

# ベクトル計算機の高速度化技術の評価\*

中 村 絹 代\*1,

## Evaluation of High-Performance Techniques of a Vector Computer by Software Simulation

Kinuyo NAKAMURA \* 1

### ABSTRACT

This report describes the efficiency of two methods of boosting single vector computer ability by software simulation of DO loops of FORTRAN programs. The DO loops for evaluation were selected from computational fluid dynamics programs used by the National Aerospace Laboratory. One way of boosting computer ability is to strengthen arithmetic pipeline performance by increasing vector pipeline throughput of the cycle time. The other is to strengthen the ability to move vector data in and out of the arithmetic pipelines smoothly and quickly.

As a result of the evaluation, efficient pipeline throughput and the ability to supply vector data for arithmetic pipelines were quantitatively obtained.

**Keywords** : vector computer, software simulation, performance estimation, FORTRAN program, DO loops

### 概 要

本報告は、単一ベクトル計算機の二つの性能強化策の有効性をDOループのソフトウェアシミュレーションにより、評価、考察したものである。これらの性能強化策の評価のために利用したDOループは航技研の計算空気力学プログラムの中から選出した。一つ目の性能強化策は、パイプライン多重度の増大による演算器性能の強化であり、もう一つはパイプライン演算器に対するデータ供給能力の強化である。

結果として、これらの強化策の有効性を確認すると共に、効率的なパイプライン多重度やデータ供給能力を定量的に把握することができた。

### 1. はじめに

ベクトル計算機はFORTRANプログラムのDOループを高速処理するベクトル処理（パイプライン処理）機構を備えた計算機である。ベクトル計算機が使用され始めてから米国では25年、我が国では20年が経過し、現在、科学技術計算の分野におけるベクトル計算機の有効性に

対する認識は完全に定着している。一層の性能向上を目指して計算機方式は並列化の道を進んでいるが、ベクトル処理機構の効率性の故にベクトル処理機構は今後も並列計算機の要素計算機に採用されるであろう。従って、コストの上でも性能の上でも効率的なベクトル計算機について検討しておくことは重要である。

本報告は単一ベクトル計算機のハードウェア性能強化

---

\* 平成12年2月2日受付 (received 2, February 2000)

\*1 計算科学研究部 (Computational Science Division)

策のうち、マシクロック時間の短縮と並んで最も重要度の高い下記の性能強化策に関して考察したものである。

- (1) パイプライン多重度の増大による演算器性能の強化策
- (2) パイプライン演算器に対するデータ供給能力強化策

(1) はパイプラインの多重化により単位時間当たりの演算量の増大をはかるものである。(2) の性能強化策は二つの方策により対処されている。一つは(イ)主記憶に高速主記憶素子を採用することによる演算器へのデータ供給能力強化策である。もう一つは(ロ)主記憶のデータ供給能力の不足を大容量のベクトルレジスタにより補う方策である。

本報告はこれら二つの性能強化策の有効性をベクトル計算機のDOループ処理動作のソフトウェアシミュレーションにより研究したものである。

以下、2章において研究の対象となるベクトル計算機モデルの設定、ソフトウェアシミュレータVTAPおよび計算機モデルの処理速度評価のために必要なDOループの選定について述べる。3章においてDOループ処理におけるパイプライン演算器の動作について述べる。これに基づいて、4章ではパイプライン多重度の増大による処理速度向上効果を、そして、5章ではデータ供給能力強化策の効果について検討を行う。

## 2. シミュレーション対象の設定

本章ではシミュレーション対象となる計算機モデルの設定と計算機モデルの性能強化策の効果を推定するためのDOループの選択を行い、ベクトル計算機のDOループ処理動作に対するソフトウェアシミュレータVTAPの説明を行う。

### 2.1 計算機モデルの設定

種々のベクトル計算機を遠景において眺めるとどのベクトル計算機も似通った相貌を呈しており、モデルを設定するのは容易であるように思われる。しかしながら各機種に近寄って仔細に眺めて見るとどのベクトル計算機にもそれぞれ特色があり、モデルを設定する作業の難しさがにわかにクローズアップされてくる。

そこで報告の主旨が前章に述べた二つの性能強化策の有効性の研究であることを考慮し、この視点に立って計算機モデルの設定を行うことにする。即ち、演算器性能強化策に関しては計算機モデルの演算パイプラインの多重度を中心に、演算パイプラインの立ち上がり時間、種類、本数、並列動作を設定する。データ転送強化策に関しては、計算機モデルのロード・ストアパイプライン構成、ロード・ストアパイプラインの立ち上がり時間およびベクトルレジスタを設定する。計算機モデル及び各種パイプラインの立上り時間等を表2.1及び表2.2に示す。

表2.1 計算機モデルパラメータ

パラメータの種類	略号	省略	パラメータ値
パイプライン多重度	PM	8	1, 2, 4, 8, 16
ベクトルレジスタの個数	VR	128	8, 16, 128
ロード・ストアパイプライン構成	—	L/S×1	L/S×1, L/S×2, L×2+S×1
ロード・ストアパイプラインの立ち上がり時間	—	I型	I型, II型

表2.2 各種パイプラインの立ち上がり時間およびパイプライン速度係数

パイプライン名	対象ベクトル命令	立ち上がり時間 単位: $\tau$		パイプライン 速度係数 (k) I、II型共通
		I型	II型	
A パイプライン	加減算ベクトル命令	10	10	1
M パイプライン	乗算ベクトル命令	10	10	1
D パイプライン	除算ベクトル命令	26	26	7
L パイプライン	連続ロードベクトル命令	30	20	1
又は	ストライド付きロードベクトル命令	30	20	2
L/S パイプライン	インダイレクトロードベクトル命令	35	25	16
S パイプライン	連続ストアベクトル命令	15	10	1
又は	ストライド付きストアベクトル命令	15	10	2
L/S パイプライン	インダイレクトストアベクトル命令	20	15	16

## (1) パイプライン多重度及び演算パイプライン

多重パイプライン方式は物理的に複数本のパイプラインから構成されるパイプラインをソフトウェアを介して、論理的に一本のパイプラインに見せる方式をいう。論理的に一本に見えるパイプラインを構成する物理的なパイプラインの本数をパイプライン多重度（以下PMと略記する）という。

我々の計算機モデルでは

$$PM = 1, 2, 4, 8, 16$$

とする。また、このパイプライン多重度は1つの計算機モデルにおいては算術演算パイプライン（以下ARパイプラインと略記する）でもロード・ストアパイプライン（以下LSパイプラインと略記する）でも共通であるとする。

ベクトル計算機のパイプライン多重度の値は NEC-SX-2及びSX-3ではPM=4, SX-4ではPM=8, SX-5ではPM=16, CRAY-YMP/8ではPM=1, CRAY-C90ではPM=2である。Fujitsu-VP400(以下VP400と略記する)ではPM=4であり、VPPシリーズの要素計算機ではPM=8である。航技研の数値風洞の要素ベクトル計算機はPM=8である。

マシクロック時間を $\tau$ とすると、PM=mのARパイプラインは1 $\tau$ 当たりm個の演算結果を算出する能力を持つ。LSパイプラインの場合は1 $\tau$ 当たりm個の8B(B=バイト)データをロード又はストアする能力を持つ。

次にARパイプラインの種類と本数および各種パイプラインの並列動作について述べる。これらは本報告における全計算機モデルに共通である。ARパイプラインの種類には加減算パイプライン（以下Aパイプラインと略記する）、乗算パイプライン（以下Mパイプラインと略記する）、除算パイプライン（以下Dパイプラインと略記する）があり、パイプラインの本数は、

$$A \text{パイプライン} \times 1$$

$$M \text{パイプライン} \times 1$$

$$D \text{パイプライン} \times 1$$

である。ARパイプラインのうち、任意に2本が並列動作可能であり、2本のARパイプラインはまた任意本数のLSパイプラインと並列動作可能である。

ベクトル計算機のARパイプライン構成には、Fujitsu-VP2600やHITACシリーズの様にAパイプラインとしてもMパイプラインとしても、M&A ( $V_4 = V_1 + V_2 * V_3$ )パイプラインとしても使用できる汎用のARパイプラインを2本持つもの、SX-3シリーズの様に2本のAパイプライン、2本のMパイプライン、1本のDパイプラインを持つもの、CRAYシリーズの様にDパイプラインがなく、除算を逆数演算を行うパイプラインとMパイプライン等を組み合わせて行うもの等、各機種毎に変化があ

る。本計算機モデルでは変わり種のARパイプラインを採用しなかったが、それは研究の目的がパイプライン多重度と主記憶性能に関するものであることによる。ベクトル計算機の並列動作可能なARパイプラインの数は2、3および4とこれまた多岐にわたる。本計算機モデルでこれを2本としたのは、ソフトウェアシミュレータVTAPのシミュレーション精度をVP400と比較するため並列動作可能なARパイプラインの数をVP400と合わせる必要があったということ、および並列動作可能なARパイプラインの数は研究の目的にとってそれ程本質的なものではないという理由による。

ARパイプラインの立ち上り時間及びピーク処理速度も本報告の全計算機モデルを通じて共通である（表2.2）。

$$A \text{パイプラインの立ち上り時間} = 10 \tau$$

$$M \text{パイプラインの立ち上り時間} = 10 \tau$$

$$D \text{パイプラインの立ち上り時間} = 26 \tau$$

VP400のAパイプライン及びMパイプラインの立ち上がり時間は12 $\tau$ 、Dパイプラインのそれは36 $\tau$ である。また、CRAY-XMPではAパイプライン、Mパイプライン、Dパイプラインの立ち上がり時間はそれぞれ11 $\tau$ 、12 $\tau$ 、19 $\tau$ である。

また、各パイプラインのピーク処理速度は、 $PM / (k \cdot \tau)$ と表せる。

$$A \text{パイプラインの場合, } k = 1$$

$$M \text{パイプラインの場合, } k = 1$$

$$D \text{パイプラインの場合, } k = 7$$

である。kをパイプライン速度係数といい、除算命令は加減算命令や乗算命令に比較してパイプライン処理において7倍の時間がかかることを示すものである。

## (2) ロード・ストアパイプライン構成

LSパイプラインの種類にはロードパイプライン（以下Lパイプラインと略記する）、ストアパイプライン（以下Sパイプラインと略記する）、ロード・ストア兼用パイプライン（以下L/Sパイプラインと略記する）がある。

本計算機モデルでは主記憶の性能をLSパイプライン構成で表現するという観点に立ち、下記の3種類のLSパイプライン構成を考える。

$$(イ) L / S \times 1$$

$$(ロ) L / S \times 2$$

$$(ハ) L \times 2 + S \times 1$$

(イ) および(ロ)はロード・ストア兼用パイプラインがそれぞれ1本と2本であり、(ハ)はロードパイプラインが2本とストアパイプラインが1本の構成である。

ベクトル計算機のLSパイプライン構成はVP400ではL/S $\times$ 1、VP200ではL/S $\times$ 2、CRAY-YMP/8ではL $\times$ 2 + S $\times$ 1となっている。

LSパイプライン構成が主記憶のデータ供給能力を表現するというの以下の意味においてである。

今、 $PM=m$ 、LSパイプライン構成が  $L \times 2 + S \times 1$  の計算機モデルをモデルAとし、 $PM=m$ 、LSパイプライン構成が  $L/S \times 1$  の計算機モデルをモデルBとする。モデルAでは  $1 \tau$  当たり  $2m$  個の  $8B$  データを主記憶からベクトルレジスタにロードし、且つ  $m$  個の  $8B$  データをベクトルレジスタから主記憶にストアする能力がある。モデルBでは  $1 \tau$  当たり  $m$  個の  $8B$  データをロード又はストアする能力がある。従ってモデルAはモデルBの3倍の主記憶データ供給能力を持つことになる。このデータ供給能力の差を主記憶素子の性能に翻訳する。A、B両モデルの主記憶のバンク構成、主記憶素子の方式および主記憶制御方式が同じであるという条件のもとでは、モデルAの主記憶素子はモデルBの主記憶素子に比較してアクセスタイムが約1/3の高速主記憶素子を使用する必要がある。アクセスタイムのレベルがこれだけ異なれば、主記憶の消費電力が大幅に増加することおよび主記憶素子のコストが高価につくのは止むを得ないことである。ちなみにマシクロック時間  $\tau$  を  $\tau=10\text{ns}$  ( $10^{-9}$ 秒)、 $m=8$  とするとモデルAの主記憶データ供給能力は  $19.2\text{GB}$  ( $10^9$  バイト) / 秒となり、これは VP400 の主記憶データ供給能力の約4倍である。

### (3) ロード・ストアパイプラインの立ち上り時間とピーク処理（データ転送）速度

パイプラインに立ち上り時間があることは良く知られている。LSパイプラインもパイプラインの一種であるから当然立ち上り時間がある。この立ち上り時間はベクトルロード命令の場合は命令が発信されてからベクトルレジスタに最初のベクトルエレメントが主記憶からロードされる迄の時間をいい、ベクトルストア命令の場合は命令が発信されてからベクトルの最初のエレメントがベクトルレジスタから主記憶にストアされる迄の時間をいう。これも又主記憶の性能を表現するパラメータの一つである。

本計算機モデルでは立ち上り時間に関して二つのモデル、I型およびII型を考える。LSパイプラインの立ち上り時間およびピーク処理速度  $PM/(k \cdot \tau)$  におけるパイプライン速度係数  $k$  の値はベクトルロード・ストア命令の対象が連続ベクトル、ストライド付ベクトル、リストベクトル毎に又、ロード命令およびストア命令の別により異なる。表2.1にARパイプラインとLSパイプラインの立ち上がり時間およびパイプライン速度係数の一覧を示す。

ベクトル計算機の連続ベクトルロードに関するパイプラインの立ち上がり時間はCRAY-YMP/8では  $17 \tau$  ( $\tau=6\text{ns}$ )、VP400では  $30 \tau$  ( $\tau=13.5\text{ns}$ ) である。

### (4) ベクトルレジスタの個数

ベクトルレジスタは演算パイプラインがベクトル命令を実行する際の被演算子である入力データおよび演算結果である出力データを置く場所である。ベクトルレジスタの容量はベクトルレジスタの個数（以下VRと略記する）とベクトル長により定まる。

我々の計算機モデルでは

$$VR = 8, 16, 128$$

とする。また1個のベクトルレジスタのベクトル長は便宜的に $\infty$ としておく。

ベクトル計算機のベクトルレジスタの個数は、CRAY-YMPでは  $VR=8$ 、VP400では最大  $VR=256$  である。ベクトルレジスタの他にベクトルレジスタからアクセス可能な高速大容量のベクトルデータレジスタを持つNEC-SX-2およびSX-3の様なベクトル計算機、高速大容量の局所記憶を持つCRAY-2の様なベクトル計算機があるが、本計算機モデルではこれらの資源を考慮していない。

その理由は、ベクトルデータレジスタの場合、少なからぬ制限はあるがそのハードウェア上の用途はベクトルレジスタとほぼ同様であり、コンパイラは通常のベクトルレジスタと合わせてベクトルデータレジスタを使用していることから、両者を合わせて大容量のベクトルレジスタと考えても良いからである。大容量の局所記憶に関してはその資源の有効な利用を図るための措置が提案されているが、それが実現したとしても大容量の局所記憶はベクトル演算に関しては大容量のベクトルレジスタの有効性と高々同程度にしかならないからである。

### (5) その他の設定

計算機モデルのマシクロック時間  $\tau$  は全モデル共通に

$$\tau = 10\text{ns}$$

と固定した。 $\tau$  の値は素子および実装技術の進歩により短縮される。 $\tau$  の値が  $1/m$  になればDOループの処理速度は一律に  $m$  倍されるだけであり、 $\tau$  の値そのものは研究目的にたいして何の影響も与えない。 $\tau=10\text{ns}$  としたのは計算の便宜上の措置である。

また、計算機モデルにおけるベクトル命令の処理と実行の制御はVP400と同じものを採用した。なお、ベクトル命令の最短発信間隔は  $4 \tau$  である。

ベクトル計算機のベクトル命令制御方式はそれぞれのベクトル計算機のハードウェア資源の物量と配置により、機種毎にそれぞれ異なる。

ベクトル命令の制御方式とベクトルレジスタのアクセス制御をVP400のそれに合わせたのは以下に示す理由による。

(イ) VP400の制御方式はなお改良の余地を残しているとはいえ、最適に近いレベルにあると認識している。従って、制御方式としてVP400のそれを採用

することにより、研究が誤った結論に導かれることはない。

- (ロ) シミュレーションの精度検証をVP400で行う以上、これらの制御方式はVP400のそれと合わせておく方が良い。

ここで以下の記述の便宜の為、使用する計算機モデルを表現する記号法について説明しておく。計算機モデルのパラメータを上述べた(1)～(4)の順に次のように示す。

パイプライン多重度は $PM=8$ 、LSパイプライン構成は $L/S \times 2$ 、LSパイプラインの立ち上がり時間はI型、ベクトルレジスタ個数は $VR=128$ の計算機モデルを、

VP (8,  $L/S \times 2$ , I, 128)

と表す。又、計算機モデルパラメータは様々な値をとるが、そのパラメータの全ての値を対象とする場合、\*を用いて表す。例えば、

VP (8,  $L/S \times 1$ , I, \*)

は $VR=8, 16, 128$ の場合を対象とし、

VP (8,  $L/S \times 1$ , I, 8 )

VP (8,  $L/S \times 1$ , I, 16 )

VP (8,  $L/S \times 1$ , I, 128)

の三つの計算機モデルを対象とする。

計算機モデルパラメータの対象範囲は表2.1に示す通りである。

## 2.2 性能評価の為のDOループの選択

計算機の性能評価を行う為のワークロードの選択は厄介な作業であり、選択の基準は計算機利用技術の分野毎に、ワークロードの使用目的毎に異なるといっても良い。

目的はベクトル計算機のベクトル処理性能強化策の有効性の評価を行う為のワークロードの選択であるから、選択の対象は当然プログラムのDOループということになる。そのため、種々の計算空気力学プログラムを調査し、1000個弱のDOループの中から18個のDOループを選び出した。その選択の基準を以下に示す。

- (1) DOループの含む算術演算命令数の大小
- (2) ベクトル算術演算命令中の加減算命令数と乗算命令数のバランスが取れているものといないもの
- (3) ベクトル低速演算命令、即ち除算命令の有無
- (4) 全ベクトル命令に占めるベクトルロード・ストア命令数の比率の大小
- (5) ベクトルロードストア命令中のストライド付ロードストア命令又はリストベクトルロード・ストア命令の有無
- (6) VP400による実行処理速度の大小

