

ユーザ挙動モデルに基づく教育用システムに適したネットワーク構成の検討

石原 進[†] 小島 英樹^{††} 岡田 稔^{†††}

大学などの集合情報処理教育施設においては、NFS などの分散ファイルシステムを用い、数千人以上のユーザデータや共有データを管理しているところが多い。このような環境においては、授業利用時のユーザによる一斉操作によるネットワーク、サーバへの負荷集中への対応がシステム設計において重要である。本論文では Ethernet を基本とした様々なネットワーク構成例において、ユーザ操作による NFS および NFS サーバへのアクセス負荷集中を想定したシミュレーションを行い、教育用システムに適したネットワーク構成指針を示す。授業利用時のユーザ挙動に即したシミュレーションを行うため、教育用システムでの実測データに基づくモデルを用いた。シミュレーション結果に基づく性能とコスト面からの検討により、教育用システムにおいては媒体共有型の 100 Mbps Ethernet による構成もしくはスイッチング型 Ethernet を用いた 10/100 Mbps のビッグパイプ構成が適切であることを明らかにした。

A Study of Proper Designs of Networks for Educational Computer Systems Based on User Behavior Models

SUSUMU ISHIHARA,[†] HIDEKI KOJIMA^{††} and MINORU OKADA^{†††}

In concentrated educational computer facilities for information processing at universities which have many users more than 10000, distributed file systems like NFS are widely utilized for maintaining user data and public data. It is very important for designing those systems to avoid a performance decline by network access concentrations to the networks and servers caused by users' operations. We evaluated the performance of various network topologies based on Ethernet to find proper designs for the networks for educational computer systems by simulations in the access concentration scenarios. To simulate users behavior in educational systems, we utilized models based on measured behavior in actual educational systems. Simulation results and the cost evaluation of LAN systems prove that shared 100 Mbps Ethernet or 10/100 Mbps big-pipe topology using switching Ethernet are suitable for educational computer network systems.

1. はじめに

大学などの情報処理教育施設などのワークステーションを主体とした大規模集合型情報処理教育システムの多くでは、ユーザの個人データや共有データを NFS などの分散ファイルシステムによって管理している。このような施設における LAN (教育用 LAN) では、授業利用時におけるネットワークへの負荷集中がそのネットワーク設計において問題になる。

分散ファイルシステムを用いた場合、ユーザのホームディレクトリ、アプリケーションプログラムや演習資料などの共有データはファイルサーバ (FS) 上に保存され、クライアントワークステーション (CWS) のユーザがそれらを利用するときには FS・CWS 間でのファイル読み込み、書き込み操作が行われる。これらの操作の多くは教官の指示に従った学生が CWS を操作した結果として行われることが多い。いわば「よーいどん」で一斉に操作を行う状況である。最悪の場合全ユーザが同時に操作を行うことになり、この場合 LAN, FS への負荷は多くの端末から大量に発生されることになる。この結果ユーザの操作に対する応答時間が長くなる。

十分に速いユーザ応答速度を保ちかつ低コストでネットワークを設計するためには、上記のような過

[†] 静岡大学情報学部

Faculty of Information, Shizuoka University

^{††} KDD 株式会社

KDD. Co., Ltd.

^{†††} 中部大学工学部

School of Engineering, Chubu University

渡的な負荷集中の発生についての考慮が重要である。ユーザの一斉操作によって発生する LAN への時間的負荷集中を避けるため、様々なネットワークポロジが教育用 LAN 向けに提案されてきた^{1),2)}。Ethernet を用いたクライアント・サーバ型システムの最も単純な構成は、FS と CWS を同一の Ethernet コリジョンドメインに接続する方式であるが、この場合、コリジョンドメイン内の端末数が大きい場合には Ethernet 上でのパケットの衝突が頻発することが予想される。岡田ら¹⁾は数十台の CWS ごとにコリジョンドメインを分け、各ドメインをそれぞれ複数のネットワークインタフェースを持つ FS に接続する方式を提案している。この方式を基本にした構成の場合、各コリジョンドメインに接続する CWS の台数、および接続する Ethernet の方式の選択がその性能を左右する要因となる。

