

# マイクロプロセッサ(PULCE)における マイクロ命令の静的使用特性

正員 古谷 立美<sup>†</sup>      正員 飯塚 肇<sup>††</sup>

## Static Characteristics of Microprograms in a Microprocessor (PULCE)

Tatsumi FURUYA<sup>†</sup> and Hajime HIZUKA<sup>††</sup>, Regular Members

あらまし 筆者らはPULCEと呼ばれるマイクロプログラマブルマイクロプロセッサを開発した。PULCEは5種類の計算機の中央処理部に使われ、そこで作られたマイクロプログラムの総ステップ数は7万ステップに近付いた。そこでそれらのマイクロプログラム中で使われたマイクロ命令について、主操作の使用ひん度、レジスタのアクセスひん度、ジャンプ命令やジャンプサブルーチン命令での飛距離などの静的使用特性を測定した。本論文では、それらの測定結果をもとに、マイクロプログラマやマイクロプログラムの種類による特性の違いなどマイクロプログラムに関する特性の検討を行うと共に、測定結果をもとにPULCEアーキテクチャを見直し、設計者としての立場からPULCEを評価・検討する。

### 1. ま え が き

筆者らは工業技術院大型プロジェクトパターン情報処理システム(以下パターンプロジェクトと略す)の中で、PULCE<sup>(1),(2)</sup>(PIPS Universal Computing Element)と呼ばれるマイクロプログラマブルマイクロプロセッサを設計・製作した。PULCEはパターンプロジェクトの中で、5種類の計算機の中央処理部に使われ、そこで作成されたマイクロプログラムのステップ数は合計で約7万ステップに達した。そこで、それらのマイクロプログラムで使われたマイクロ命令の静的使用特性を測定し、マイクロプログラムの特性と、PULCEアーキテクチャに対する設計者としての評価という二つの面から考察を行った。ここでの測定は静的使用特性に関するもので、動的なものは含まないが、従来マイクロ命令の使用特性に関する報告は例がなく、本測定結果が計算機設計者にとって有用な資料になると考え報告することとした。

<sup>†</sup> 電子技術総合研究所電子計算機部, 茨城県  
Computer Division, Electrotechnical Laboratory,  
Ibaraki-ken, 305 Japan

<sup>††</sup> 成蹊大学工学部経営工学科, 東京都  
Faculty of Engineering, Seikei University, Tokyo,  
180 Japan

論文番号: 昭 57-論101[D-31]

以下2.でPULCEを用いた計算機と被測定マイクロプログラムの概要、3.で測定結果と、それに対する考察を示す。

### 2. PULCEを用いた計算機とマイクロプログラム

パターンプロジェクトではさまざまな情報処理形態が要求され、それに応じていろいろな計算機が必要となる。PULCEはそれらのいろいろな計算機を構成する場合に共通に使用できるプロセッサとして設計された。計算機の構成要素のうち、多くの計算機に共通するものはレジスタとALU(RALU部)であり、シーケンサ部は応用によって異なるという考え方からPULCEはRALU部をLSI化している。このた

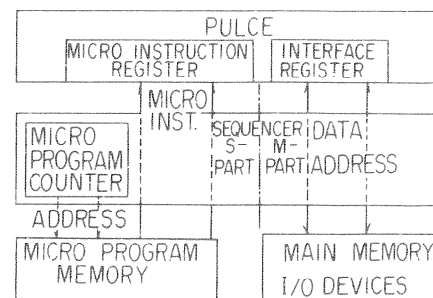
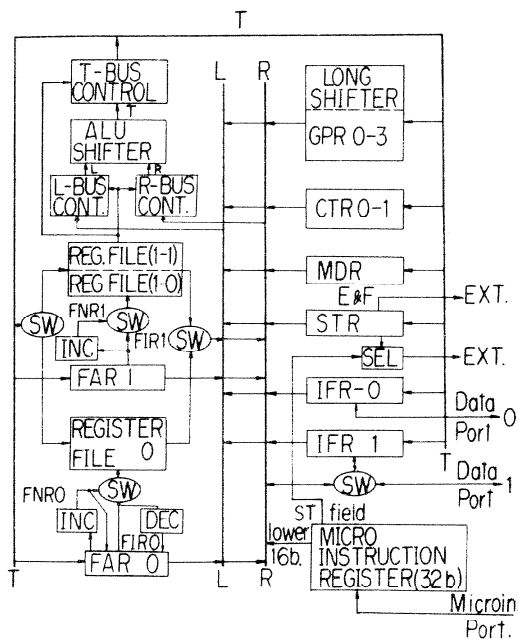


図1 PULCEを用いた計算機構成  
Fig.1 - Computer structure with PULCE.

