

IAP(内蔵アレイプロセッサ)の設計評価  
 DESIGN EVALUATION OF IAP(INTEGRATED ARRAY PROCESSOR)

梅谷 征雄 堀越 弥

日立製作所 中央研究所

CENTRAL RESEARCH LABORATORY, HITACHI LTD.

## 1. 緒言

HITAC M-180, M-200H, M-280H 処理装置に内蔵されている IAP (INTEGRATED ARRAY PROCESSOR 内蔵アレイプロセッサ) は科学技術計算の高速化を目的とするベクトル演算装置であるが、特定計算の高速化よりはむしろタイムシェアリング/マルチプログラミング環境で運用される大規模な計算センタシステムに置けるシステムスループットの向上を目的としている。このため、IAP 用命令語の仕様がそのような環境に耐えるように設計されているほか、ユーザのプログラミング環境を不変に保つため FORTRAN 語からの自動ベクトル化方式をとっている。

IAP はベクトル演算装置の常として、特定の性質を備えた反復演算のみを集中的に高速化する機構であることから、多様なジョブを処理する計算センタシステムにおいては、ジョブの性格やプログラミング言語、コンパイラの使用状況によりその適用状況が異なり、効果の把握を難しくしている。IAP の有効性を評価するためには実サイトにおける多くのデータを積み重ねる必要があるが、ここではその一例として、昭和 53 年より IAP を導入し、使用している日立中研計算センタシステムに置ける利用状況を解析し、そこから得られる知見を整理して見たい。

## 2. IAP の概要

緒言で述べたとおり、IAP は処理装置に内蔵されたベクトル演算装置であり、ベクトル命令を高速に実行することにより技術計算プログラムの処理時間を短縮する。その方式の概要を図 1 に示す。

すなわち、標準

FORTRAN (ANSI 66 FORTRAN ないし FORTRAN 77) にて記述されたユーザプログラムを最適化コンパイラによりベクトル命令を含むオブジェクトコードに変換し、中央処理装置 (CPU) により実行する。FORTRAN プログラムの最内側 DO ループ部分が数個のベクトル命令におきかわり演算ループは消滅する。

ベクトル命令とはベクトルと名付けた 1 次元のデータ組の間で単純な演算を纏めて行う命令である。中央処理装置内の IAP は、HSA (HIGH SPEED ARITHMETIC: 高速演算装置) をパイプライン的に効率よく使用することにより、これらの命令を高速に実行する。

表 1 に M-200H IAP の備えているベクトル命令の一覧を示す。単精度 (32 ビット)、倍精度 (64 ビット) の実数データにたいして合計 28 種類の命令が用意されており、個々の命令は単能であるがこれらを組み合わせることで種々の演算をサポートできるよう工夫されている。

IAP の重要な特徴の一つは、FORTRAN プログラム中の DO ループ部分をコンパイラがベクトル命令を含むオブジェクトコードに自動展開する処にある。コンパイラのこのような機能を自動ベクトル化と呼んでいる。図 2 に最適化 FORTRAN 77 コンパイラによる自動ベクトル化の一例を示す。これは内積演算の例であるが、内側二重ループのオブジェクトコードは図に示すように、.VD001, .VD002 などのベクトルアドレス設定コード、ループ長設定コードなどにひき続くベクトルコード (VIPE) からなる一重の演算ループである。

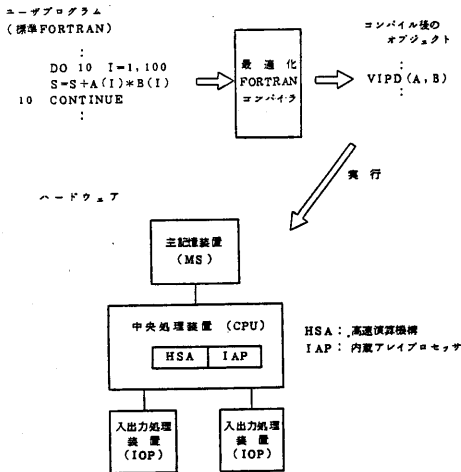
緒言にて述べたとおり，IAPの目的はシステムスループットの向上にありこのためIAPは，多重仮想記憶方式，マルチプログラム/マルチタスク方式を取る最新のオペレーティングシステムのもとで，複プログラムから時分割で使用できるよう次の点で工夫されている。