筆者らは現実の教育用 LAN におけるユーザの挙動の計測に基づいて負荷集中状態のモデル化を行い、シミュレーションにより Ethernet を基本とした接続方式におけるネットワークの性能評価を行ってきた^{3)~5)}。本論文ではスイッチング型、媒体共有型およびギガビット Ethernet による 6 種の構成方式における性能比較を行い教育環境に適切な LAN 構成の指針を提案する。以下、2 章で教育用 LAN における負荷集中時の性能評価を行うためのモデリング方および負荷集中モデルについて述べ、3 章ではシミュレーション結果とそれにより得られた教育用 LAN の設計指針についてまとめる。

2. 教育用 LAN の負荷集中のモデル化

2.1 シミュレーションの場面設定

シミュレーションを行う条件として以下のような状況を想定した。

- 1 台の FS と N ($= 1 \sim 150$) 台の CWS から構成される Ethernet LAN。
- NFS version 2⁶⁾ および FTP による FS から CWS への 1 MB のファイル転送。
- 教官の合図に従ったユーザの一斉操作により、CWS でファイル転送要求が発生。

転送ファイルサイズ 1 MB は中規模のプログラムファイルおよび教材の FS から CWS へのロードを想定している。1 MB 前後の実行ファイルサイズを持つ UNIX 上で動作するプログラムの例としては Ghostscript, GIMP, Lynx, GDB, XV などがあげられる。また教材として利用されるファイルとしては、サンプルプログラムのソースファイル, 実行ファイル, PostScript

ファイルなどが想定される。名古屋大学情報処理教育センターでの統計では、教師、講義用 ID を含む利用者のファイルサイズの大半は 1 MB に満たないことが分かっている⁷⁾。

2.2 シミュレーションモデル

シミュレーションには筆者らの設計による多階層イベント駆動型ネットワークシミュレータ⁴⁾を使用した。本シミュレータでは NFS および TCP/IP の再送制御およびフロー制御, Ethernet の CSMA/CD アルゴリズムを忠実にモデル化している。各端末のモデルは各階層のプロトコルモデル, アプリケーションモデルおよびユーザ挙動モデルから構成される。

シミュレーションは以下のような手順で行われる。まず、ユーザ挙動モデルが定義する分布に従い各 CWS のユーザの操作時刻が乱数により決定され、イベントが発生する。このイベントを受け取った CWS の端末モデル上のアプリケーションモデルでメッセージの生成が行われ、各階層のプロトコルモデルの動作を介して FS へのメッセージ送出行われる。以後のメッセージ生成・送信はアプリケーションモデルおよび各階層のプロトコルモデルの動作に従って行われる。

なお、本シミュレーションでは Ethernet 送信部の待ち行列長に制限を設けていない。また本研究では、ネットワーク自体の構成方式の検討を目的として、ファイルサーバは十分に高速であると仮定し、ディスクアクセスおよび CPU 動作による遅延は無視している。

2.3 ユーザ挙動モデル

ユーザ挙動モデルは CWS におけるユーザの操作が行われる時刻 t_{start} の分布を定義する。筆者らは集合型情報処理教育施設の現場で教官の指示に対して学生がマウスのダブルクリック (GUI: Graphical User Interface) で応答するまでの時間、およびキーボード操作 (CUI: Command User Interface) による応答時間を測定し、この結果に基づいた 3 つのユーザ挙動モデルを作成した³⁾。マウス操作による応答時間の測定のサンプル数はのべ 127 人である。また、キーボード操作による応答時間の測定は 3 文字, 7 文字, 15 文字のコマンドに対して行い、サンプル数はのべ 123 人である。

ユーザ挙動モデルは、正規分布 $N(\mu, \sigma)$ においてユーザの操作時刻 t_{start} が $t_{start} < 0$ となる確率を 0 となるように変形した次式の分布で表現した。