以上の選択基準はこれ迄提案されてきたベクトル計算機

の性能評価の為のDOループのワークロード、例えば有名なりバモアカーネル<sup>2)</sup>、NASA-エームズR.CのNASカーネル<sup>3)</sup>、DFVLRカーネル等の選択基準とは全く異なっている。

DFVLRカーネルは主としてベクトル和、積及び内積等科学技術計算に現れる基本的な素ベクトル演算から構成されている。リバモアカーネルおよびNAS Sカーネルは、それぞれの研究所の中で頻度高く利用されているFFT計算、線型計算サブルーチン等に現れる典型的なプログラムエレメントから構成されている。これらのカーネルによる性能測定から有用な情報が得られることは明らかであるが、これらのカーネルプログラムは本報告の目的に関しては大きな短所を持っている。それはDOループ中に含まれるベクトル算術演算命令の数が概して少なく、こうしたDOループを用いることによっては大容量のベクトルレジスタの効果は正当に評価出来ないからである。事実リバモアカーネルに対するVP400の性能測定ではリバモアカーネル中の各DOループに対する性能の算術平均が166.1 MFLOPS (Mega Floating Operations Per Second)、調和平均が21.5 MFLOPSであるのに対して、NEC-SX-2のそれは算術平均が289.2 MFLOPS、調和平均が53.1 MFLOPSである<sup>4)</sup>。このデータによればNEC-SX-2はVP400の2倍程度の性能をリバモアカーネルに対して示している。しかしながら航技研の代表的な計算空気力学プログラムによる性能測定ではSX-2の性能はVP400と高々同等か或いは下廻るといふ結果がでてい。この様な結果が生ずる原因を調べて見ると大容量のベクトルレジスタとこれの最適利用コンパイラの存在に行き当たる。

表2.3に18個のDOループの特性を示す。表中、L、S、A、M、Dとあるのはそれぞれ各DOループが含むベクトルロード命令、ベクトルストア命令、ベクトル加減算命令、ベクトル乗算命令およびベクトル除算命令の数である。但し、ベクトルロード命令数とベクトルストア命令数はベクトルレジスタ個数が異なれば異なるのでベクトルレジスタの個数毎に別々に示してある。表中、 $VR=8$ の場合、DOループ番号2、4、6、17及び18のL及びSの内容が空欄になっているのはVP400のコンパイラがこれらのDOループに対して $VR=8$ のオブジェクトプログラムを作成できなかった為である。

## 2.3 汎用ベクトル計算機シミュレーションプログラムVTAP

仮想的に種々の計算機モデルを設定し、これらの計算機モデルのDOループの処理速度を推定することにより、ベクトル計算機のハードウェアの性能強化策の効果을明らかにする為の手段としてはソフトウェアシミュレ

表 2.3 DO ループの種類別ベクトル命令数および VP400 の実測 MFLOPS 値と VTAP シミュレーション MFLOPS 値の比較

DO ループ 番号	VTAP MFLOPS 値 ( $\alpha$ )	実測 MFLOPS 値 ( $\beta$ )	$\beta / \alpha$ $\times 100$	DO ループ中に含まれるベクトル命令の数								
				VR=128		VR=16		VR=8		A	M	D
				L	S	L	S	L	S			
1	256	254	99.2	107	80	172	145	180	153	31	82	2
2	815	700	85.9	21	50	117	136	—	—	176	170	4
3	961	870	90.5	110	59	349	262	548	375	300	340	5
4	686	654	95.3	28	39	128	126	—	—	140	169	8
5	777	720	92.7	70	15	108	51	183	91	113	117	6
6	467	414	88.7	26	18	72	57	—	—	143	147	1
7	388	402	103.6	6	7	6	7	6	7	4	17	1
8	785	870	110.8	22	4	29	11	57	31	35	33	0
9	305	341	111.8	7	4	7	4	7	4	6	9	1
10	309	354	114.6	22	2	22	2	22	2	14	20	2
11	433	420	97.0	42	2	42	2	50	10	36	54	2
12	259	256	98.8	30	10	30	10	34	14	20	10	0
13	458	498	108.7	25	5	25	5	26	6	20	15	0
14	583	605	103.8	31	5	31	5	39	10	25	27	0
15	254	237	93.3	13	5	13	5	13	5	9	4	0
16	408	417	102.2	32	6	32	6	42	15	24	42	0
17	596	560	94.0	34	45	127	122	—	—	202	202	7
18	701	705	100.6		8	176	96	—	—	200	162	7

ーションを使用するのが最適の方法である。この節では研究に使用したソフトウェアシミュレータVTAPの説明を簡単に行う<sup>9)</sup>。

VTAPはFujitsu-VPシリーズのFORTRANコンパイラの作成するオブジェクトプログラムを入力とし、DOループ処理におけるベクトル計算機の動作に関するタイムチャートを作成し、DOループ処理におけるベクトル計算機の動作解析を行うソフトウェアシミュレータである。以下にVTAPの特徴を示す。

- (1) VTAPはVPシリーズに属する計算機に対しては、
- (イ) ベクトル命令フェッチからベクトル命令実行迄の制御の動作を正確にシミュレート出来る。
  - (ロ) ベクトルレジスタアクセス制御は正確にシミュレート出来る。
  - (ハ) 全ての演算パイプラインの動作は正確にシミュレート出来る。
- (二) 主記憶アクセスはロード、ストアの別、連続ベクトルアクセス、ストライド付アクセス、インダイレクトアクセスの別にそれぞれ主記憶競合モデルを作成し、シミュレートしている。

(ホ) スカラ命令処理は処理時間を一律  $2\tau$  と単純化してシミュレートする。又レジスタコンフリクトチェックは行わない。更にキャッシュミスも無視する。

- (ヘ) ベクトル命令の最小発信時間間隔は  $4\tau$  である。
- (2) VTAPはVPシリーズ以外のベクトル計算機のDOループ処理動作も解析可能にする為、以下のように設定されている。

- (イ) マシンサイクル時間は変更可能である。
- (ロ) スカラ命令処理時間は変更可能である。
- (ハ) 各種パイプライン、パイプライン多重度の構成、性能、立ち上り時間は変更可能である。
- (ニ) 並列動作可能なパイプラインの種類と本数は変更可能である。
- (ホ) 主記憶アクセスに関する主記憶競合モデルについては主記憶競合がある一定の確率で発生すると仮定して、ロード/ストア処理速度の調整を行っており、この調整は変更可能である。
- (ヘ) ベクトルレジスタのアクセス制御は制限付ではあるが変更可能である。

VTAPはこれらの設定に従いオブジェクトプログラムの指定された範囲内の命令処理動作をシミュレートし、その性能を予測する。以下にVTAPの主な出力内容を述べる。

- ( i ) DO ループ処理におけるベクトル計算機の動作に関するタイムチャート
- ( ii ) 各種パイプラインの利用状況の解析
- ( iii ) ベクトルレジスタの利用状況の解析
- ( iv ) 実行性能推定および各種命令数の算出
- ( v ) DO ループ処理時間中の各種パイプライン演算器のアイドル率およびパイプライン立ち上がり時間の統計量

VTAPの精度について簡単に説明する。表2.3には18個のDOループをVP400上で走行させた結果とVTAPによるシミュレーション結果がMFLOPS値で表されている。VTAPシミュレーションの精度を示す表中の $\beta/\alpha \times 100$ により本報告におけるVTAPシミュレーションの精度を或る程度推定することができる。これによれば、その精度は平均値で99.5%であり、これはソフトウェアシミュレーションの結果としてかなり良い精度である。

### 3. シミュレーション結果の分析のための予備的考察

本章では種々の計算機モデルのDOループの処理速度に関するシミュレーション結果の分析に必要なパイプラインの動作に関するいくつかの定義と命題について述べる。

#### 3.1 パイプラインの動作に関する定義

**定義** (パイプライン動作の平行四辺形)

ベクトル命令をVで表す。図3.1にパイプライン動作の平行四辺形を示す。

t ; 時刻を示す。時間きざみの単位は $\tau$ である。

$t_a$  ; パイプラインに入力ベクトル又は入力ベクトル対の最初のエレメント又はエレメント対が入力された時刻である。

$t_b$  ; パイプラインから演算結果ベクトルの最初のエレメントが出力された時刻である。

$t_c$  ; パイプラインに入力ベクトル又は入力ベクトル対の最後のエレメント又はエレメント対が入力された時刻である。

$t_d$  ; パイプラインから演算結果ベクトルの最後のエレメントが出力された時刻である。

$|ST(V)| = t_b - t_a$  ;

パイプラインの立ち上がり時間である。パイプラインがAパイプラインに特定される場合、 $|ST(V)|$ は $|ST(A)|$ と表す。他のパイプラインの場合も同様の記号を用いる。

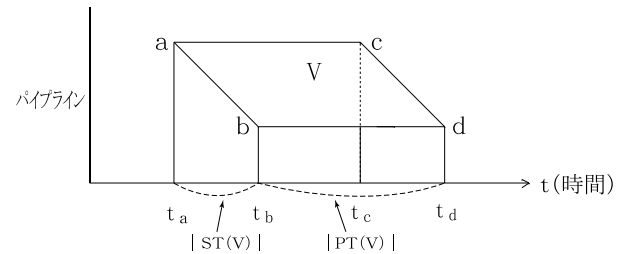


図3.1 パイプライン動作の平行四辺形

$|PT(V)| = t_d - t_b$  ;

パイプラインが演算結果を出力している時間である。パイプラインがAパイプラインの場合は $|PT(A)|$ 、Mパイプラインの場合は $|PT(M)|$ と記す。他のパイプラインも同様の記号を用いる。パイプライン多重度をPM、ベクトル長をVL、パイプライン速度係数をkとすると、

$$|PT(V)| = k \cdot VL / PM$$

である。

**定義** (ベクトル命令列)

DOループのオブジェクトコードの中のベクトル命令を発信順に並べたものをベクトル命令列といい、

$$\{V_i\}_{i=1}^{n_V} \text{ 又は } \{V_i\}$$

で表す。ベクトル命令列を命令発信の順序を変更せずに、ARパイプラインを使用するベクトル命令およびLSパイプラインを使用するベクトル命令毎に分離したものを、使用パイプラインの種類毎に、

$$\{AR_i\}_{i=1}^{n_{AR}} \text{ 又は } \{AR_i\}$$

$$\{LS_i\}_{i=1}^{n_{LS}} \text{ 又は } \{LS_i\}$$

と記し、それぞれAR命令列、LS命令列という。又、 $\{AR_i\}$ および $\{LS_i\}$ を命令発信の順序を変更せずに個々のパイプラインを使用するベクトル命令毎に分離したものをそれぞれ

$$\{A_i\}_{i=1}^{n_A}, \{M_i\}_{i=1}^{n_M}, \{D_i\}_{i=1}^{n_D}$$

$$\{L_i\}_{i=1}^{n_L}, \{S_i\}_{i=1}^{n_S}$$

又は、 $\{A_i\}$ 、 $\{M_i\}$ 、 $\{D_i\}$ 、 $\{L_i\}$ 、 $\{S_i\}$

と表し、それぞれA命令列、M命令列、D命令列、L命令列およびS命令列という。これらはそれぞれAパイプライン、Mパイプライン、Dパイプライン、Lパイプライン、Sパイプラインを使用するベクトル命令列であり、 $n_A$ 、 $n_M$ 、 $n_L$ 、 $n_S$ はそれぞれDOループ中に含まれる各ベクトル命令列の命令の総数である。当然、

$$\begin{aligned} n_{AR} &= n_A + n_M + n_D \\ n_{LS} &= n_L + n_S \\ n_V &= n_A + n_M + n_D + n_L + n_S \\ &= n_{AR} + n_{LS} \end{aligned}$$

となる。

**定義** (パイプラインの重合動作)

図3.2～図3.4に同一のパイプラインを使用する連続する二つのベクトル命令に対するパイプラインの動作を示す。例としてAパイプラインを使用する。

$$|VIT(A_{i+1})| = \begin{cases} t_{a_{i+1}} - t_{d_i}; & t_{d_i} < t_{a_{i+1}} \\ 0; & t_{a_{i+1}} \leq t_{d_i} \end{cases}$$

: Aパイプラインが動作していない時間を表す。 $0 \leq |VIT(A_{i+1})|$

$$|EST(A_{i+1})| = \begin{cases} t_{b_{i+1}} - t_{d_i}; & t_{a_{i+1}} \leq t_{d_i} \\ ST(A_{i+1}) = ST(A); & \\ t_{d_i} < t_{a_{i+1}} & \end{cases}$$

: Aパイプラインの実効立ち上り時間を

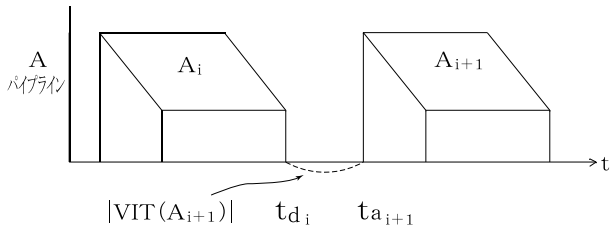


図3.2 連続するパイプラインの動作  
(パイプラインの非重合動作)

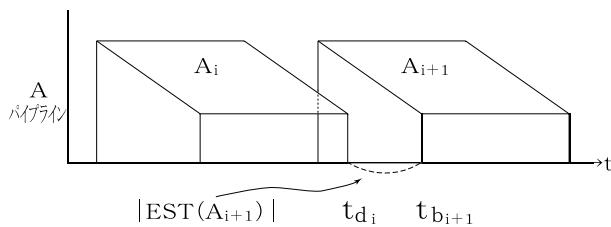


図3.3 パイプラインの不完全重合動作

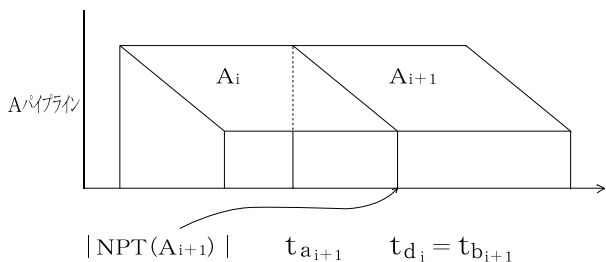


図3.4 パイプラインの完全重合動作

表す。 $0 \leq |EST(A_{i+1})| \leq |ST(A)|$   
 $|NPT(A_{i+1})| = t_{b_{i+1}} - t_{d_i}$   
 : Aパイプラインが演算結果を出力していない時間を表す。

$|VIT(A_{i+1})| \geq \tau$ の時パイプラインは非重合動作をするという。

$|EST(A_{i+1})| < |ST(A)|$ の時パイプラインは重合動作をする, 又は不完全重合動作をするという。

$|NPT(A_{i+1})| = 0$ の時パイプラインは完全重合動作をするという。

図3.2はAパイプラインの非重合動作を示し, 図3.3はパイプラインの不完全重合動作を示し, 図3.4はパイプラインの完全重合動作を示す。

$|EST(A_i)| < |EST(A_j)| \leq |ST(A)|$ の時, ベクトル命令 $A_i$ の処理のためのパイプライン動作はベクトル命令 $A_j$ の処理のためのパイプライン動作より重合の度合いが深いという。

上に示した記号はAパイプライン使用命令の場合で, これがLパイプライン使用命令の場合には順に,

$VIT(L_i), EST(L_i), NPT(L_i)$

の様に書く。他のパイプラインについても同様である。又, パイプラインを特に指定しない場合はそれぞれ順に,

$VIT(V_{i+1}), EST(V_{i+1}), NPT(V_{i+1})$

の様に示す。

**定義** (二つのパイプラインの並列動作)

図3.5は二つのパイプライン, AパイプラインとMパイプラインの並列動作を説明するものである。他のパイプラインの組み合わせについても同様である。

仮定:  $A_i$ 命令の方が先に発信されたものとする。又,

$A_i$ および $M_j$ 命令のオペランドベクトル長は等しいとする。更に, 本計算機モデルでは

$$|ST(A_i)| = |ST(M_j)|$$

である。

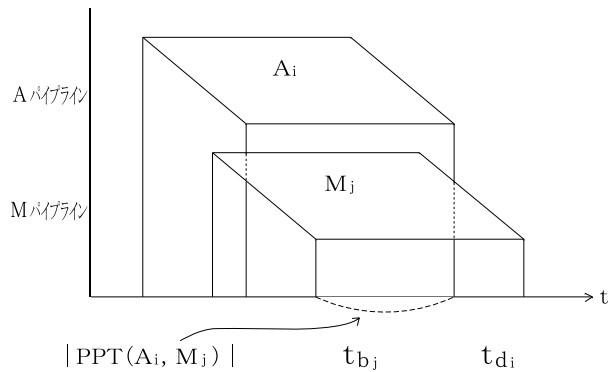


図3.5 パイプラインの並列動作



今,

$$|PPT(A_i, M_j)| = \begin{cases} t_{d_i} - t_{b_j} ; t_{d_i} \leq t_{b_j} \\ 0 ; t_{d_i} > t_{b_j} \end{cases}$$

と定義すると,

$$|PPT(A_i, M_j)| \geq \tau$$

の時二つのパイプラインは並列出力動作をするという。

並列出力動作時の処理速度は並列出力動作しない場合の2倍(AパイプラインとMパイプラインの場合)の処理速度になる。

### 3.2 パイプライン処理速度とパイプライン効率

定義(パイプライン処理速度とパイプライン効率)

ベクトル命令Vを処理する場合の処理速度Pは

$$P = \{ |PT(V)| / (|EST(V)| + |PT(V)|) \} \cdot \{ PM / (k \cdot \tau) \}$$

k: パイプライン速度係数

(3.2.1)

である。また,

$$|PT(V)| = k \cdot VL / PM$$

である。 $\tau$ をns単位で表し、Pの値を1000倍すると、PはMFLOPS値になる。

$$PP = (PM / (k \cdot \tau)) \times 1000$$

はパイプラインのピーク処理速度をMFLOPS値で表したものである。

$$PLE = \{ |PT(V)| / (|EST(V)| + |PT(V)|) \} \leq 1 \quad (3.2.2)$$

をパイプライン効率という。因みに,

$$VL=128, PM=1, k=1, |EST(V)| = 10 \tau \quad PLE=0.928$$

$$VL=128, PM=1, k=1, |EST(V)| = 30 \tau \quad PLE=0.810$$

$$VL=128, PM=16, k=1, |EST(V)| = 10 \tau \quad PLE=0.444$$

$$VL=128, PM=16, k=1, |EST(V)| = 30 \tau \quad PLE=0.211$$

である。

(3.2.1)式は、PLEを用いて

$$P = PLE \cdot PP \quad (3.2.1)'$$

とも表せる。(3.2.1)式において,

$$|EST(V)| = |ST(V)|$$

とするとパイプラインが非重合で動作したときのパイプラインの処理速度となる。

定義から $|PT(V)|$ が大きいほどパイプライン効率は高くなる。即ち、パイプライン効率は向上する。また、パイプラインの立ち上がり時間 $|ST(V)|$ が小さいほど同一の $|PT(V)|$ に対するパイプライン効率は高くなる。

