

JAERI-Data/Code  
97-008



圧縮性流体コードを用いた異機種並列計算機の性能評価

1997年3月

木村俊哉

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の問い合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1997

編集兼発行 日本原子力研究所  
印刷 いばらき印刷(株)

圧縮性流体コードを用いた異機種並列計算機の性能評価

日本原子力研究所計算科学技術推進センター

木村 俊哉

(1997年2月10日受理)

日本原子力研究所計算科学技術推進センター中目黒複合並列計算機システムにおける5台の異機種並列計算機、富士通VPP300、日本電気SX-4、クレイT94、IBM SP2、そして日立SR2201、に対し2次元の陽的オイラーコードを移植し、典型的な圧縮性流れの問題を解くことによって、それらの実効性能を測定し、それぞれの特徴の違いを調べた。その際、格子サイズ及びプロセッサ台数を変えて、さらに複数の並列化方法に対して計算を行った。それぞれの場合における実効性能（計算速度、加速率、並列化効率）を測定し、また、プロセッサ間の通信時間の測定も行った。その結果、ベクトル並列計算機とスカラ並列計算機間の実効性能の差や、それぞれの特徴の違いが示された。この結果は並列計算機を有効利用するための有用なデータ及び並列計算機上でCFDの大規模計算を行う際の基礎的なデータを提供すると考えられる。

Performance Evaluation for Compressible Flow Calculations on  
Five Parallel Computers of Different Architectures

Toshiya KIMURA

Center for Promotion of Computational Science and Engineering  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Nakameguro, Meguro-ku, Tokyo-to

(Received February 10, 1997)

A two-dimensional explicit Euler solver has been implemented for five MIMD parallel computers of different machine architectures in Center for Promotion of Computational Science and Engineering of Japan Atomic Energy Research Institute. These parallel computers are Fujitsu VPP300, NEC SX-4, CRAY T94, IBM SP2, and Hitachi SR2201. The code was parallelized by several parallelization methods, and a typical compressible flow problem has been calculated for different grid sizes changing the number of processors. Their effective performances for parallel calculations, such as calculation speed, speed-up ratio and parallel efficiency, have been investigated and evaluated. The communication time among processors has been also measured and evaluated. As a result, the differences on the performance and the characteristics between vector-parallel and scalar-parallel computers can be pointed, and it will present the basic data for efficient use of parallel computers and for large scale CFD simulations on parallel computers.

Keywords: Computational Fluid Dynamics, Euler Equations, Performance Evaluation,  
Parallel Calculation

## 目 次

1. 序 論 .....	1
2. 使用した並列計算機 .....	1
3. 数値計算 .....	2
4. 性能評価 .....	5
4.1 単一プロセッサによる計算 .....	5
4.2 並列計算 .....	6
4.2.1 SP2 及び SR2201 .....	6
4.2.2 VPP300 .....	8
4.2.3 SX4 及び T94 .....	9
4.2.4 5機種のパフォーマンス評価 .....	10
5. まとめ .....	12
謝 辞 .....	12
参考文献 .....	13

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Parallel Computers in Employ .....	1
3. Numerical Calculations .....	2
4. Performance Evaluation .....	5
4.1 Sequential Calculations .....	5
4.2 Parallel Calculations .....	6
4.2.1 SP2 and SR2201 .....	6
4.2.2 VPP300 .....	8
4.2.3 SX4 and T94 .....	9
4.2.4 Evaluation of Five Parallel Computers .....	10
5. Concluding Remarks .....	12
Acknowledgements .....	12
References .....	13

## 1. 序論

数値シミュレーションは近年、科学や工学の様々な分野において重要性を増しており、複雑な現象や非定常現象、またダイナミックレンジの大きな現象（例えば、乱流）を解明するための応用計算ではその計算スケールは非常に大きなものとなる。そのような計算では、非常に長い計算時間が必要になると共に巨大な主記憶が必要とされる。

従来の単一プロセッサのスーパーコンピュータはこれまでめざましい発達を遂げ、計算科学の発展に大きな貢献をしてきたが、最近では技術的にその能力の限界に近づいていると言われている。その代わりとして複数のプロセッサに処理を分担させ高速化を図りさらに大規模な主記憶の使用を可能にする並列計算機が発達し、用いられるようになってきている。今後、並列計算は様々な分野において重要性が高まり、大規模なシミュレーションには欠かせないものとなると考えられ、並列計算機の効率的な利用が重要になってくると考えられる。

しかしながら、現在の並列計算機には、ベクトル並列、スカラ並列、分散メモリ、共有メモリといったような機種によってアーキテクチャが異なり、さらにソースコードの並列化方法に関してもメッセージパッシングライブラリや、コンパイラ指示行によるものなど様々である。一般に、計算機にはそのプロセッサに対するピーク性能が示されているが、実際に計算を行う際の性能（実効性能）は必ずしもピーク性能ほど高くはない。また、特に並列計算機の場合、プロセッサを並列に動かした場合の効率（並列化効率）は必ずしも 100%にはならない。従って、様々なマシンアーキテクチャや並列化方法に対して、実際の計算で用いられるような応用プログラムに対する並列計算機の実効性能がどの程度であるかを知ることは、並列計算機の効率的な利用や、大規模数値シミュレーションを行う際の目安として有用であると考えられる。

分野によって、用いられる計算コードは様々でありタイプが異なる。従ってそれぞれのタイプのコードを用いて計算することが望ましいが、本研究においては、各分野の中でも特に数値計算に対する重要性が高い数値流体力学（CFD）の分野において一般的なコードを用いて並列計算機の実効性能の測定を行った。用いたコードは 2次元のオイラーコードで、それを全ての計算機に移植し同じ条件の下で、典型的な圧縮性流体の問題を計算することによって性能評価を行った<sup>1)</sup>。

日本原子力研究所計算科学技術推進センターでは異なるアーキテクチャを持つ 5 台の並列計算機が稼働中である。そこで本研究においては、特にベクトル並列計算機とスカラ並列計算機の特徴の違いに焦点を置きながら 5 台の異機種並列計算機における性能評価を行なった。

## 2. 使用した並列計算機

本研究において使用した並列計算機は次の 5 台である、富士通 VPP300、日本電気 SX-4、クレイ T94、IBM SP2、日立 SR2201。VPP300 は 16 台のプロセッサがクロスパーネットワークで結合された分散メモリ・ベクトル並列型計算機であり、各プロセッサは 2.2GFlops のピーク性能を持ち 512Mbytes の主記憶を搭載している。SX-4 は HIPPI switch で結合された 3 台のノードから構成された分散/共有メモリ・ベクトル並列型計算機であり、各ノードには 2 台のベクトルプロセッ

