

VLAN イーサネットを用いた大規模 PC クラスタの検討

渡辺 崇文^{†1} 中尾 昌広^{†1} 廣安 知之^{†2}
鯉 渕 道 紘^{†3} 大塚 智 宏^{†4}

本稿では、VLAN ルーティング法を用いてイーサネットのトポロジ、ルーティングを改良することで同志社大学の大规模 PC クラスタの性能向上を達成した報告を行う。本実装ではソフトウェアには手を加えずに最小限のシステムの更新で VLAN ルーティング法を実現するために、(1) スイッチにおいてフレームに VLAN タグを付与し、(2) スイッチにおける MAC アドレステーブルの学習のためだけにローカルなネットワークアドレスをホストの仮想インタフェースに持たせた。評価結果より、小規模なスイッチ 8 台のネットワーク構成において本実装を用いることにより大規模なスイッチを 1 台使用した場合とほぼ同等の High-Performance LINPACK benchmark(HPL) 性能を計測できることを示した。

Massively PC Clusters using VLAN Ethernet

TAKAFUMI WATANABE,^{†1} MASAHIRO NAKAO,^{†1}
TOMOYUKI HIROYASU,^{†2} MICHIMIRO KOIBUCHI^{†3}
and TOMOHIRO OTSUKA^{†4}

This paper reports that a massively PC cluster increased its performance by improving Ethernet topology and its routing using the VLAN routing method. To minimize the system update without modifying system software of the PC cluster, (1) VLAN tag is added to a frame at switches, and (2) each host creates VLAN interface that has a local network address used only for learning MAC addresses of switches. Evaluation results show the small eight-switch network was comparable with that of an ideal 1-switch (full crossbar) network in the execution of High-Performance LINPACK benchmark(HPL).

1. はじめに

イーサネット (Ethernet) は、管理の容易さ、高い耐故障性、安価なハードウェアなどの利点から、ローカルエリアネットワーク (LAN) のみならず、広域ネットワークや PC クラスタのインタコネクタとしても幅広く採用されている。特に、Gigabit Ethernet (GbE) の普及、ツイストペアケーブルを用いる 10GBASE-T の標準化 (IEEE 802.3an-2006) などにより、イーサネットはハイパフォーマンスコンピューティング (HPC) 分野において、Myrinet などの高価なシステムエリアネットワーク (SAN) に迫るインタコネクタとして主流になりつつある。しかし、イーサネットを用いた PC クラスタの多くは

単純なツリー状トポロジを採用している。これは、基本的にイーサネットがループ構造を含むトポロジを許していないためである。ツリー状ネットワークにはトラフィックがツリーのルート付近に偏りやすいという欠点があるため、リンク集約化 (IEEE 802.3ad) などによってルート付近のリンクを強化するのが一般的である。しかし、クラスタが大規模になると、1つの集約化されたリンクを構成するポート数は限られている場合が多いためツリー状ネットワークの欠点を補い切れなくなる。また、リンク集約化のためにスイッチのポートを多数占有してしまうため、次数が低く直径の大きいトポロジしか構築できないという問題も生じる。これらのことから、ユーザやアプリケーションの要求に応じたトポロジ・ルーティングを採用している SAN や並列計算機の相互結合網に比べて、イーサネットを用いた PC クラスタは大規模化には向かないとされてきた。

リンク集約化以外にも、スイッチ間に複数リンクを接続することでバンド幅を向上させる方法が提案されている。この方法では、ループを解消してツリー構造を維持するスパニングツリープロトコル (STP, IEEE 802.1D) を用いないため、Fat ツリーやトラスなどのループ構造

^{†1} 同志社大学大学院
Graduate School of Engineering, Doshisha University
^{†2} 同志社大学生命医科学部
Department of Life and Medical Sciences, Doshisha University
^{†3} 国立情報学研究所/総合研究大学院大学/JST
National Institute of Informatics/SOKENDAI/JST
^{†4} 慶應義塾大学大学院 理工学研究所
Graduate School of Science and Technology, Keio University

