

アルファワークステーションのクラスタ etlwiz の性能評価

益口摩紀[†] 建部修見^{††} 関口智嗣^{††}
長嶋雲兵[†] 佐藤三久^{†††}

本研究では NAS Parallel Benchmarks (NPB) と実アプリケーション QCDMPI を用い、100Base/TX ether switch により接続されたアルファワークステーションクラスタ etlwiz の性能評価を行う。NPB の EP, LU では etlwiz は Cray T3E-900 に匹敵する性能を示したが、BT に関してはネットワークのスループットが足りず性能は T3E-900 に対し半分であった。QCDMPI では高次元の隣接転送が必要となるが、etlwiz は 8.9 MB/sec. のスループットを達成し、32 台のクラスタで 3 GQCDFlops を達成した。

Preliminary performance evaluation of etlwiz: a dedicated cluster of Alpha workstations

MAKI MASUGUCHI,[†] OSAMU TATEBE,^{††} SATOSHI SEKIGUCHI,^{††}
UMPEI NAGASHIMA[†] and MITSUHISA SATO^{†††}

In this paper, we evaluate etlwiz, a dedicated cluster of Alpha workstations connected by 100Base/TX ether switch, using NAS Parallel Benchmarks (NPB) and a real application QCDMPI. In the NPB, the etlwiz can compete with Cray T3E-900 in EP and LU, while it is half the performance of the T3E-900 in BT because of insufficient throughput of the network. Though the QCDMPI requires nearest-neighbor communication in three or higher dimension, the etlwiz achieves a maximum throughput of 8.9 MB/sec. and a maximum performance of 3 GQCDFlops with 32 workstations.

1. はじめに

大規模な科学技術計算の実現に向け超並列計算機に代表されるコンピュータシステムの高速化を目的とした研究は躍進している。一方最近では、ワークステーションの CPU 性能も著しく向上し、ワークステーションクラスタ上での高速な並列処理が実現されており、最新のプロセッサを用いて、ユーザのニーズにあったシステム構築が可能なクラスタ技術にも目が向けられている。

本研究では DEC AlphaStation のクラスタ etlwiz を用いて CPU 性能とネットワーク性能の比重に着目した考察を行なうことを目的に、ワークステーションクラスタの性能評価を実施し、超並列計算機との性能比較を行なった。

ベンチマークプログラムには、NAS Parallel Benchmarks (NPB)¹⁾ と Lattice QCD の実アプリケーション

である QCDMPI²⁾ を適用した。これらは共に MPI^{3),4)} により記述されている。

NPB は主に分散メモリ型並列計算機に対する代表的なベンチマークで、様々なプラットフォームにおける性能評価が実施されているので、これまで報告されているデータと etlwiz における評価結果を比較して etlwiz の性能の位置付けを行なう。

また QCDMPI は、プログラム上で演算と通信が全く分離しており、プロセッサ数やデータ分割方法に依存しないポータブルなコードである。このため、計算機の演算性能・通信性能を各々独立に評価するのに適しており、ベクトル型並列計算機を含めたベンチマークデータが数多く公表されている。QCDMPI ではデータ分割の次元を変えることでネットワークの評価も行う。

2. 基本性能

図 1 に etlwiz の構成を示す。etlwiz は 32 台構成で、それぞれのプロセッサにおけるメモリは、512 MB × 8 台、256 MB × 8 台、128 MB × 16 台のような三段構成である。これは並列処理を実行する上で、並列度に依存しない一定のメモリ量を確保するためである。つま

[†] お茶の水女子大学

Ochanomizu University

^{††} 電子技術総合研究所

Electrotechnical Laboratory

^{†††} 新情報処理開発機構

Real World Computing Partnership

表1 各並列計算機システムの仕様

マシン	プロセッサ (PE 数)	クロック周波数	メモリ	キャッシュ	ネットワーク	バンド幅
etlwiz	Alpha21164(32PE)	333 MHz	128MB	8KB,96KB,2MB	100Base/TX ether switch	100Mbps
Cenju-3	VR4400(64PE)	75 MHz	64MB	32KB,1MB	多段接続網	40MB/sec.
AP1000+	SuperSPARC(64PE)	50 MHz	64MB	36KB	2次元トラス	25MB/sec.