パイプラインの実際動作においては実効上の立ち上がり時間は $|EST(V)| \leq |ST(V)|$ となるから、同じ $|PT(V)|$ に対するパイプライン効率はパイプライン動作の重合の度合いが深いほど大きい。以上の結果をとりまとめると次の命題が成立する。

#### 命題1

(イ) PM=一定の条件のもとで、二つのパイプラインVとV'の間に,

$$|ST(V)| < |ST(V')|$$

の関係がある時、固定されたベクトル長に対して、Vパイプラインのパイプライン効率はV'パイプラインのそれよりも大である。

(ロ) PM=一定の条件のもとで、一つのパイプライン、たとえばAパイプラインのベクトル命令 $A_i, A_j$ の処理において,

$$|EST(A_i)| < |EST(A_j)|$$

なる関係があれば、固定されたベクトル長に対して、パイプラインのパイプライン効率は $A_i$ 命令処理の場合の方が $A_j$ 命令処理の場合より大である。

次に二つの計算機モデル $VP(PM, VL, \tau)$ 及び $VP(PM', VL', \tau)$ が,

$$|PT(V)| = VL / PM = VL' / PM'$$

の関係のもとで同一のDOループをそれぞれベクトル長VL及びVL'で処理する場合の処理速度について考える。これについて下記の命題が成立する。

#### 命題2

今、二つの計算機モデル $A = VP(PM, a, b, c)$ 及び $B = VP(PM', a, b, c)$ があり、 $PM / PM' = k$ とする。

モデルAとモデルBが同一のDOループをそれぞれベクトル長VLおよびVL'で処理するとし、VLとVL'の間に $VL / VL' = k$ の関係があるとする。その時、コンパイラにより生成された同一DOループの二つのオブジェクトプログラムが同一であれば、モデルAのDOループの処理速度はモデルBのDOループの処理速度のk倍である。

証明

仮定;  $PM / PM' = VL / VL' = k$ より

$$VL = VL' \cdot k,$$

$$PM = PM' \cdot k.$$

$$\therefore VL / PM = VL' / PM' = |PT(V)|$$

命令列および $|PT(V)|$ が等しいオブジェクトプログラムの処理時間は等しい。等しい処理時間中にモデルAのDOループはモデルBのDOループのk倍の演算処理を行うことになるのでモデルAのDOループの処理速度はモデルBのDOループの処理速度のk倍となる。(終)

命題2を検証するために付録表1の各種計算機モデル

のDOループの処理速度を基に表3.1に従って $|PT(V)| = 16$ をもつDOループの処理速度を求める。表3.1はVP(2,L/S×1,I,128)におけるVL=32のDOループの処理速度を4倍したものをMF1とすることを示す。図3.6はDOループのMF1, MF2, MF3を折れ線グラフに示したものである。各DOループのMF1, MF2, MF3の値が等しいものはDOループのベクトル長が異なってもVP400のコンパイラが同一のオブジェクトプログラムを生成した場合であって、これにより命題は検証されている。DOループのMF1, MF2, MF3の値が異なっているものは同一DOループであってもVP400のコンパイラがDOループのベクトル長により異なるオブジェクトプログラムを生成した場合である。同一DOループに対してベクトル長ごとに異なったオブジェクトプログラムが生成される理由は以下の通りである。

富士通VPシリーズにおいて同じFORTRANコンパイラを用いても、DOループの性質によってはベクトル長が異なると、コンパイラの最適化手法により同一のオブジェクトプログラムとはならないことがある。オブジェクトプログラムが異なれば一般的にDOループの処理時間に相違が生ずるのは当然である。

しかし、MF1, MF2, MF3の値が異なる場合でもその差は高々10%程度であるので、各種計算機モデルの処理

表 3.1  $|PT(V)| = 16$ をもつDOループの処理速度の求め方

処理速度略号	計算機モデル	ベクトル長	倍率(k倍)
MF1	VP(2, L/S X 1, I, 128)	32	4倍
MF2	VP(4, L/S X 1, I, 128)	64	2倍
MF3	VP(8, L/S X 1, I, 128)	128	1倍

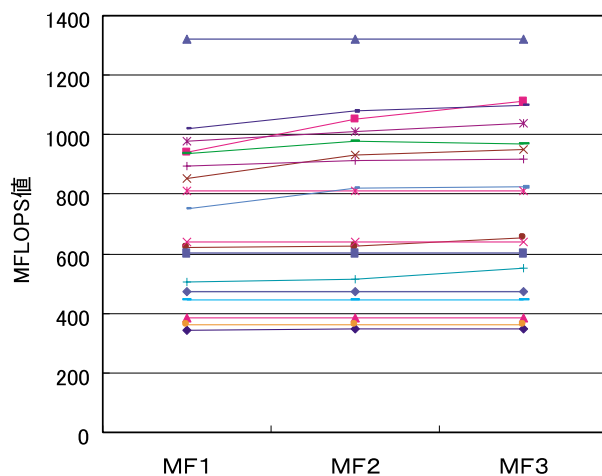


図 3.6  $|PT(V)| = 16$ をもつDOループの処理速度の比較

速度の概略的傾向を論じる場合には、一般的にこの命題2が成立すると仮定して議論を進めても良いと考える。

#### 4. パイプライン多重度と処理速度

本章では、ベクトル長を固定してパイプライン多重度毎のDOループの処理速度を比較することによりパイプライン多重度とDOループの処理速度の関係を検討する。また、パイプライン多重度とベクトル長の関係から飽和ベクトル長についても述べる。

本章の対象となる計算機モデルは、

VP(\*, L/S×1, I, 128)

である。L/Sパイプライン構成、L/Sパイプラインの立ち上がり時間及びベクトルレジスタ個数をこのように設定した上で、パイプライン多重度が1, 2, 4, 8及び16の5種類の計算機モデルを考える。パイプライン多重度の設定はこれまでのベクトル計算機のパイプライン多重度が1~8であることによる。

ここで、性能評価のためのDOループに関する記号法について述べておく。n番のDOループを $D_n$ で示し、n番のDOループの処理速度、即ちMFLOPS値を $MF(D_n, VL=l, PM=m)$ で示す。VLはDOループのベクトル長を、PMはパイプライン多重度を示す。

本章で考察対象となったデータを付録に示す。(付録表1~4)

##### 4.1 パイプライン多重度増大による処理速度向上効果

本節ではDOループの処理速度、パイプライン多重度増大によるDOループの処理速度向上率、また多重度1の処理速度に対するパイプライン多重度mのDOループの処理速度に及ぼす効果をみるためにDOループのパイ

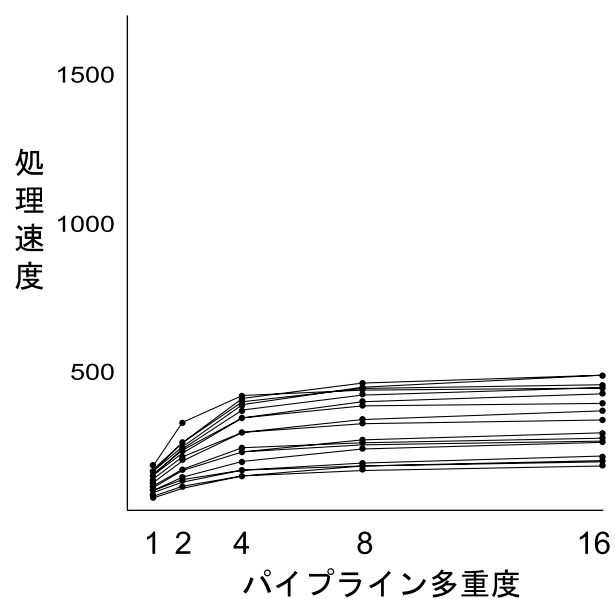


図 4.1(a) パイプライン多重度と処理速度 (VL=32)

ライン効率について考察する。

図4.1にVP(\*, L/S × 1, I, 128)におけるVL=32, VL=64, VL=128のDOループの処理速度とパイプライン多重度の関係を示す。各DOループのPM=1, 2, 4, 8, 16の処理速度を折線で結び、パイプライン多重度が増大する場合のDOループの処理速度の向上の様子を示すものである。横軸はパイプライン多重度を示し、縦軸はDOループの処理速度を示す。

パイプライン多重度増大によるDOループの処理速度向上率を $R_{m1}$ で表す。

$$R_{m1}(D_i) = \frac{MF(D_i, VL=32, PM=m)}{MF(D_i, VL=32, PM=1)} \quad m=2, 4, 8, 16$$

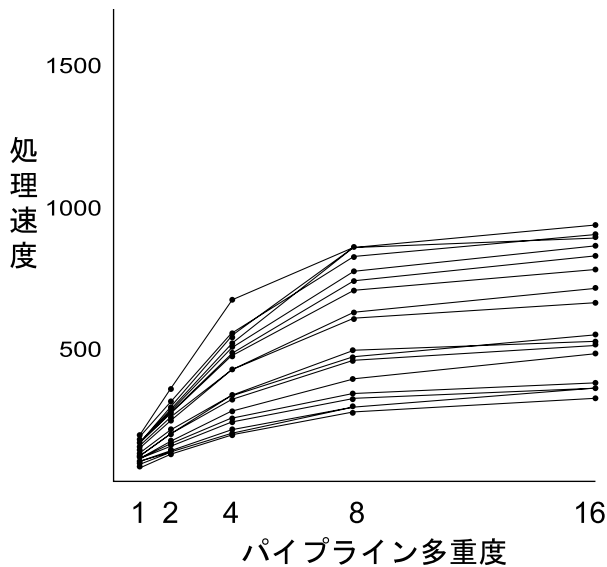


図4.1(b) パイプライン多重度と処理速度 (VL=64)

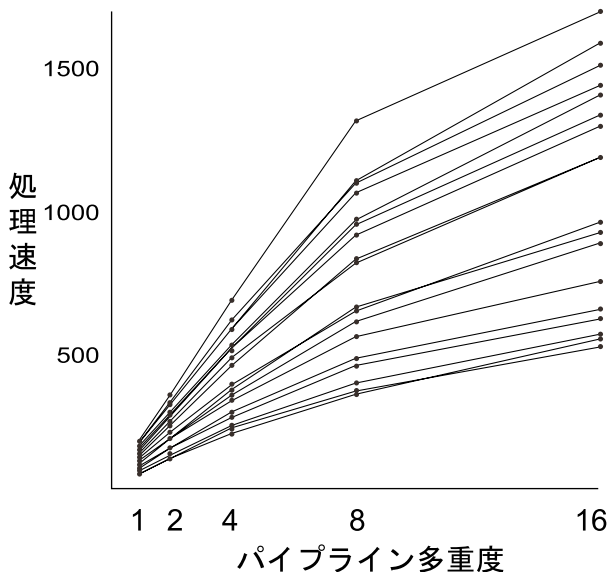


図4.1(c) パイプライン多重度と処理速度 (VL=128)

また、パイプライン効率を $E_{m1}$ で表す。DOループのパイプライン効率はPM=1のDOループのパイプライン効率に対するPM=2, 4, 8, 16のDOループのパイプライン効率の倍率であり、DOループの処理速度向上率をそれぞれのパイプライン多重度で除した値である。

$$E_{m1}(D_i) = R_{m1}(D_i) / m, \quad m=2, 4, 8, 16$$

図4.2にパイプライン多重度毎のDOループのパイプライン効率の最大値、最小値、平均値及び分布範囲を折線グラフに示す。横軸にパイプライン多重度を、縦軸にパイプライン効率を示す。

(1) VL=32の場合の多重度増大に伴う処理速度向上の傾向

ここではベクトル長が32の場合のパイプライン多重度の増大にともなうDOループの処理速度向上の傾向について記す。

図4.1(a)より、パイプライン多重度を増大することにより以下のことがわかる。

- ①全体のDOループの処理速度が向上する。
- ②DOループの処理速度の分布範囲が広がる。

①は次の理由による。DOループのオブジェクトプログラムは種々の命令列の集まりであり、その命令列の実行は種々のパイプラインの重合動作や並列動作の組み合わせである。従って、DOループの処理速度 $P_{DO}$ は、

$$P_{DO} = n_{AR} \cdot VL / T_{DO} \quad (4.1.1)$$

で表すことができる。ここで、 $T_{DO}$ はDOループの処理時間である。(4.1.1)式においてベクトル長を固定してパイプライン多重度を増大すると演算量( $n_{AR} \cdot VL$ )は一定であるが、DOループの処理時間( $T_{DO}$ )は変化する。ベクトル長を固定してパイプライン多重度を増大するとDOループを構成する全てのベクトル命令の処理時間(|ST(V)| + |PT(V)|)は小さくなるから、DOループの処理時間 $T_{DO}$ は小さくなる。従って、DOループの処理速度は増大する。

また、②のパイプライン多重度が増大するに従い、個々のDOループの処理速度の分布範囲が広がることは次の理由による。個々のDOループはDOループ中の命令数の相違、算術演算命令数とロード・ストア命令数の比率、各種算術演算命令数のバランスおよびデータ依存性等の種々の個性をもっている。これらの個性はパイプラインの重合動作や並列動作に影響し、パイプライン多重度の増大におけるDOループの処理時間 $T_{DO}$ の減少の度合いにも影響を及ぼす。即ち、個々のDOループの $T_{DO}$ の減少はパイプライン多重度の増大に対して同じ割合で減少するものではなく、全ベクトル命令に対してロード・ストア命令数が多ければ $T_{DO}$ の減少の度合いは緩く、少なければその度合いは激しい。更に、データ依存性により引き起こされるパイプラインの重合動作や算術

演算命令のバランスにより引き起こされるパイプラインの並列動作により  $T_{DO}$  の減少率は左右される。DO ループの処理速度や DO ループの処理速度向上率の分布範囲が広がるのは DO ループの個性によって  $T_{DO}$  の減少率が微妙に影響を受けるからである。

また、図 4.1(a) より以下のことがわかる。

③ DO ループの処理速度向上率  $R_{m1}$  はパイプライン多重度の増大に従い向上するが、 $R_{m1}$  の向上率は低下する様子が見えてくる。

④ 特に、PM=4 を超えるとパイプライン向上率の向上率の低下が著しいことは PM=4 で DO ループの処理速度向上が飽和傾向にあることを示すものである。

まず、③の  $R_{m1}$  の向上率の低下について考察する。ベクトル長を固定してパイプライン多重度を増大すると、 $|PT(V)| (=k \times VL / PM)$  は小さくなり、ベクトル命令の処理時間は減少し、その減少率は小さくなる。また、 $|PT(V)|$  を小さくすると、パイプラインの重合関係が崩れ、重合度が浅くなり、命題 1 よりパイプライン効率も減少する。更に、パイプラインの並列性の可能性が小さくなり、パイプラインの並列性の効率が落ちる。これらから、DO ループの処理時間  $T_{DO}$  が減少しその減少率も小さくなるのが予想される。これにより、DO ループの処理速度向上率の向上率は小さくなると思われる。

また、④の PM=4 を超えると DO ループの処理速度の向上が飽和傾向にある理由は上記の DO ループ処理速度向上率の向上率低下の原因に加えて、

$|PT(V)|$  が、

$$|PT(A)| = |PT(M)| = 1 \cdot 32 / 4 = 8 \tau$$

$$< 10 \tau = |ST(A)| = |ST(M)|$$

により加減算及び乗算パイプラインの立ち上がり時間より小なること、さらに、PM=8 では

$|PT(V)| < \tau_1 = 4 \tau$  による命令発信間隔より小なることが原因となり、パイプラインの不完全重合が更に発生し始めるためであると考えられる。このように、ベクトル長 32 に対して 4 を超えるパイプライン多重度の増大は DO ループの処理速度向上に対してその効果が徐々に低下する。

次に、図 4.2(a) よりパイプライン効率の傾向をみるとパイプライン毎のパイプライン効率の最大値、最小値及び平均値はパイプライン多重度が増大するにつれて小さくなり、その分布範囲は PM=4 において急激に広がるが、以降、急激な範囲の広がりは見られない。また、PM=2 におけるパイプライン効率は最小値でも 0.8 以上の値を示し、非常に高いパイプライン効率である。PM=4 におけるパイプライン効率は 0.5 から 0.8 の範囲に分布しており、PM=2 のパイプライン効率程ではないが、比較的

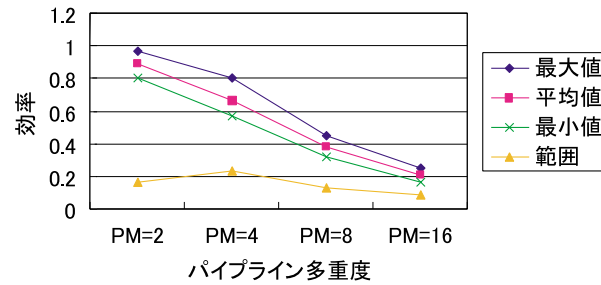


図 4.2(a) パイプライン多重度とパイプライン効率  
(VL = 32)

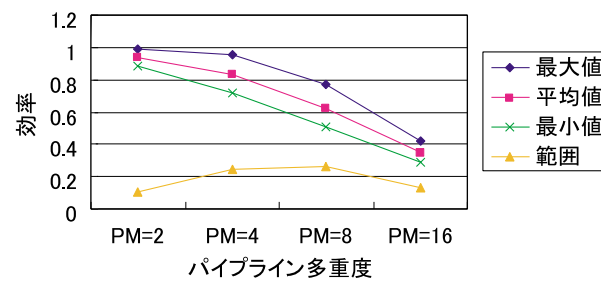


図 4.2(b) パイプライン多重度とパイプライン効率  
(VL = 64)

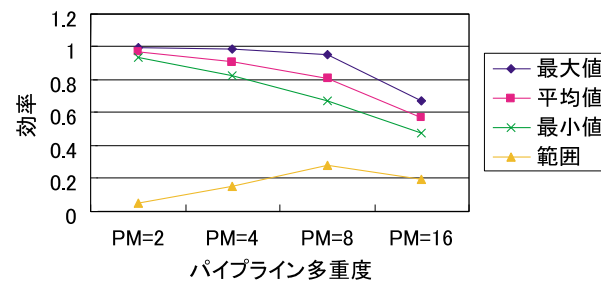


図 4.2(c) パイプライン多重度とパイプライン効率  
(VL = 128)