め計算機を作成するには、PULCEの外部にシーケンサを作る必要があり、シーケンサの違いが計算機の違いということになる。図1はPULCEを用いた計算機の基本構成を示しており、シーケンサは次の二つの機能をつかさどる。

- ① マイクロプログラムカウンタを管理してPULCEへのマイクロ命令の供給を制御する(図1のS部)。
- ② PULCEとメモリ及び入出力装置などとのデータ授受を制御する(図1のM部)。表1にはPULCEを用いた計算機名とその相異が示してある。



GPR: General Purpose Reg., STR: Status Reg., IFR: Interface Reg., CTR: Counter, MDR: Mode Reg., REG. FILE: Register file, FAR, FNR, FIR: Reg. file control reg.

図2 PULCEのブロック図  
Fig.2 - Block structure of PULCE.

PULCEの構成は図2であり、R, L, Tの3本のバスにALU, シフタ, レジスタ, レジスタファイルが接続されている。PULCEの基本動作は、レジスタの被演算データ(16bit)をR及びLバスでALU又はシフタに送り、演算結果をTバス経由でレジスタに格納するというものである。PULCEと外部とのデータ交換はインタフェースレジスタ(IFR)を経て行われる。図3はPULCEチップ上の構成要素の配置を示している。図4はPULCEのマイクロ命令で、五つの型が存在し、その基本機能は次のとおりである。

① RR型: レジスタ間演算で、RとT(L)フィールドで示されるレジスタの値にOPフィールドで示される演算を施し、結果をT(L)フィールドで示されるレジスタに格納する。STフィールドはステータスレジスタ(STR)の1bitを指定し、その0, 1によって次の命令をスキップする。MKフィールドはR, L, Tバスのマスクを指定する。その他のフィールドは次の意味を持つ。SS: 演算結果のステータスをSTRに格納するか否か。TC: 演算結果をレジスタに格納するか否か。LC: Lバスにデータを乗せるか否か。RC: Rバスにレジスタの値を出すか、Rフィールドの値をそのまま出すか。CT: カウンタ(CTR)のデクリメント指定。

② RE型: T(L)フィールドで示されるレジスタとEフィールドの16bitエミット値を演算し、結果をT(L)フィールドのレジスタに格納する。

③ RH型: T(L)フィールドのレジスタとEフィールドの8bitエミット値を演算し、結果をT(L)フィールドのレジスタに格納する。HLフィールドは、エミ

表1 PULCEを用いた計算機とマイクロプログラム

計 算 機			マイクロプログラム			
名	シーケンサ	文献	番号	名	性質	作者
ACE (適応構造形 計算機種合体)	1	(3)	1	ACEのOS	O	1
			2	並列PASCALマシン	E・I	2
			3	NOVAエミュレータ	E	3
PMCS (パーソナル コンピュータ)	2-1*	(4)	4	TOSBAC 40エミュレータ	E	4
			5	PASCALマシン	I	5
			6	手書き文字認識	O・E	6
LISPマシン	2-2*	(5)	7	LISPマシン	I・O	5
磁気バブル データベース マシン	2-3*	(5)	8	データベースマシンのOS	O	1
			9	" コンパイラ	O	7
			10	" インタプリタ	I	1
EPOS (ポリプロ セッサ)	2-4*	(5)	11	EPOSのOS	O	多数
			12	APLマシン	I	8
			13	PASCALマシン	I	9

\*: 2-nのnはシーケンサのうちメモリ管理部(M-PART)の違いを示す。

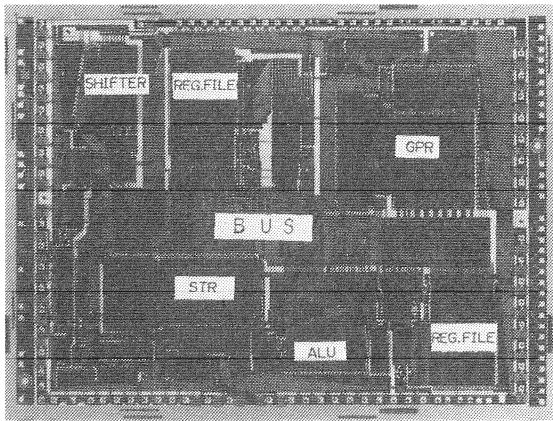


図3 PULCEのレイアウト  
Fig.3 - Layout of PULCE LSI.