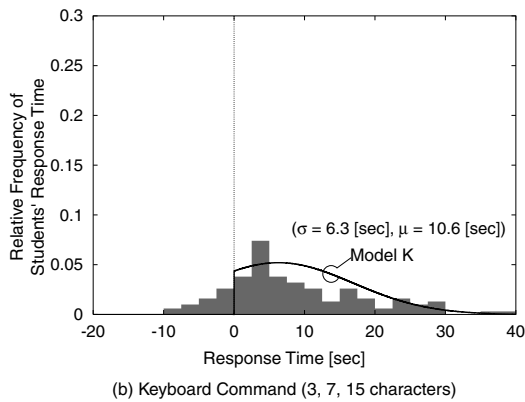
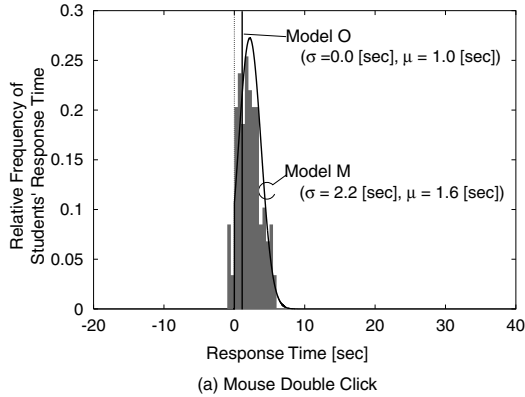


図 1 ユーザ挙動モデル

Fig. 1 User behavior models.

$$f(t_{start}) = \begin{cases} \frac{\exp\left(\frac{-(t_{start} - \mu)^2}{2\sigma^2}\right)}{\int_0^{\infty} \exp\left(\frac{-(\xi - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) d\xi} & (t_{start} \geq 0) \\ 0 & (t_{start} < 0) \end{cases} \quad (1)$$

図 1 は学生の応答時間の分布と今回用いたユーザ挙動モデルである。モデル M, K はそれぞれ、ユーザの応答がそれぞれ GUI, CUI で行われることを想定している。パラメータ μ, σ の値は図 1 に示すとおりである。またモデル O はユーザ操作が完全に同時に行われたと仮定した理想モデルである。

2.4 アプリケーションモデル

FS, CWS 間のファイル転送を行うアプリケーションとして、FTP と NFS の 2 種類のシミュレーションを行った。FTP と NFS では信頼性の保証の方法が異なる。FTP が TCP 上で動作し、その信頼性が TCP のスライディングウィンドウを用いた再転送付き肯定確認応答により保証されるのに対し、NFS は UDP および RPC 上で動作し、CWS 側のタイムアウト・アン

表 1 TCP のパラメータ
Table 1 TCP parameters.

	サイズ [bytes]
TCP 送信ウィンドウ	8192
TCP 受信ウィンドウ	8192
アプリケーション送信バッファ	32768
アプリケーション受信バッファ	32768

ド・リトライで信頼性を保証する。これらの処理方法はシステムの実装方式によって異なり、それが性能を左右する。シミュレーションでは TCP の実装方式は UNIX 4.3 BSD Tahoe Release⁸⁾ に従い、NFS の実装方式およびパラメータは SunOS 4.1 のデフォルトに従うことにした。TCP のパラメータを表 1 に示す。

NFS および FTP でファイル転送を行う場合には、実際には伝送路の確立などのための複数のメッセージ交換が行われるが、シミュレーションでは単純化した。NFS version 2 では一度の要求で 8 Kbytes ごとにしか読み込みができないので、NFS のモデルでは、ユーザ挙動モデルで決定された時刻から、CWS からの要求と FS からの応答を繰り返す。FTP のモデルでは、CWS から送られたファイル転送要求の 1 メッセージに対して FS から連続して応答が返るのみとした。

2.5 接続方式

教育用 LAN の適切な設計指針を得るため、CSMA/CD 方式の媒体共有型 Ethernet による 3 種類、スイッチング型の Ethernet による 3 種類、計 6 種の接続方式(表 2)を想定した。すべての方式で FS とすべての CWS は 1 台のリピータハブまたはスイッチングハブに接続されているものとし、Ethernet の接続方式(媒体共有型・スイッチング型)と伝送速度を変化させた。6 種のうち 5 つは FS 側と CWS 側の伝送速度を同じにしてあるが、BigPipe10M/100M は FS 側の伝送速度が CWS 側よりも高速なビッグパイプ型の構成となっている。Shared-1G を除いてハブと端末間のケーブル長は 10BASE T および 100BASE TX で定める最大長である 100 m とした。スイッチングハブの方式はストア・アンド・フォワード形式であるとし、スイッチング時間は 0 とした。

