JZ 命令と同様な考え方で描きます。JZ 命令を参考にして下さい。

使用例： JZ 命令の使用例で紹介した「結果がゼロだったら停止するプログラムの例」を JNZ 命令を使用して書き直しました。JNZ 命令を使用したほうが随分シンプルになります。

番地	機械語	ラベル	ニーモニック
00	30 05	LOOP	ADD GO,ONE
02	B4 00		JNZ LOOP
04	FF		HALT
05	01	ONE	DC 1

5.6.7 JNC (Jump on Not Carry) 命令

C フラグが 0 のときだけジャンプします。

意味： C フラグが 0 ならジャンプします。

フラグ： 変化しません。

ニーモニック： JNC EA

命令フォーマット： JNC 命令は 2 バイトの長さを持

ちます。GR フィールドは必ず 10_2 にします。GR フィールド以外の意味は JNZ 命令と同じです。

第1バイト		第2バイト	
OP	GR XR		
1011_2	10_2 XR	aaaa	aaaa

フローチャート： JNC 命令のフローチャートも、JZ 命令と同様な考え方で描きます。JZ 命令を参考にして下さい。

5.6.8 JNM (Jump on Not Minus) 命令

S フラグが 0 のとき（計算結果がゼロか正だったとき）だけジャンプします。名前が、JNS 命令ではなく JNM 命令になっているので注意して下さい。

意味： S フラグが 0 ならジャンプします。

フラグ： 変化しません。

ニーモニック： JNM EA

命令フォーマット： JNM 命令は 2 バイトの長さを持ちます。GR フィールドは必ず 11_2 にします。GR フィールド以外の意味は JNZ 命令と同じです。

第1バイト		第2バイト	
OP	GR XR		
1011_2	11_2 XR	aaaa	aaaa

フローチャート： JNM 命令のフローチャートも、JZ 命令と同様な考え方で描きます。JZ 命令を参考にして下さい。

問題

- 「例題 5-1 絶対値を求める」プログラムを JNM 命令を用いて書き直しなさい。
- 「例題 5-2 $1+2+3+\dots+10$ を計算する」プログラムを JNZ 命令を用いて書き直しなさい。
- N 番地と M 番地の値のかけ算を計算し、L 番地に結果を格納するプログラムを JNZ 命令を用いて作り直しなさい。
- N 番地と M 番地の値の和を計算し L 番地に結果を格納するプログラムを作りなさい。但し、オーバーフローが発生した場合は 8bit で表現できる最大の値 255 を L 番地に格納することとします。（数値は符号なし数とします。）
参考：このような計算を飽和演算（ほうわえんざん）と言います。
- 前の問題では JC 命令か JNC 命令を使用したはずです。JC 命令を使用していた場合は JNC 命令、JNC 命令を使用していた場合は JC 命令を用いて作り直しなさい。

5.7 比較命令

5.7.1 CMP (Compare) 命令

Compare は、「比較をする」と言う意味の英語です。CMP は Compare の綴を縮めたものです。比較は引き算により行います。レジスタの値からメモリの値を引いて、その結果によりフラグを変化させます。引き算結果そのものは、どこにも格納しないで捨てます。

意味： レジスタの値とメモリデータを比較します。引き算の結果により、フラグだけが変化します。

フラグ： 計算結果により変化します。

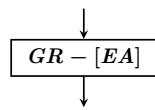
ニーモニック： CMP GR,EA

GR で指定されたレジスタの値と、EA で表されるメモリの値が比較されます。

命令フォーマット： CMP 命令は 2 バイトの長さを持ちます。各フィールドの意味は、LD 命令と同様です。

第1バイト	OP	GR XR	第2バイト
0101 ₂	GR	XR	aaaa aaaa

フローチャート： CMP 命令は次のように描きます。



使用例： 符号なしデータ A, B の大きい方を C に格納するプログラムの例です。

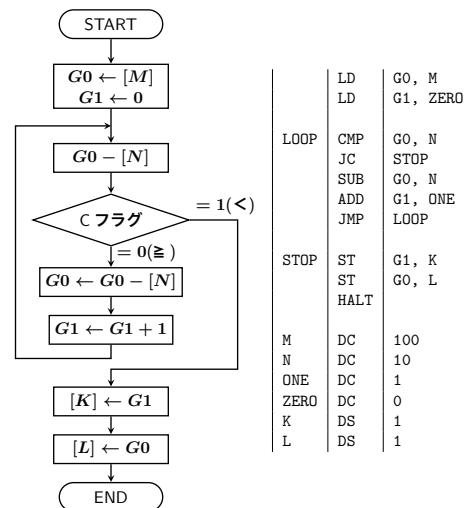
番地	機械語	ラベル	ニーモニック	
00	10 0B	START	LD	G0,A
02	50 0C		CMP	G0,B
04	B8 08		JNC	L1
06	10 0C		LD	G0,B
08	20 0D	L1	ST	G0,C
0A	FF		HALT	
0B	64	A	DC	100
0C	C8	B	DC	200
0D	00	C	DS	1

例題 5-3 割算を計算する.

問題： M 番地の値を N 番地の値で割り， 商を K
番地， 余りを L 番地に求めるプログラムを作り
なさい。ただし，データは符号なしとします。

考え方： TeC には割算命令がありません。割算は引き算の繰り返しで計算できます。割られる数から、割る数を引くことを繰り返します。引くことができなくなったら終了します。このとき、引いた回数が商、引いた結果が余りになります。

解答： フローチャートとプログラムは次のようになります



解説： CMP 命令と JC 命令で G0 が N 番地のデータより大きいか確認してから、引き算を実行します。

問題

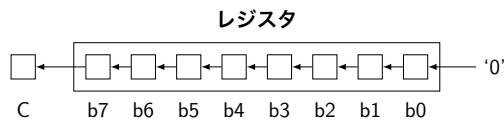
- 「例題 5-1 絶対値を求める」プログラムを CMP 命令を用いて書き直しなさい。
 - 「例題 5-2 $1+2+3+\dots+10$ を計算する」プログラムを G0 レジスタを使用しないプログラムに書き換えなさい。(CMP 命令を用いると簡単にできる。)

5.8 シフト（桁ずらし）命令

データの2進数を左右に桁移動する命令をシフト命令と言います。TeCは以下に説明する4種類のシフト命令を持っています。

5.8.1 SHLA (Shift Left Arithmetic) 命令

左算術（算術=Arithmetic）シフトと言います。レジスタのデータを左方向に1ビットずらします。右側から常に“0”が入力されます。左にはみ出したビットは、Cフラグの値になります。



意味： レジスタの値を左に1ビットシフトします。

フラグ： Cフラグは上の説明のように、S, Zフラグはシフト結果の値により変化します。

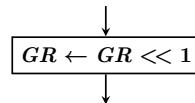
ニーモニック： SHLA GR

GRが、シフトされるレジスタを表します。GRの値とレジスタの対応は、LD命令等と同じです。

命令フォーマット： SHLA命令は1バイトの命令です。XRフィールドは必ず00₂にします。

第1バイト	
OP	GR XR
1001 ₂	GR 00 ₂

フローチャート： SHLA命令は次のように描くことをします。なお、この書き方は、Java言語やC言語のシフト演算子を真似たものです。



使用例： SHLA命令は次のSHLL命令と全く同じ動作をしますので、SHLA命令とSHLL命令で兼用の使用例をSHLL命令の後に示します。

5.8.2 SHLL (Shift Left Logical) 命令

左論理（論理=Logical）シフトと言います。この命令はSHLAと全く同じ動作をします。（左シフトでは、算術と論理の差はない）

意味： レジスタの値を左に1ビットシフトします。

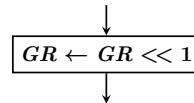
フラグ： SHLA命令と同様です。

ニーモニック： SHLL GR

命令フォーマット： SHLL命令は1バイトの命令です。XRフィールドは必ず01₂にします。

第1バイト	
OP	GR XR
1001 ₂	GR 01 ₂

フローチャート： SHLL命令は次のように描くことをします。SHLA命令と全く同じ動作をするので、フローチャートの書き方も、SHLA命令と全く同じです。

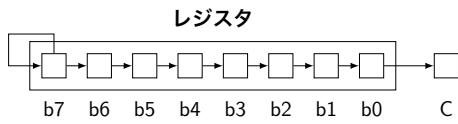


使用例： A番地のデータを2ビット左にシフトしB番地に格納する例です。左に2ビットシフトすることは×4を計算することと同じです。例ではSHLA命令を用いていますが、SHLL命令を用いても全く同じ結果になります。

番地	機械語	ラベル	ニーモニック
00	10 07		LD G0,A
02	90		SHLA G0
03	90		SHLA G0
04	20 08		ST G0,B
06	FF		HALT
07	01	A	DC 1
08	00	B	DS 1

5.8.3 SHRA (Shift Right Arithmetic) 命令

右算術（算術= Arithmetic）シフトと言います。レジスタのデータを右方向に 1 ビットずらします。左側からシフト前のデータの最上位ビット（符号ビット）と同じ値が入力されます。右にはみ出したビットは、C フラグの値になります。



意味： レジスタの値を右に 1 ビット算術シフトします。

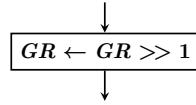
フラグ： SHLA 命令と同様です。

ニーモニック： SHRA GR

命令フォーマット： SHRA 命令は 1 バイトの命令です。XR フィールドは必ず 10_2 にします。

第1バイト	
OP	GR XR
1001_2	$GR\ 10_2$

フローチャート： SHRA 命令は次のように描くことにします。

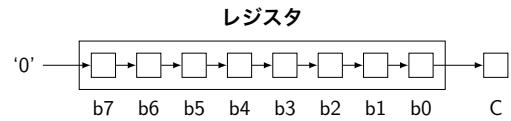


使用例： A, B 番地のデータを 1 ビット右にシフトし、C, D 番地に格納します。右 1 ビットシフトと、 $\div 2$ の結果は同じです。算術シフトの場合は、負の数でも正しく $1/2$ の値になります。

番地	機械語	ラベル	ニーモニック
00	10 0B		LD GO,A
02	92		SHRA GO
03	20 0D		ST GO,C
05	14 0C		LD G1,B
07	96		SHRA G1
08	24 0E		ST G1,D
0A	FF		HALT
0B	08	A	DC 8
0C	F8	B	DC -8
0D	00	C	DS 1
0E	00	D	DS 1

5.8.4 SHRL (Shift Right Logical) 命令

右論理（論理= Logical）シフトと言います。レジスタのデータを右方向に 1 ビットずらします。左側から “0” が入力されます。右にはみ出したビットは、C フラグの値になります。



意味： レジスタの値を右に 1 ビット論理シフトします。

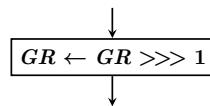
フラグ： SHLA 命令と同様です。

ニーモニック： SHRL GR

命令フォーマット： SHRL 命令は 1 バイトの命令です。XR フィールドは必ず 11_2 にします。

第1バイト	
OP	GR XR
1001_2	$GR\ 11_2$

フローチャート： SHRL 命令は次のように描くことにします。



使用例： A, B 番地のデータを 1 ビット右にシフトし、C, D 番地に格納します。右 1 ビットシフトと、 $\div 2$ は同じ結果になります。論理シフトの場合は、128 以上の大きな数でも正しく $1/2$ の値になります。

番地	機械語	ラベル	ニーモニック
00	10 0B		LD GO,A
02	93		SHRL GO
03	20 0D		ST GO,C
05	14 0C		LD G1,B
07	97		SHRL G1
08	24 0E		ST G1,D
0A	FF		HALT
0B	7F	A	DC 127
0C	80	B	DC 128
0D	00	C	DS 1
0E	00	D	DS 1

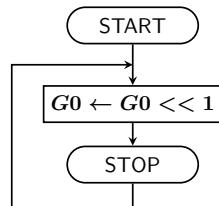
例題 5-4 シフトの動作確認

問題： 4種類のシフト命令について、G0 レジスタの値をシフトしながら動作を確認しなさい。

プログラム： 次のプログラムを作成します。

番地	機械語	ラベル	ニーモニック
00	90	L0	SHLA G0
01	FF		HALT
02	A0 00		JMP L0

フローチャート： フローチャートで描く場合は、次のように HALT を表現することにします。



実行方法： 次の手順で実行します。

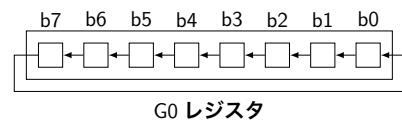
1. PC を 00_{16} にする。
2. G0 レジスタに適当なデータを書き込む。
3. ロータリースイッチを G0 に合わせたまま、RUN ボタンを押す。
4. G0 の値がシフトされたことが、データランプで確認できる。
5. 再度、RUN ボタンを押す。
6. G0 の値が更にシフトされる。

一度 RUN ボタンを押すと HALT 命令で停止します。そのとき PC は JMP 命令を指しているので、再度 RUN ボタンを押すと JMP 命令からプログラムの実行が再開されます。

SHLA 命令の動作が良く分かったら別のシフト命令でも試してみましょう。

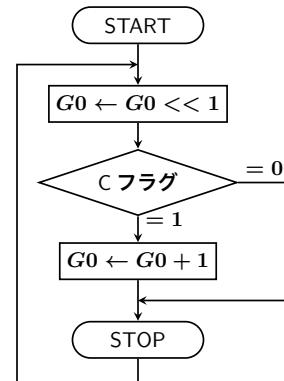
例題 5-5 ビットの回転

問題： 次の図のように、G0 レジスタの値を 1 ビット左回転するプログラムを作りなさい。



考え方： TeC には、ビットを回転する命令がありません。次の手順で目的を達成します。

1. G0 を 1 ビット左シフトする。
2. はみ出したビットが C フラグに保存されているので、C フラグを調べる。
3. C フラグが 1 だった場合は、G0 の最下位ビットを 1 にする。



プログラム： プログラムにすると次のようになります。例題 5-4 と同様に最後に JMP 命令を追加しました。

番地	機械語	ラベル	ニーモニック
00	91	L1	SHLL G0
01	B8 05		JNC L2
03	30 08		ADD G0, ONE
05	FF	L2	HALT
06	A0 00		JMP L1
08	01	ONE	DC 1

実行方法： 例題 5-4 と同様です。実行する度に、データランプの表示が左回転します。

例題 5-6 シフトを用いた高速乗算

問題： シフトを用いて、A の 10 倍の値を B に求めるプログラムを作りなさい。

考え方： TeC には、かけ算命令がありません。そのため、繰り返しでかけ算をする方法を、以前、紹介しました。ここでは、繰り返しによる方法より高速なかけ算を紹介します。

$\times 10$ は、次の式のように変形できます。

$$B = A \times 10 = A \times 8 + A \times 2$$

$\times 2$ は、1 ビット左にシフトすることと同じです。 $\times 8$ は、3 ビット左にシフトすることと同じです。シフトした結果同士を足し合わせることにより、10 倍を計算することができます。

プログラム： プログラムにすると次のようになります。TMP は、一時的に A の 2 倍の値を記憶するために使用します。

番地	機械語	ラベル	ニーモニック
00	10 0C		LD G0, A
02	90		SHLA G0
03	20 0E		ST G0, TMP
05	90		SHLA G0
06	90		SHLA G0
07	30 0E		ADD G0, TMP
09	20 0D		ST G0, B
0B	FF		HALT
0C	03	A	DC 3
0D	00	B	DS 1
0E	00	TMP	DS 1

問題

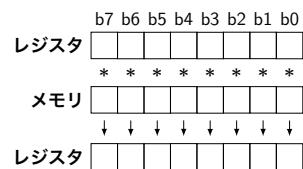
1. A の値の 7 倍を B に求めるプログラムを作りなさい。
2. A の値が符号無し 2 進数の場合、A の値の $1/4$ 倍を B に求めるプログラムを作りなさい。
3. A の値が符号無し 2 進数の場合、A の値の 1.5 倍を B に求めるプログラムを作りなさい。

5.9 論理演算命令

2.8.1 論理演算と論理回路で学んだ論理演算を行う機械語命令です。

5.9.1 AND (Logical AND) 命令

AND 命令は、レジスタとメモリデータのビット毎の論理積 (AND) を計算します。ビット毎の論理積とは、次の図のように、レジスタとメモリの対応するビット同士の論理積の計算のことです。計算結果はレジスタに格納されます。



意味： ビット毎の論理積を計算します。結果は元のレジスタに格納します。(メモリの値は変化しません。)

フラグ： C フラグは常に 0 になります。S, Z フラグは計算の結果により変化します。

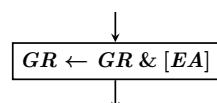
ニーモニック： AND GR,EA

GR は、計算の対象になるレジスタを表します。このレジスタの値と EA で表されるメモリの値のビット毎の論理積が計算されます。結果はこのレジスタに格納されます。

命令フォーマット： AND 命令は 2 バイトの長さを持ちます。各フィールドの意味は、LD 命令と同様です。

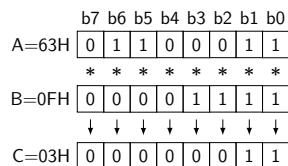
第1バイト		第2バイト
OP	GR XR	
0110 ₂	GR XR	aaaa aaaa

フローチャート： AND 命令は次のように描くことにします。これも、Java 言語や C 言語の演算子を真似したものです。



使用例： A 番地のデータと B 番地のデータのビット毎の論理積を計算し、C 番地に格納するプログラムの例を示します。

番地	機械語	ラベル	ニーモニック
00	10 07		LD G0,A
02	60 08		AND G0,B
04	20 09		ST G0,C
06	FF		HALT
07	63	A	DC 63H
08	0F	B	DC 0FH
09	00	C	DS 1



AND 命令の応用

AND 命令は、データの特定のビットを 0 にクリアしたり、データの特定のビットの 1/0 を確かめたり、データの一部のビットだけを取り出したりするために使用できます。

- 特定の 1 ビットがゼロかそうでないか判定できます。次は G0 の最下位ビット (LSB) がゼロならジャンプする例です。01₁₆ との AND の結果が 00₁₆ になることから、LSB が 0 だったことが分かります。

ラベル	ニーモニック
	...
	AND G0,ONE
	JZ L1
L1	...
	...
	...
ONE	DC 01H

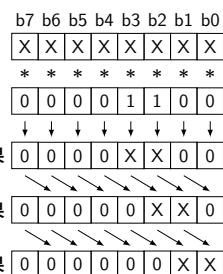
- バイト中の連続した数ビットを取り出すことができます。次は G0 の, b₃, b₂ の 2 ビットだけを右詰めにして取り出す例です。下の図のように、まず AND 命令で目的の 2 ビット以外を 0 にします。次に右に 2 回シフトして右詰めにします。

ラベル	ニーモニック
	...
	AND G0,MSK
	SHRL G0
	SHRL G0
MSK	...
MSK	DC 0CH

16進数の表記

ニーモニック中で数値を 16 進数で書き表したいことがあります。そのときは、前のプログラム中の DC 命令のように、数値の後ろに “H” を付けます。

16 進数が “A”～“F” で始まるとき数値なのかラベルなのか分かりません。このような場合は数値であることが分かるように先頭に “0” を付加します。例えば F8H は 0F8H と書きます。



- 2ⁿ の倍数になるように切り捨てるできます。次は G0 の値を 2³ = 8 の倍数になるように切り捨てる例です。下 3 ビットをゼロにすると 8 の倍数になります。

ラベル	ニーモニック
	...
	AND G0,MSK
MSK	...
MSK	DC 0F8H

- 2ⁿ で割った余りを求めるできます。次は G0 の値を 2³ = 8 で割った余りを求める例です。下 3 ビットだけを取り出すと 8 で割った余りになります。

ラベル	ニーモニック
	...
	AND G0,MSK
MSK	...
MSK	DC 07H

このように、2 の累乗 (2,4,8,16,...) で割った商や余りは、シフトや論理演算で簡単に計算できます。また、2 の累乗の倍数に切捨てたり、切り上げたりする計算も、論理演算を使うと簡単にできます。

5.9.2 OR (Logical OR) 命令

OR 命令は、レジスタとメモリデータの対応するビット同士の論理和 (OR) を計算します。計算結果はレジスタに格納されます。

意味： ビット毎の論理和を計算します。結果は元のレジスタに格納します。（メモリの値は変化しません。）

フラグ： C フラグは常に 0 になります。S, Z フラグは計算の結果により変化します。

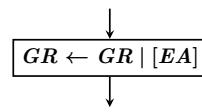
ニーモニック： OR GR,EA

GR は、計算の対象になるレジスタを表します。このレジスタの値と EA で表されるメモリの値のビット毎の論理和が計算されます。結果はこのレジスタに格納されます。

命令フォーマット： OR 命令は 2 バイトの長さを持ちます。各フィールドの意味は、LD 命令と同様です。

第1バイト		第2バイト
OP	GR XR	
0111 ₂	GR XR	aaaa aaaa

フローチャート： OR 命令は次のように描くことにします。これも、Java 言語や C 言語の演算子を真似したものです。



OR 命令の応用

OR 命令は、データの特定のビットを 1 にするために使用できます。次の例は、G0 の上位 4 ビットを全て 1 にします。

ラベル	ニーモニック
	...
	LD G0,DATA
	OR G0,MSK
	...
DATA	DC OAAH
MSK	DC OFOH

b7 b6 b5 b4 b3 b2 b1 b0							
1 0 1 0 1 0 1 0							
+	+	+	+	+	+	+	+
1 1 1 1 0 0 0 0							
↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓							
OR の結果 1 1 1 1 1 0 1 0							

5.9.3 XOR (Logical XOR) 命令

XOR 命令は、レジスタとメモリデータの対応するビット同士の排他的論理和 (XOR) を計算します。計算結果はレジスタに格納されます。

意味： ビット毎の排他的論理和を計算します。結果は元のレジスタに格納します。（メモリの値は変化しません。）

フラグ： C フラグは常に 0 になります。S, Z フラグは計算の結果により変化します。

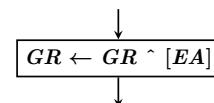
ニーモニック： XOR GR,EA

GR は、計算の対象になるレジスタを表します。このレジスタの値と EA で表されるメモリの値のビット毎の排他的論理和が計算されます。結果はこのレジスタに格納されます。

命令フォーマット： XOR 命令は 2 バイトの長さを持ちます。各フィールドの意味は LD 命令と同様です。

第1バイト		第2バイト
OP	GR XR	
1000 ₂	GR XR	aaaa aaaa

フローチャート： XOR 命令は次のように描きます。



XOR 命令の応用

XOR 命令を使用してデータの特定ビットの 0/1 を反転できます。TeC には NOT 命令がないので XOR 命令で代用します。次は G0 の上位 4 ビットの 0/1 を反転します。