ット値をレジスタの上位8bitと演算するか、下位8bitと演算するかを指定。

④ SH型：T(L)フィールドのレジスタの内容をRで示されるビット数(0~15)だけシフトする。SIはキャリーのシフトイン指定。

⑤ LS型：汎用レジスタ(GPR0~GPR3)を複数個連結して1bitシフトする。連結形態はRSフィールドで指定。MMは1bitシフトを繰り返し実行させる指定。

⑥ NP型：PULCE内には何の影響も与えず、シーケンサ側で自由に設定できる命令、ジャンプ、ジャンプサブルーチン、メモリアクセス命令などがこれに割り当てられる。

PULCEの特徴を整理すると以下のとおりである。

- ・マイクロ命令は32bit垂直型。
- ・データの基本処理語長は16bit。
- ・シーケンス制御部を外付け。
- ・命令形式の均一性の重視。
- ・エミュレーション用にフィード処理機能の充実。
- ・LSI化を前提にした設計。

表1はPULCEを用いた計算機と、そこで作られたマイクロプログラムの名前、性質、プログラムの違いを示している。プログラムの性質は、処理内容により次の3種類に分類した。

- ① E型：機械語など低レベルの命令のエミュレータ。
- ② I型：高級言語マシンの中間言語の命令など比較的レベルの高い命令のインタプリタ。
- ③ O型：OS、コンパイラなどプログラム全体で一つの仕事をするもの。又これらの幾つかの性格を合せ持つものには、E・Iなど複数併記型にした。

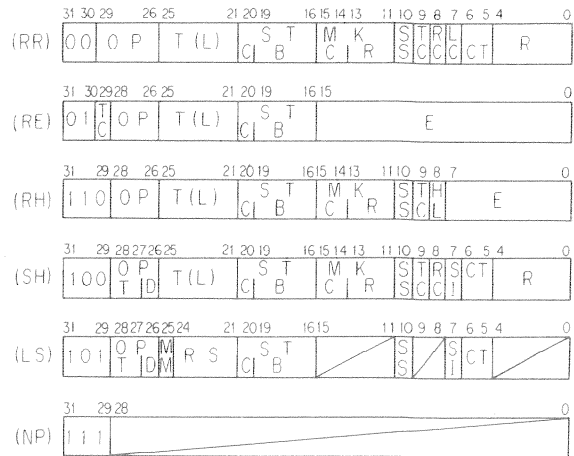


図4 マイクロ命令の形式  
Fig.4 - Micro instruction format.

### 3. 測定結果と考察

本章では表1に示した13のマイクロプログラム(計68,789ステップ)におけるマイクロ命令の使用特性を、マイクロプログラムの性質と、アーキテクチャの評価という二つの立場から考察する。考察は、使用特性をできるだけ一般性のあるように整理して行っているが、2に示したPULCEの特徴が使用特性に影響を与えていることは念頭に置く必要がある。

#### 3.1 主操作の使用ひん度

表2は、マイクロ命令中の操作(OP)フィールドで指定される主な操作の使用ひん度を、マイクロプログラムごとに整理したものである。表2から分かることを整理すると次のとおりである。

- ① PULCE用命令(RR, RE, RH, SH, LS型)と外部命令(NP型)の割合は約半分・半分である。
- ② PULCE用命令について見ると、データの移動(MOVE)命令が50%以上を占める。LISPマシンではMOVE命令が少ないが、これはシーケンサ内の機能を充実し、PULCEにできるだけ演算以外の仕事をさせないようにしているためである。
- ③ RR型に10進加減算用命令を4種類用意したが、ほとんど使われなかった。これは今回の応用の中に事務処理的なものがなかったためであり、この結果だけから10進命令の価値を判断するのは早急と思われる。
- ④ マイクロプログラムは一般のプログラムに比べて処理がハードウェアに近いので、エミットデータとの論理演算が多く使われると考え、エミット演算の充実を図った。その結果RE型は予想どおり高い使用ひ

ん度を示したがRH型はほとんど使われていない。RH型のRE型に対する利点は、マスクが可能なことと、演算結果のステータスをSTRにセットしない指定ができることである。しかし実際にはRH型でなければならない場合は少なく、ほとんどRE型で済まされていると思われる。