Shared-1G は CSMA/CD 方式のギガビット Ethernet 1000BASE X であり、10 Mbps および 100 Mbps の従来の Ethernet の CSMA/CD に 2 つの変更、(i) 最小フレームサイズよりも大きなスロット時間を扱うためフレーム送信後にスロット時間に達するまでキャリアを送信し続けるキャリア拡張、(ii) キャリア拡張による有効帯域の減少を防ぐため、規定された時間以内であれば 1 つのノードが連続してフレームを送信で

表 2 検討対象とした接続形式
Table 2 Examined network topologies.

	方式	サーバ	クライアント
Shared-10M	CSMA/CD	10 Mbps	10 Mbps
Shared-100M	CSMA/CD	100 Mbps	100 Mbps
Shared-1G	CSMA/CD	1 Gbps	1 Gbps
Switched-10M	スイッチ (全二重)	10 Mbps	10 Mbps
Switched-100M	スイッチ (全二重)	100 Mbps	100 Mbps
BigPipe-10M/100M	スイッチ (全二重)	100 Mbps	10 Mbps

きるようにするフレームバースティングが行われている⁹⁾。ケーブル長は端末間の遅延が 1000BASE X で定める最大値と等しくなるようにした。

3. シミュレーション結果

3.1 応答時間

ここでは、CWS から最初のリクエストが送信されてから、CWS が要求したファイルの全体を受信するまでの時間を応答時間と定義する。図 2 に CWS 数 N と全 CWS での平均応答時間 T の変化を示す。

3.1.1 媒体共有型

図 2 (a) から分かるように、Shared-10M の NFS における T は、ユーザ挙動モデル M の場合、 N にほぼ比例して増加している。モデル O との違いは小さい。モデル K の場合、 $N > 20$ では他のモデルと同様の増加率を示すが、 $N < 20$ では T の増加率は非常に小さい。図 2 (b) に示す Shared-100M のモデル M では、 $N = 30$ を境として同様の傾向が見られる。これは N が小さいときには要求発生時刻のばらつきのために、複数台の CWS による競合がほとんど起きないためである。この領域が Ethernet の使用環境における理想状態といえよう。

また、Shared-10M では、 N が 100 を超えると、すべてのモデルで T は急激に増大する。これは NFS の要求の再送タイムアウト発生が原因である。NFS の各要求に対する平均サーバ応答時間は $N = 100$ 付近で再送タイムアウトを超えており、このため CWS からの要求の再送が頻発していることが確認されている¹⁰⁾。この状態ではパケットの消失がないにもかかわらず、要求の再送が行われることになる。要求の再送が発生すると、CWS からの再送要求メッセージ数、FS からの重複した応答数により、ネットワーク負荷はさらに増大する。NFS のパラメータの調節、CWS 台数の削減によってこのような状況の発生を避けるべきである。

一方 FTP の場合、 T の急激な増加は見られない。FTP は TCP 上で動作するが、TCP におけるデータの再送は送信側で動的に設定される再送タイムアウト

によって制御される。このため、NFS で起きたように、パケットの消失が実際には起きていない場合に再送が行われることが少ない。また、再送が送信側である FS から行われるので、台数の多い CWS からの再送要求によるトラヒックの増加が少ない。このため、NFS の場合のような急激な T の増大は起きなかったと考えられる。

図 2 (c) から分かるように、Shared-1G では、モデル M、K とともにアクセス集中による影響はまったく見られなかった。図 3 に NFS における Shared-100M の場合の $T/10$ との比較を示す。Shared-100M の $T/10$ のモデル M では $N = 30$ 付近で増加率の上昇があるが、Shared-1G の場合にはそれが無い。