- (1) ベクトル命令のオペランドは仮想アドレスで指定される。
- (2) ベクトル命令はその実行の途中で割り込みを受け付ける仕様としてマルチプログラミングに対処し，しかもタスク切り替え時のオーバヘッドを最小とするためにベクトルデータを主記憶上におく仕様としている。

また コンパイラを介してFORTRAN言語で使えるようにし，利用率の向上と既存プログラムからの移行性の確保に努めている点も大きな特徴である。

表1 ベクトル命令一覧

命令名	高階度 二重ベクトル	低階度 単重ベクトル	動作概要
Vector Move	VME	VMD	$Z_i \leftarrow X_i$
Vector Elementwise Add	VEAE	VEAD	$Z_i \leftarrow X_i + X_i$
Vector Elementwise Subtract	VESE	VESD	$Z_i \leftarrow X_i - Y_i$
Vector Elementwise Multiply	VEME	VEMD	$Z_i \leftarrow X_i * Y_i$
Vector Elementwise Divide	VEDE	VEDD	$Z_i \leftarrow X_i / Y_i$
Vector Elementwise Complement	VECE	VECD	$Z_i \leftarrow -X_i$
Vector Inner Product	VIPE	VIPD	$FLR \leftarrow FLR * EX_i + Y_i$
Vector Element Sum	VSME	VSMD	$FLR \leftarrow FLR + EX_i$
First Order Iteration	VITRE	VITRD	$Z_i \leftarrow X_i + Y_i * Z_{i-1}$
Vector Element Sum With Complement	VSMCE	VSMCD	$FLR \leftarrow FLR - EX_i$
Vector Inner Product With Complement	VIPCE	VIPCD	$FLR \leftarrow FLR - EX_i + Y_i$
Scalar Multiply & Add	VSMAE	VSMAD	$Z_i \leftarrow Z_i + X * Y_i$
Scalar Multiply & Subtract	VSMSE	VSMSD	$Z_i \leftarrow Z_i - X * Y_i$
Convert Floating Double To Single		VCVDE	$Z_i(\text{単}) \leftarrow X_i(\text{倍})$
Convert Floating Single To Double		VCVED	$Z_i(\text{倍}) \leftarrow X_i(\text{単})$



(注) VIPD: Vector Inner Product命令 (長階度)

図1 IAPの方式概要

ユーザプログラム

```

J=1,C(1),A(100,100),J(100,100),C(100,100)
DO 10 I=1,N
DO 10 J=1,N
DO 10 K=1,N
10 C(I,J)=C(I,J)+A(K,I)*J(K,J)
STOP
END

```

オブジェクトコード

```

100000 LTR 4,4
JC 13,100007
100003 LA 14,A
ST 14,VD001
LA 14,B
ST 14,VD002
1) SR 0,0
L 1,N
SR 0,0
LE 0,C
LA 15,DA001
VIPE 0,15
STE 0,C
100007 AR 9,5
AR 10,5
JCT 8,100006

```

図2 自動ベクトル化オブジェクトコード例

### 3. IAPの効果決定要因

IAPはベクトル命令の高速化を通じて処理装置の平均性能を向上させることによりシステムスループットの増大に寄与する。処理装置性能とスループットの関係はシステム構成要素のバランスによるが、通常は処理装置ネットワークに構成されるのでその寄与は大きい。

処理装置性能の向上度はIAPの利用率すなわち、全処理時間中にベクトル処理の占める割合と、IAP固有の加速率すなわち、ベクトルの処理時間がIAPによりそれが無い場合の何分の一に短縮されるかを示す指標により決定される。前者をベクトル処理比率RV、後者をベクトル部性能向上比Kと呼ぶことにする。RV, Kと処理装置の平均性能向上比Pの関係を図3に示す。

なお、ベクトル処理比率RVの代わりに、ベクトル処理部をそれと等価なスカラ処理に置き換えて得られる指標であるベクトル化率Vを使うこともある。ベクトル化率はベクトル性能の寄与を含まないので利用率の尺度としては、より客観的である。

