

コンソールパネルを持つビデオカセットサイズの教育用マイコンの開発

重村 哲至 山田 健仁 新田 貴之 力 規晃 原田 徳彦 三木 幸

徳山工業高等専門学校 情報電子工学科

要 旨

高専の計算機系学科で低学年の機械語教育用に使用するマイクロコンピュータを開発した。このマイコンは、2進数で操作するコンソールパネルを持ち、かつ、VHSビデオカセットケースに収納可能な大きさのものである。本稿では、まずマイコンの概要を述べ、次にコンソールパネル、命令セットアーキテクチャ、未定義命令の発見機能等の特徴について述べる。最後に授業内容の例を紹介し、本マイコンの有用性を示す。

Development of an educational microcomputer with a console panel.

Tetsuji SHIGEMURA Takehito YAMADA Takayuki NITTA
Noriaki CHIKARA Norihiko HARADA Miyuki MIKI

Dept. of Computer Science and Electronic Engineering, Tokuyama College of Technology

Abstract

A microcomputer used for lower-grade computer education in the technical college has been developed. The microcomputer has a console panel for binary-code inputs, and is small to be put in a VHS video case. In this paper, the microcomputer overview is described, and then characteristics of the console panel, instruction-set architecture, a function of invalid instruction detection, and so on are represented. Lastly effect of this microcomputer is demonstrated by showing the application to a class.

1 はじめに

計算機系学科に於ける計算機初期教育で学生に計算機の原理を理解させるには、オペレーティングシステム等が搭載されていない裸の計算機を扱わせることが有効である。また、シミュレータ等でなく、実機を用いることが必要である [1],[2]。

しかし、計算機システムの高機能化が進んだ現在では、パーソナルコンピュータあるいはマイクロコンピュータといえども高度化、複雑化し、オペレーティングシステムや BIOS 等の厚いソフトウェア層を通してのプログラミングしかできなくなってしまった。そのため、計算機システムをブラックボックスとして教育せざるをえない面がある。

特に高専の低学年で教育を行う場合、対象となる学生が中学校を卒業したばかりの段階にあり、ブラックボックス化・抽象化して教えることの弊害が大きいと考えられる。そこで、高専での使用を前提とし、機械語の学習を通しノイマン型コンピュータの原理を理解できるよう、ブラックボックスが少ない実習用のマイクロコンピュータ (以下マイコン) を開発した。

開発したマイコンは学習が容易な命令セットアーキテクチャを持ち、かつ、ランプやスイッチの ON/OFF で 2 進数を表現するコンソール・パネルを装備したものである。文字 (特に 16 進文字) による表現が、ビットの並びであるメモリイメージを理解することの障害になる危険性があると考えたため、このようなコンソールパネルを実装した。

2 マイコンの概要

本マイコンの外観を写真 1 に示す。本マイコンは、次のような特徴を備えている。

(1) コンソールパネル

本体プリント基板の右半分にコンソールパネルを実装した。

(2) 携帯性重視

学生が自宅でも演習ができるよう携帯性を重視した。マイコンの大きさは VHS ビデオカセットと同じ大きさとしたので、市販のビデオカセットケースに収納して持ち歩くことが可能である。写真 1 は、ビデオカセットケースに収納した状態である。



写真 1 外観

(3) アドレス、データともに 8 ビット構成

(1)、(2) の特徴を優先しコンソールパネルが大きくなりすぎないように、アドレスもデータも 8 ビットの構成とした。メモリ空間が小さすぎることは否めないが、低学年の演習課題を行うには十分である。

(4) シリアル入出力インターフェース

RS-232C に準拠したシリアル入出力インターフェース (写真 1 左の D-SUB コネクタ) を持っており、パソコンと接続することにより文字入出力が可能である。コンソールでは一切文字を扱うことができないので、パソコンを文字端末として使用する。

(5) スピーカ

パラレルポートに接続された圧電スピーカ (写真 1 中央の円形の部品) を持っており、ソフトウェアにより音を出力することが可能である。学生にマシンステートを意識させるための演習をさせるのに都合が良い。