ラベル	ニーモニック
	...
	LD G0,DATA
	XOR G0,MSK
	...
DATA	DC OAAH
MSK	DC OFOH

b7 b6 b5 b4 b3 b2 b1 b0
1 0 1 0 1 0 1 0
⊕ ⊕ ⊕ ⊕ ⊕ ⊕ ⊕ ⊕
1 1 1 1 0 0 0 0
↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓
XOR の結果 0 1 0 1 1 0 1 0

表 5.2 XR フィールドの値とアドレッシングモード

XR	意味	
00 ₂	ダイレクトモード	(直接モード)
01 ₂	G1 インデクスドモード	(G1 指標モード)
10 ₂	G2 インデクスドモード	(G2 指標モード)
11 ₂	イミディエイトモード	(即値モード)

5.10 アドレッシングモード

LD, ST, ADD, SUB, CMP, AND, OR, XOR, JMP, JZ, JC, JM, JNZ, JNC, JNM 命令は、どれも次のような同じ命令フォーマットでした。これまで、これらの命令の *XR* 部分は 00₂ にしてきました。

第1バイト		第2バイト	
OP	GR	XR	
OP	GR	XR	aaaa aaaa

XR に 00₂ 以外を指定することにより、メモリアドレス（実効アドレス）の表現方法を変更することができます。実効アドレスの表現方法のことをアドレッシングモードと呼びます。TeC で使用できるアドレッシングモードは、*XR* の値により表 5.2 に示す 4 種類があります。（同様な表が「図 B.1 TeC7 命令表」にも掲載されているので、そちらも確認してください。）

以下では LD 命令と ST 命令を例に、4 種類のアドレッシングモードを説明します。ここでは説明しませんが、ADD, SUB, CMP, AND, OR, XOR 命令でも、LD 命令や ST 命令と同様にアドレッシングモードが使用できます。

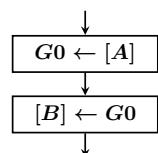
5.10.1 ダイレクト（直接）モード

これまで使用してきたのは、このモードです。命令の第 2 バイトがメモリアドレスを直接に表します。

ニーモニックでは次のように書きました。ここで、A, B は、データを置いたメモリのアドレスです。

```
LD G0,A
ST G0,B
```

フローチャートでは、次のように描きました。



実効アドレス

実効アドレス (*Effective Address*) は、命令が操作対象にするメモリのアドレス（番地）のことです。Effective Address を EA と略して書くこともあります。これまで、命令のニーモニック、フローチャート、命令表の動作説明欄等に、EA とか [EA] の記述が出てきました。これらは、実効アドレスや、実効アドレスに置いてあるデータを指していました。

EA の意味や、ニーモニックやフローチャートでの表記方法は、アドレッシングモードにより変化します。例えば G1 インデクスドモードの時、EA は「命令のアドレス部（第 2 バイト）の値と G1 レジスタの値を加えた値の番地」を意味し、ニーモニックでは EA を A, G1 のように表記しますし、フローチャートでは [EA] を [A+G1] のように表記します。

5.10.2 インデクスド（指標）モード

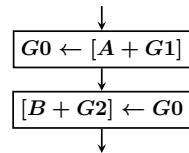
G1 または G2 レジスタの値と、命令の第 2 バイトの値の合計がメモリアドレスを表します。XR の値により、G1, G2 どちらのレジスタを使用するか決まります。G0 レジスタは使用できないので注意してください。

このモードは、配列データをアクセスするとき使用できます。また、ジャンプ命令でも使用できます。ジャンプ命令でインデクスドモードを使用する方法は、「6.7.3 ジャンプテーブル」で説明します。

ニーモニックでは次のように書きます。このプログラムは、A + G1 番地のデータを G0 に読み込み、B + G2 番地に格納しています。

```
LD G0,A,G1
ST G0,B,G2
```

フローチャートでは、次のように描きます。



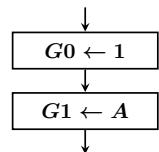
5.10.3 イミディエイト（即値）モード

第2バイトがデータそのものになるモードです。ST命令やジャンプ命令では使用できません。（これらの命令でXRを11になると、CPUが命令を実行しようとしたとき、命令コードのエラーになりRUNランプが点滅します。）

ニーモニックでは次のように書きます。

```
LD G0, #1
LD G1, #A
```

最初のLD命令は、G0を1にします。次のLD命令は、G1をAの番地（内容ではない）にします。フローチャートでは、次のように描きます。



5.10.4 アドレッシングモードの使用例

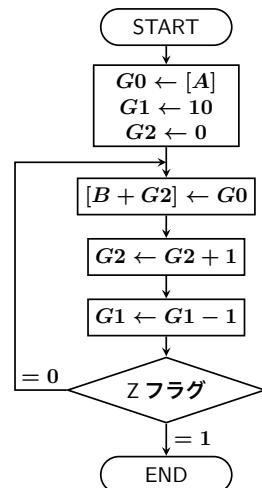
A番地のデータで、B番地からの10バイトの配列を初期化するプログラムの例を示します。

G1, G2レジスタの初期化とG1, G2レジスタの値を±1する部分にイミディエイトモードを使用しました。

また、10回の繰り返しで10バイトの領域を初期化できるよう、ST命令の格納アドレスがG2の値で1番地ずつずれていきます。ずらすためにインデクスドモードを使用しました。

番地	機械語	ラベル	ニーモニック
00	10 0F		LD G0, A
02	17 0A		LD G1, #10
04	1B 00		LD G2, #0
06	22 10	LOOP	ST G0, B, G2
08	3B 01		ADD G2, #1
0A	47 01		SUB G1, #1
0C	B4 06		JNZ LOOP
0E	FF		HALT
0F	AA	A	DC OAAH
10	00 00 00 00 00	B	DS 10
15	00 00 00 00 00 00		

次に、このプログラムのフローチャートを示します。イミディエイトモードとインデクスドモードを、フローチャート上でどのように表現しているか、よく確認してください。



問題

- これまでに出てきたプログラムをイミディエイトモードを使用して書き換えなさい。
- A番地からの5バイトのデータの合計をB番地に求めるプログラムを作りなさい。
- A番地からの5バイトのデータをB番地からの5バイトにコピーするプログラムを作りなさい。
- A番地からの5バイトのデータのビットを反転するプログラムを作りなさい。
- A番地からの5バイトとB番地からの5バイトのビット毎の論理和をC番地からの5バイトに求めるプログラムを作りなさい。
- A番地からの5バイトのデータのなかで、奇数の個数をB番地に求めるプログラムを作りなさい。
(ヒント：奇数の LSB は必ず1になっている。)
- A番地からの5バイトのデータの最大の値をB番地に求めるプログラムを作りなさい。
- A番地からの5バイトのデータの合計をB番地に求めるプログラムをインデクスドモードを使用しないで作りなさい。
(ヒント：プログラムが自身を書き換えながら動作する。)

表 5.3 I/O マップ

I/O マップ		
番地	Read	Write
0	データスイッチ	ブザー
1	データスイッチ	スピーカ
2	SIO 受信データ	SIO 送信データ
3	SIO ステータス	SIO コントロール
4	タイマ現在値	タイマ周期
5	タイマステータス	タイマコントロール
6	空き	INT3 コントロール
7	PIO 入力ポート	PIO 出力ポート
8	ADC CH0	空き
9	ADC CH1	空き
A	ADC CH2	空き
B	ADC CH3	空き
C	空き	PIO コントロール
D	空き	空き
E	空き	空き
F	空き	空き

5.11 入出力

図 5.2 TeC の構成に示した主記憶装置（メモリ）は、LD, ST 命令等を使用することでアクセスできることができました。ここで説明する入出力（Input Output= 略して I/O）命令は、入出力インターフェース回路をアクセスするための命令です。読み込みを行う IN 命令、書き込みを行う OUT 命令の 2 種類があります。

5.11.1 I/O マップ

いくつか存在するインターフェース回路の中で、どれをアクセスするかは I/O アドレス（メモリアドレスとは別のもの）により指定します。TeC の I/O アドレスは $0_{16} \sim F_{16}$ までの 16 番地です。I/O アドレスの一覧を「I/O マップ」と言います。TeC の「I/O マップ」を表 5.3 に示します。

「表 5.3 I/O マップ」から次のことが分かります。（詳しくは、後の方で説明します。）

- 0 番地の Read（読み込み）により、データスイッチの値を読み込むことができる。
- 0 番地の Write（書き込み）により、ブザーにアクセスできる。
- 1 番地の Read（読み込み）でも、データスイッチの値を読み込むことができる。

- 1 番地の Write（書き込み）により、スピーカーにアクセスできる。
- 2, 3 番地は、SIO（シリアル入出力）を用いてパソコンと通信するために使用される。
- 4, 5 番地は、タイマを使用して時間を計るために使用される。
- 6 番地は、コンソールパネルから発生する INT3 割込を制御する。
- 7 番地は、入出力ポートの値を読み書きするために使用される。
- 8, 9, A, B 番地は ADC（A/D コンバータ：電圧を計測して数値に変換する回路）の値を読み取るために使用される。
- C 番地は入出力ポートを制御する。
- D, E, F 番地は使用されない。

I/O マップは「図 B.1 TeC7 命令表」にも掲載されているので確認してください。

5.11.2 IN (Input) 命令

入出力インターフェース回路からデータを入力します。

意味： 4 ビットの I/O アドレスで指定した入出力インターフェース回路からデータをレジスタに入力します。

ニーモニック： IN GR,P

GR は値を入力するレジスタを表します。P は入出力インターフェース回路の I/O アドレスです。

命令フォーマット： IN 命令は 2 バイトの長さを持ちます。XR フィールドは必ず 00_2 にします。第 2 バイトの上位 4 ビットも必ず 0000_2 にします。

第1バイト		第2バイト
OP	GR XR	
1100_2	$GR\ 00_2$	$0000_2\ pppp$

フローチャート： IN 命令は次のように描くことにします。「動作の説明」は各自が工夫して下さい。



使用例： 次のプログラムはデータスイッチの状態を I/O アドレス 0 番地から読み取り、G0 レジスタに

格納するものです。ロータリースイッチを G0 に合わせた状態で、プログラムを実行してください。データスイッチを変化させると即座にデータランプの表示が変化します。プログラムは無限ループになっているので、実行を開始したら STOP ボタンを押すまで止まりません。

ラベル	ニーモニック
START	IN G0,0
	JMP START

IN 命令の応用

次のプログラムは、データスイッチから数値を入力し、合計を G0 に求めるものです。ロータリースイッチを G0 に合わせて実行すると、2 進数入力、2 進数表示の簡単な電卓として使用できます。

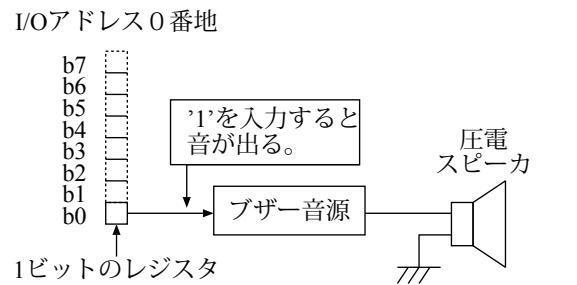
操作手順は次の通りです。

1. プログラムを入力する。
2. PC にプログラムの実行開始番地をセットする。
3. ロータリースイッチを G0 に合わせる。
4. データスイッチにデータをセットする。
5. RUN ボタンを押す。
6. データの件数分、4, 5 を繰り返す。
7. データランプに合計が表示されている。

ラベル	ニーモニック
START	LD G0,#0
LOOP	IN G1,00H
	ST G1,TMP
	ADD G0,TMP
	HALT
	JMP LOOP
TMP	DS 1

問題

1. データスイッチから 0 で終了する値を次々入力し、合計を X 番地に求めるプログラムを作りなさい。
2. A 番地からの 5 バイトを、実行開始時にデータスイッチにセットしてあった値で埋めつくすプログラムを作りなさい。



5.11.3 OUT (Output) 命令

入出力インターフェース回路へデータを出力します。

意味： レジスタのデータを 4 ビットの I/O アドレスで指定した入出力インターフェース回路へ出力します。

ニーモニック： OUT GR,P

GR は出力する値を持っているレジスタを表します。

P は入出力インターフェース回路のアドレスです。

命令フォーマット： OUT 命令は 2 バイトの長さを持ちます。XR フィールドは必ず 11_2 にします。第 2 バイトの上位 4 ビットも必ず 0000_2 にします。

第1バイト		第2バイト
OP	GR	XR
1100_2	$GR\ 11_2$	$0000_2\ pppp$

使用例： 次のプログラムはデータスイッチの値を読み取り、ブザー用のポートに出力するものです。

ブザーは図 5.4 のような構造になっており、I/O アドレス 0 番地に書き込んだ値で鳴ったり止まります。プログラム実行中にデータスイッチを操作して、最下位ビットを 1 にするとブザーが鳴ります。逆に最下位ビットを 0 にするとブザーの音が止まります。

プログラムは無限ループになっているので、実行を開始したら STOP ボタンを押すまで止まりません。ブザーが鳴っている状態でプログラムを停止しても、ブザーが鳴りっぱなしになります。その場合は、RESET スイッチを押して下さい。

ラベル	ニーモニック
START	IN G0,00H
	OUT G0,00H
	JMP START

問題

1. データスイッチのビット 7(D7) をオンにしている間、ブザーを鳴らすプログラムを作りなさい。
(但し、論理演算命令を用いること。)
2. データスイッチのビット 7(D7) をオンにしている間、ブザーを鳴らすプログラムを作りなさい。
(但し、シフト命令を用いること。)
3. データスイッチのビット 0(D0) をオンにしている間、ブザーを鳴らすプログラムを作りなさい。
(但し、データスイッチの 7(D7) がオンになったら、ブザーを止めて終了するようにすること。)

定数の定義 (EQU 命令)

IN 命令の使用例ではデータスイッチの値を読み込むための I/O アドレス 00H がプログラム中に直接書いてありました。データスイッチのことだと分かりやすい名前を用いるとプログラムが読みやすくなります。EQU 命令は、名前（ラベル）を定義するための命令です。EQU 命令のオペランドの値をラベルに割り付けます。他の命令と異なり、機械語やデータを生成しません。

番地	機械語	ラベル	ニーモニック
00		DSW	EQU 00H
00	C0 00	START	IN GO, DSW
02	A0 00		JMP START

TeC パラレル入出力 (PIO) の拡張機能

標準では入力 8 ビット・出力 8 ビットの構成ですが、入力 4 ビット・出力 12 ビットの構成に切り替えることができます。I/O アドレス 0CH 番地の b_7 に 1 を書き込むと入出力ポートコネクタの $I_7 \sim I_4$ 4 ビットが出力に切り替わります。この時、書き込んだデータの $b_3 \sim b_0$ が $I_7 \sim I_4$ に出力されます。

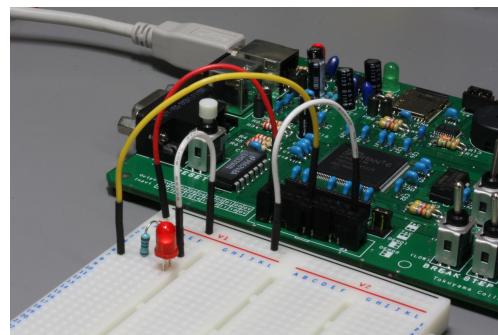
次のプログラムは、入出力ポートコネクタの $I_7 \sim I_4$ に 1010_2 を出力します。

番地	機械語	ラベル	ニーモニック
0C		PIOEX	EQU 0CH
00	13 8A	START	LD GO, #8AH
02	C3 0C		OUT GO, PIOEX
04	FF		HALT

5.12 TeC パラレル入出力 (PIO)

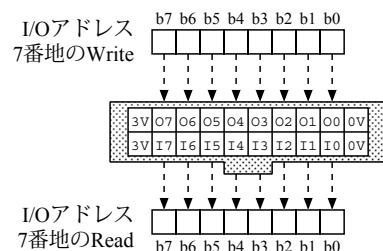
TeC には「図 4.1 各部の名称」の「入出力ポートコネクタ」を通し 8 ビットのデータを並列に入力・出力するパラレル入出力 (Parallel Input Output : 略して PIO) 機能があります。

次の写真は PIO を使用し、ブレッドボード上の LED をプログラムで点灯・消灯できるようにした例です。

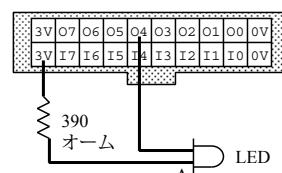


下に入出力ポートコネクタのピン配置図を示します。I/O アドレスの 7 番地に OUT 命令で書込んだ 2 進数データがコネクタの $O_7 \sim O_0$ に出力されます。（対応するビットの “1” が 3.3V, “0” が 0V になります。）I/O アドレスの 7 番地を IN 命令で読むとコネクタの $I_7 \sim I_0$ に入力された電圧に対応したデータを入力できます。

入出力ポートコネクタの “0V” ピンは TeC の GND に接続されています。“3V” ピンは TeC の 3.3V 電源に接続されています。外部に接続した回路の電源として使用することができます。



上の写真では、ブレッドボードを用いて次図のように配線してあります。ポートに “0” を出力すると LED が光ります。



5.13 TeC アナログ入力 (AIN)

TeC には、基板上の入出力ポートコネクタ（図 4.1 参照）を通してアナログ電圧値を入力できる機能（Analog INput：略して AIN）があります。

TeC の AIN には、同時に 4 つのアナログ電圧が入力できます。アナログ電圧は入出力ポートコネクタの I_3 , I_2 , I_1 , I_0 ピンから入力します。入力電圧は、0V～3.3V を 256 等分した数値（0V=0, 3.3V=255）に変換されます。数値に変換された結果は、I/O アドレス 8H～BH で読み取ることができます。次の表に、入力ピンと I/O アドレスの対応をまとめます。

I/O 番地	名称	入力ピン
816	ADC CH0	I_0
916	ADC CH1	I_1
A16	ADC CH2	I_2
B16	ADC CH3	I_3

入出力ポートコネクタの I_3 , I_2 , I_1 , I_0 ピンは、パラレル入力にもアナログ入力にも使用されます。パラレル入力ポートから見ると、入力電圧が 1.6V 付近を境界に“0”と“1”が切り替わります。

次にアナログ電圧を入力する配線例を示します。可変抵抗器を変化させると入力値が変化します。入力値をプログラムが読み取るためには、I/O アドレスの 8H 番地（ADC CH0）を IN 命令で読みます。



Bluetoothによるパソコンとの接続

TeC7c 以降の機種では、USB だけでなく Bluetooth によるシリアル通信が可能です。この機能を使用するにはパソコン等に以下のアプリをインストールする必要があります。

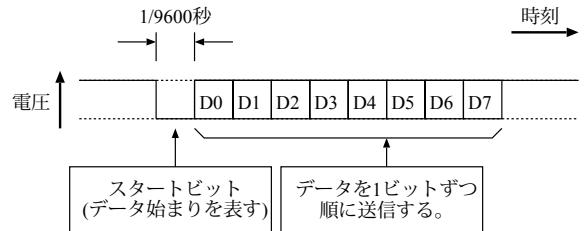
- macOS 用の BlueTerminal
<https://github.com/tctsigemura/BlueTerminal>
- iOS 用の MLDP-Terminal
<https://github.com/tctsigemura/MLDP-Terminal>
- Android 用の MLDP-Terminal
<https://github.com/yokoro13/MLDPTerminal>

5.14 TeC シリアル入出力 (SIO)

TeC には、パソコンと接続できるシリアル入出力（Serial Input Output：略して SIO）インターフェースが備えてあります。USB または Bluetooth でパソコンと接続することができます。前出の IN, OUT 命令を使用して、SIO インターフェースにアクセスします。

5.14.1 シリアル入出力

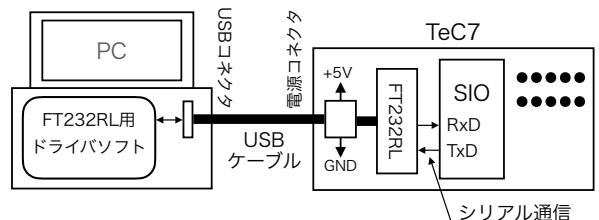
名前（Serial = 直列）の通り、データを 1 ビット毎に、順に転送する方式です。次の図のように、時間による電圧の変化としてデータを表現します。また、1 ビットの時間として 1/9600 秒を用います。1/9600 秒で 1 ビットを送る通信速度を 9600baud（ボード）と言います。



5.14.2 パソコンとの USB 接続

TeC の電源コネクタとパソコンの USB コネクタを USB ケーブルで接続します。TeC には「USB シリアル変換 IC」として FTDI 社の FT232RL が実装されているので、パソコンから電源が供給されると同時にシリアル通信も可能になります。^{*1}

次の図に USB 接続でシリアル通信をするときのパソコンと TeC の関係を示します。FT232RL と TeC の SIO インターフェース回路の間がシリアル通信部分になります。TeC のプログラムは SIO インターフェース回路を操作するだけなので、その先に FT232RL や USB ケーブルがあることは分かりません。

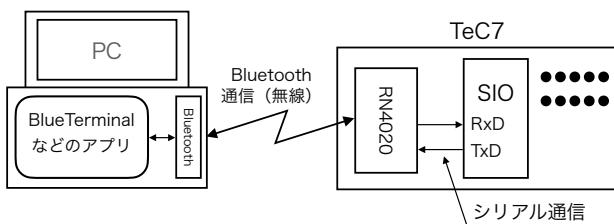


^{*1} パソコンの OS によっては FT232RL 用のドライバをインストールする必要があります。その場合は、FTDI 社の Web ページ (<http://www.ftdichip.com/>) から VCP ドライバを入手してパソコンにインストールしてください。

5.14.3 パソコンとの Bluetooth 接続

次の図に Bluetooth 接続でシリアル通信をするときのパソコンと TeC の関係を示します。RN4020 と TeC の SIO インタフェース回路の間がシリアル通信部分になります。TeC のプログラムは SIO インタフェース回路を操作するだけなので、その先に RN4020 や Bluetooth が存在することは分かりません。