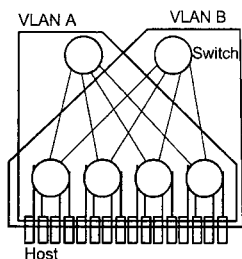


図1 VLAN ルーティング法

を含むトポロジを構築することができる。STP を用いずに大規模クラスタシステムを構築する場合、ホストの追加やスイッチの故障、操作ミス等によるブロードキャストストームの発生を抑えるために、ホストの MAC アドレスの管理が1つの課題となる。この点において、IEEE 802.1Q 標準のタグ VLAN 技術を応用した VLAN ルーティング法¹⁾が既存の方法の中で有力である。

VLAN 技術は本来、同じ物理ネットワークに接続されたホストの集合を、複数の論理的なグループに分割するために用いられるが、VLAN ルーティング法ではこれをネットワークのスループット向上のために用いる。図1のように、各ホストが複数の VLAN グループのメンバーになるようにしておき、各 VLAN にそれぞれ異なるリンク集合を割り当てる。ここで、各 VLAN ネットワークのトポロジはツリー構造となっているため、ブロードキャストストームは発生しない。上記の方法により、すべてのホストがどの VLAN を用いても互いに通信でき、VLAN を選択することで複数の経路を切り替えて使うことが可能になる。

PC クラスタにおいて VLAN 技術を用いたイーサネットはインタコネクトとして有益であることが報告されている¹⁾。しかし、TOP500 スーパーコンピュータのランキング²⁾において上位 500 台の中で GbE を用いたシステムが 54%と過半数になっているにも関わらず、これらを含めて多くの PC クラスタにおいてトラストポロジなどのループを含むトポロジを採用した報告はほとんどない。

これは、現時点において運用されている PC クラスタのホスト、システムソフトウェアが VLAN 技術に対応しておらず、また、使用可能な VLAN 数、および MAC アドレステーブルの登録可能なエントリ数が商用スイッチに大きく依存する等の点が一因となっていると考えられる。

そこで、本稿では、システムソフトウェアが VLAN 技術に対応しておらず、静的な MAC アドレスのエントリ数が 100 個と極めて少ないスイッチを用いた既存の典型的な大規模 PC クラスタにおいて、システムの更新を最小限に抑えた VLAN ルーティング法を実装した。具体的

には、ホスト内のシステムソフトウェア環境には一切手を加えず、商用の L2 イーサネットスイッチでサポートされている機能を制御することにより実現できるスイッチタグを用いた VLAN ルーティング法³⁾を採用した。また、MAC アドレスの学習のみに用いる (ローカルな) ネットワークアドレスを利用することでスイッチの MAC アドレスを管理した。さらに、VLAN ルーティング法により、イーサネットトポロジ、ルーティングを改良することでシステムの大幅な性能向上を達成した。

以下、2 節で本研究の関連研究を紹介し、3 節において PC クラスタの概要、ならびに、VLAN ルーティング法の実装について述べ、4 節にて評価結果を示す。最後に 5 節でまとめを述べる。

2. 関連研究

イーサネットにおいて VLAN を用いてホスト間に複数の経路を設定し、ループ構造を含むさまざまなトポロジを利用できるようにするルーティング技術は国内外でほぼ同時期に提案された¹⁾⁴⁾。工藤らが提案した VLAN ルーティング法¹⁾では、図1のようにループを含まない各リンク集合にそれぞれ異なる VLAN を割り当てることで、ブロードキャストストームを避けつつ同一スイッチ間に複数経路を実現する。

VLAN 技術を利用して PC クラスタのインタコネクトを構築する手法はその後国内を中心に活発に議論され、三浦らの研究⁵⁾では、MAC アドレスから VLAN ID を決定しタグ付けを行うための Linux 用デバイスドライバを開発し、TCP/IP を用いた VLAN ルーティング法の利用を実現している。この手法では、MAC アドレスに基づいた VLAN ID の制御とすることで、送信先に応じた VLAN の選択をドライバに任せられるようになるため、上位レイヤのソフトウェア環境に手を加えることなく VLAN ルーティング法を実現できる。

これに対し我々は、様々なトポロジにおける VLAN の割当て方法や、スイッチにおいて VLAN タグ付けを行うことで、システムソフトウェアが VLAN 技術をサポートしていない場合にも VLAN ルーティング法を利用できるようにする手法³⁾を提案し、32 台ホストで構成される PC クラスタにおいて評価を行った。