⑤ SH型の特別シフト命令とは、ソースデータを汎用レジスタに入れておき、シフト結果を他のレジスタに入れるものである。これはソースデータを破壊しないため、命令のデコードなどに便利な機能と考え設

けたものだが、使用しているものと使用しないものが極端に分かれた。これは良く使い方を知らせなかったためではないかと思われる。

⑥ LS型は87%以上が論理シフトである。

⑦ 全プログラム中、全く使われなかった命令は、RH、RE型のNORとパターンマッチである。パターンマッチとは4bitでできるビットパターンの集合を扱えるものである。これらの命令は少し難解なため、“難しい命令はあまり使われない”という機械語レベルの話がマイクロレベルにもあてはまるようである。

表2 マイクロ命令の静的使用ひん度

プログラム番号		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	平均
総ステップ数		3,192	1,760	336	2,581	2,439	3,008	11,267	1,827	7,127	6,513	18,043	5,483	5,213	
PULCE 用 命 令	RR型														
	MOVE	12.84	15.45	34.21	21.08	27.63	22.14	7.76	17.02	27.11	27.13	19.79	20.55	18.20	20.84
	OR	0.29	1.93	2.98	5.00	2.34	5.05	1.07	1.31	0.17	0.18	1.51	2.32	2.74	2.07
	XOR	0.53	0.23	0	2.29	1.76	0.37	0.34	0.38	0.21	0.18	0.13	0.11	2.03	0.66
	AND	0	0.11	0.30	0.62	0.57	0.27	0.04	0.11	0.03	0.17	0.22	0.07	0.27	0.21
	ADD	0.56	0.85	3.57	2.13	5.62	3.95	1.80	0.71	0.68	2.49	3.27	2.26	3.80	2.44
	SUB	0.13	0.74	0.89	1.98	3.48	2.16	1.72	0.76	0.45	2.18	1.73	1.19	4.55	1.69
	十進演算	0	0	0	0	0	0	0.03	0	0	0	0.01	0	0	0.00
	その他	0	0.12	2.10	0.04	0.33	0.06	0.01	0	0.21	0.17	0	0	0.02	0.24
	RP型計	14.35	19.43	44.05	33.13	41.74	34.01	12.75	20.31	28.85	32.50	26.66	26.50	31.61	28.15
RE型															
MOVE	19.33	3.24	2.98	3.91	9.06	10.57	10.62	9.41	8.19	6.77	10.26	11.34	15.33	9.31	
OR	1.07	2.05	4.17	0.04	0.04	1.06	0.56	0.49	0.29	0.71	0.74	1.06	0.38	0.97	
XOR	1.69	0.34	1.79	0.19	1.76	0.40	1.50	1.37	1.11	4.15	0.02	0.05	0.61	1.15	
AND	2.57	7.78	5.65	1.90	1.11	1.89	4.47	3.12	3.03	2.18	2.63	3.57	1.75	3.20	
ADD	3.73	4.20	1.49	1.05	0.29	5.22	0.87	4.00	10.64	8.37	5.87	4.85	1.96	4.04	
SUB	0.85	5.00	0.60	2.75	0.16	4.12	2.52	1.86	1.22	1.84	8.74	5.14	3.64	2.96	
RE型計	29.23	22.61	16.67	9.84	12.42	23.27	20.54	20.25	24.48	24.01	28.27	26.03	23.67	21.64	
RH型															
RH型計	0	0	0.30	2.63	0	0	0	0	4.08	0.02	0.02	0.02	0	0.54	
SH型															
回転シフト	0.03	0.39	0.89	0.23	0	0	0.02	0.11	0.25	0.23	0.14	0.04	0.10	0.19	
論理シフト	1.03	5.17	4.46	2.71	1.19	1.79	0.93	1.26	0.47	0.32	2.12	2.50	1.67	1.97	
算術シフト	0	0.68	0.30	0.08	0.37	0.70	0	0	0	0.06	0	0	0.02	0.17	
特別シフト	0	2.27	2.68	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.12	0.39	
SH型計	1.07	8.52	8.33	3.02	1.56	2.49	0.95	1.37	0.72	0.61	2.26	2.54	1.90	2.72	
LS型															
論理シフト	0.06	0.12	0	0.97	0.53	1.23	0.18	0	0.10	0.15	0.14	0.16	0.69	0.33	
その他	0.06	0	0	0.32	0.08	0	0	0	0	0	0	0	0.23	0.05	
LS型計	0.13	0.12	0	1.28	0.62	1.23	0.18	0	0.10	0.15	0.14	0.16	0.92	0.39	
PULCE用命令計	44.77	50.68	69.35	49.90	56.33	61.00	34.41	41.93	58.23	57.30	57.35	55.24	58.10	53.43	
外部命令															
ジャンプ	8.05	22.33	22.03	28.24	19.13	9.31	18.86	11.16	11.08	13.25	9.22	16.36	18.40	15.96	
ジャンプサブルーチン	6.55	13.81	0	5.81	5.78	5.12	10.83	5.15	8.42	3.95	12.74	6.66	9.76	7.28	
リターンサブルーチン	3.70	3.41	0	1.32	3.90	1.00	1.81	2.85	1.41	1.72	3.33	1.37	3.49	2.25	
マイクロプログラムメモリアクセス	—	—	—	2.37	8.57	13.68	8.98	20.75	0.45	1.48	1.55	0	0	4.45	
メモリアド	11.81	1.48	3.33	1.05	2.74	0.30	8.48	2.02	4.13	6.57	3.55	5.53	2.72	4.13	
メモリアイト	9.68	2.50	2.41	0.77	0.16	0.66	6.52	2.29	5.38	5.59	3.02	5.91	2.17	3.62	
その他	15.44	5.80	2.88	10.55	3.37	8.94	10.12	13.85	10.08	10.15	9.26	8.94	5.35	8.83	
外部命令計	55.23	49.32	30.65	50.10	43.67	39.00	65.59	58.07	41.77	42.70	42.65	44.76	41.90	46.57	

