

GeoFEM ベンチマークによる Hitachi SR11000/J1 および IBM p5-595 のノード性能評価

中島 研吾^{†,††}

Hitachi SR11000/J1 と IBM p5-595 は、いずれも IBM POWER5 プロセッサ (1.90 GHz) に基づく SMP クラスタ型の並列計算機である。本研究では、並列有限要素法コード GeoFEM に基づく様々なベンチマークを各計算機の 1 ノード (8 コア) を使って実施し、性能を比較した。各コア間通信に MPI を適用した場合と OpenMP によってノード内を並列化した場合についても比較を実施した。両機種とも、似通った性能を示すが、Hitachi SR11000/J1 はキャッシュへのデータプリフェッチをパイプライン的に実施することで擬似ベクトル処理を実現し、問題サイズが増加しても性能の低下が少なく抑えられている。

Single node performance of Hitachi SR11000/J1 and IBM p5-595 using GeoFEM benchmarks

KENGO NAKAJIMA^{†,††}

Hitachi SR11000/J1 and IBM p5-595 are SMP cluster architectures based on IBM POWER5 processor (1.9GHz). In this study, performance of each architecture on a single node performance with eight processor cores has been evaluated through various types of benchmarks based on GeoFEM, which is a parallel finite-element code. Both of MPI and OpenMP are applied for parallel processing. Pseudo vector processing of Hitachi SR11000/J1 through pipelined data pre-fetching on to cache, provides almost constant performance, even if the size of problem is large.

1. はじめに

近年ハードウェア技術の発展によって、単一のメモリに多くのプロセッサが効率的にアクセスすることが可能となり SMP (Symmetric Multiprocessor) のクラスタによる並列計算機が数多く開発されている。米国エネルギー省の ASC 計画 (Advanced Simulation & Computing) [1], 「地球シミュレータ」[2] などのテラフロップスクラスの超並列計算機はすべてこのアーキテクチャによっている。

Hitachi SR11000/J1 (以下 SR11000/J1) [3] と IBM p5-595 (以下 p5-595) [4] は、いずれも IBM POWER5 プロセッサ (1.90 GHz) に基づく SMP クラスタ型の並列計算機である。本研究では、並列有限要素法コード GeoFEM に基づく様々なベンチマークを、それぞれの計算機の 8 個のプロセッサコア (以下 コア) から構成されるノードを使って実施し、性能を評価した。各コア間通信に MPI を適用した場合と OpenMP によってノード内を並列化した場合について比較を実施する。先行機種である、Hitachi SR8000, IBM SP-3 との比較も実施する。以下、第 2 章では利用するハードウェア環境、第 3 章で GeoFEM ベンチマークの概要を紹介し、第 4 章で性能評価結果について説明し、第 5 章で本稿をまとめる。

2. ハードウェア環境

(1) 利用環境

SR11000/J1 および p5-595 では、2 つの POWER5 コア (1.9GHz, ピーク性能 7.6GFLOPS) によって POWER5 チップが構成されている。各コアは 32KB の L1 キャッシュを持ち、L2 キャッシュ、L3 キャッシュは各チップ内で 2 つのコアに共有されており、サイズはそれぞれ 1.875MB, 36MB である [3,4,5]。チップ内にはメモリコントローラが内蔵されており、高速で信頼性の高いメモリへのアクセスが可能となっている。4 つのチップ、すなわち 8 つのコアからモジュール (Multi Chip Module, MCM) が構成される。2 つの MCM から構成される 16-way のユニット (Fig.1) をプロセッサブックと呼んでいる。

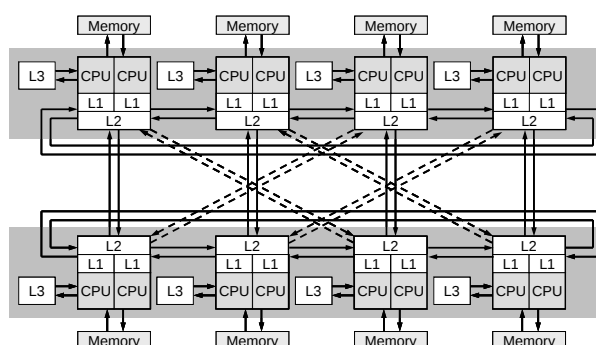


Fig.1 Node (or processor book) architecture of Hitachi SR11000/J1 and IBM p5-595. Dashed lines are extra lines for connecting Multi Core Modules of Hitachi SR11000/J1 with 16 processors on an SMP node [5].

[†] 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻
Department of Earth and Planetary Science,
The University of Tokyo.