## 1. 序論

数値シミュレーションは近年、科学や工学の様々な分野において重要性を増しており、複雑な現象や非定常現象、またダイナミックレンジの大きな現象（例えば、乱流）を解明するための応用計算ではその計算スケールは非常に大きなものとなる。そのような計算では、非常に長い計算時間が必要になると共に巨大な主記憶が必要とされる。

従来の単一プロセッサのスーパーコンピュータはこれまでめざましい発達を遂げ、計算科学の発展に大きな貢献をしてきたが、最近では技術的にその能力の限界に近づいていると言われている。その代わりとして複数のプロセッサに処理を分担させ高速化を図りさらに大規模な主記憶の使用を可能にする並列計算機が発達し、用いられるようになってきている。今後、並列計算は様々な分野において重要性が高まり、大規模なシミュレーションには欠かせないものとなると考えられ、並列計算機の効率的な利用が重要になってくると考えられる。

しかしながら、現在の並列計算機には、ベクトル並列、スカラ並列、分散メモリ、共有メモリといったような機種によってアーキテクチャが異なり、さらにソースコードの並列化方法に関してもメッセージパッシングライブラリや、コンパイラ指示行によるものなど様々である。一般に、計算機にはそのプロセッサに対するピーク性能が示されているが、実際に計算を行う際の性能（実効性能）は必ずしもピーク性能ほど高くはない。また、特に並列計算機の場合、プロセッサを並列に動かした場合の効率（並列化効率）は必ずしも 100%にはならない。従って、様々なマシンアーキテクチャや並列化方法に対して、実際の計算で用いられるような応用プログラムに対する並列計算機の実効性能がどの程度であるかを知ることは、並列計算機の効率的な利用や、大規模数値シミュレーションを行う際の目安として有用であると考えられる。

分野によって、用いられる計算コードは様々でありタイプが異なる。従ってそれぞれのタイプのコードを用いて計算することが望ましいが、本研究においては、各分野の中でも特に数値計算に対する重要性が高い数値流体力学（CFD）の分野において一般的なコードを用いて並列計算機の実効性能の測定を行った。用いたコードは 2次元のオイラーコードで、それを全ての計算機に移植し同じ条件の下で、典型的な圧縮性流体の問題を計算することによって性能評価を行った<sup>1)</sup>。

日本原子力研究所計算科学技術推進センターでは異なるアーキテクチャを持つ 5 台の並列計算機が稼働中である。そこで本研究においては、特にベクトル並列計算機とスカラ並列計算機の特徴の違いに焦点を置きながら 5 台の異機種並列計算機における性能評価を行なった。

## 2. 使用した並列計算機

本研究において使用した並列計算機は次の 5 台である、富士通 VPP300、日本電気 SX-4、クレイ T94、IBM SP2、日立 SR2201。VPP300 は 16 台のプロセッサがクロスネットワークで結合された分散メモリ・ベクトル並列型計算機であり、各プロセッサは 2.2GFlops のピーク性能を持ち 512Mbytes の主記憶を搭載している。SX-4 は HIPPI switch で結合された 3 台のノードから構成された分散/共有メモリ・ベクトル並列型計算機であり、各ノードには 2 台のベクトルプロセッ

サが 512Mbytes の主記憶を共有して搭載されている。各プロセッサのピーク性能は 2.0GFlops である。T94 は共有メモリ・ベクトル並列型計算機であり、4 台のプロセッサが 1Gbytes の主記憶を共有している。各プロセッサのピーク性能は 1.8GFlops である。SP2 と SR2201 は分散メモリ・スカラ並列型であり、SP2 の各プロセッサは 266MFlops のピーク性能と 128Mbytes の主記憶を搭載し、SR2201 の各プロセッサは 300MFlops のピーク性能と 256Mbytes の主記憶を持つ。これらの並列計算機は ATM switcher で、ファイルサーバや画像処理システムと結合されている。表 1 に、各計算機の性能諸元一覧を示す。

表 1: 各並列計算機の諸元

Computer	No. of PEs	Peak MFlops/PE	Memory/PE(Mbytes)
SP2	50	266	128
SR2201	64	300	256
VPP300	16	2200	512
SX-4	6(3nodes,2PEs/node)	2000	512/node
T94	4	1800	1000(total)

### 3. 数値計算

本研究で用いられる基礎方程式は 2 次元のオイラー方程式である。一般座標  $(\xi, \eta)$  におけるオイラー方程式は以下のように記述される。

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial \xi} + \frac{\partial F}{\partial \eta} = 0, \quad (1)$$

$$Q = \frac{1}{J} \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ e \end{pmatrix}, E = \frac{1}{J} \begin{pmatrix} \rho U \\ \rho u U + \xi_x p \\ \rho v U + \xi_y p \\ (e+p)U \end{pmatrix}, F = \frac{1}{J} \begin{pmatrix} \rho V \\ \rho u V + \eta_x p \\ \rho v V + \eta_y p \\ (e+p)V \end{pmatrix},$$

ここで、

$$U = \xi_x u + \xi_y v, \quad V = \eta_x u + \eta_y v, \quad e = \frac{p}{\gamma-1} + \frac{1}{2}\rho(u^2 + v^2).$$

$\rho$  は密度、 $u$ 、 $v$  は  $x$  および  $y$  方向の速度、 $p$  は圧力、 $e$  は全エネルギー、 $\gamma$  は比熱比、 $J$  はヤコビアンで

$$J = \frac{\partial(\xi, \eta)}{\partial(x, y)}$$

の様に定義される。

オイラー方程式 (1) は次のように差分化される。

$$\frac{\partial \hat{Q}_{i,j}}{\partial t} + (\hat{E}_{i+\frac{1}{2},j} - \hat{E}_{i-\frac{1}{2},j}) + (\hat{F}_{i,j+\frac{1}{2}} - \hat{F}_{i,j-\frac{1}{2}}) = 0.$$



サが 512Mbytes の主記憶を共有して搭載されている。各プロセッサのピーク性能は 2.0GFlops である。T94 は共有メモリ・ベクトル並列型計算機であり、4 台のプロセッサが 1Gbytes の主記憶を共有している。各プロセッサのピーク性能は 1.8GFlops である。SP2 と SR2201 は分散メモリ・スカラ並列型であり、SP2 の各プロセッサは 266MFlops のピーク性能と 128Mbytes の主記憶を搭載し、SR2201 の各プロセッサは 300MFlops のピーク性能と 256Mbytes の主記憶を持つ。これらの並列計算機は ATM switcher で、ファイルサーバや画像処理システムと結合されている。表 1 に、各計算機の性能諸元一覧を示す。

表 1: 各並列計算機の諸元

Computer	No. of PEs	Peak MFlops/PE	Memory/PE(Mbytes)
SP2	50	266	128
SR2201	64	300	256
VPP300	16	2200	512
SX-4	6(3nodes,2PEs/node)	2000	512/node
T94	4	1800	1000(total)