媒体共有型のギガビット Ethernet では、従来の Ethernet CSMA/CD に対して、キャリア拡張とフレームバースティングの 2 つの拡張が行われている。フレームバースティングはキャリア拡張による有効帯域の減少を防ぐための技術だが、コスト削減のためにこの機能が実装されない場合も多い。図 3 に 2.5 節で述べたフレームバースティングの有無による性能の比較を示す。フレームバースティングの使用による性能向上効果は見られなかった。今回想定した条件では、トラヒックの大半はサーバからの最大サイズの Ethernet パケットから構成される。このため、フレームバースティングによって連続送信されることになる短いパケットが少なかったため、このような結果になったと考えられる。

3.1.2 スイッチング型

スイッチング型では、媒体共有型で発生する Ethernet パケットの衝突が発生しないため、特に CWS 数が多い場合に性能の向上が期待される。図 2 (a), (d) から分かるように、伝送速度 10 Mbps の場合、スイッチング型と媒体共有型で T は大きく異ならなかった。一方、図 2 (b), (e) で示すように、伝送速度 100 Mbps の場合には大きな違いが見られる。特にモデル O の場合、Shared-100M では N が小さいときに T が急激に増加するが、Switched-100M では、 T は N に比例して増加している。モデル M における T の増加

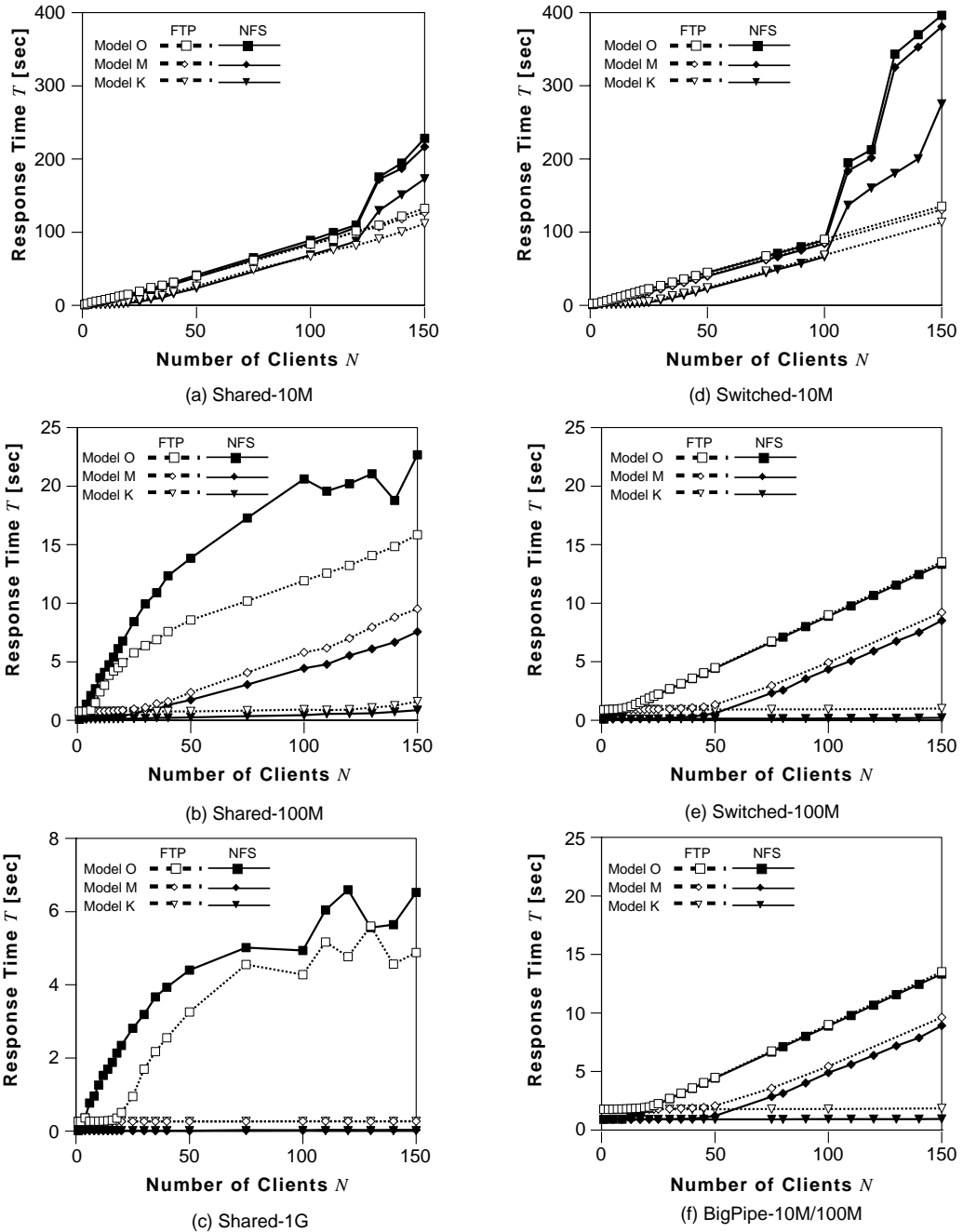


図 2 サーバ応答時間

Fig. 2 Server response time.

率の変化点は Shared-100M の $N = 30$ から $N = 50$ になっている。なお、媒体共有型とスイッチング型の詳細な比較では、CWS 間で応答時間のばらつきが少なく、システム全体として公平なデータ転送が可能であることが分かっている⁵⁾。

BigPipe-10M/100M (図 2(f)) では、Switched-

