

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[†]

[†] 名古屋大学大学院工学研究科, ^{††} 国際電信電話株式会社

あらまし: 大学などの集合情報処理教育施設においては, NFS 等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. 本研究では Ethernet を基本とした様々なネットワーク構成例に対して, 現実のユーザの挙動の測定値に基づいたモデルを用い, ユーザ操作による負荷集中を想定したシミュレーションを行った. 負荷集中時の性能とコスト面での考察を行い, 教育用システムに適したネットワーク構成を示す.

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

Susumu ISHIHARA[†], Hideki KOJIMA^{††} and Minoru OKADA[†]

[†] Graduate School of Engineering, Nagoya University, ^{††} KDD Co., Ltd.

Abstract: 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. Some guidelines to design networks for educational systems are proposed.

1 はじめに

大学等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時には 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多い場合には 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もつ 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ろう．

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][4][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 節で教育用 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 節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 $N (= 1 \sim 150)$ の CWS から構成される Ethernet LAN ．
- NFS version 2 [6] 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る，CWS でファイル転送要求が発生 ．

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

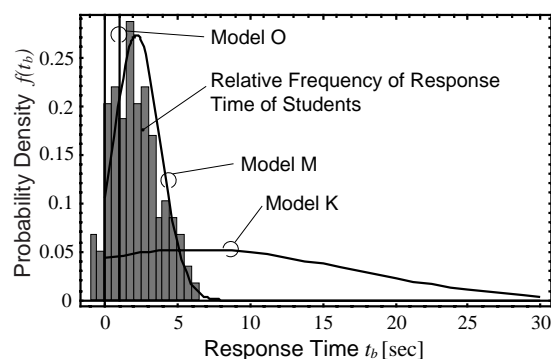


図 1: ユーザ挙動モデル

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，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で応答するまでの時間を測定し，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] ．

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，ユーザの応答がマウスクリック，キーボードによる操作で行われることを想定している．キーボードによる操作時間とユーザ間のキーボード習熟度の差を考慮し，モデル K では M よりも広い分布としている．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 の二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

表 2: 検討対象とした接続形式

	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

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 Release [7] 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だけとした。

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 と全ての 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 の方式と伝送速度を変化させた。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 に二つの変更、(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は 1 つのノードが連続してフレームを送信できるようにするフレームパースティンクが行われている [8]。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。

媒体共有型 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。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 が小さい時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