### 3. 数値計算

本研究で用いられる基礎方程式は 2 次元のオイラー方程式である。一般座標  $(\xi, \eta)$  におけるオイラー方程式は以下のように記述される。

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial \xi} + \frac{\partial F}{\partial \eta} = 0, \quad (1)$$

$$Q = \frac{1}{J} \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ e \end{pmatrix}, E = \frac{1}{J} \begin{pmatrix} \rho U \\ \rho u U + \xi_x p \\ \rho v U + \xi_y p \\ (e + p)U \end{pmatrix}, F = \frac{1}{J} \begin{pmatrix} \rho V \\ \rho u V + \eta_x p \\ \rho v V + \eta_y p \\ (e + p)V \end{pmatrix},$$

ここで、

$$U = \xi_x u + \xi_y v, \quad V = \eta_x u + \eta_y v, \quad e = \frac{p}{\gamma - 1} + \frac{1}{2} \rho (u^2 + v^2).$$

$\rho$  は密度、 $u$ 、 $v$  は  $x$  および  $y$  方向の速度、 $p$  は圧力、 $e$  は全エネルギー、 $\gamma$  は比熱比、 $J$  はヤコビアンで

$$J = \frac{\partial(\xi, \eta)}{\partial(x, y)}$$

の様に定義される。

オイラー方程式 (1) は次のように差分化される。

$$\frac{\partial \hat{Q}_{i,j}}{\partial t} + (\hat{E}_{i+\frac{1}{2},j} - \hat{E}_{i-\frac{1}{2},j}) + (\hat{F}_{i,j+\frac{1}{2}} - \hat{F}_{i,j-\frac{1}{2}}) = 0.$$

$\hat{E}$  と  $\hat{F}$  は数値流速で Chakravarthy and Osher's TVD スキーム<sup>2)</sup>を用いる。空間精度は3次である。全計算においてこの数値流速の計算が約95%を占める。時間積分は2次の Runge-Kutta 法を用いて陽的に行う。

圧縮性流体の典型的なテスト問題として、本計算では角度40°のランプに入射するマッハ2.52の衝撃波が形成する複合マッハ反射を取り上げる。積分時間は全ての計算に対し等しく行い、本計算の時間単位で0.08まで計算を行う。図1は計算に使用した格子(左図)と  $t=0.08$  における反射衝撃波の例を密度の等高線で表したもの(右図)である。

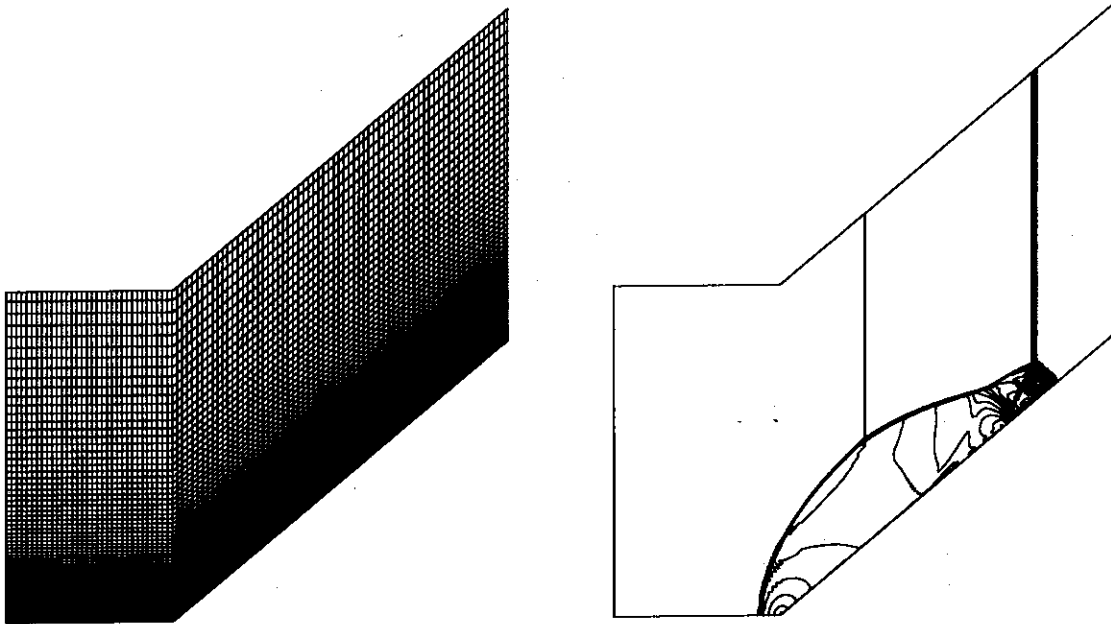


図1: 格子図(左)及び衝撃波の密度等高線図(右)

計算の並列化は領域分割法によって行う。領域分割とは物理領域を分割して各領域をそれぞれ別のプロセッサに割り当て、各領域を独立して計算を行う、並列計算ではよく用いられる手法である。分割の方法は図2に示されるように3通り考えられるが本計算では領域を単純に  $J(\eta)$ -方向にスライスするような(図2a)分割方法を採用する。また、分割は各領域の格子点数が同じになるように分割し、各プロセッサのロードバランスを保つようにする。

基本となるソースコードは全ての計算機で共通であり Fortran77 で記述されている。コード自身はメッセージパッシングライブラリ、コンパイラ指示行、そしてコンパイラの自動並列化を利用して並列化が行われる。本計算で用いられるメッセージパッシングライブラリは MPI<sup>3)</sup> と PVM<sup>4)</sup> である。コンパイラ指示行による並列化は VPP300 において行われる。T94 のコンパイラでは自動並列化が行われ、SX-4 の1ノード内の計算についてもコンパイラによる自動並列化が可能である。これらのコンパイラによる自動並列化機能を用いる場合はオリジナルなソースコード、す

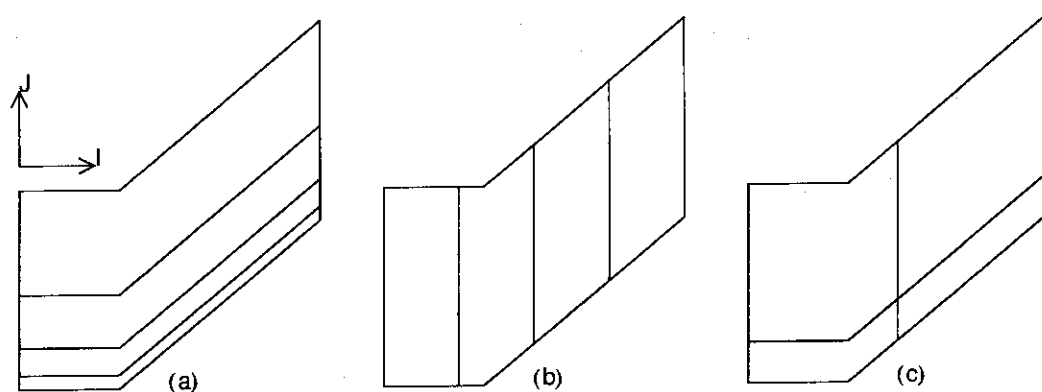


図 2: 領域分割方法

なわち並列化に対する変更を加えていないコード、を用いる。各計算機で用いられる並列化方法は表 2 に示している。表 2 において、“VPP Fortran” は VPP Fortran でのコンパイラ指示行による並列化を表し “compiler” はコンパイラによる自動並列化を表している。