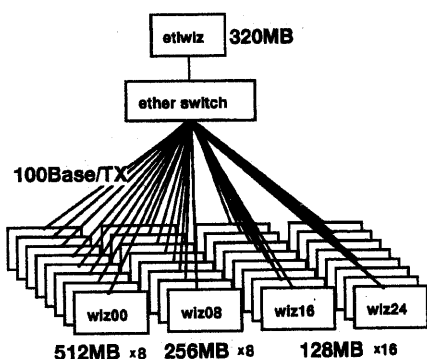


図1 etlwizの構成

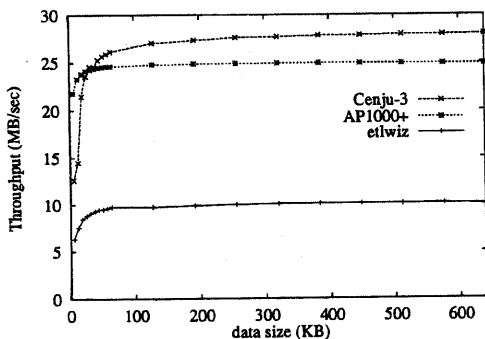


図2 各マシンのスループット

り、32 PE での実行時に利用可能なメモリ量 128 MB × 32 と 8PE を用いた場合に利用可能なメモリ量 512 MB × 8 は相等しい。また、ネットワークは 100Base/TX を ether switch で接続した構造となっており、ether switch のバックプレーンは 1.2 Gbps である。

基本的な性能として、ここでは、MPI を用いて簡単なピンポン転送による実験を行なって得た 基本通信性能について述べる。

640KB までのデータサイズの変化に対する MPI のスループットの振舞い図 2 を測定した。比較のため、超並列計算機、NEC の Cenju-3、富士通 AP1000+ の性能も示す。etlwiz、Cenju-3 では MPICH を、AP1000+ では MPIAP^{5),6)} を用いた。表 1 には、etlwiz と NEC の Cenju-3、富士通 AP1000+ の仕様を示す。

ここでは簡単に、データ転送量を通信時間で割算した値をスループットとして示した。最大スループットは、etlwiz では 10MB/sec., Cenju-3 では 28MB/sec., AP1000+ では 24MB/sec. 程度となっている。ピークの 9 割のスループットが観測されるのは、etlwiz では、

データサイズ 32KB のとき、Cenju-3、AP1000+ では各々、データサイズ 45KB、10KB 程度するときである。

1 通信における転送量が 32KB 以上程度であるとき、AP1000+ に比較して Cenju-3 の方がより効率の良い通信を実現していることがわかる。

同じく 0 バイトのメッセージのピンポン転送により得た片道通信にかかるレイテンシは etlwiz で 193 μ sec., Cenju-3 で 67 μ sec., AP1000+ においては 23 μ sec. である。AP1000+ より Cenju-3 の方がレイテンシが大きい、データサイズが 32KB 以下になると、Cenju-3 に比較して AP1000+ の方が高いスループットを示している。

また、 $n = 100$ の Linpack Benchmark では etlwiz の単体性能は 175 MFlops であった。

3. NPB による評価

本稿ではまず、NPB 2 による etlwiz と 代表的なマシンとの性能比較を行ない、その中における etlwiz の性能の位置付けを行なう。etlwiz、AP1000+, Cenju-3 以外のシステム : Cray T3E-900, SUN Ultra Enterprise 4000 等における性能は、NPB のホームページ <http://www.nas.nasa.gov/NAS/NPB/> から引用した。

3.1 NPB の概要

NPB 2 のポータブルなソースコードは、チューニングを行なうことなく広く利用され、評価指標として有効な地位が確立されている。本研究では NPB 2 を用いて、特別なプログラム・チューニングを施さないアプリケーションにおける実行時の性能に着目した評価を行なった。