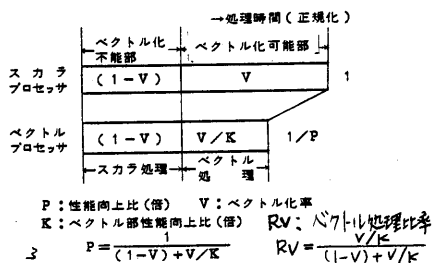


図3 ベクトルプロセッサの性能向上比

ここで、ベクトル化率(ないしベクトル処理比率)とベクトル部性能向上比の決定要因としては次のものが挙げられる。

#### (1) ベクトル化率の決定要因

##### (A) ジョブの種類

バッチジョブに関しては、技術計算、事務計算、OS/言語プロセッサなどのプログラム開発に分類されるが、IAPは基本的には技術計算用に設計されており、それ以外には適さない。また、最近TSSの普及によるインタラクティブなデータ編集、データセット操作、バッチジョブ投入などの処理が増えているがIAPはそれらにも適さない。

##### (B) 言語とコンパイラ

現在、IAPはFORTRANとAPLを通じて使用することができる。FORTRANについては、最適化FORTRAN77、最適化FORTRAN、拡張FORTRAN、実行型FORTRANの4種類のコンパイラが提供されているが、最適化FORTRAN77、最適化FORTRANのみが自動ベクトル化機能を備える。

##### (C) 演算の性格

ベクトル演算の基本的制約から、繰り返し演算のみにIAPを適用できる。また、演算間のデータ依存関係や繰り返し演算内の制御構造に関して特殊な制約がある。

##### (D) ハードウェアとコンパイラの機能

命令レパートリの制限から、データの種別(整数など)、配列参照の型(間接インデックスなど)に制約がある。また、コンパイラのデータ依存関

係の解析能力，組み込み関数のサポート範囲などにより自動ベクトル化の範囲が限定される。

(2) ベクトル部性能向上比の決定要因

これは，完全にIAPの論理方式により決定されるものである。その主要なファクタは繰り返し回数(ベクトル長)と単位繰り返しあたりの演算数(項数)である。M-200HIAPについて，項数の異なる次の4つのループに関して，ベクトル長とベクトル部性能向上比の関係を日立中研計算センタにおける実測により調査すると図4のようになる。

・二項ループ

```
DO 10 I=1,N
10 C(I)=A(I)+B(I)
```

・内積ループ

```
DO 10 I=1,N
10 SUM=SUM+A(I)*B(I)
```

・三項ループ

```
DO 10 I=1,N
10 C(I)=C(I)+A*B(I)
```

・四項ループ

```
DO 10 I=1,N
10 C(I)=C(I)-E*A(I)-F*B(I)
```

この図から，ベクトル長がさらに一層重要なファクタである事がわかる。

線形計算における上記ループ

群の出現頻度を勘案して二項ループ 20%，内積ループ 30%，三項ループ 15%，四項ループ 35%で重みを付け平均したものを仮りにループミックスと名付け，そのデータも図4に示した。大体ベクトル長10以上がIAPの効果を生む領域である。

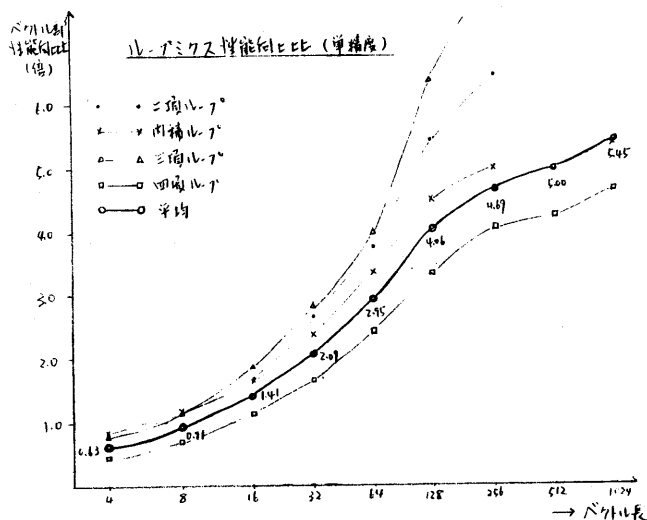


図4 ベクトル長とベクトル部性能向上比 (M-200HIAP)