注：① 表中の値の和は、丸め誤差のため必ずしも計の値と一致しない。

② ACEシステムには、マイクロ命令で直接マイクロプログラムメモリを読み書きする命令がない(表中の一印)。

③ PULCE用命令には無操作命令がないため、同一レジスタ間のデータ移動(MOVE)命令などで無操作を代用している場合がある。

⑧ マイクロプログラムの種類による差は、表2からあまり明確にならず、E型(エミュレーション型)のもののシフトが多少多い程度である。

### 3.2 スキップ

全マイクロ命令中には5bitのスキップ(ST)フィールドがあり、このうちの4bit(B部)でステータスレジスタ(STR)の任意の1bitを指定する。そしてSTフィールドのC部が“0”のときは、STRの指定されたビットが“1”なら次の命令をスキップする。一方、STフィールドのC部が“1”のときは、STRの指定されたビットが“0”なら次の命令をスキップすることになる。表3はSTフィールドで指定されるスキップ条件の指定率である。この結果、83.58%スキップ指定がなく(次の命令をスキップしない)、スキップ指定がある場合では演算結果が零か否かでスキップする場合が多い。表4は、マイクロ命令中の主操作(OPフィールド)とスキップ指定の関係を示している。すなわち、どの命令でどれくらいスキップ指定が行われるかを示している。これを見るとXOR(排他的論理和)、AND、SUB命令の結果でスキップする場合が多い。そしてこれらの命令の演算結果のステータスで重要なものは零か否かであり、表3の“演算結果が零によるスキップ”が多いことも符合する。スタック“満”と“空”は両方共“満”

表3 スキップ指定

スキップ指定なし(スキップしない命令)… 83.58%  
 無条件スキップ(常にスキップする命令)… 0.46%  
 条件スキップ(以下この詳細) … 15.96%

スキップ条件	指定率	スキップ条件	指定率
演算結果 零	4.92	演算結果 負数	0.43
演算結果 否零	4.56	演算結果 否負数	0.83
演算結果 正数	0.40	演算結果 偶数	0.10
演算結果 否正数	0.50	演算結果 奇数	0.75
スタック 満	0	スタック 空	0
スタック 否満	0.20	スタック 否空	0.62
キャリー 有	0.48	その他	1.61
キャリー 無	0.56		

表4 操作に対するスキップ指定率

命令型	操作名	スキップ指定率	命令型	操作名	スキップ指定率
RR型	OR	10.21	RE型	OR	14.01
	XOR	37.54		XOR	92.38
	AND	44.07		AND	38.45
	ADD	4.53		ADD	2.20
	SUB	53.94		SUB	69.80
	その他	25.58		その他	1.18
RH型	XOR	97.06	SH型	-	5.19
	その他	29.79	LS型	-	22.38