NPB 2 は 5 つのカーネル、EP, CG, FT, MG, IS と、3 つの擬アプリケーション、LU, BT, SP から構成されている。NPB では、各々のプログラムに対して問題サイズにより class A, B, C の三つのクラスが与えられている。class C はハイエンドのスーパーコンピュータのために NPB 2 で付け加わったものである。

以下では本評価で用いる EP, LU, BT の特徴と今回用いた問題サイズを示す。LU, BT はいずれも圧縮性 Navier-Stokes 方程式を解く CFD の擬アプリケーションである。

EP (Embarrassingly parallel): 乗算合同法による一様乱数及び正規乱数の生成。通信を含まない。問題サイズは class B で 2^{30} とする。

LU (LU solver): 対象領域を x, y 方向にブロック分割しプロセッサに割り当てる。ニュートン反復ごとに離散化した行列を不完全 LU 分解し、SSOR 法を用いて解く。ベンチマークとしてはこの SSOR 法と右辺の計

算を規定回数反復する。SSOR 法は xy 平面に関しパイプライン処理を行うことで並列化されている。問題サイズ n^3 、プロセッサ数 p^2 の時、タイルあたりの計算量は $O(n^2/p^2)$ 、通信量は $O(n/p)$ である。また、タイルの数は n である。右辺の計算では通信隠蔽はされておらず、計算量 $O(n^3/p^3)$ に対し通信量 $O(n^2/p^2)$ である。通信パターンは 2 次元隣接転送となっている。問題サイズは class A: 64^3 , class B: 102^3 を用いる。

BT(Block tridiagonal solver): Beam-Warming 近似分解に基づき x, y, z 方向それぞれの方向に分離した分解を行う。それぞれの方向では 5×5 ブロックの 3 重対角行列を解くことになる。データ分割はマルチパーティショニング法を用い、それぞれの方向でほぼ完全な負荷分散を行うことができる。ベンチマークとしては規定 time step の計算を行う。BT ではそれぞれの方向で 5×5 ブロックの 3 重対角行列をガウスの消去法を用いて解く。マルチパーティショニング法を用いるためセルと呼ばれる単位で計算を行う。問題サイズ n^3 、プロセッサ数 p^2 の時、 $O(n^3/p^3)$ の計算をした後、 $O(n^2/p^2)$ の通信を行い、このステップを n/p 段繰り返す。この時データ並列ではあるが、パイプライン処理における通信隠蔽はなされない。その代わり、通信時に右辺の計算を行い通信と計算のオーバーラップを行っている。通信パターンはステップの段数により相手先が複雑に変化する一対一転送である。問題サイズは class A で 64^3 とする。

以下に、NPB を用いてそれぞれ 1 プロセッサ当たりの性能により etlwiz とその他の代表的なシステムとの比較を PE 数 64 台までの範囲で行なった結果を示す。

3.2 EP による性能比較

図 3 に、etlwiz とその他の代表的なマシンとの EP における性能比較を示す。EP はプロセッサ間通信を含まないので、グラフは演算性能を示し、理想的には PE 数に依らず一定の値をとる。

etlwiz のクロック周波数は 333MHz であるが、EP では 450MHz の Cray T3E-900 より高性能を記録した。

3.3 LU, BT による性能比較

図 4 に LU(class A) による性能比較、図 5 に BT(class A) による性能比較結果を示す。

LU は SSOR 法で細かい通信を幾度も行うが、パイプライン処理により通信は隠蔽される。が、右辺の計算では通信は隠蔽されない。通信パターンはいずれも一定で 2 次元隣接転送である。BT は全プロセスで計算、通信のフェーズを繰り返し、この通信のフェーズと右辺の計算部分がオーバーラップして実行される。基本的に全プロセスでの一対一通信であるが、データ分割にマルチパーティショニング法を用いているためフェーズごとに通信相手異なる。

LU ではパイプライン処理により通信が隠蔽され、8 PE 迄は T3E-900 より高性能を示す。が、etlwiz は通信遅延が 193 μsec 。もあるため、プロセッサ数の増加に対し性能の低下が速い。BT に関しては、etlwiz は CPU