#### 4. IAPの利用状況の解析

日立中研計算センタに於けるIAPの利用状況を述べる。

日立中研計算センタは、主に所内研究者の技術計算に供されており、中央処理装置としては、M-200H（IAP付き）とM-180（IAP付き）各1台を有する疎結合マルチプロセッサシステムである。主にM-200HがバッチジョブをM-180がTSSなどのインタラクティブジョブを処理する。OSはVOS3を用いている。

##### (1) ジョブ種類の解析

非常に大雑把な分類であるが、使用する言語の種類により見当をつけると表2のようなる。表2は昭和56年9月に於ける言語プロセッサの使用件数比を示す。FORTRANが技術計算、PL/I、COBOLが事務計算、アセンブラ、PASCALがシステムプログラム開発と考えれば、全体の約70%が技術計算、10%が事務計算、残り約20%がプログラム開発である。20%のプログラム開発は一部の研究用途の他システムのメンテナンスや拡張のために必要であることから技術計算比率70%はIAPの効果を十分期待できる環境にあると言つてよい。

表2 言語プロセッサの使用件数比

種別	比率(%)
拡張FORTRAN	37.7
最適化FORTRAN	19.3
最適化FORTRAN77	14.4
最適化PL/I	4.6
COBOL	6.8
アセンブラ	13.6
PASCAL	3.6
合計	100.0

日立中研計算センタ  
昭和56年9月

なお、IAPはTSS環境化でも使用可能であることから、TSSコマンドの使用状況も調査した。表3に示す。CALLコマンドにてIAP用オブジェクトコードが実行される可能性があるがその頻度は未だ低い。実質的な技術計算を対話的に行うのは今しばらく時期を待つ必要があろう。

##### (2) 言語プロセッサの使用状況

同じく表2に言語プロセッサの使用比率を示す。FORTRANの使用比率71.4%中IAP用の自動ベクトル化機能を備えた最適化FORTRAN、最適化FORTRAN77コンパイラの使用比率は33.7%と約半分である。これは小型のジョブに於いて特にメモリサイズの小さな拡張FORTRANコンパイラが好まれるためであるが、ジョブの大型化と共に将来は次第にオブジェクト効率の良い最適化FORTRANないし最適化FORTRAN77コンパイラに移行するものと期待される。

表3 TSSコマンド使用件数比

コマンド種別	比率(%)	
デック編集	15.2	
バッチ操作表示	46.2	
プログラム実行	CALL	5.6
	FORRT	0.1
	FORRT	0.0
	FORRT77	0.1
その他	0.5	
バッチジョブ操作	25.5	
その他	6.8	
合計	100.0	

日立中研計算センタ  
昭和56年9月

### (3) ハードウェアモニタによるIAP 利用状況調査

既に述べたジョブの種別、コンパイラ種別に演算の性格とハードウェア/コンパイラ能力の影響を加えた総合的なIAPの利用状況を把握するため、主にバッチ処理を受け持つM-200H処理装置について、ハードウェアモニタを用いた計測を行った。

図5は、昭和56年9月週末の典型的な1日における、ベクトル処理比率（ベクトル処理時間/全処理時間）の時系列的推移を示すものである。各プロット点は15分間の平均である。太線は分母にユーザモード処理時間を置いたもの、細線はシステムオーバヘッドを含めた全処理時間を置いたものである。図5に示すように、ベクトル処理比率は時間により激しく変動するのが特徴である。マルチプログラミング

によっても、IAPの適用に関してグラフを平準化させる程ジョブの粒がそろっていないことがうかがえる。この傾向は日平均についてもうかがえ、日による変動が大きい。しかし、22時以降の深夜に高い比率を示すのは一般的傾向であり、夜間の長時間ジョブとIAPの利用は関連があるものと思われる。

図6はベクトル部性能向上比を決める主要因子としてベクトル長をとり、その時系列的推移を15分ごとの平均で示したものである。また、図4のループミックスを用いたベクトル部性能比の推測値も併せて示した。