表 1: TCP のパラメータ

	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

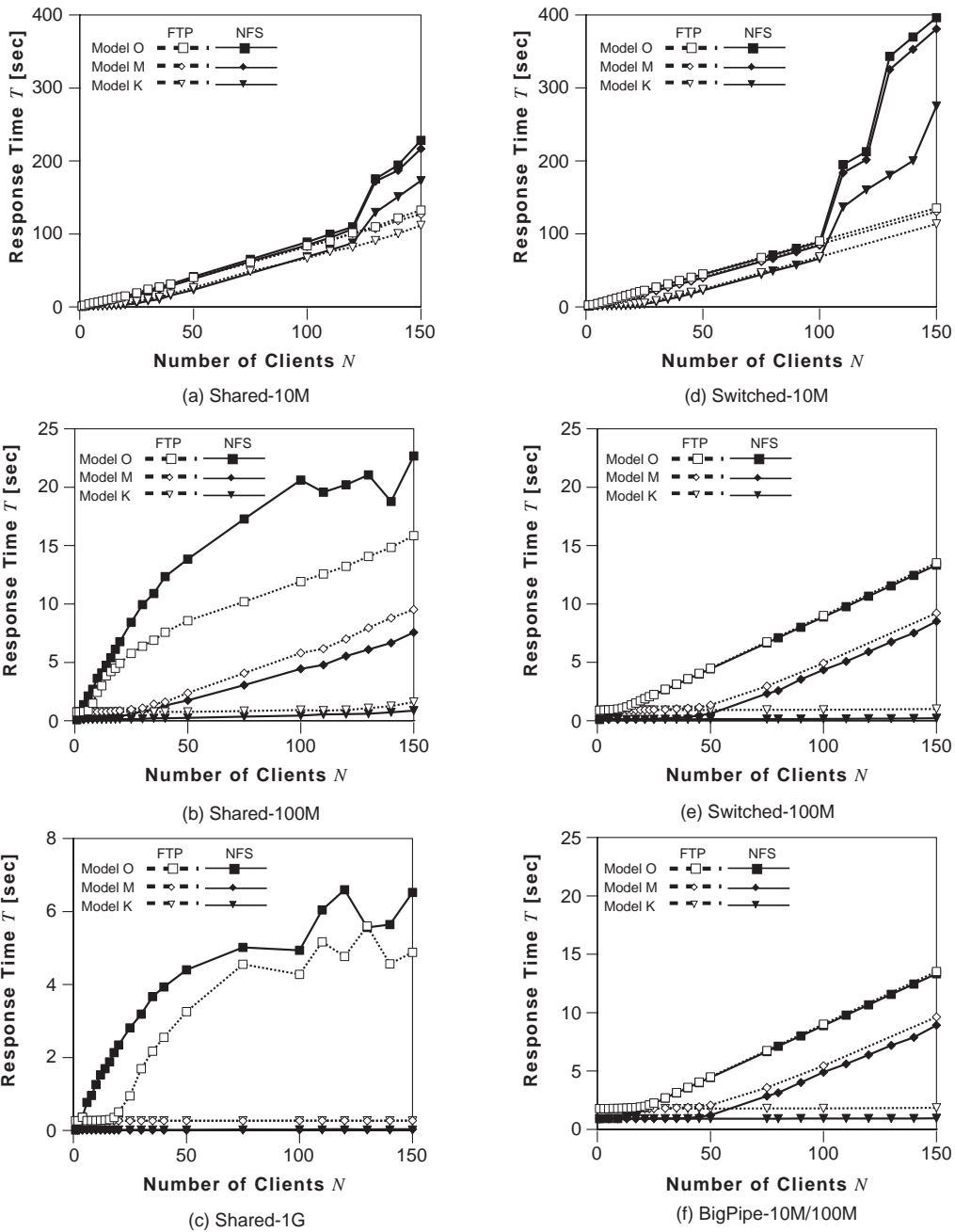


図 2: サーバ応答時間

といえよう。

また, Shared-10M では, N が 100 を越えると, すべてのモデルで T は急激に増大する. これは NFS の要求再送タイムアウトが原因である. 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越えており, 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 [9]. この状態ではパケットの消失がないにも関わらず, 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更に増大する. 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.

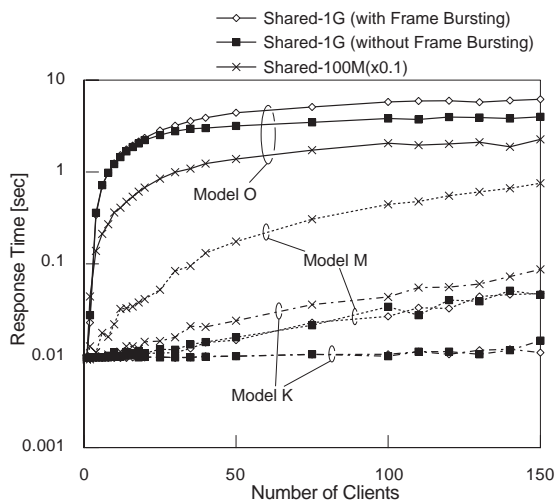


図 3: 媒体共有型ギガビット Ethernet と媒体共有型 100Mbps Ethernet との比較

一方 FTP の場合、 T の急激な増加はみられない。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。

媒体共有型ギガビット Ethernet 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全く見られなかった。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 の場合にはそれがない。

図 3 に 2.5 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。

表 3: 適切なクライアント台数のめやす

	GUI	CUI
Shared-10M	10 台以下	20 台以下
Shared-100M	30 台以下	150 台以下
Shared-1G	150 台以上	150 台以上
Switched-10M	10 台以下	20 台以下
Switched-100M	50 台以下	150 台以上
BigPipe-10M/100M	50 台以下	150 台以上

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。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、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 が小さい時に 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わかっている [5]。

BigPipe-10M/100M では、Switched-100M 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ってよい。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 での使用条件では、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

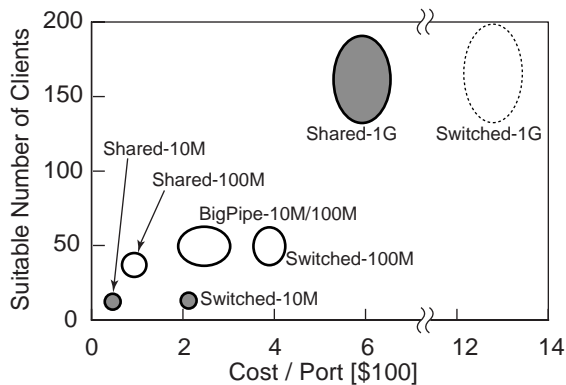


図 4: 教育用 LAN における Ethernet のコストと性能の関係

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 [10]。全ての端末を 100 Mbps で接続するスイッチング型と比較して，ビッグパイプ方式および 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 のビッグパイプ方式が適切との結論を得た。

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。

参考文献

- [1] 岡田，櫻井，岩田，“教育用大規模分散 WS システムの一構成方法，” 情処論，Vol. 37, No. 12, pp.2447-2456, 1996
- [2] 中山，大西，末永，有田，“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，” 情処論，Vol. 35, No. 11, pp. 2225-2238, 1994
- [3] 石原，岡田，岩田，櫻井，“教育用 LAN の通信量解析，” 1996 年情報情報学シンポジウム，pp. 17-23, 1996
- [4] Ishihara, S. and Okada, M., “A modeling and simulation method for transient traffic LAN,” IEICE Trans. Comm., Vol. E-80-B, No. 8, pp.1239-1247, 1997
- [5] 小島，石原，岩田，岡田，“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，” 信学技報，IN97-165, pp. 37-44, 1998
- [6] Sun Microsystems, Inc, “NFS: network file system protocol specification,” RFC 1094, 1989
- [7] Leffler, S. J., McKusick, M. K., Karels, M. J. and Quarterman, J. S., “The design and implementation of the 4.3 BSD UNIX operating system,” Addison-Wesley Publ., 1989
- [8] Molle, M., “Frame bursting: a technique for scaling CSMA/CD to gigabit speeds,” IEEE Network Mag., pp. 6-15, Jul/Aug 1997
- [9] 石原，岡田，“ストール率による高負荷 CSMA/CD LAN のトラヒック解析，” 信学技報，IN97-106, pp. 49-54, 1997
- [10] Gigabit Ethernet Alliance, “Gigabit Ethernet Overview,” http://www.gigabit-ethernet.org/technology/whitepapers/gige_0698/geal1998v3.pdf, 1998