

ストール率による高負荷 CSMA/CD LAN の トラフィック解析

石原 進[†], 岡田 稔^{††}

[†]名古屋大学大学院工学研究科, ^{††}名古屋大学情報処理教育センター

〒464-01 名古屋市千種区不老町

Tel 052-789-3906

susumu@ecip.nagoya-u.ac.jp, okada@ecip.nagoya-u.ac.jp

あらまし CSMA/CD LAN の性能評価のための新しい指標としてストール率を提案する。CSMA/CD LAN の送信遅延を増大させる要因は、伝送路の空きを待つ時間と衝突後のバックオフによる送信待機時間に大別される。ストール率はこれらがパケット送信時間中に占める割合を示すものである。ストール率によって示されるネットワーク性能は、視覚的・直感的な理解が容易であり、CSMA/CD LAN の詳細についての専門知識を持たないプロトコル上位層の設計者がシステム評価を行う上で有用である。本稿ではストール率の定義とその一般的性質について明らかにする。またストール率を用いた一般アプリケーション利用時の Ethernet LAN の性能について評価し、本指標の有効性を示す。

キーワード CSMA/CD LAN, Ethernet, NFS, FTP, シミュレーション, ネットワーク設計

Traffic Analysis of High-Loaded CSMA/CD LAN with the Stall Rate

Susumu ISHIHARA[†] and Minoru OKADA^{††}

[†]Graduate School of Engineering, Nagoya University,

^{††}Education Center for Information Processing, Nagoya University

Nagoya, 464-01 JAPAN

Tel +81-52-789-3906

susumu@ecip.nagoya-u.ac.jp, okada@ecip.nagoya-u.ac.jp

Abstract In this paper we propose a new metric index for analyzing performance of CSMA/CD LAN, the *Stall Rate*. The main portions of the latency of CSMA/CD LAN are two periods, the deferring time caused by the busyness of the channel, and the waiting time for the next retransmission after collisions. The proposed index stall rate is the ratio of these periods and the packet transmission latency. Analysing results of CSMA/CD LAN with stall rate is easy to understand and useful for system designers who are not unfamiliar with CSMA/CD LAN to understand phenomena on LAN. The definition of the stall rate and the general characteristics are described. And the examples of the stall rate analysis of the performance of CSMA/CD LAN under generally used network applications are shown.

key words CSMA/CD LAN, Ethernet, NFS, FTP, simulation, network design

1 はじめに

近年の LAN の普及およびそれに伴うシステムの複雑化により、ネットワーク管理者および設計者の負担が増加する傾向にある。彼らの業務にとって、ネットワーク性能のモニタリングおよび予測は、重要な位置を占めるが、ネットワークアナライザ、シミュレータによって表される性能値から、システムの問題追求を行うためには、高度な専門知識を要する。

スループットや送信遅延は、ネットワークの性能評価指標として広く用いられているが、それらが示す値はあくまでもネットワークの性能そのものである。システム設計者の立場からは、これらのような結果そのものを表す性能指標はもちろんのこと、その性能が得られた原因を明らかに示すことのできる評価指標が求められる。また、異なる複数の指標を用いることにより、従来明らかにできなかったネットワークの特性を発見できることも期待できる。

Ethernet に代表される CSMA/CD ネットワークの性能変化の原因を追求するための手段としては、従来より衝突数や送信遅延の分布が用いられてきた。Ethernet の仕様上の問題とされる Capture Effect¹ は Molle による送信遅延の分布の調査 [1] によってその現象の詳細が示されている。しかし、彼らの評価で行われたシミュレーションでは、上位層プロトコルのモデルは単純化されており、アプリケーション利用時における Capture Effect の影響は十分には明らかにされていなかった。一方、石田らは実際に運用中の LAN 上での特定のアプリケーション利用時におけるパケット長およびパケット発生間隔の測定し、この結果に基づいて Ethernet 単体レベルでのシミュレーション [2] を行っている。しかし、性能評価はスループットおよび送信遅延特性のみにとどまっておき、アプリケーションに依存するトラヒック特性の詳細を評価するには至っていない。