平均ベクトル長も8時から15時の昼間は激しく変動するが夜間に入って落ち着く傾向がある。図5と重ね合わせると、ベクトル処理比の高い時間帯ではベクトル長はほぼ一定となっており、同種のジョブが固まって処理されているものと推察される。ベクトル部性能向上比はおおむね2倍から3倍であり、設計時の予想値に近い。

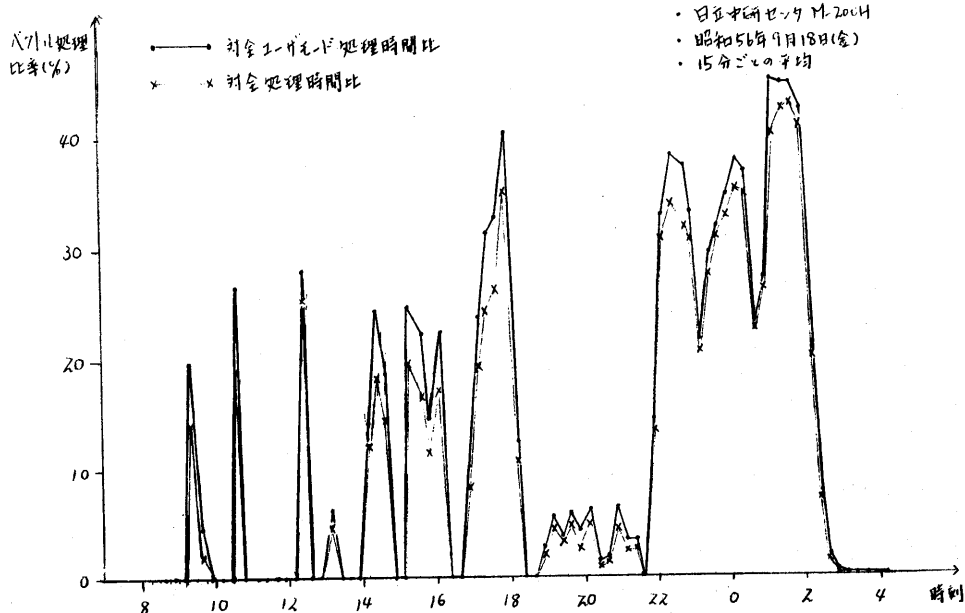


図5 ベクトル処理比率の時系列的変化

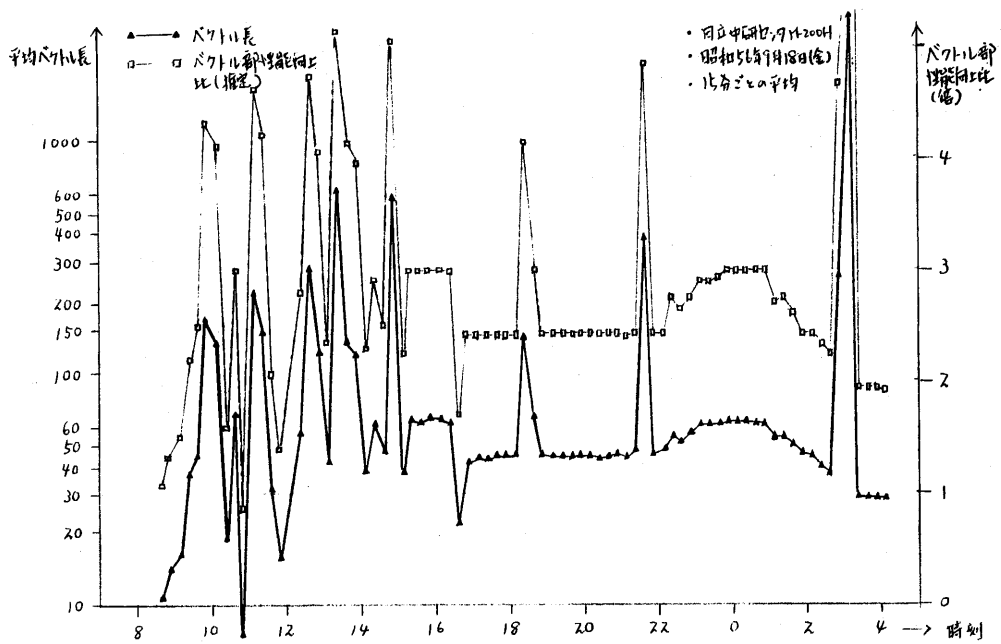


図6 平均ベクトル長，ベクトル部性能向上比の時系列的変化

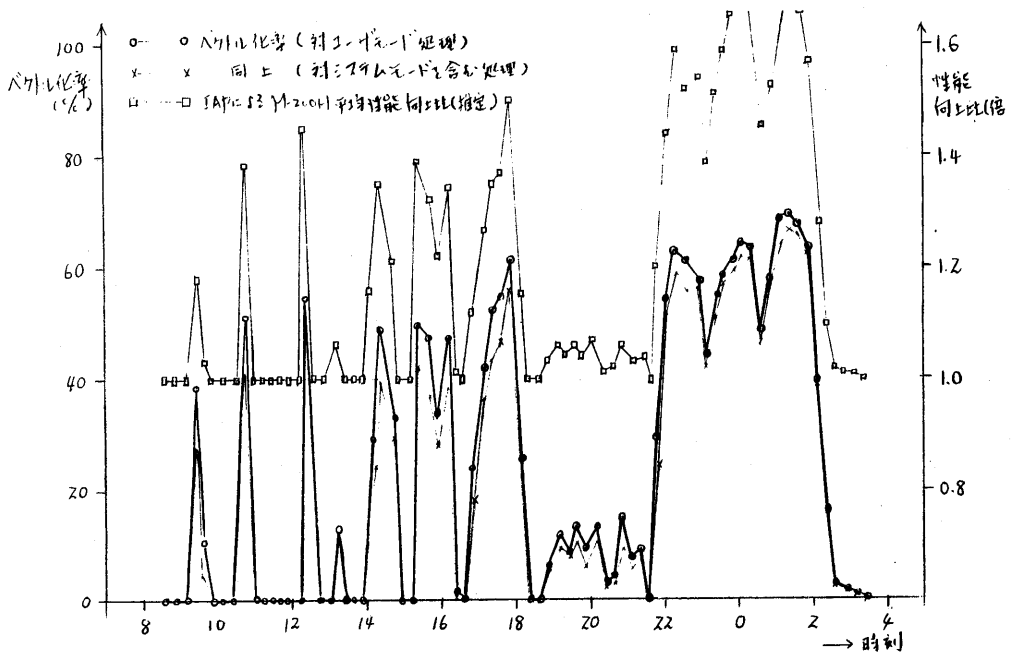


図7 ベクトル化率，平均性能向上比(M-200HIAP)の時系列的変化

最後に図7は、図5、図6から、ベクトル化率と、平均性能向上比を推定して示したものである。夜間のピーク時にはベクトル化率は70%位、性能向上比は1.7倍程度に達する。

## 5. 結言

以上、日立中研計算センタに置けるIAPの利用状況について述べた。1サイトの解析から結論を引き出すのは早尙であるが、ここから次のような知見が得られる。

- バッチを主体とするマルチプログラミングシステムにおいて、ピーク40%程度のIAP利用率を達成している。
- 利用率は時間毎に変動が大きくマルチプログラミングによる平準化ではならされない。また夜間の長時間ジョブでは一般に利用率が高い。
- FORTRAN言語の利用率は非常に高いことからFORTRANを通じての利用の狙いはあっている。ただし、ベクトル化コンパイラの利用ジョブ件数はそのうち半分程度であり、旧来コンパイラから最適化コンパイラへの移行が今後の課題である。

なお、当解析を行うに当たっては日立中研計算センタの下位憲司氏に大変お世話になった。厚く御礼を申し上げます。

## 6. 参考文献

- 1) 河辺ほか" HITAC M-200H内蔵アレイプロセッサ(IAP)", 信学会電子計算機研究会, EC80-79, 1981.9
- 2) 小高ほか" 超高速演算の動向" 情報処理, 1980.9, PP.927-937
- 3) 梅谷ほか" 技術計算プログラムの自動ベクトル化技術", 情報処理, 1982.1, PP.29-40