高い値である。これらに比べ、PM=8 のパイプライン効率の最大値は 0.5 にも満たない値であり、パイプライン効率が良くないことが分かる。又、PM=16 のパイプライン効率の最大値は更に小さく 0.3 以下であり、パイプライン効率が更に悪化していることを示す。

以上により、8 割程度の稼働率を良いパイプライン効率であるとすれば、VL=32 の場合には PM=2 が効率的パイプライン多重度であることを示すものと考えてよいであろう。

(2) VL = 64 及び VL = 128 の場合の多重度増大に伴う処理速度向上の傾向

ここでは、VL=64 および 128 の場合の多重度増大に伴う DO ループの処理速度向上の傾向について述べる。

図 4.1(b) よりパイプライン多重度が増大するにつれて全体の DO ループの処理速度が向上し、DO ループの処理速度の分布範囲も広がるのがわかる。更に、パイプ

ライン多重度の増大に従いDOループの処理速度向上率は向上するが、処理速度向上率の向上率は低下することがわかる。

これらはPM=32の場合と同様の傾向を示すものである。しかし、VL=32の場合にはPM=4を超えるとDOループの処理速度向上率の向上率の低下が著しかったが、VL=64の場合にはPM=8を超えると処理速度向上率の向上率の低下が著しい。これはVL=64の場合には、

$$|PT(A)| = |PT(M)| = 1 \cdot 64/8 = 8\tau$$

$$< 10\tau = |ST(A)| = |ST(M)|$$

となるのがPM=8だからである。従って、VL=32の場合と同様の理由によることが分かる。

また、図4.2(b)よりDOループのパイプライン効率の最大値、最小値及び平均値はパイプライン多重度が増大するにつれて小さくなり、これもVL=32の場合と同様の傾向を示す。そして、その分布範囲はPM=8までは広がるがPM=16ではその分布範囲は狭くなる。

PM=2及びPM=4の場合のパイプライン効率の平均値はいずれも0.8以上と高いが、PM=8では平均値は0.6と下がる。PM=16では平均値は0.4以下と更に低下し、全てのDOループのパイプライン効率は0.5に満たないことがわかる。これらから、VL=64の場合の効率的パイプライン多重度はPM=4であることが言える。

図4.1(c)及び図4.2(c)より、VL=128の場合においてもDOループの処理速度、DOループの処理速度向上率およびDOループのパイプライン効率についてはVL=32およびVL=64の場合のそれらと同様の傾向が見られる。また、VL=32およびVL=64の場合の効率的パイプライン多重度はPM=2及びPM=4であった。VL=128においては図4.2(c)よりPM=8までのパイプライン効率の平均値は80%以上と非常に高く、PM=16のパイプライン効率の平均値は0.57と急激に下がる。従って、VL=128の場合の効率的パイプライン多重度は8であると考えてよいであろう。

## 4.2 ベクトル長と処理速度

前節ではパイプライン多重度とDOループの処理速度の関係をベクトル長が32、64及び128の場合の各パイプライン多重度におけるDOループの処理速度を分析することにより行った。

ベクトル長を32、64および128としたのは、シミュレーション実験時には計算機に投入されるプログラムの多くは $100 \times 100 \times 100$ 程度の格子点計算のものが多かったこと、および方向によっては100点では細かく、30点位でも妥当な格子点数であることにより、ベクトル長として32、64および128を想定してシミュレーション実験を行った。

一般的に、パイプライン多重度を一定にした時、ベクトル長が大であればDOループの処理速度は大きいと言われている。これは個々のベクトル命令を処理する際のパイプライン効率の定義より明らかである。また、DOループの処理速度は計算機モデルのピーク処理速度以下であることはピーク処理速度の定義より明らかである。即ち、DOループの処理においては、算術ベクトル演算の外にスカラ処理命令、データのロード・ストア命令の処理が含まれる事、及びベクトル加算命令とベクトル乗算命令のバランス、データ依存性等により個々のDOループの処理速度についてはピーク処理速度は望めない。

また、個々のDOループの最高到達処理速度は計算できないが、それに十分近いDOループの処理速度は計算できる。

ここで準飽和ベクトル長及び準飽和处理速度を便宜的に次のように定義する。

定義 (準飽和ベクトル長及び準飽和处理速度)

$$R_{m,n}(D_i) = MF(D_i, VL=m) / MF(D_i, VL=n)$$

$$VL = n_1 < n_2 < \dots < n_k < \dots$$

とする時、

$$R_{n_{k+1}, n_k}(D_i) - 1 \leq 0.1$$

$$R_{n_{k+2}, n_{k+1}}(D_i) - 1 \leq 0.1$$

且つ、

$$R_{n_{k+1}, n_k}(D_i) - 1 \geq 2(R_{n_{k+2}, n_{k+1}}(D_i) - 1)$$

となる時、 $n_{k+2}$ を準飽和ベクトル長(qsvl)と言い、 $MF(D_i, VL=n_{k+2})$ をそのDOループの準飽和处理速度(qsmf)と言う。

3章の命題2より、計算機モデルVP(\*, L/S × 1, I, 128)のDOループの処理速度から、PM=1においてはVL=2, 4, 8, 16, 32, 64, 128の処理速度を求め、PM=16においてはVL=32, 64, 128, 512, 1024, 2048の処理速度を求めて、定義により、計算機モデルVP(1, L/S × 1, I, 128), VP(16, L/S × 1, I, 128)の準飽和ベクトル長を求める。

図4.3はPM=1及びPM=16における処理速度向上率の最大値、最小値及び平均値を折線グラフに表したものである。横軸は $R_{n_{k+1}, n_k}$ を、縦軸は向上率を示す。なお、 $R_{n_{k+1}, n_k}$ は $n_k$ の数値が大きいと煩雑になるのでR1~R6で表す。図4.3(a)ではR1=R<sub>4,2</sub>, R2=R<sub>8,4</sub>, R3=R<sub>16,8</sub>, R4=R<sub>32,16</sub>, R5=R<sub>64,32</sub>, R6=R<sub>128,64</sub>である。

図4.3(a)及び準飽和ベクトル長の定義より、VL=128がPM=1における準飽和ベクトル長であることがわかる。大方のDOループは準飽和ベクトル長の定義を満たしている。いくつかのDOループではこの定義に合わないものもあるが、それらのDOループの $R_{n_{k+1}, n_k}$ の値はあるkを超えると向上率が10%程度以下となり徐々に飽和傾向を示すので、大方のDOループと同様の傾向を示すと考えて差し支え無いと考えられる。但し、D<sub>7</sub>はいずれ

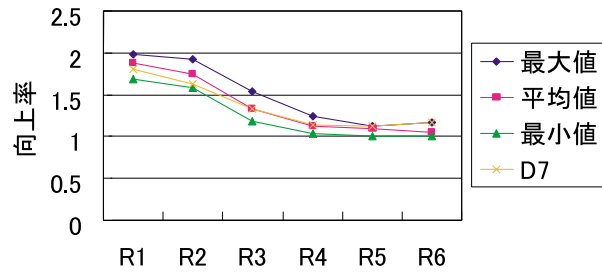


図 4.3(a) ベクトル長の相違による処理速度向上率  
(PM = 1)

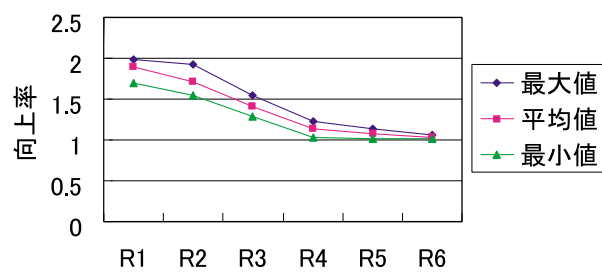


図 4.3(b) ベクトル長の相違による処理速度向上率  
(PM=16)

の  $R_{n_{k+1}}$ ,  $n_k$  の値も 1.10 を超えており、この DO ループについては VL=128 が準飽和ベクトル長でないと言える。D<sub>7</sub> についてのみ図 4.3(a) に示す。

PM=1 の準飽和ベクトル長が 128 であることから PM=2, 4, 8, 16 の準飽和ベクトル長はそれぞれ 256, 512, 1024, 2048 であることがわかる。図 4.3(b) から PM=16 の準飽和ベクトル長は 2048 であることが読みとれる。

さて、シミュレーション実験で対象としたベクトル長は 32, 64 及び 128 である。

|PT(V)| = 128 の時 DO ループの処理速度は準飽和処理速度となるから、命題 2 より PM=2, 4, 8, 16 の DO ループの準飽和処理速度を、

$$\begin{aligned} MF_{qsvl}(D_i, VL=\infty, PM=m) \\ = MF(D_i, VL=128, PM=1) \times m \\ m=1, 2, 4, 8, 16 \end{aligned}$$

として求め、DO ループの準飽和処理速度に対する PM=1, 2, 4, 8, 16 の DO ループの処理速度の達成率を以下のように求める。

$$\begin{aligned} R_{qsvl}(D_i, VL=n, PM=m) = MF(D_i, VL=n, PM=m) \\ / MF_{qsvl}(D_i, VL=\infty, PM=m) \times 100 \\ m=1, 2, 4, 8, 16, \quad n=32, 64, 128 \end{aligned}$$

図 4.4 は DO ループの準飽和処理速度に対する DO ループの処理速度の達成率の平均値を折線グラフにしたものである。横軸はパイプライン多重度を示し、縦軸は達成率を百分率で示す。図から、同一パイプライン多重度ではベクトル長が大きいほど達成率は高く、いずれのベクトル長においてもパイプライン多重度が增大するほど

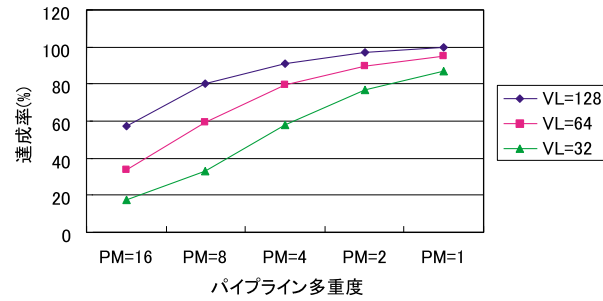


図 4.4 DO ループの準飽和処理速度に対する DO ループの処理速度の達成率

達成率は低下することがわかる。

また、各ベクトル長において達成率が他のパイプライン多重度のそれよりも格段に向上し、かつ達成率も 80% 程度と高いパイプライン多重度がある。それらは VL=32, VL=64, VL=128 でそれぞれ PM=2, PM=4, PM=8 である。

以上により、DO ループの準飽和処理速度に対する望ましい DO ループの処理速度の達成率として平均的に 80% 程度を考えると、ベクトル長毎の効率的なパイプライン多重度は

VL = 32 の場合、PM = 2

VL = 64 の場合、PM = 4

VL = 128 の場合、PM = 8

であろう。

### 4.3 DO ループ特性と処理速度

4.1 節および 4.2 節では処理速度とパイプライン多重度やベクトル長の関係について DO ループ全体の傾向を述べてきたが、DO ループには個性があり、これは個々の DO ループの処理速度や処理速度向上率に影響を与える。本節においては個々の DO ループの処理速度の大小と DO ループの特性について考察する。

図 4.1 において PM=1, 2, 4, 8, 16 の DO ループの処理速度の傾向をみると処理速度の大きい DO ループの処理速度はパイプライン多重度に関係なく大きく、処理速度の小さい DO ループの処理速度は同様にパイプライン多重度に関係なく小さい様子がうかがえる。

DO ループ特性を調べるために、ベクトル長別の各パイプライン多重度の DO ループの処理速度の平均値とその標準偏差を用いて、処理速度の大きい DO ループと処理速度の小さい DO ループを調べる。即ち、VL=n, PM=j の DO ループの処理速度の平均値を  $m_{n,j}$ 、同じく標準偏差を  $\sigma_{n,j}$  とする。この時、

$$MF(D_i, VL=n, PM=j) \geq m_{n,j} + \sigma_{n,j} \quad (4.3.1)$$

$$MF(D_i, VL=n, PM=j) \leq m_{n,j} - \sigma_{n,j} \quad (4.3.2)$$

を満たす処理速度をもつ DO ループをしらべ、(4.3.1) 式を満足する DO ループを L グループとし (4.3.2) 式を満足

する DO ループを S グループとする。DO ループの振り分けについては、大方これらの式を満たす DO ループやこれらの式を満たさないまでもこの基準値に近い値を示す DO ループもグループに含めた。L グループと S グループに属する DO ループは以下の通りである。

$$L \ni D_2, D_3, D_5, D_8, D_{18}$$

$$S \ni D_1, D_9, D_{10}, D_{12}, D_{15}$$

表 2.3 をもとに VR=128 の場合の DO ループ中の各種ベクトル命令数から以下の特性を求め、L グループ及び S グループに属する DO ループの特性を調べる。

①ロード・ストア特性

$n_{LS} / n_V \leq 1$ ，全命令数に対するロード・ストア命令数の比率。

0 に近い程ロード・ストアの負担が少ない。

②算術演算バランス特性

$$R = \text{MAX}(n_A, n_M) / \text{MIN}(n_A, n_M)$$

1 に近いほどバランスがよい。

③算術演算量特性

$n_V$ ，総ベクトル命令数。

図 4.5 に L グループ及び S グループの DO ループ特性を示す。図から L グループに属する DO ループは次の C1 ~ C3 の特性をもつ DO ループが多いことが分かる。

C1  $n_{LS} / n_V$  の値が小さい。

C2 算術演算命令数の加減算命令数と乗算命令数のバランスが比較的よい。

C3 算術演算命令数が多い。

同様に、S グループに属する DO ループは次の C4 ~ C6 の特性をもつ DO ループが多いことが分かる。

C4  $n_{LS} / n_V$  の値が大きい。

C5 算術演算命令数の加減算命令数と乗算命令数のバランスが悪い。

C6 算術演算命令数が少ない。

L グループの DO ループの処理速度が大であるのは以下の理由による。即ち、C1 によりロード・ストア命令に対して算術演算命令が多いので算術演算命令を纏めて処理可能であること、算術演算命令が多いためデータ依存性の少ないパイプライン使用が可能であり、パイプラインの完全重合や重合の度合いの深いパイプライン処理が可能なることによる。また、C2 により加減算パイプラインと乗算パイプラインの並列度が高いこと、及び C1, C3 により立ち上がり時間が大きくパイプライン効率の低いロード・ストア命令や除算命令が少数であることによる。

S グループの DO ループの特性が C4, C5 及び C6 である理由は L グループの場合と逆の理由によるものであると考えられる。但し、S グループの D<sub>1</sub> について言えば算術演算命令数は 100 命令以上あり、これは少ない命令数

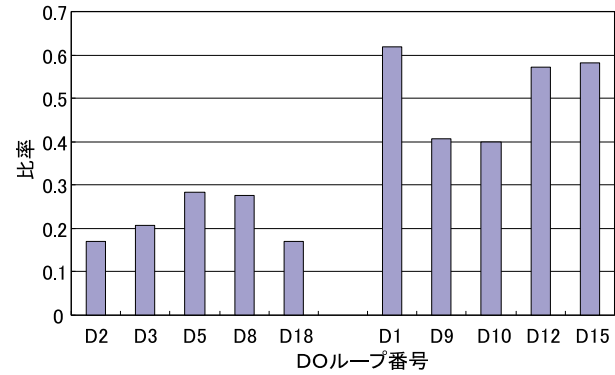


図 4.5(a) L グループ及び S グループの DO ループのロード・ストア特性

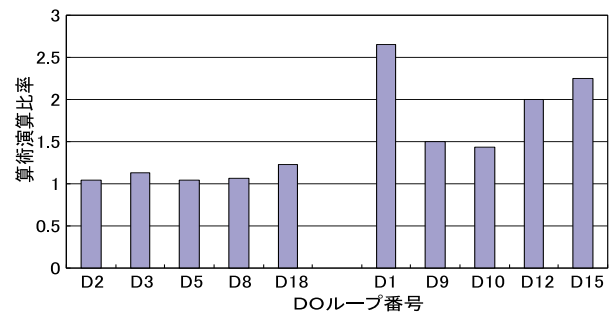


図 4.5(b) L グループ及び S グループの DO ループの算術演算バランス特性

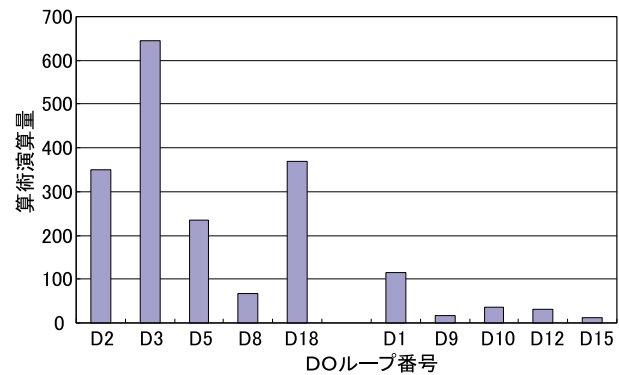


図 4.5(c) L グループ及び S グループの DO ループの算術演算量特性

であるとは言いにくい。

S グループにも L グループにも属さない DO ループは D<sub>6</sub> 及び D<sub>17</sub> を除き、L グループと S グループの両方の DO ループ特性が混じっている。D<sub>6</sub> 及び D<sub>17</sub> の DO ループは C1 ~ C3 を満足しているのも本来、L グループに属してもよいのではないかと考えられる。これらの DO ループの処理速度が大きくなるのは C1 ~ C6 以外の別の理由、例えば、データ依存性が高い等の理由が考えら

れる。

4.1 節より、処理速度の大きい DO ループはパイプライン効率が大きい傾向があること、及び処理速度の小さい DO ループはパイプライン効率は小さい傾向があることがわかっている。言い換えれば、DO ループ特性として C1~C3 の特性をもつ DO ループは処理速度が大きく、かつパイプライン効率が大きい傾向があること、および C4~C6 の特性をもつ DO ループは処理速度が小さく、かつパイプライン効率は小さい傾向があることが言える。

このように、計算機モデル VP(\*, L/S×1, I, 128) で処理される DO ループの処理速度の大小はパイプライン多重度及びベクトル長に関係なく分類できそうであり、DO ループの処理速度の大小及び DO ループの処理速度向上率の大小、即ち、DO ループのパイプライン効率の大小を説明する変数として DO ループ処理におけるベクトル命令数やその比率を参考にできる。従って、それらのデータは DO ループの特徴を説明する一つの変数として考えられる。

以上、DO ループ特性と DO ループの処理速度の大小及び DO ループの処理速度向上率の傾向を述べてきた。ベクトル計算機で効率的にプログラムを処理するためには、プログラム中の DO ループの処理速度を L グループに属するようにプログラムコーディングする必要がある。そのためには C1~C3 の DO ループ特性を持つようにプログラムコーディングすると良い。これらの DO ループ特性を定量的に表すと次の (イ) ~ (ハ) になる。

