

実シミュレーションコードによる 大規模科学計算システムの性能評価 ベクトル型コンピュータとスカラ型コンピュータとの比較

小林 広明¹⁾, 岡部 公起¹⁾, 撫佐 昭裕²⁾,
曾我 隆³⁾, 松村 佳昭³⁾, 伊藤 学³⁾

1)東北大学情報シナジーセンター,
2)日本電気株式会社, 3)NEC システムテクノロジー

概要: 本稿では情報シナジーセンター利用者のシミュレーションプログラム 5 本を用いて, ベクトル並列型コンピュータとスカラ並列型コンピュータの性能評価を行った. 本性能評価により, ベクトル並列型コンピュータの高いメモリ転送能力は, 実シミュレーションプログラムの実行において, 高い実効性能を引き出すのに必要不可欠であることが明らかになった.

1. はじめに

大規模シミュレーションを効率よく実行するためには, 高い実効性能を有するコンピュータシステムが必要である. 情報シナジーセンターでは, 様々な研究者が必要とする多様な計算要求に応じるため, 大規模科学計算システムを提供している. 大規模科学計算システムでは, 世界最高クラスの性能を有するベクトル並列型コンピュータと汎用的な利用を目的としたスカラ並列型コンピュータを導入している.

ベクトル並列型コンピュータとスカラ並列型コンピュータの大きな違いは, CPU・メモリ間のメモリ転送能力(メモリバンド幅)にある. HPC Challenge ベンチマークによる評価結果[1]からも示されるように, ベクトル並列型コンピュータはメモリ転送能力が高く, 大容量のデータを高速に転送できるように設計されている. 一方, スカラ並列型コンピュータはメモリ転送能力が低いが, キャッシュメモリを効果的に用いることによって高速なデータ転送を行えるように設計されている. しかし, キャッシュメモリが有効に機能しない場合には, CPU へのデータ供給がボトルネックになり, 演算性能は大きく低下する.

本稿では, ベクトル並列型コンピュータとスカラ並列型コンピュータの性能特性をメモリ転送能力に着目して評価・検討した結果を報告する. 性能評価のための実験は, Fortran で記述された情報シナジーセンター利用者のシミュレーションプログラムを用いて, ベクトル並列型コンピュータ NEC SX-7, スカラ並列型コンピュータ NEC TX7/Azusa, NEC TX7/i9510, SGI Altix3700 で行った.

2. 性能評価環境

本評価で使用したプログラム, コンピュータ, および性能測定法について述べる.

2.1. プログラム

本評価ではセンター利用者が開発したプログラム 5 本を使用した. 表 1 にプログラ

ムの概要を示す。

表1 プログラムの概要

分野	プログラム名	手法	メッシュ数
電磁解析	不均質媒体中における電磁伝搬と散乱	FDTD法	50*750*750
電磁解析	超帯域アンテナの解析	FDTD法	612*105*505
流体・熱	二次元予混合火炎の不安定性解析	DNS法	513*513
流体・熱	非定常剥離流れの熱伝導解析	SMAC法	711*91*221
地殻解析	プレート境界面上における滑りシミュレーション	摩擦構成則	32400**3

(1) 不均質媒体中における電磁伝搬と散乱

本プログラムは地雷探査レーダの性能評価をシミュレーションするコードである。地雷探査レーダのシミュレーションでは、電磁波パルスにおける地表面での反射・透過、不均質地下媒体中での散乱などを再現する。そのため電磁場における Maxwell の方程式の数値計算が必要となる[2]。

本プログラムは電磁場における Maxwell の方程式を FDTD 法(Finite Difference Time Domain method)を用いて解いている。FDTD 法は解析領域をセルに分割し、空間、時間をそれぞれ一次の中心差分で離散化するものである。FDTD 法のプログラムは、次時刻ステップの電場、磁場を各セルの誘磁率、誘電率、導電率および電場と磁場の空間差分から求めるもので、空間領域における単純な d o ループ構造となる[3]。

FDTD 法は閉領域の解法のため、開放形の領域を扱う場合には、吸収境界条件が必要となる。本プログラムでは、境界条件として Berenger の PML(Perfectly matched layer)を使用している。

(2) 超帯域アンテナ解析

本プログラムはダイポールアンテナやフェルミアンテナ等の様々なアンテナに関する電磁解析を行うコードである。これらアンテナは、アンテナ長、開口幅、非誘電率など多数の構造パラメータによって放射特性が大きく変化する。本プログラムはこれらの放射特性をシミュレーションするものである[4]。

本プログラムの計算手法は(1)と同様に FDTD 法を用い、Berenger の PML を使用している。

(3) 二次元予混合火炎の不安定性解析

本プログラムは燃焼流における化学反応機構を用いて平面予混合火炎の自己乱流化のシミュレーションを行うコードである。燃焼流は家庭用ガスバーナーから超音速燃焼エンジンまで応用範囲の広いものである[5]。

本プログラムは、燃焼流体の乱流を DNS(Direct Numerical Simulation)により解くものであり、流体方程式の空間離散化として6次精度のコンパクト差分法を、また、時間積分として3段階ルンゲ・クッタ法をそれぞれ用いている。コンパクト差分法は、他のスキームに比べ高い演算精度を少ない演算量で実現するものである。本プログラムでは、境界条件として NSCBS(Navier-Stokes Characteristic Boundary Conditions)による無反射境界条件を使用している。

(4) 非定常剥離流れの熱伝導解析

本プログラムは流体の剥離現象とその熱伝導のシミュレーションを行うコードで

ある．剥離現象と熱伝導の解析は，スペースプレーン，航空機，リニアモーターカーなどの高速交通機関の性能向上，安全性に必要なものである[6]．

本プログラムで用いている計算スキームは SMAC (Simplified Marker-and-Cell) 法であり，圧力項に関するポアソン方程式は SOR 法を用いている．

(5) プレート境界面上における滑りシミュレーション

本プログラムは，地殻プレート沈み込みによって発生した地震がもたらす，余効すべりをシミュレーションし，余効すべりの伝搬速度とプレート境界面の摩擦特性を究明することを目的としたコードである[7]．

本プログラムのシミュレーションは，地殻を弾性体とした摩擦構成則を用いて行っている．摩擦構成則として使用しているモデルは，プレート境界に作用する摩擦が速度・状態摩擦構成則に従うとした slowness law である．

2.2. コンピュータ

本評価で使用したコンピュータの諸元を表 2 に示す．また，各コンピュータの概要について説明する．

表 2 性能諸元一覧

システム名	CPU数/ ノード	クロック (MHz)	1CPUの諸元			備考
			理論性能 (GFLOPS)	メモリバンド 幅(GB/s)	キャッ シュ (L3)MB	
SX-7	32	552	8.83	35.3	-	
TX7/AzusaA	16	800	3.2	2.1	4	Intel Itanium
TX7/i9510	16	1600	6.4	6.4	9	Intel Itanium2
Altix3700	64	1600	6.4	6.4	6	Intel Itanium2

(1) SX-7

NEC SX-7 は大規模な科学技術計算を高速に実行するために開発された，ベクトル並列型スーパーコンピュータである．

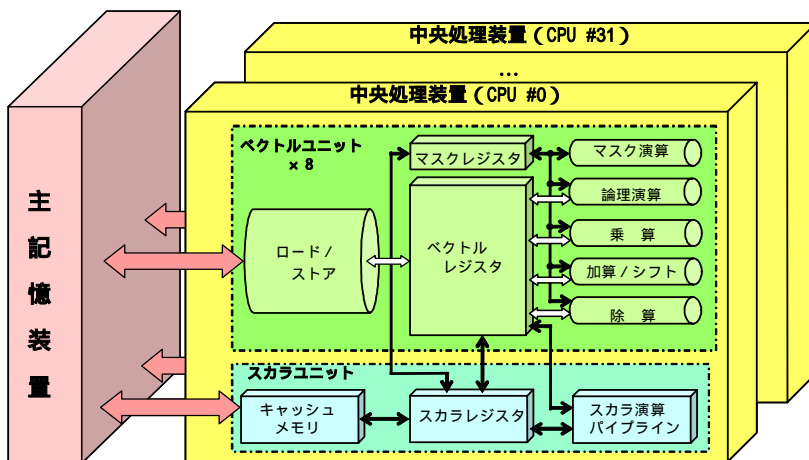


図 1 SX-7 の CPU 概念図

図1はSX-7のCPU概念図である。SX-7はdoループ中の配列演算を高速に実行するベクトルユニットを有している。ベクトルユニットは5種類のベクトルパイプライン(乗算,加算/シフト演算,除算,論理演算,マスク演算)からなり,SIMD(Single Instruction Multiple Data)型の並列処理を行っている。ベクトルパイプラインへの演算データ供給のため,CPU・メモリ間のメモリバンド幅は35.3GB/sを有している。このメモリ転送能力の大きさがベクトル型コンピュータの最大の特長である[8]。