計算は格子サイズとプロセッサ数を変えて行う。本計算で用いる格子サイズは  $100 \times 100$ 、 $200 \times 200$ 、 $300 \times 300$ 、 $400 \times 400$ 、そして  $500 \times 500$  で、プロセッサ数は各計算機において使用可能な台数内で変化させる。各計算機における使用可能な最大のプロセッサ数は表 2 に示している<sup>†</sup>。  $500 \times 500$  の格子サイズにおいて本コードの使用するメモリサイズは約 128Mbytes となり、SP2 の主記憶程度である。本計算において、各計算機でのコンパイル時での最適化のオプションは、リスクが少なく最も最適化が行われる一般的に推奨されているオプションを選択した。用いたオプションは次の通りである。SP2 については ‘-O3 -qstrict -qarch=pwr2’、SR2201 では ‘OPT(O(S)),PVEC’、VPP300 では ‘-Wx -Of’、SX-4 では ‘-C hopt’、そして T94 では ‘-Otask3 -Ovector3 -Oscalar3’ である。SR2201 での ‘PVEC’ は疑似ベクトル機能<sup>5)</sup>の使用を意味する。

表 2: 並列化方法と使用可能プロセッサ数

Machine	methods	available CPUs
SP2	MPI, PVM	48
SR2201	MPI	64
VPP300	VPP Fortran, PVM	15
SX-4	compiler, MPI	6
T94	compiler	4

<sup>†</sup>使用可能な最大プロセッサ数が表 1 のプロセッサ数と一部異なるのは計算機システムの運用上の事情による

#### 4. 性能評価

性能評価のために計算時間（経過時間）を測定する。そして単一格子点、単一時間ステップ当たりの計算時間、加速率、並列化効率を並列計算の性能評価の指標として見積もる。計算はまず最初に格子データを読み込み、初期値を設定し、時間ステップループにおいて積分を実行した後、所定の積分時間に達した時点で結果を出力し、終了するという手順を経るが、計算時間の測定では、ディスクへのI/Oに対するルーチンは含まないことにする。すなわち、初期値の設定と時間ステップループに要する時間を測定する。また、計算時間にはプロセッサ間での通信にかかる時間も含まれているので、その通信に要した時間も測定を行う。

本計算では、積分時間を一定にして格子サイズを変えているので、格子サイズによって全時間ステップ数が異なる。従って、測定した経過時間 ( $T_{elp}$ ) を全格子点数と全時間ステップ数で割った値、すなわち単一格子点、単一時間ステップ当たりの計算時間を以下のように定義し、評価のための基礎データとする。

$$T_0 = T_{elp}/N_{grid}/N_{step}$$

ここで、 $N_{grid}$  と  $N_{step}$  は全格子点数と全時間ステップ数を表す。加速率は単一プロセッサでの計算に対する速度向上比として表され、並列化効率は加速率を使用したプロセッサ数で割ったものとして以下のように定義される。

$$F_{speed} = (T_0)_{Ncpu=1}/T_0,$$

$$F_{eff} = F_{speed}/N_{cpu},$$

ここで、 $N_{cpu}$  はプロセッサ数を表し、 $(T_0)_{Ncpu=1}$  は単一プロセッサ計算での  $T_0$  を表す。

##### 4.1 単一プロセッサによる計算

まず最初に、各計算機の単一プロセッサを用いて格子サイズを変えて計算を行う。計算においてはオリジナルのコード（並列化のための変更を加えていないコード）を用いる。表3はSP2に対する各計算機の相対的な計算速度を載せている。ここで計算速度は上で定義した  $T_0$  の値をもとにしている。SR2201の欄において、2つの値が示されているが、左は疑似ベクトル機能を用いた結果で、右は疑似ベクトル機能を用いない結果である。また、図3は、格子サイズ  $400 \times 400$  の場合をグラフに表したものである。

結果が示すように、ベクトル並列計算機（VPP300、SX-4、T94）はスカラ並列計算機（SP2、SR2201）の約10倍～25倍程度の高速性を示す。本計算で用いられているような有限差分法はコードの主要部分は単純なDOループで構成されておりベクトル化効率は高くなるので本質的にベクトル計算機向きといえる。SP2とSR2201の計算速度の差はほぼピーク性能の差程度となっており、本計算では疑似ベクトルの効果はあまり現れていない。ベクトル計算機では、ピーク性能は

表 3: 単一プロセッサでの計算の結果: SP2に対する相対計算速度

Grid number	SP2	SR2201		VPP300	SX-4	T94
100×100	1.0	1.29	1.20	10.42	23.27	10.36
200×200	1.0	1.32	1.22	11.18	26.62	10.49
300×300	1.0	1.33	1.25	11.54	24.36	10.52
400×400	1.0	1.33	1.19	11.51	25.67	10.54

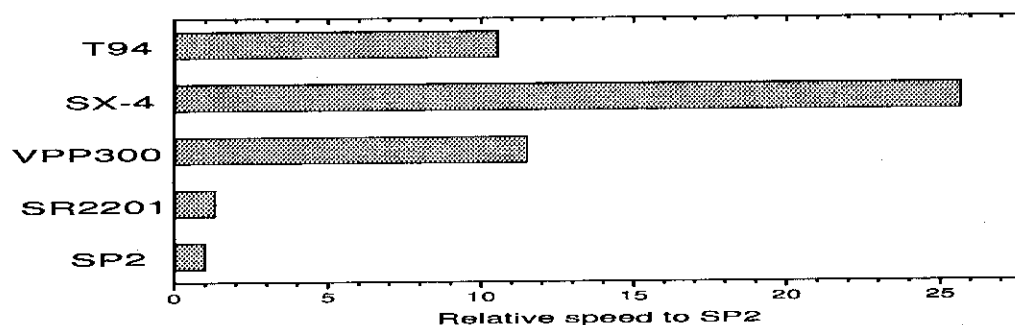


図 3: 単一プロセッサにおける性能 (SP2に対する相対速度)

それぞれのベクトル計算機は同様な値であるのに対し、実効性能ではSX-4は約2.5倍他のベクトル計算機より高速な値を示す。この点については後に議論する。これらの単一プロセッサでの計算の値は並列計算での性能評価の際に用いられる。