パソコンには BlueTerminal 等の専用アプリをインストールする必要があります。



5.14.4 シリアル入出力回路の仕組み

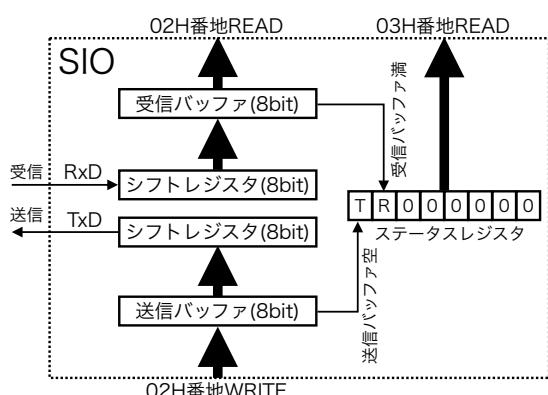
次の図に TeC のシリアル入出力回路の仕組みを示します。前の図の SIO インタフェース回路の中身です。

受信

データはシフトレジスタに 1 ビットずつ受信します。シフトレジスタに 8 ビット揃うと受信バッファにコピーします。シフトレジスタは次の受信を開始することができます。CPU が受信バッファのデータを読み出すまで、ステータスレジスタの R ビットが 1 になります。

送信

シフトレジスタは空になると送信バッファからデータを受け取ります。CPU は次のデータを送信バッファに書き込むことができます。シフトレジスタのデータは 1 ビットずつ送信します。送信バッファのデータをシフトレジスタに渡すまで、ステータスレジスタの T ビットが 0 になります。



5.14.5 I/O ポート

SIO の I/O ポートは、2 番地、3 番地に配置されています（「表 5.3 I/O マップ」参照）。内容は次の通りです。

受信データ

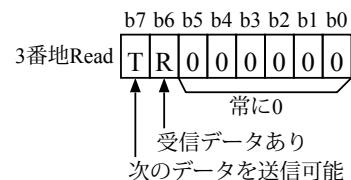
IN 命令で 2 番地の読むことで受信バッファのデータを読むことができます。

送信データ

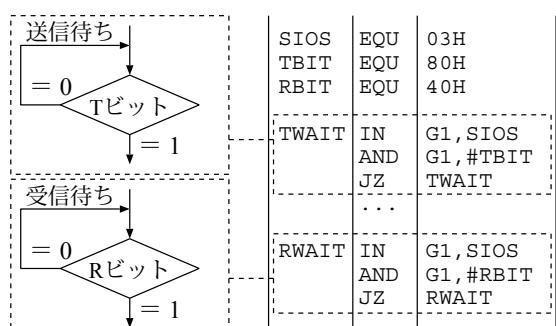
OUT 命令で 2 番地に書き込むことで送信バッファにデータを書き込むことができます。

ステータス

IN 命令で 3 番地を読むことでステータスレジスタを読むことができます。ステータスレジスタの各ビットの意味は次の図の通りです。

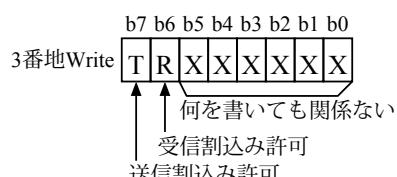


プログラムは次の手順でステータスレジスタを調べ、データの入出力が可能か判断します。この判断は頻繁に使用するので、フローチャートを次のように簡単化して描くことにします。



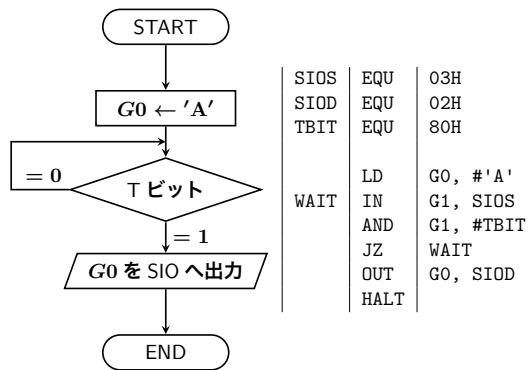
コントロール

3 番地へ OUT 命令で次図のようなデータを書き込みます。詳細は、「6.11 入出力割込み」で説明します。



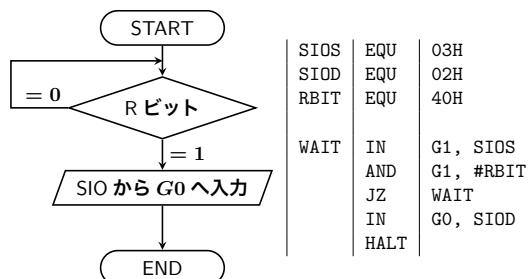
5.14.6 シリアル出力プログラム

シリアル出力をを行うプログラムの一般的なフローチャートを次の図に示します。I/O アドレス 3 番地の「T ビット」が“1”になり、送信可能になるのを待って出力データを 2 番地に書き込みます。T ビットが 1 か 0 か調べるために、AND 命令を使用しています。これで、2 番地に書き込んだデータがパソコンに送信されます。



5.14.7 シリアル入力プログラム

シリアル入力をを行うプログラムの、一般的なフローチャートを次の図に示します。受信データが届き、I/O アドレス 3 番地の「R ビット」が“1”になるのを待って、2 番地からデータを読み込みます。受信したデータは G0 に格納されます。



5.14.8 シリアル入出力データ

TeC がパソコンと通信するときは、「[2.6 文字の表現](#)」で勉強した ASCII コードを使用する約束とします。パソコンのキーボードを叩くと対応する文字の文字コードが TeC に送信され、TeC が文字コードを送信すると対応する文字がパソコンの画面に表示されます。パソコンに、このように動作するターミナルエミュレータを動かしておく必要があります。

ターミナルエミュレータ

その昔、ホストコンピュータのディスプレイとキーボードの役目をした文字端末（下の写真）をシミュレーションするソフトウェアのことです。文字端末は現代のパソコンのような外観ですが、ホストコンピュータから受信した文字を表示するディスプレイと、ホストコンピュータに送信する文字をタイプするキーボードの機能しかありません。UNIX または macOS の「ターミナル」、macOS の「CoolTerm」、Windows の「Tera Term」等がターミナルエミュレータの一種です。

ここでは TeC がホストコンピュータの役割になります。キーボードやディスプレイを持たない TeC は、シリアル入出力を通して文字端末のキーボードとディスプレイを使用します。ターミナルエミュレータを動作させたパソコンは TeC の文字端末として働きます。ターミナルエミュレータは TeC から受信したデータを ASCII 文字コード（[2.6 文字の表現](#) 参照）とみなし、対応する文字を画面に表示します。また、キーボードが押されると、押された文字の ASCII 文字コードを TeC へ送信します。

「CoolTerm」や「Tera Term」は、別のコンピュータと通信することを主な目的に作っています。一方で UNIX や macOS の「ターミナル」は、ターミナルエミュレータが動作するのと同じパソコンをホストコンピュータと見做します。そこで、「ターミナル」はシリアル通信をターミナルエミュレータに中継する「screen プログラム」や「tip プログラム」と組合せて使用します。BlueTerminal (p.51) も「screen プログラム」と同様に「ターミナル」と組合せて使用するプログラムです。

TeC の SIO を使用するときは、TeC とパソコンをケーブルで接続するだけでなく、パソコンにターミナルエミュレータ等を起動し、パソコンを文字端末として使用できるように準備する必要があります。



写真：<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Televideo925Terminal.jpg> (パブリックドメイン)

ニーモニック中の文字データ表記

文字を扱うプログラムを書くとき、文字コードが必要になります。そのときは、ニーモニック中に数値の代わりに、「'A'」のように書くことができます。文字 A の文字コード（41H）と言う意味です。（文字コードには ASCII コードを用います。）

ニーモニック中の'A'は、41H または 65 と書いたのと全く同じ意味になります。

DC 命令では、連続した文字の定義に"文字列"を使用できます。下のプログラム中にあります。

番地	機械語	ラベル	ニーモニック
00	13 41	START	LD G0,#'A'
02	FF		HALT
03	42 43		DC 'B','C'
05	45 65		DC "TeC"
07	43		

ターミナルエミュレータ画面の改行

CR（復帰文字）は文字カーソルを画面の左端に移動するための制御文字、LF（改行文字）は文字カーソルを一行下に移動するための制御文字です。CR の文字コードは 0DH、LF の文字コードは 0AH です。文字コードは図 2.14 を確認して下さい。

ターミナルエミュレータの表示を改行するには、通常、CR と LF の 2 文字を TeC からパソコンへ送ります。しかし、筆者のパソコンで試してみると、LF だけを送信しても復帰と改行の両方ができてしましました。（CR を送っても害はありませんでした。）

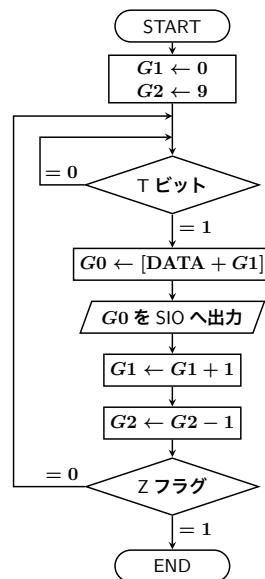
ターミナルエミュレータにより、必要な制御文字の組合せが異なるようです。自分が使用するシステムに合わせて、臨機応変に対応してください。

例題 5-7 文字列出力 1

問題： SIO ヘローマ字で自分の名前を出力するプログラムを作りなさい。

考え方： 筆者の場合、SHIGEMURA の 9 文字を出力するプログラムを作成します。データとして準備した 9 文字を、インデクスドモードのアドレスシングルを使用し順に出力します。

フローチャート： 次のようになります。



プログラム：

番地	機械語	ラベル	ニーモニック
02	SIOD		EQU 02H
03	SIOS		EQU 03H
00	17 00	START	LD G1,#0
02	1B 09		LD G2,#9
04	C0 03	LOOP	IN G0,SIOS
06	63 80		AND G0,#80H
08	A4 04		JZ LOOP
0A	11 15		LD G0,DATA,G1
0C	C3 02		OUT G0,SIOD
0E	37 01		ADD G1,#1
10	4B 01		SUB G2,#1
12	B4 04		JNZ LOOP
14	FF		HALT
15			
15	53 48	DATA	DC "SHIGEMURA"
17	49 47		
19	45 4D		
1B	55 52		
1D	41		

例題 5-8 文字列出力 2

問題： SIO へローマ字で “Tokuyama Kousen”, “Shigemura” のような 2 行を出力するプログラムを作りなさい。

考え方： 繰り返しにより、1 文字ずつ SIO へ出力します。1 行目データと 2 行目データの間に、復帰コードと改行コードを置きます。これらのコードも通常の文字と同じように扱って構いませんので、プログラムは 2 行分を一気に出力するもので構いません。

プログラム： プログラムにすると次のようになります。データの最後の 00H は、データの終わりを示す目印です。文字コードが 00H の文字は通常使用しませんので、これを文字ではなく終わりの印に使用しました。
この方法だと、出力するデータの長さが変化してもプログラムを変更する必要がありません。

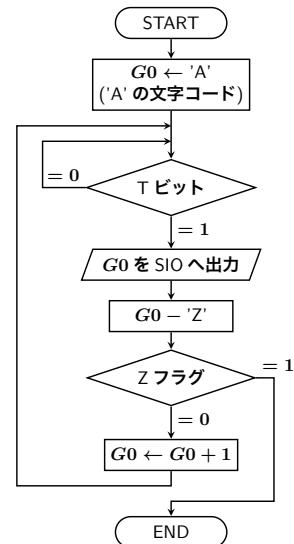
番地	機械語	ラベル	ニーモニック
02		SIOD	EQU 02H
03		SIOS	EQU 03H
00 17 00			LD G1,#0
02 19 15	LO		LD G2,DATA,G1
04 5B 00			CMP G2,#0
06 A4 14			JZ END
08 C0 03	L1		IN G0,SIOS
0A 63 80			AND G0,#80H
0C A4 08			JZ L1
0E CB 02			OUT G2,SIOD
10 37 01			ADD G1,#1
12 A0 02			JMP LO
14 FF	END		HALT
15			
15 54 6F	DATA	DC	"Tokuyama
17 6B 75			Kousen"
19 79 61			
1B 6D 61			
1D 20 4B			
1F 6F 75			
21 73 65			
23 6E			
24 0D 0A		DC	ODH, OAH
26 53 68		DC	"Shigemura"
28 69 67			
2A 65 6D			
2C 75 72			
2E 61			
2F 0D 0A		DC	ODH, OAH
31 00		DC	00H

例題 5-9 ‘A’～‘Z’ の文字を表示

問題： SIO へ ‘A’～‘Z’ の文字を連続して出力するプログラムを作りなさい。

考え方： ‘A’～‘Z’ の文字コードは連続しています（図 2.14 ASCII 文字コード表 参照）。最初に ‘A’ の文字コードをレジスタにロードし SIO へ出力します。次に、レジスタに 1 加えて文字コードを増やします。増やした結果は ‘B’ の文字コードですので、それを出力します。後は同様に ‘Z’ の文字コードまで出力します。

フローチャート： 次の通りです。



プログラム： G0 レジスタを文字コードの格納に、G1 レジスタを「T ビット」のチェックに使います。出力可能になったら G0 の文字コードを SIO へ出力します。出力した後で出力した文字を調べ、「Z」だったら終了します。

番地	機械語	ラベル	ニーモニック
02		SIOD	EQU 02H
03		SIOS	EQU 03H
00 13 41			LD G0, #'A'
02 C4 03	WAIT		IN G1, SIOS
04 67 80			AND G1, #80H
06 A4 02			JZ WAIT
08 C3 02			OUT G0, SIOD
0A 53 5A			CMP G0, #'Z'
0C A4 12			JZ OWARI
0E 33 01			ADD G0, #1
10 A0 02			JMP WAIT
12 FF	OWARI		HALT

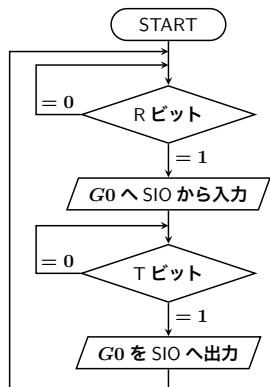
例題 5-10 echo プログラム

問題： SIO から入力した文字をそのまま SIO へ

送り返す（こだま）プログラムを作りなさい。

考え方： STOP ボタンが押されるまで終了しない
プログラムを作ります。

フローチャート： 次のようなアルゴリズムででき
るはずです。



プログラム： G0 レジスタを文字コードの格納用に、G1 レジスタを「R ビット」、「T ビット」のチェック用に使います。IN 命令で G0 へ読み込んだ文字コードを、OUT 命令で書き戻すことにより文字を送り返します。

番地	機械語	ラベル	ニーモニック
02		SIOD	EQU 02H
03		SIOS	EQU 03H
00			
00	C4 03	START	IN G1, SIOS
02	67 40		AND G1, #40H
04	A4 00		JZ START
06	C0 02		IN GO, SIOD
08	C4 03	WAIT	IN G1, SIOS
0A	67 80		AND G1, #80H
0C	A4 08		JZ WAIT
0E	C3 02		OUT GO, SIOD
10	A0 00		JMP START

5.15 まとめ

この章では教育用コンピュータ TeC の機械語プログラミングを学びました。手作業で機械語を作成すること（ハンドアセンブル）を前提にしました。これらを通してノイマン型コンピュータの特徴である以下の三つを体感できたはずです。

1. データだけでなくプログラムも主記憶に置くこと（ストアードプログラム方式）
2. プログラムの命令は PC で指定されたアドレス順に一つずつ実行されること（逐次実行方式）
3. データもプログラムも 2 進数で表現すること（2 進法）

そして何より、1 ビットでも間違えると TeC が正しく動作しないことを痛感したと思います。これは TeC に限らず現代のノイマン型コンピュータ全てに共通です。また、C 言語や Java 言語などの高級言語を用いた場合であっても、1 文字の間違いも許容されることは共通です。ノイマン型コンピュータを使用する以上、ハードウェアもソフトウェアも 1 ビットも間違ってはならないことをよく覚えておいて下さい。

ハンドアセンブルによりプログラムを作成するのは効率が悪いので、アセンブラーというプログラムで機械語を自動的に作ることもできます。TeC 用のアセンブラーは <https://github.com/tctsigemura/Tasm> から入手可能です。

問題

1. SIO から 1 文字入力する度に '*' を送り返すプログラムを作りなさい。（パスワード入力を真似する。）
2. SIO から 1 文字入力する度に、入力した文字がアルファベット小文字の場合大文字に変換し、そうでなければそのまま SIO へ出力するプログラムを作りなさい。

第 6 章

高度なプログラミング

6.1 クロス開発

第 5 章では、ハンドアセンブルにより機械語のプログラムを作成しました。プログラムをニーモニックから機械語に手作業で変換する際、ミスが多発しました。このようにミスが多発するので、実は、ハンドアセンブルによるプログラムの開発は、ほとんど行われません。

この授業の中では、原理をよく理解してもらうために、あえて面倒なハンドアセンブルをたくさんしてもらいました。そろそろ、機械語の原理はよく分かってきたので、楽にプログラミングする方法を教えます。

プログラムを作成することを「プログラムを開発する」と言います。楽に「開発する」ために使用するコンピュータやプログラムのことを、「開発環境」と言います。「開発環境」には、「セルフ開発環境」と「クロス開発環境」があります。

「セルフ開発環境」は、パソコンで Java 言語や C 言語でプログラムを作成し実行するような、プログラムを開発するコンピュータと実行するコンピュータが同じ場合に用いる「開発環境」です。

「クロス開発環境」は、TeC のような小さなコンピュータのプログラム開発によく用いられます。他のコンピュータ上でプログラムを作成し、出来上がったプログラムを目的のコンピュータに転送して実行するような「開発環境」です。「クロス開発環境」を用いたプログラムの開発は、「クロス開発」と呼ばれます。

6.1.1 TeC クロス開発環境

「TeC クロス開発環境」は、アセンブラーとダウンロードプログラムからなります。「TeC クロス開発環境」の入手とパソコンへのインストール方法は、<https://github.com/tctsigemura/Tasm> を参照してください。以下では、UNIX または macOS に「TeC クロス開

```
1 ; 入力例
2 ld g0,a
3 st g0,b
4 halt
5 a dc 10
6 b ds 1
```

図 6.1 ソースプログラムの例

発環境」がインストールされていることを前提に説明します。また、「TeC クロス開発環境」の詳細は、「付録 A TeC クロス開発環境」を参照してください。

6.1.2 アセンブラー

ニーモニックから機械語に変換する作業を、これまでには、手作業（ハンドアセンブル）により行ってきました。このような単純で機械的な作業はコンピュータが得意なものです。この作業を行うプログラムを「アセンブラー」と言います。アセンブラーは、ニーモニックで記述したプログラムを機械語に変換します。

TeC 用アセンブラーの使用方法

TeC 用のアセンブラーは、UNIX や macOS、または Windows 上で動作する「クロスアセンブラー」です。クロスアセンブラーを使用したプログラムの作成手順は次の通りです。

1. テキストエディタを用いてソースプログラムを入力します。ソースプログラムを格納するファイルの拡張子は“.t7”でなければなりません。例えば、図 6.1 のソースプログラムを“xxx.t7”ファイルに書込みます。
2. 図 6.1 の内容を説明します。1 行目は注釈の例です。‘;’ から行末までが注釈になります。ラベルのない行 (2, 3, 4 行) は、一つ以上の空白を書いた後、命令を書きます。ラベルのある行 (5, 6) は、行の 1

```
$ tasm7 xxx.t7
アセンブル成功
結果は [xxx.lst] と [xxx.bin] に格納しました.

[xxx.lst]
ADR CODE      Label    Instruction

00          ; 入力例
00 10 05      LD       GO,A
02 20 06      ST       GO,B
04 FF         HALT
05 0A         A        DC     10
06 00         B        DS     1
$
```

図 6.2 tasm7 の実行例

```
$ tasm7 yyy.t7
*** エラー[未知のニーモニック] ***
エラー発生場所 : ファイル [yyy.t7] の 3行で
エラー行の内容 : [   SL GO,B]
エラートークン : [SL]
$
```

図 6.3 エラーが発生する tasm7 の実行例

- 文字目からラベルを書きます。なお、例では命令のインデントが揃っていますが、揃える必要はありません。
- アセンブラーを実行します。アセンブラーのコマンド名は、tasm7です。実行例を図 6.2 に示します。
入力にミスがなければ、アセンブルリストと機械語プログラムが生成されます。
入力にミスがあった場合は、図 6.3 のようにエラーメッセージが表示され、エラーの場所と原因が分かるようになっています。

TeC 用アセンブラーの出力

- アセンブルリスト
画面と拡張子 “.lst” のファイルに、アセンブルリストが output されます。アセンブルリストは、入力したニーモニックと、それから作られた機械語の対応を分かり易く表示したものです。ハンドアセンブルで行っていた機械語作成の結果と同じになっていることを確認してください。
- 機械語プログラムファイル

```
$ twrite7 xxx.bin
[00] [07] [10] [05] [20] [06] [ff] [0a] [00]
$
```

図 6.4 twrite7 の実行例

拡張子 “.bin” のファイルに機械語が格納されました。ファイルの内容は、「[A.8 機械語プログラムファイル形式](#)」で説明します。

6.1.3 ダウンロード

アセンブラーを実行することにより、拡張子 “.bin” のファイルに機械語が格納されました。次に、この機械語を TeC の主記憶にダウンロードします。ダウンロード方法は tsend7 コマンドを用いる方法^{*1}と、 twrite7 コマンドを用いる方法^{*2}の二種類があります。以下では twrite7 コマンドを用いる方法を説明します。

プログラムをダウンロードするには、パソコンと TeC を USB ケーブルで接続し通信できる状態にした上で、パソコンで twrite7 コマンドを実行します。ケーブルの接続方法は「[5.14 TeC シリアル入出力](#)」を参照してください。ダウンロード手順は次の通りです。

- パソコンで tasm7 を用いて .bin ファイルを作成します。
- パソコンで .bin ファイルを指定して twrite7 コマンドを実行します。その様子を図 6.4 に示します。
- 自動的にコンソールパネルが操作され、.bin ファイルのプログラムが TeC の主記憶装置（メモリ）に書き込まれます。
- twrite7 はプログラムの先頭アドレスを PC に自動的にセットします。

以上の操作で、手動でコンソールパネルから機械語を打ち込むこと無く、機械語が TeC の記憶装置に書き込まれました。主記憶装置に書き込まれたプログラムを実行したりデバッグしたりする方法は、手動でコンソールパネルから機械語を打ち込んだ場合と同様です。