(6) 割り込み機能

機械語の基本的な演習ができるだけでなく割り込みを用いた入出力の演習が可能である。シリアル入

出力インターフェースから割り込みを発生することが可能である。

(7) CPU 速度

ソフトウェアによりスピーカーから音を出す演習等が可能で、ある程度の CPU 性能を確保している。システムクロックは 2.457MHz で、1 命令を 3~8 クロックで実行する。

(8) IPL 機能

ROM に予め格納された IPL プログラムを用い、シリアル入出力インターフェースからプログラムをダウンロードする機能を持っている。パソコン上で開発したプログラムのダウンロード実行ができる。

(9) 拡張性

拡張コネクタ (写真 1 下の右側コネクタ) にバスが接続されている。これにより、外部に入出力インターフェース回路を追加できる。

(10) FPGA 学習ボード機能

本マイコンの核になっている FPGA に自分の設計した回路をダウンロード可能である。ボード上のジャンパーを変更することにより、JTAG コネクタ (写真 1 下の左側のコネクタ) から FPGA の設計データがダウンロードできる状態になる。

基板上的回路は、FPGA のピンがスイッチやランプに接続されているだけの単純なものである。同じ基板を FPGA の学習ボードとしても使用できる。

(11) 安価な価格

パネル制御回路、CPU、RAM、ROM、入出力インターフェース回路は 1 チップの FPGA に集積した。集積できなかったのは電源回路、ランプやスピーカの駆動回路、スイッチ、ランプのみである。これにより、価格を安くすることができ学生に個人的に購入させることが可能になった。

3 コンソールパネル

コンソールパネルは、メモリ内容と CPU レジスタ内容の表示・書き換え機能の他、ステップ実行やブレークポイント等のデバッグ機能を提供するものである。写真 2 にコンソールパネルの拡大写真を示す。

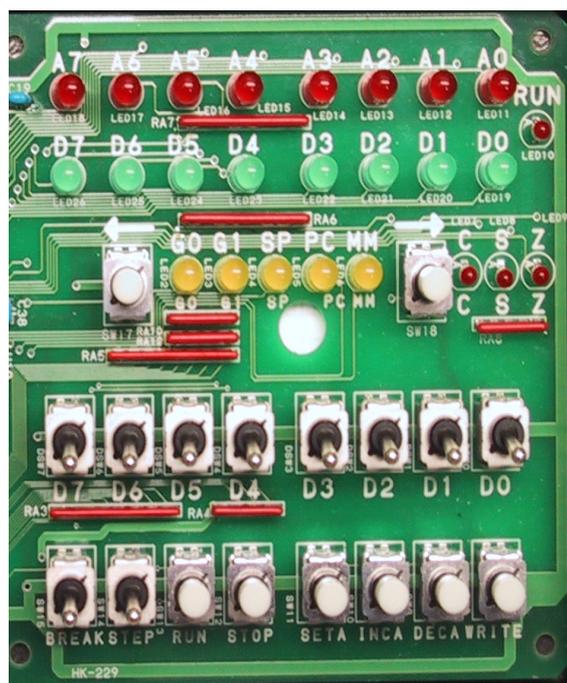


写真 2 コンソールパネル

3.1 コンソールパネルの特徴

(1) ハードウェア制御

従来のワンボードマイコンの 16 進表示や 16 進キーボードは ROM モニタにより制御されているため、どうしてもソフトウェアの存在が隠し切れない。一方、本マイコンのコンソールパネル機能は完全にハードウェアにより実現されているため、そのような問題点が存在しないし、CPU がユーザプログラムを実行中でも表示や操作が可能である。また、ROM モニタのワークエリアのようなブラックボックスの存在を意識させる要素も存在しない。

(2) 非文字による入出力

データの表示や入力は、ランプやスイッチの ON/OFF で行い文字を用いない。そのため、コンピュータの内部の状態をより直接に表現できる。これは、表示を本来の状態 (ビットの ON/OFF) と少しでも近づけることにより無用な混乱を学生に生じさせない工夫である。低学年の学生に使用させる場合、このような簡単に分かるはずの変換が予想外の負担になることが多いため、これは重要なことである。

3.2 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る。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る。これは、操作性を考慮した結果であり、これ以上小さくすることは難しい。