また,プログラムを高速に実行させるために,FortranとCコンパイラは自動ベクトル化機能と自動並列化機能を有している。

(2) TX7/AzusA

NEC TX7/AzusAはIntel社の64bitマイクロプロセッサItaniumを搭載したスカラ並列型コンピュータである。

ItaniumはEPIC(Explicitly Parallel Instruction Computing)方式のCPUであり,命令レベルの並列処理を行っている。また,倍精度浮動小数点演算ユニット(乗加算器)を2個有し,積和演算命令を利用した場合,同時に4つの浮動小数点演算を行うことができ,3.2GFLOPSの演算性能を有している。キャッシュメモリはL1(16KB+16KB),L2(96KB),L3(4MB)の3階層からなり,L1とL2のみオンチップ実装になっている。浮動小数点演算で使用されるのはL2とL3のみである。

図2はTX7/AzusAのセルカード概念図である。TX7/AzusAは,1枚のセルカードにメモリとCPU4個を搭載し,セルカード4枚で1ノード(16CPU)を構成している。システム方式としてはcc-NUMA(cache-coherent nonuniform memory access)型である。メモリバンド幅は2.1GB/sであり,4CPUで2.1GB/sのバスを共有している[9]。

FortranとCコンパイラは,Itaniumの性能を引き出すことができるソフトウェアパイプライン機能,命令スケジューリングおよび自動並列化機能を有している[10]。

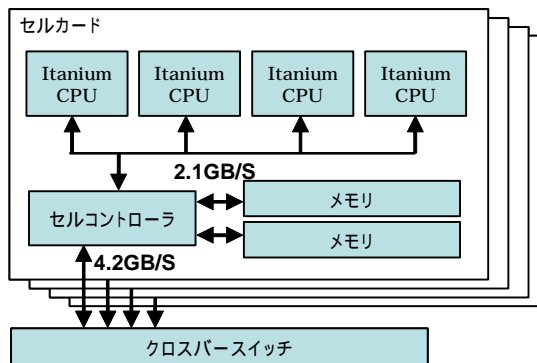


図2 TX7/AzusA セルカード概念図

(3) TX7/i9510

NEC TX7/i9510はTX7/AzusAの後継機であり,Intel社の64bitマイクロプロセッサItanium2を搭載したスカラ並列型コンピュータである。

Itanium2はItaniumの後継CPUであり,動作周波数の向上(0.8GHzから1.6GHzへ),L3キャッシュのオンチップ化と容量増強(L2:256KB,L3:9MB),バス性能の強化が行われている。図3はTX7/i9510のセルカード概念図である。TX7/i9510では,

TX7/AzusA 同様に 1 枚のセルカードにメモリと CPU 4 個を搭載し、セルカード 8 枚で 1 ノード(32CPU)を構成している。メモリバンド幅は 6.4GB/s であり、4CPU で 6.4GB/s のバスを共有している [11]。

Fortran と C コンパイラは、Itanium2 の性能を引き出すことができるソフトウェアパイプライン機能、命令スケジューリングおよび自動並列化機能を有している。

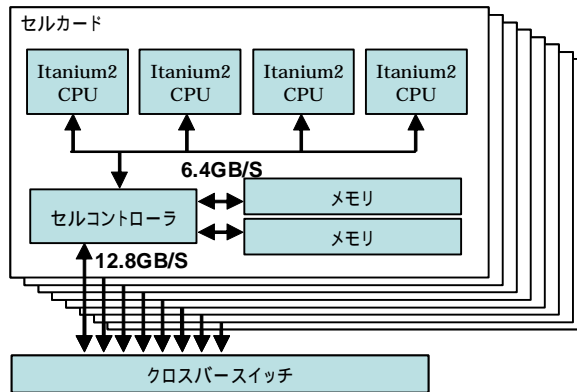


図 3 TX7/i9510 セルカード概念図

(4) Altix3700

SGI Altix3700 は Intel 社の 64bit マイクロプロセッサ Itanium2 を搭載したスカラ並列型コンピュータである。

図 4 は Altix3700 のセルカードの概念図である (Altix3700 では、セルカードのことを C-brick と呼ぶ)。Altix3700 は、C-brick と呼ばれる筐体に 4 個の CPU とメモリを搭載した cc-NUMA 型システムである。C-brick 内には 2 つのフロントサイドバスがあり、それぞれ 2 つの CPU が接続される。C-brick は 2 つのネットワークインタフェースチップ Shub を有し、Fat-tree 型のネットワーク NUMalink に接続されている。NUMalink に接続できる最大 C-brick は 256 台までである。また、メモリバンド幅は 6.4GB/s であり、2CPU で 6.4GB/s のバスを共有している [12]。

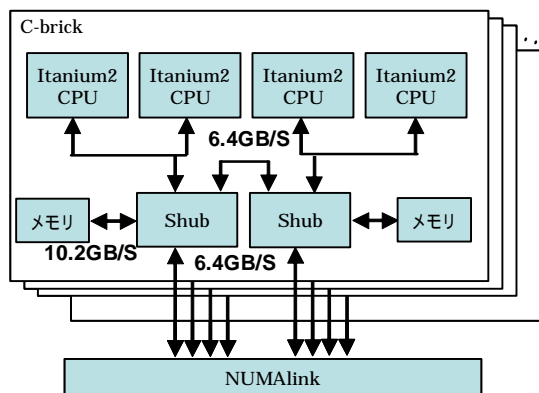


図 4 Altix3700 セルカード概念図

Fortran と C コンパイラは、Itanium2 の性能を引き出すことができるソフトウェアアプライライン機能、命令スケジューリングおよび自動並列化機能を有している。

2.3. 測定方法

性能測定として、SX-7、TX7/AzusA、TX7/i9510、Altix3700 において 1CPU、4CPU、8CPU、16CPU でプログラムを実行させた。測定を 16CPU までとしたのは、TX7/AzusA の最大 CPU 構成が 16CPU であるからである。また性能測定では、各プログラムの実行経過時間を計測した。経過時間の測定では、ファイル入出力の処理時間を除くため、初期データの入力と演算結果出力を除いた部分を測定区間とした。

本性能測定では、プログラムのソース修正による高速化は行わず、コンパイラによる最適化のみを使用した。コンパイラによる最適化として、SX-7 においては最適化オプション-Chopt とインライン展開を行う-pi を、また、TX7/AzusA、TX7/i9510、Altix3700 では最適化オプション-O3 とインライン展開を行う-ip を指定した。なお、スカラ並列型コンピュータでは、コンパイラによる性能差が発生しないように、NEC が開発した Fortran コンパイラをそれぞれのマシンで使用した。

4CPU 以上の実行にはコンパイラの自動並列化機能を利用した。自動並列化では、各コンピュータともプログラムの同一箇所を並列化し、コンパイラが並列化の可否を判断できない do ループには、並列化指示行を挿入している。また、TX7/AzusA、TX7/i9510、Altix3700 では、CPU アフィニティ機能を使用した。

プログラムの性能解析には、SX-7、TX7/i9510、Altix3700 とともに NEC が開発した ftrace 機能を利用した。

3. 測定結果

3.1. 不均質媒質中における電磁波伝搬・散乱

図 5 は TX7/AzusA の実効性能を 1 としたときの各コンピュータの実効性能比である。図 6 は各コンピュータの理論性能に対する実効性能の割合（以下、実行効率）を示したものである。

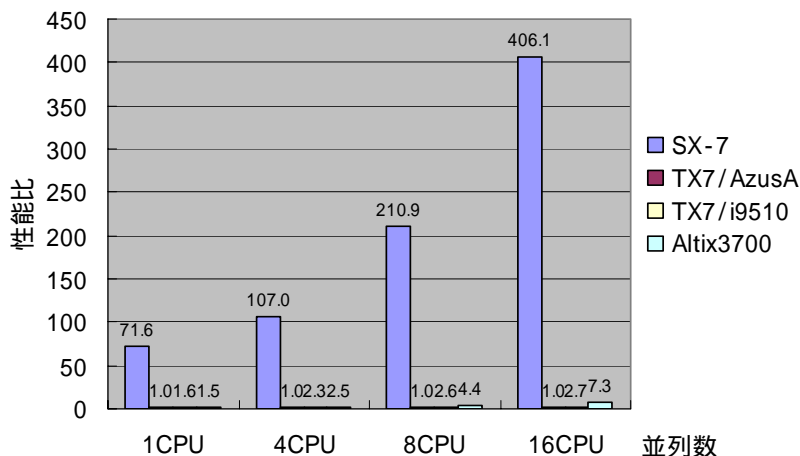


図 5 TX7/AzusA を 1 とした時の性能比

1CPU における SX-7 の理論性能は TX7/i9510 と Altix3700 の理論性能の 1.38 倍である。しかし 図 5 の 1CPU における性能比較では SX-7 は TX7/i9510 と Altix3700 の 44 倍から 47 倍と大きく開いている。16CPU では SX-7 は TX7/i9510 の 150 倍、Altix3700 の 55 倍の実効性能比に達している。図 6 の実行効率では 1CPU において、SX-7 は 49%、TX7/i9510 は 1.5%、Altix3700 は 1.4%である。