^{††} 科学技術振興機構 CREST
CREST, Japan Science and Technology Agency (JST)

SR11000/J1 では、このプロセッサブックが 1 SMP ノードを構成する。本研究で利用する東京大学情報基盤センターのシステムはこの 1 ノードを 2 ノードに論理分割して使用しており、各ノードは 8-way の SMP ノードとみなすことができる〔6〕。p5-595 はプロセッサブック 4 個を結合し、最大 64-way の SMP として利用することが可能である。本研究で利用する九州大学情報基盤センター〔7〕のシステムは、64-way のシステムをネットワークで結合したものである。本研究では 8 個のコアから構成される MCM を 1 ノードとみなして計算を実施した (Table 1)。

(2) 擬似ベクトル処理 (PVP) 等

POWER5 は大容量のキャッシュを搭載しているが、広範囲なアプリケーションで高性能を実現するためには、メモリ上の大規模データへのアクセス機能を高める必要がある。SR11000/J1 ではこのために擬似ベクトル処理 (Pseudo Vector Processing, PVP) を採用している。PVP はメモリからデータをパイプライン的にキャッシュへプリフェッチすることで、メモリレイテンシを隠蔽し、メモリ上の大規模データを演算ユニットへ高速に供給する〔5〕。POWER5 はハードウェアによるプリフェッチをサポートしているが、ハードウェア資源の制約により、プリフェッチ可能なストリーム数に上限がある。SR11000/J1 では更にコンパイラによるソフトウェアアシストプリフェッチがサポートされており、PVP における安定した高いメモリアクセス性能が実現されている〔5〕。

(3) 比較のための計算環境

本研究では、SR11000/J1, p5-595 の他、Table 1 に示す SMP クラスタ型並列計算機での評価結果との比較を実施した。

Hitachi SR8000/G1 (東京大学情報基盤センター、以下 SR8000/G1)〔6〕の各プロセッサ (Processing Element, PE) は IBM PowerPC に基づくスカラープロセッサであるが、キャッシュへのプリフェッチのほか、レジスタへのプリロードを考慮した PVP により、ベクトル機向けに開発されたプログラムも高い性能を出すことが可能である〔3,8〕。

IBM SP-3 (米国 Lawrence Berkeley National Laboratory、以下 SP-3)〔9〕は IBM POWER3 に基づいたスカラーシステムであり、各 SMP ノードは 16 個の PE から構成されているが、このうち 8 個の PE のみを使用している。各 PE は 64KB の L1 キャッシュと 8MB の L2 キャッシュをそれぞれ独立に持っている。

Table 1 に、Hitachi SR11000/J1, IBM p5-595 も含め、各計算機のノードの諸元を示す。

Table 1 Architectural highlights of Hitachi SR11000/J1, Hitachi SR8000, IBM p5-595 and IBM SP-3 platforms

	Hitachi SR11000/J1 IBM p5-595 [3,4,5,6,7]	Hitachi SR8000/G1 [6]	IBM SP-3 [9]
PE architecture	POWER5	PowerPC based	POWER3
PE#/node	8, 16-64	8	16
Clock rate (MHz)	1,900	450	375
GFLOPS/PE	7.60	1.80	1.50
Memory BW (GB/s.)	6.2	4	1

3. GeoFEM ベンチマーク

(1) 概要

本研究では GeoFEM プロジェクト〔10〕で開発された並列有限要素法アプリケーションを元に整備した性能評価のためのベンチマークプログラム群〔8, 11〕を使用した。有限要素法は間接参照を多く含むため、メモリに対する負担が大きいアプリケーションである。

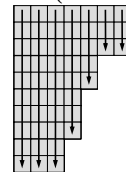
GeoFEM ベンチマークは、三次元弾性問題 (Cube 型モデル, PGA モデル)、三次元接触問題、二重球殻間領域三次元ボアソン方程式、に関する並列前処理付き反復法ソルバーの実行時性能 (GFLOPS 値) を様々な条件下で計測するものである。プログラムは全て OpenMP ディレクティブを含む FORTRAN90 および MPI で記述されている。

各ベンチマークプログラムでは、GeoFEM で採用されている局所分散データ構造〔10〕を使用しており、マルチカラー法に基づくオーダリング手法によりベクトルプロセッサ, SMP 並列計算において高い性能が発揮できるように最適化されている。また、MPI, OpenMP, Hybrid (OpenMP + MPI) の全ての環境で稼動し、SMP クラスタの性能評価に適している。の Cube 型は任意の問題サイズで任意の PE 数を使用したベンチマークテストが可能である〔8〕。