^{*1} 全ての TeC7 で使用できます。tsend7 を用いる方法は「TeC 教科書 Ver. 4.0.5」(<https://github.com/tctsigemura/TecTextBook/blob/v4.0.5/tec.pdf>) に解説しております

^{*2} TeC7c 以降の機種で使用できます。

ニーモニック入力上の注意

- TeC のアセンブラーは、文字データ以外では、アルファベット大文字と小文字を区別しません。小文字で記述しても、アセンブルリストには大文字に変換されて表示されます。
- ‘A’～‘F’ の文字で始まる 16 進数は、前に ‘0’ を付加する必要があります。アルファベットで始まる 16 進数は、ラベルと区別ができないためです。（例 F1H → 0F1H）
- 空白の表現には、スペースとタブのどちらも使用できます。インデントを揃えるにはタブを使用すると便利です。また、空白の文字数はいくつでも構いません。読みやすいように、上手に空白を使用してください。
- ‘;’ をニーモニックの中に書くと、次の文字から行末までが注釈（コメント）になります。上手に注釈を入れて、読みやすいプログラムにしてください。
- 文字や文字列の表記も、これまで使用してきた‘文字’や“文字列”的記述が使用できます。実際に使用する記号は、「'」（パソコンの日本語キーボードでは、シフトを押しながら「7」）と、「"」（シフトを押しながら「2」）です。本書の記述の中では、左と右のクオートに異なる記号を用いている場合もありますが、実際には同じ記号です。

問題

1. 「例題 5-5 ビットの回転」をクロス開発環境を用いてやり直しなさい。
2. 「例題 5-3 割算を計算する」をクロス開発環境を用いてやり直しなさい。
3. 「例題 5-8 文字列出力 2」をクロス開発環境を用いてやり直しなさい。

注意

同じシリアル通信機能を「クロス開発環境」と「文字列出力プログラム」の両方で使用します。プログラムのダウンロード時には、パソコンのターミナルプログラムを終了する必要があります。

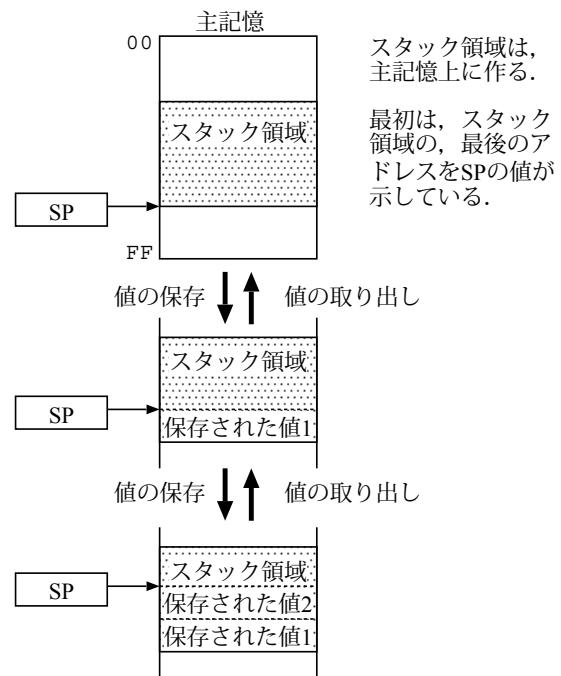


図 6.5 スタックの仕組み

6.2 スタック

スタックは、一時的にデータを保管するために使用できます。例えば、レジスタの個数が足らなくなったりとき、レジスタの値をスタックに一時退避しておき、後でレジスタに復元することができます。

同じことを、ST, LD 命令と「名前を付けた領域」を用いて行なうことも可能ですが、スタックを利用すると「名前を付けた領域」を使用する必要がありません。スタックもメモリ上の領域ですが、名前を付けたりすることなしに、プログラムのあちこちから同じ領域を繰り返し使用することができます。

6.2.1 仕組み

スタックは、CPU のスタックポインタ（SP レジスタ）により管理されます。図 6.5 のように、最初は SP がスタック領域の最後の番地を記憶しています。スタックに値を保存するときは、SP の値から 1 を引き新しいアドレスを決め、そのアドレスに値を保存します。値を保存する度に SP の値は減少していきます。

スタックから値を取り出すときは、SP の示すアドレスの値を取り出し、次に SP の値に 1 を加えます。値を取り出す度に SP の値は増加していきます。

このように、スタックを用いると、保存したのとは逆の順番で値を取りだすようになります。最後に入れたデータを最初に取り出すので、スタックは LIFO (Last In First Out) 方式のデータ構造です。

6.2.2 PUSH 命令

Push は、「押す」と言う意味の英語です。データをスタックに「押し込む」のに使用します。

意味： レジスタの値をスタックに押し込む。

ニーモニック： PUSH GR

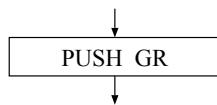
GR で指定されたレジスタの値がスタックに押し込まれます。GR が SP を表す場合は、SP の値がスタックに押し込まれます。

命令フォーマット： PUSH 命令は、1 バイト長の命令です。XR フィールドは必ず 00_2 にします。

第1 バイト	
OP	GR XR
1101_2	$GR\ 00_2$

動作の詳細： PUSH 命令は、まず、スタックポインタ (SP) の値を 1 減らします。次に、SP の値をアドレスとみなし、主記憶の SP 番地に指定されたレジスタの値を書き込みます。

フローチャート： 次のように描くことにします。



6.2.3 POP 命令

Pop は、「飛び出る」と言う意味の英語です。データをスタックから取り出すのに使用します。

意味： スタックのデータをレジスタに取り出す。

ニーモニック： POP GR

GR で指定されたレジスタにスタックからデータが取り出されます。GR が SP を表す場合は、スタックからデータが取り出され、SP に格納されます。

命令フォーマット： POP 命令は、1 バイト長の命令です。XR フィールドは必ず 10_2 にします。

第1 バイト	
OP	GR XR
1101_2	$GR\ 10_2$

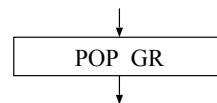
動作の詳細： POP 命令は、まず、主記憶の SP 番地か

ラベル	ニーモニック
	LD SP, #0DCH
	...
	G0, G1 を使用する処理 1
	...
	PUSH G0 ; G0 を保存
	PUSH G1 ; G1 を保存
	...
	G0, G1 を使用する処理 2
	...
	POP G1 ; G1 を復元
	POP G0 ; G0 を復元
	...
	処理 1 の続き
	...

図 6.6 スタックにレジスタの値を一時退避する例

らデータを取り出し、指定されたレジスタに格納します。次に、SP の値を 1 増やします。

フローチャート： 次のように描くことにします。



PUSH/POP 命令の応用例 (1)

図 6.6 のように、PUSH 命令と POP 命令を組み合わせて、レジスタの値を一時的に保管することができます。まず、SP の値を初期化します。DCH 番地に初期化する理由は、「図 B.1 TeC7 命令表」のメモリマップを参照して考えてください。スタックは LIFO なので、PUSH (保存) した順序と逆の順序で POP (復元) する必要があります。

PUSH/POP 命令の応用例 (2)

図 6.7 のように、PUSH 命令と POP 命令を組み合わせて、レジスタの値を別のレジスタにコピーすることができます。TeC にはレジスタ間のデータ転送命令がないので、このテクニックは役に立ちます。次の例では G0 の値を G1 にコピーします。

問題

スタックを利用して G0 と G1 の値を交換する方法を考えなさい。

ラベル	ニーモニック
	LD SP, #0DCH
	...
	PUSH GO ; GO を保存
	POP G1 ; G1 に復元
	...

図 6.7 スタックを用いたレジスタ間のコピーの例

6.3 サブルーチン

プログラムの中に同じ処理が何度も出てくることがあります。また、一つのまとまった機能を実現している部分があり、他の部分と独立させた方がプログラムの見通しが良くなる場合があります。

例えば、「[5.14 TeCシリアル入出力\(SIO\)](#)」の例題プログラムの多くで、1文字入力や1文字出力を行うプログラムの部分がありました。このような部分はサブルーチン(副プログラム)としてまとめることにより、繰り返し呼び出して使用したり、他の部分から独立させて見やすいプログラムにすることができます。ここでは、サブルーチンを作る方法を学びます。

6.3.1 仕組み

サブルーチンは、他のプログラムから呼び出されて実行されます。サブルーチンの実行が終わったら、呼び出したプログラムに戻り続きを実行します。サブルーチンを呼び出すための CALL 機械語命令と、サブルーチンの最後から呼び出し元に戻るための RET 機械語命令を新たに導入します。

図 6.8 のプログラムは、1文字出力機能をサブルーチンとして独立させ、メインルーチン(主プログラム)から2回呼び出します。プログラムは先頭から実行が開始され CALL 命令で PUTCH サブルーチンへジャンプします。PUTCH サブルーチンを最後まで実行すると RET 命令でメインルーチンに戻り、CALL 命令の次の命令から実行を再開します。

6.3.2 CALL 命令

Call は、「呼び出す」と言う意味の英語です。サブルーチンを呼び出すために使用します。CALL 命令は JMP 命令に似ていますが、サブルーチンから戻る準備をしてからジャンプしなければなりません。CALL 命令は、自身の次の命令のアドレスをスタックに保存(PUSH)してから、サブルーチンにジャンプします。

ラベル	ニーモニック
START	LD SP, #0DCH
	LD GO, #'A'
	CALL PUTCH ; サブルーチン呼出し
	LD GO, #'B'
	CALL PUTCH ; サブルーチン呼出し
	HALT
PUTCH	IN G1, 03H ; 1文字出力
	AND G1, #80H ; サブルーチン
	JZ PUTCH
	OUT GO, 02H
	RET

図 6.8 サブルーチンの例

意味： サブルーチンを呼び出す。

フラグ： 変化しません。

ニーモニック： CALL EA

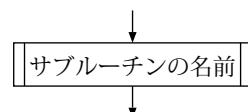
EA 番地のサブルーチンを呼び出します。EA にインデクストモードは使用できますが、イミディエイトモードは使用できません。

命令フォーマット： CALL 命令は 2 バイトの長さを持ちます。各フィールドの意味は JMP 命令と同様です。GR フィールドは必ず 00_2 にします。

第1バイト		第2バイト
OP	GR XR	
1011_2	00_2	$aaaa\ aaaa$

動作の詳細： CALL 命令は、まず、PC の値(CALL 命令実行時には既に次の命令のアドレスになっている)を、スタックに保存(PUSH)します。次に、サブルーチンにジャンプします。

フローチャート： 次のように描きます。箱の中には、呼び出すサブルーチンの名前を書きます。



使用上の注意： CALL 命令が使用するスタックは PUSH 命令や POP 命令が使用するのと同じものです。CALL 命令を使用する前に SP を初期化する必要があります。

6.3.3 RET (Return) 命令

Return は、「戻る」と言う意味の英語です。RET は Return の綴を縮めたものです。サブルーチンから戻るために使用します。

意味： サブルーチンから戻る。

フラグ： 変化しません。

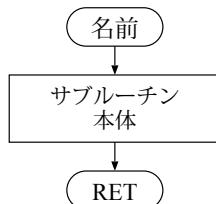
ニーモニック： RET

命令フォーマット： RET 命令は、1 バイト長の命令です。

第1バイト	
OP	GR XR
1110 ₂	11 ₂ 00 ₂

動作の詳細： スタックから値を一つ取り出し PC にセットします。スタックには CALL 命令が保存した PC の値が保存されているので、プログラムの実行は、サブルーチンを呼び出した CALL 命令の次の命令に移ります。

フローチャート： 次のフローチャートの、最後の角を取った四角が RET 命令に対応します。フローチャートは、サブルーチン全体を示しています。



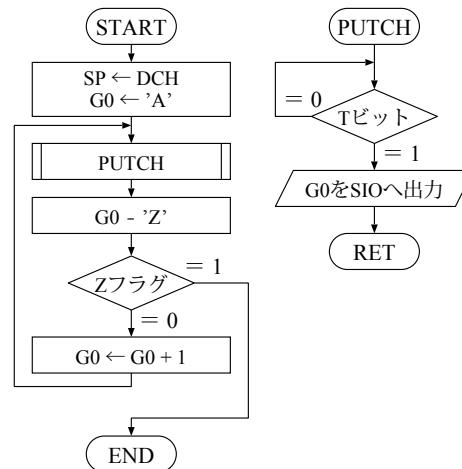
使用上の注意： RET 命令は POP 命令と同様な方法でスタックから値を取り出します。サブルーチンの中で PUSH 命令や POP 命令を使用した場合は、スタックの状態がサブルーチンの実行開始時と同じになるようにしてから、RET 命令を実行しなければなりません。サブルーチンの中で、PUSH 命令の実行回数と POP 命令の実行回数が同じになるようにして下さい。

例題 6-1 ‘A’～‘Z’ の文字を表示（改良版 1）

問題： SIO へ ‘A’～‘Z’ の文字を連続して出力するプログラムを、前ページの 1 文字出力サブルーチン (PUTCH) を使用して作りなさい。

考え方： 基本的な考え方は「例題 5-9 ‘A’～‘Z’ の文字を表示」と同じです。1 文字出力サブルーチンは G0 レジスタにセットされた値を SIO へ出力します。メインルーチンは、G0 レジスタに ‘A’～‘Z’ の文字の文字コードをセットして、サブルーチンを呼び出します。

フローチャート： サブルーチンの呼び出しとサブルーチンは次のように描きます。



プログラム： CALL, RET 命令がスタックを使用するので、まず、SP の初期化をします。G0 レジスタを文字コードの格納に、G1 レジスタを「T ビット」のチェックに用います。

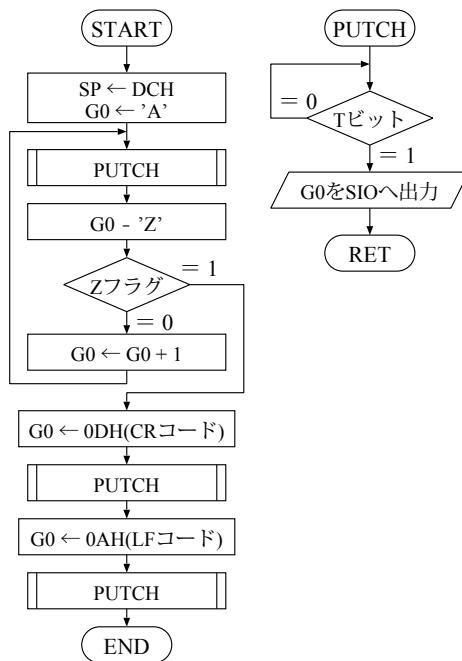
番地	機械語	ラベル	ニーモニック
02	SIOD	EQU	02H
03	SIOS	EQU	03H
00	1F DC	START	LD SP, #ODCH
02	13 41		LD G0, #'A'
04	B0 OF	LOOP	CALL PUTCH
06	53 5A		CMP G0, #'Z'
08	A4 OE		JZ OWARI
0A	33 01		ADD G0, #1
0C	A0 04		JMP LOOP
OE	FF	OWARI	HALT
OF	C4 03	PUTCH	IN G1, SIOS
11	67 80		AND G1, #80H
13	A4 0F		JZ PUTCH
15	C3 02		OUT G0, SIOD
17	EC		RET

例題 6-2 ‘A’～‘Z’ の文字を表示（改良版 2）

問題： SIO へ ‘A’～‘Z’ の文字を連続して出力した後、SIO へ改行コードを出力するプログラムを作りなさい。

考え方： サブルーチン (PUTCH) をメインルーチンの箇所から呼び出します。

フローチャート： 改行するため、CR, LF を出力します。



プログラム： PUTCH ルーチンは、「例題 6-1 ‘A’～‘Z’ の文字を表示（改良版 1）」と同様なので省略しました。

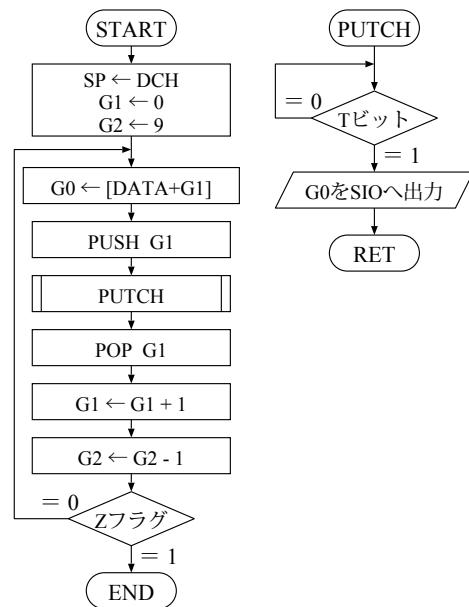
番地	機械語	ラベル	ニーモニック
02	SIOD		EQU 02H
03	SIOS		EQU 03H
00	1F DC	START	LD SP, #0DCH
02	13 41		LD G0, #'A'
04	B0 17	LOOP	CALL PUTCH
06	53 5A		CMP G0, #'Z'
08	A4 OE		JZ OWARI
0A	33 01		ADD G0, #1
0C	A0 04		JMP LOOP
0E	13 OD	OWARI	LD G0, #13
10	B0 17		CALL PUTCH
12	13 OA		LD G0, #10
14	B0 17		CALL PUTCH
16	FF		HALT
17	C4 03	PUTCH	...

例題 6-3 文字列出力（改良版 1）

問題： SIO へローマ字で自分の名前を出力するプログラムを作りなさい。

考え方： 「例題 5-7 文字列出力 1」をサブルーチンを使用して作りなおします。

フローチャート： G1 レジスタが PUTCH サブルーチンで破壊される（T ビットのチェックで使用します。）ので、メインルーチン側で G1 レジスタをスタックに保存しています。



プログラム： PUTCH ルーチンは省略します。

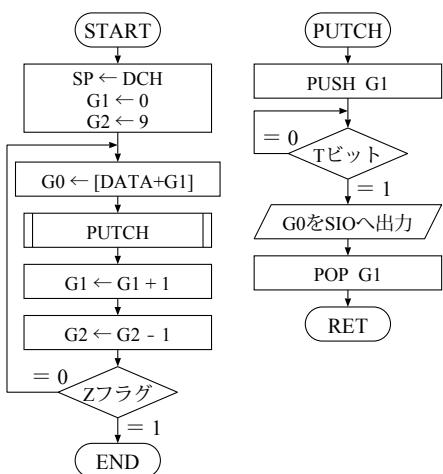
番地	機械語	ラベル	ニーモニック
02			EQU 02H
03			EQU 03H
00	1F DC	START	LD SP, #0DCH
02	17 00		LD G1, #0
04	1B 09		LD G2, #9
06	11 1C	LOOP	LD G0, DATA, G1
08	D4		PUSH G1
09	B0 13		CALL PUTCH
0B	D6		POP G1
0C	37 01		ADD G1, #1
0E	4B 01		SUB G2, #1
10	B4 06		JNZ LOOP
12	FF	END	HALT
13	C4 03	PUTCH	IN G1, SIOS
...
1C	53 48	DATA	DC "SHIGEMURA"
...	...		

例題 6-4 文字列出力（改良版 2）

問題：SIO ヘローマ字で自分の名前を出力するプログラムを作りなさい。

考え方：「例題 5-7 文字列出力 1」をサブルーチンを使用して作りなおします。

フローチャート：PUTCH サブルーチンが G1 レジスタを破壊しないようにしました。「例題 6-3 文字列出力（改良版 1）」より完成度の高い PUTCH サブルーチンです。



プログラム：PUTCH ルーチンも掲載します。

番地	機械語	ラベル	ニーモニック	
02		SIOD	EQU	02H
03		SIOS	EQU	03H
00	1F DC	START	LD	SP, #0DCH
02	17 00		LD	G1, #0
04	1B 09		LD	G2, #9
06	11 1C	LOOP	LD	G0, DATA, G1
08	B0 11		CALL	PUTCH
0A	37 01		ADD	G1, #1
0C	4B 01		SUB	G2, #1
0E	B4 06		JNZ	LOOP
10	FF	END	HALT	
11	D4	PUTCH	PUSH	G1
12	C4 03	WAIT	IN	G1, SIOS
14	67 80		AND	G1, #80H
16	A4 12		JZ	WAIT
18	C3 02		OUT	G0, SIOD
1A	D6		POP	G1
1B	EC		RET	
1C	53 48 49	DATA	DC	"SHIGEMURA"
1F	47 45 4D			
22	55 52 41			

問題

1. SIO から 1 文字を入力するサブルーチン (GETCH) を作成しなさい。GETCH は、入力した文字の文字コードを G0 に格納して戻るものとします。
2. 前出の 1 文字出力サブルーチン (PUTCH) と GETCH を利用し、「例題 5-10 echo プログラム」を作りなoshinaさい。
3. 「例題 5-3 割算を計算する」を参考に、割算サブルーチン DIV を作成しなさい。DIV は、G0 に割られる数、G2 に割る数をセットして呼び出され、G1 に商、G0 に余りを格納して戻ります。
4. 「例題 5-6 シフトを用いた高速乗算」を参考に、G0 の数値の 10 倍を計算し G0 に求めるサブルーチン MUL10 を作成しなさい。

ラベル	ニーモニック	ステート
MS1	PUSH GO	3
	LD GO,#n	4
MATU	SUB GO,#1	4
	JZ KAERU	3
KAERU	JMP MATU	3
	POP GO	4
	RET	3

図 6.9 1ms タイマーサブルーチン

6.4 時間の計測

コンピュータで、正確な時間を計る必要がある場合があります。時間を計測するための専用の回路を使用できる場合もありますが、TeCのような小規模マイコンは専用の回路を持っていないことがあります。そこで、プログラムだけで時間を計測する工夫が必要になります。

6.4.1 マシンステート

プログラムだけで一定の時間が経過するのを待つには、各命令の実行に必要な時間を調べて、ちょうど目的の時間が必要な命令の組合せを実行させます。

「図 B.1 TeC7 命令表」にステート数と書かれた欄があります。この数値が命令の実行に要する時間を表します。例えば、NO 命令はステート数 2 の命令ですので、2 マシンステートの時間が必要になります。

TeC の場合、1 マシンステートは、回路の動く基準になるクロック信号の 1 周期分になります。TeC のクロック信号は、2.4576MHz ですので、1 マシンステートは、 $1/(2.4576 \times 10^6) = 0.4069 \times 10^{-6} = 0.4069\mu s$ です。例えば、NO 命令はステート数が 2 なので、実行に $0.4069\mu s \times 2 = 0.8138\mu s$ の時間がかかります。他の命令も、同様に実行時間が決まります。