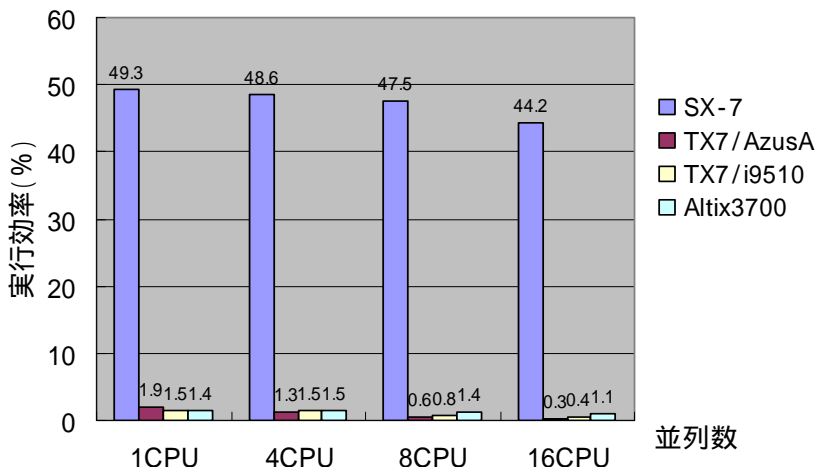


図 6 実行効率

SX-7 においてベクトル処理の効率を示すベクトル化率とベクトル長はそれぞれ 99.7%と 245.1 であった。また、メモリから CPU へのデータ供給においては、バンク競合が全メモリアクセスに対して数%程度発生したが、本プログラムはベクトル処理により効率よく実行されている。

本プログラムは大きな配列データに対し不連続なアクセスを頻繁に行っており、スカラ並列型コンピュータではキャッシュミスが数多く発生している。TX7/i9510、Altix3700 とともに 1CPU 実行においてキャッシュヒット率は 77%であり、実行時間の 95%がメモリアクセス時間であった。メモリ転送能力の低いコンピュータでは実効性能を高くすることができず、TX7/i9510、Altix3700 とともに実行効率は 2%以下となっている。

図 7 は各コンピュータの 1CPU の実効性能を 1 とした時の並列性能の向上比を示したものである。本プログラムの並列化率は 98%であった。SX-7 と Altix3700 はスケラブルに性能が伸びている。TX7/i9510 は 4CPU までスケラブルに性能が伸びているが、その後頭打ちになっている。TX7/i9510 で性能が向上しないのは、図 8 に示したように並列実行をしてもメモリアクセス時間が減少しないためである。これは、TX7/i9510 のセル内バスにおいてアクセス競合が発生したためである。今回使用した TX7/i9510 が 4 セルからなるモデルであり、8CPU 以上の実行では、各セルで複数 CPU を同時に実行するからである。図 9 に Altix3700 のメモリアクセス時間を示す。Altix3700 は 16 セル(C-brick)の構成で、各セルで 1CPU の実行であったため、セル内のアクセス競合は発生していない。

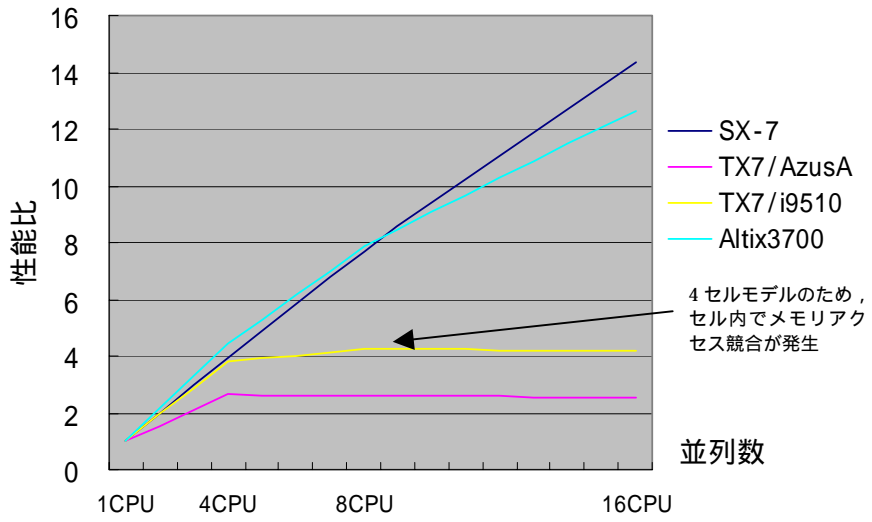


図7 並列時の性能向上比

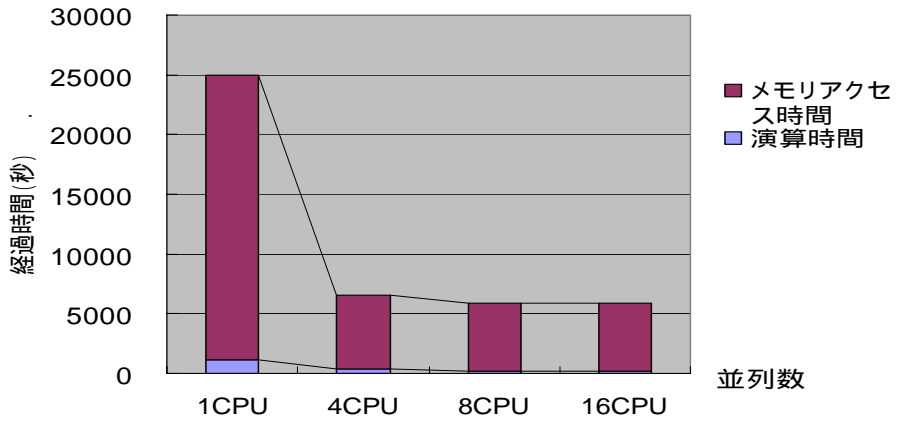


図8 TX7/i9510 演算時間とメモリアクセス時間

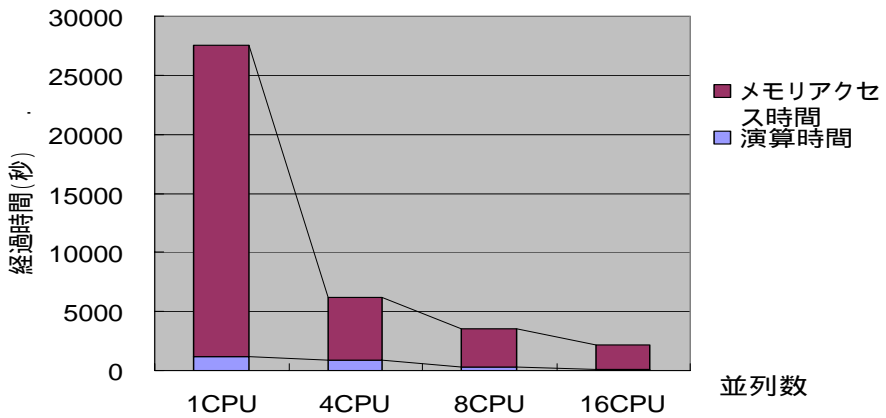


図9 Altix3700 演算時間とメモリアクセス時間

3.2. 超帯域アンテナの解析

図 1 0 は TX7/AzusA の実効性能を 1 としたときの各コンピュータの実効性能比である。図 1 1 は各コンピュータの実行効率を示したものである。

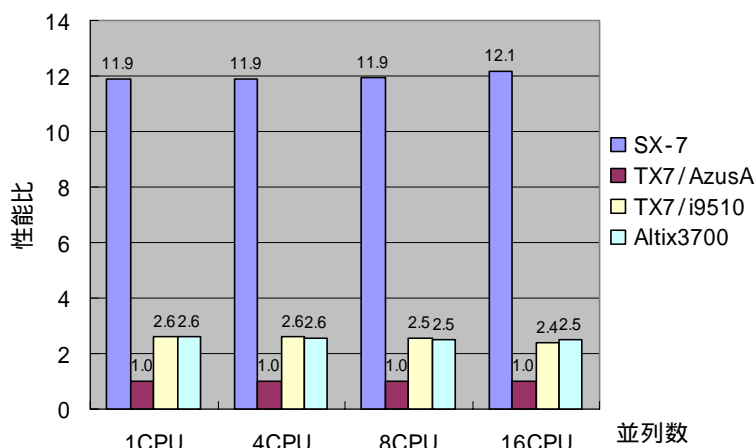


図 1 0 TX7/AzusA を 1 とした時の性能比

図 1 0 の 1CPU での比較では、SX-7 は TX7/i9510 と Altix3700 の 4.6 倍の性能である。16CPU では、SX-7 は TX7/i9510 と Altix3700 の約 5 倍である。図 1 1 の実行効率では 1CPU において、SX-7 は 41%、TX7/i9510 は 12.5%、Altix3700 は 12.4% である。