様々なハードウェアに対応可能なように、連立一次方程式の係数マトリクスの格納法として Fig.2 に示す 2 種類の方法が準備されている。ベクトルプロセッサ向けには、長いループ長が得られるように Fig.2(a) に示す Descending order Jagged Diagonal Storage (DJDS) 法を採用している〔8,11〕。スカラープロセッサ向けには非対角成分の走査方向を変えた Descending order Compressed Row Storage (DCRS) (Fig.2(b)) を利用可能である。DCRS では最内ループ長が短くなるが、最内ループにおけるデータの局所性を保つことが可能であり、キャッシュの有効利用に適している〔8,11〕。

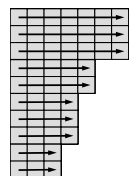
以下に各ベンチマーク問題と、SR8000/G1, SP-3 での結果の傾向について説明する〔8,11〕。

(a) DJDS (Descending-order Jagged Diagonal Storage)



```
do j= 1, NJmax
  do i= 1, Imax(j)
    k= (j-1)*N+i; kk=IA(k)
    Y(i) = Y(i) +A(k)*X(kk)
    ...
  enddo
enddo
```

(b) CRS (Compressed Row Storage)



```
do i= 1, N
  do k= IND(i-1)+1, IND(i)
    kk=IA(k)
    Y(i) = Y(i) +A(k)*X(kk)
    ...
  enddo
enddo
```

Fig.2 Storage scheme and loop organization for matrix operation

(2) 三次元弾性問題

三次元弾性問題の対象は、単純形状 (Cube 型) モデル〔8,11〕と Fig.3 に示すような PC のマイクロプロセッサの Pin Grid Array (PGA) を模擬したモデルである。いずれも、三次元弾性問題を局所不完全コレスキー分解付き共役勾配法 (局所 ICCG 法) により解く

〔8,10,11〕。Cube 型モデルは任意の問題サイズ、領域数でのベンチマークを実施可能である。PGA モデルは問題規模が固定されており（1,012,354 節点、3,037,062 自由度（DOF））、マルチカラーの色数の効果、OpenMP と MPI（8 領域）の比較検討に使用される。

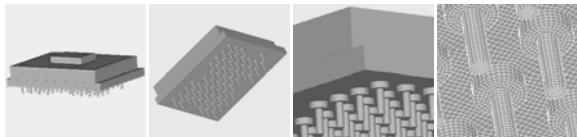


Fig.3 Micro PGA model for 3D linear elastic analysis. 956,128 elements, 1,012,354 nodes (3,037,062 DOF) [8,11].

Fig.4 は、Cube 型モデルの SR8000/G1、SP-3 において、色数 = 100 または最内ループ長 > 256 とした実行例である〔8〕。SR8000/G1 ではレジスタへのプリロードによる擬似ベクトルの効果が高く、ベクトル機と同様に問題サイズが大きくなりループ長が大きくなると、性能も向上する。ループ長を長くとれる DJDS（●）が DCRS（■□）よりも性能が高い。SP-3 では L2 キャッシュの効果により、問題サイズが小さい場合に性能が高い。DJDS と DCRS、MPI と OpenMP の違いは少ないが、特に問題サイズが小さい場合は、キャッシュを有効利用できる手法（DCRS、MPI）の性能が高い〔8〕。

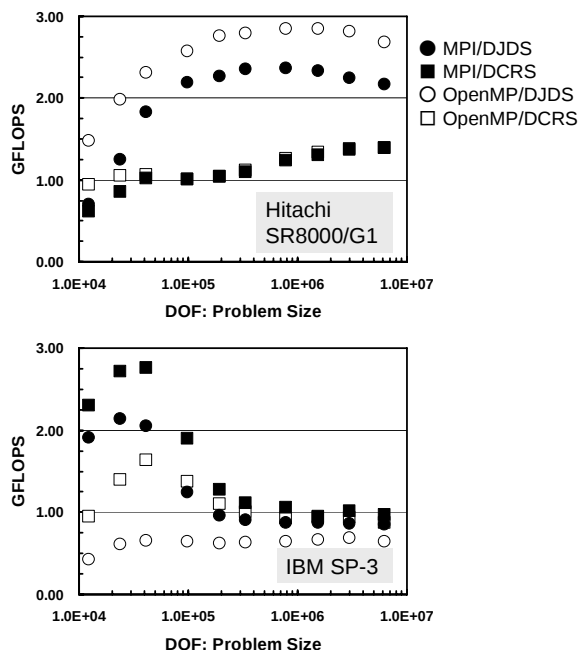


Fig. 4. Effect of coefficient matrix storage method and MPI/OpenMP on 8 PE's of Hitachi SR8000/G1 and IBM SP-3 for the 3D linear elastic problem of cube model with various problem sizes (100 colors).