VLAN 技術を用いずに、静的にホストの MAC アドレスを登録することでルーティングを行う方法も検討されているが、ブロードキャストストームが発生した場合の対処、ならびに各スイッチから宛先への出力ポートが入力ポートによらずに定まるため利用可能なルーティングアルゴリズムが限定される。

この他、住元らの研究⁶⁾では、VLAN ルーティング法とは異なるが、大規模クラスタシステム用のネットワークとしてイーサネットによる 3 次元ハイバークロスバ網を

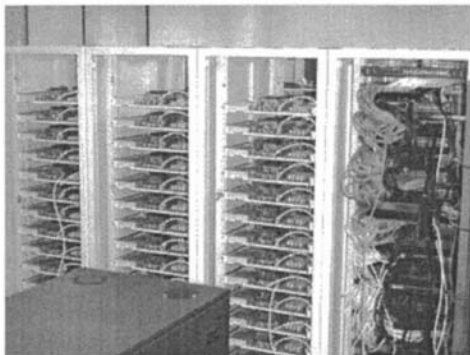


図2 同志社 PC クラスタの概観

実現し、そのための専用通信ライブラリ PM/Ethernet-HXB を新たに開発した。VLAN ルーティング法によるハイパークロスバ網¹⁾では節点において各次元方向のスイッチを直接接続するが、この方式では、ホスト上の PM ドライバがフレームのルーティングを担当する点が異なる。

3. PC クラスタにおける VLAN ルーティング法の実装

3.1 実験に使用した PC クラスタの構成

本実験では、225 ノードからなる PC クラスタを利用して実験を行った。使用した PC クラスタは同志社大学の SuperNova システムの一部である。SuperNova は 2003 年に、1 台の Force10 E1200 スイッチを用いて 256 台の PC を接続することで Top500 ランキング²⁾において LINPACK 性能で 93 位となった大規模計算システムであり、現在も同志社大学において計算量を必要とする研究者のために公開され、運用されている。現在では、225 台の PC と 8 台の 48 ポートの GbE スイッチ (Dell 社 PowerConnect6248) で構成されている (図 2)。

表 1 に汎用のコンポーネントで構成されているホストの仕様を示す。評価に用いたトポロジ構成については第 4 章で述べる。

表 1 ホストの仕様

CPU	AMD Opteron 1.8GHz × 2
Chipset	AMD 8131+8111
Memory	PC2700 Registered ECC 2GB
OS	Debian GNU/Linux 4.0
Kernel	2.6.18-4-amd64
MPICH	1.2.7p1

3.2 VLAN ルーティング法の実装

最小限のシステム更新で VLAN ルーティング法を実装するために、本実装では (1) 各スイッチは、ホストから注入される VLAN タグのないフレームに VLAN タグを挿入し³⁾、(2) 各ホストはスイッチの MAC アドレ

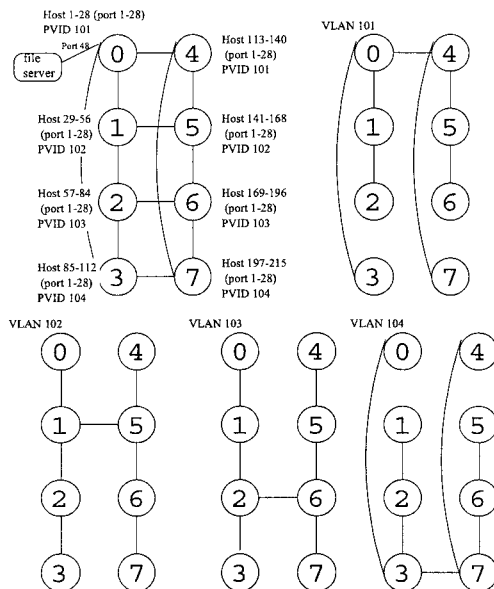


図3 スイッチで VLAN タグ付けを行うルーティングの例

スの学習のために、並列プログラムの通信には利用しない仮想インタフェースを持たせた。

3.2.1 スイッチにおいて VLAN タグ付けを行う VLAN ルーティング法

ホストと接続されたスイッチポートでは、ホストからの入力フレームに VLAN タグを付加し、ホストへ出力するフレームから VLAN タグを除去する。これを行うため、ホストと接続された各スイッチポートに対し、以下の 2 種類の設定を行う。