## 4.2 並列計算

並列計算においても、異なる格子サイズに対してプロセッサ数を変えて計算を行う。用いた格子サイズは、200×200、300×300、400×400、そして500×500である。プロセッサ数は各計算機で使用可能な台数内(表2)で変えて計算を行う。それぞれの計算において、 $T_0$ 、 $F_{\text{speed}}$ 、そして $F_{\text{eff}}$ を見積もる。また通信時間についても測定を行う。

### 4.2.1 SP2 及び SR2201

図4にSP2とSR2201における $T_0$ と $F_{\text{speed}}$ の値を、横軸をプロセッサ数としてプロットしてある。SP2の値は丸、SR2201の値は菱形で表している。SP2のデータにおける白抜きと黒塗りの丸はそれぞれPVMとMPIによって並列化された結果を示している。また、SR2201のデータにおける白抜きと黒塗りの菱形は疑似ベクトル機能を使った場合と使わなかった場合を示している。またSR2201の結果はいつでもMPIを用いて並列化した結果である。各記号を結ぶ線の種類は計算に用いた格子サイズを示している。実線は200×200、長い破線は300×300、短い破線は400×400を表している。

$T_0$ の値を対数スケールで図4aに示している。白抜きの丸印に着目すると、図で示されるように、異なる種類の線で結ばれている複数のグループがプロットされているにも関わらず、それら

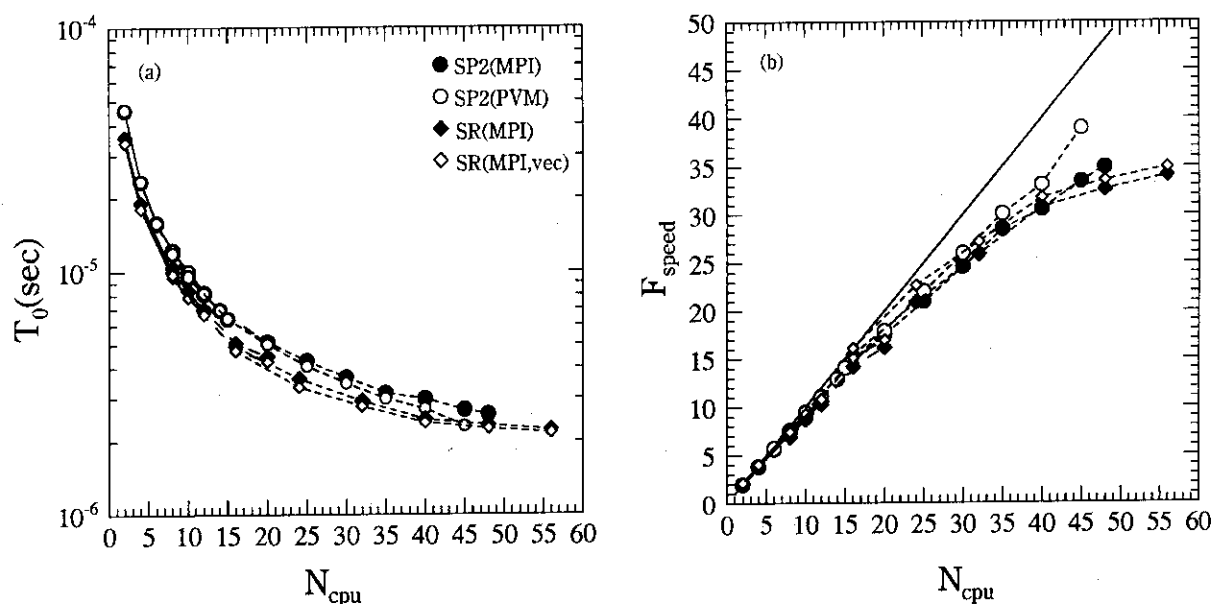


図 4: SP2 及び SR2201 の並列計算結果。(a)  $T_0$ : 単一格子点、単一時間ステップ当たりの計算時間、(b)  $F_{speed}$ : 加速率。直線は理想的な加速率を示す。

はほとんど重なって一つの曲線を形成しているように見える。異なる格子サイズの結果が重なっている、すなわち、あるプロセッサ数に対して異なる格子サイズの結果が同じ値を示しているということは単一格子点、単一時間ステップ当たりの計算時間が格子サイズに依らないことを意味している。黒塗りの丸についても同様である。SR2201 のデータも SP2 のデータと同じ傾向を示している。SR2201 と SP2 では、SR2201 の  $T_0$  の値は全体的に SP2 より小さい値を示すが、その差は単一プロセッサでの計算で見られたように、ピーク性能の差程度である。

図 4b では加速率が示されている。直線は、理想的な加速率すなわち並列化効率が 100%であることを表している。全てのデータはプロセッサ数が 40 台ぐらいまではほぼ同様な傾向を示し、プロセッサ数が 20 台ぐらいまではほぼ理想直線に近い高い性能を示しており、並列化効率も 90% を越えている。中程度のプロセッサ数では次第に効率は低下するが 40 台でも 80% 程度を保っている。さらにプロセッサ数が増えると (40 台以上)、比較的大きな減少を示すようになるが、SP2 の PVM は依然として高い値を保っている。SP2 における PVM と MPI の結果を見ると、PVM で並列化した方が大きなプロセッサ数においてやや良い性能を示している。

図 5 には SP2 における MPI と PVM の結果における通信時間と演算時間の比率を表している。図より、PVM の方が MPI を用いた計算より通信時間が小さいことが分かる。これが図 4 で見られた PVM と MPI の性能の差に現れている。また、プロセッサ数が多いほど通信時間の割合が増加しているのが分かる。今回の計算では、ある一定の格子サイズに対してプロセッサ数を変えている。したがって、大きなプロセッサ数に対して通信のオーバーヘッドが大きくなるために加速率や並列化効率の低下を招いていると考えられる。