と“空”の補集合でスキップを指定しているという特徴がある。表3の“その他”の中には、STR中にユーザのアクセスできるフラグを4bit用意して、その状態によってスキップするものもあるが、使われたのは1bitだけで、他の3bitはほとんど使われなかった。スキップ条件は31種類用意したが、主に使われたものは表3に示すように比較的少ない。これに対しSTRがチップ上に占める割合は図3のとおり非常に大きい。このようなことを考えると、STRやSTフィールドの圧縮も検討に値すると思われる。

スキップ指定の次の命令がジャンプ命令であると条件ジャンプになる。このようなスキップ指定とジャンプ命令が対になる割合は、スキップ指定の約85%と非常に高い。そこで、演算を行い、その結果で条件ジャンプする命令を用意すればステップ数を節約できることが分かる。しかし、この種の命令には、演算に係るフィールドとジャンプアドレスフィールドが必要となり、実行サイクルも演算とジャンプの2マイクロサイクルになる。演算に関するフィールドとアドレスフィールドを32bitに入れようとすると、いずれかのフィールドを圧縮することとなり命令形式が変則的になる。又、マイクロ命令長を32bit以上にするにはLSIのピン数の制限から難しい。更に2マイクロサイクル命令の導入は均一性を乱し、ハードウェアが複雑になり集積度と高速化の面で思わしくない。以上を考慮するとPULCEにおける分岐命令の扱いは適当と考えられる。

### 3.3 レジスタ

マイクロ命令中のT(L)及びRフィールドで指定されるレジスタのひん度を表5に示す。インタフェースレジスタ(IFR)はPULCEと外部とのデータ交換の仲介となるレジスタである。データやアドレスを外部に送出するときは一度IFRにデータをセットしてから出力命令を出すし、入力の際にもデータは外部からIFRにセットされ、その後PULCE内で使用可能となる。このためIFRが使用される割合は高くなり37.39%に達した。PULCEのように外部との交

表5 レジスタの使用ひん度

	ビット数	数	使用ひん度(%)
汎用レジスタ(GPR)	16	4	28.45
インタフェースレジスタ(IFR)	16	2	37.39
レジスタファイル制御レジスタ	16, 4	6	6.31
専用レジスタ(STRなど)	16	4	7.08
レジスタファイル(RF)	16	32	20.77

信にレジスタを介する方法に対して、マイクロコンピュータなどによくあるように、アドレスバスとデータバスを直接外部へ引出し、内部レジスタの内容をアドレスとして1命令でデータを読み書きする方法もある。後者は一般のマイクロコンピュータのようにアーキテクチャがある程度固定している場合には命令数を減らす意味で有効であるが、アドレスやデータ幅が16bit以上であったり、外部にメモリ制御用レジスタを幾つも置くような応用ではPULCEの方式が有利な場合が多い。汎用レジスタ(GPR)は4個あるが、その使用ひん度はGPR0=12.07%, GPR1=7.08%, GPR2=5.46%, GPR3=3.83%となっている。レジスタファイルの各語へのアクセス率は平均して低く、レジスタファイルの語数に不足はないと思われる。レジスタファイルに関しては、レジスタファイル中の語を間接指定できるレジスタ(レジスタファイル制御レジスタ)を用意し、ゲスト計算機のレジスタ割当に便利にしようとしたが、実際には命令中から直接レジスタファイルの語を指定するケースが多かった。総じてレジスタ数やその機能割当に対する不満はないと思われる。

3.4 シフト

SH型命令は、エミュレーションなどのフィールド抽出に重要と考え、0~15bitのシフトを1マイクロ

表6 シフト量

シフト量(bit)	0	1	2	3	4	5	6	7
利用率(%)	0.2	29.7	3.7	4.7	11.0	3.2	1.9	2.5
シフト量(bit)	8	9	10	11	12	13	14	15
利用率(%)	34.7	0.4	1.3	0.8	2.3	2.0	1.2	0.4

命令で実行するバレルシフトを用意した。表6はシフト量の測定結果であり、1,2,4,8 bitのシフトは合計で80%近くに達する。チップ上にシフトの占める割合は図3に示すとおり大きい。8bitシフトなど使用率が高いことを考えるとバレルシフトは有効に使われたといえよう。1,2,4,8以外のシフトは比較的少なく、機能的には1,2,4,8 bitシフトだけを用意するアーキテクチャでもさほど性能に影響はないと思われる。ハードウェア量でいえばPULCEでは1,2,4,8bitシフトを直列につなぎ、これらの組合せで、0~15bitのシフトを行っており、1,2,4,8bitシフトだけのものに比べさほど増えてはいない。