Fig.5 は PGA モデルの SP-3 での実行例である。キャッシュを有効利用できる手法（DCRS、MPI）の性能が高い（■ > ● > □ > ○）。マルチカラーオーダリングに基づく反復解法では、色数を増加させることによって反復回数は減少するが、ループ長が短くなるためベクトルプロセッサにおける性能は低下する〔8,11〕。スカラープロセッサにおいては色数の性能に対する影

響は顕著ではないが、DJDS を採用すると、Fig.5 に示すように色数が増加するほど性能は向上する。これは、Fig.2(a)における最内ループが色数増加とともに短くなり、データの局所性が増大し、キャッシュがより有効に利用されるためと考えられる〔8,11〕。OpenMP の場合（○□）は DJDS、DCRS に関わらず色数が増加すると、IC(0)前処理の前進後退代入処理における OpenMP のオーバーヘッド（Fig.6 参照）により性能が低下する〔8,11〕。

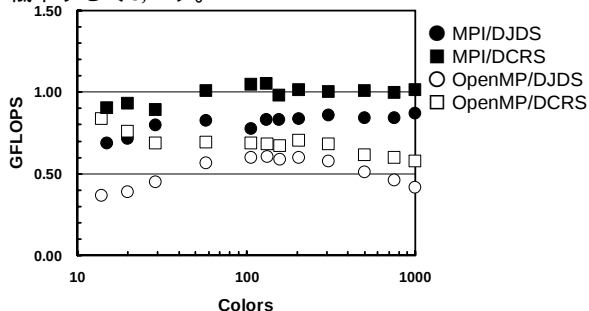


Fig.5 Effect of color number, coefficient matrix storage method and MPI/OpenMP on 8 PE's of IBM SP-3 for the 3D linear elastic problem of PGA model with 3,037,062 DOF.

```

do iv= 1, NColors
  !Somp parallel do private (iv0,j,iS,iE... etc.)
  do ip= 1, PEmpTOT
    iv0= STACKmc(PEmpTOT*(iv-1)+ip- 1)
    do j= 1, NLhyp(iv)
      iS= INL(npLX1*(iv-1)+PEmpTOT*(j-1)+ip-1)
      iE= INL(npLX1*(iv-1)+PEmpTOT*(j-1)+ip )
      !CDIR NODEP
      do i= iv0+1, iv0+iE-iS
        k= i+iS - iv0
        kk= IAL(k)
        X(i)= X(i) - A(k)*X(kk)*DINV(i) etc.
      enddo
    enddo
  enddo
enddo

```

Fig.6 Forward/backward substitution procedure using OpenMP and vectorization directives during ILU(0)/IC(0) preconditioning by multicolor ordering.

（3）三次元接触問題

プレート境界の断層接触面（Fig.7）における応力蓄積と地震発生サイクルのシミュレーションを効率よく計算するために著者によって開発された、選択的ブロッキング（selective blocking）前処理〔12〕を適用した CG 法を使用する。西南日本領域を対象とした固定サイズのモデル（784,000 要素、2,471,439 DOF）を解き、マルチカラーの色数の効果、OpenMP と MPI（8 領域）の比較検討を実施する。マトリクス格納法は DJDS のみである。色数と性能の関係については三次元弾性解析（PGA モデル）と同様である〔8,11〕。

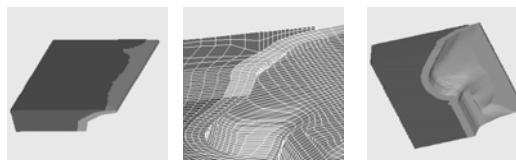


Fig.7 Description of the Southwest Japan model This model consists of crust (dark gray) and subduction plate (light gray).[4,5,6,16]

(4) 二重球殻間領域三次元ポアソン方程式

マントル対流，海洋大循環モデルなどで使用される，二重球殻間の領域における非圧縮性流体のシミュレーションにおいて得られるポアソン方程式を，Gauss-Seidel 法を緩和演算子とするマルチグリッド前処理付き CG 法で解く。空間は Fig.8 に示すように正二十面体を分割して得られる三角形を底面とする三角柱メッシュによって離散化されており，メッシュ分割のための階層構造をマルチグリッドに使用する。問題規模は，6,144,000 要素に固定されており，マルチカラーの色数の効果，OpenMP と MPI (8 領域) の比較検討を実施する。マトリクス格納法は DJDS のみである。