100M (図 2(e)) とほぼ同様の結果が得られた。FS からの送信が主の場合、ハブ・CWS 間の伝送速度を 10 Mbps にしても、性能に影響はないといつてよい。今回想定した条件とは逆に、CWS からのデータ転送が集中した場合には、CWS 側の小さい伝送速度が問題になるだろう。しかしながら教育用 LAN における

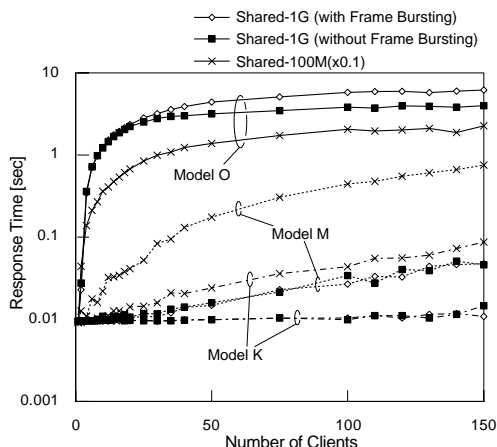


図 3 媒体共有型ギガビット Ethernet と媒体共有型 100 Mbps Ethernet との比較

Fig. 3 Comparison between shared gigabit Ethernet and 100 Mbps Ethernet.

表 3 適切なクライアント台数のめやす

Table 3 Suitable numbers of client stations in educational systems.

	GUI (Model M)	CUI (Model K)
Shared-10M	10 台以下	20 台以下
Shared-100M	30 台以下	150 台以下
Shared-1G	少なくとも 150 台	少なくとも 150 台
Switched-10M	10 台以下	20 台以下
Switched-100M	50 台以下	150 台以下
BigPipe-10M/100M	50 台以下	150 台以下

使用条件では、FS 上のプログラム、資料などの大容量ファイルを CWS に送信することが多く、CWS からの大容量ファイルの転送が時間的に集中して行われるケースは少ない。

3.2 教育用 LAN の適切な設計指針

前節に示した結果より得られた、サーバの 1 つのネットワークインタフェースに接続する CWS の適切な台数のめやすを表 3 に示す。これらの台数の選択の基準は、アクセス集中時に 1 Mbytes のファイル転送要求に対する応答時間が 10 秒以内であり、 N に対する増加率の変化がないこととした。

教育用施設の 1 教室に 30 台から 50 台程度の学生用 CWS を設置することを考慮すると、ビッグパイプ型を含む媒体共有型、スイッチング型の 100 Mbps Ethernet は適切な選択肢であるといえよう。しかしながら、コスト面を考慮すると、スイッチング型のネットワークを構成する場合にはビッグパイプ型を選択す