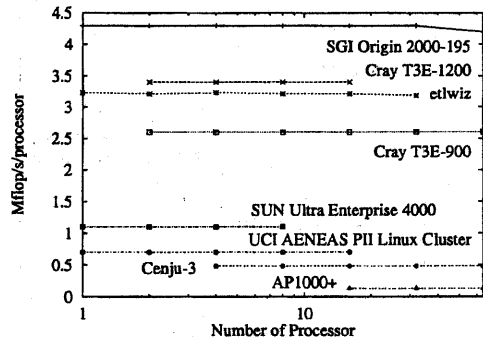


図 3 EP(class B) による性能比較

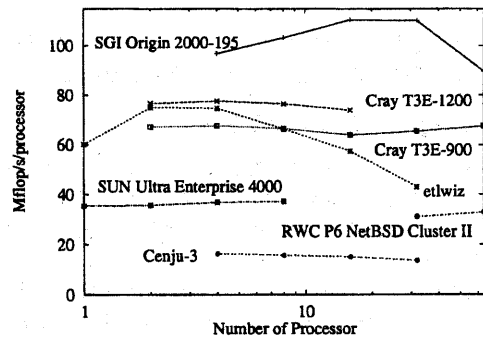


図 4 LU(class A) による性能比較

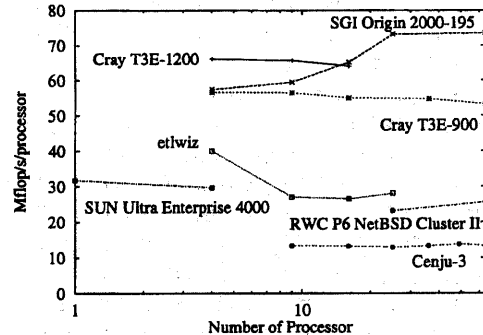


図 5 BT(class A) による性能比較

を介さない転送を行うことができないため、通信と計算のオーバーラップによる通信隠蔽がなされず、また通信スループットが足りないために通信オーバーヘッドが顕現した。

図 6 に LU(class B) による性能比較結果を示す。Class B は Class A の約 4 倍の問題サイズを与える。

Cray T3E-900 と比較すると、class A では 2 ~ 8 PE に限り etlwiz の方が優位を占めたが、class B になると 8 ~ 32 台の全ケースにおいて etlwiz の方が高性能を示す。etlwiz では通信と計算のオーバーラップによる通信隠蔽を行うことはできないが、LU においては、パイプライン処理による通信隠蔽が可能となり充分な問題サイズ

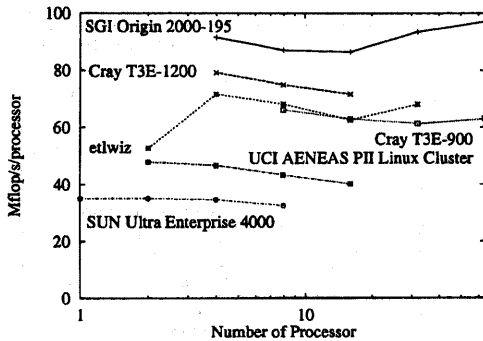


図6 LU(class B)による性能比較

があれば通信レイテンシによる通信オーバーヘッドは隠され、実効性能に対して通信はほとんど影響を与えない。

4. QCDMPIによる評価

Linpack や NPB に代表されるベンチマークプログラムによる性能評価の研究はこれまで数多く行なわれている。しかし、実際に計算機上での演算を必要とするのは実アプリケーションである。ここでは、これまでに示した NPB による評価結果を踏まえて、計算機の演算性能・通信性能を各々独立に評価するのに適した実アプリケーションである QCDMPI を用いた評価を行なう。QCDMPI は、Fortran での記述、MPI を用いたメッセージ通信、SPMD モデルに基づいており、計算に必要な CPU 時間は格子空間のサイズに比例する。