Fig.9 は SR8000/G1，SP-3 を使用した場合の色数と計算時間 (10 反復分) の関係である [11]。色数を増やすと，MPI ではほとんど計算時間の変化は無いが，OpenMP では色数の増加とともに計算時間が増加する。色数が 12 色と 2000 色の場合を比較すると計算時間の比は 3.90 (SP-3)，1.57 (SR8000/G1) となる。これは (2)，Fig.6 で述べた前進後退代入処理における OpenMP の同期オーバーヘッドによるものと考えられる。マルチグリッド法では，Gauss-Seidel 法による緩和計算において Fig.6 に示すのと同様な前進後退代入処理が発生するが，粗い格子上では計算量そのものが減るため，同期オーバーヘッドの影響を受けやすくなる。したがって，マルチカラーオーダリングによる ICCG 法と比較して，色数によるオーバーヘッドの増加はより顕著である。

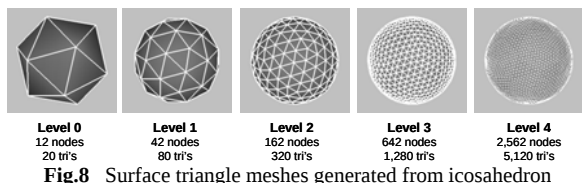


Fig.8 Surface triangle meshes generated from icosahedron

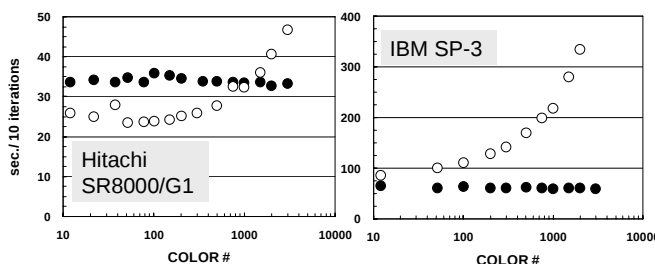


Fig.9 Effect of color number and MPI/OpenMP for elapsed time of 10 MGCG cycles on 8 PE's of Hitachi SR8000/G1 and IBM SP-3 with 6,144,000 cells (● MPI/DJDS, ○ OpenMP/DJDS)[11].

3. 計算結果

(1) 三次元弾性問題 (Cube 型モデル)

Fig.10 は SR11000/J1，p5-595 の 8 コアを使用して，様々な規模で三次元弾性解析 (Cube 型モデル，色数 = 100 または最内ループ長 > 256) を実施した場合の結果である。

コンパイルにあたっては，推奨オプションとして，SR11000/J1：「-Oss -64 -looptiling (-noparallel or -omp)」，p5-595：「-O3 -qarch=pwr5 -qtune=pwr5 (-qsmp=omp)」を使用した。他の問題についても同様である。

いずれも Fig.4 で示したスカラープロセッサの典型的な挙動を示しており，問題規模が小さい場合はキャ

ッシュを有効利用できているが，規模が大きくなると性能が低下する。MPI と (● ■) OpenMP (○ □) の性能は変わらないが，MPI の方が各チップに装着されたキャッシュを効率的に利用できるため，特に小規模問題では性能が良い。DJDS (● ○) と DCRS (■ □) についてもキャッシュを有効利用できる DCRS が若干良い [8]。SR11000/J1 と p5-595 を比較すると，問題規模が小さくキャッシュを有効利用できる場合の性能は似通っているが，規模が大きい問題では，SR11000/J1 の性能が約 2 倍大きい。これは 2. で述べた PVP が効果的に動作しているためと考えられる。SR11000/J1 ではレジスタへのブロードをサポートしていないため，Fig.4 の Hitachi SR8000/G1 の DJDS (● ○) に見られるような問題規模増加とともに性能が向上するような傾向は見られない。

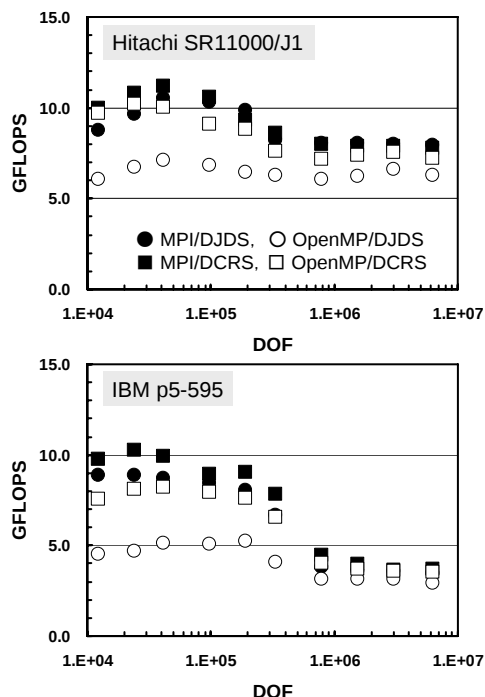


Fig. 10. Effect of coefficient matrix storage method and MPI/OpenMP on 8 cores for the 3D linear elastic problem of cube model with various problem sizes (100 colors).