LS型は汎用レジスタ0~3を幾つか連結して1ビットシフトするものである。レジスタの連結形態は命令中のRSフィールドで16種類指定できるが、実際に使われたものは限られており表7に示すものである。又、LS型ではマルチモード(MMフィールド)といい、LS型命令を何サイクルか繰り返し実行するモードを用意している。マルチモードが指定される割合は60%強と非常に高かった。

3.5 マスク

マスクはエミュレーションに効力を発揮するであろ

表7 ロングシフトの連結形態

汎用レジスタの結合形態	百分率(%)
GPR0-GPR1	43.9
GPR2-GPR3	28.3
GPR0-GPR1-GPR2-GPR3	21.5
GPR0-GPR1-GPR2	3.9
GPR1-GPR2-GPR3	1.5
GPR1-GPR2	1.0

表8 マスク利用率

(a) プログラム別マスク利用率

プログラム番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
マスク利用率(%)	0	10.4	4.6	8.4	0	0	1.2	0	5.5	0	0.1	3.4	2.3

(b) マスクの種類別利用率

マスクの種類	マスクしない	Tバスマスク	Lバスマスク	Rバスマスク	R,L,Tバスマスク
利用率(%)	97.88	0.85	0.13	0.90	0.23

表9 数値定数

PULCE	定数	0	1	2	3	4	5~7	8	9~16	17~32	33~max
	利用率	12.8	38.4	14.4	2.4	4.2	4.6	2.9	5.1	2.8	12.5
X P L	利用率	15.6	17.0	7.9	6.0	9.5	9.4	34.6			
	定数	0	1	2~3	4~7	8~15	16~31	32~max			

うと考え、RR, RH, SH型命令中に5bitを取って、R, L, Tバスに対するさまざまなマスク指定を用意した。表8(a)はマイクロプログラムごとのマスク利用率(マスクフィールドにマスクを指定する割合)を、(b)はマスクの種類別利用率を求めたものである。マスクは比較的マイクロプログラムの性質(表1参照)を反映しており、E, I型でよく利用され、O型ではあまり利用されない。マスクはエミュレーションなどで有効性を発揮しているが、平均すると利用率は低い。このような点を考えると、応用ごとにマイクロ命令のマスクフィールドの意味を変えたり、マスクフィールドを圧縮するとか、少しマスクに関しては工夫の余地があると思われる。

### 3.6 数値定数

表9にはマイクロプログラム中で使われる数値定数の値を示した。値としては15以下のものが76.7%を占めている。又、同表にはAlexanderらがXPLプログラムについて調べた<sup>6)</sup>数値定数の結果を示したが、これに比べるとマイクロプログラムでは“1”、“2”が非常に多いことが分かる。これは一般のプログラム、特に数値計算などでは、さまざま値の数値が使われるのに対し、マイクロプログラムではゲストマシンのレジスタのインクリメントやデクリメントなど比較的小さい値の数値が使われることが多いことによると思われる。

### 3.7 ジャンプ、ジャンプサブルーチンの飛距離

図5はジャンプ命令の飛距離の累積である。図の横軸は飛距離を表すのに必要なビット数である。図中の(…○…)線は正方向への飛距離(…×…)線は負方向への飛距離、実線はその合計である。又、同図にはAlexanderらがXPLプログラムで調べた無条件ジ

ャンプの飛距離も参考のために示した。PULCEの場合がXPLに比べて近距離へのジャンプが多いのはPULCEに条件ジャンプ命令がないことと、プログラムサイズが小さいためと思われる。一般に条件ジャンプは飛び先が近い。PULCEでは条件ジャンプをスキップ指定とジャンプ命令の組合せで実現するため、近距離へのジャンプが増える傾向にある。図5を見る上で注意を要する点としては、図中の曲線が二つの成分から成っていることである。すなわち近距離へのジャンプはプログラマが直接記述した飛び先であるのに対し、遠距離へのジャンプはモジュールのリンクにより決まるものでプログラマが関知しない飛距離である。この二つの要素の境は約10bitあたりである。

図6はジャンプサブルーチンの飛距離であり、図5と性格が大きく異なる。これはプログラマがサブルーチンをプログラムの最初か最後にまとめておくことに由来する。

## 4. む す び

測定の結果、マイクロプログラムによる命令の静的使用特性の違いは、マスク、シフトなどにくらか見受けられる以外あまり明確にならなかった。すなわちマイクロプログラムの性格の差により、プログラムの仕方やシーケンサの違いなどによる影響の方が大きいことが分かる。アーキテクチャに関する点としては、3.に示したように、マスク、RH型などで幾つかの検討に値する点が明らかになった。シーケンサに関しては、当初応用ごとに全く異なるものが要求されると考えていたが、実際にはマイクロ命令の制御部(図1のS部)はさほど特殊性が要求されなかった。但し、メモリ管理部(図1のM部)は応用ごとにさまざまな形