- スイッチポートの PVID として、接続されたホストがフレームを送信する際の経路として使う VLAN の ID を設定する。
- 各リモートホストから送られてくるフレームのタグを除去するため、ポートをネットワーク全体で使われる全 VLAN の “タグなし” メンバとしておく。

この例を使用した PC クラスタの構成図図 3 に示す。図中の円はスイッチを表している。図において、ホスト 1～28 から送出されたフレームは、スイッチ 0 の入力ポートにおいて VLAN タグ #101 を付与され、すべての宛先について VLAN #101 内によってルーティングされる。そして、宛先ホストに接続しているスイッチの出力ポートにおいて VLAN タグ #101 を除去する。一方、ホスト 29～56 から送出されたフレームも同様の方法で VLAN #102 によってルーティングされる。

上記の方法により、ホスト側で VLAN がサポートされていなくても、さまざまなトポロジにおいて全ホストの相互通信が可能になる。

3.2.2 スイッチにおける MAC アドレスの管理

スイッチは通常、以下のように MAC アドレスを学習する。まず、スイッチがフレームを受信した際、スイッチはその送信元 MAC アドレスを参照し、入力されたポート番号とともに MAC アドレステーブルに登録する。次に、宛先 MAC アドレスを参照し、テーブルを引いてそのアドレスのエントリがあるかどうかを調べる。エントリが見つからなかった場合、スイッチは VLAN メンバとなっている全ポートからフレームを出力するため（これをフラッディングと呼ぶ）、最終的にフレームは宛先ホストへ到達する。この宛先 MAC アドレスのエントリは、宛先ホストからの返信フレームを受信した際に登録されるため、以後はフラッディングを伴わずにフレームの交換が実現されるようになる。

しかし、Blue/Gene L 等の並列計算機の結合網で利用されている高性能ルーティングは同一スイッチ間の経路が往路と復路で異なる。そのため、PC クラスタにおいてこららを VLAN ルーティング法を実現するためには、各スイッチにおける MAC アドレステーブルの管理が 1 つの課題となる。

この課題は、静的に MAC アドレスをスイッチに登録することで解決することができる。しかし、スイッチの多くは静的に登録できる MAC アドレス数が限られているため、大規模 PC クラスタには適用できない場合がある。例えば、本評価に用いた Dell 社 PowerConnect 6248 は高々 100 個の MAC アドレスのみが登録可能である一方、MAC アドレスの学習等により最大 8,000 個の MAC アドレスのエントリを持つことが可能である。

そこで、本実装では以下のようにして MAC アドレスの学習を実現した。

- (1) 全 VLAN に対応する仮想インタフェースを各ホストにおいて vconfig 等を使って作成する。例えば図 3 の場合、vlan 101~104 を用いるため、各ホストにおいて eth0.101~eth0.104 までを作成する。
- (2) VLAN 毎に一意のネットワーク (IP) アドレスを与え、VLAN 毎に別々のセグメントに属するように各ホストの仮想インタフェースに IP アドレスを割り振る。
- (3) 各仮想インタフェースごとに、ICMP または UDP メッセージを一度ブロードキャストする。

ステップ (3) では、各ホストにおいて、例えば各 VLAN セグメント内で全ホストに対して ping (ICMP echo req.) を送信することで実現することもできる。これにより、各スイッチにおいて、各 VLAN のアドレステーブルに送信ホストの MAC アドレスが登録される。ただし、ping を利用した場合、送信ホストは ping に対する pong (ICMP echo reply) を受信することはできない。ping が宛先ノードに接続されているスイッチから出力される際に VLAN

タグが取り払われてしまうため、例えば送信元ホストにおいて eth0.101 から ping でイーサネットのフレームを送っても宛先ホストでは eth0 が受信することになり、宛先不明としてそこで廃棄されてしまう可能性が高い。つまり、ステップ (3) で述べたように ping (echo req.) ではなく、pong を伴わないような ICMP または UDP メッセージを用いることで十分である。

本 MAC アドレス登録方式はスイッチの MAC アドレスの学習することのみが目的であり、MPI などで発生する並列計算の通信レイヤ、通信経路には影響を与えない。