文献 [5] によると SR11000/J1 の 1 ノード (16 コア) の実効メモリバンド幅は 70GB/sec 以上 (ピークは 99.2GB/sec) である。p5-595 については，STREAM ベンチマーク [13] では 64-way の結果のためのため，性能が似通っていると考えられる p5-575 の値を参考値として使用すると，16-way，8-way いずれの場合も性能は約 40GB/sec である。1 コアのメモリバンド幅に換算すると，SR11000/J1 では 4.38GB/sec 以上，p5-595 では 2.50 ~ 5.00GB/sec となる。この値と 1 コアのピーク性能 (7.6GFLOPS) から，文献 [14] に示した手法に基づき，キャッシュの効果が無いものとして推測した 1 コアあたりの性能を Table 2 に示す。SR11000/J1 の最大値は，メモリバンド幅をピーク性能 (99.2GB/sec) と仮定した場合の値である。実測性能は，Fig.10 に示した MPI/DCRS (●) のケースでキャッシュの効果が無視できる 6,291,456 DOF (786,432 DOF/PE) の場合の性能を 8 で割ったものである。実測値と予測値は比較

的よく一致しているが、SR11000/J1 での実測値は予測値の上限より 30%程度大きく、プリフェッチによる PVP の効果は大きい。Fig.11 は文献〔14〕に示した推定法に基づき、実効メモリバンド幅とピーク性能に対する比と 1 コアあたりの性能 (GFLOPS 値) の関係である。性能はメモリバンド幅にほぼ比例している。

Table 2 Estimated and measured single core performance for FEM problem on cubic geometry with 786,432 DOF/PE

	Hitachi SR11000/J1	IBM p5-595
Peak performance/core (GFLOPS)	7.60	7.60
Estimated performance (GFLOPS (% of peak))	.497-.754 (6.54-9.92)	.292-.608 (3.85-8.00)
Measured performance	.971 (12.9)	.461 (6.07)

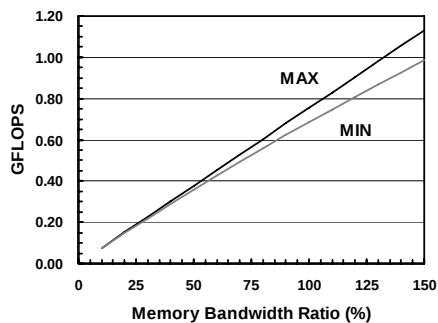


Fig. 11. Estimated single core performance of Hitachi SR11000/J1 and IBM p5-595 for the 3D linear elastic problem according to practical memory bandwidth ratio to peak performance based on the method described in [14]

(2) 三次元弾性問題 (PGA モデル)

Fig.12 は SR11000/J1, p5-595 の 8 コアを使用して、様々な色数で三次元弾性解析 (PGA モデル) を実施した場合の結果である。問題規模が 3×10^6 DOF を超えているため、PVP の効果により SR11000/J1 の性能が約 2 倍大きい。

ここでは、スカラープロセッサに特有な DCRS (■ □) > DJDS (● ○), MPI (● ■) > OpenMP (○ □) という傾向がより顕著である (全体としては、■ > ● > □ > ○)。

DCRS では色数の性能に対する影響は小さいが、DJDS では色数が増加すると、3. (2) で述べたようにキャッシュがより有効に利用できるため、性能が高くなる。この傾向は SR11000/J1 でより顕著である。MPI/DJDS (●) の性能は色数の増加によって向上し、OpenMP/DJDS (○) の場合も 300 色程度までは色数の増加によって性能が向上する。色数が 300 以上では、OpenMP のオーバーヘッドによる性能の低下〔8,11〕が見られるが、Fig.5 に示す IBM SP-3 の OpenMP/DJDS (○) の場合と比較すると低下の度合いは小さい。

(3) 三次元接触問題

Fig.13 は SR11000/J1, p5-595 の 8 コアを使用して、様々な色数で三次元接触解析を実施した場合の結果である。問題規模が 2×10^6 DOF を超えているため、PVP の効果により SR11000/J1 の性能が約 2 倍大きい。係数行列格納法としては DJDS のみ考慮した。色数の性能に対する効果は PGA の場合と同様である。