4.1 QCDMPI のアルゴリズム

4次元の格子空間 $N = ng1 \times ng2 \times ng3 \times ng4$ をプロセッサ数 $P = np1 \times np2 \times np3 \times np4$ で分割する。各プロセッサは一斉にそれぞれ割り当てられた空間内の処理を行なう。各プロセッサに割り当てられる空間サイズは、 $\frac{ng1}{np1} \times \frac{ng2}{np2} \times \frac{ng3}{np3} \times \frac{ng4}{np4}$ となり、計算するリンクの数は空間サイズに次元数 4 を掛けたものとなる。

プログラムのアルゴリズムは以下の通りである。

- [step1: generation] 各々のプロセッサ対し割り当てられた格子空間内における初期値を設定する。
- [step2: update1] 行列の加算・乗算を行なう。ここで、並列実行の場合各次元毎に隣接通信が生じる。
- [step3: update2] 経路積分を行なう。
- [step4: gather] 結果を集約する。step2～step4 を反復することにより物理量 (plaquette energy) の近似値を得る。但し、反復回数は事前に与える。

step2 において効率を考慮して可能な限り同時処理を行なう。1つの次元分割に対し、1反復当たり 12 回の通信を必要とする。例えば 4 次元分割の通信回数は 12 回 $\times$ 4 次元となる。低次元分割の場合、通信の頻度は低いが、1通信当たりの転送量は増す。高次元分割により転送量を軽減できるが一方で通信回数は増加する。計算

表2 QCDMPIにおける次元分割方法

分割法	PE 数: 64	PE 数: 32	PE 数: 16
1次元	$64 \times 1 \times 1 \times 1$	$32 \times 1 \times 1 \times 1$	$16 \times 1 \times 1 \times 1$
2次元	$8 \times 8 \times 1 \times 1$	$8 \times 4 \times 1 \times 1$	$4 \times 4 \times 1 \times 1$
3次元	$4 \times 4 \times 4 \times 1$	$4 \times 4 \times 2 \times 1$	$4 \times 2 \times 2 \times 1$
4次元	$4 \times 4 \times 2 \times 2$	$4 \times 2 \times 2 \times 2$	$2 \times 2 \times 2 \times 2$

機の特性に合った次元分割の選択により、実行時間の短縮化が望める。ここでは、最適な分割方法の検討により、演算 / 通信性能の評価を行なう。PE 数 64, 32, 16 とした時、各々の次元分割における分割方法を表 2 に示す。

4.2 評価手法

実行時間の計測は、通信ライブラリの組み込み関数である MPI_Wtime() を用いた。通信時間は、ある一定のプロセッサにおいて MPI_Isend() を呼び出してから、MPI_Irecv() によりデータを受ける迄の時間と定義し、データ転送と待ち時間が含まれる。

QCDMPI の標準的なプログラムにおいて必要な 1 リンク当たりの浮動小数点演算数は 5700 である。単位時間当たりの浮動小数点演算数を $QCDFlops$ とする。但し、空間サイズによって与えられるリンク数によって、

$$QCDFlops = 5700 \times (\text{リンク数}) / (\text{実行時間})$$

としている。このようにして得られた GigaQCDFlops を以下では Gflops として評価指標に用いる。

例として QCDMPI のホームページ

<http://murodoh.sci.hiroshima-u.ac.jp/QCDMPI/> から引用した SX-4, AP3000(167MHz), SR2201 における性能を表 3 に示す。問題サイズ 32^4 , PE 数 8($=2 \times 2 \times 2 \times 1$) としている。同条件の下で PE 数 8 台のときの etlwiz の性能は 0.80Gflops となった。

4.3 改良点

本研究は、これまでに浮上した問題点⁹⁾ に対して次のような考察を行なった上で評価を行なう。

- 実装によっては、送受信の時に deadlock になる可能性があったので、一度送信バッファをコピーしてノンブロッキング通信で送受信を行う様にした。
- AP1000+ ではホストを含めない処理を行なうように変更し、通信性能がリーズナブルになった。¹⁰⁾
- Cenju-3 では mini-MPI に代用して MPICH を用いたことで問題サイズを大きくすることができた。
- etlwiz では OS と MPICH の version up により、以前観測されていたような各反復間でのばらつきがみられなくなり、通信性能も良くなった。