本稿では、CSMA/CD ネットワークの性能評価指標の一つとしてストール率を提案する。ストール率は、フレーム送信遅延に対する、伝送路が使用中のために待機していた時間および、衝突発生後のバックオフによる待ち時間の割合である。ストール率によって示されるネットワーク特性は、直観的な理解が容易であり、アプリケーションレベルでのネットワーク特性評価を行なう際には、利用者にとって有用な指標であると考えられる。

以下、まず 2 でストール率の概念およびそれによって表されるネットワークの特性について説明する。次に 3 で高負荷ネットワーク上でのアプリケーション利用時を想定したシミュレーションの概略を示し、ストール率を用いた評価結果を上位層プロトコルの特性と照らし合わせて示す。

¹複数端末の送信の結果衝突が起きた場合、そのフレームにおける衝突回数が少ない端末の方が、常に次に伝送路を占有できる確率が高くなる現象

2 ストール率

2.1 CSMA/CD 方式における送信遅延

まず CDMA/CD 方式の概略について Ethernet の例で簡単に説明する。Ethernet では、各端末は共有伝送路の状態を確認後、伝送路が空きならばパケット送信を開始し、伝送路が使用中であれば伝送路が空くまで待つてから送信する。送信開始後、他の端末との同時送信開始の結果パケットの衝突が起きると、ジャム信号を送信後、2 進指数バックオフによりランダム時間だけ待つてから送信を再試行する。衝突が規定回数 (Ethernet では 16 回) に達した場合は、再送信を行わない。CSMA/CD LAN においては送信遅延を増す大きな要因は、(i) 伝送路使用中による送信待ち時間 T_{CS} 、(ii) 衝突後のバックオフによる待ち時間 T_{WT} の 2 つである。

CSMA/CD LAN の性能表指標として広く用いられているスループットは T_{CS} と T_{WT} を区別なく総合的に評価するものであり、衝突数または衝突率は T_{WT} について評価するものである。これら 2 つの指標はネットワークアナライザで容易に取得可能であるが、これらのみから LAN 上での現象を直観的に把握するのは困難である。一方、詳細なシミュレーションによる評価を行う場合、 T_{CS} と T_{WT} はそれぞれ容易に取得可能である。 T_{CS} T_{WT} それぞれについて送信遅延との比較を行うことで、これらの直観的かつ総合的な評価が可能であると考えられる。

2.2 ストール率の定義

ストール率は、パケットの送信を開始してから送信の成功または 16 回の衝突によって終了するまでの時間 (パケット送信遅延) に対する伝送路使用中による送信待ち時間の比率、および衝突後のバックオフによる待ち時間の比率を示したものである。ここで、端末 i における測定期間内のパケット送信遅延の和を $T_{XMT}^{(i)}$ 、衝突後のバックオフによる待ち時間の和を $T_{WT}^{(i)}$ 、伝送路使用中による送信待ち時間の和を $T_{CS}^{(i)}$ とする。これより、 N 台の端末における平均ストール率は以下のように定義される。

$$\begin{aligned} \text{平均 CS ストール率} & R_{CS} = \frac{\sum_{i=1}^N T_{CS}^{(i)}}{\sum_{i=1}^N T_{XMT}^{(i)}} \\ \text{平均 WT ストール率} & R_{WT} = \frac{\sum_{i=1}^N T_{WT}^{(i)}}{\sum_{i=1}^N T_{XMT}^{(i)}} \\ \text{平均トータル ストール率} & R_T = R_{CS} + R_{WT} \end{aligned} \quad (1)$$

CS (Carrier Sensing) ストール率は送信遅延に対する伝送路の空き待ちのために送信できなかった割合を示し、WT (WaiTing) ストール率は衝突後のバックオフによる送信再