6.4.2 1ms タイマ（マシンステートの応用）

マシンステートの合計を調節して、実行にちょうど 1ms の時間がかかるサブルーチンを作ります。クロックの周波数から、1 秒が 2.4576×10^6 マシンステートになりますので、1ms は、 $(2.4576 \times 10^6) \times (1 \times 10^{-3}) = 2,457.6$ マシンステートになります。

実際に、2,458 マシンステートを要するサブルーチンを作ります。ステート数が多いので繰り返しを使用しないと、うまくいきそうにありません。繰り返しを利用したプログラムは、図 6.9 のようになります。

ラベル	ニーモニック
START	; メインルーチン
	LD SP,#ODCH
	CALL MS200
	HALT
MS200	; 200ms サブルーチン
	PUSH GO
	LD GO,#200
L1	CALL MS1
	SUB GO,#1
	JNZ L1
	POP GO
	RET
MS1	; 1ms サブルーチン
	PUSH GO
	LD GO,#244
MATU	SUB GO,#1
	JZ KAERU
	JMP MATU
KAERU	POP GO
	RET

図 6.10 0.2 秒タイマーサブルーチン

このプログラムの実行に要するステート数は、繰り返し回数を n とすると、 $3 + 4 + (4 + 3 + 3) \times (n - 1) + 4 + 3 + 4 + 3$ となります。ステート数が 2,458 になるような n を計算すると、 n は 244 になります（7 ステート不足）。図 6.9 のプログラムで n を 244 にしたものが、実行に約 1ms かかるサブルーチンになります。

6.4.3 0.2 秒タイマ（入れ子サブルーチンの利用）

1ms タイマーサブルーチンを利用すると、もっと長い時間のタイマーサブルーチンを簡単に作ることができます。0.2 秒タイマルーチン（図 6.10 の MS200 サブルーチン）は、1ms タイマーサブルーチンを 200 回呼び出すように作ります。「サブルーチンの中から別のサブルーチンを呼び出すこと」を「サブルーチンの入れ子」と言います。ここでは「サブルーチンの入れ子」を利用していきます。

図 6.10 のプログラム全体では、MS200 サブルーチンを 5 回呼び出して、実行に約 1 秒かかるプログラムの例になっています。

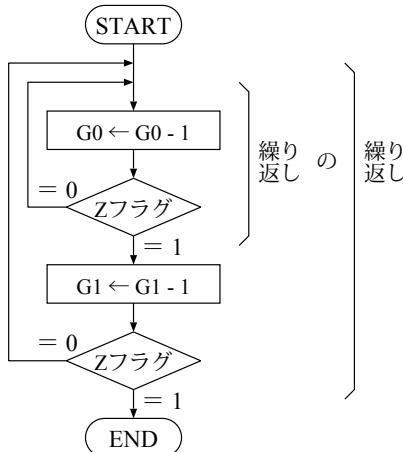


図 6.11 2重ループ

6.4.4 1秒タイマ（多重ループの利用）

約 1ms のタイマを 200 回呼び出すサブルーチンを 5 回呼び出す方法では、誤差がたまって、正確な 1 秒タイマではなくなっている可能性があります。正確な 1 秒タイマを、1 から作りなおします。

1 秒タイマは、2,457,600 マシンステートのプログラムになります。1ms タイマでは、繰り返し 1 回が 10 ステートでした。同じステート数だとすると、 $2,447,600/10 = 244,760$ 回 ループを繰り返す必要があります。カウンタに使用したレジスタは 8 ビットですから、256 回のカウントが限界です。そこで、図 6.11 に示すフローチャートのように繰り返しを更に繰り返す（2 重ループ）プログラムを作成する必要があります。

ところが、256 回を 256 回繰り返しても、まだ、繰り返し回数の 2,447,600 回に足りません。そこで、実際には「「繰り返し」の繰り返し」の繰り返し（3 重ループ）を作ります。図 6.12 にプログラムを示します。繰り返し回数は、プログラムを書いてプログラム各部のステート数が定まった後で、合計のステート数が 2,457,600 に近くなる組み合わせを PC のプログラムでしらみつぶしで探して決めました。

番地	機械語	ラベル	ニーモニック
00	13 6C	START	LD G0,#49 ; 4
02	17 CC	L1	LD G1,#20 ; 4
04	1B 07	L2	LD G2,#245 ; 4
06	4B 01	L3	SUB G2,#1 ; 4
08	A4 0C		JZ L4 ; 3
0A	A0 06		JMP L3 ; 3
0C	47 01	L4	SUB G1,#1 ; 4
0E	A4 12		JZ L5 ; 3
10	A0 04		JMP L2 ; 3
12	43 01	L5	SUB G0,#1 ; 4
14	A4 18		JZ L6 ; 3
16	A0 02		JMP L1 ; 3
18	00	L6	NO ; 2
1A	FF		HALT ; 3

図 6.12 3重ループを用いた 1 秒タイマー

問題

- 0.2 秒タイマサブルーチンを使用した、1 秒タイマプログラムを入力して実行しなさい。
- 0.2 秒タイマサブルーチンを利用して、ブザーを 1 秒間隔で 0.2 秒間鳴らすプログラムを作りなさい。このプログラムは STOP を押すまで繰り返し実行するものとします。
- 多重ループを利用した 1 秒タイマプログラムを入力して実行しなさい。
- 2 重ループの練習として、SIO に ‘A’ 10 文字の行を、5 行出力するプログラムを作りなさい。
- 入れ子サブルーチンの練習として、SIO に ‘A’ 10 文字の行を、5 行出力するプログラムを作りなさい。(1 行出力サブルーチンを 5 回呼び出す。1 行出力サブルーチンは、1 文字出力サブルーチンを 10 回呼び出す。)
- 最初の 3 分間は 1 秒毎にブザーを鳴らし、3 分経過したらブザーを鳴らしっぱなしするプログラム（3 分タイマ）を作りなさい。

番地	機械語	ラベル	ニーモニック	
02		SIOD	EQU	2
03		SIOS	EQU	3
00	1F DC	START	LD	SP, #0DCH
02	14 27		LD	G1, DATA
04	1B 08		LD	G2, #8
06	13 31	L1	LD	G0, #'1'
08	95		SHLL	G1
09	A8 0D		JC	L2
0B	13 30		LD	G0, #'0'
0D	B0 1C	L2	CALL	PUTCH
0F	4B 01		SUB	G2, #1
11	B4 06		JNZ	L1
13	13 0D	L3	LD	G0, #0DH
15	B0 1C		CALL	PUTCH
17	13 0A		LD	G0, #0AH
19	B0 1C		CALL	PUTCH
1B	FF		HALT	
1C				
1C	D4	PUTCH	PUSH	G1
1D	C4 03	WAIT	IN	G1, SIOS
1F	67 80		AND	G1, #80H
21	A4 1D		JZ	WAIT
23	C3 02		OUT	G0, SIOD
25	D6		POP	G1
26	EC		RET	
27	CA	DATA	DC	OCAH

図 6.13 2進数を表示するプログラム

6.5 数値の入出力

これまでに SIO を使用した文字の入出力を勉強しました。ここでは数値の入出力を扱います。

6.5.1 2進数の出力

データを 2進数として表現したものを人間に読める形式で SIO に出力します。ビットの 0 は文字の ‘0’ に、ビットの 1 は文字の ‘1’ に変換します。図 6.13 に 1 バイ特のデータを表示するプログラムを示します。

このプログラムは、DATA 番地の内容を上位ビットから順に ‘0’, ‘1’ の文字に変換し、SIO へ出力します。8 ビット分の出力が終わると、CR (0DH), LF (0AH) を出力して画面を改行します。文字の出力には前出の PUTCH サブルーチンを使用します。パソコンの画面に、DATA 番地のデータ CAH を 2進数で表した，“11001010” が表示されます。

番地	機械語	ラベル	ニーモニック	
02		SIOD	EQU	2
03		SIOS	EQU	3
00	1F DC	START	LD	SP, #0DCH ; 上位桁の出力
02	14 38		LD	G1, DATA
04	97		SHRL	G1
05	97		SHRL	G1
06	97		SHRL	G1
07	97		SHRL	G1
08	11 28		LD	GO, HSTR, G1
0A	B0 1D		CALL	PUTCH
0C	14 38		;	下位桁の出力
0E	67 0F		LD	G1, DATA
10	11 28		AND	G1, #0FH
12	B0 1D		LD	GO, HSTR, G1
14			CALL	PUTCH
14	13 0D		;	改行の出力
16	B0 1D		LD	G0, #0DH
18	13 0A		CALL	PUTCH
1A	B0 1D		LD	GO, #0AH
1C	FF		CALL	PUTCH
1D			HALT	
1D	D4	PUTCH	;	1 文字出力
1E	C4 03	WAIT	PUSH	G1
20	67 80		IN	G1, SIOS
22	A4 1E		AND	G1, #80H
24	C3 02		JZ	WAIT
26	D6		OUT	GO, SIOD
27	EC		POP	G1
28			RET	
28	30 31 32 33	HSTR	;	16進数字
2C	34 35 36 37		DC	"01234567"
30	38 39 41 42		DC	"89ABCDEF"
34	43 44 45 46		;	出力するデータ
38	CA	DATA	DC	OCAH

図 6.14 16進数を表示するプログラム

6.5.2 16進数の出力

DATA 番地のデータを 16進数で SIO に出力するプログラムを図 6.14 に示します。

まず、データの上位 4 ビットを取り出し、その値から ‘0’～‘F’ の 1 文字を選択し SIO へ出力します。次に、下位 4 ビットを用いて同様の出力をします。最後に、CR (0DH), LF (0AH) を出力し画面を改行します。パソコンの画面に “CA” が表示されます。

ラベル	ニーモニック	コメント
PUTDEC	LD SP,#ODCH	; SP 初期化
	LD G0,DATA	; 割られる数
	LD G2,#10	; 割る数
	CALL DIV	; 割算
	ST G0,D1	; 余り (1位桁)
	PUSH G1	; 商を
	POP G0	; 割られる数に
	CALL DIV	; 割算
	ST G0,D2	; 余り (10位桁)
	ST G1,D3	; 商 (100位桁)

図 6.15 各桁に分する部分

6.5.3 10進数の出力

DATA 番地のデータを 10 進数で SIO に出力するプログラムを考えましょう。扱うデータは 8 ビットの符号無し 2 進数 (0 ~ 255) とします。10 進数で表示するには、10 進数の一桁一桁に分解した後、一桁毎に対応する数字に変換して出力します。

各桁への分解

次のような手順で数値を一桁一桁に分解します。下にデータが 123 だった場合の計算例を示しますので、計算例と比較しながら手順を確認して下さい。

1. データを 10 で割って商と余りを求めます。この時、余りが最下位桁 (1 位桁) の値です。
2. 商を更に 10 で割って新しい商と余りを求めます。新しい余りが下から 2 衔目 (10 位桁) の値です。
3. 新しい商は下から 3 衔目 (100 位桁) の値になります。

計算例

10) 123	
10) 12	… 3 (余り 3 が 1 位桁の値)
1	… 2 (余り 2 が 10 位桁の値)
	(商 1 が 100 位桁の値)

以上の手順をプログラムにするためには、割算機能が必要です。ここでは、「例題 5-3 割算を計算する」をサブルーチン化して DIV と言う名前で準備済みと仮定します。図 6.15 は割算サブルーチン DIV を使用した桁への分解プログラム (部分) です。各桁の値は、D1, D2, D3 の 3 バイトに格納されます。後で、これらの値を上の桁から順に出力します。

ラベル	ニーモニック	コメント
	LD G0,D3	; 100 位桁の数値
	ADD G0,#'0'	; 文字コードへ変換
	CALL PUTCH	; SIO へ出力

図 6.16 一桁目を数字に変換し出力する部分

各桁の出力

桁への分解ができたら、分解した各桁を上の桁から順に数字に変換して SIO へ出力します。数字の文字コードが ‘0’ ~ ‘9’ まで連続していることを利用すると、数値から数字への変換は簡単にできます。

$$\text{数字} = \text{数値} + '0' \text{ の文字コード}$$

変換結果を PUTCH サブルーチンを利用して SIO へ出力します。図 6.16 は 100 位桁の値を数字に変換し出力するプログラム (部分) です。10 位桁、1 位桁も同様に出力すれば 3 衔の数値を表示できます。

6.5.4 10 進数の入力

10 進数の出力ができるようになったので、今度は入力を考えましょう。10 進数の出力と逆の手順で行います。まず、一桁毎に入力し数字を数値に変換します。次に、各桁の値を合成して一つの数値にします。

各桁の入力

入力は符号無し 8bit 2 進数で表現できる 0 ~ 255 の数値とします。今回はプログラムの作りやすさを優先して、3 衔の数字しか入力されない前提で考えます。100 未満の数値を入力するときは、“012” のように上の 1 衔に ‘0’ を入力します。10 未満の数値を入力するときは、“001” のように上の 2 衔に ‘0’ を入力します。

1 文字入力し入力した文字の文字コードから ‘0’ の文字コードを引きます。これで、数字に対応した数値が求められます。入力された各桁の値は、メモリ上の領域に保存しておきます。

$$\text{数値} = \text{数字} - '0' \text{ の文字コード}$$

ここまで手順をプログラムにすると図 6.17 のようになります。プログラムの中で 1 文字入力 (GETCH) 每に 1 文字出力 (PUTCH) しているのは、入力した文字がパソコンの画面に表示されるようにするためです。

ラベル	ニーモニック	コメント
GETDEC	LD SP,#ODCH	; SP 初期化
	CALL GETCH	; 1 文字入力
	CALL PUTCH	; エコーバック
	SUB G0,#'0'	; 文字コードから値に
	ST G0,D3	; 100 位桁
	CALL GETCH	; 1 文字入力
	CALL PUTCH	; エコーバック
	SUB G0,#'0'	; 文字コードから値に
	ST G0,D2	; 10 位桁
	CALL GETCH	; 1 文字入力
	CALL PUTCH	; エコーバック
	SUB G0,#'0'	; 文字コードから値に
	ST G0,D1	; 1 位桁

図 6.17 3 桁入力し数値に変換してメモリに保存する部分

ラベル	ニーモニック	コメント
	LD G0,D3	; 100 位桁
	CALL MUL10	; × 10
	ADD G0,D2	; 10 位桁
	CALL MUL10	; × 10
	ADD G0,D1	; 1 位桁
	ST G0,DATA	; 結果を保存

図 6.18 各桁の値を合成する部分

各桁の値の合成

下の式で目的の値を求めることができます。2 行目のように計算すれば 10 倍を計算するサブルーチンを 2 回呼び出せば良いことになります。

$$\begin{aligned} \text{値} &= 100\text{位桁} \times 100 + 10\text{位桁} \times 10 + 1\text{位桁} \\ &= ((100\text{位桁} \times 10) + 10\text{位桁}) \times 10 + 1\text{位桁} \end{aligned}$$

この計算をプログラムにすると図 6.18 のようになります。ここで MUL10 は、G0 値の 10 倍を計算するサブルーチンです。予め、「例題 5-6 シフトを用いた高速乗算」を参考に、MUL10 を作成しておく必要があります。

掛算の回数

一般に、掛算や割算は時間のかかる計算です。TeC のような掛算命令や割算命令を持たない小さなコンピュータにとっては特に時間がかかります。掛け算や割算の回数は少なくするべきです。「各桁の値の合成」で掛け算の回数が少なくなるように式を変形したのは、そのような意味からです。

問題

1. SIO から入力した文字の文字コードを 16 進数で出力するプログラムを作成しなさい。(1 文字入力サブルーチン (GETCH), 16 進数出力サブルーチン (PUTHEX) を作成し、これらを用いてプログラムを完成しなさい。)
2. 本文中のプログラムを参考に、DATA 番地のデータを 10 進数で出力するプログラムを完成しなさい。
3. 10 進数の出力プログラムを、出力する数値の桁数に合わせて先行する余分な ‘0’ が出力されないように改良しなさい。
4. 10 進数の出力プログラムを、D1, D2, D3 領域の代わりにスタックを使用するように改造しなさい。
5. 本文中のプログラムを参考に、10 進数を入力し DATA 番地に格納するプログラムを作成しなさい。
6. 10 進数を入力するプログラムを、数字以外が入力されるまで入力を受け付けるように改造しなさい。(3 桁固定ではなく、10[Enter] や 1[Enter] で入力できるプログラムにする。)
7. 10 進数を入力し、10 加えた値を 10 進数で出力するプログラムを作成しなさい。(10 進数入力サブルーチン (GETDEC), 10 進数出力サブルーチン (PUTDEC) を作成し、これらを用いてプログラムを完成しなさい。)
8. 二つの 10 進数を入力し、和を 10 進数で出力するプログラムを作成しなさい。
9. ゼロが入力されるまで 10 進数を入力し、合計を 10 進数で出力するプログラムを作成しなさい。

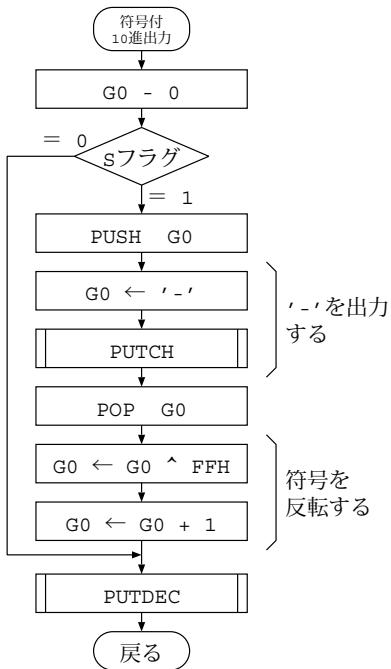


図 6.19 符号付き 10 進出力

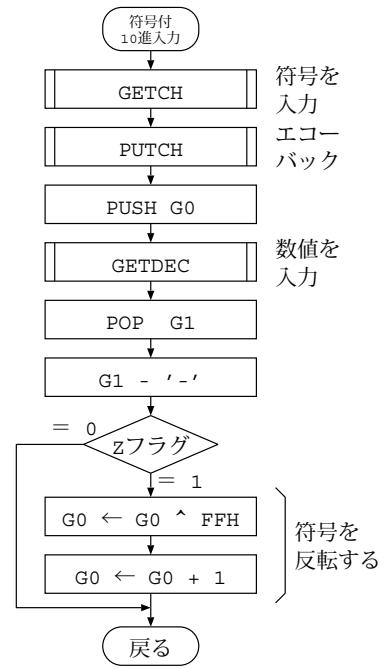


図 6.20 符号付き 10 進入力

6.6 符号付数の入出力

「[2.3 負数の表現](#)」で学んだように、負の数は2の補数を用いて表現します。TeCは8bit符号付2進数を扱うので-128～+127の数値を扱うことができます。

データが符号付であるか符号無しであるかは、そのデータをプログラムがどのように扱うかで決まります。特にデータの外部表現を左右する入出力ルーチンは、処理内容がはっきり区別されます。

6.6.1 符号付10進数の出力

図6.19にG0に格納された符号付2進数の値をSIOへ出力するサブルーチンのフローチャートを示します。なお、G0に格納した1文字を出力するPUTCHサブルーチン、G0に格納した値を10進数として出力するPUTDECサブルーチンが別に必要です。

まず、G0の値と0を比較し、G0の値が正か負かを判断します。負の場合は、「-」を出力した後、G0の値の符号を反転します。符号の反転は、「[2.3.6 2の補数から元の数を求める手順](#)」で学習したように、「ビット反転した後、1を加える」ことで実行できます。ビットの反転にはXOR命令を使用します。最後に、PUTDECサブルーチンを用いてG0の値を10進数で出力します。

6.6.2 符号付10進数の入力

次のような形式の10進数を入力します。

正の数：空白 数字 数字 数字

負の数：「-」 数字 数字 数字

図6.20に符号付数値を入力するサブルーチンのフローチャートを示します。なお、SIOから1文字を入力しG0に格納するサブルーチンGETCH、SIOから10進数を入力しG0に格納するサブルーチンGETDECが、予め準備してあるものとします。

まず、符号を入力しスタックに退避します。続いて10進数をG0に入力します。退避しておいた符号をG1に取り出し、文字「-」と比較します。同じなら、G0の符号を反転します。

問題

1. 符号付の10進数出力サブルーチン(PUTSDEC)を作成しなさい。
2. 符号付の10進数入力サブルーチン(GETSDEC)を作成しなさい。
3. ゼロが入力されるまで符号付の10進数を入力し、合計を符号付10進数で出力するプログラムを作成しなさい。

番地	機械語	ラベル	ニーモニック
1E	53 48 49 47	DATA	DC "SHIGEMURA",0
22	45 4D 55 52		
26	41 00		

図 6.21 文字列データの表現例

6.7 アドレスデータ

番地をデータとして扱えると便利なことがあります。番地（＝アドレス）のデータなので、ここではアドレスデータと呼びます。C 言語を勉強したことのある人は、ポインタのことだ言えばピンとくると思います。アドレスデータを使用すると便利な例としては、サブルーチンにデータの置き場所を教える場合が考えられます。

6.7.1 TeC のアドレスデータ

TeC では、インデクストモードのアドレッシングを用いて、レジスタで指定された特定アドレスのデータをアクセスすることができます。例えば、12H 番地にあるデータを G0 レジスタにロードするプログラムは、次のようにになります。

```
LD  G1,#12H
LD  G0,0,G1
```

G1 インデクストモードでは、データのアドレスを「第 2 バイト + G1」で求めます。このプログラムの場合、第 2 バイトが 0 ですから、G1 の値がそのままデータのアドレスになります。つまり、G1 に格納されたアドレスデータを用いて、そのアドレスをアクセスします。

6.7.2 文字列出力サブルーチン

アドレスデータの使用例として、文字列出力サブルーチンを作成してみましょう。サブルーチンには出力すべき文字列を渡す必要があります。ここでは文字列を「図 6.21 文字列データの表現例」に示すような文字コード 0 で終わるバイト列として表現することにします。（この文字列表現方式は、C 言語と同じです。）

サブルーチンにデータを渡す方法として、これまでにはレジスタを使用してきました。例えば 1 文字出力サブルーチン (PUTCH) は、出力したい文字の文字コードを G0 に格納して呼び出されるようになっていました。文字列の場合はデータの量が多いのでレジスタにデータ全体を格納してサブルーチンに渡すことができません。そこで、文字列データの置いてあるアドレスを渡すこと

にします。

図 6.22 のプログラムは、文字列出力サブルーチン (PUTSTR) が output する文字列のアドレスを受け取るようした例です。G1 に文字列のアドレスをセットして PUTSTR を呼び出します。なお、プログラム中「#STR1」のような記述は STR1 ラベルの値を意味します。どのような機械語へ変換されているか確認してください。

6.7.3 ジャンプテーブル

これまで、データのアドレスばかり考えてきましたが、プログラムのアドレスも同様に扱うことができます。インデクストモードのアドレッシングは、ジャンプ命令や CALL 命令でも使用できます。

このことを利用すると、表に登録してあるいくつかのサブルーチンから一つを選んで実行するプログラムをつくることができます。サブルーチンを登録してある表のことを、ここでは、ジャンプテーブルと呼びます。

ジャンプ命令を表にする場合

ジャンプ命令や CALL 命令のインデクストアドレッシングはジャンプ先アドレスをインデクスレジスタを用いて計算します。例えば、次の JMP 命令は A + G2 番地にジャンプします。

```
JMP  A,G2
```

次のプログラムは、G2 の値を使用して TBL 以下のどれか一つの JMP 命令を選択し、PRG0, PRG1, … のいずれかにジャンプする例です。つまり、Java 言語や C 言語の switch 文に似た動きをします。JMP 命令は 2 バイトの命令なので、SHLL を用いて G2 の値を 2 倍にしています。

```
LD  G2,N
SHLL G2
JMP  TBL,G2
TBL JMP  PRG0
      JMP  PRG1
      ...
...
```

CALL 命令を用いてサブルーチンを呼び出すこともできます。CALL 命令の次の命令にサブルーチンから戻ってきてるので、注意して下さい。

番地	機械語	ラベル	ニーモニック
02		SIOD	EQU 02H
03		SIOS	EQU 03H
00			
00	1F DC	START	LD SP,#0DCH
02	17 2F		LD G1,#STR1
04	B0 13		CALL PUTSTR
06	17 41		LD G1,#CRLF
08	B0 13		CALL PUTSTR
0A	17 39		LD G1,#STR2
0C	B0 13		CALL PUTSTR
0E	17 41		LD G1,#CRLF
10	B0 13		CALL PUTSTR
12	FF		HALT
13			;
13		PUTSTR	文字列出力ルーチン
13	D0		PUSH G0
14	D4		PUSH G1
15	11 00	LOOP	LD G0,0,G1
17	53 00		CMP G0,#0
19	A4 21		JZ RETURN
1B	B0 24		CALL PUTC
1D	37 01		ADD G1,#1
1F	A0 15		JMP LOOP
21	D6	RETURN	POP G1
22	D2		POP G0
23	EC		RET
24			;
24		PUTCH	1 文字出力ルーチン
24	D4		PUSH G1
25	C4 03	WAIT	IN G1,SIOS
27	67 80		AND G1,#80H
29	A4 25		JZ WAIT
2B	C3 02		OUT G0,SIOD
2D	D6		POP G1
2E	EC		RET
2F			;
2F	53 48	STR1	DC "SHIGEMURA",0
31	49 47		
33	45 4D		
35	55 52		
37	41 00		
39	54 45	STR2	DC "TETSUJI",0
3B	54 53		
3D	55 4A		
3F	49 00		
41	0D OA	CRLF	DC ODH, OAH, 0
43	00		

LD G2,N
SHLL G2
CALL TBL,G2
サブルーチンから戻る場所
...
TBL JMP PRG0
JMP PRG1
...