なお、PC クラスタはホストの追加、削除は一般的に、LAN 環境に比べて頻繁ではない。そのため、スイッチにおいて学習した MAC アドレステーブルの保持時間を定める Aging Time を無限とするのが理想的である。ただし、本評価で使用した PowerConnect 6248 では最大値 100000 秒=11.6 日とした。そのため上記の MAC アドレスの学習手続きを 11.6 日に一度行うことでスイッチの MAC アドレステーブルを維持することができる。

4. 評価

前章で説明した PC クラスタを用いて、本 VLAN 実装により実現された様々なトポロジ、ルーティングの評価結果を示す。

評価したトポロジは図 3 VLAN #101 の単純木構造、図 3 に示した 4×2 トーラス (次元順ルーティング) (3-bit hypercube)、 4×2 完全結合 (次元順ルーティング)、 8×1 リング、 4×2 メッシュ (次元順ルーティング) の各トポロジについて、スイッチ間のリンク数を 1~6 本に変化させて評価を行った。なおトーラスの場合は 4 個の VLAN を用いて次元順ルーティングを採用した。すべてのトポロジにおいて各スイッチは IEEE 802.3x リンクレベルフロー制御を用いており、スイッチ-ホスト間のリンク数は 1 本である。また、いずれのトポロジの場合においてもリンク集約化は出発地、目的地の IP アドレス、UDP/TCP のポート番号でリンク間のトラフィック分散を行った。

並列ベンチマークは、MPICH 1.2.7.p1 を用いた IP パケットによりプロセス間通信を行った。

4.1 LINPACK

High-Performance LINPACK Benchmark (HPL)⁷⁾ により PC クラスタを用いて評価を行った結果を図 4 に示す。

Tree は図 3 VLAN #101 の単純木構造、Compl は完全結合、Torus は 4×2 トーラス、Mesh は 4×2 メッシュ、Ring は 8×1 リングの各トポロジを示し、() 内はスイッチ間リンク数である。HPL は、LINPACK Benchmark⁸⁾ の Highly Parallel Computing の実装の 1 つであり、このクラスでは数値解の精度が要求される。しかし、今回の計測では、Tree(1link)、Compl(2link)、

Mesh(1link), Mesh(6link), Ring(8link) において並列計算により求めた解の精度確認時にエラーが起きていたため、これらの計測値は参考値とする。

HPL, MPICH のコンパイルには pgcc/pgf 7.1 を用い、最適化オプションは -fastsse -tp k8-64 とした。演算ライブラリには, gcc4.2.2/pgf7.1 を用いてコンパイルを行った GotoBLAS1.22 を使用した。HPL ではシステムの特性にあったパラメータを設定することが可能である⁹⁾。今回計測に利用した HPL の主要なパラメータを表 2 に示す。

表 2 主な HPL のパラメータ

N	180000
NB	240
(P, Q)	(18, 25)
BCAST	increasing-1ring(modified)

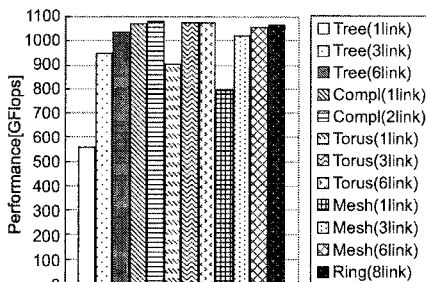


図 4 LINCACK 結果

PC クラスターのピーク性能値 (Rpeak) は 1.620TFlops である。表 4 より、提案手法を実装した各トポロジにおいて Tree(1link) に比べて約 42% ~ 約 93% 高い実効性能値 (Rmax) を計測できたことが分かる。しかし、Tree(6link) の結果と、計測最高値である Compl(2link) の結果の性能差は 4% 程度であり、LINCACK においては単純木構造にてリンク集約化技術を用いれば十分性能向上が可能であることが分かる。また、Compl(1link) の場合、Tree(6link) の場合より 14 本少ないスイッチ間リンク数で Tree(1link) に比べて約 91% の性能向上を達成できていることから、リンク 1 本あたりの性能を考慮すれば、単純木構造より完全結合のトポロジの方がリンクあたりの性能が良いことが分かる (表 3)。