- (イ) ベクトル命令数に対するロード・ストア命令数の割合を 20~30% 程度以下とする。
- (ロ) 算術演算命令数を数十命令~100 命令以上にする。
- (ハ) 加減算命令数と乗算命令数をほぼ同数にする。

#### 4.4 パイプライン多重度と高速化効果

ハードウェア設計の面ではパイプライン多重度をいくらにするかはハードウェア物量の決定に関係する。

計算機モデル VP(\*, L/S×1, I, 128) では現在、利用されている問題規模、即ちベクトル長が 128 程度であれば効率的パイプライン多重度は PM=8 で良い。ベクトル長が 32~64 程度の問題規模が主流であれば効率的パイプライン多重度は PM=4 で良い。その場合、DO ループの処理速度の達成度は 60~80% 程度で満足すべきである。

プログラム作成の面では DO ループの処理速度を大きくするために、ベクトル命令数に占めるロード・ストア命令の比率を 30% 以下とし、算術演算命令数を数十命令以上にし、加減算命令数と乗算命令数をほぼ同数にするようにプログラムコーディングする。更に、パイプライ

ン多重度の大きいパイプラインを持つベクトル計算機で DO ループの処理を行う場合には、出来るだけベクトル長を長くするように配慮する必要がある。これは PM=16 の場合に VL=32 で DO ループを処理する場合には処理速度は PM=1 の場合のそれの高々 4 倍にしかならないが、VL=128 の場合には 10 倍にもなることをみてもわかる(付録表 2)。但し、ベクトル長は解くべき問題に依存して決まる。与えられた問題でベクトル長を長くするためにはプログラム作成においてプログラム技術が必要である。

## 5. データ供給能力と処理速度

本章ではデータ供給能力をロード・ストアパイプライン構成、ベクトルレジスタ、ロード・ストアパイプラインの立ち上がり時間の三つにわけて、それらの観点からデータ供給能力の DO ループの処理速度に及ぼす影響について論じ、最後に総合的評価を与える。

本章の各節で対象とする計算機モデルを表 5.1 に示す。又、本章で対象とする DO ループは、D<sub>2</sub>, D<sub>4</sub>, D<sub>6</sub>, D<sub>17</sub>, D<sub>18</sub> の 5 つの DO ループを除き残りの 13 の DO ループとする。その理由は、ベクトルレジスタ個数の設定はプログラム中にベクトル制御文を用いて行うが、上記の 5 つの DO ループでは外部モジュールの組込関数を用いているのでベクトルレジスタ個数を VR=8 とできないためである。

なお、本章では VL=128 の DO ループの処理速度を対象とする。

本章で考察対象となったデータを付録に示す。(付録表 5~8)

表 5.1 本章で用いる計算機モデル一覧表

計算機モデル	5.2 節	5.3 節	5.4 節
VP (8, L/S×1, I, 8)	○	○	○
VP (8, L/S×1, I, 16)	○		○
VP (8, L/S×1, I, 128)	○	○	○
VP (8, L/S×2, I, 8)	○	○	
VP (8, L/S×2, I, 16)	○		
VP (8, L/S×2, I, 128)	○	○	
VP (8, L×2+S×1, I, 8)	○	○	
VP (8, L×2+S×1, I, 16)	○		
VP (8, L×2+S×1, I, 128)	○	○	
VP (8, L/S×1, II, 8)			○
VP (8, L/S×1, II, 16)			○
VP (8, L/S×1, II, 128)			○



### 5.1 データ供給能力強化策

演算パイプラインへのデータ供給能力、即ちデータ転送能力はロード・ストアパイプラインの本数や形態、ベクトルレジスタ個数の大小及び主記憶性能を考察することである。

ベクトルレジスタはベクトル命令をパイプラインで実行するのに必要な入力データ（ソースオペランド）や結果として出力されるデータを一時的に置く場所である。ベクトル演算に必要なデータは予め、ロード命令により主記憶装置から読み出され、ベクトルレジスタに置かれる。また、ベクトル演算により処理された結果、即ち、出力データ（シンクオペランド）はストア命令によりベクトルレジスタから読み出され、主記憶装置に格納される。

各種演算パイプラインはベクトルレジスタにあるデータを対象に演算を行う。通常、演算は2つのソースオペランドおよび1つのシンクオペランドがあれば、即ち、3個のベクトルレジスタがあれば演算可能である。この場合には、ロード命令、ロード命令、算術演算命令、ストア命令、ロード命令、ロード命令、算術演算命令、ストア命令、……を繰り返すことになる。これら演算の実行においてベクトルレジスタの個数が沢山あることは以下の利点がある。

- ① 遙か先の算術演算命令に必要なソースオペランドもベクトルレジスタに予め置いておくことができる。このため、ロード命令を纏めて処理することおよび算術演算命令を纏めて処理することが可能となる。
- ② 何度も使用するデータを主記憶装置からベクトルレジスタへ一度ロードするだけで、ベクトルレジスタに置いておくことができる。このため主記憶とベクトルレジスタ間の不要のデータアクセスを避けることができる。
- ③ 後で使用する中間結果を全てベクトルレジスタに置いておくことができる。②同様、不要のデータアクセスを避けることができる。
- ④ 算術演算パイプライン動作中に別のベクトルレジスタにロード・ストアパイプラインでアクセス可能である。これにより、算術演算パイプラインとロード・ストアパイプラインの並列処理が可能である。

①～④により、パイプラインの重合の度合いを深くすることやパイプラインの並列処理の可能性を高めることができる。従って、ベクトルレジスタの個数を大きくすることはデータ供給能力を間接的に高めることになり、処理速度の向上に有効である。

同時走行可能なロード・ストア兼用パイプラインが1

本の場合にはロード命令またはストア命令を1つ処理することが出来る。同じく、同時走行可能なロード・ストア兼用パイプラインが2本の場合には、ロード命令またはストア命令を同時に2つ処理することが出来る。また、同時走行可能なパイプラインがロードパイプラインが2本、ストアパイプラインが1本の場合にはロード命令を2つ、ストア命令を1つ、同時に最大3つ処理することが出来る。このように、ロード・ストアパイプラインの本数を増大するとロード・ストア命令の同時実行が可能となり、データ供給能力を高めることができる。

主記憶容量が大きいと主記憶装置とベクトルレジスタとのデータ転送のためにアクセス時間がかかる。アクセス時間の短縮化を図るためには、即ち単位時間当たりのデータ転送率を増大するためには主記憶に高価な高速素子を使用する場合と、主記憶のインターリーブ数の増大により行う方法がある。後者の場合には制御方法が複雑になるのでロード・ストアパイプラインの立ち上がり時間が長くなる傾向がある。ロード・ストアパイプラインの立ち上がり時間の短縮化は主記憶装置をコンパクトにすることと関連する。

### 5.2 ベクトルレジスタ個数と処理速度

本節で対象とする計算機モデルは表5.1に示すように、パイプライン多重度 (PM=8) 及びロード・ストアパイプラインの立上り時間 (Iタイプ) は同じである。従って、DO ループの処理速度は

$$MF(D_i, LS\text{type}, VR=m) \\ LS\text{type}=L/S \times 1, L/S \times 2, L \times 2 + S \times 1 \\ m=8, 16, 128$$

と表す。

ベクトルレジスタ個数と密接に関係するロード・ストア命令の全ベクトル命令に対する比率  $R_{LS}$  と処理速度向上率  $R1 \sim R6$  を以下のように求める。

$$R_{LS}(D_i) = n_{LS}(D_i) / n_v(D_i) \\ = n_{LS}(D_i) / (n_{LS}(D_i) + n_{AR}(D_i)) \leq 1 \\ R1(D_i) = MF(D_i, L/S \times 1, VR=16) / MF(D_i, L/S \times 1, VR=8) \\ R2(D_i) = MF(D_i, L/S \times 1, VR=128) / MF(D_i, L/S \times 1, VR=8) \\ R3(D_i) = MF(D_i, L/S \times 2, VR=16) / MF(D_i, L/S \times 2, VR=8) \\ R4(D_i) = MF(D_i, L/S \times 2, VR=128) / MF(D_i, L/S \times 2, VR=8) \\ R5(D_i) = MF(D_i, L \times 2 + S \times 1, VR=16) \\ / MF(D_i, L \times 2 + S \times 1, VR=8) \\ R6(D_i) = MF(D_i, L \times 2 + S \times 1, VR=128) \\ / MF(D_i, L \times 2 + S \times 1, VR=8)$$

先ず、 $R_{LS}$  について考察する。VR=8, 16, 128 の  $R_{LS}$  は本章で共通である。図5.1は  $R_{LS}$  のベクトルレジスタ毎の最大値、最小値、平均値及び分布範囲を示したものである。 $R_{LS}$  の平均値、最大値及び最小値はベクトルレジ

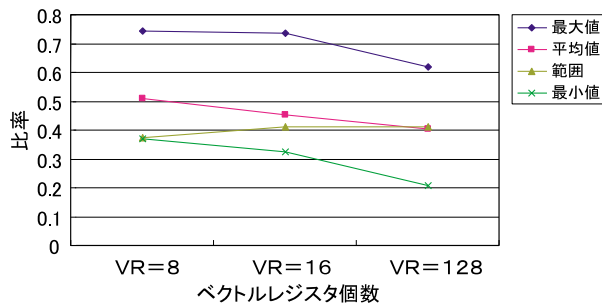


図 5.1 全ベクトル命令中のロード・ストア命令の比率

スタ個数が大きくなるにつれて減少する。これは、ベクトルレジスタ個数が大きくなれば DO ループのロード・ストア命令数が減少することを示す。又、分布範囲は VR=16 及び VR=128 では VR=8 のそれと比較して僅かに広くなり、0.4 程度となる。これは、ロード・ストア命令数の減少の度合いの大きい DO ループと小さい DO ループの差が広がることを示す。そして、 $R_{LS}$  の平均値はベクトルレジスタの個数が大きくなるにつれて 10% 程度ずつ小さくなる。

図 5.2 は、各種パイプライン構成におけるベクトルレジスタ個数毎の DO ループの処理速度の最大値、平均値、最小値及び分布範囲を折線グラフに示したものである。また、図 5.3 は DO ループの処理速度の向上率 R1 ~ R6 の最大値、平均値、最小値及び分布範囲を示す。

図 5.2(a) よりベクトルレジスタ個数が大きくなるにつれて DO ループの処理速度の最大値、最小値、平均値は大きくなり、その分布範囲も広がるのが分かる。また、図 5.3(a) より DO ループの処理速度向上率である R1, R2 の最小値は等しいが、最大値、平均値及び範囲は R2 の方が大きいことがわかり、特に R2 の分布範囲は R1 のそれと比較して格段の広がりを見せる。

これらの傾向はロード・ストアパイプライン構成が  $L/S \times 2$  の場合 (図 5.2(b), 図 5.3(b)) 及び  $L \times 2 + S \times 1$  の場合 (図 5.2(c), 図 5.3(c)) にも同様に得られる。

図 5.3 より、ロード・ストアパイプライン構成を変化させても R1 の平均値は 1.5 前後の値を、R2 の平均値は 2.1 前後の値を示し、DO ループの処理速度向上率にはロード・ストアパイプライン構成の相違による大きな差は見られない。従って、ロード・ストアパイプライン構成に関係なく倍率効果はほぼ同じであると考えてよい。但し、DO ループの処理速度の平均値は  $L/S \times 1$  の単一パイプライン構成と  $L/S \times 2$  及び  $L \times 2 + S \times 1$  の複数パイプライン構成との間に差があり、複数パイプライン構成の DO ループの平均値は  $L/S \times 1$  の場合の DO ループの処理速度の平均値の 14 ~ 20% 増しになっている。

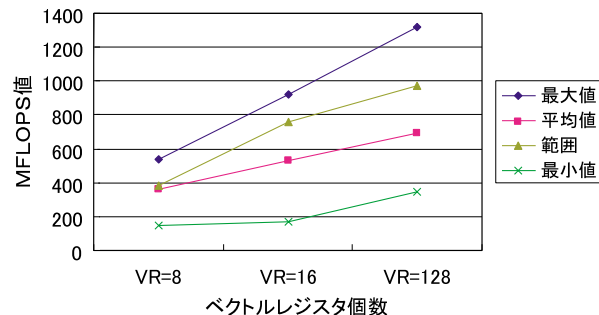


図 5.2(a) ベクトルレジスタ個数と処理速度 ( $L/S \times 1$ )

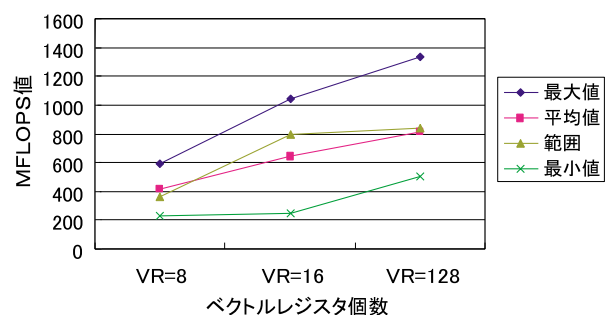


図 5.2(b) ベクトルレジスタ個数と処理速度 ( $L/S \times 2$ )

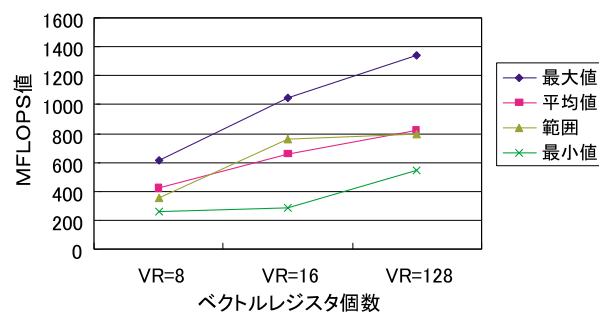


図 5.2(c) ベクトルレジスタ個数と処理速度 ( $L \times 2 + S \times 1$ )

以上のことからベクトルレジスタ個数が大きくなるにつれて  $R_{LS}$  の値が小さくなること及び DO ループの処理速度が大きくなる傾向のある事が得られた。前者の理由は、5.1 節の②及び③の理由のストアを回避できるからである。後者の理由は以下の通りである。

- (1) 5.1 節の①の理由によりデータ依存性のある命令列が減少するため、パイプラインの重合が増大し、パイプライン効率が大きくなる。
- (2) 5.1 節の④の理由によりロード・ストアパイプラインと算術演算パイプラインの並列処理及び算術演算パイプライン間の並列処理が増大する。

次に、個々の DO ループの処理速度向上率の大小について考察する。

先に求めた R1 ~ R6 の平均値より常に大きい処理速度

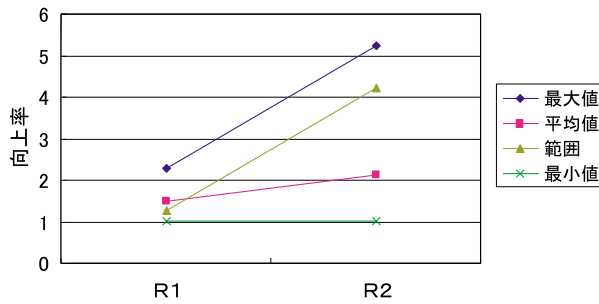


図 5.3(a) ベクトルレジスタ個数と処理速度向上率  
( $L/S \times 1$ )

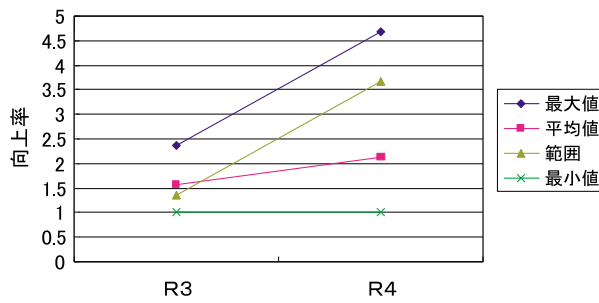


図 5.3(b) ベクトルレジスタ個数と処理速度向上率  
( $L/S \times 2$ )

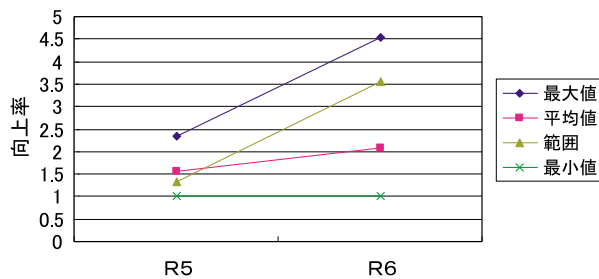


図 5.3(c) ベクトルレジスタ個数と処理速度向上率  
( $L \times 2 + S \times 1$ )

向上率をもつ DO ループと、R1～R6の平均値より常に小さい処理速度向上率をもつ DO ループとを取り出す。それらのうち、ロード・ストアパイプライン構成を変えても常に平均値より大きい処理速度向上率をもつ DO ループを L グループ、常に平均値より小さい処理速度向上率をもつ DO ループを S グループとすると各グループは次のようになる。

$L \ni D_3, D_5, D_8$

$S \ni D_7, D_9, D_{10}, D_{13}, D_{15}$

これらのグループに属する DO ループではベクトルレジスタを増大させた場合の  $R_{LS}$  の値の変化に特徴があることが分かる。これを図 5.4 に示す。L グループに属する DO ループはベクトルレジスタ個数が大きくなるにつれて  $R_{LS}$  の値も小さくなる。S グループに属する DO ループはベクトルレジスタ個数の変化に関係なく  $R_{LS}$  の値