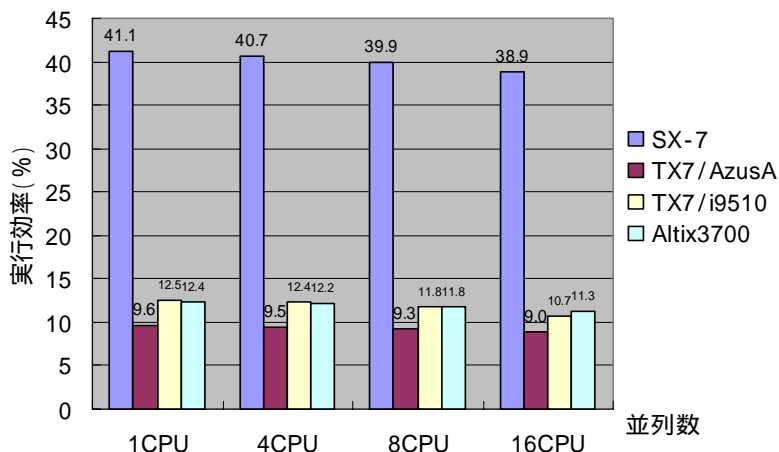


図 1 1 実行効率

SX-7 においてベクトル化率とベクトル長はそれぞれ 99.5%と 255.5 であった。本プログラムはストリップマイニングの手法をもちいて、主な do ループのベクトル長を SX-7 の最大ベクトル長に合わせ、ベクトル処理を効率よく行う工夫が行われている。

スカラ並列型コンピュータの実行において、本プログラムはオンキャッシュでほとんどの処理を行っている。TX7/i9510、Altix3700 とともにキャッシュヒット率は 99.9%

であった。しかし、本プログラムでは Itanium 系 CPU で機能強化されているソフトウェアパイプライン機能や積和演算命令がほとんど利用できないプログラム構造であり、また、本プログラムで多用されている複素型 EXP 関数の処理性能が Itanium2 で 0.5GFLOPS 程度と低い性能になっている(注)。このことからスカラ並列型コンピュータで実行効率が 10%程度となっていると思われる。

図 1 2 は各コンピュータの 1CPU の実効性能を 1 とした時の並列性能の向上比を示したものである。この図から、すべてのコンピュータでスケラブルに性能が向上していることがわかる。本プログラムの並列化率は 99.5%であった。

(注) 複素型 EXP 関数の性能は今後向上される予定。

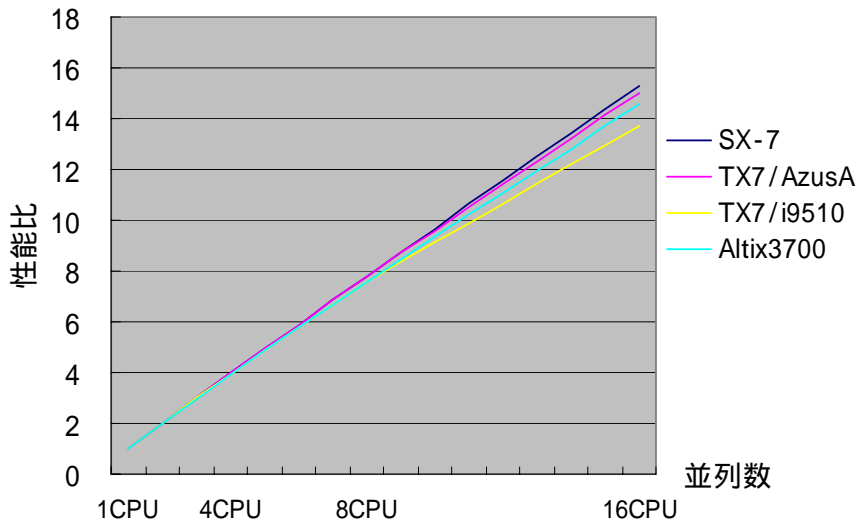


図 1 2 並列時の性能向上

3.3. 二次元混合火炎の不安定性の解析

図 1 3 は TX7/AzusA の実効性能を 1 としたときの各コンピュータの実効性能比である。図 1 4 は各コンピュータの実行効率を示したものである。

図 1 3 の 1CPU での比較では、SX-7 は TX7/i9510 と Altix3700 の 10 倍から 13 倍の性能である。16CPU では、SX-7 は TX7/i9510 の 30 倍、Altix3700 の 25 倍である。図 1 4 の実行効率では SX-7 は 43%、TX7/i9510 は 4.5%、Altix3700 は 5.7%である。

SX-7 においてベクトル化率とベクトル長はそれぞれ 99.3%と 179.1 であった。メモリから CPU へのデータ供給においては、バンク競合はほとんど発生していない。このことから、本プログラムはベクトル処理により効率よく実行され、SX-7 において高い実効性能を得ることができる。

本プログラムは一部の配列データに対し不連続なアクセスを行っており、TX7/i9510、Altix3700 とともに 1CPU 実行においてキャッシュヒット率 96%、実行時間の 83%がメモリアクセス時間であった。また、積和演算命令がほとんど利用できないプログラム構造にもなっている。このため、TX7/i9510 の実行効率が 2%以下となり、Altix3700 でも同様な結果が得られている。

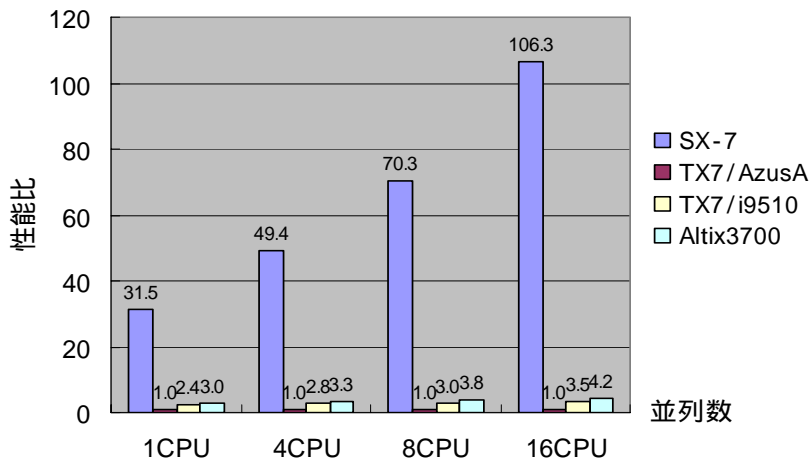


図 1 3 TX7/AzusA を 1 とした時の性能比

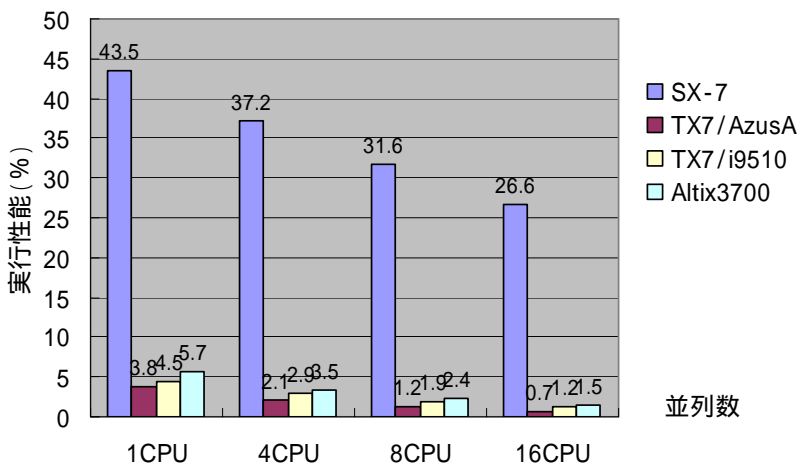


図 1 4 実行効率

図 1 5 は各コンピュータの 1CPU の実効性能を 1 とした時の並列性能の向上比を示したものである。本プログラムの並列化率は 93%であった。SX-7 は並列化率 93%のスケールでほぼ性能が伸びている。スカラ並列型コンピュータは 4CPU ですでに性能が伸びていない。図 1 6 に示すように並列化を行ってもメモリアクセス時間は減少していないことがわかる (Altix3700 も同様であった)。これは、本プログラムの構造から並列化を行うとセル間のデータ転送が多くなり、メモリアクセス時間が増加するからである。