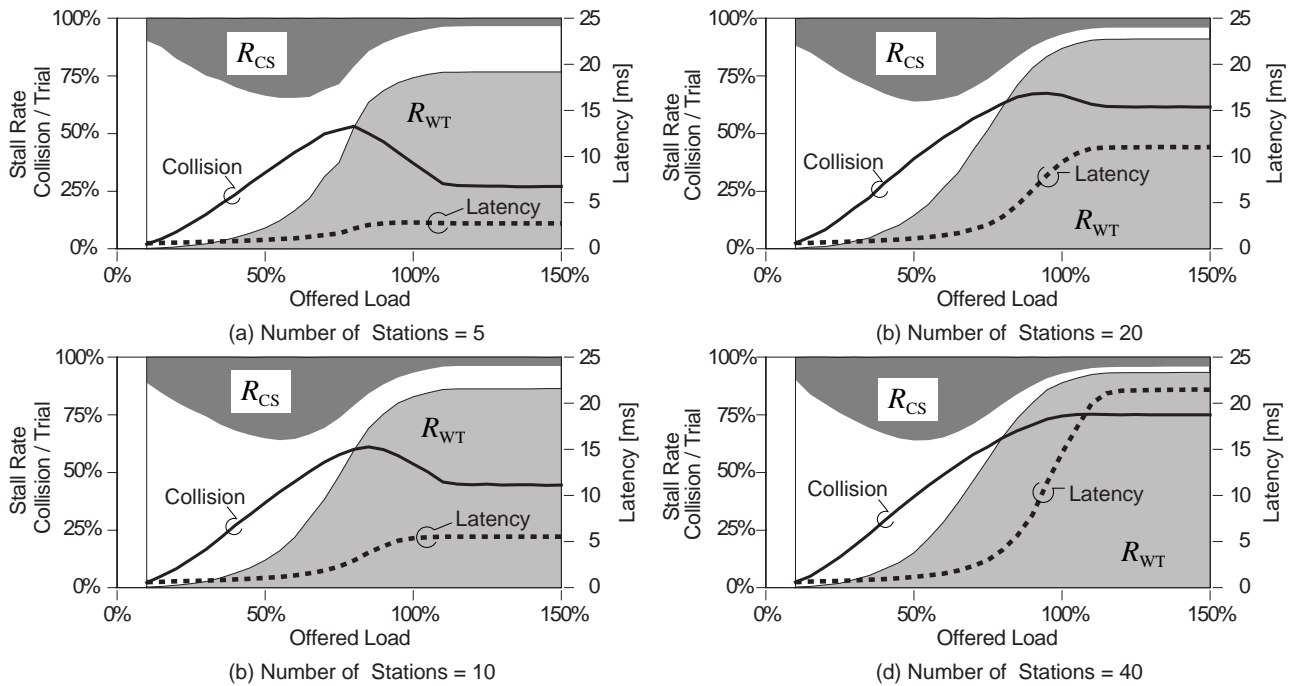


図 1: データトラフィック発生時の平均ストール率

試行の待ち時間の割合を示す。

2.3 ストール率とトラフィック特性

ここでは、ストール率と CSMA/CD LAN の特性との関連について説明する。

CS ストール率 伝送路の空きを待っている時間 T_{CS} は、ネットワークの負荷およびネットワーク全体の平均パケット長に依存する。ネットワークの負荷が高いほど、パケット送信時に伝送路が占有されている確率が高い。また、伝送路が占有されている場合の待ち時間は平均パケット長に比例する。このため、 R_{CS} はネットワークの負荷が高いほど大きな値を示すことになる。またネットワーク内の一部の端末について R_{CS} を評価した場合、それら端末における平均パケット長に対してネットワーク全体の平均パケット長が長ければ R_{CS} は大きくなる。

WT ストール率 衝突後のバックオフによる待ち時間 T_{WT} は、1 つのパケット送信あたりの衝突回数とともに増加する。このため R_{WT} はネットワーク上で衝突が多く発生すればするほど、衝突が連続して発生すればするほど大きくなる。

トータルストール率 トータルストール率 R_T はネットワークへの送信が滞った割合を示している。逆に $1 - R_T$ はネットワーク全体のスループットを表していると言える。

表 1: パケット長分布

Length [byte]	Probability
64	0.304
144	0.083
220	0.080
576	0.100
1072	0.250
1500	0.183
Average	649.1Bytes

R_T に対する R_{CS} R_{WT} の内訳はネットワークへの送信が滞った原因を示している。

なお、 R_T 、 R_{CS} 、 R_{WT} はパケット送信遅延に対する T_{WT} の比であるので、平均パケット長が長い場合には、相対的に小さな値を示すことになる。