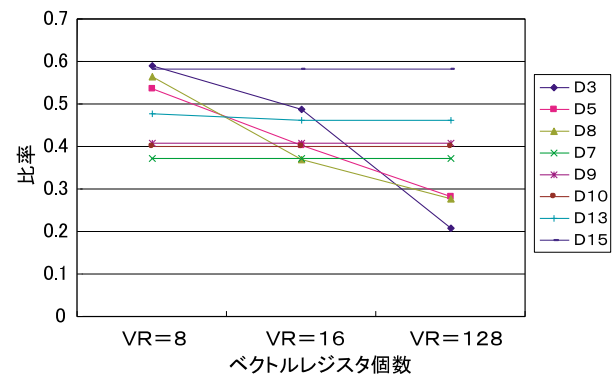


図 5.4 ベクトルレジスタ個数とロード・ストア命令比率

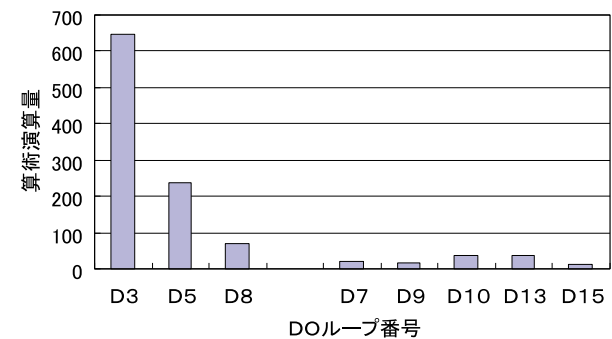


図 5.5 (a) L グループ及び S グループの DO ループの算術演算量特性

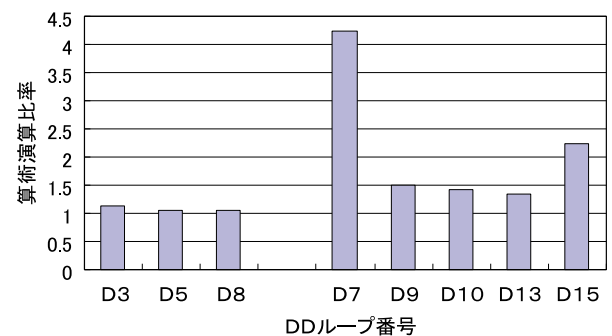


図 5.5 (b) L グループ及び S グループの DO ループの算術演算バランス特性

はほぼ同じである。

また、これらのグループの DO ループの算術演算命令数も特徴のあることが図 5.5(a) によりわかる。L グループに属する DO ループの算術演算命令数は 70 命令程度以上と多く、S グループに属する DO ループのそれは 40 命令以下と少ない。算術演算命令数が多い DO ループではベクトルレジスタ個数が小さいと 5.1 節の②及び③の利点を活かすことができず、ベクトルレジスタ個数が多い場合には不要なロード・ストア命令が必要となり、 $R_{LS}$  の値が大きくなる。従って、ベクトルレジスタを大きく

することの効果は大きく、DO ループの処理速度向上率は大きい。LグループのDO ループはこれに該当する。

SグループのDOループでは比較的算術演算命令数が少ないのでベクトルレジスタ個数が小さくても (VR=8~VR=16) 足りているためベクトルレジスタ個数を増やしてもロード・ストア命令数に大きな変化は無く、従ってDOループの処理速度向上率はLグループのDOループに比較して小さい。

また、図5.5(b)よりLグループに属するDOループは比較的、加減算命令数と乗算命令数のバランスがよく、Sグループのそれはよくないことも分かる。

なお、これらの図からLグループのD<sub>3</sub>は効果的なDOループ特性を持つ事がわかる。その処理速度向上率R<sub>2</sub>は図5.3(a)の最大値に等しく5倍強に達している。

### 5.3 ロード・ストアパイプライン構成と処理速度

本節で対象とする計算機モデルは表5.1に示すように、5.2節で対象としたものからVR=16の計算機モデルを除いたものである。これを分析対象から除いたのは、ベクトルレジスタ個数の大小によるDOループのオブジェクトプログラムの変化はVR=8及びVR=128の両極端の場合に現れると考えられるからである。これにより、DOループの処理速度の表示は5.2節で定義したものをを用いる。また、処理速度向上率R<sub>1</sub>~R<sub>4</sub>を以下のように求める。R<sub>LS</sub>は前節と共通である。

$$R_{LS}(D_i) = n_{LS}(D_i) / n_V(D_i)$$

$$= n_{LS}(D_i) / (n_{LS}(D_i) + n_{AR}(D_i)) \leq 1$$

$$R1(D_i) = MF(D_i, L/S \times 2, VR=8) / MF(D_i, L/S \times 1, VR=8)$$

$$R2(D_i) = MF(D_i, L \times 2 + S \times 1, VR=8) / MF(D_i, L/S \times 1, VR=8)$$

$$R3(D_i) = MF(D_i, L/S \times 2, VR=128) / MF(D_i, L/S \times 1, VR=128)$$

$$R4(D_i) = MF(D_i, L \times 2 + S \times 1, VR=128) / MF(D_i, L/S \times 1, VR=128)$$

図5.6にLSパイプライン構成毎のDOループの処理速度の最大値、平均値、最小値及び分布範囲を示す。図5.7にDOループの処理速度向上率R<sub>1</sub>~R<sub>4</sub>の最大値、平均値、最小値、分布範囲及び向上率に特徴のあるDOループの処理速度向上率を示す。

最初に、ベクトルレジスタ個数の小さい場合(VR=8)のロード・ストアパイプライン構成とDOループの処理速度の関係について考察する。

図5.6(a)及び図5.7(a)よりDOループの処理速度の最大値、最小値及び平均値はL/S×1, L/S×2, L×2+S×1のパイプライン構成の順に大きくなるが、その分布範囲は少しずつ狭くなっていること、及びDOループの処理速度向上率R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>の最小値はほぼ同じであるが、最大値、平均値及び分布範囲はR<sub>2</sub>の方がR<sub>1</sub>より大きいこ

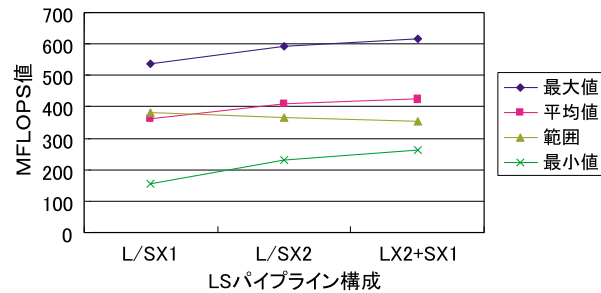


図5.6(a) LSパイプライン構成と処理速度 (VR = 8)

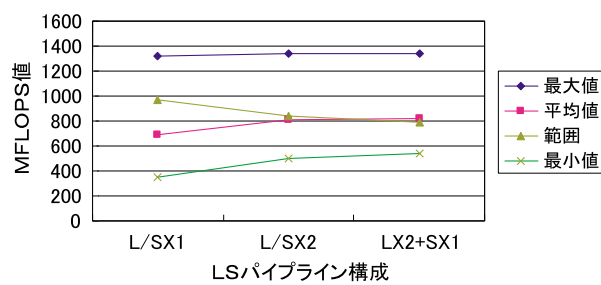


図5.6(b) LSパイプライン構成と処理速度 (VR = 128)

とがわかる。

L/S×1, L/S×2, L×2+S×1のパイプライン構成は同時走行可能なロード・ストアパイプラインがそれぞれ1本, 2本, 3本であるから、この順にデータ転送能力が強化されていることになる。従って、ロード・ストアパイプライン構成が強化される程、DOループの処理速度は向上し、処理速度の分布範囲は転送能力の拡大のために僅かに狭くなる傾向があること、及び平均的にロード・ストアパイプラインを2本にするとDOループの処理速度向上率は16%上がり、ロード・ストアパイプラインを3本にするとDOループの処理速度向上率は21%上がる事がわかる。しかし、このDOループの処理速度向上率の全体的傾向から外れるDOループがD<sub>1</sub>及びD<sub>7</sub>である。

D<sub>1</sub>の処理速度向上率は図5.7(a)の最大値と同一であり、ロード・ストアパイプラインを1本から2本に強化することにより約50%のDOループの処理速度の向上を得、1本から3本に強化することにより約70%の処理速度の向上を得る。ロード・ストアパイプラインを2本から3本に強化する場合には1本から2本に強化する場合より処理速度向上効果が少ないとはいえ、他のDOループの向上より効果がある。

また、D<sub>7</sub>の処理速度向上率は図5.7(a)の最小値と同一であり、ロード・ストアパイプラインの本数を増大しても処理速度はほとんど変わらない。これはこのDOループではベクトルレジスタ個数が8個で且つロード・スト

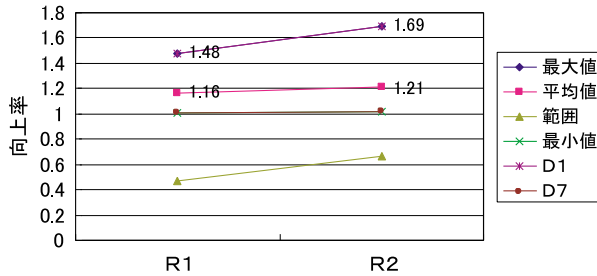


図 5.7(a) LS パイプライン構成と処理速度向上率  
(VR = 8)

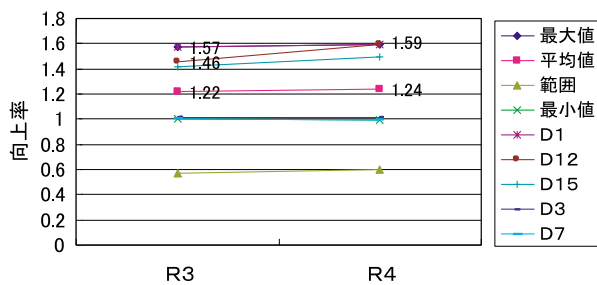


図 5.7(b) LS パイプライン構成と処理速度向上率  
(VR = 128)

ア兼用パイプラインが1本で充足していることを示す。このため、ベクトルレジスタ個数及びロード・ストアパイプライン本数を多くしても処理速度にほとんど影響を与えない。

図 5.6(b) より DO ループの処理速度の最大値、最小値及び平均値は  $L/S \times 1$ ,  $L/S \times 2$ ,  $L \times 2 + S \times 1$  のパイプライン構成の順に大きくなるが、 $L/S \times 2$ ,  $L \times 2 + S \times 1$  のパイプライン構成における最小値及び平均値の差はあまり大きくなく、特に最大値は同じである。そして、 $L/S \times 1$ ,  $L/S \times 2$ ,  $L \times 2 + S \times 1$  の順に DO ループの処理速度の分布範囲は小さくなっている。

図 5.7(b) より DO ループの処理速度向上率 R3 及び R4 の最大値、最小値、平均値及び分布範囲はほぼ同じ値を示し、これらの傾向はベクトルレジスタ個数の小なる場合と異なる。これはロード・ストアパイプラインが2本に強化されることにより平均値で22%のDOループの処理速度の向上を得るが3本に強化しても24%の処理速度の向上を得るに過ぎないことを示し、DOループの処理速度に飽和傾向のあることが分かる。

$D_1$  も全体的な傾向と同様に飽和傾向があるがロード・ストアパイプラインを1本から2本に強化することにより約60%のDOループの処理速度の向上を得て、ここでのパイプライン本数の増大による効果の大きいことが示されている。

$D_{12}$  はロード・ストアパイプラインを2本に強化する

ことにより約45%の処理速度の向上を得て効果のあることが示されるが、3本に強化することにより約60%の処理速度の向上となり、DOループの全体的傾向よりパイプライン本数強化の効果が大きい。 $D_{15}$  この傾向がある。

また、 $D_3$  および  $D_7$  の DO ループはロード・ストアパイプラインの本数を多くしても処理速度に大きな変化は見出せない。 $D_7$  はベクトルレジスタ個数の小さい場合でもこの傾向が示されたが、 $D_3$  はベクトルレジスタ個数が大という条件ではロード・ストアパイプライン本数強化の効果はないことを示すものである。

ベクトルレジスタ個数が小さい (VR=8) 場合、ロード・ストアパイプライン本数を2本にしても16%の処理速度向上率を得るのみであり、同様に3本にしても21%の処理速度向上効果を得るのみである。目を見張る効果は得られない。

これに対しベクトルレジスタ個数が大きい (VR=128) 場合、ロード・ストアパイプライン本数が2本の場合、22%の処理速度向上率であり、同様に3本の場合は24%の処理速度向上となり、VR=8の場合より、多少効果は大きい。即ち、ロード・ストアパイプライン本数増大による処理速度向上の効果はベクトルレジスタの個数が小さいと効果も少ない。

#### 5.4 立ち上がり時間と処理速度

立ち上がり時間のDOループの処理速度向上に及ぼす効果は  $L/S \times 1$  のロード・ストアパイプライン構成の場合が最も顕著に表れるので、この構成の場合の立ち上がり時間の効果を調べる。対象計算機モデルは表 5.1 に示す通りである。

DOループの処理速度向上率 R1 ~ R3 を以下のように求める。

$$R1(D_i) = MF(D_i, II, VR=8) / MF(D_i, I, VR=8)$$

$$R2(D_i) = MF(D_i, II, VR=16) / MF(D_i, I, VR=16)$$

$$R3(D_i) = MF(D_i, II, VR=128) / MF(D_i, I, VR=128)$$

図 5.8 にベクトルレジスタ個数毎の立上り時間の大小による DO ループの処理速度向上率 R1 ~ R3 の最大値、平均値、最小値、分布範囲及び向上率に特徴のある DO ループの処理速度向上率を示す。

図 5.8 より DO ループの処理速度向上率の平均値は、VR=8 の場合にはロード・ストアパイプラインの立ち上がり時間を短縮することにより処理速度は平均値で7%向上している。それに対して、VR=16 及び VR=128 の場合には立ち上がり時間を短縮することにより処理速度は2~3%の向上を得るに過ぎない。

この理由は VR=8 の場合にはベクトルレジスタ個数が少ないためロード・ストア命令を纏めて処理できないのでロード・ストア命令の重合動作の頻度が少ないか、ま

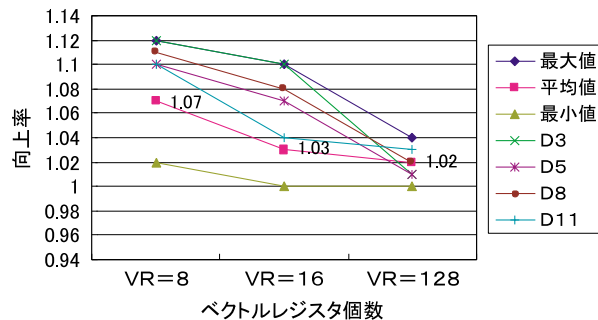


図 5.8 LS パイプラインの立ち上がり時間と処理速度向上率

たは、あっても浅くなる傾向がある。従って、ロード・ストアパイプラインの立ち上がり時間の大小が DO ループの処理時間に影響するので DO ループの処理速度の向上はベクトルレジスタ個数の大きい場合に比較して顕著にでるからである。

反対に、ベクトルレジスタ個数が多い場合にはロード・ストア命令を纏めて処理できるのでロード・ストアパイプラインは重畳動作する確率が高くなりロード・ストアパイプラインの立ち上がり時間の影響が少ない。

図 5.8 に表示した DO ループは  $R1(D_i) \geq 1.1$  を満たす DO ループであり、 $D_3$ 、 $D_5$ 、 $D_8$ 、 $D_{11}$  である。これらの DO ループのうち、 $D_3$ 、 $D_5$ 、 $D_8$  の DO ループは  $R_{1S}$  が大きい。これらの DO ループではベクトルレジスタ個数が足りないため、パイプラインの重畳の度合いの少ないパイプライン処理となるため、パイプラインの立ち上がり時間の大小による影響が顕著に表れる。

同様に、 $R2(D_i) \geq 1.1$  を満たす DO ループは  $D_3$  だけである。これも  $R1$  の場合と同様の理由による。ベクトルレジスタ個数が 8 から 16 に増大したので立ち上がり時間が小なることの効果が少なくなり、その効果は 1 つの DO ループにしか及ばなかったものと考えられる。

また、 $R3(D_i) \geq 1.1$  を満たす DO ループは無い。これも前記同様、ベクトルレジスタ個数の増大によるものである。

立ち上がり時間を小にすることの DO ループの処理速度向上効果はベクトルレジスタ個数が少ない (VR=8) 場合には 7% である。特に、向上効果の大きい DO ループでは 10% 強の向上を示す。また、ベクトルレジスタ個数が多い場合には DO ループの処理速度向上率は 2% となり、向上効果の小さいことが言える。

### 5.5 データ供給能力強化策と高速化効果

$L/S \times 1$ 、 $L/S \times 2$ 、 $L \times 2 + S \times 1$  のいずれのパイプライン構成の場合でもベクトルレジスタ個数を増大することによって平均値で DO ループの処理速度はベクトル

レジスタ個数が少ない場合の処理速度の 2 倍強の向上が得られる。特に、DO ループの算術演算命令数が約 70 命令以上で加減算命令数および乗算命令数のバランスが良い場合にはその向上率は平均値を上回り、最高 5 倍強にもなる。

ベクトルレジスタ個数が少ない (VR=8) 場合、ロード・ストアパイプラインの本数を増加することにより DO ループの処理速度は平均値でロード・ストアパイプライン 1 本の場合の処理速度の約 20% の向上を得る。特に、全ベクトル命令に対するロード・ストア命令数が約 60% 以上で、加減算命令と乗算命令のバランスの悪い DO ループの処理速度の向上率は 20% を上回る。これらの DO ループ特性に加えて算術演算命令数の多い DO ループでは 70% の処理速度の向上を示し、処理速度の向上は著しい。

ベクトルレジスタ個数が多い (VR=128) 場合、ロード・ストアパイプラインの本数を増加することにより DO ループの処理速度は平均値でロード・ストアパイプライン 1 本の場合の処理速度の 20% 強の向上を得る。特に、ロード・ストア命令数が算術演算命令数より多い場合で加減算命令と乗算命令のバランスの悪い DO ループの処理速度の向上率は 40% 強を上回る。これらの DO ループ特性に加えて算術演算命令数の多い DO ループでは 60% の向上を示し、処理速度向上が著しい。また、ロード・ストアパイプライン 2 本で全ての DO ループの処理速度は飽和傾向にあり、これ以上のパイプラインの増加による処理速度の向上はあまり期待できない。

このように、ベクトルレジスタ個数の大小に関係なくロード・ストアパイプラインの本数増加は DO ループの処理速度の向上に効果があり、そして並列走行可能なパイプライン本数は 2 本を超えると DO ループの処理速度に飽和傾向がみられる。

ロード・ストアパイプラインの立ち上がり時間の短縮はベクトルレジスタ個数が少ない場合に DO ループの処理速度向上に効果があり、平均値で 7% 向上する。ベクトルレジスタ個数が多い場合には 2% の向上率で効果が少なく、ベクトルレジスタの個数が多い場合に行う立ち上がり時間の短縮、即ち、主記憶装置の強化はあまり意味を持たない。

第 1 章に述べたデータ供給能力強化策 (イ) は次のように考えることができる。計算機モデル VP(8, L/S × 1, I, 8) に対する VP(8, L/S × 1, II, 8) の DO ループの処理速度の向上をパイプラインの立ち上がり時間の短縮による効果と見なすことができ、これによると平均値で 7% の向上を得る。また、計算機モデル VP(8, L/S × 1, I, 8) に対する VP(8, L × 2 + S × 1, I, 8) の DO ループの処理速度の向上をロード・ストアパイプラインの本数の増大による効果と見なすことができ、これによると平均値で