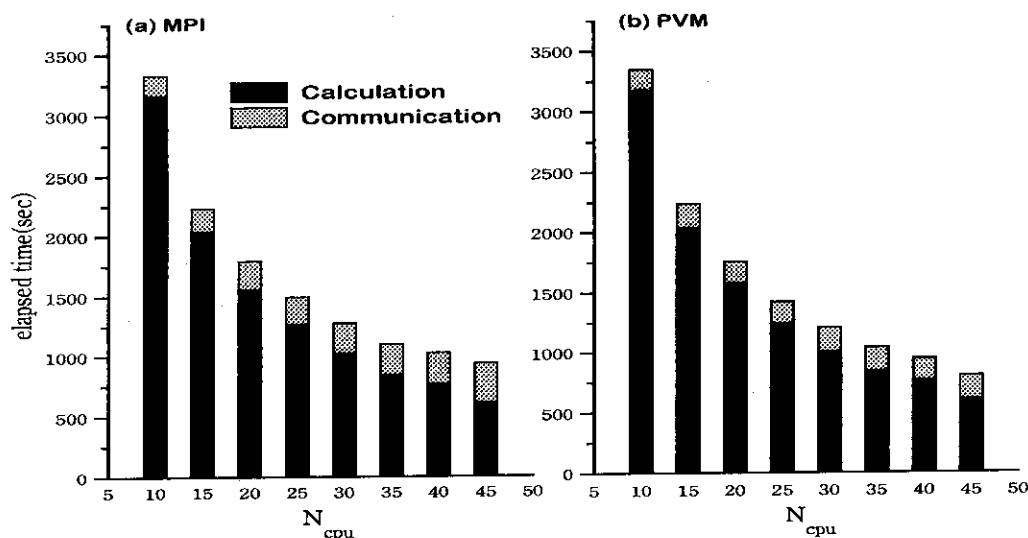


図 5: SP2 の (a)MPI と (b)PVM の結果における演算時間と通信時間

#### 4.2.2 VPP300

図 6 に VPP300 の格子サイズと並列化方法を変えたときの性能測定結果  $T_0$  と  $F_{\text{speed}}$  がプロットされている。黒塗りと白抜きの丸印はそれぞれ VPP Fortran と PVM を用いた結果を表している。記号を結んでいる線の種類の違いは用いた格子サイズの違いを表しており、実線は  $200 \times 200$ 、長い破線は  $300 \times 300$ 、短い破線は  $400 \times 400$ 、点線は  $500 \times 500$  を示している。

図 6a に示されるように、 $T_0$  は格子サイズによって異なる傾向を見せる。すなわち、一定のプロセッサ数に対して大きな格子サイズほど  $T_0$  は小さくなる。これはベクトル化による効果であると考えられる。前節で見られたように、SP2 や SR2201 のようなスカラ並列計算機では、あるプロセッサ数に対し格子サイズが異なっても  $T_0$  はほぼ一定であった。図 6b に見られるように加速率も大きな格子サイズに対してより高い性能を示す。 $500 \times 500$  の格子サイズでは 15 台のプロセッサ数に対しても 90% を越える効率を示しているが、 $200 \times 200$  では 15 台に対して 70% 以下に落ちており、格子サイズに対する性能格差が著しい。

VPP Fortran と PVM の結果を比べると、VPP Fortran の結果は PVM の結果に比べて全体的に非常によい結果を示している。これは VPP Fortran を用いた方が通信時間が PVM に比べて格段に小さくなるため、そのためより効率的な計算が行えている。VPP300 の結果の一部を表 4 に示す。表から明らかなように経過時間に対する通信時間の比率が PVM の結果に比べて VPP Fortran の方がかなり小さいことが分かる。また、同じプロセッサ数 (10 台) で、 $300 \times 300$  の場合より  $500 \times 500$  の結果の方がより高い性能を示していることも明らかである。

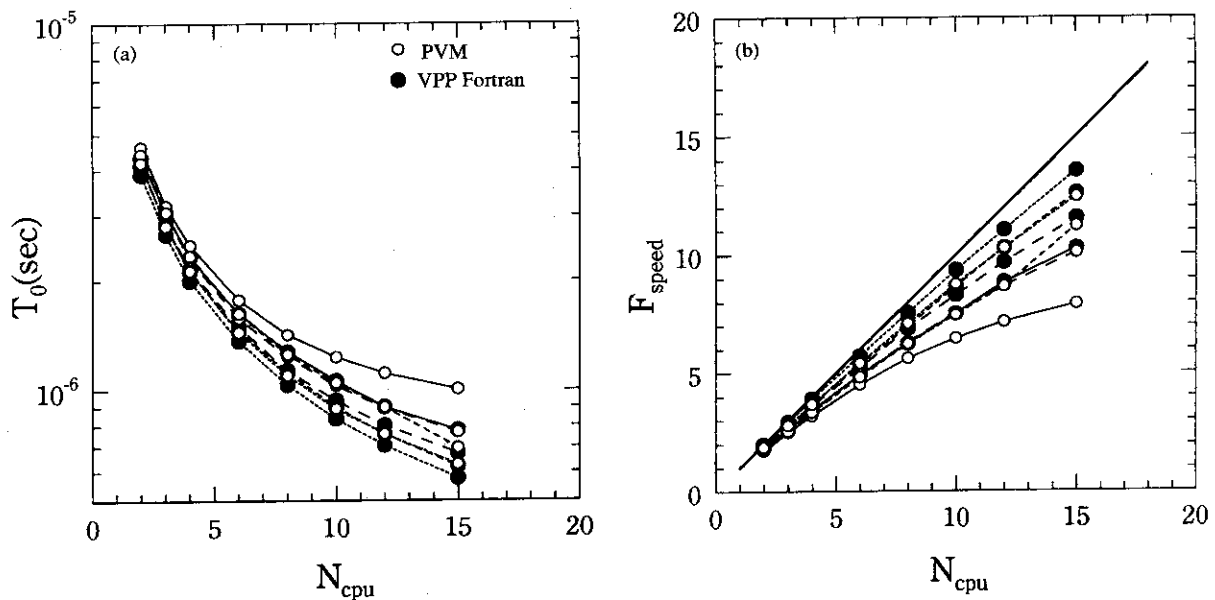


図 6: VPP300 の並列計算結果。(a)  $T_0$ 、(b)  $F_{speed}$

表 4: Results of parallel calculations by VPP300

$N_{grid}$	$N_{cpu}$	method	$T_0$	$F_{speed}$	$F_{eff}$	comm.(%)
300×300	10	VPP F.	$9.364 \times 10^{-7}$	8.30	83.0	4.7
		PVM	$1.028 \times 10^{-6}$	7.55	75.5	18.0
500×500	10	VPP F.	$8.352 \times 10^{-7}$	9.34	93.4	3.6
		PVM	$8.906 \times 10^{-7}$	8.76	87.6	9.4

#### 4.2.3 SX4 及び T94

SX-4はHIPPIで結合された3つのノードから構成されており、各ノードには2つのベクトルプロセッサが搭載されており共有メモリを持っている。コンパイラによる自動ベクトル化は1ノード内においてのみ行われるがMPIは単一ノード及びマルチノードでも使用可能である。

表5は単一ノード内(2CPU)での計算の性能を示している。"auto"は自動並列化、"MPI"はMPIによる並列化を表している。SX-4における自動並列化の場合、コード内にコンパイラ指示行を挿入してファインチューニングが可能であるが、今回は何も変更を加えてないオリジナルなコードを使用している。表6にはマルチノードでの並列計算の結果が示されている。マルチノード計算では格子数は $200 \times 200$ で積分時間は0.01に縮小している。ケースAからDがマルチノードでの計算を表し、ケースEは比較のために同じ条件での単一ノードの結果である。