表 3 スイッチ間リンク 1 本あたりの性能の比較

Topology	Tree(6link)	Compl(1link)
Links between switches	42	28
Performance (GFlops)	24.6	38.2

2003 年、9 月に Force10 Networks 社の E1200 を用い

て計測を行った際に得られた結果¹⁰⁾ との比較を表 4 に示す。E1200 は、1.44Tbps のバックプレーンを持ち、最高 336 ノード間のノンブロッキング通信が可能な超高性能スイッチである。

表 4 より、本実験で得られた最高計測値 (1081GFlops) は、256 台のホストを単一のスイッチに接続したフラットなトポロジに匹敵する値である。2003 年の計測時に比べて 62 個少ない CPU を用い、E1200 よりはるかに安価な小規模スイッチの組み合わせによってこのような性能を計測できたことが分かる。さらに、今回の評価では E1200 を用いた場合より 3.3% 高い 66.7% の実効性能割合 (Rmax/Rpeak) を得ることができた。2008 年 6 月に発表された TOP500 スーパーコンピュータのランキング²⁾ では、Gigabit Ethernet を用いた PC クラスタシステムの実効性能値は、最高で 73.6% であり、それに次いで 63.8% と続いている。このように、Gigabit Ethernet を用いた大規模な PC クラスタシステムにおいて実行性能割合が 60% を超える結果を得るのは困難であるが、今回それを大きく上回る 66.7% という結果を得ることができたことは大きな成果であると言える。

表 4 Force 10 E1200 スイッチ使用時との比較

Switch	Powerconnect6248	E1200
Number of Processors	450	512
Cable	CAT6E	CAT5E
Number of Switches	8	1
Rmax(TFlops)	1.081	1.169
Rpeak(TFlops)	1.620	1.843
Rmax/Rpeak(%)	66.7	63.4
Nmax	180000	220000

4.2 NAS Parallel Benchmarks

NAS Parallel Benchmarks 3.2¹¹⁾ を用いて、本実験の VLAN ルーティング法により実現された各トポロジにおいてアプリケーション実行性能の測定を行った。各ベンチマークの問題サイズはクラス C とし、各アプリケーションの実行プロセス数は、計算を実行できるホスト数 225 内の最大値 128 あるいは 225 とした。アプリケーションは、CG 法、FT 法、IS 法、LU 法、MG 法、BT 法、SP 法を使用した。コンパイルは gcc 3.3.6/g77 3.4.6 を用いてオプションを -O3 として行った。各トポロジでのベンチマーク性能 (Mop/s/process) を測定した結果を図 5 に示す。図 5 では、Tree(1link) における性能値により正規化している。トポロジの表記は図 4 と同様である。なお、アプリケーションの表記である CG.128 は、CG 法における実行プロセス数が 128 であることを示す。各アプリケーションにおいて、提案手法を実装したトポロジを用いることで Tree(1link) に比べて約 94% ~ 約 650% 高い性能値を計測できたことが分かる。CG 法では、Tree(1link) の結果に比べて Tree(6link) の結果

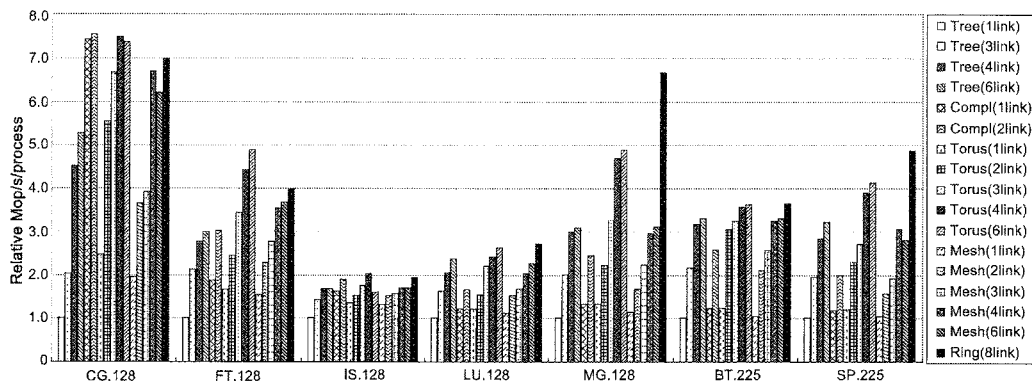


図 5 NAS Parallel Benchmarks 結果

では約 420% の性能向上を達成しているが、トポロジを Compl(2link) に変えることによってさらに約 230% 性能向上を達成している。また、他のアプリケーションにおいても、Tree(6link) の結果に比べて、提案手法を用いたトポロジの結果の方が、最低でも約 40% 高い性能を得られていることから、今回計測を行ったアプリケーションの場合、単純木構造のトポロジのままでは十分なチューニングを行うことができないことが分かった。