4.4 各システムの評価

各システムにおいて、使用可能な最大メモリ量を使用 (問題サイズを最大: 64×32^3 に設定) したときの、次元分割の違いに対する性能の変化を評価する。用いた PE 数は、etlwiz は 32PE, その他の MPP は 64PE とした。

表3 各システムにおける性能 (問題サイズ: 32^4 , 8PE)

マシン	SX-4	AP3000	SR2201
性能 (Gflops)	8.50	0.69	0.54

表 4 に etlwiz, Cenju-3, AP1000+ における各次元分割に対する性能と通信スループットを示す。表中で () の値は、通信を除いた演算性能である。図 7, 8 に、各次元分割に対する実行時間における内訳 (計算 / 通信時間と全実行時間に占める各々の割合) を示す。吹出しは 1 通信における転送量と通信の生じる回数を示している。

etlwiz, Cenju-3 では多次元分割を行なう程、性能が向上するのに対し、AP1000+ では 2 次元分割の場合に最大性能となり、3, 4 次元分割では隣接転送のスループットが減少している。これは、AP1000+ のネットワークが 2 次元トラス構造であるため、3, 4 次元分割の場合に通信の衝突が起こることが要因にあると思われる。

全実行時間に対する通信の割合は、etlwiz は MPP と比較してより顕在化する傾向にある。しかし、QCDMPI において Cenju-3, AP1000+ は高次元の隣接転送のスループットがピークのほぼ半分であるのに対し、etlwiz は 7 ~ 9 割出ており、基本性能に対しては、効率良い通信が実現されている。全実行においては約 3Gflops を達成しており、1.6 ~ 2 倍以上の性能が示された。

表 4 etlwiz, Cenju-3, AP1000+ における性能 (問題サイズ: 64×32^3)

マシン	分割方法	性能 (除く通信)	スループット
etlwiz (32PE)	1dim	2.36(3.78) Gflops	7.44 MB/sec.
	2dim	2.94(3.88) Gflops	7.22 MB/sec.
	3dim	2.96(3.87) Gflops	7.33 MB/sec.
	4dim	2.97(3.91) Gflops	7.28 MB/sec.
Cenju-3 (64PE)	1dim	1.51(1.85) Gflops	10.02 MB/sec.
	2dim	1.81(1.95) Gflops	10.62 MB/sec.
	3dim	1.83(1.96) Gflops	10.07 MB/sec.
	4dim	1.84(1.96) Gflops	10.84 MB/sec.
AP1000+ (64PE)	1dim	1.16(1.30) Gflops	12.83 MB/sec.
	2dim	1.28(1.34) Gflops	12.74 MB/sec.
	3dim	1.27(1.34) Gflops	8.75 MB/sec.
	4dim	1.26(1.34) Gflops	8.11 MB/sec.

4.5 他のシステムとの性能比較

ここではプロセス数 (16PE) と問題サイズを一定 (問題サイズ: 16^4) に揃え、演算数、通信データサイズを全てのシステムで合わせ、また各次元の通信における特性の差が反映されやすいように問題設定を行なった上で、etlwiz とその他のシステムとの比較を行なう。

表 5 に、各次元分割に対する性能と通信スループットを示す。表中で () の値は、通信を除いた演算性能である。図 9 に、各次元分割に対する実行時間における内訳 (計算 / 通信時間と各々の割合) を示す。吹出しは 1 通信における転送量と通信の生じる回数を示している。

2 ~ 4 次元分割において通信する総データサイズは等しい。etlwiz, Cenju-3 では 4 次元分割の場合に最大性能を示すが、AP1000+ では 3 次元分割の場合に最も性能は高い。AP1000+ で 3 次元分割の方が 2 次元分割より性能が向上しているのは、16 台の場合、物理構成は 8×2 となり、2 次元方向では必ず通信の衝突が起こる