SX-4の単一ノードではCPUが2台しか搭載されていないので並列性能を議論するには不十分であるが、VPP300に対してはプロセッサのピーク性能はVPP300の方が10%高いにも関わらず、実効性能はSX-4の方が約2倍高い性能が得られる。しかしながら、マルチノードではノード間の通信に非常に(単一ノードの時の約100倍)時間がかかるために性能が極めて低下している。



クレイ T94 は共有メモリを持った 4 台の CPU からなり、コンパイラが自動で並列化を行うが、その性能の結果は VPP300 とほぼ同様な値を示しているので次節の図中にプロットしている。

表 5: SX-4 の単一ノード内での並列計算の結果

$N_{\text{grid}}$	$T_0(\text{auto})$	$F_{\text{speed}}(\text{auto})$	$T_0(\text{MPI})$	$F_{\text{speed}}(\text{MPI})$	$T_{\text{comm}}(\%, \text{MPI})$
200×200	$2.885 \times 10^{-6}$	1.16	$1.799 \times 10^{-6}$	1.86	6.94
300×300	$2.237 \times 10^{-6}$	1.64	$1.946 \times 10^{-6}$	1.89	3.05
400×400	$1.958 \times 10^{-6}$	1.72	$1.739 \times 10^{-6}$	1.94	2.29

表 6: SX-4 でのマルチノードでの並列計算の結果

Case	$T_0$	$T_{\text{comm}}(\%)$	Remark
A	$1.532 \times 10^{-5}$	88.43	2 processes in 2 nodes
B	$2.000 \times 10^{-5}$	93.80	3 processes in 3 nodes
C	$2.153 \times 10^{-5}$	90.45	4 processes in 2 nodes
D	$2.802 \times 10^{-5}$	96.78	6 processes in 3 nodes
E	$1.867 \times 10^{-6}$	7.14	2 processes in 1 nodes

#### 4.2.4 5 機種の実効性能評価

前節まで各計算機における個別の実効性能を示したが、本節ではそれぞれの計算機の典型的な性能結果を基にして 5 機種間での実効性能の検討を行う。図 7a では、各計算機における、異なる格子サイズに対する  $T_0$  の値をプロセッサ数を横軸としてプロットしたものである。図中括弧内の "MPI" は MPI を用いて並列化した結果を表し、"VPP F" は VPP Fortran を用いて並列化した結果を示している。SR2201 の "pvec" は疑似ベクトル機能を使用したことを意味している。図から明らかなように、本研究で用いたパラメータの範囲では、ベクトル並列計算機の実効性能はスカラ並列計算機の約 10-25 倍高い性能を示す。スカラ並列計算機はどちらもほぼ同じような傾向を示し同じプロセッサ数では格子サイズには依存しない。一方、ベクトル並列計算機では大きな格子サイズに対してはより高い性能を示すが、格子サイズに対する性能格差が大きい。ベクトル並列計算機では、これら 3 機種のパーク性能はほぼ同じではあるが、実効性能では SX-4 は極めて高い性能を示すが、これは 1 ノード内 (2 プロセッサ) だけの性能である。今回用いたコードでは CPU のメモリ参照頻度と浮動小数点演算の比率がほぼ 1 対 1 となっている (これは T94 のハイパフォーマンスモニタで得られたデータである)。SX-4 では特にノード内での CPU のメモリ参照速度が他の計算機より強化されているために、今回のコードに対して特に高い性能を示したと考えられる。

$T_0$  そのもののデータに着目するとベクトル並列計算機がスカラ並列計算機より、より高い性能を示すが、パーク性能自体はベクトル並列計算機の方がスカラ並列計算機より元々高い値を持っている。従って、それぞれの計算機のパーク性能の違いを考慮した検討を行う。これは SP2 の性

能値をもとにして行う。SP2を基準として用いる理由は特別なものではないが以下の理由による。SP2のピーク性能は5機種の中で最も低いこと。そして、性能評価の結果、あるプロセッサ数に対して、格子サイズが異なってもほぼ一定の $T_0$ の値を示すことによる。そこで、各計算機の $T_0$ の値を同じプロセッサ数でのSP2の $T_0$ の値で割り実効性能比を求める。そして、この実効性能比を、SP2に対するピーク性能比で規格化する。この値を新たな性能評価値とする。すなわち、この値が1であることは、実効性能の比がピーク性能の比に等しいことを意味する。1より大きいことは、SP2に対して実効性能がピーク性能比よりも高く出ていることを示す。これらの値は図7bに示してある。途中データが抜けている所は、SP2において同じプロセッサ数のデータがないためである。図に見られるように、SX-4はプロセッサ数が2台だけのデータであるが4台の中で極めて高い性能を示している。VPP300はデータ数も多くベクトル並列計算機の特徴を良く表していると思われるが、格子サイズが大きいと大きなプロセッサ数に対しても高い性能を維持するが、小さな格子サイズに対しては性能はプロセッサ数と共に低下する傾向が顕著になり、 $200 \times 200$ の格子で15台のプロセッサ数では実効性能比はピーク性能比より小さくなってしまふ。SR2201では1.2-1.0の値を示しているが、これは疑似ベクトル機能の効果を表していると考えられる。