(1) アドレスランプ

最上段の 8 個のランプは、主記憶の操作対象となる番地を表示する。

(2) データランプ

上から 2 段目の 8 個のランプは、選択されたレジスタまたは主記憶の内容を表示する。

(3) ロータリースイッチ

上から 3 段目の 5 個の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ある。ロータリースイッチは、背が高くビデオカセットケースにマイコンを収めるための障害になるのをこのようにした。

ランプのうち一つが点灯し、レジスタ (G0, G1, SP, PC) または主記憶 (MM) をのどれが選択されているか表示する。左右のスイッチで点灯するランプを変更できる。選択されたものの内容がデータスイッチに表示される。

(4) 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ある。

(5) 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る。右から順に、「書き込み」、「アドレスを戻す」、「アドレスを進める」、「アドレスセット」、「プログラム停止」、「プログラム実行」、「ステップ実行モード」、「ブレークポイントモード」の機能を持つ。

これらのスイッチのうち押しボタンスイッチを操作すると、圧電ブザーから短い電子音が鳴り操作を耳で確認できるようになっている。また、長押しによりリピート機能が働く。ハードウェア制御ではあるが、操作性を向上させるための工夫を盛りこんである。

(6) 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す。CPU が未定義命令を実行した場合は点滅して異常を知らせる。

(7) フラグランプ

実行ランプ下の 3 つの小さなランプ C(Carry), S(Sign), Z(Zero) は、3 つのフラグの値を表示する。

4 命令セットアーキテクチャ

機械語プログラミングに必要なマイコンのリソースと命令セットは、学生が学習しやすく、かつ、一般に用いられる別の CPU を学習するときの基礎となる知識が得られるように定めた。

4.1 CPU

CPU は独自の 8 ビット CPU である。設計と仕様変更の工数を節約するためにマイクロプログラム制御方式を採用している。レジスタは 8 ビットの汎用レジスタ 2 本 (G0, G1), スタックポインタ (SP), プログラムカウンタ (PC) である。命令の実行結果により変化する 3 つのフラグ (C, S, Z) があり、条件付きジャンプ命令でテストできる。付録 1 に CPU のブロック図を示す。

4.2 命令体系

機械語命令は 29 種類、アドレッシングモードはダイレクト、インデクスド、イミディエイトの 3 種類、直交性の高い命令体系となっている。命令は 1 バイトのものと 2 バイトのものがある。プログラム例を図 1 に、命令表を付録 2 に示す。

教育用の CPU としては命令数が多めであるが、割り込み処理までを可能にするためには、この程度の命令数が必要である。

4.3 メモリ空間

本マイコンのメモリ空間 (付録 2 命令表のメモリマップ参照) は全体で 256 バイトである。00H 番地から DFH 番地は自由に使用できる RAM 領域である。E0H 番地から FBH 番地までの 28 バイトは ROM 領域になっており RS-232C からプログラム

Adr	Code	Label	Instruction
00	13 00	START	LD GO, #0
02	17 01		LD G1, #1
04	57 0B	LOOP	CMP G1, #11
06	A4 10		JZ STOP
08	24 13		ST G1, N
0A	30 13		ADD GO, N
0C	37 01		ADD G1, #1
0E	A0 04		JMP LOOP
10	20 14	STOP	ST GO, SUM
12	FF		HALT
13			
13	00	N	DS 1
14	00	SUM	DS 1

図1 プログラム例
(1 から 10 の合計を求めるプログラム)

をダウンロードする IPL プログラムが格納される。FCH 番地からの 4 バイトは割り込みベクタとして使用する RAM 領域になっている。

4.4 I/O 空間

本マイコンの I/O 空間(付録2 命令表の I/O マップ参照)は全体で 16 バイトである。0H 番地はコンソールパネルのデータスイッチの状態を読み取るポートに、1H 番地の LSB はスピーカへ接続されたポートに、2H 番地はシリアル入出力インタフェースのデータレジスタに、3H 番地はシリアル入出力インタフェースのステータス/コントロールレジスタに接続されたポートになっている。

4H 番地から FH 番地は使用されていない。拡張コネクタに入出力インタフェースを増設して使用できる。

4.5 割り込み

割り込みは優先度を持たせた 4 つ (INT0 ~ INT3) を用意した。INT0 が最も優先度の高い割り込みである。メモリ空間にある 4 バイトの割り込みベクタが各レベルに対応しており、1 レベルにつき 1 つの割り込み処理ルーチンを定義できる。