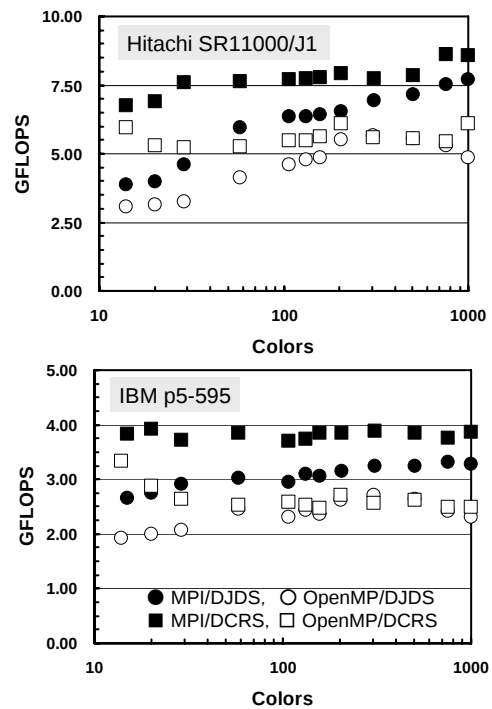


Fig.12 Effect of color number, coefficient matrix storage method and MPI/OpenMP on 8 cores for the 3D linear elastic problem of PGA model with 3,037,062 DOF.

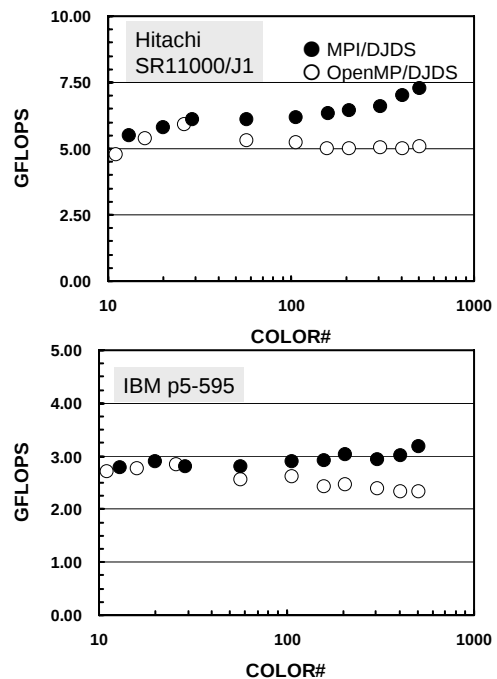


Fig.13 Effect of color number and MPI/OpenMP on 8 cores for the 3D contact problem with 2,471,439 DOF.

(4) 二重球殻間領域三次元ポアソン方程式

Fig.14 は SR11000/J1, p5-595 の 8 コアを使用して、様々な色数について、二重球殻間領域ポアソン方程式をマルチグリッド前処理付き CG 法で解いた場合の 10 反復分の計算時間である。問題規模が 6×10^6 DOF を超えているため、PVP の効果により SR11000/J1 の性能が約 2 倍大きい。係数行列格納法としては DJDS のみ考慮した。色数の性能に対する効果は PGA, 接触問題の

場合と同様である。また、Fig.9 で示した IBM SP-3 の場合とも似た傾向であるが、OpenMP を適用した場合の色数の増加による性能低下（計算時間増加）の割合が少ない。色数が 12 色と 2000 色の場合を比較すると計算時間の比はそれぞれ 1.86（SR11000/J1），1.70（p5-595）となっている。これは Fig.9 に示した SP-3（3.90）の場合と比較すると改善が見られるものの、SR8000/G1（1.57）とほぼ同じである。また、計算時間を比較すると、OpenMP/DJDS については p5-595 は SR8000/G1 とほとんど変わらないことがわかる。

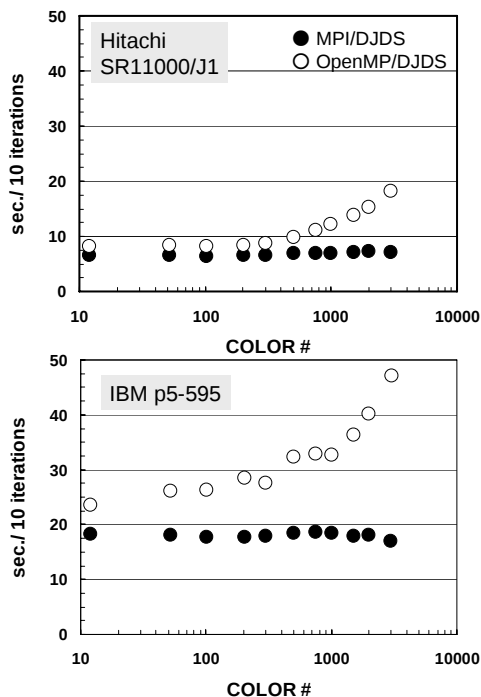


Fig.14 Effect of color number and MPI/OpenMP for elapsed time of 10 MGCG cycles on 8 cores with 6,144,000 cells.