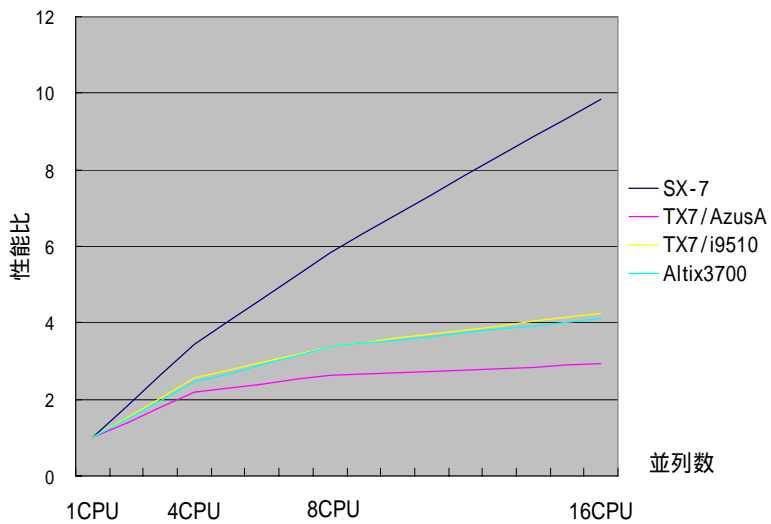


図 1 5 並列時の性能向上比

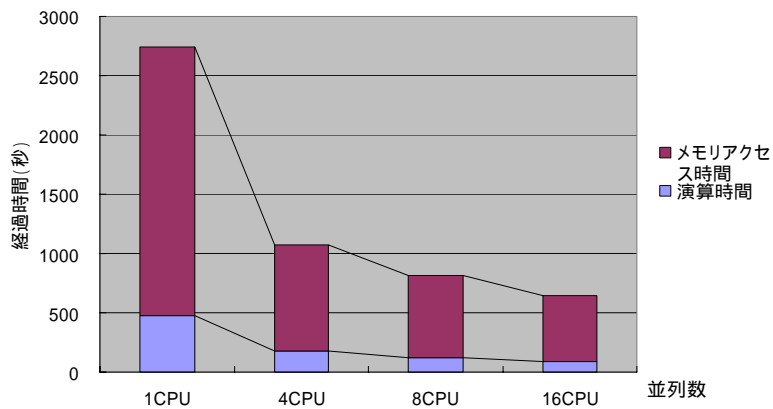


図 1 6 TX7/i9510 演算時間とメモリアクセス時間

3.4. 非定常剥離流れの熱伝導解析

図 1 7 は TX7/AzusA の実効性能を 1 としたときの各コンピュータの実効性能比である。図 1 8 は各コンピュータの実行効率を示したものである。

図 1 7 の 1CPU での比較では、SX-7 は TX7/i9510 と Altix3700 の 1.4 倍程度の性能である。16CPU では、SX-7 は TX7/i9510 の 35 倍、Altix3700 の 13 倍の性能である。図 1 8 の実行効率では SX-7 は 48%、TX7/i9510 は 4.9%、Altix3700 は 4.6% である。

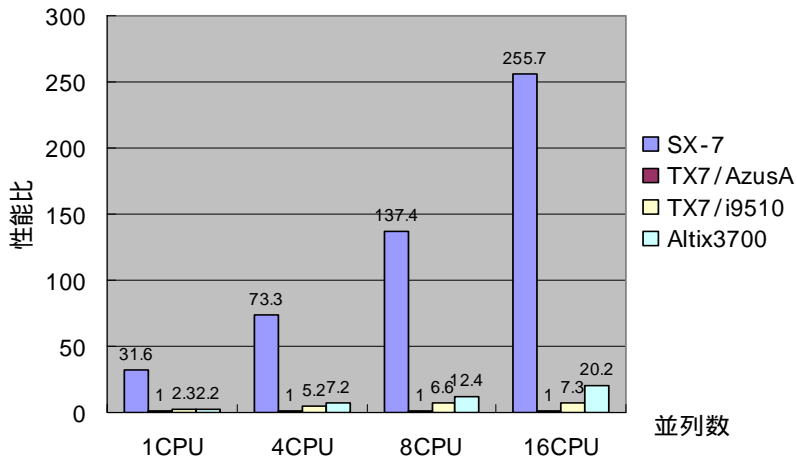


図 1 7 TX7/AzusA を 1 とした時の性能比

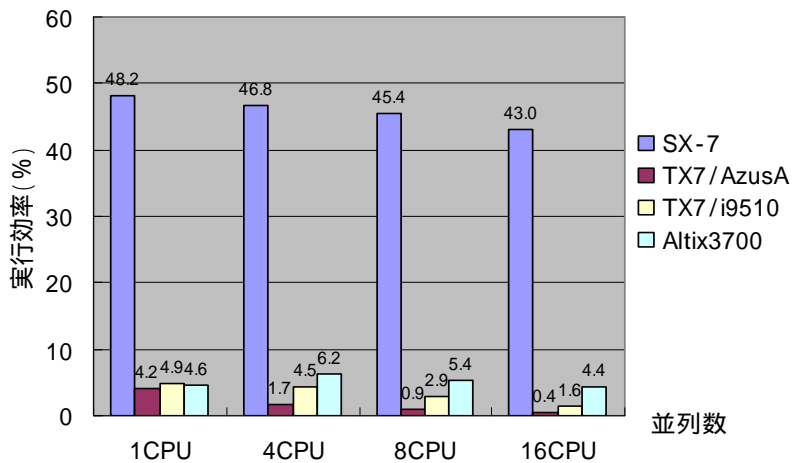


図 1 8 実行効率

SX-7 においてベクトル化率とベクトル長はそれぞれ 99.3%と 192.9 であった。メモリから CPU へのデータ供給においては、バンク競合が全経過時間の 10%程度発生していた。これは配列要素の飛びアクセスを行っているからである。しかし、本プログラムはループアンローリングの手法を利用し、メモリアクセスの負荷を軽減する工夫も行われ、ベクトル処理を効率よく実行している。

TX7/i9510, Altix3700 では配列要素の飛びアクセスのため、1CPU 実行におけるキャッシュヒット率は 93%であり、メモリアクセス時間は実行時間の 86%であった。また、積和演算命令がほとんど利用できないプログラム構造にもなっている。このような理由から、TX7/i9510 と Altix3700 で実行効率が 5%以下となっていると思われる。

図 1 9 は各コンピュータの 1CPU の実効性能を 1 とした時の並列性能の向上比を示したものである。本プログラムの並列化率は 98%であった。SX-7 はスケラブル

に性能が伸びている．TX7/i9510 は 4CPU までスケラブルに性能が伸びているが，その後頭打ちになっている．TX7/i9510 で性能が向上しないのは，図 2 0 に示したよ