標準では RS-232C が INT1, INT2 を使用し他は未使用の状態である。拡張ポートに入出力インターフェースを増設することにより、現在、未使用の割り込みレベルも使用できるようになる。

4 レベルの割り込みは、禁止/許可を DI / EI 機械語命令により一括して設定する。NMI 割り込みは用意していない。

5 未定義命令の発見機能

教育用 CPU であり、ハンドアセンブルやコンソールパネルからの機械語打ち込みをする機会が多いことが予想される。そのため、誤った機械語コードが入力される可能性が高い。そこで、未定義の機械語コードを確実に見つけ出すことにより、学生に誤った箇所を発見しやすくする機能を提供した。CPU は未定義命令を発見すると実行を打ち切り、実行中を表すランプを点滅させる。

しかし、本マイコンのようにマイクロプログラム制御方式の場合、未定義命令を細かくチェックするには、命令デコードのためのマイクロプログラムが複雑になり効率が悪い。また、全ての場合をチェックするためには、完全なデコードが可能なようにマイクロ命令の体系を設計し直す必要もある。

そこで、ROM を用いて全ての未定義機械語コードを発見する仕組みを組み込んだ。付録1のブロック図左下のデコード ROM は、機械語の第1バイトから、対応するマイクロプログラムの開始アドレスに変換する変換表である。ここに、第1バイト 256 パターン全てについて、実行するマイクロプログラムが指定してある。未定義命令に対応するデコード ROM の番地には、エラー信号 (ER) を出力して CPU を停止するマイクロプログラムのアドレスが格納されている。未定義命令を実行するとこのマイクロプログラムにより、CPU が停止しランプが点滅を始める。

本マイコンの機械語では、2 バイト命令であっても 1 バイト目だけで命令の種類アドレッシングモードが分かる。2 バイト目にはアドレスが即値しか格納されない。そのため、この方法で完全なデコードが可能である。

表 1 授業内容例

授業項目	回数
ガイダンス	1回
情報の表現 (2進数, ビット, 文字等)	3回
論理演算 (演算と論理素子)	2回
マイコンの組み立て (ハンダ付け)	4回
マイコンの操作	1回
マイコンの構成 (レジスタ, メモリ)	2回
試験	1回
プログラミング (ハンドアセンブル)	1回
転送命令	1回
加減算命令	1回
分岐命令	1回
フラグと条件分岐	1回
繰り返し処理	2回
論理演算命令	2回
アドレッシングモード	1回
入出力	4回
試験	1回
ガイダンス	1回
クロス開発とデバッグ機能	3回
スタックとサブルーチン	2回
2進16進 / 10進変換	2回
マシンステートとタイマー	2回
電子オルゴール	2回
割り込み処理	2回
試験	1回

6 授業内容

1年から2年にかけて1年半(45週)の授業内容の例を表1に示す。

マイコンは組み立てキットとして学生に提供し、授業時間中に指導しながら自分でハンダ付けして組み立てる。その後、ハンドアセンブルでのプログラミング演習を半年行いストアード・プログラム方式のメモリエージ(プログラムも数値データも文字データもビットで表現されている)をしっかりと理解させる。

2年ではクロスアセンブラを用い少し長めのプログラムを書かせ、アセンブラを用いて自由にプログラミングができるように訓練する。更に、マシンステートや割り込みまでを学習し、他の小規模なマイ

クロプロセッサで一般に用いられる概念を一通り理解する。

7 おわりに

本稿では、高専の計算機系学科の低学年で使用する演習用マイコンを提案した。このマイコンは、低学年での機械語教育に使用できるよう様々な工夫がしてある。また、基本的な機械語演習だけでなく割り込みや入出力の演習も可能である。

本マイコンは2003年度の入学生から使用を開始し、現在、この学年が2年生の授業を受けている。1年間を終了した時点で授業項目(52項目)について理解度を調べるアンケートを実施した。アンケートの結果は、ほぼ、全ての項目で満足できる回答が得られた。