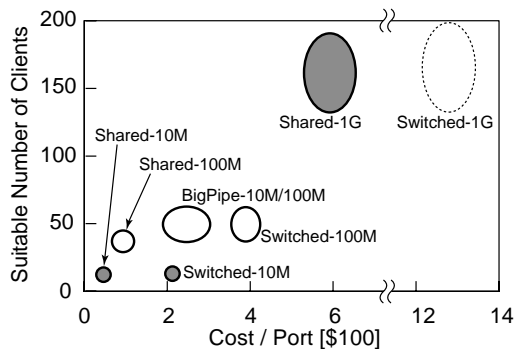


図 4 教育用 LAN における Ethernet のコストと性能の関係
Fig. 4 Cost performance of Ethernet LANs in educational systems.

るのが望ましい。図 4 は今回評価したネットワーク構成の教育用 LAN における性能と 1999 年度におけるポートあたりの予想コストの関係を示している¹¹⁾。すべての端末を 100 Mbps で接続するスイッチング型と比較して、ビッグパイプ型および 100 Mbps の媒体共有型の性能に大きな違いはなかったが、コスト的にはこれらの方式が有利である。

また、今回比較した中では媒体共有型ギガビット Ethernet の性能が群を抜いているが、その価格はスイッチング型ギガビット Ethernet の半分、100 Mbps のスイッチング型の 2 倍以下である。また、アクセス集中時の性能は媒体共有型 100 Mbps Ethernet の 10 倍以上であった。媒体共有型ギガビット Ethernet の導入効果は高いといえよう。

4. ま と め

教育用 LAN 上の分散ファイルシステムにおける授業利用時のネットワーク負荷集中を防ぐための適切なネットワーク設計を得るため、ユーザの挙動モデルに基づくシミュレーションにより性能評価を行った。シミュレーションの結果、Ethernet を中心としたネットワーク構成における FS の 1 ネットワークインタフェースあたりの適切な CWS 数を得ることができた。設置コスト、負荷集中が起きた場合のユーザ操作に対する応答時間を考慮して現時点での教育用 LAN に適したネットワーク構成を選ぶとすると、30 から 50 台の学生用 CWS を保有する教室では、媒体共有型の 100 Mbps Ethernet もしくは、スイッチング型 Ethernet を用いた 10 Mbps/100 Mbps のビッグパイプ型の構成が適切との結論を得た。

本論文では、ファイルサーバへのアクセス集中の一例としてプログラムファイルおよび授業用の資料の FS

からのロードを対象に検討を行ったが、教育現場では WWW による教材提示を利用するケースが増加している。WWW を用いた場合、それによるネットワークトラヒックの特性として比較的小さなサイズのデータが断続的に転送要求されるという特徴がある。1つの WWW ページに含まれるデータの総量が 1MB を超えるケースは少ないため、サーバへのアクセス集中の度合いは今回想定した条件よりも低いと考えられるが、各 CWS からの断続的なファイル転送要求の発生は今回想定した CWS が 1 回のみ転送要求を行う条件とは異なる。この点に関しては今後の検討課題としたい。

また今後、VOD (Video On Demand) などによるマルチメディア教材の提供を行うことが多くなると予想される。サーバから受信したデータの連続再生を行う授業形態を想定すると、ネットワークへの負荷は今回想定したように一時的に高くなるのではなく、授業中つねに高い状態が持続されると考えられる。このため、それをサポートするネットワークの構築は想定される定常的なトラヒックの最悪ケースをサポートするべきであろう。

なお、今回の評価では FS の CPU 負荷、ディスクアクセス遅延などは考慮しなかったが、ギガビット Ethernet 環境の評価結果には少なからず影響を与えるであろう。サーバ負荷の考慮、および複数サーバ構成における性能予測は今後の課題である。