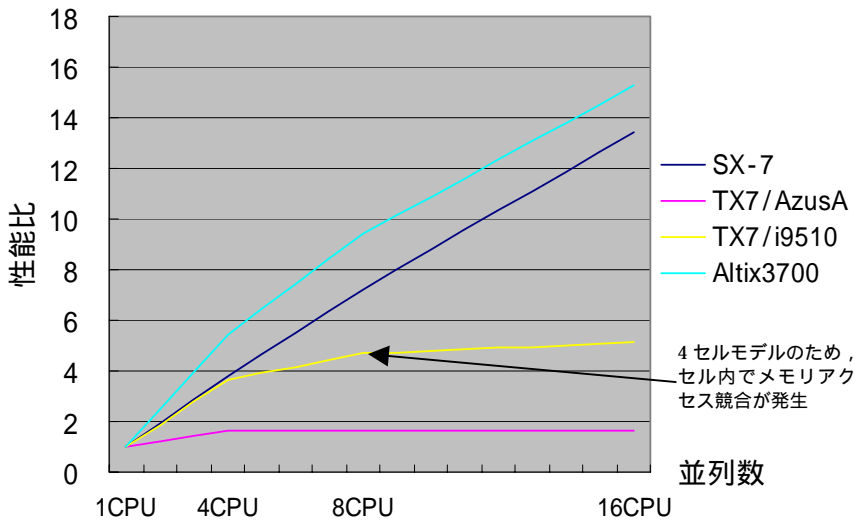


図 1 9 並列時の性能向上比

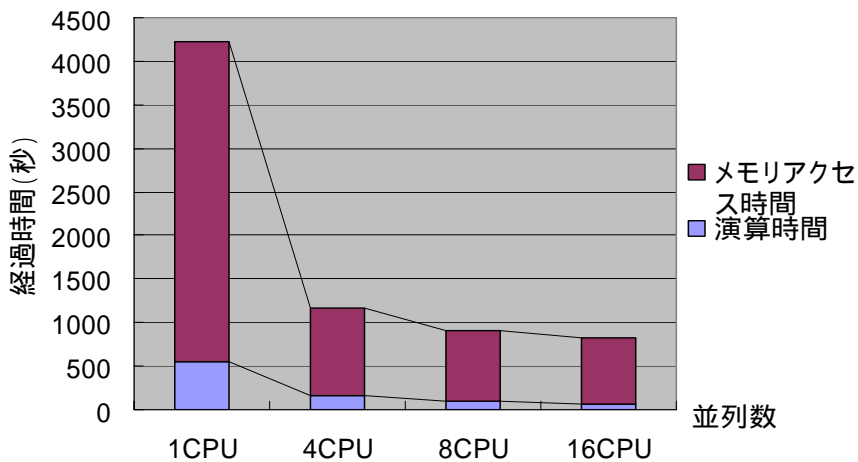


図 2 0 TX7/i9510 演算時間とメモリアクセス時間

うに並列実行をしてもメモリアクセス時間が減少しないためである．これは，今回使用した TX7/i9510 が 4 セルからなるモデルであり，8CPU 以上の実行では，各セルで複数 CPU を同時に実行するため，セル内のバスにおいてアクセス競合が発生したためである．Altix3700 では，並列化によりスーパスケラビリティが得られている．このスーパスケラビリティは，図 2 1 に示したように並列実行によりメモリアクセス時間が台数効果以上に減少したためである．これは，並列化を行うことで各 CPU で実行されるプログラムのワーキングセットサイズが減少し，また，Altix3700 と TX7/i9510 のキャッシュ制御方式が異なることから，Altix3700 のみキャッシュ効果が向上したためと思われる．

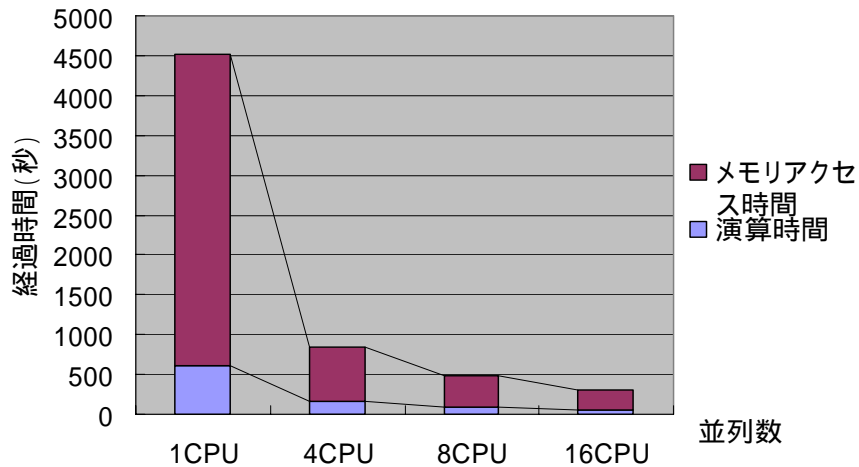


図 2 1 Altix3700 演算時間とメモリアクセス時間

3.5. プレート境界面上における滑りシミュレーション

図 2 2 は TX7/AzusA の実効性能を 1 としたときの各コンピュータの実効性能比である。図 2 3 は各コンピュータの実行効率を示したものである。

図 2 2 の 1CPU での比較では、SX-7 は TX7/i9510 の 12 倍、Altix3700 の 9 倍の性能である。16CPU では、SX-7 は TX7/i9510 の 30 倍、Altix3700 の約 18 倍の性能である。図 2 3 の実行効率では SX-7 は 90%、TX7/i9510 は 10.2%、Altix3700 は 13.5% である。

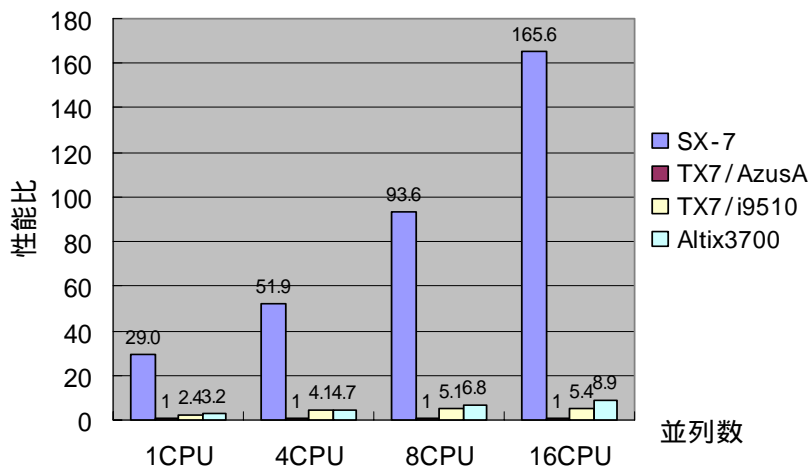


図 2 2 TX7/AzusA を 1 とした時の性能

SX-7 においてベクトル化率と平均ベクトル長はそれぞれ 99.5% と 255.5 であった。本プログラムが実行効率 78% から 90% を達成しているのは、本プログラムの全演算の 99% が総和演算と行列積演算であり、これら演算を SX-7 の高速ライブラリによって実行されているからである。

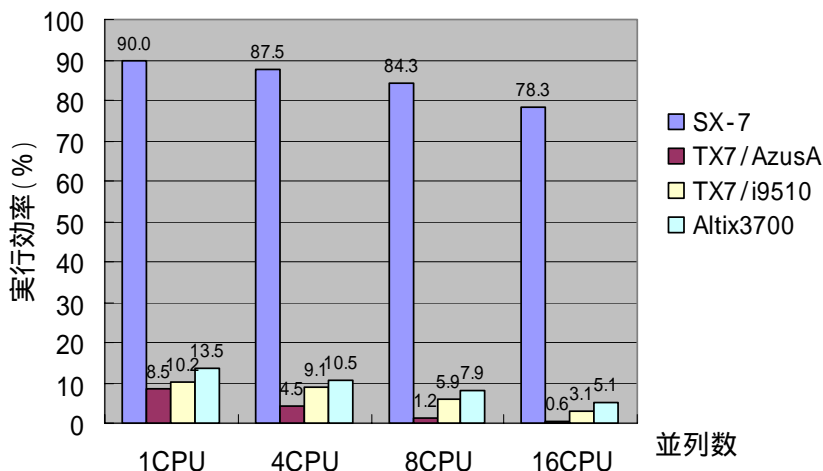


図 2 3 実行効率

本プログラムでは、TX7/i9510 の 1CPU 実行においてキャッシュヒット率は 94%、実行時間の 65%がメモリアクセス時間であった。Altix3700 では、キャッシュヒット率 95%、実行時間の 54%がメモリアクセス時間であった。また、総和計算が多く、積和演算命令がほとんど利用されていない。

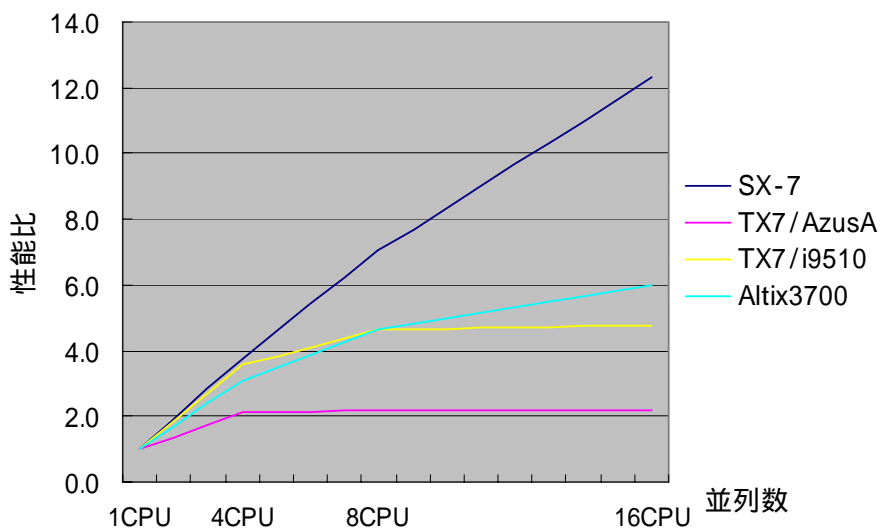


図 2 4 並列時の性能向上

図 2 4 は各コンピュータの 1CPU の実効性能を 1 とした時の並列性能の向上比を示したものである。本プログラムの並列化率は 98%であった。SX-7 はスケラブルに性能が伸びている。TX7/i9510 と Altix3700 は 4CPU までスケラブルに性能が伸びているが、その後頭打ちになっている。図 2 5 と図 2 6 に TX7/i9510 と Altix3700

の演算時間とメモリアクセス時間を示した。図 2 5 から TX7/i9510 は 8CPU 以上でメモリアクセス時間が減少していないことがわかる。また図 2 6 から Altix3700 は、