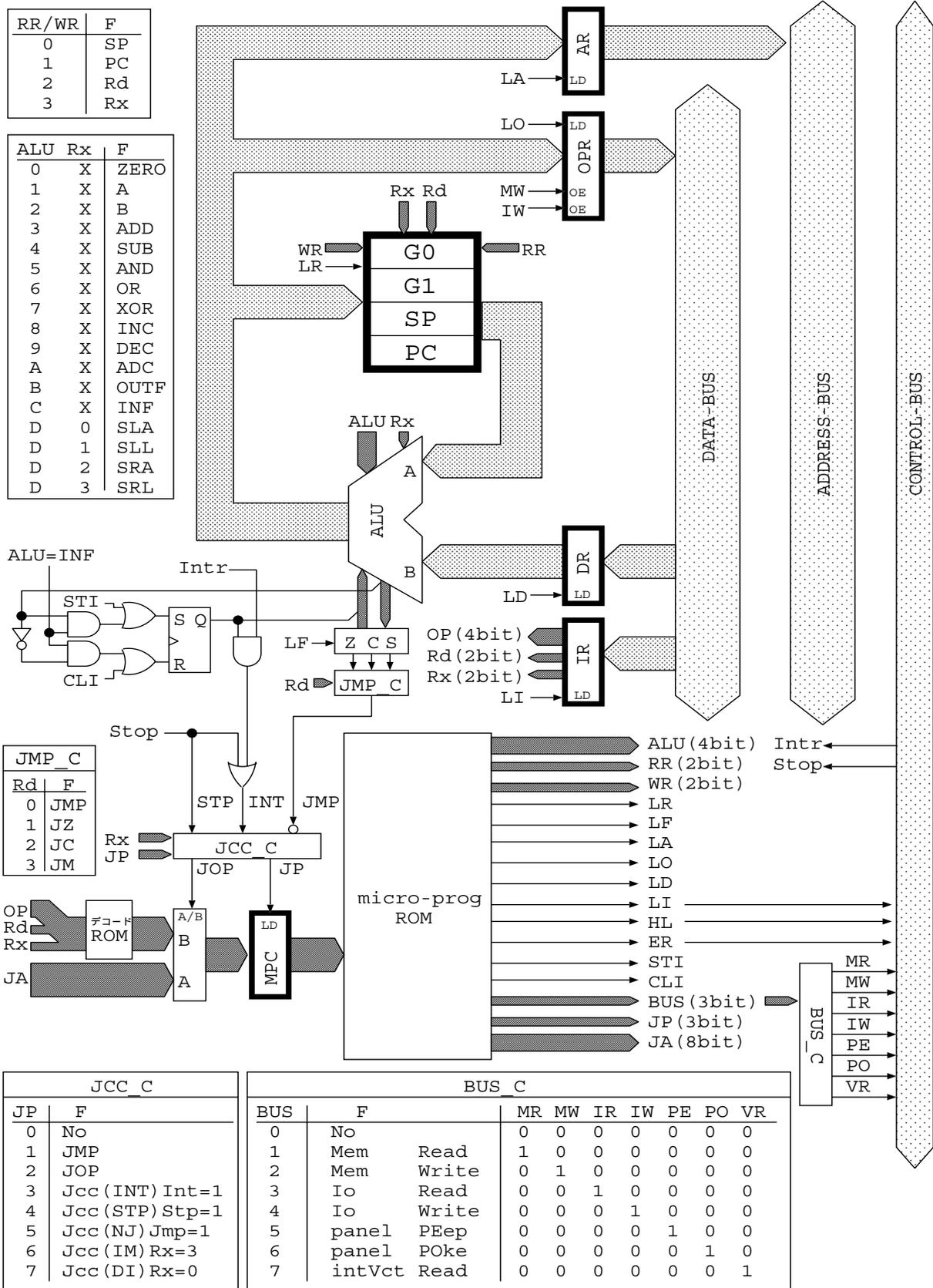
今後の課題として、「(1) 機械語入門科目以外での使用」と「(2) 教科書の整備」があげられる。

(1)に関しては既に、2004年度から4年生の実験科目でFPGAのトレーニングボードとして利用する試みを開始している。また、マイクロプログラムを外部からダウンロード可能にすることによりマイクロプログラムのプログラミング演習も可能になると考えているが、演習の需要が無いのが現状である。