謝辞 本研究は文部省科学研究費補助金による研究成果である。

参 考 文 献

- 岡田 稔, 櫻井桂一, 岩田 晃: 教育用大規模分散 WS システムの一構成方法, 情報処理学会論文誌, Vol.37, No.12, pp.2447-2456 (1996).
- 中山 仁, 大西淑雅, 末永 正, 有田五次郎: 工学系学生のための情報処理集合教育環境の設計と構築, 情報処理学会論文誌, Vol.35, No.11, pp.1442-1452 (1994).
- 石原 進, 岡田 稔, 岩田 晃, 櫻井桂一: 教育用 LAN の通信量解析, 1996 年情報学シンポジウム講演論文集, pp.17-23 (1996).
- Ishihara, S. and Okada, M.: A modeling and simulation method for transient traffic LAN, *Trans. IEICE*, Vol.E-80-B, No.8, pp.1239-1247 (1997).
- 小島英樹, 石原 進, 岩田 晃, 岡田 稔: イベント駆動シミュレーションによるイーサネットハブの特性解析, 電子情報通信学会技術研究報告・情報ネットワーク研究会, IN97-165 (1998).
- Sun Microsystems: NFS: Network file system protocol specification, RFC 1094 (1989).
- 小島英樹, 石原 進, 岩田 晃, 岡田 稔: 大規模分散型教育用ワークステーションシステムの利用実態, 情報処理学会研究報告・分散システム運用技術研究会, 97-DSM-5 (1997).
- Leffler, S.J., McKusick, M.K., et al.: *The design and implementation of the 4.3BSD UNIX operating system*, Addison-Wesley Publishing Company (1989).
- Molle, M., Kalkunte, M.H. and Kadambi, J.: Frame bursting: A technique for scaling CSMA/CD to gigabit speeds, *IEEE Mag. Network*, Vol.11, No.4, pp.6-15 (1997).
- 石原 進, 岡田 稔: ストール率による高負荷 CSMA/CD LAN のトラヒック解析, 電子情報通信学会技術研究報告・情報ネットワーク研究会, IN97-106 (1997).
- Gigabit Ethernet Alliance: Gigabit Ethernet Overview. http://www.gigabit-ethernet.org/technology/whitepapers/gige_0698/geal1998v3.pdf (1998).

(平成 11 年 1 月 5 日受付)

(平成 12 年 3 月 2 日採録)



石原 進 (学生会員)

平成 6 年名古屋大学工学部電気学科卒業, 平成 11 年名古屋大学大学院博士後期課程 (電子情報学) 修了, 工学博士。平成 10 年度日本学術振興会特別研究員。平成 11 年静岡大学情報学部情報科学科助手, 現在に至る。大規模計算機システムおよび情報ネットワークのモデル化に関する研究に従事。電子情報通信学会, ACM 各会員。平成 6 年度電気系学会東海支部連合大会奨励賞, 平成 9 年度電気通信普及財団賞, 平成 10 年度電子通信学会東海支部学生研究奨励賞各賞受賞。



小島 英樹

平成 8 年名古屋大学工学部電子情報学科卒業, 平成 10 年名古屋大学大学院博士前期課程 (電子情報学) 修了。工学修士。同年, 国際電信電話 KDD (株) (現 KDD (株)) 入社。企業向けネットワーク構築業務に従事。



岡田 稔(正会員)

昭和 59 年名古屋工業大学工学部電気工学科卒業，平成元年名古屋大学大学院博士課程後期課程情報工学専攻修了．工学博士．昭和 63・平成元年度日本学術振興会特別研究員，平成 2 年名古屋大学情報処理教育センター助手，平成 5 年同助教授，平成 10 年同大学院工学研究科情報工学専攻助教授，平成 11 年中部大学工学部工業物理学科教授を経て，平成 12 年 4 月同情報工学科教授，現在に至る．平成 7 年より 1 年間，米国ミシガン大学客員准教授．画像とパターンの認識・理解，計算幾何学，画像合成，マルチメディア情報通信の理論と応用に関する研究に従事．電子情報通信学会，画像電子学会，IEEE 各会員．平成 4 年度情報処理学会研究賞，平成 6 年度市村賞学術貢献賞，平成 9，11 年度電気通信普及財団賞各受賞．著書「C によるプログラミング演習」(近代科学社)，「情報科学基礎論」(朝倉書店)，「インターネット時代のコンピュータ活用法」(コロナ社)等．