表 1 で示したパケット長分布 [4] のデータトラフィック発生をシミュレートした場合のストール率の例を図 1 に示す。同図には参考のため衝突率 (パケット送信試行回数に対する衝突回数の比) とパケット送信遅延をともに示した。シミュレーションでは送信要求の発生間隔は指数分布とし、ネットワークは Ethernet 10 BASE-T で 1 台の HUB にすべてのノードが 10 m のケーブルで接続されているとした。シミュレーションは筆者らの設計によるイベント駆動方式のシミュレータ [3] を使用した。

図 1 中で白く塗られていない部分が $R_T = R_{CS} + R_{WT}$

を示している。ネットワークの負荷が増大するにつれて白い部分が減少し、ネットワークインターフェースが送信処理を行なっても実際には信号が送信されなくなることがわかる。また R_{CS} , R_{WT} の値から送信効率を減少させる要因が直観的に理解できる。

負荷 70 程度までは R_{CS} が大きな値を占め、 R_{WT} は小さい。これはある端末が送信を開始しようとした場合に伝送路が占有されていた場合、伝送路が空いた時点で送信を開始すればすぐに伝送路を占有できる確率が高いことを示す。言い換えれば、伝送路の空きを待っている端末がただか 1 台であり、伝送路が空いた時点で送信を開始しても他の端末の送信と衝突することがないことを示している。

R_{WT} は負荷が増大するにつれて衝突率ともに増大し、負荷 70 % 程度で R_{CS} 送信遅延の大半を占める様子がよくわかる。Ethernet で採用されている二進バックオフ調停アルゴリズムでは、衝突数が増加した場合、伝送路の空きを待っている時間 T_{CS} は衝突回数 n に対し $O(n)$ であるが、バックオフによる待ち時間 T_{WT} は $O(n^2)$ になる(ただし、Ethernet ではパケット 1 つの送信あたり衝突は 16 回まで)。このため、衝突回数が増加した場合には R_{WT} が急激に大きくなる。また端末数が多くなるにつれて衝突率が増加し、それが直接送信遅延に反映されている。

3 アプリケーション利用時の Ethernet 特性評価

本章では現実的な高負荷 LAN 環境の一例として、集合情報処理教育環境におけるクライアントサーバシステムをとりあげ、この環境下でネットワークアプリケーションを利用した場合の CSMA/CD LAN の特性をシミュレーションにより評価する。

3.1 場面設定

ネットワーク 1 台のファイルサーバと N 台のクライアント WS が 1 台の HUB に 10 m のケーブルを介して接続されている Ethernet 10 BASE-T (10 Mbps) LAN。

トラフィック発生源 集合情報処理教育用システムで最もネットワークアクセスが集中するのは、授業利用時に教官の指示のもとに学生が一斉にネットワークアクセスを伴う操作を行うときである。教官の指示後の学生の反応時間をモデル化するため、各クライアントワークステーション (WS) がサーバ WS に対してリクエストを送信する時刻 t_s を次式により与えられる密度関数 $f(t_s)$ に従うとした。

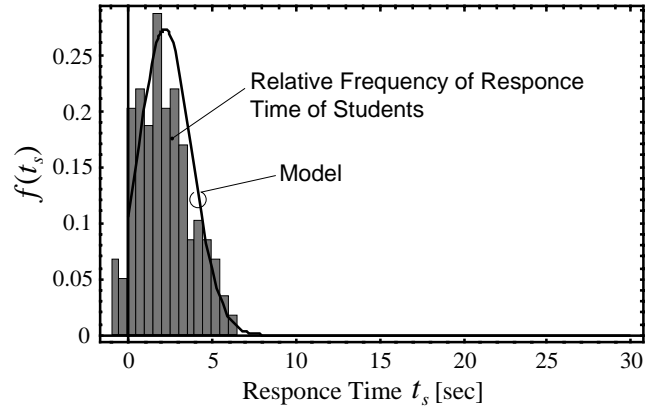


図 2: 学生の反応時間のモデル

$$f(t_s) = \begin{cases} [\int_0^\infty \exp\{-\frac{(\epsilon-\mu)^2}{2\sigma^2}\} d\epsilon]^{-1} \exp\{-\frac{(t_s-\mu)^2}{2\sigma^2}\} & (t_s > 0) \\ 0 & (t_s \leq 0) \end{cases} \quad (2)$$