参考文献

- [1] 中西正和：機械語プログラミング教育の必要性と実習用コンピュータの製作, bit Vol.25 No.8-9(1993)
- [2] 中森真理雄, 萩原洋一, 高田正之：情報工学系学科の教育における手回し計算機の活用, 情報処理学会論文誌 Vol.31, pp.1547-1555(1990)

付録1 CPUブロック図



付録2 命令表

Ver. 1.0 (2003.7.9)

TEC5命令表
 ステート数：イミディエイト/ダイレクト/インデックス (ジャンプ命令では、条件不成立/ダイレクト/インデックス)

三 モ 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 Opration	0000	00 00	—	x	3	何もしない
LD	Load	0001	GR XR	aaaa aaaa	x	5/7/8	GR <- [EA]
ST	Store	0010	GR XR	aaaa aaaa	x	-/7/7	[EA] <- GR
ADD	Add	0011	GR XR	aaaa aaaa		5/7/8	GR <- GR + [EA]
SUB	Subtract	0100	GR XR	aaaa aaaa		5/7/8	GR <- GR - [EA]
CMP	Compare	0101	GR XR	aaaa aaaa		5/7/8	GR - [EA]
AND	Logical And	0110	GR XR	aaaa aaaa		5/7/8	GR <- GR & [EA]
OR	Logical Or	0111	GR XR	aaaa aaaa		5/7/8	GR <- GR [EA]
XOR	Logical Xor	1000	GR XR	aaaa aaaa		5/7/8	GR <- GR ^ [EA]
SHLA	Shift Left Arithmetic	1001	GR 00	—		4	GR <- GR << 1
SHLL	Shift Left Logical	1001	GR 01	—		4	GR <- GR << 1
SHRA	Shift Right Arithmetic	1001	GR 10	—		4	GR <- GR >> 1
SHRL	Shift Right Logical	1001	GR 11	—		4	GR <- GR >> 1
JMP	Jump	1010	00 XR	aaaa aaaa	x	-/5/6	PC <- EA
JZ	Jump on Zero	1010	01 XR	aaaa aaaa	x	4/5/6	if Zero PC <- EA
JC	Jump on Carry	1010	10 XR	aaaa aaaa	x	4/5/6	if Carry PC <- EA
JM	Jump on Minus	1010	11 XR	aaaa aaaa	x	4/5/6	if Sign PC <- EA
CALL	Call subroutine	1011	11 XR	aaaa aaaa	x	-/6/7	[--SP] <- PC, PC <- EA
IN	Input	1100	GR 00	0000 pppp	x	7	GR <- IO [P]
OUT	Output	1100	GR 11	0000 pppp	x	7	IO [P] <- GR
PUSH	Push Register	1101	GR 00	—	x	6	[--SP] <- GR
PUSHF	Push Flag	1101	11 00	—	x	6	[--SP] <- FLAG
POP	Pop Register	1101	GR 11	—	x	6	GR <- [SP++]
POPF	Pop Flag	1101	11 11	—		6	FLAG <- [SP++]
EI	Enable Interrupt	1110	00 00	—	x	4	割り込み許可
DI	Disable Interrupt	1110	00 11	—	x	4	割り込み禁止
RET	Return from subroutine	1110	11 00	—	x	6	PC <- [SP++]
RETI	Return from Interrupt	1110	11 11	—	x	6	PC <- [SP++] , STI
HALT	Halt	1111	11 11	—	x	4	停止

GR	意味
00	G0
01	G1
10	SP
11	禁止

XR	意味
00	ダイレクトモード
01	G1相対モード
10	SP相対モード
11	イミディエイトモード

Addr	内容
00	RAM
DF	
E0	
FB	ROM(IPL)

FC	INT0 割り込みベクタ
FD	INT1 割り込みベクタ
FE	INT2 割り込みベクタ
FF	INT3 割り込みベクタ

INT1 : SIO 送信割り込み
 INT2 : SIO 受信割り込み

I/Oマップ	
Addr	Read/Write
0	Data-Sw/空き
1	00H/b0:Spk-Port
2	SIO-Data/SIO-Data
3	b7:Tx Ready/ b7:Tx STI b6:Rx Ready/ b6:Rx STI
4	空き/空き
....
F	空き/空き