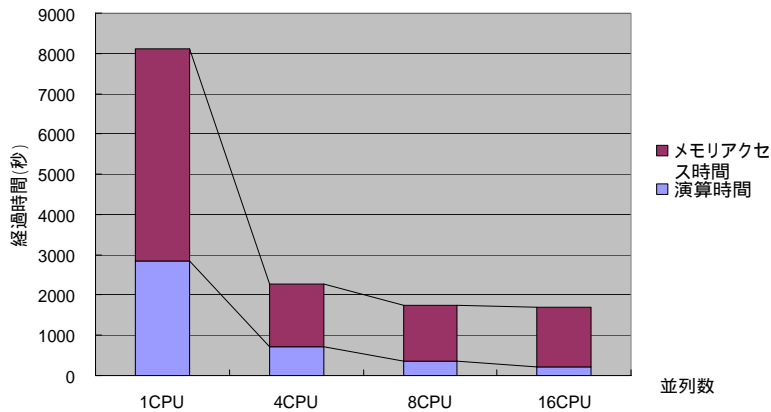


図 2 5 TX7/i9510 演算時間とメモリアクセス時間

TX7 に比べ 1CPU から 4CPU でのメモリアクセス時間の短縮は大きくないが、16CPU までメモリアクセス時間が減少していることがわかる。

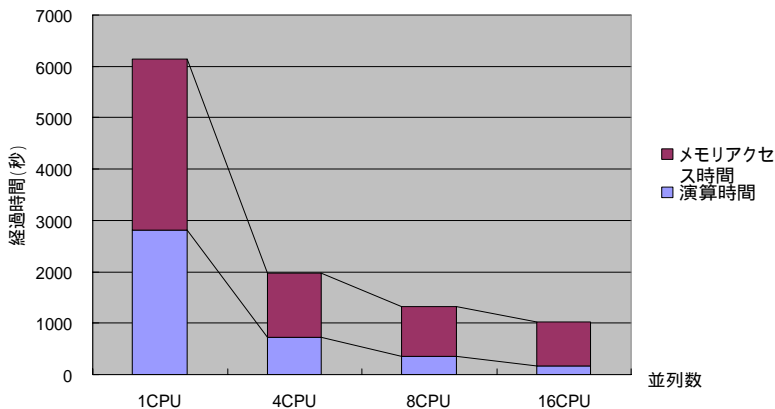


図 2 6 Altix3700 演算時間とメモリアクセス時間

3.6. 総合比較

図 2 7 は性能評価に用いたプログラム 5 本の測定結果をまとめたものである。SX-7 が 40%以上の実行効率を有し、スカラ並列型コンピュータは 14%以下の実行効率であることがわかる。

SX-7 とスカラ並列型コンピュータの実行効率の違いはメモリ転送能力の違いである。表 3 に SX-7 と TX7/i9510, Altix3700 の 1CPU で実行した場合のメモリアクセス時間の比較を示す。この表の倍率は SX7 のメモリアクセス時間との比である。この表から SX-7 のメモリ転送能力の高さがわかる。図 2 8 は SX-7, TX7/i9510, Altix3700 の 1CPU の処理時間に対するメモリアクセス時間の割合を示したものである。TX7/i9510, Altix3700 では処理時間の大半がメモリアクセス時間に費やされていることがわかる。図 2 9 は、TX7/i9510 と Altix3700 の処理時間におけるメモリア

クセス時間の割合と実行効率をプロットしたものである。この図からメモリアクセス時間の割合と実行効率に相関関係があることがわかる。メモリアクセス時間の割合が高いプログラムは実効性能が低く、逆にメモリアクセス時間の割合が低いプログラムは実効性能が高くなっている。プログラムを効率的に実行するためには、メモリ転送が重要な要素になっていることがわかる。

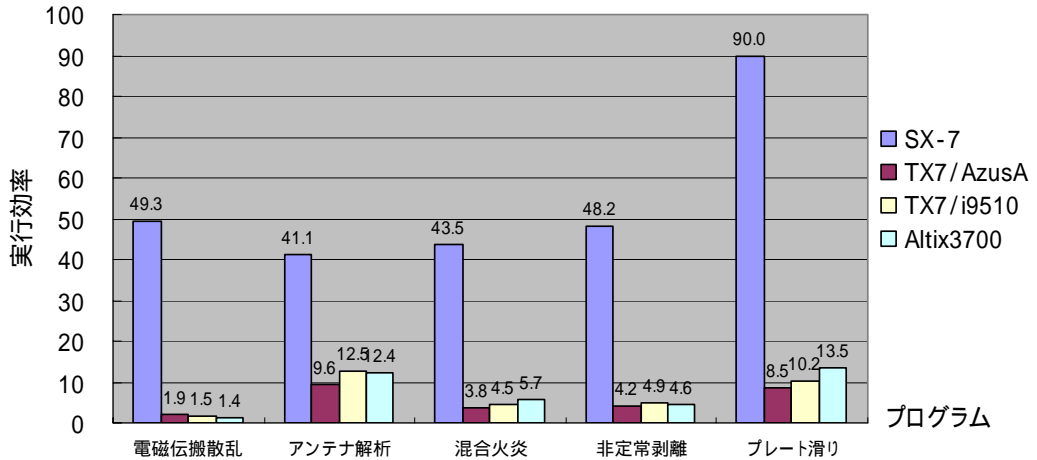


図 2.7 1CPU での実行効率

表 3 メモリアクセス時間

	電磁伝搬散乱	アンテナ解析	混合火炎	非正常剥離	プレート滑り
SX-7 (秒)	51	11	35	66	14
TX7/i9510(秒)	23804	632	2268	3673	5272
倍率	470	58	65	56	389
TX7/i9510(秒)	26319	612	1745	3910	3323
倍率	520	56	50	59	245

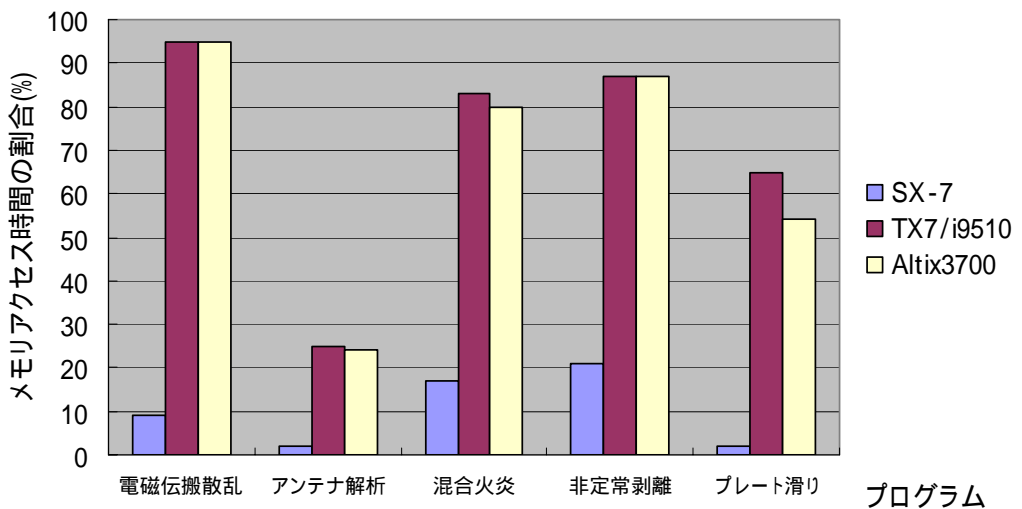


図 2.8 1CPU におけるメモリアクセス時間の割合

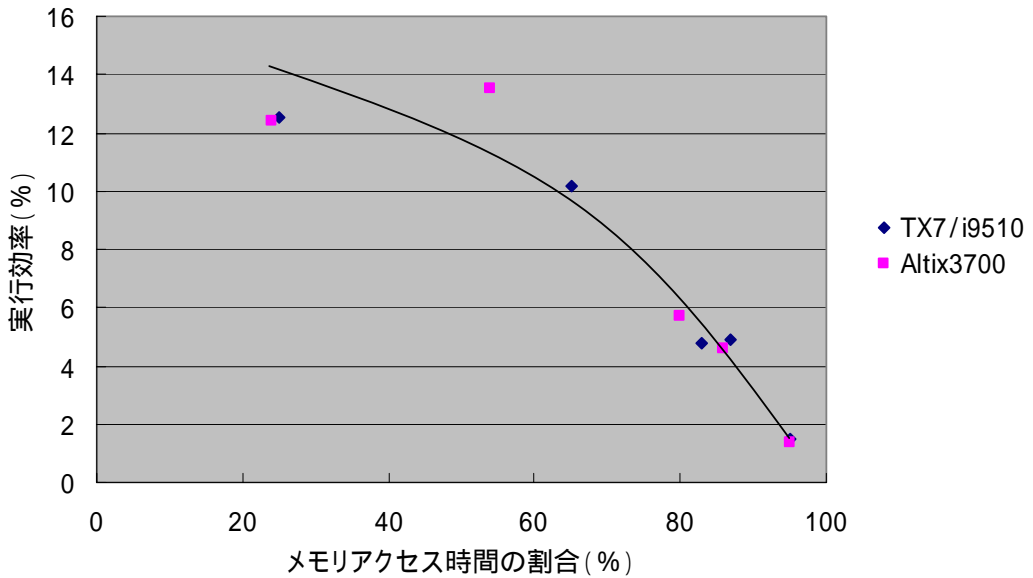


図 2 9 1CPU における実行効率とメモリアクセスの相関

スカラ並列型コンピュータのメモリ転送は、キャッシュを効率的に利用しているかで決まる。図 3 0 は、TX7/i9510 と Altix3700 の 1CPU 実行における、キャッシュヒット率とメモリアクセス時間の割合をプロットしたものである。この図からキャッシュヒット率が 95%程度あったとしてもメモリアクセス時間の割合は 50%以上となる。キャッシュの効果が十分にあらわれるのは、キャッシュヒット率が限りなく 100%に近づいたときである。