パラメータ μ, σ の決定には、情報処理教育環境 [5] におけるユーザの応答時間の実測結果 [6] を用いた。この測定では学生が教官の指示に対してマウスによるコマンド入力での応答する間での時間を計測している。この結果より $\mu = 2.2[\text{sec}]$, $\sigma = 1.6[\text{sec}]$ とした。図 2 に、測定結果と本シミュレーションで仮定したモデルにおける t_s の分布を示す。

アプリケーション クライアント WS がサーバ WS に対して FTP および NFS によるファイル転送要求を行う。クライアントにおける転送要求発生時刻の分布は前項の学生の反応時間のモデルに従う。転送ファイルサイズは、中規模のアプリケーションをファイルサーバから読みとることを想定し、すべて 1 MB とした。FTP の場合、障害処理は TCP によって行われるので、クライアントは最初に一度だけ転送要求を送信すれば良い。一方 NFS は最大 8 KB の転送しか要求することは出来ないので、8 KB を受信するたびに新しい転送要求を送信することになる。

シミュレーションには前章とおなじく文献 [3] のイベント駆動シミュレータを使用した。本シミュレータでは FTP が利用する TCP/IP のモデルは UNIX 4.3 BSD の実装に基づいて設計されている。また、再送タイムアウト等の NFS のパラメータには Sun OS 4.1.3 のデフォルト値を使用した。FTP で接続する場合、クライアントがリクエストを送信する前に TCP におけるサーバ・クライアント間の接続は確立されているとした。