アドレスを表にする場合

ジャンプ命令を表にすると表の要素が 2 バイトになります。アドレスだけを表にすると表の要素が 1 バイトで済み、メモリの節約になります。

次のプログラムは、アドレスを表にした例です。G1 の値を使用し、表から PRG0, PRG1, ... のどれかのアドレスを選び G2 にロードします。次に、JMP 命令で G2 の内容が表す番地にジャンプします。

LD G1,N
LD G2,TBL,G1
JMP 0,G2
TBL DC PRG0
DC PRG1
...

次のプログラムは、CALL 命令を用いてサブルーチンを呼び出す例です。

LD G1,N
LD G2,TBL,G1
CALL 0,G2
サブルーチンから戻る場所
...
TBL DC PRG0
DC PRG1
...

問題

1. G1 レジスタで指定された番地から始まる G0 レジスタで指定されたバイト数の領域を、00H で埋めつくすサブルーチンを作りなさい。
2. C 言語の switch 文が、TeC の機械語でどのように表現できるか考察しなさい。

図 6.22 文字列出力サブルーチン

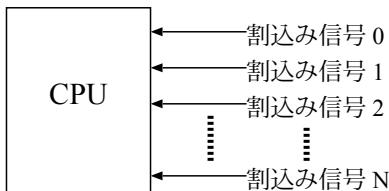


図 6.23 割込み信号

表 6.1 TeC の割込みの種類

名前	意味	ベクタ
INT0	インターバルタイマ割込み	DCH
INT1	SIO 受信割込み	DDH
INT2	SIO 送信割込み	DEH
INT3	コンソール割込	DFH

6.8 割込み (Interrupt)

ノイマン型のコンピュータはプログラムの命令を逐次実行しますので、仕事を順番に処理するのが基本です。しかし緊急の仕事が発生したとき等は、処理中の仕事を後回しにして、緊急の仕事を先に処理しなければならない場合があります。割込みは、そのような緊急の事象をコンピュータに伝えて、優先される処理を割り込ませる仕組です。英語では割込みのことを Interrupt と言います。

割込みは CPU の外部で発生した事象をハードウェアにより CPU に伝えることにより発生します。割込みにはいくつかの種類があり、図 6.23 に示すように、CPU には割込みの種類毎に入力が用意されます。

CPU のフラグには割込みの受付を制御する E フラグ(割込み許可フラグ)が含まれます。E フラグが“1”的時は割込み許可状態です。“0”的時は割込み禁止状態です。割込み許可のとき割込み信号が CPU に入力されると割込みが発生します。禁止のときは許可されるまで割込みの発生が延期されます。

割込みが発生すると、CPU は現在実行中のプログラムを中断し、予め登録された割込み処理プログラム(「割込み処理ルーチン」または「割込みハンドラ」と呼びます)の実行を開始します。割込み処理ルーチンは割込みの種類毎に登録することができます。

6.8.1 TeC の割込み種類

TeC の割込みの種類は 4 種類です。表 6.1 に一覧表を示します。4 種類の割込みには、“INT0”, “INT1”, “INT2”, “INT3”という名前が付いています。ベクタは割込み処理ルーチンを登録するメモリの番地です。(主記憶の DCH～DFH 番地の範囲はベクタと呼ばれる特別な領域です。) 例えば “INT0” の割込み処理ルーチンが 12H 番地から始まる場合は、メモリの DCH 番地に、12H を書き込みます。

インターバルタイマ割込み

“INT0”はインターバルタイマに接続されています。インターバルタイマは指定された時間間隔で繰返し割込みを発生します。指定できる間隔は 1/75 秒～256/75 秒の範囲です。

SIO 受信割込み

“INT1”は SIO に接続されており SIO が文字を受信する度に割込みが発生します。

SIO 送信割込み

“INT2”も SIO に接続されており SIO が次の文字を送信可能になる度に割込みが発生します。

コンソール割込み

“INT3”はコンソールパネルに接続されています。プログラム実行中にユーザがコンソールパネルの WRITE スイッチを押すと割込みが発生します。

6.8.2 TeC の割込み動作

TeC の CPU はプログラム実行中、前の機械語命令を実行し終え、次の機械語命令を実行開始する前に、割込みが発生していないかチェックします。割込みが発生していた場合は次のような動作をします。

1. PSW を, PC, フラグの順でスタックに PUSH する。
2. E フラグを“0”にリセットし割込み禁止にする。
3. 割込みの種類 (INT0～INT3) に対応するベクタから、割込み処理ルーチンのアドレスを読み込む。
4. 読み込んだアドレスを PC にセットする。

6.8.3 EI (Enable Interrupt) 命令

Enable は「可能にする」という意味の英語です。EI 命令は「E フラグ」を“1”にセットし割込みを許可します。

CPU がリセットされたとき(初期状態)は割込み禁止状態です。プログラムは、SP の初期化や割込みベクタの設定等が完了し、割込みを受け付ける準備ができるとき EI 命令を用いて割込みを許可します。

意味： 割込みを許可する。(E フラグをセットする)

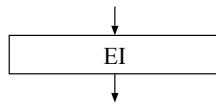
フラグ： C, S, Z フラグは変化しません。E フラグが“1”にセットされます。

ニーモニック： EI

命令フォーマット： EI 命令は 1 バイト長の命令です。

第1バイト	
OP	GR XR
1110 ₂	00 ₂ 00 ₂

フローチャート： 次のように描きます。



6.8.4 DI (Disable Interrupt) 命令

Disable は、「できなくなる」という意味の英語です。DI 命令は「E フラグ」を“0”にリセットし割込みを禁止します。プログラムが割込みを許可したあと、割込まれると都合が悪くなったりと使用します。

割込みが発生し割込み処理ルーチンの実行が始まった時は、自動的に割り込み禁止状態になります。それ以外で割り込み禁止にしたいとき使用する命令です。

意味： 割込みを禁止する。(E フラグをリセットする。)

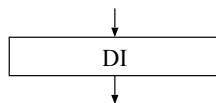
フラグ： C, S, Z フラグは変化しません。E フラグが“0”にリセットされます。

ニーモニック： DI

命令フォーマット： DI 命令は 1 バイト長の命令です。

第1バイト	
OP	GR XR
1110 ₂	00 ₂ 11 ₂

フローチャート： 次のように描きます。



6.8.5 RETI (Return from Interrupt) 命令

割込み処理ルーチンから通常のプログラムへ戻るための、特別な RETI 命令です。割込み処理ルーチンの最後で RETI 命令を実行します。スタックから、フラグ、PC の順に POP し PSW を復元します。

フラグは割込み発生時に E000 0CSZ のビットで構成される 1 バイトデータとしてスタックに保存されています。PSW が復元されると、割込みが発生前のプログラ

ラベル	ニーモニック	コメント
	LD SP, #ODCH	; SP 初期化
	LD GO, #NEXT	; RETI の次番地
	PUSH GO	; スタックに積む
	LD GO, #87H	; フラグの値
	PUSH GO	; スタックに積む
	RETI	; スタックから
		; PC, フラグを POP
NEXT	HALT	; 停止

図 6.24 フラグに値をセットするプログラムの例

ムの実行が再開されます。

この命令はフラグに任意の値をセットするためにも使用できます。プログラム例を図 6.24 に示します。このプログラムは、E フラグ、C フラグ、S フラグ、Z フラグを 1 にセットします。

意味： 割込み処理ルーチンから戻る。

フラグ： E, C, S, Z フラグにスタックから取り出した値がセットされます。

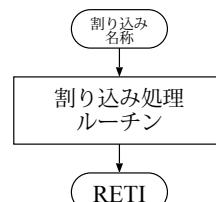
ニーモニック： RETI

命令フォーマット： RETI 命令は 1 バイト長の命令です。

第1バイト	
OP	GR XR
1110 ₂	11 ₂ 11 ₂

動作の詳細： スタックから、フラグ、PC の順に POP し、PSW を割り込み前の状態に復元します。

フローチャート： 次のフローチャートの最後の角を取った四角が RETI 命令に対応します。フローチャートは割り込み処理ルーチン全体を示しています。



6.9 タイマ割込み

一般に、コンピュータには割込みを発生するタイマが内蔵されています。時間を計ったり複数の仕事を切替えるきっかけとして、タイマから発生する割込みを使用するからです。

パソコンでは複数のプログラムが同時に実行されているように見えますが、これは $1/10 \sim 1/100$ 秒程度の間隔で実行するプログラムを切替えることにより、複数のプログラムを同時に実行しているように見せているのです。このとき、プログラムを切替えるきっかけになるのはタイマからの割込みです。

6.9.1 インターバルタイマ割込み

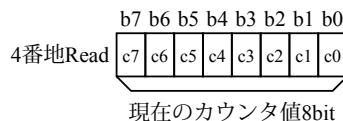
TeC にはプログラムから周期を設定できるインターバルタイマが一つ内蔵されています。インターバルタイマは指定した時間間隔で繰返し割込みを発生します。インターバルタイマには 8 ビットのタイマ・カウンタと 8 ビットの周期レジスタが内蔵されています。

I/O ポート

インターバルタイマの I/O ポートは、4 番地、5 番地に配置されています（「表 5.3 I/O マップ」参照）。

1. タイマ・カウンタ

4 番地を IN 命令で読むとタイマ・カウンタの現在値を読み出すことができます。タイマ動作中、この値は $1/75$ 秒毎にカウントアップされます。そして値が周期レジスタの値と一致したら 0 に戻ります。その後、カウントアップが再開されます。

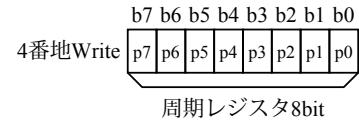


2. 周期レジスタ

周期レジスタ値によって割込みの発生周期が決まります。4 番地に OUT 命令で書き込んだ値が周期レジスタに書き込まれます。書き込む値を n とすると周期は次の式で計算できます。

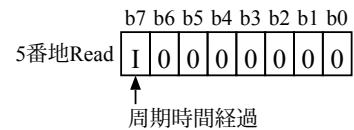
$$\text{周期} = (n + 1)/75\text{秒}$$

周期レジスタの初期値は 1 秒に相当する 74 です。「周期」を変更するとタイマはカウントを停止します。下記のコントロールを使用してスタートし直す必要があります。



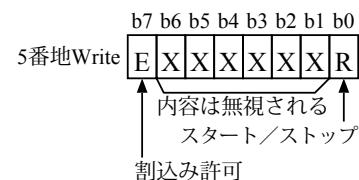
3. ステータス

5 番地を IN 命令で読むとタイマがスタートしてから一周期の時間が経過したかどうかを割込みを用いることなく知ることができます。一周期時間が経過すると b_7 の値が “1” に変化します。 b_7 は「ステータス」を一度読みだすと “0” にクリアされます。その後一周期時間が経過する度に b_7 の値が “1” に変化します。



4. コントロール

タイマ割込みの（許可／不許可）、タイマカウンタのカウント（スタート／ストップ）の情報を 5 番地に OUT 命令で書き込みます。 b_7 が割込みの許可ビット、 b_0 がタイマカウンタのスタートビットです。タイマカウンタをスタートすると、タイマカウンタの値が “00H” にリセットされてからカウントが始まります。



6.9.2 プログラミング例

図 6.25 にインターバルタイマを用いたプログラムの例を示します。このプログラムは 1 秒間隔でブザーの ON/OFF を繰り返します。

メインプログラム

1. スタックポインタの値を初期化します。割込みが発生すると CPU が自動的に PSW (PC とフラグ) をスタックに保存するので、割込みが発生する前にスタックポインタの値を初期化する必要があります。
2. INT0 の割込みベクタに割込みルーチンの番地を書き込みます。INT0 の割込みベクタ DCH 番地に割込み処理ルーチンの先頭番地を書き込みます。

ラベル	ニーモニック	コメント
BUZ	EQU OOH	; ブザーポート
TMRVCT	EQU ODCH	; 割込みベクタ
TMRCNT	EQU 4	; カウンタ
TMRCTR	EQU 5	; コントロール
START	;	メインプログラム
	LD SP,#ODCH	; SP 初期化
	LD G0,#TMRINT	; 割込みルーチンを登録
	ST G0,TMRVCT	; ベクタに登録
	LD G0,#74	; タイマ初期化
	OUT GO,TMRCNT	; 周期=1秒,
	LD G0,#81H	; 割込み許可,
	OUT GO,TMRCTR	; カウント開始
	EI	; CPU の割込許可
WAIT	LD G0,FLG	; フラグを
	CMP G0,#0	; チェック
	JZ WAIT	; 0の間は待つ
	LD G0,VAL	; ブザーポートの
	XOR G0,#01H	; 値を反転して
	ST G0,VAL	; 記録すると
	OUT GO,BUZ	; 同時に出力
	LD G0,#0	; フラグをクリア
	ST G0,FLG	; 次の割込みを
	JMP WAIT	; 待つ
	;	共有変数
FLG	DC 0	; フラグ
VAL	DC 0	; ブザー状態
;	割込みルーチン	
TMRINT	PUSH G0	; 全てのCPU
	PUSH G1	; レジスタを
	PUSH G2	; 保存する
	LD G0,#1	; フラグに
	ST G0,FLG	; 1を書き込む
	POP G2	; 全てのCPU
	POP G1	; レジスタを
	POP G0	; 復旧する
	RETI	; 割込み終了

図 6.25 タイマ割込みプログラムの例

3. インターバルタイマの初期化を行います。1秒毎に割込みが発生するように 74 を周期レジスタに書き込みます。続けてコントロールに 81H を書き込むことで割込み可能な状態でカウントが開始されます。
4. EI 命令を実行して CPU を割込み許可状態にします。これで、割込みを受け付ける準備ができました。ループを実行して割込みの発生を待ちます。TeC は CPU が停止しているときは割込みを受け付けませ

んので、プログラムを終了しないで割込みの発生を待つ必要があります。

5. 割込みが発生すると割込みルーチンにより共有変数 FLG の値が “1” に書き換えられます。FLG の値が “1” になったらブザーの ON/OFF を変更した後、FLG の値を “0” に戻します。

割込みルーチン

1. メインルーチンがインターバルタイマを起動したので、1秒に一度、インターバルタイマ割込み (INT0) が発生します。
2. 割込みが発生すると CPU は PSW (PC とフラグ) の値をスタックに保存した後、割込みベクタに書いてある番地にジャンプします。メインプログラムが INT0 の割込みベクタに割込みルーチンの先頭番地を書き込んでいるので、割込みルーチンへジャンプします。
3. 割込みルーチンは、メインプログラムを実行中の CPU の状態 (コンテキスト) を保存します。PSW は自動的に保存されているので、CPU レジスタ (G0, G1, G2) を保存すればコンテキストが完全に保存されます。(SP は継続使用され、割込みルーチンを終了するときには元に戻っているはずです。) 今回は、割込みルーチンが G0 しか破壊しないと一目で分かるので G0だけ保存すれば十分ですが、一般的には G0, G1, G2 全てを保存します。
4. 割込み処理の内容は FLG 変数に “1” を書き込むことです。
5. 処理が終わったらコンテキストを復元してメインプログラムになります。CPU レジスタは POP 命令で、PSW は RETI 命令で復元されます。

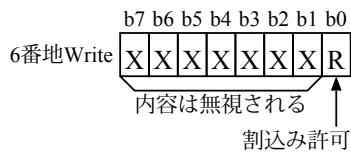
問題

1. 「タイマ割込みプログラムの例」の動作を確認しなさい。
2. “LD G0,#TMRINT” は、どんな機械語に変換されたか確認しなさい。

6.10 コンソール割込み

コンソールパネルの操作で INT3 割込みを発生することができます。コンソール割込みを許可する手順は次の通りです。

1. スタックポインタを初期化する。
2. INT3 割込みベクタにコンソール割込み処理ルーチンの番地を書き込む。
3. コンソール割込み（INT3）許可ビットを ON にする。割込み許可ビットは I/O 6 番地の b_0 です



4. EI 命令で CPU の割込みを許可する。

以上の準備をした上でプログラム実行中にコンソールパネルの WRITE ボタンを押すと割込が発生します。

コンソール割込みの応用例

図 6.26 にコンソール割込みを応用したプログラムの例を示します。プログラムはコンソール割込みとタイマ割込みの両方を使用しています。コンソールパネルの WRITE ボタンが押されるたびに 0.3 秒間ブザーを鳴らします。以下の手順で機能が実現されています。

1. 初期化

メインプログラムはスタックポインタとタイマ等のハードウェアを初期化し、CPU を割込み許可状態にします。初期化が完了したら割込み待ちの無限ループに入れます。

2. コンソール割込み

ユーザが WRITE ボタンを押して割込みが発生すると、コンソール割込みルーチンが起動されます。コンソール割込みルーチン中でブザーを ON にした上でタイマをスタートします。

3. タイマ割込み

タイマがスタートして 0.3 秒後にタイマ割込が発生します。タイマ割り込みルーチンではブザーを OFF にしてタイマを停止します。

ラベル	ニーモニック	コメント
BUZ	EQU OOH	; ブザーポート
TMRVCT	EQU ODCH	; TMR 割込みベクタ
CONVCT	EQU ODFH	; CON 割込みベクタ
TMRCNT	EQU 4	; TMR (周期)
TMRCTR	EQU 5	; TMR コントロール
CONCTR	EQU 6	; CON コントロール
START		; メインプログラム
	LD SP,#ODCH	; SP 初期化
	LD G0,#CONINT	; コンソール割込み
	ST G0,CONVCT	; ルーチン登録
	LD G0,#01H	; コンソール割込み
	OUT G0,CONCTR	; 許可
	LD G0,#TMRINT	; タイマ割込み
	ST G0,TMRVCT	; ルーチン登録
	LD G0,#25	; 周期=0.3SEC
	OUT G0,TMRCNT	; タイマ周期セット
	EI	
WAIT	JMP WAIT	; 無限ループ
		; コンソール割込みルーチン
CONINT	PUSH G0	; レジスタ保存
	LD G0,#01H	;
	OUT G0,BUZ	; BEEP ON
	LD G0,#81H	;
	OUT G0,TMRCTR	; TIMER START
	POP G0	; レジスタ復旧
	RETI	; 戻る
		; タイマ割込みルーチン
TMRINT	PUSH G0	; レジスタ保存
	LD G0,#00H	;
	OUT G0,BUZ	; BEEP OFF
	LD G0,#00H	;
	OUT G0,TMRCTR	; TIMER STOP
	POP G0	; レジスタ復旧
	RETI	; 戻る

図 6.26 コンソール割込みプログラムの例

6.11 入出力割込み

CPU の処理速度と入出力装置の動作速度には大きな差があるので、入出力装置を動かすとき CPU は長い待ち状態になります。入出力装置の動作完了を待って CPU がループを回り続けるだけでは時間が勿体ないので、その間に他の仕事ができる仕組みが望まれます。

そこで、入出力装置は動作が完了したことを CPU に割込みで知らせることができるよう設計してあります。キーボード、マウス、ハードディスク、ネットワーク等のほとんどの入出力装置が、動作完了の割込みを発生する機構を持っています。このような割込みを「入出力割込み」と呼びます。

6.11.1 TeC の入出力割込み

TeC は SIO から入出力割込みを発生することができます。SIO からの割込みは、文字を受信したとき発生する「受信割込み」と、次の文字を送信可能になったとき発生する「送信割込み」の 2 種類があります。これらの割込みを使用するかしないかは、割込み許可ビットにより別々に制御できるようになっています。