これらより、NAS Parallel Benchmarks では、各アプリケーションにおいてネットワークトポロジのチューニングが必要であり、用いるトポロジによっては単純木構造の場合に比べて非常に高い性能値が得られることが分かる。今回全てのアプリケーションにおいて、VLAN を用いてチューニングを行ったトポロジが高い性能値を得られており、VLAN ルーティング法の有効性が示されたと言える。

5. まとめ

本稿では、VLAN ルーティング法を用いてイーサネットのトポロジ、ルーティングを改良することで同志社大学の大规模 PC クラスタの性能向上を達成した報告を行った。ソフトウェアには手をいれずに最小限のシステムの更新で VLAN ルーティング法を実現するために、(1) 既存のスイッチの機能を利用して、スイッチにおいてフレームに VLAN タグを付与し、(2) スwitchの MAC アドレステーブルの学習のみに用いる (ローカルな) ネットワークアドレスをホストの作成した VLAN インタフェースに持たせた。本実装はスイッチにおける MAC アドレスの管理が容易でかつ、ホストのシステムソフトウェアは VLAN タグを扱う必要がない点で、既存の多くの PC クラスタに適用可能であるといえる。

謝 辞

本研究の一部は、科学技術振興機構「JST」の戦略的

創造研究推進事業「CREST」の支援による。

参考文献

- 1) 工藤知宏, 松田元彦, 手塚宏史, 児玉祐悦, 建部修良, 関口智嗣: VLAN を用いた複数パスを持つクラスタ向き L2 Ethernet ネットワーク, 情報処理学会論文誌コンピュータリングシステム, Vol. 45, No. SIG 6(ACS 6), pp. 35-43 (2004).
- 2) Top 500 Supercomputer Sites: <http://www.top500.org/>.
- 3) 大塚智宏, 鯉淵道紘, 工藤知宏, 天野英晴: スイッチでタグ付けを行う VLAN ルーティング法, 情報処理学会論文誌コンピュータリングシステム, Vol. 47, No. SIG 12(ACS 15), pp. 46-58 (2006).
- 4) Sharma, S., Gopalan, K., Nanda, S. and cker Chiueh, T.: Viking: A Multi-Spanning-Tree Ethernet Architecture for Metropolitan Area and Cluster Networks, *Infocom*, pp. 2283-2294 (2004).
- 5) 三浦信一, 岡本高幸, 朴泰祐, 佐藤三久, 高橋大介: tagged-VLAN に基づく PC クラスタ向け高バンド幅 ツリーネットワークの開発, 情報処理学会研究報告 2005-HPC-104, pp. 13-18 (2005).
- 6) 住元真司, 久門耕一, 朴泰祐, 佐藤三久, 宇川彰: PACS-CS のための Ethernet を用いた高性能通信機構の設計, 情報処理学会研究報告 2005-HPC-103, pp. 139-144 (2005).
- 7) HPL - A Portable Implementation of the High-Performance Linpack Benchmark for Distributed-Memory Computers: <http://www.netlib.org/benchmark/hpl/>.
- 8) The Linpack Benchmark: <http://www.netlib.org/linpack/>.
- 9) 笹生健, 松岡聡: HPL のパラメータチューニングの解析, ハイパフォーマンスコンピューティング, Vol. 91, No. 22, pp. 125-130 (2002).
- 10) 廣安知之, 三木光範, 荒久田博士: テラフロップスクラスタの構築と Benchmark による性能評価, 同志社大学理工学研究報告, Vol. 45, No. 4, pp. 187-198 (2005).
- 11) Saphir, W., Wijngaart, R., Woo, A. and Yarrow, M.: New Implementations and Results for the NAS Parallel Benchmarks 2, *8th SIAM Conference on Parallel Processing for Scientific Computing* (1997).