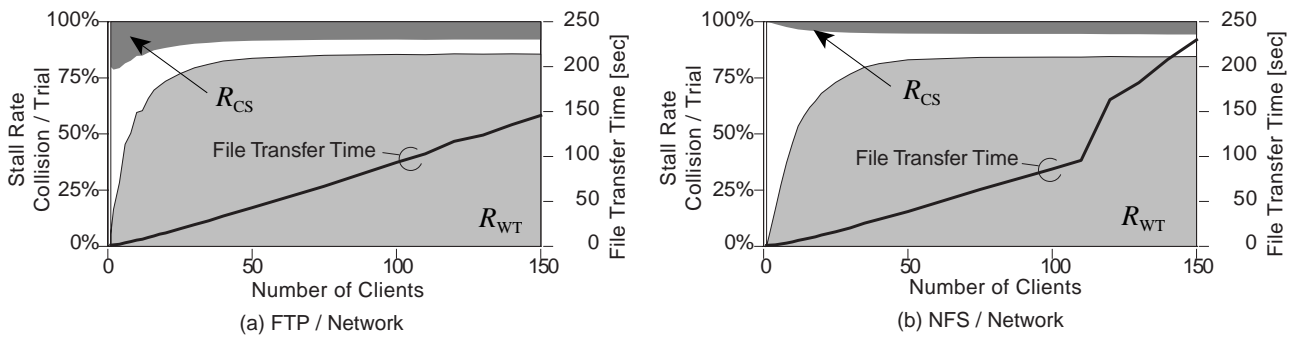


図 3: アプリケーション利用時のファイル転送時間とネットワーク平均ストール率

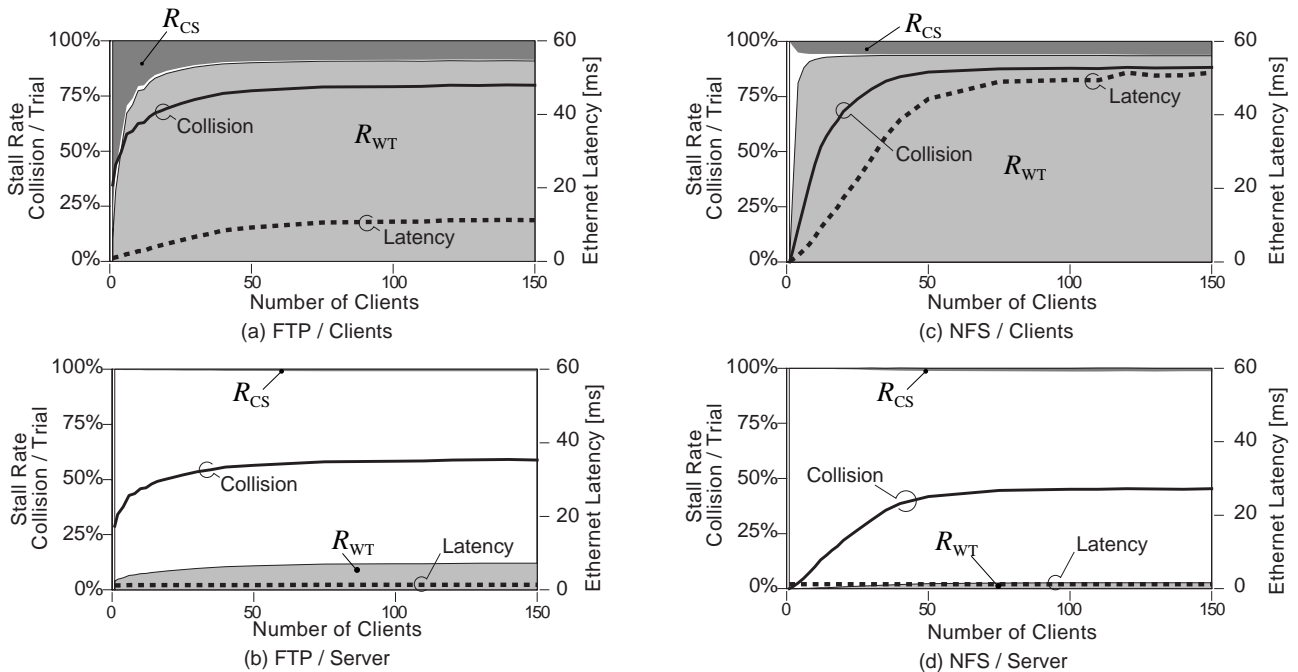


図 4: クライアントとサーバのストール率と衝突率

3.2 シミュレーション結果

3.2.1 ネットワーク全体の特性

図 3 に NFS および FTP によるファイル転送時における全クライアントの平均ファイル転送時間、およびサーバを含むすべての端末におけるストール率を示す。

FTP, NFS どちらの場合でもクライアント数の増加に伴って R_{WT} が増加し、クライアント数 50 台以上で 80% 程度で変化がなくなる。一方 R_{CS} は FTP の場合に少ないクライアント数で大きな値を示しているが、NFS の場合には逆に R_{CS} は小さい値を示す。FTP はトランスポート層に TCP を用いているため、サーバからデータを受信すると確認応答を送信する必要がある。このため、クライアント数が少ない場合においても、サーバとクライアントとの間で同時に送信を行うことがあり、その結果 R_{CS} が大きな値を示す。一方、NFS ではタイムアウトが起きない限り

クライアントはサーバに対して送信要求メッセージを送信しない。このため、クライアント数が少ない場合においては、サーバとクライアントが同時に送信を行うことがない。

しかしながら、ストール率からは、上記のようなプロトコルの違いによるトラフィック特性の差を知ることは出来るが、平均ファイル転送時間のようなアプリケーションレベルでの性能に及ぼす影響を読みとることは出来ない。

3.2.2 クライアント・サーバの送信特性

クライアントサーバシステムを考えた場合、サーバの送信するパケットは一般的に長く、その数が多い。またクライアントの送信するパケットは要求メッセージや TCP の確認応答がほとんどであり、パケット長が短く数も多くはない。さらに、クライアントサーバシステムではクライアントとサーバ間のメッセージ依存性があるので、両者にお