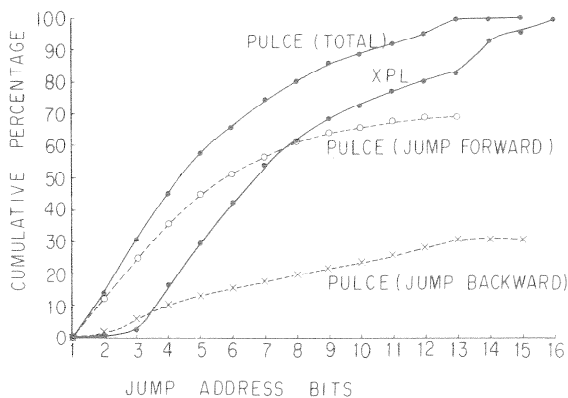


図5 ジャンプ命令の飛距離  
Fig.5 - Distribution of jump distance.

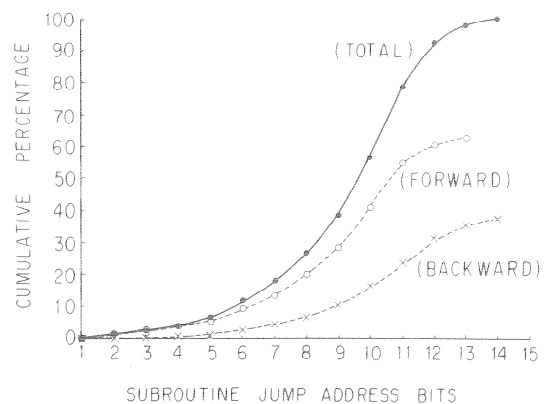


図6 ジャンプサブルーチン命令の飛距離  
Fig.6 - Distribution of jump subroutine distance.

態が採られた。

設計者の立場からの感想としては、用意された機能が必ずしも有効に使用されていない。これは設計者の一人よがりという面もあるが、設計者の意図を伝えるようなサンプルプログラムなどが十分用意されなかったためにプログラマが理解できなかったこと、又、かなり急いで大規模なマイクロプログラムを作成したために、効率より見やすさや作成の容易さを重視したマイクロプログラミングが行われた場合が多いためと見られる。これらの点の対策を行えば、設計者の意図が伝わり、もっとプログラムが効率化できると考えられる。アーキテクトは、よい機能を単に設計するだけでなく、これをプログラマに伝える努力が必要ということであり、マイクロプログラムにおいても効率と書きやすさを同時に与えるような工夫が必要ということであらう。

謝辞 最後にEPOSの測定をお願いした東芝総研の前田明、西尾誠一の両氏、測定結果の検討に参加頂いた藤井狷介室長ほか、計算機方式研究室の皆様、そして研究の機会を与えられた柏木寛電子計算機部長、石井治ソフトウェア部長に感謝の意を表します。

## 文 献

- (1) 飯塚, 古谷: “マイクロプロセッサアーキテクチャの一設計”, 信学論(D), J59-D, 3, pp.188-195 (昭51-03).
  - (2) Iizuka, H., Hayashi, Y., Tamaru, K. and Hara, H.: “Development of a high performance universal computing element-PULCE”, AFIPS Conf. Proc. vol. 47, 1970 NCC, pp.1255-1264(1979).
  - (3) 飯塚, 藤井, 古谷: “モジュール型複合計算機(ACE)の試み”, 情報処理, 20, 4, pp.314-318 (昭54-04).
  - (4) 飯塚, 松江, 橋本, 花田: “マイクロコンピュータシステムⅡ”, パターン情報処理システム調査研究報告(電総研), PIPS-R-No.23 (昭55-03).
  - (5) 工業技術院編: “大型プロジェクトパターン情報処理システム研究開発成果発表会論文集”, 日本産業技術振興協会(昭55-10); 電総研PIPS-R-No.25.
  - (6) Alexander, W. G. and Wortman, D. B.: “Static and dynamic characteristics of XPL program”, IEEE Computer (Nov.1975).
- (昭和56年6月24日受付, 9月9日再受付)