SIO 受信割込み

TeC の SIO は文字を受信したとき、INT1 割込みを発生することができます。割込みの発生を許可する手順は次の通りです。

1. スタックポインタを初期化する。
2. INT1 割込みベクタに SIO 受信割込み処理ルーチンの番地を書き込む。
3. SIO の受信割込み許可ビットを ON にする。割込み許可ビットは、I/O 3 番地の b_6 です。（「[5.14.5 I/O ポート](#)」の「コントロール」参照）
4. EI 命令で CPU の割込みを許可する。

文字を受信すると INT1 割込みが発生します。受信した文字を I/O マップ 2 番地の SIO 受信データレジスタ（「[表 5.3 I/O マップ](#)」参照）から読み出すことで INT1 割込みが解除されます。

SIO 送信割込み

TeC の SIO は文字を送信することが可能なとき INT2 割込みを発生することができます。割込みの発生を許可する手順は次の通りです。

1. スタックポインタを初期化する。

2. INT2 割込みベクタに、SIO 送信割込み処理ルーチンの番地を書き込む。
3. SIO の送信割込み許可ビットを ON する。割込み許可ビットは I/O 3 番地の b_7 です。（「[5.14.5 I/O ポート](#)」の「コントロール」参照）
4. EI 命令で CPU の割込みを許可する。

次の文字を送信することができるようになると INT2 割込みが発生します。次に送信する文字を I/O マップ 2 番地の SIO 送信データレジスタ（「[表 5.3 I/O マップ](#)」参照）に書き込みます。これで割込みが解除されます。これ以上、送信する文字が無い場合は、割込み許可ビットを OFF にします。

6.11.2 入出力割込みの使用例

SIO を割込み駆動で使用する例を示します。

SIO 送信割込みの使用

図 [6.27](#) にローマ字で自分の名前を出力するプログラムの例を示します。「[例題 6-4 文字列出力（改良版2）](#)」等と同様なことを割込みを使用して行います。プログラムの動きは次の通りです。

1. メインルーチンで割込みを許可すると、すぐに最初の割込みが発生する。
2. 割込み処理ルーチンの中で最初の文字を SIO データレジスタに書き込む。
3. その後は 1 文字の送信が終了する度に割込みが発生するので、割込み処理ルーチンの中で SIO データレジスタに次の文字を書き込む。
4. 全ての文字を送信したら SIO の送信割込み許可ビットを OFF にし、それ以上の割込みが発生しないようにする。

この例では、メインルーチンは出力が終了するまでループを回りながら待つだけですが、本来は、出力は割込みに任せて、他の処理を行うことができます。

SIO 受信割込みの使用

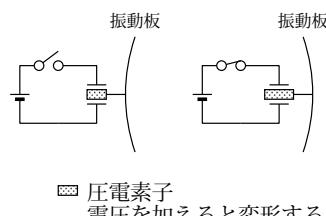
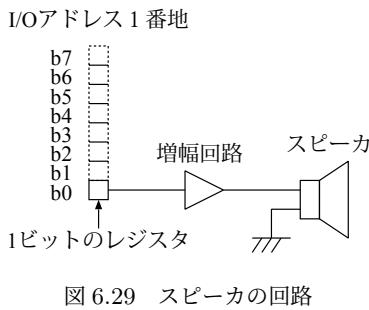
図 [6.28](#) に、SIO から受信した文字（アルファベット小文字）によって、ブザーが鳴る間隔が変化するプログラムを示します。`'a'` よりも `'b'` が、`'b'` よりも `'c'` が、長い間隔になります。`'z'` はプログラムを終了します。図 [6.28](#) では省略していますが、「[6.4.3 0.2 秒タイマ](#)」で作成した MS200 サブルーチンを利用します。実際に実行する場合は MS200 サブルーチンも打ち込んで下さい。

ラベル	ニーモニック	コメント
INT2V	EQU ODEH	
SIOD	EQU 02H	
SIOC	EQU 03H	
		; メインプログラム
START	LD SP,#ODCH	; SP 初期化
	LD GO,#SIOXINT	; 割込みループ登録
	ST GO,INT2V	; チン登録
	LD GO,#80H	; SIO 送信割込み許可
	OUT GO,SIOC	; 込み許可
	LD GO,#DATA	; データの位置
	ST GO,POINTER	; 置セット
	LD GO,#1	; 出力中 Flag
	ST GO,FLAG	; セット
	EI	; 割込み許可
LOOP	LD GO,FLAG	; 出力中は
	CMP GO,#0	; 割込み
	JNZ LOOP	; を待つ
	HALT	
DATA	DC "SHIGEMURA"	
	DC 0	
		; SIO 送信割込み処理ループ
SIOXINT	PUSH GO	
	PUSH G1	
	LD G1,POINTER	; 一文字
	LD GO,O,G1	; 取り出す
	CMP GO,#0	; 文字列の
	JZ OWARI	; 終わりか?
	OUT GO,SIOD	; 送信する
	ADD G1,#1	; 次の文字
	ST G1,POINTER	; に進める
	JMP KAERI	
OWARI	LD GO,#OOH	; SIO 送信割込み許可 OFF
	OUT GO,SIOC	; み許可 OFF
	ST GO,FLAG	; Flag クリア
KAERI	POP G1	
	POP GO	
	RETI	
		; 割込み処理ループのデータ
POINTER	DS 1	; 文字列位置
FLAG	DS 1	; 動作中 FLAG

図 6.27 SIO 送信割込みの使用例

ラベル	ニーモニック	コメント
INT1V	EQU ODDH	; INT1 のベクタ
BUZZ	EQU 00H	
SIOD	EQU 02H	
SIOC	EQU 03H	
		; メインプログラム
START	LD SP,#ODCH	; SP 初期化
	LD GO,#SIORINT	; 割込みルーチン
	ST GO,INT1V	; を登録
	LD GO,#40H	; SIO 受信割込み許可
	OUT GO,SIOC	; 許可ビット ON
	LD GO,#'a'	; 最後に入力した文字='a'
	ST GO,IKEY	; 文字='a'
	EI	; 割込み許可
LOOP	LD GO,IKEY	
	ST GO,KEY	
	CMP GO,#'z'	; 'z' が入力され
	JZ END	; たら終了
	LD GO,#'a'	
L1	CALL MS200	; 200MS 待ち
	CMP GO,KEY	
	JZ L2	
	ADD GO,#1	
	JMP L1	; 割込み待ち
L2	LD GO,#1	
	OUT GO,BUZZ	; ブザー ON
	LD GO,#'a'	
L3	CALL MS200	
	CMP GO,KEY	
	JZ L4	
	ADD GO,#1	
	JMP L3	
L4	LD GO,#0	
	OUT GO,BUZZ	; ブザー OFF
	JMP LOOP	
END	HALT	
KEY	DS 1	
IKEY	DS 1	
		; SIO 受信割込み処理ループ
SIORINT	PUSH GO	
	IN GO,SIOD	; 入力した文字を
	ST GO,IKEY	; IKEY に格納
	POP GO	
	RETI	

図 6.28 SIO 受信割込みの使用例



6.12 マシンステートとスピーカ

TeCには音を鳴らすためのスピーカが準備されています。スピーカにはOUT命令でアクセスします。ここではマシンステートを意識したプログラミングを行いスピーカを鳴らします。

6.12.1 スピーカーの仕組み

図6.29に示すようにI/Oアドレス1番地（「表5.3 I/Oマップ」参照）のLSB (b_0)には1ビットのレジスタが存在します。このレジスタの1/0によりスピーカに加わる電圧が変化するようになっています。なお、図では省略しましたが「5.11.3 OUT（Output）命令」で紹介した「ブザー音源」も同じスピーカに接続されています。

図6.30にスピーカの構造を示します。加えた電圧により振動板が前後に移動します。レジスタの値を1,0,1,0,1,0,1,0と変化させることにより振動板が前後に振動して音ができます。1kHzの音を出したい時はプログラムで1,0書き込みを1秒間に1000回（1000サイクル）行う必要があります。

6.12.2 スピーカ駆動プログラム

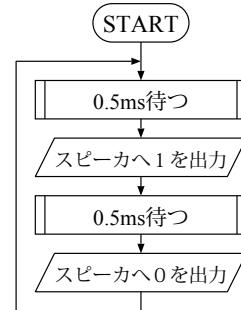
プログラムで1秒間に1000回のペースで1,0を繰り返すためには、時間を計って1/2000秒に1度I/Oポートの書き換えが行われるようにする必要があります。マ

例題6-5 1kHz ブザー

問題：スピーカーから1kHzの音を出すプログラムを作りなさい。

考え方：「6.4.2 1ms タイマ」では、1msのタイマを作りました。今回の問題では、半分の0.5ms毎にスピーカ出力の0/1を書き換えるようにします。

フローチャート：次のようになります。



プログラム：若干のステート数の増減は誤差と考えて無視します。プログラムは、次のようになります。

番地	機械語	ラベル	ニーモニック
00			; 1kHz ブザー
01		SPK	EQU 01H
00	1F DC	START	LD SP,#0DCH
02	B0 10	LOOP	CALL MS5
04	17 01		LD G1,#01H
06	C7 01		OUT G1,SPK
08	B0 10		CALL MS5
0A	17 00		LD G1,#00H
0C	C7 01		OUT G1,SPK
0E	A0 02		JMP LOOP
10			; 0.5ms サブルーチン
10	D0	MS5	PUSH GO
11	13 7A		LD GO,#122
13	43 01	MATU	SUB GO,#1
15	A4 19		JZ KAERU
17	A0 13		JMP MATU
19	D2	KAERU	POP GO
1A	EC		RET

シンステートを使用して時間を計り、一定の時間毎にスピーカポートの0/1を書き換えるプログラムを作ります。「例題6-5 1kHz ブザー」のようなプログラムになります。書き換えの間隔によって音の高さが決まります。

問題

200Hz ブザーを作りなさい。

6.12.3 電子オルゴールプログラム

スピーカ出力プログラムの応用として電子オルゴールプログラムを紹介します。このプログラムは楽譜データの配列を用いて演奏します。データは、音の高さを決めるためのループの繰り返し回数と、音の長さを決めるためのループの繰り返し回数を組み合わせたものです。

フローチャート

図 6.31 にフローチャートを示します。プログラムは 3 重のループになっています。最も内側の二つのループが、スピーカに 1 を出力している時間と、0 を出力している時間を計っています。2 番目のループの繰り返しにより音の継続時間を制御します。最も外側のループは曲のデータを順番に取り出しています。

音符データ

最も内側のループは 20 ステートあります。時間調整のために ADD 命令、DI 命令、NO 命令を使用しています。これら命令の組み合わせで 20 ステートになるように調整しています。20 ステートにしたのは、繰り返し回数を 8 ビットで表現できる範囲にするためです。

スピーカへの出力と音波の関係を図 6.32 に示します。ループの繰り返し回数で時間を計りスピーカへの出力を音波の半サイクル毎に書き換えます。例えば「ラ」の音は $440Hz$ ですので半サイクルの時間は $2,457,600/440/2 = 2,792$ ステートになります。半サイクルの時間をループで測るのでループの繰り返し回数は、 $2,792/20 = 139 = 8B_{16}$ 回となります。この値が音の高さを決めます。

音の長さは、音の出力を何サイクル行うかにより決めます。例えば「ラ」の音は $440Hz$ なので、 $220 = DC_{16}$ サイクルで 0.5 秒になります。このプログラムでは、0.5 秒を 4 分音符一つの時間としました。

「ラ」以外の音も同様に対応するデータ値を決めました。表 6.2 に音データの一覧を示します。

プログラム

図 6.33 に完成したプログラムとデータを示します。プログラム中の ORG 命令は、プログラムのアドレスを指定する命令です。この場合、データを 40H 番地に生成するために使用しました。

このプログラムは、休符が表現できない、同じ高さの音が連続すると一つの音になってしまう等の問題があります。改良を考えて下さい。

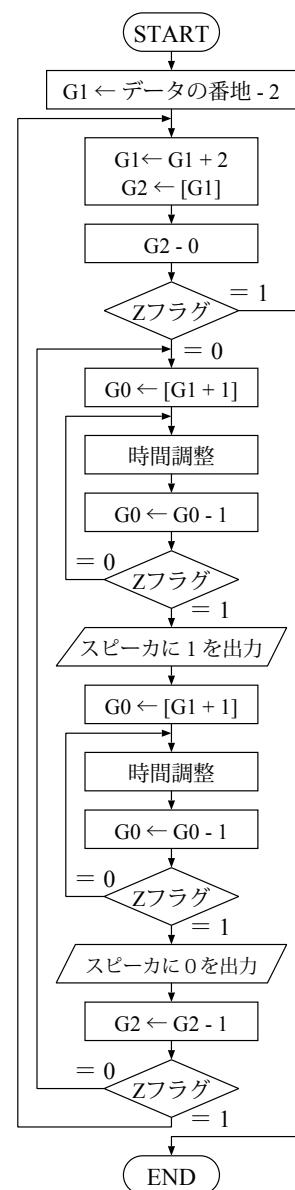


図 6.31 電子オルゴールのアルゴリズム

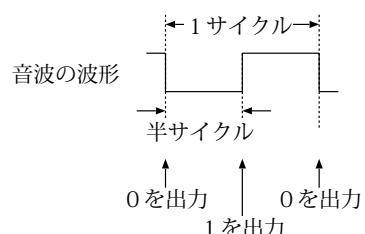


図 6.32 0/1 の出力と音波の関係

番地	機械語	ラベル	ニーモニック
01		SPK	EQU 01H
00			; 電子オルゴール
00	17 3E		LD G1,#TABLE-2
02	37 02	L1	ADD G1,#2
04	19 00		LD G2,0,G1
06	5B 00		CMP G2,#0
08	A4 30		JZ L5
0A	11 01	L2	LD G0,1,G1
0C	3F 00	L3	ADD SP,#0 ;4
0E	3F 00		ADD SP,#0 ;4
10	E3		DI ;3
11	00		NO ;2
12	43 01		SUB G0,#1 ;4
14	B4 0C		JNZ L3 ;3
16	13 01		LD G0,#01H
18	C3 01		OUT GO,SPK
1A	11 01		LD G0,1,G1
1C	3F 00	L4	ADD SP,#0 ;4
1E	3F 00		ADD SP,#0 ;4
20	E3		DI ;3
21	00		NO ;2
22	43 01		SUB G0,#1 ;4
24	B4 1C		JNZ L4 ;3
26	13 00		LD G0,#00H
28	C3 01		OUT GO,SPK
2A	4B 01		SUB G2,#1
2C	B4 0A		JNZ L2
2E	A0 02		JMP L1
30	FF	L5	HALT
31			; ドレミの歌
40		TABLE	ORG 40H
40	C5 E8		DC 0C5H,0E8H ; ド
42	49 D1		DC 049H,0D1H ; レ
44	F7 BA		DC 0F7H,0BAH ; ミ
46	41 E8		DC 041H,0E8H ; ド
48	A5 BA		DC 0A5H,0BAH ; ミ
4A	83 E8		DC 083H,0E8H ; ド
4C	A5 BA		DC 0A5H,0BAH ; ミ
4E	A5 BA		DC 0A5H,0BAH ; ミ
40	DC D1		DC 0DCH,0D1H ; レ
52	52 BA		DC 052H,0BAH ; ミ
54	57 AF		DC 057H,0AFH ; フア
56	57 AF		DC 057H,0AFH ; フア
58	52 BA		DC 052H,0BAH ; ミ
5A	49 D1		DC 049H,0D1H ; レ
5C	AF AF		DC 0AFH,0AFH ; フア
5E	AF AF		DC 0AFH,0AFH ; フア
60	AF AF		DC 0AFH,0AFH ; フア
62	AF AF		DC 0AFH,0AFH ; フア
64	F7 BA		DC 0F7H,0BAH ; ミ
66	57 AF		DC 057H,0AFH ; フア
68	C4 9C		DC 0C4H,09CH ; ソ
6A	62 9C		DC 062H,09CH ; ソ
6C	52 BA		DC 052H,0BAH ; ミ
6E	C4 9C		DC 0C4H,09CH ; ソ
70	A5 BA		DC 0A5H,0BAH ; ミ
72	C4 9C		DC 0C4H,09CH ; ソ
74	C4 9C		DC 0C4H,09CH ; ソ
76	00		DC 000H ; 終了

図 6.33 電子オルゴールプログラム

表 6.2 音データ一覧

音	周波数 (Hz)	長さ	高さ
ド	262	83	E8
ド#	277	8B	DD
レ	294	93	D1
レ#	311	9C	C5
ミ	330	A5	BA
ファ	349	AF	AF
ファ#	370	B9	A6
ソ	392	C4	9C
ソ#	415	D0	93
ラ	440	DC	8B
ラ#	466	E9	83
シ	494	F7	7C
ド	523	FF	75

6.13 まとめ

この章では、教育用コンピュータ TeC の少し高度な機械語プログラミングを学びました。クロス開発環境を用いてアセンブラーで機械語を作成することを前提にしました。

前の章で扱ったのは、ノイマン型コンピュータに最低限必要な機能でした。それに対し、この章では、スタッカー、サブルーチン、割込み等、ノイマン型コンピュータを実用的に使用するために必要な機能を扱いました。

また、マシンステートやジャンプテーブルの利用、数値の入出力等、プログラミングを行う上でよく使用されるテクニックも紹介しました。

付録 A

TeC クロス開発環境

A.1 始めに

TeC クロス開発環境は、教育用コンピュータ TeC (Tokuyama kousen Educational Computer) の機械語プログラムを開発するためのパソコン上で動作するプログラム群です。クロス開発環境は、クロスアセンブラー tasm7、ダウンロードプログラム twrite7 からなります。これらを用いて TeC のプログラムをパソコン上でクロス開発する様子を図 A.1 に示します。

これらの入手とパソコンへのインストール方法は、<https://github.com/tctsigemura/Tasm> を参照して下さい。以下では、UNIX (Linux) または macOS にインストールされた「TeC クロス開発環境」を使用する前提で説明しています。

A.2 アセンブルコマンド

クロスアセンブラーは次の形式のコマンド行から起動され、ソースプログラムを入力し、アセンブルリストと機械語を出力します。アセンブルリストは拡張子 .lst のファイルに、機械語は拡張子 .bin のファイルに格納されます。

```
tasm7 [-l nn] [-w nn] source_file
```

source_file は A.4 章で説明する文法で記述されたソースファイルの名前です。ソースファイル名は、拡張子 .t7 でなければなりません。アセンブルリストの整形に関するコマンド行オプションが使用できます。意味は表 A.1 の通りです。

A.3 ダウンロードプログラム

ダウンロードプログラムは tasm7 が output した機械語プログラムをシリアル通信を用いて TeC に転送します。

表 A.1 コマンド行オプション

オプション	意味
-l nn	リストの 1 ページを nn 行にする。
-w nn	リストの 1 ページを nn 柄にする。

次の形式のコマンド行から起動します。

```
twrite7 bin_file
```

bin_file は tasm7 が output した機械語プログラムファイルの名前です。twrite7 を起動すると、.bin ファイルが TeC の主記憶装置 (メモリ) に自動的に書き込まれます。

A.4 アセンブラーの文法

以下では tasm7 の入力となるソースプログラムの文法について説明します。

A.4.1 行フォーマット

ソースプログラムは「行」の連なりからなるテキストです。ソースプログラムはソースファイルと呼ばれるテキストファイルに格納されます。

tasm7 のソースプログラムでは、文字定数と文字列中を除き、英字大文字と小文字は区別されません。空白はトークンの前後にいくつでも挿入できます。但し、行頭の空白だけは「ラベルが存在しない」ことを表す特別なものになります。空白にはスペース (文字コード 20H) とタブ (文字コード 09H) の 2 種類があります。以下に「行」の書式を示します。

[ラベル] [命令とオペランド] [; コメント]

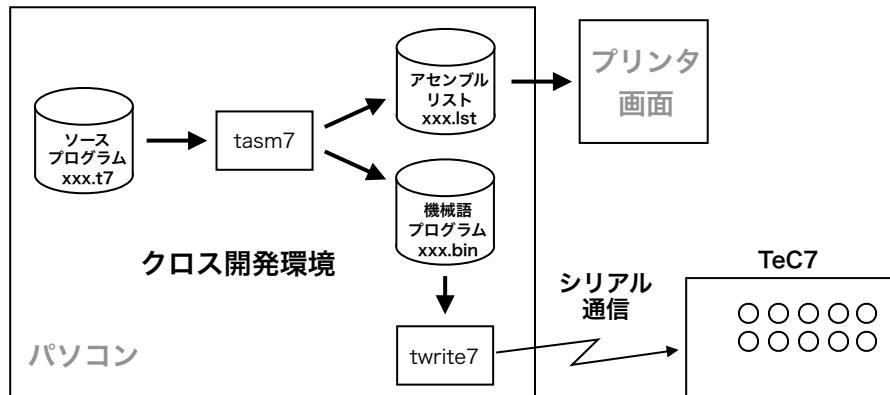


図 A.1 処理の流れ

ラベル	命令	オペランド
START	EQU	03H
SIZE	EQU	100
END	EQU	START+SIZE

図 A.2 EQU 命令の使用例

ラベル	命令	オペランド
START	ORG	03H

図 A.3 ORG 命令の使用例

ラベル	命令	オペランド
WORK	DS	10

図 A.4 DS 命令の使用例

A.4.2 ラベル

行が英字で始まる場合、その行にラベルがあるとみなされます。ラベルは英字で始まり、その後に任意長の英数字が続く文字列です。ラベルが無い行は空白文字で始めます。ラベルの長さに制限はありませんが、アセンブルリストの見栄えから 7 文字以内を推奨します。

行にラベルを書くとラベルが定義されます。EQU 命令を除き、その行のアドレスがラベルの値になります。

A.4.3 疑似命令

以下の 4 種類の疑似命令が使用できます。

EQU 命令

任意の値を持つラベルを定義する疑似命令です。この命令にはラベルが必ず必要です。命令行のラベルがオペランド式の値で定義されます。式ではラベルの前方参照はできません。EQU 命令の書式を以下に、使用例を図 A.2 に示します。

ラベル EQU 式

ORG 命令

機械語を生成するアドレスを変更する疑似命令です。機械語（データも含む）が生成される全ての行より前で使用された場合は、単に次の命令のアドレスを変更します。機械語の生成が開始された後に使用された場合は、

指定アドレスに達するまでゼロで初期化された領域を生成します。

現在のアドレスより若いアドレス（逆戻りするアドレス）を指定することはできません。ORG 命令の式ではラベルの前方参照は禁止です。ORG 命令の書式を以下に、使用例を図 A.3 に示します。

[ラベル] ORG 式

DS 命令

領域を定義するために使用する疑似命令です。式の値は領域のバイト数を表します。領域の値はゼロで初期化されます。DS 命令の式では、ラベルの前方参照はできません。DS 命令の書式を以下に、使用例を図 A.4 に示します。

[ラベル] DS 式

DC 命令

メモリ上に任意の定数を出力するために使用する疑似命令です。オペランドに任意個の式または文字列を書くことができます。DC 命令の書式を以下に、使用例を図 A.5 に示します。

ラベル	命令	オペランド
DATA	DC	1,2,3,4
	DC	1+1
CHA	DC	'a'
STR	DC	"abc"

図 A.5 DC 命令の使用例

表 A.2 機械語命令 1 に属す命令

命令	意味
NO	何もしない
EI	割り込み許可
DI	割り込み禁止
RET	サブルーチンから復帰
RETI	割り込みから復帰
HALT	プログラム終了

ラベル	命令	オペランド
START	NO	
	NO	
END	HALT	

図 A.6 機械語命令 1 の使用例

[ラベル] DC { 式 } [, { 文字列 } ...]