21%の向上を得る。強化策(イ)はこれら二つの効果を合わせることでその効果を見ることができる。これによれば、DOループの処理速度向上効果は平均値で28%の向上となり、その有効性が確認された。

また、データ供給能力強化策(ロ)は、計算機モデルVP(8, L/S×1, I, 8)に対するVP(8, L/S×1, I, 128)のDOループの処理速度の向上をベクトルレジスタ個数の増大による効果と見做すことができ、平均値で2倍強を得て、この有効性も確認された。どちらの強化策もその効果が認められるが、強化策(イ)に比較して、強化策(ロ)の方がより大きい効果を期待できることが認識できる。

また、データ供給能力強化策において処理速度向上効果のあるDOループは以下の通りである。

- ① L/S×1, L/S×2及びL×2+S×1のパイプライン構成毎のベクトルレジスタ個数の増大によるDOループの処理速度向上効果の大きいDOループはいずれの場合もD<sub>3</sub>, D<sub>5</sub>, D<sub>8</sub>の3つのDOループであった。
- ② VR=8においてロード・ストアパイプライン本数の増大によるDOループの処理速度向上効果の大きいDOループはD<sub>1</sub>であった。同じく、VR=128においてロード・ストアパイプライン本数の増大によるDOループの処理速度向上効果の大きいDOループはD<sub>12</sub>であった。
- ③ ロード・ストアパイプラインの立ち上がり時間の短縮によるDOループの処理速度向上効果の大きいDOループはVR=8の場合にはD<sub>3</sub>, D<sub>5</sub>, D<sub>8</sub>, D<sub>11</sub>の4つのDOループであり、VR=128の場合には該当するDOループは無かった。

ロード・ストアパイプライン本数の増大、ベクトルレジスタ個数の増大及びロード・ストアパイプラインの立ち上がり時間の短縮によるデータ供給能力が強化されると、DOループの処理速度向上効果のあるDOループはその強化策毎にDOループの番号に出入りがあり全く同じではない。しかし、同じDOループが異なる強化策の分類に現れる場合もあるので他の要素を取り入れた分析を行うことによりDOループの特徴付けが可能になるのではないかと考えられる。

## 6. 終わりに

本報告では単一ベクトル計算機のハードウェア性能強化策二つについて、その有効性をベクトル計算機のDOループ処理動作のソフトウェアシミュレーションにより検討した。

一つ目のパイプラインの多重度増大による性能強化策では、計算機モデルVP(\*, L/S×1, I, 128)では、ベク

トル長が128程度であればパイプライン多重度は8でよい。その場合のDOループの処理速度の達成度は80%程度である。ベクトル長が32～64程度であればパイプライン多重度は4でよい。この場合、達成度は60～80%に落ちる。計算センター毎に利用されている問題規模に相違があるので、主流となるベクトル長が128より大きい場合、また、ベクトル長が32より小さい場合で効率的なパイプライン多重度を考慮する必要がある。

二つ目のデータ供給能力強化策については、

- (イ) 高速主記憶素子の採用によるもの
  - (ロ) ベクトルレジスタの大容量化によるもの
- の方策について考察した。(イ)によるDOループの処理速度の向上効果は平均値で1.28倍であり、データ供給能力強化策(ロ)によるそれは2倍強である。いずれの強化策もその有効性が確認された。平均値で(ロ)による強化策の方が(イ)によるものより大きい。

(イ)の強化策に効果のあるDOループ特性は、 $n_{LS}/n_V$ が50%以上の算術演算命令数よりロード・ストア命令数の方が多いDOループであり、その効果がロード・ストアパイプラインが一本の場合の処理速度に対して1.7倍にもなるDOループもある。

(ロ)の強化策に効果のあるDOループ特性は、 $n_{LS}/n_V$ が20～30%以下のDOループであり、その効果がベクトルレジスタ個数の少ない場合の処理速度に対して5倍にもなるDOループもある。

このようにパイプライン多重度の増大による処理速度向上効果もデータ供給能力強化策の効果もDOループ特性に影響を受けることがわかった。

また、パイプライン多重度の大小、ベクトル長の大小に関係なく、次のDOループ特性を持つDOループの処理速度は大きいことが得られた。

- (i) 算術演算命令数が大きい。  
(およそ100命令以上)
- (ii)  $n_{LS}/n_V$ が小さい。(およそ30%以下)
- (iii) 加減算命令数と乗算命令数がほぼ同数である。

本報告ではベクトル計算機の性能強化策についての是非を論じてきた。その結果、処理速度の大きいDOループの特徴やパイプライン効率、性能を強化する場合のその処理速度の向上率はDOループ特性と深く関係が有ることが認識された。このためにDOループ特性とパイプライン効率の相関解析を行い、その定量的関係を明確にすることを考えている。

本報告ではDOループのグループ分類については処理速度の大きいDOループと小さいDOループという両極端の場合についての分類であり、全てのDOループをいずれかのグループに分類することは行っていない。DOループ特性とパイプライン効率の相関解析により定量的

な把握が可能となれば、全ての DO ループのグループ分類が可能であると考えている。

ベクトル計算機においてパイプライン効率の良いワークロードとはどのようなものか。それを探ることは効率的ベクトル計算機とはどのような計算機であるかを考えることである。これらを研究する過程で、あるいは結果として得られる成果を蓄積し、それらの有効利用を図りたい。

## 7. 参考文献

- 1) Kay A. Robbins, Steven Robbins ; The Cray X-MP/ Model 24 : A Case Study in Pipelined Architecture and Vector Processing (Lecture Notes in Computer Science 374), 1989
- 2) Frank H. McMahon; The Livermore FORTRAN Kernels Test of the Numerical Performance Range, Performance Evaluation of Supercomputers P143~186, 1988
- 3) Bailey, D. H. and Barton, J. T. ; The NAS Kernel Benchmark Program, Technical Report 86711, NASA Ames Research Center, 1985
- 4) SUPERCOMPUTER P14, 1986 年 3 月
- 5) 三好甫, 畠間晴夫, 軽部行洋 ; ベクトル計算機のベクトル処理に対するソフトウェアシミュレータ VTAP, 航空宇宙技術研究所報告 TR-1094



付録表 1 (a) VP (\*, L/S × 1, I, 128) における VL = 32 の DO ループの処理速度

DO ループ 番号	PM=1	PM=2			PM=4			PM=8			PM=16		
	MFLOPS	MFLOPS	R <sub>21</sub>	E <sub>21</sub>	MFLOPS	R <sub>41</sub>	E <sub>41</sub>	MFLOPS	R <sub>81</sub>	E <sub>81</sub>	MFLOPS	R <sub>161</sub>	E <sub>161</sub>
1	50	86	1.72	0.860	135	2.70	0.675	170	3.40	0.425	203	4.06	0.254
2	126	235	1.87	0.933	393	3.12	0.780	456	3.62	0.452	495	3.93	0.246
3	170	330	1.94	0.971	427	2.51	0.628	443	2.61	0.326	448	2.64	0.165
4	113	213	1.88	0.942	348	3.08	0.770	403	3.57	0.446	431	3.81	0.238
5	129	244	1.89	0.946	414	3.21	0.802	468	3.63	0.453	492	3.81	0.238
6	86	155	1.80	0.901	227	2.64	0.660	267	3.10	0.388	239	3.36	0.210
7	72	126	1.75	0.875	189	2.63	0.656	232	3.22	0.403	257	3.57	0.223
8	143	255	1.78	0.892	406	2.84	0.710	450	3.15	0.393	463	3.24	0.202
9	67	111	1.66	0.828	152	2.27	0.567	173	2.58	0.323	182	2.72	0.170
10	70	118	1.69	0.843	161	2.30	0.575	180	2.57	0.321	188	2.69	0.168
11	86	151	1.76	0.878	221	2.57	0.642	248	2.88	0.360	254	2.95	0.185
12	59	96	1.63	0.814	139	2.36	0.589	169	2.86	0.358	180	3.05	0.191
13	95	160	1.68	0.842	239	2.52	0.629	255	2.68	0.336	268	2.82	0.176
14	119	203	1.71	0.853	297	2.50	0.624	325	2.73	0.341	337	2.83	0.177
15	56	90	1.61	0.804	128	2.29	0.571	153	2.73	0.342	166	2.94	0.185
16	126	224	1.78	0.889	347	2.75	0.688	388	3.08	0.385	396	3.14	0.196
17	103	188	1.83	0.913	290	2.82	0.704	338	3.28	0.410	370	3.59	0.225
18	124	234	1.89	0.944	375	3.02	0.756	431	3.48	0.434	451	3.64	0.227
最大値	170	330	1.94	0.971	427	3.21	0.802	468	3.63	0.453	495	4.06	0.254
最小値	50	86	1.61	0.804	128	2.27	0.567	153	2.57	0.321	166	2.64	0.165
範囲	120	244	0.33	0.167	299	0.94	0.235	315	1.06	0.132	329	1.43	0.089
平均値	99.7	178.8	1.77	0.885	271.6	2.67	0.668	308.3	3.07	0.383	326.1	3.27	0.204
偏差値	32.8	66.3			104.4			112.7			115.4		

付録表 1 (b) VP (\*, L/S × 1, I, 128) における VL = 64 の DO ループの処理速度

DO ループ 番号	PM=1	PM=2			PM=4			PM=8			PM=16		
	MFLOPS	MFLOPS	R <sub>21</sub>	E <sub>21</sub>	MFLOPS	R <sub>41</sub>	E <sub>41</sub>	MFLOPS	R <sub>81</sub>	E <sub>81</sub>	MFLOPS	R <sub>161</sub>	E <sub>161</sub>
1	55	101	1.84	0.918	174	3.16	0.791	272	4.95	0.618	345	6.27	0.392
2	142	278	1.96	0.979	526	3.70	0.926	848	5.97	0.746	930	6.55	0.409
3	172	340	1.98	0.988	660	3.84	0.959	855	4.97	0.621	887	5.16	0.322
4	126	247	1.96	0.980	465	3.69	0.923	730	5.79	0.724	821	6.52	0.407
5	138	268	1.94	0.971	506	3.67	0.917	856	6.20	0.775	935	6.78	0.423
6	90	174	1.93	0.967	314	3.49	0.872	455	5.06	0.632	533	5.92	0.370
7	81	150	1.85	0.926	257	3.17	0.793	378	4.67	0.583	463	5.72	0.357
8	160	301	1.88	0.941	539	3.37	0.842	818	5.11	0.639	899	5.62	0.351
9	75	134	1.79	0.893	223	2.97	0.743	305	4.07	0.508	346	4.61	0.288
10	77	141	1.83	0.916	236	3.06	0.766	322	4.18	0.523	360	4.68	0.292
11	90	171	1.90	0.950	302	3.36	0.839	442	4.91	0.614	497	5.52	0.345
12	66	117	1.77	0.886	193	2.92	0.731	277	4.20	0.525	338	5.12	0.320
13	105	190	1.81	0.905	320	3.05	0.762	479	4.56	0.570	509	4.85	0.303
14	131	238	1.82	0.908	406	3.10	0.775	594	4.53	0.567	650	4.96	0.310
15	63	111	1.76	0.881	181	2.87	0.718	257	4.08	0.510	306	4.86	0.304
16	138	259	1.88	0.938	457	3.31	0.828	695	5.04	0.630	771	5.59	0.349
17	115	224	1.95	0.974	410	3.57	0.891	615	5.34	0.668	704	6.12	0.383
18	135	263	1.95	0.974	488	3.61	0.904	766	5.67	0.709	856	6.34	0.396
最大値	172	340	1.98	0.988	660	3.84	0.959	856	6.20	0.775	935	6.78	0.423
最小値	55	101	1.76	0.881	174	2.87	0.718	257	4.07	0.508	306	4.61	0.288
範囲	117	239	0.22	0.107	486	0.96	0.241	599	2.14	0.267	629	2.16	0.135
平均値	108.8	205.9	1.88	0.939	369.8	3.33	0.832	553.6	4.96	0.620	619.4	5.62	0.351
偏差値	34.5	70.0			140.8			218.4			227.0		

付録表 1 (c) VP (\*, L/S × 1, I, 128) における VL = 128 の DO ループの処理速度

DO ループ 番号	PM=1	PM=2			PM=4			PM=8			PM=16		
	MFLOPS	MFLOPS	R <sub>21</sub>	E <sub>21</sub>	MFLOPS	R <sub>41</sub>	E <sub>41</sub>	MFLOPS	R <sub>81</sub>	E <sub>81</sub>	MFLOPS	R <sub>161</sub>	E <sub>161</sub>
1	57	110	1.93	0.965	202	3.54	0.886	349	6.12	0.765	541	9.49	0.593
2	148	293	1.98	0.990	577	3.90	0.975	1112	7.51	0.939	1600	10.81	0.676
3	173	344	1.99	0.994	681	3.94	0.984	1321	7.64	0.954	1709	9.88	0.617
4	131	258	1.97	0.985	505	3.85	0.964	951	7.26	0.907	1340	10.23	0.639
5	149	294	1.97	0.987	570	3.83	0.956	1067	7.16	0.895	1450	9.73	0.608
6	97	190	1.96	0.979	366	3.77	0.943	654	6.74	0.843	923	9.52	0.595
7	95	180	1.89	0.947	326	3.43	0.858	550	5.79	0.724	741	7.80	0.488
8	165	321	1.95	0.973	608	3.68	0.921	1099	6.60	0.833	1522	9.22	0.577
9	79	148	1.87	0.943	268	3.39	0.848	445	5.63	0.704	610	7.72	0.483
10	81	155	1.91	0.957	282	3.48	0.870	472	5.83	0.728	644	7.95	0.497
11	92	179	1.95	0.973	343	3.73	0.932	604	6.57	0.821	883	9.60	0.600
12	70	132	1.89	0.943	235	3.36	0.839	386	5.51	0.689	555	7.93	0.496
13	110	209	1.90	0.950	380	3.45	0.864	640	5.82	0.727	957	8.70	0.544
14	137	261	1.91	0.953	477	3.48	0.870	812	5.93	0.741	1189	8.68	0.542
15	67	126	1.88	0.940	222	3.31	0.828	362	5.40	0.675	514	7.67	0.479
16	147	283	1.93	0.963	525	3.57	0.893	918	6.24	0.781	1304	8.87	0.554
17	118	233	1.97	0.987	451	3.82	0.956	827	7.01	0.876	1189	10.08	0.630
18	136	269	1.98	0.989	525	3.86	0.965	970	7.13	0.892	1416	10.41	0.651
最大値	173	344	1.99	0.994	681	3.94	0.984	1321	7.64	0.954	1709	10.81	0.676
最小値	57	110	1.87	0.940	202	3.31	0.828	349	5.40	0.675	514	7.67	0.479
範囲	116	234	0.11	0.054	479	0.6 2	0.156	972	2.23	0.279	1195	3.14	0.196
平均値	114.1	221.4	1.94	0.968	419.1	3.63	0.908	752.2	6.44	0.805	1060.4	9.13	0.570
偏差値	34.7	70.0			142.7			289.0			389.9		

付録表 2 (a) PM = 1 におけるベクトル長の相違による処理速度

DO ループ	VL= 2	VL= 4	VL= 8	VL= 16	VL= 32	VL= 64	VL=128
1	12.7	21.3	33.8	43.0	50	55	57
2	30.9	57.0	98.3	117.5	126	142	148
3	28.0	55.4	106.8	165.0	170	172	173
4	26.9	50.4	87.0	106.5	113	126	131
5	30.8	58.5	103.5	122.0	129	138	149
6	18.1	33.4	56.8	77.5	86	90	97
7	16.1	29.0	47.3	63.0	72	81	95
8	28.9	56.3	101.5	127.5	143	160	165
9	11.4	21.6	38.0	55.5	67	75	79
10	11.8	22.5	40.3	59.0	70	77	81
11	15.9	31.0	55.3	75.5	86	90	92
12	11.3	21.1	34.8	48.0	59	66	70
13	16.8	31.9	59.8	80.0	95	105	110
14	21.1	40.6	74.3	101.5	119	131	137
15	10.4	19.1	32.0	45.0	56	63	67
16	24.8	48.5	86.8	112.0	126	138	147
17	23.1	42.3	72.5	94.0	103	115	118
18	28.2	53.9	93.8	117.0	124	135	136
最大値	30.9	58.5	106.8	165.0	170	172	173
最小値	10.4	19.1	32.0	43.0	50	55	57
範囲	20.5	39.4	74.8	122.0	120	117	116
平均値	20.4	38.5	67.9	89.4	99.7	108.8	114.0

付録表 2 (b) PM = 1 におけるベクトル長の相違による処理速度向上率

DO ループ	R <sub>4,2</sub>	R <sub>8,4</sub>	R <sub>16,8</sub>	R <sub>32,16</sub>	R <sub>64,32</sub>	R <sub>128,64</sub>
1	1.68	1.59	1.27	1.16	1.10	1.04
2	1.84	1.72	1.20	1.07	1.13	1.04
3	1.98	1.93	1.54	1.03	1.01	1.01
4	1.87	1.73	1.22	1.06	1.12	1.04
5	1.90	1.77	1.18	1.06	1.07	1.08
6	1.85	1.70	1.36	1.11	1.05	1.08
7	1.80	1.63	1.33	1.14	1.13	1.17
8	1.95	1.80	1.26	1.12	1.12	1.03
9	1.89	1.76	1.46	1.21	1.12	1.05
10	1.91	1.79	1.46	1.19	1.10	1.05
11	1.95	1.78	1.37	1.14	1.05	1.02
12	1.87	1.65	1.38	1.23	1.12	1.06
13	1.90	1.87	1.34	1.19	1.11	1.05
14	1.92	1.83	1.37	1.17	1.10	1.05
15	1.84	1.68	1.41	1.24	1.13	1.06
16	1.96	1.79	1.29	1.13	1.10	1.07
17	1.83	1.71	1.30	1.10	1.12	1.03
18	1.91	1.74	1.25	1.06	1.09	1.01
最大値	1.98	1.93	1.54	1.24	1.13	1.17
最小値	1.68	1.59	1.18	1.03	1.01	1.01
範囲	0.30	0.34	0.36	0.21	0.12	0.16
平均値	1.88	1.75	1.33	1.13	1.10	1.05