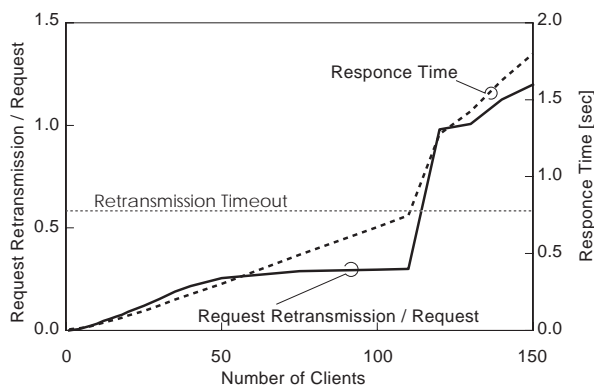


図 5: NFS の平均応答時間と平均要求再送回数

ける送信要求の発生時刻の分布は異なり、パケット送信時のネットワーク状態も異なるものになる。このため、アプリケーションを含んだ性能評価を行う上では、単純にネットワーク全体の統計値のみによる評価では不十分である。

図 4 にクライアントとサーバそれぞれの平均ストール率と衝突率および平均パケット送信遅延を示す。明らかにサーバの方がストール率が低く、高い送信効率を保っていることがわかる。サーバがほとんどのパケットを最大パケット長 (1518 byte) で送信しているため相対的にバックオフによる待ち時間および伝送路の空きを待っていた時間が短くなるのが、高い送信効率の一因である。しかしそれだけでなく実際、サーバの衝突率はクライアントに比べて低い。このことから、サーバ送信時における衝突は少なく、サーバの送信効率の極端な低下は起きないが、クライアントはクライアントどうしが同時に送信しようとすることによって送信効率が悪くなっていることがわかる。

この傾向は NFS の場合に顕著である。TCP を用いる FTP の場合、再送信はデータ送信側であるサーバによって開始されるのに対し、NFS ではクライアントにより要求の再送信が行なわれる。従って、再送タイムアウトが発生した場合 NFS の場合の方がより多くの端末からトラフィックが発生することになるのである。

しかし、ストール率は上記のような上位プロトコルの特性が LAN 挙動に及ぼす影響を示しはするものの、ストール率のみからアプリケーションの性能を判断するのは困難である。実際、図 3(b) で見られる NFS におけるファイル転送時間の増加は、アプリケーションレベルの応答時間やリクエスト再送回数の評価 (図 5) によって初めて原因が特定可能である。

4 むすび

CSMA/CD LAN の性能評価のための新しい指標としてストール率を提案した。ストール率は CSMA/CD LAN の送信遅延を発生させる要因である伝送路の空きを待つ時間と、衝突後のバックオフによる送信待ち時間が送信遅延に占める割合を表したものである。ストール率による評価では、結果をグラフに表すことによって、端末の送信効率とその低下の原因の直観的理解が容易である。ストール率による現実的な高負荷 LAN 環境の評価例として、集合情報処理教育環境におけるクライアントサーバシステムにおけるネットワークアプリケーション利用時のトラフィック特性をストール率を用いて評価し、ネットワーク全体のストール率と、役割の違う端末のストール率を比較することによってアプリケーションの動作が LAN 性能に及ぼす影響が明らかになることを示した。

ストール率による評価は、CSMA/CD LAN の挙動の直観的理解を助けるものの、それのみによってシステムの定量的評価を行うには不向きである。しかし、ストール率の特徴である視覚的・直観的理解のしやすさは従来からの性能指標の理解を促進し、設計システムの早期問題発見に有用であると考えられる。

参考文献

- [1] M. Molle, "A New Binary Logarithmic Arbitration Method for Ethernet," *Tech. Rep. CSRI-398*, Univ of Tronto, 1994
- [2] 石田, 高原, "イーサネット上のトラフィック特性によるパケット発生モデルについて," *信学論*, Vol. J78-B-I, No. 11, pp. 664-671, 1995
- [3] S. Ishihara, M. Okada, "A Modeling and Simulation Method for Transient Traffic LAN," *IEICE Trans. Commun.*, Vol E-80-B. No. 8, pp. 1239-1247, 1997
- [4] R. Gusella, "A measurement study of diskless workstation traffic on an Ethernet," *IEEE Trans. Commun.*, Vol 38, No. 9, pp. 1557-1507, 1990
- [5] 岡田, 櫻井, 岩田, "教育用大規模分散型 WS システムの一構成方法," *情処論*, Vol 37. No. 12, pp. 2447-2456, 1996
- [6] 川村, "ネットワーク通信量の計測とその検討," 名古屋大学工学部卒業論文, 1995