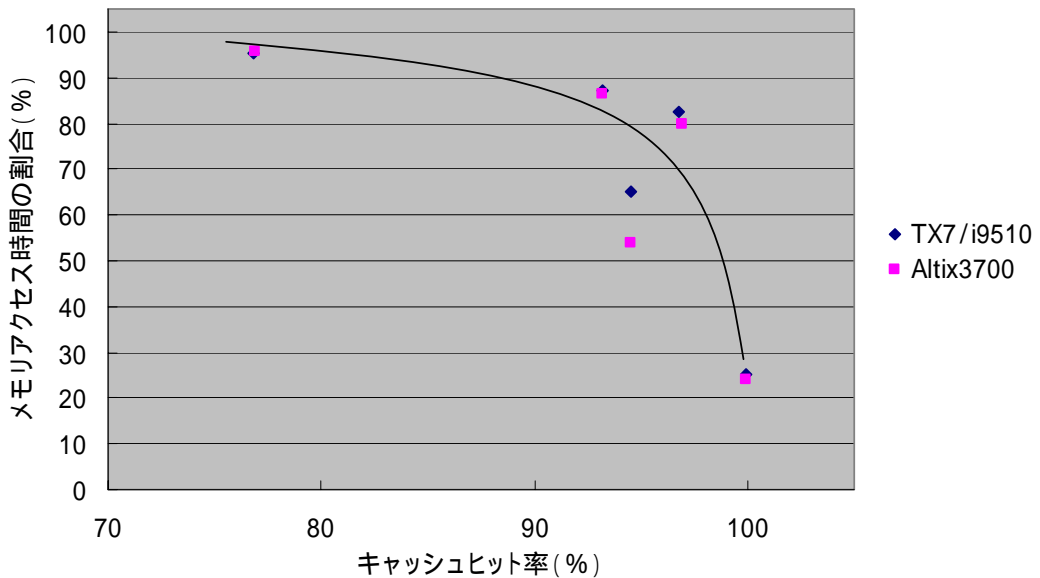


図 3 0 キャッシュヒット率とメモリアクセス時間の相関関係

図 3 1 は、16CPU における並列性能向上比（対 1CPU）をまとめたものである。電磁伝搬拡散と非定常剥離の 2 つのプログラムで TX7 と Altix3700 で性能向上の倍率が大きく異なることがわかる。これは TX7 と Altix3700 で同じ Itanium2 の CPU を使用しているが、システム構成が異なるためである。システム構成の違いとして、TX7 ではセル内のバスに 4CPU を接続し、Altix3700 は 2CPU までである。TX7 はセル内の 4CPU から同時にメモリアクセスを行うと Altix3700 に比べバスが飽和しやすい。そのためメモリアクセス時間が伸び、並列処理効果が得られないのである。コンピュータのメモリ転送能力は、1CPU におけるメモリバンド幅だけでなく、システム構成全体で考えなければならない。

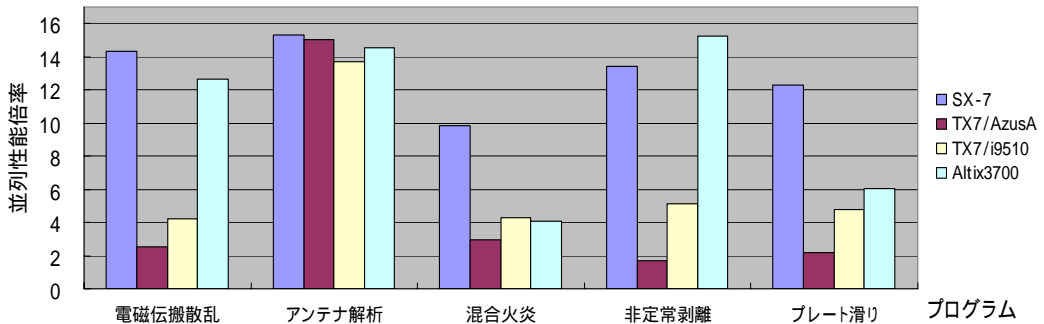


図 3 1 16CPU における性能倍率

4. まとめ

本稿では、電磁解析、流体、地殻と 3 分野 5 プログラムの性能評価を実施した。その結果、メモリ転送能力の高いベクトル並列型コンピュータは実行効率が高いことが示された。スカラ並列型コンピュータはメモリ転送能力が低く、ほとんどの処理時間がメモリアクセス時間に費やしていることがわかった。また、ベクトル並列型コンピュータではプログラムのベクトル化を行う必要があるが、スカラ並列型コンピュータでもソフトウェアパイプライン化や積和演算化を行わなければ高速に実行できないことも判明した。

謝辞

本プログラム評価において快くプログラム提供を行っていただきました、東北大学東北アジア研究センター佐藤研究室、東北大学大学院理学研究科地震・噴火予知研究観測センター長谷川研究室、東北大学工学研究科航空宇宙工学専攻升谷研究室、東北大学工学研究科電気通信工学専攻澤谷研究室、東北大学工学研究科機械システムデザイン工学専攻太田研究室に感謝いたします。

参考文献

- [1] 小林広明, 滝沢寛之, 小久保達信, 岡部公起, 伊藤英一, 小林義昭, 浅見暁, 小林一夫, 後藤記一, 片海健亮, 深田大輔:「HPC チャレンジでの SX システムの性能評価」東北大学情報シナジーセンター大規模科学計算システム広報 SENAC, Vol.38, No.1, pp.5-28, 2005.
- [2] 佐藤源之, 小林敬生:「地雷探知地下探査レーダ設計最適化のための不均質媒体中における電磁波伝搬・散乱の研究」
東北大学大規模科学計算システム利用者成果ポスター集
<http://www.cc.tohoku.ac.jp/refer/poster/SX-7-2.pdf>
- [3] 宇野亨:「FDTD 法による電磁界およびアンテナ解析」コロナ社 1998 年
- [4] 東北大学大学院工学研究科電気・通信工学専攻澤谷研究室:
「スーパーコンピュータを用いた電磁界, アンテナの解析と設計」
東北大学大規模科学計算システム利用者成果ポスター集
<http://www.cc.tohoku.ac.jp/refer/poster/sawaya.pdf>
- [5] 東北大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻 升谷・滝田研究室:
「燃焼流のシミュレーション」
東北大学大規模科学計算システム利用者成果ポスター集
<http://www.cc.tohoku.ac.jp/refer/poster/masuya-takita.pdf>
- [6] 東北大学大学院工学研究科機械システムデザイン工学専攻
太田研究室ホームページ
<http://www.mech.tohoku.ac.jp/mech-labs/ota/index-j.html>
- [7] 東北大学大学院理学研究科地震・噴火予知研究観測センター:
「プレート境界上におけるすべりの数値シミュレーション」
<http://www.cc.tohoku.ac.jp/refer/poster/2004-ariyoshi-hasegawa.pdf>
- [8] 西川岳:「スーパーコンピュータ SX-7 ハードウェア」
東北大学情報シナジーセンター広報 SENAC Vol.35 No.3(2002.10)
- [9] 鈴木重信, 高木均, 横山淳:「汎用コンピュータシステム TX7/Azusa」
東北大学情報シナジーセンター広報 SENAC Vol.34 No.3(2001.12)
- [10] 左近彰一:「TX7/Azusa Fortran プログラムの高速化技法」
http://www.cc.tohoku.ac.jp/refer/pdf_data/v35-2p9-15.pdf
- [11] TX7/i9000 シリーズ: <http://www.sw.nec.co.jp/hpc/tx7/i9000.html>
- [12] SGI Altix3700 システム概要:
http://www.sgi.co.jp/products/pdf/SGI_Altix_Introduction_public_0715.pdf