4. まとめ

本研究では、IBM POWER5 プロセッサ（1.90 GHz）に基づく SMP クラスタ型の並列計算機である Hitachi SR11000/J と IBM p5-595 の性能評価を GeoFEM ベンチマークを使用して実施した。Hitachi SR11000/J1 および IBM p5-595 では 2 つの POWER5 コアによってチップが構成されている。本研究では 4 つのチップ、すなわち 8 つのコアから構成される MCM（Multi Chip Module）を 1 ノードとみなして、コア間の通信に MPI を適用した場合と OpenMP によって MCM 内を並列化した場合について比較を実施した。

GeoFEM ベンチマークは GeoFEM プロジェクトで開発された並列有限要素法アプリケーションを元に整備した性能評価のためのベンチマークプログラム群であり、ベクトルおよびスカラープロセッサに適した係数行列格納法（DJDS，DCRS）が準備されており、MPI，OpenMP，Hybrid などの様々な並列プログラミングモデルに対応し、SMP クラスタの性能評価に適している。

両機種ともキャッシュを搭載したスカラープロセッサ特有の挙動を示し、キャッシュを有効利用できる手法（DCRS，MPI）が高い性能を示した。両機種は似通った性能の傾向を示すが、Hitachi SR11000/J1 はキャッ

シュへのデータプリフェッチをパイプライン的に実施することで擬似ベクトル処理を実現し、問題サイズが増加しても性能の低下が抑えられている。L3 キャッシュに収まらないような大規模データ（本ベンチマークでは 8 コアについて 10^6 DOF 以上）では、Hitachi SR11000/J1 の性能は IBM p5-595 の 2 倍程度であった。

GeoFEM ベンチマークでは一部のプログラムを除いて 8 コアから構成される SMP ノードを対象としている。また主としてベクトル計算機向けの係数行列格納法が採用されている。今後、様々なアーキテクチャのハードウェアに対して柔軟に対応していくための拡張を実施していく予定である。

謝 辞

本研究は、東京大学 21 世紀 COE プログラム「多圏地球システムの進化と変動の予測可能性」、および科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業（CREST）の補助を受けている。計算機環境を提供いただいた東京大学情報基盤センター、九州大学情報基盤センターおよび Lawrence Berkeley National Laboratory に謝意を表す。貴重な助言をいただいた直野健氏（日立製作所）に謝意を表す。

参 考 文 献

- [1] ASCI: <http://www.llnl.gov/asci/>
- [2] Earth Simulator Center: <http://www.es.jamstec.go.jp/>
- [3] 日立製作所: <http://www.hitachi.co.jp/>
- [4] 日本 IBM: <http://www.ibm.com/jp/>
- [5] 青木，中村，助川，齋藤，深川，中川，五百木「スーパーテクニカルサーバーSR11000 モデル J1 のノードアーキテクチャと性能評価」，情報処理学会論文誌：コンピューティングシステム Vol.45 No.SIG12（ACS11），pp.27-36，2005．
- [6] 東京大学情報基盤センター: <http://www.cc.u-tokyo.ac.jp>
- [7] 九州大学情報基盤センター: <http://www.cc.kyushu-u.ac.jp/>
- [8] Nakajima, K. "Parallel programming models for finite-element method using preconditioned iterative solvers with multicolor ordering on various types of SMP cluster supercomputers", *IEEE Proceedings of HPC Asia 2005*, pp.83-90, 2005.
- [9] National Energy Research Scientific Computing Center, Lawrence Berkeley National Laboratory: <http://www.nersc.gov/>
- [10] GeoFEM: <http://geofem.tokyo.rist.or.jp/>
- [11] Nakajima, K. "Preconditioned Iterative Linear Solvers for Unstructured Grids on the Earth Simulator", *IEEE Proceedings of HPC Asia 2004*, pp.150-169, 2004.
- [12] Nakajima, K. "Parallel Iterative Solvers of GeoFEM with Selective Blocking Preconditioning for Nonlinear Contact Problems on the Earth Simulator", *ACM/IEEE Proceedings of SC2003*, 2003.
- [13] STREAM benchmarks: <http://www.cs.virginia.edu/stream/>
- [14] Nakajima, K. "Three-Level Hybrid vs. Flat MPI on the Earth Simulator: Parallel Iterative Solvers for Finite-Element Method", *Applied Numerical Mathematics*, Vol.54, pp.237-255, 2005.