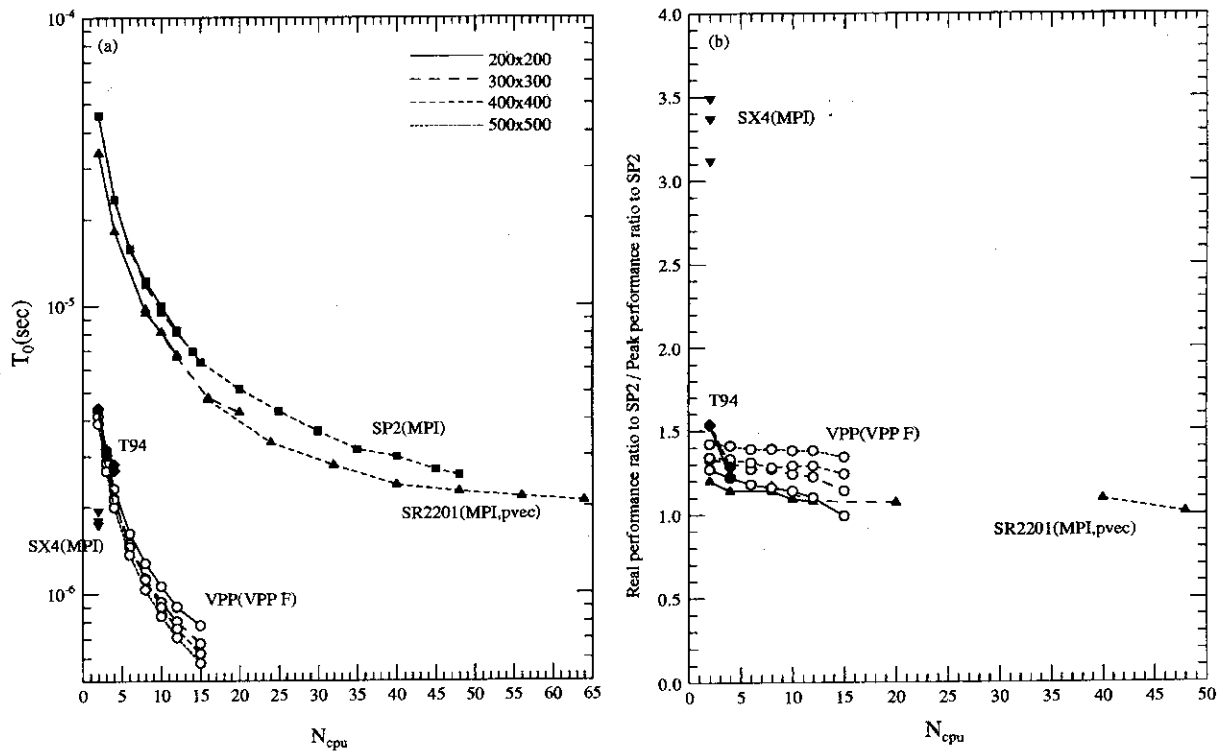


図 7: 5 機種 of 並列計算に対する性能結果。(a) 単位格子点、単位時間ステップ当たりの計算時間  $T_0$ 、(b) SP2 に対するピーク性能比で規格化された実効性能比

## 5. まとめ

本研究において、5台の異機種並列計算機、VPP300、SX-4、T94、SP2、そしてSR2201、の実効性能を2次元のオイラーコードを用い、典型的なCFD問題を解くことによって調べた。そこで、単位格子点、単位時間ステップ当たりの計算時間、加速率、並列化効率、プロセッサ間の通信時間等を、格子サイズやプロセッサ数を変えて、また幾つかの並列化方法に対して、測定及び見積もりを行った。いずれの計算でも並列計算による高い性能向上が示されたが、本コードのような構造格子上での有限差分コードはベクトル化に対して大変効果的であり、ベクトル並列計算機ではスカラ並列計算機に比べて非常に高い(10-25倍)性能を示すことが分かった。またベクトル並列計算機では格子サイズに対する性能格差が大きく、大きな格子サイズに対してはより高い性能を示すが、スカラ並列計算機よりもプロセッサ数に対する加速率の減少は顕著であることが分かった。一方、スカラ並列計算機では大きなプロセッサ数に対しても高い加速率を示し、性能は格子サイズにはほとんど依らないことが分かった。これはスカラ計算機ではプロセッサの演算速度が遅いために通信時間の比率が相対的に小さくなるため加速率が結果的に高くなることと、ベクトル計算でないために格子サイズに対する依存性がほとんど出ないことによる。ベクトル並列計算機とスカラ並列計算機を計算速度そのものの値で実効性能を見ると、その性能の差は明らかでありベクトル並列計算機がCFDのシミュレーションに向いていると言えるが、ピーク性能の差を考慮してもベクトル並列計算機はスカラ並列計算機よりも高い性能を示すが、SX-4の1ノード内での性能結果を除いてその差は特に大きなものではないことが分かった。

## 謝辞

本研究において、計算科学技術推進センター並列計算法開発グループ蕪木英雄グループリーダー及び同グループの各メンバー、また同並列処理基本システム開発グループの武宮博氏には様々な助言をいただきここに感謝する次第である。

## 5. まとめ

本研究において、5台の異機種並列計算機、VPP300、SX-4、T94、SP2、そしてSR2201、の実効性能を2次元のオイラーコードを用い、典型的なCFD問題を解くことによって調べた。そこで、単位格子点、単位時間ステップ当たりの計算時間、加速率、並列化効率、プロセッサ間の通信時間等を、格子サイズやプロセッサ数を変えて、また幾つかの並列化方法に対して、測定及び見積もりを行った。いずれの計算でも並列計算による高い性能向上が示されたが、本コードのような構造格子上での有限差分コードはベクトル化に対して大変効果的であり、ベクトル並列計算機ではスカラ並列計算機に比べて非常に高い(10-25倍)性能を示すことが分かった。またベクトル並列計算機では格子サイズに対する性能格差が大きく、大きな格子サイズに対してはより高い性能を示すが、スカラ並列計算機よりもプロセッサ数に対する加速率の減少は顕著であることが分かった。一方、スカラ並列計算機では大きなプロセッサ数に対しても高い加速率を示し、性能は格子サイズにはほとんど依らないことが分かった。これはスカラ計算機ではプロセッサの演算速度が遅いために通信時間の比率が相対的に小さくなるため加速率が結果的に高くなることと、ベクトル計算でないために格子サイズに対する依存性がほとんど出ないことによる。ベクトル並列計算機とスカラ並列計算機を計算速度そのものの値で実効性能を見ると、その性能の差は明らかでありベクトル並列計算機がCFDのシミュレーションに向いていると言えるが、ピーク性能の差を考慮してもベクトル並列計算機はスカラ並列計算機よりも高い性能を示すが、SX-4の1ノード内での性能結果を除いてその差は特に大きなものではないことが分かった。

## 謝辞

本研究において、計算科学技術推進センター並列計算法開発グループ蕪木英雄グループリーダー及び同グループの各メンバー、また同並列処理基本システム開発グループの武宮博氏には様々な助言をいただきここに感謝する次第である。

参考文献

- 1) T.Kimura, Performance evaluation and comparison for compressible flow calculations on scalar and vector parallel computers, submitted to *Parallel Computing*.
- 2) S.R.Chakravarthy and S.Osher, A new class of high accuracy TVD schemes for hyperbolic conservation laws, AIAA paper 85-0363,1985.
- 3) W.Gropp,E.Lusk, and A.Skjellum, *Using MPI:Portable Parallel Programming with the Message-Passing Interface* ( The MIT Press, 1994).
- 4) A.Geist,A.Beguelin,J.Dongarra,W.Jiang,R.Manчек, and V.Sunderam, *PVM:Parallel Virtual Machine - A Users' Guide and Tutorial for Networked Parallel Computing* (The MIT Press, 1994).
- 5) H.Nakamura,H.Imori,K.Nakamura,T.Boku,I.Nakata,Y.Yamashita,H.Wada, and Y.Inagami, A Scalar Architecture for Pseudo Vector Processing based on Slide-Windowed Registers, Proc.Intl.Conf. on Supercomputing '93(ACM), 1993, 298-307.