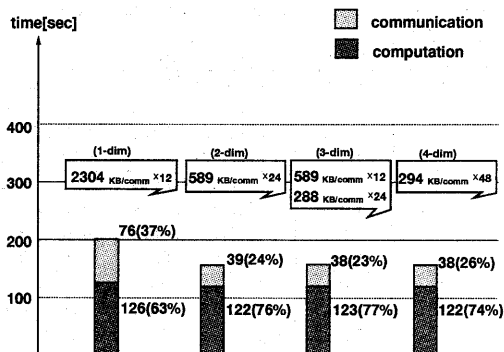


図 7 etlwiz における実行時間 (問題サイズ: 64×32^3)

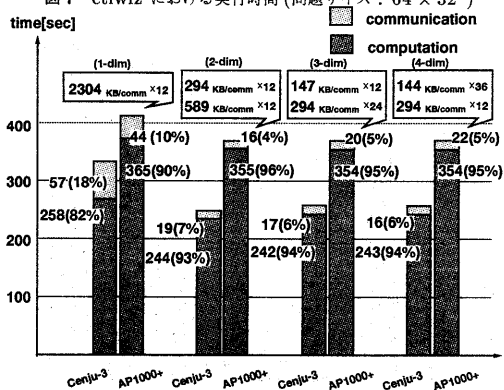


図 8 Cenju3, AP1000+ における実行時間 (問題サイズ: 64×32^3)

が、3 次元方向では衝突が起こらないためだと思われる。

演算性能については、各々のシステムで 2 ~ 3 次元分割における性能は等しい。問題サイズ 64×32^3 の時と比べると、etlwiz の性能低下は 2 ~ 3 割であるのに対し、Cenju-3, AP1000+ では 7 ~ 8 割も性能が低下した。

etlwiz の通信スループットは Cenju-3, AP1000+ に比べ半分以下であるが、QCDMPI においては 2 割程度の差しかなく、十分な性能を出しているといえる。

5. ま と め

本研究では、NPB と実アプリケーションである QCDMPI を用いて、Ether switch で結合した DEC AlphaStation のクラスタ etlwiz の予備的な性能評価を実施し、超並列計算機との性能を比較した。

NPB については、プロセッサ間通信を含まないカーネル EP により演算性能を評価し、また擬アプリケーションである LU, BT を用いて通信効率に注目した評価を行なった。さらに LU において問題サイズの変化に対する性能比較も実施した。EP では、より高いクロック周波数をもつ CPU を備えた Cray T3E-900 よりも etlwiz の方がその性能は優越していた。

表5 etlwiz, Cenju-3, AP1000+ における性能 (問題サイズ:

マシン	分割方法	性能 (除く通信)	スループット
etlwiz (16PE)	1dim	1.02(2.86) Gflops	7.58 MB/sec.
	2dim	1.52(3.21) Gflops	6.92 MB/sec.
	3dim	1.60(3.21) Gflops	7.63 MB/sec.
	4dim	1.78(3.41) Gflops	8.89 MB/sec.
Cenju-3 (16PE)	1dim	0.43(0.53) Gflops	11.13 MB/sec.
	2dim	0.52(0.59) Gflops	10.85 MB/sec.
	3dim	0.52(0.59) Gflops	10.20 MB/sec.
	4dim	0.53(0.59) Gflops	10.84 MB/sec.
AP1000+ (16PE)	1dim	0.28(0.32) Gflops	10.11 MB/sec.
	2dim	0.30(0.33) Gflops	9.11 MB/sec.
	3dim	0.31(0.33) Gflops	11.16 MB/sec.
	4dim	0.30(0.33) Gflops	10.16 MB/sec.