付録表 2 (c) PM = 16 におけるベクトル長の相違による処理速度

DO ループ	VL=32	VL=64	VL=128	VL=256	VL=512	VL=1024	VL=2048
1	203	345	541	698	808	880	912
2	495	930	1600	2224	2308	2344	2368
3	448	887	1709	2642	2724	2752	2768
4	431	821	1340	1902	2020	2064	2096
5	492	935	1450	2134	2280	2352	2384
6	289	533	923	1308	1464	1520	1552
7	257	463	741	1100	1304	1440	1520
8	463	899	1522	2198	2432	2568	2640
9	182	346	610	890	1072	1192	1264
10	188	360	644	944	1128	1240	1296
11	254	497	883	1208	1372	1432	1472
12	180	338	555	772	940	1056	1120
13	268	509	957	1280	1520	1672	1760
14	337	650	1189	1624	1908	2088	2192
15	166	306	514	724	888	1008	1072
16	396	771	1304	1836	2100	2264	2352
17	370	704	1189	1654	1804	1864	1888
18	451	856	1416	1940	2100	2152	2176
最大値	495	935	1709	2224	2724	2752	2768
最小値	166	306	514	698	808	880	912
範囲	329	629	1195	1526	1916	1872	1856
平均値	326	619	1060	1504	1676	1772	1824

付録表 2 (d) PM = 16 におけるベクトル長の相違による処理速度向上率

DO ループ	$R_{64,32}$	$R_{128,64}$	$R_{256,128}$	$R_{512,256}$	$R_{1024,512}$	$R_{2048,1024}$
1	1.70	1.57	1.29	1.16	1.09	1.04
2	1.88	1.72	1.39	1.04	1.02	1.01
3	1.98	1.93	1.55	1.03	1.01	1.01
4	1.90	1.63	1.42	1.06	1.02	1.02
5	1.90	1.55	1.47	1.07	1.03	1.01
6	1.84	1.73	1.42	1.12	1.04	1.02
7	1.80	1.60	1.48	1.19	1.10	1.06
8	1.94	1.69	1.44	1.11	1.06	1.03
9	1.90	1.76	1.46	1.20	1.11	1.06
10	1.91	1.79	1.47	1.19	1.10	1.05
11	1.96	1.78	1.37	1.14	1.04	1.03
12	1.88	1.64	1.39	1.22	1.12	1.06
13	1.90	1.88	1.34	1.19	1.10	1.05
14	1.93	1.83	1.37	1.17	1.09	1.05
15	1.84	1.68	1.41	1.23	1.14	1.06
16	1.95	1.69	1.41	1.14	1.08	1.04
17	1.90	1.69	1.39	1.09	1.03	1.01
18	1.90	1.65	1.37	1.08	1.02	1.01
最大値	1.98	1.93	1.55	1.23	1.14	1.06
最小値	1.70	1.55	1.29	1.03	1.01	1.01
範囲	0.28	0.38	0.26	0.20	0.13	0.05
平均値	1.89	1.71	1.41	1.14	1.07	1.03

付録表 3 (a) パイプライン多重度毎の DO ループの準飽和処理速度

パイプライン 多重度	PM = 1	PM = 2	PM = 4	PM = 8	PM = 16
VL $\infty$	128	256	512	1024	2048
ピーク処 理速度	200	400	800	1600	3200
1	57	114	228	456	912
2	148	296	592	1184	2368
3	173	346	692	1384	2768
4	131	262	524	1048	2096
5	149	298	596	1192	2384
6	97	194	388	776	1552
7	95	190	380	760	1520
8	165	330	660	1320	2640
9	79	158	316	632	1264
10	81	162	324	648	1296
11	92	184	368	736	1472
12	70	140	280	560	1120
13	110	220	440	880	1760
14	137	274	548	1096	2192
15	67	134	268	536	1072
16	147	294	588	1176	2352
17	118	236	472	944	1888
18	136	272	554	1088	2176
最大値	173	346	692	1384	2768
最小値	57	114	228	456	912
範 囲	116	232	464	928	1856
平均値	114	228	456	912	1824

付録表 3 (b) DO ループの準飽和処理速度に対する DO ループの処理速度の達成率

DO ループ 番号	PM = 1			PM = 2			PM = 4			PM = 8			PM = 16		
	VL=32	VL=64	VL=128	VL=32	VL=64	VL=128	VL=32	VL=64	VL=128	VL=32	VL=64	VL=128	VL=32	VL=64	VL=128
1	87.7	96.5	100	75.4	88.6	96.5	59.2	76.3	88.6	37.3	59.6	76.5	22.3	37.8	59.3
2	85.1	95.9	100	79.4	93.9	99.0	66.4	88.9	97.5	38.5	71.6	93.9	20.9	39.3	67.6
3	98.3	99.4	100	95.4	98.3	99.4	61.7	95.4	98.4	32.0	61.8	95.4	16.2	32.0	61.7
4	86.3	96.2	100	81.3	94.3	98.5	66.4	88.7	96.4	38.5	69.7	90.7	20.6	39.2	63.9
5	86.6	92.6	100	81.9	89.9	98.7	69.5	84.9	95.6	39.3	71.8	89.5	20.6	39.2	60.8
6	88.7	92.8	100	79.9	89.7	97.9	58.5	80.9	94.3	34.4	58.6	84.3	18.6	34.3	59.5
7	75.8	85.3	100	66.3	78.9	94.7	49.7	67.6	85.8	30.5	49.7	72.4	16.9	30.5	48.8
8	86.7	97.0	100	77.3	91.2	97.3	61.5	81.7	92.1	34.1	62.0	83.3	17.5	34.1	57.7
9	84.8	94.9	100	70.3	84.8	94.3	48.1	70.6	84.8	27.4	48.3	70.4	14.4	27.4	48.3
10	86.4	95.1	100	72.8	87.0	95.7	49.7	72.8	87.0	27.8	49.7	72.8	14.5	27.8	49.7
11	93.5	97.8	100	82.1	92.9	97.3	60.1	82.1	93.2	33.7	60.1	82.1	17.3	33.8	60.0
12	84.3	94.3	100	68.6	83.6	94.3	49.6	68.9	83.9	30.2	49.5	68.9	16.1	30.2	49.6
13	86.4	95.5	100	72.7	86.4	95.0	54.3	72.7	86.4	29.0	54.4	72.7	15.2	28.9	54.4
14	86.9	95.6	100	74.1	86.9	95.3	54.2	74.1	87.0	29.7	54.2	74.1	15.4	29.7	54.2
15	83.6	94.0	100	67.2	82.8	94.0	47.8	67.5	82.8	28.5	47.9	67.5	15.5	28.5	47.9
16	85.7	93.9	100	76.2	88.1	96.3	59.0	77.7	89.3	33.0	59.1	78.1	16.8	32.8	55.4
17	87.3	97.5	100	79.7	94.9	98.7	61.4	86.9	95.6	35.8	65.1	87.6	19.6	37.3	63.0
18	91.2	99.3	100	86.0	96.7	98.9	68.9	89.7	96.5	39.6	70.4	89.2	20.7	39.3	65.1
平均値	86.9	95.2	100	77.0	89.4	96.8	58.1	79.3	90.8	33.3	59.1	80.5	17.7	33.4	57.0

付録表4 VR = 128の場合のDO ループ中の各種ベクトル命令数及びロード・ストア命令比と算術演算命令バランス

DO ループ 番号	ロード・ス トア命令数		算術演算命令数			各種命令合計			ロードストア 命令の比率	加算と乗算 のバランス
	$n_L$	$n_S$	$n_A$	$n_M$	$n_D$	$n_{LS}$	$n_{AR}$	$n_V$	$n_{LS}/n_V$	$R^*)$
1	107	80	31	82	2	187	115	302	0.619	2.65
2	21	50	176	170	4	71	350	421	0.169	1.04
3	110	59	300	340	5	169	645	814	0.208	1.13
4	28	39	140	169	8	67	317	384	0.174	1.21
5	70	15	113	117	6	85	236	321	0.283	1.04
6	26	18	143	147	1	44	291	335	0.131	1.03
7	6	7	4	17	1	13	22	35	0.371	4.25
8	22	4	35	33	0	26	68	94	0.277	1.06
9	7	4	6	9	1	11	16	27	0.407	1.50
10	22	2	14	20	2	24	36	60	0.400	1.43
11	42	2	36	54	2	44	92	136	0.324	1.50
12	30	10	20	10	0	40	30	70	0.571	2.00
13	25	5	20	15	0	30	35	65	0.462	1.33
14	31	5	25	27	0	36	52	88	0.409	1.08
15	13	5	9	4	0	18	13	31	0.581	2.25
16	32	6	24	42	0	38	66	104	0.365	1.75
17	34	45	202	202	7	79	411	490	0.161	1.00
18	67	8	200	162	7	75	369	444	0.169	1.23
平均値									0.338	1.58

\*)  $R = \text{MAX}(n_A, n_M) / \text{MIN}(n_A, n_M)$ 

付録表5(a) VR (8, L/S × 1, I, \*) における VL = 128 の DO ループのロード・ストア命令の比率と処理速度

DO ループ 番号	VR = 8		VR = 16			VR = 128		
	$R_{LS}$	MFLOPS	$R_{LS}$	MFLOPS	$R_L$	$R_{LS}$	MFLOPS	$R_C$
1	0.743	155	0.734	166	1.07	0.619	349	2.25
3	0.589	252	0.486	385	1.53	0.208	1321	5.24
5	0.537	290	0.403	531	1.83	0.265	1067	3.68
7	0.371	537	0.371	550	1.02	0.371	550	1.02
8	0.564	279	0.370	638	2.29	0.277	1099	3.94
9	0.407	316	0.407	449	1.42	0.407	445	1.41
10	0.400	383	0.400	472	1.23	0.400	472	1.23
11	0.395	363	0.324	586	1.61	0.324	604	1.66
12	0.615	279	0.571	386	1.38	0.571	386	1.38
13	0.478	538	0.462	640	1.19	0.462	640	1.19
14	0.485	461	0.409	812	1.76	0.409	812	1.76
15	0.581	333	0.581	362	1.09	0.581	362	1.09
16	0.463	497	0.365	922	1.86	0.365	918	1.85
最大値	0.743	538	0.734	922	2.29	0.619	1321	5.24
最小値	0.371	151	0.324	166	1.02	0.208	349	1.02
範囲	0.372	383	0.410	756	1.27	0.411	972	4.22
平均値	0.510	360.2	0.453	530.7	1.48	0.405	694.2	2.13

付録表 5(b) VP (8, L/S×2, I, \*) における VL = 128 の DO ループのロード・ストア命令の比率と処理速度

DO ループ 番号	VR = 8		VR = 16			VR = 128		
	R <sub>LS</sub>	MFLOPS	R <sub>LS</sub>	MFLOPS	R <sub>e</sub>	R <sub>LS</sub>	MFLOPS	R <sub>e</sub>
1	0.743	229	0.734	246	1.07	0.619	549	2.40
3	0.589	286	0.486	451	1.58	0.208	1338	4.68
5	0.537	334	0.403	613	1.84	0.265	1155	3.46
7	0.371	542	0.371	550	1.01	0.371	550	1.01
8	0.564	328	0.370	774	2.36	0.277	1189	3.63
9	0.407	353	0.407	507	1.44	0.407	502	1.42
10	0.400	414	0.400	538	1.30	0.400	538	1.30
11	0.395	408	0.324	692	1.70	0.324	725	1.78
12	0.615	350	0.571	555	1.59	0.571	565	1.61
13	0.478	593	0.462	868	1.46	0.462	868	1.46
14	0.485	523	0.409	1008	1.93	0.409	1040	1.99
15	0.581	400	0.581	514	1.29	0.581	514	1.29
16	0.463	588	0.365	1046	1.78	0.365	1046	1.78
最大値	0.743	588	0.734	1046	2.36	0.619	1338	4.68
最小値	0.371	229	0.324	246	1.01	0.208	502	1.01
範囲	0.372	359	0.410	800	1.35	0.411	836	3.67
平均値	0.510	411.4	0.453	643.2	1.57	0.405	813.8	2.14

付録表 5(c) VP (8, L×2 + S×1, I, \*) における VL = 128 の DO ループのロード・ストア命令の比率と処理速度

DO ループ 番号	VR = 8		VR = 16			VR = 128		
	R <sub>LS</sub>	MFLOPS	R <sub>LS</sub>	MFLOPS	R <sub>e</sub>	R <sub>LS</sub>	MFLOPS	R <sub>e</sub>
1	0.743	262	0.734	284	1.08	0.619	555	2.12
3	0.589	294	0.486	465	1.58	0.208	1338	4.55
5	0.537	347	0.403	634	1.83	0.265	1156	3.33
7	0.371	548	0.371	548	1.00	0.371	548	1.00
8	0.564	347	0.370	810	2.33	0.277	1186	3.42
9	0.407	352	0.407	504	1.43	0.407	500	1.42
10	0.400	423	0.400	553	1.31	0.400	555	1.31
11	0.395	412	0.324	691	1.68	0.324	724	1.76
12	0.615	367	0.571	610	1.66	0.571	613	1.67
13	0.478	607	0.462	878	1.45	0.462	878	1.45
14	0.485	531	0.409	1037	1.95	0.409	1050	1.98
15	0.581	431	0.581	544	1.26	0.581	544	1.26
16	0.463	615	0.365	1043	1.70	0.365	1043	1.70
最大値	0.743	615	0.734	1043	2.33	0.619	1338	4.55
最小値	0.371	262	0.324	284	1.00	0.208	544	1.00
範囲	0.372	353	0.410	759	1.33	0.411	794	3.55
平均値	0.510	425.8	0.453	661.6	1.56	0.405	822.3	2.07



付録表6 ベクトルレジスタ毎のDO ループ中の各種ベクトル命令数及び全ベクトル命令数に対するロード・ストア命令数の比率

DO ループ 番号	VR = 8				VR = 16				VR = 128			
	$n_{LS}$	$n_{AR}$	$n_V$	$n_{LS}/n_V$	$n_{LS}$	$n_{AR}$	$n_V$	$n_{LS}/n_V$	$n_{LS}$	$n_{AR}$	$n_V$	$n_{LS}/n_V$
1	333	115	448	0.743	317	115	432	0.734	187	115	302	0.619
3	923	645	1568	0.589	611	645	1256	0.486	169	645	814	0.208
5	274	236	510	0.537	159	236	395	0.403	85	236	321	0.283
7	13	22	35	0.371	13	22	35	0.371	13	22	35	0.371
8	88	68	156	0.564	40	68	108	0.370	26	68	94	0.277
9	11	16	27	0.407	11	16	27	0.407	11	16	27	0.407
10	24	36	60	0.400	24	36	60	0.400	24	36	60	0.400
11	60	92	152	0.395	44	92	136	0.324	44	92	136	0.324
12	48	30	78	0.615	40	30	70	0.571	40	30	70	0.571
13	32	35	67	0.478	30	35	65	0.462	30	35	65	0.462
14	49	52	101	0.485	36	52	88	0.409	36	52	88	0.409
15	18	13	31	0.581	18	13	31	0.581	18	13	31	0.581
16	57	66	123	0.463	38	66	104	0.365	38	66	104	0.365
平均値				0.510				0.453				0.406

付録表7(a) VP (8, \*, I, 8) における VL = 128 の DO ループの処理速度

DO ループ 番号	$R_s$	$L/S \times 1$	$L/S \times 2$		$L \times 2 + S \times 1$	
		MFLOPS	MFLOPS	$R_i$	MFLOPS	$R_e$
1	0.743	155	229	1.48	262	1.69
3	0.589	252	286	1.13	294	1.17
5	0.537	290	334	1.15	347	1.20
7	0.371	537	542	1.01	548	1.02
8	0.564	279	328	1.18	347	1.24
9	0.407	316	353	1.12	352	1.11
10	0.400	383	414	1.08	423	1.10
11	0.395	363	408	1.12	412	1.13
12	0.615	279	350	1.25	367	1.32
13	0.478	538	593	1.10	607	1.13
14	0.485	461	523	1.13	531	1.15
15	0.581	333	400	1.20	431	1.29
16	0.463	497	588	1.18	615	1.24
最大値	0.743	538	593	1.48	615	1.69
最小値	0.371	155	229	1.01	262	1.02
範囲	0.372	383	364	0.47	353	0.67
平均値	0.510	360.2	411.4	1.16	425.8	1.21

付録表 7(b) VP (8, \*, I, 128) における VL = 128 の DO ループの処理速度

DO ループ 番号	R <sub>s</sub>	L/S × 1	L/S × 2		L × 2 + S × 1	
		MFLOPS	MFLOPS	R <sub>c</sub>	MFLOPS	R <sub>c</sub>
1	0.619	349	549	1.57	555	1.59
3	0.208	1321	1338	1.01	1338	1.01
5	0.265	1067	1155	1.08	1156	1.08
7	0.371	550	550	1.00	548	0.99
8	0.277	1099	1189	1.08	1186	1.08
9	0.407	445	502	1.13	500	1.12
10	0.400	472	538	1.14	555	1.18
11	0.324	604	725	1.20	724	1.20
12	0.571	386	565	1.46	613	1.59
13	0.462	640	868	1.36	878	1.37
14	0.409	812	1040	1.28	1050	1.29
15	0.581	362	514	1.42	544	1.50
16	0.365	918	1046	1.14	1043	1.14
最大値	0.619	1321	1338	1.57	1338	1.59
最小値	0.208	349	502	1.00	544	0.99
範囲	0.411	972	836	0.57	794	0.60
平均値	0.405	694.2	813.8	1.22	822.3	1.24

付録表 8 VP (8, L/S × 1, \*, \*) における VL = 128 の DO ループの処理速度

DO ループ 番号	VR = 8			VR = 16			VR = 128		
	I 型	II 型	R <sub>c</sub>	I 型	II 型	R <sub>c</sub>	I 型	II 型	R <sub>c</sub>
1	155	158	1.02	166	169	1.02	349	350	1.00
3	252	282	1.12	385	423	1.10	1321	1329	1.01
5	290	320	1.10	531	568	1.07	1067	1075	1.01
7	537	551	1.03	550	564	1.03	550	564	1.03
8	279	310	1.11	638	687	1.08	1099	1123	1.02
9	316	333	1.05	449	462	1.03	445	462	1.04
10	383	403	1.05	472	481	1.02	472	481	1.02
11	363	398	1.10	586	607	1.04	604	621	1.03
12	279	297	1.06	386	387	1.00	386	387	1.00
13	538	569	1.06	640	645	1.01	640	645	1.01
14	461	500	1.08	812	817	1.01	812	817	1.01
15	333	353	1.06	362	366	1.01	362	366	1.01
16	497	535	1.08	922	940	1.02	918	936	1.02
最大値	538	569	1.12	922	940	1.10	1321	1329	1.04
最小値	155	158	1.02	166	169	1.00	349	350	1.00
範囲	383	411	0.10	756	771	0.10	972	979	0.04
平均値	360.2	385.3	1.07	530.7	547.4	1.03	694.2	704.3	1.02