A.4.4 機械語命令

機械語命令は 6 つのグループに分類できます。以下では 6 つのグループの命令について、書き方を説明します。

機械語命令 1

オペランドの無い 1 バイトの機械語命令です。表 A.2 の命令がこのグループに属します。このグループの命令の書式を以下に、使用例を図 A.6 に示します。

[ラベル] 命令

機械語命令 2

レジスタ指定付きの 1 バイトの機械語命令です。レジスタとして G0, G1, G2, SP が使用できます。表 A.3 の命令がこのグループに属します。このグループの命令の書式を以下に、使用例を図 A.7 に示します。

[ラベル] 命令 レジスタ

表 A.3 機械語命令 2 に属す命令

命令	意味
SHLA	左算術シフト
SHLL	左論理シフト
SHRA	右算術シフト
SHRL	右論理シフト
PUSH	スタックにレジスタを退避
POP	スタックからレジスタを復旧

ラベル	命令	オペランド
L1	SHRA	SP
	PUSH	G0
	POP	G1

図 A.7 機械語命令 2 の使用例

表 A.4 機械語命令 3 に属す命令

命令	意味
IN	入出力ポートから読み込む
OUT	入出力ポートに書き込む

ラベル	命令	オペランド
SIO	EQU	03H
	IN	G0, SIO

図 A.8 機械語命令 3 の使用例

機械語命令 3

オペランドにレジスタと式を書く 2 バイトの機械語命令です。レジスタとして G0, G1, G2, SP が使用できます。表 A.4 の命令がこのグループに属します。このグループの命令の書式を以下に、使用例を図 A.8 に示します。

[ラベル] 命令 レジスタ, 式

機械語命令 4

レジスタとメモリをオペランドに指定できる命令で、全てのアドレッシング・モードが使用できるグループです。レジスタとして G0, G1, G2, SP が、インデクスレジスタとして G1, G2 が使用できます。表 A.5 の命令がこのグループに属します。このグループの命令の書式を以下に、使用例を図 A.9 に示します。

オペランドの書式はアドレッシング・モードにより変

表 A.5 機械語命令 4 に属す命令

命令	意味
LD	レジスタにメモリの値をロード
ADD	レジスタとメモリの値の和
SUB	レジスタとメモリの値の差
CMP	レジスタとメモリの値を比較
AND	レジスタとメモリの値の論理積
OR	レジスタとメモリの値の論理和
XOR	レジスタとメモリの値の排他的論理和

ラベル	命令	オペランド
L1	LD	G0,DATA
	LD	G1,#0
	SUB	G0,DATA,G1
	ADD	G1,#1

図 A.9 機械語命令 4 の使用例

表 A.6 機械語命令 5 に属す命令

命令	意味
ST	レジスタの値をメモリオペランドに格納

化します。1行目がダイレクトモード、2行目がインデクスモード、3行目がイミディエイトモードです。

[ラベル] 命令 $\left\{ \begin{array}{l} \text{レジスタ, 式} \\ \text{レジスタ, 式, インデクスレジスタ} \\ \text{レジスタ, #式} \end{array} \right\}$

機械語命令 5

機械語命令 4 と、ほぼ、同様ですが、イミディエイトモードが使用できない機械語命令のグループです。レジスタとして G0, G1, G2, SP が、インデクスレジスタとして G1, G2 が使用できます。表 A.6 のように ST 命令だけがこのグループに属します。このグループの命令の書式を以下に、使用例を図 A.10 に示します。

[ラベル] 命令 $\left\{ \begin{array}{l} \text{レジスタ, 式} \\ \text{レジスタ, 式, インデクスレジスタ} \end{array} \right\}$

機械語命令 6

メモリオペランドだけの機械語命令のグループです。表 A.7 に示すジャンプ・コール命令が、このグループに属します。インデクスレジスタとして G1, G2 が使用できます。このグループの命令の書式を以下に、使用例を図 A.11 に示します。

ラベル	命令	オペランド
	ST	G0,WORK
	ST	G0,WORK,G1

図 A.10 機械語命令 5 の使用例

表 A.7 機械語命令 6 に属す命令

命令	意味
JMP	必ずジャンプ
JZ	Z フラグが'1'ならジャンプ
JC	C フラグに'1'ならジャンプ
JM	S フラグに'1'ならジャンプ
JNZ	Z フラグが'0'ならジャンプ
JNC	C フラグに'0'ならジャンプ
JNM	S フラグに'0'ならジャンプ
CALL	サブルーチン呼び出し

ラベル	命令	オペランド
	JMP	LOOP
	CALL	SUB1

図 A.11 機械語命令 6 の使用例

[ラベル] 命令 $\left\{ \begin{array}{l} \text{式} \\ \text{式, インデクスレジスタ} \end{array} \right\}$

A.5 アセンブラーの文法まとめ

次のページにアセンブラーの文法を BNF 風にまとめます。

```

<プログラム> ::= { <行> } EOF
<行> ::= <命令行> | <空行> | <コメント行>
<命令行> ::= <ラベル欄> [<命令欄>] [<コメント>] <改行>
<空行> ::= <改行>
<コメント行> ::= <コメント> <改行>
<ラベル欄> ::= <ラベル> | <空白>
<命令欄> ::= <命令記述1> | <命令記述2> | <命令記述3> | <命令記述4>
| <命令記述5> | <命令記述6> | <命令記述7> | <命令記述8>
<命令記述1> ::= <命令1>
<命令記述2> ::= <命令2> <レジスタ>
<命令記述3> ::= <命令3> <レジスタ>, <式>
<命令記述4> ::= <命令4> <レジスタ>, <アドレス1>
<命令記述5> ::= <命令5> <レジスタ>, <アドレス2>
<命令記述6> ::= <命令6> <アドレス2>
<命令記述7> ::= <命令7> <式>
<命令記述8> ::= <命令8> <値列>
<アドレス1> ::= #<式> | <式> [, <インデクス>]
<アドレス2> ::= <式> [, <インデクス>]
<値列> ::= <拡張式> { , <拡張式> }
<拡張式> ::= <式> | <文字列>
<式> ::= <項> { (+ | -) <項> }
<項> ::= <因子1> { (* | /) <因子1> }
<因子1> ::= <因子> | +<因子> | -<因子>
<因子> ::= <数値> | <ラベル> | (<式>)
<コメント> ::= ; { <文字1> }
<数値> ::= <10進数> | <16進数> | <文字定数>
<10進数> ::= <数字> { <数字> }
<16進数> ::= <数字> { <16進数> } H
<文字定数> ::= ' <文字2> '
<文字列> ::= " { <文字3> } "
<ラベル> ::= <英字> { <英数字> }
<英数字> ::= <英字> | <数字>
<文字1> ::= <改行>以外の文字
<文字2> ::= <改行>, ' 以外の文字
<文字3> ::= <改行>, " 以外の文字
<16進数> ::= 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | A | B | C | D | E | F
<英字> ::= A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O
| P | Q | R | S | T | U | V | W | X | Y | Z | -
<数字> ::= 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9
<命令1> ::= NO | EI | DI | RET | RETI | HALT
<命令2> ::= SHLA | SHLL | SHRA | SHRL | PUSH | POP
<命令3> ::= IN | OUT
<命令4> ::= LD | ADD | SUB | CMP | AND | OR | XOR
<命令5> ::= ST
<命令6> ::= JMP | JZ | JC | JM | JNZ | JNC | JNM | CALL
<命令7> ::= EQU | DS | ORG
<命令8> ::= DC
<インデクス> ::= G1 | G2
<レジスタ> ::= G0 | G1 | G2 | SP
<改行> ::= '\n'
<空白> ::= ' ' | '\t'

```

A.6 プログラム例

以下にローマ字で名前 (sigemura) を SIO に出力するプログラムの例を示します。

ADR	CODE	Label	Instruction	Comment	Page(1)
02		SIOD	EQU	02H	
03		SIOS	EQU	03H	
00					
00 17 00		START	LD	G1,#0	
02 19 15		L0	LD	G2,DATA,G1	
04 5B 00			CMP	G2,#0	
06 A4 14			JZ	END	
08 C0 03		L1	IN	G0,SIOS	
0A 63 80			AND	G0,#80H	
0C A4 08			JZ	L1	
0E CB 02			OUT	G2,SIOD	
10 37 01			ADD	G1,#1	
12 A0 02			JMP	L0	
14 FF		END	HALT		
15					
15 73 69 67 65		DATA	DC	"sigemura"	
19 6D 75 72 61					
1D 0D 0A			DC	0DH,0AH	
1F 00			DC	0	; 終わりの印

A.7 アセンブラーの実行例

TeC7 を用いローマ字で名前を SIO に出力するプログラムをアセンブル・実行した例を示します。

```
$ tasm7 sigemura.t7                                <--- アセンブル
アセンブル成功
結果は [sigemura.lst] と [sigemura.bin] に格納しました。
... 省略...

$ twrite7 sigemura.bin                               <--- ダウンロード
[00] [20] [17] [00] [19] [15] [5b] [00] [a4] [14] [c0] [03] [63] [80] [a4] [08] [cb] [02] [37]
[01] [a0] [02] [ff] [73] [69] [67] [65] [6d] [75] [72] [61] [0d] [0a] [00]
$ screen /dev/cu.usbserial-xxxxxxxxxx               <--- 通信ソフト起動
sigemura                                         <--- 実行結果
^A^\
[screen is terminating]
```

A.8 機械語プログラムファイル形式

tasm7 が出力する機械語プログラムの形式は次の通りです。

ロードアドレス (1 バイト)
プログラム長 (1 バイト)
...
機械語 (1 バイト以上)
...

ファイルの 1 バイト目は、機械語プログラムの TeC 主記憶上の配置アドレスです。機械語は、このバイトで表される番地を先頭にして主記憶に書き込まれます。ロードアドレスは、アセンブラーの ORG 命令で指示することができます。ORG 命令を使用しない場合のロードアドレスは、0 番地になります。ファイルの 2 バイト目は、機械語プログラムの長さです。3 バイト目以降の機械語の長さをバイト単位で表します。

付録 B

命令表

図 B.1 に TeC7 の機械語命令表を掲載します。命令表の内容はケース蓋の裏に張り付けてあるものと同じ内容です。

TEC7命令表

ニーモニック	命令	第1バイト		第2バイト	フラグ変化	ステート数	動作
		OP	GRXR				
NO	No Operation	0000	00 00	---	×	2	何もしない
LD	Load	0001	GR XR	aaaa aaaa	×	4	GR ← [EA]
ST	Store	0010	GR XR	aaaa aaaa	×	3	[EA] ← GR
ADD	Add	0011	GR XR	aaaa aaaa	○	4	GR ← GR + [EA]
SUB	Subtract	0100	GR XR	aaaa aaaa	○	4	GR ← GR - [EA]
CMP	Compare	0101	GR XR	aaaa aaaa	○	4	GR - [EA]
AND	Logical And	0110	GR XR	aaaa aaaa	○	4	GR ← GR & [EA]
OR	Logical Or	0111	GR XR	aaaa aaaa	○	4	GR ← GR [EA]
XOR	Logical Xor	1000	GR XR	aaaa aaaa	○	4	GR ← GR ^ [EA]
SHLA	Shift Left Arithmetic	1001	GR 00	---	○	3	GR ← GR << 1
SHLL	Shift Left Logical	1001	GR 01	---	○	3	GR ← GR << 1
SHRA	Shift Right Arithmetic	1001	GR 10	---	○	3	GR ← GR >> 1
SHRL	Shift Right Logical	1001	GR 11	---	○	3	GR ← GR >>> 1
JMP	Jump	1010	00 XR	aaaa aaaa	×	3	PC ← EA
JZ	Jump on Zero	1010	01 XR	aaaa aaaa	×	3	if Zero PC ← EA
JC	Jump on Carry	1010	10 XR	aaaa aaaa	×	3	if Carry PC ← EA
JM	Jump on Minus	1010	11 XR	aaaa aaaa	×	3	if Sign PC ← EA
CALL	Call Subroutine	1011	00 XR	aaaa aaaa	×	4	[--SP] ← PC, PC ← EA
JNZ	Jump on Not Zero	1011	01 XR	aaaa aaaa	×	3	if !Zero PC ← EA
JNC	Jump on Not Carry	1011	10 XR	aaaa aaaa	×	3	if !Carry PC ← EA
JNM	Jump on Not Minus	1011	11 XR	aaaa aaaa	×	3	if !Sign PC ← EA
IN	Input	1100	GR 00	0000 pppp	×	4	GR ← IO[P]
OUT	Output	1100	GR 11	0000 pppp	×	3	IO[P] ← GR
PUSH	Push Register	1101	GR 00	---	×	3	[--SP] ← GR
POP	Pop Register	1101	GR 10	---	×	4	GR ← [SP++]
EI	Enable Interrupt	1110	00 00	---	×	3	割り込み許可
DI	Disable Interrupt	1110	00 11	---	×	3	割り込み禁止
RET	Return from subroutine	1110	11 00	---	×	3	PC ← [SP++]
RETI	Return from interrupt	1110	11 11	---	○	4	FLAG ← [SP++], PC ← [SP++]
HALT	Halt	1111	11 11	---	×	3	停止

GR	意味
00	G0
01	G1
10	G2
11	SP

XR	意味
00	ダイレクトモード
01	G1インデクストモード
10	G2インデクストモード
11	イミディエイトモード

メモリマップ	
Addr	内容
00	RAM
...	
DB	
DC	Tmr割り込みベクタ
DD	SIO受信割り込みベクタ
DE	SIO送信割り込みベクタ
DF	Console割り込みベクタ
E0	ROM (IPL)
...	
FF	

I/Oマップ	
Addr	Read/Write
0	Data-Sw/b0:Beep
1	Data-Sw/b0:Speaker
2	SIO-Data/SIO-Data
3	SIO-Stat/SIO-Ctrl
4	TMR現在値/TMR周期
5	TMR-Stat/TMR-Ctrl
6	空き/b0:Console STI
7	PIO-Input/PIO-Output
8	ADC CH0/空き
9	ADC CH1/空き
A	ADC CH2/空き
B	ADC CH3/空き
C	空き/PIO-Ctrl
...	
F	空き/空き

SIO-Stat:b7:Tx Ready,b6:Rx Ready
SIO-Ctrl:b7:Tx STI,b6:Rx STI
TMR-Stat:b7:Interrupt
TMR-Ctrl:b7:STI,b0:Enable

PIO-Ctrl:b7:out,b3-0:data
TMR:タイマー
TMR周期:75=1s
STI:Set Interrupt

図 B.1 TeC7 命令表

付録 C

参考資料

TeC7 をもっと活用してもらうために、TeC7 の基板回路図と FPGA のピン配置表を紹介します。なお、TeC7 の全設計データは、<https://github.com/tctsigemura/TeC7> に公開してあります。

C.1 TeC7c 基板回路図

TeC7c 本体のプリント基板回路図は、https://github.com/tctsigemura/TeC7/blob/TeC7d_v1.2.4/Doc/PCB/TeC7c.pdf に公開してあります。

C.2 TeC7c ピン配置表

TeC7c に搭載されている Xilinx Spartan-6 FPGA (XC6LX9-2TQG144C) のピンがどのように利用されているかを示すピン配置表は、https://github.com/tctsigemura/TeC7/blob/TeC7d_v1.2.4/Doc/PCB/TeC7cPin.pdf に公開してあります。

C.3 TeC7d 基板回路図

TeC7d 本体のプリント基板回路図は、https://github.com/tctsigemura/TeC7/blob/TeC7d_v1.2.4/Doc/PCB/TeC7d.pdf に公開してあります。

C.4 TeC7d ピン配置表

図 C.1 に TeC7d に搭載されている Xilinx Spartan-6 FPGA (XC6LX9-2TQG144C) のピンがどのように利用されているかを示します。また、https://github.com/tctsigemura/TeC7/blob/TeC7d_v1.2.4/Doc/PCB/TeC7dPin.pdf には、電子データが公開してあります。

TeC7d Spartan-6 ピン配置

V3.1(TeC7d用) 2019/04/11

番号	VHDL名稱	VHDL属性	VHDL名稱	VHDL属性	注釈	番号	VHDL名稱	VHDL属性	注釈
1	ADC REF(7)	OUT	ADC ₇ DATA	MSB	PROM	73		NO	TOK
2	ADC REF(6)	OUT	ADC ₆ DATA		NC	74		NO	TDI
3		GND			INIT	75		NO	SIO 受信データ
4	VCOO				INPUTUP	76	VCOO		FN4020 UART RTS
5	ADC REF(5)	OUT	ADC ₅ DATA		INPUTUP	77	GND		GND
6	ADC REF(4)	OUT	ADC ₄ DATA		VCOO				FN4020 WAKE UP
7	ADC REF(3)	OUT	ADC ₃ DATA		RUN LED	78	DATA LED(4)	OUT	FN4020 HW OUT
8	ADC REF(2)	OUT	ADC ₂ DATA		OUT	79	DATA LED(5)	OUT	FN4020 CTS OUT
9	ADC REF(1)	OUT	ADC ₁ DATA		Z LED	80	DATA LED(6)	OUT	FN4020 CON IN
10	ADC REF(0)	OUT	ADC ₀ DATA	LSB	SL LED	81	DATA LED(7)	OUT	FN4020 CONNECTION
11	JPN(0)		INPUTUP	ジンバル上段	C LED	82	SPK OUT	OUT	FN4020 CMD OUT
12	JP(1)		INPUTUP	ジンバル下段	MM LED	83	ADDRLED(0)	OUT	FN4020 RX OUT
13		GND			PC LED	84	ADDRLED(1)	OUT	FN4020 TX IN
14	BREAK SW		INPUTUP	BREAKスイッチ	SP LED	85	ADDRLED(2)	OUT	RESETスイッチ
15	STEP SW		INPUTUP	STEPスイッチ	OUT	86	VCOO		拉張ポート番号
16	RUN SW		INPUTUP	RUNスイッチ	G2 LED	87	ADDRLED(3)	OUT	16番ビン
17	STOP SW		INPUTUP	STOPスイッチ	VCOUNT	88	ADDRLED(4)	OUT	拉張ポート番号
18		VCOO			MM	89	VCOUNT		17番ビン
19		VCOIN			GND	90	VCOAUX		18番ビン
20		VCOAUX			IN	91			19番ビン
21	SEA_SW		INPUTUP	SETAスイッチ	9.8304MHz	92	ADDRLED(5)	OUT	EXT OUT(4) OUT
22	INO_SW		INPUTUP	INCAスイッチ	G1 LED	93	ADDRLED(6)	OUT	EXT OUT(3) OUT
23	DECA_SW		INPUTUP	DECASイッチ	GO LED	94	ADDRLED(7)	OUT	EXT OUT(2) OUT
24	WRITE_SW		INPUTUP	WRITEスイッチ	DATA LED(0)	95	A5 ランプ		EXT OUT(1) OUT
25		GND			OUT	96			EXT OUT(0) OUT
26	DATA_SW(7)		INPUTUP	D7スイッチ	DATA LED(2)	97	-		
27	DATA_SW(6)		INPUTUP	D6スイッチ	DATA LED(3)	98	SPDIN	IN	
28		VCOO			NC	99	SPISCLK	OUT	
29	DATA_SW(5)		INPUTUP	D5スイッチ	NC	100	SPDOUT	OUT	SPI テーブル出力
30	DATA_SW(4)		INPUTUP	D4スイッチ	DIN	101	SPICS	OUT	SPI セレクト出力
31		VCOO			NO	102	-		INOUTUP
32	DATA_SW(3)		INPUTUP	D3スイッチ	GND	103	VCOO		EXT IN(OUT) INOUTUP
33	DATA_SW(2)		INPUTUP	D2スイッチ	GND	104	ACQLED	OUT	EXT IN(3) INOUTUP
34	DATA_SW(1)		INPUTUP	D1スイッチ	GND	105	SIO_TXD	OUT	SIO 送信データ
35	DATA_SW(0)		INPUTUP	DOスイッチ	70	106	TDO		EXT IN(2) INOUTUP
36		VCOAUX			71	107	TMS		EXT IN(0) INOUTUP
					72	108	NC		HS(GND)

専用ビン、電源ビン、未配線ビン

TeC教科書 (PDF版)

発行日 2017年6月 9日 第4版

2025年2月18日 Ver. 4.3.0

著 者 重村 哲至

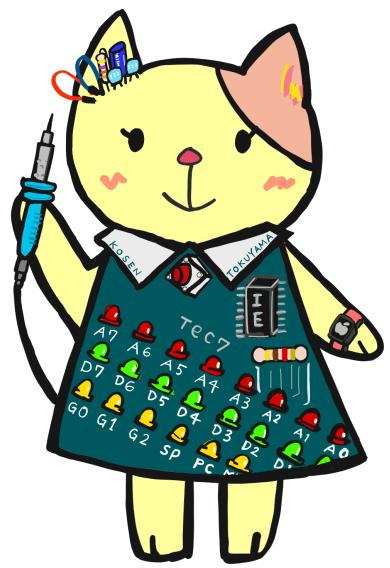
発 行 徳山工業高等専門学校 情報電子工学科

〒745-8585 山口県周南市学園台 3538

0834-29-6304

sigemura@tokuyama.ac.jp

ISBN978-4-9910528-3-5 C3055



(Ver. 4.3.0)