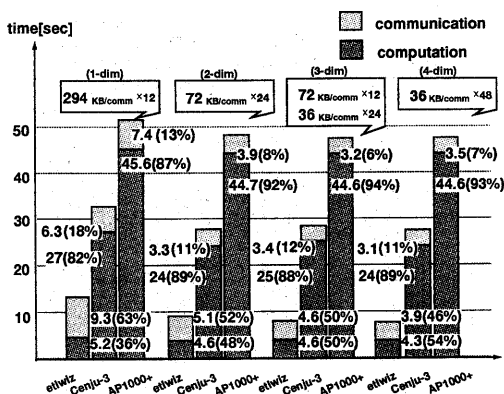


図9 etlwiz, Cenju-3, AP1000+ における実行時間 (問題サイズ: 16^4)

LU に関してはパイプライン処理でうまく通信が隠蔽され、8 PE 迄は T3E-900 よりも高い性能を示したが、etlwiz は通信遅延が 193 μ sec. もあるため、プロセッサ数を増やした時に性能の低下が早い。BT に関しては、etlwiz は CPU を介さない転送を行うことができないため、通信と計算のオーバーラップによる通信隠蔽を行うことができないこと、通信スループットが足りないため通信オーバーヘッドが現れる結果となった。

LU において問題サイズを増加させると、パイプライン処理による通信の隠蔽によって、充分な問題サイズがあれば通信レイテンシによる通信オーバーヘッドが隠れるため、実効性能に対する通信の影響が減少し、etlwiz において並列度を上げてでも高性能を維持する結果となった。

実アプリケーションである QCDCMPI については、etlwiz, Cenju-3, AP1000+ を対象とし、各システムにおける最適な次元分割方法を検討することにより、演算/通信性能の評価と各々の性能比較を行なった。

etlwiz, Cenju-3 では多次元分割を行なう程より高い性能を示すのに対し、AP1000+ では 2 次元分割の場合に最高性能となり、3, 4 次元では隣接転送のスループットが減少した。これは AP1000+ のネットワークが 2 次

元トラス構造であるために、3 次元以上の分割を行なうと通信の衝突が起こることが要因として考えられる。

Cenju-3, AP1000+ は高次元の隣接転送のスループットがピークの約半分しか出ないのに対し、etlwiz は 7 割から 9 割の性能を示し、基本通信性能に対して効率良い通信が実現された。総体性能に関しては etlwiz が優位を占める結果となり、約 3Gflops の性能を達成した。

etlwiz の通信スループットは Cenju-3, AP1000+ に比べ半分以下であるが、QCDCMPI においては 2 割程度の差しかなく、十分な性能を出しているといえる。

謝辞 QCDCMPI を御提供頂いた帝塚山大学の日置慎治助教授、また多くの有益な御助言を頂いた NEC C&C メディア研究所 並列処理センターの中田登志之様に深く感謝致します。

なお、本研究は工業技術院国際特定共同研究「ハイパフォーマンスコンピューティングシステム性能評価技術の研究」ならびに電子技術総合研究所とお茶の水女子大学の共同研究に基づくものである。

参考文献

- 1) D.Bailey, et al. "the NAS Parallel Benchmarks 2.0". Technical report, NAS, December 1995. NAS-95-020.
- 2) 日置慎治:
<http://insam.sci.hiroshima-u.ac.jp/QCDCMPI>
- 3) Marc Snir and Steve Otto and Steven Huss-Lederman and David Walker and Jack Dongarra. "MPI: The Complete Reference". The MIT Press, 1996. ISBN 0-262-69184-1.
- 4) Message Passing Interface Forum. "MPI-2: Extensions to the Message-Passing Interface". July 1997. <http://www.mpi-forum.org/docs/mpi-20-html/mpi2-report.html>
- 5) David Sitsky and Kenichi Hayashi. "An MPI library which uses polling, interrupts and remote copying for the Fujitsu AP1000+". Proceedings of ISPAN'96, June 1996. IEEE.
- 6) David Sitsky and Kenichi Hayashi. "Implementing MPI for the Fujitsu AP1000/AP1000+ using Polling, Interrupts and Remote Copying". Proceedings of JSP'96, June 1996. 177-184.
- 7) 原康夫. 量子色力学とは何か, 丸善 (1986).
- 8) 南部陽一郎. クォーク 素粒子物理の最前線, 講談社 (1981).
- 9) 益口ほか. "量子色力学プログラムを用いた並列計算機の性能評価". 情報処理学会研究報告 HPC-67-8, pp.43-48. 1997.
- 10) "ANU/Fujitsu CAP Research Program AP1000 Software Release 1995". MPI User's Guide, 1994.