

可視化に適した CSMA/CD LAN のための性能指標： ストール率

石原 進† 岡田 稔†

本論文では CSMA/CD LAN の評価指標としてストール率を提案する。ストール率はパケット送信遅延に占める送信待機時間の割合をその原因別に示した値である。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。ストール率ではこれらによるネットワークの性能低下とその原因を直観的、視覚的に把握することが容易であり、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うえで有用である。本論文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て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。

Stall Ratio: A Visual Performance Measure for CSMA/CD LAN

SUSUMU ISHIHARA† and MINORU OKADA†

In this paper we propose *Stall Ratio*: a convenient performance measure for analyzing and evaluating the behavior of CSMA/CD LAN. It is computed as the ratio of the waiting time for the transmission of frames to the total transmission delay. By representing the network performance using the stall ratio, the outline of the network performance can be expressed in one simple graph. The main factors of the transmission delay of frames are back-off delay caused by collisions and deferring time caused by the occupation of the medium by other stations. These factors are clearly demonstrated by the presentation using the stall ratio. So stall ratio is useful for those who do not have expertise about CSMA/CD LAN to evaluate network systems. In this paper the definition of the stall ratio and the characteristics are presented. We evaluated the performance of Ethernet LAN when application programs are running. From this result, the effectiveness of the stall ratio is demonstrated.

1. はじめに

近年の LAN の普及およびそれにともな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、ネットワーク動作状況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示される性能値から、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、そ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、複数の異なる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される。

Ethernet に代表される CSMA/CD ネットワークにおける実効帯域の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、送信遅延の分布およびネットワーク利用率等が用いられてきた^{1)~3)}。Ethernet の仕様上の問題とされる Capture Effect^{☆4)} は Molle²⁾ による送信遅延の分布の調査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 Ethernet のトラヒック特性については十分な評価が行われていなかった。一方、石田ら⁵⁾ 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

† 名古屋大学大学院工学研究科

Graduate School of Engineering, Nagoya University

☆ 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、つねに次に伝送路を占有できる確率が高くなる現象。

るパケット長およびパケット発生間隔を測定し、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らず、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。

本論文では、CSMA/CD ネットワークの性能評価指標の 1 つとしてストール率を提案する。ストール率は概念的には、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と要約される。ストール率によればネットワーク特性の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う際には、ネットワーク管理者等にとって有用な指標であると考えられる。

以下、まず 2 章でストール率の定義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 章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。

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⁶⁾。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ってから送信する。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、二進指数バックオフによりランダム時間だけ待っ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 の性能指標の 1 つ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が成功または 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。

平均 CS ストール率

$$R_{CS} = \frac{\sum_{i=1}^N T_{CS}^{(i)}}{\sum_{i=1}^N T_{XMT}^{(i)}} \quad (1)$$

平均 WT ストール率

$$R_{WT} = \frac{\sum_{i=1}^N T_{WT}^{(i)}}{\sum_{i=1}^N T_{XMT}^{(i)}} \quad (2)$$

平均トータルストール率

$$R_T = R_{CS} + R_{WT} \quad (3)$$

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試行の待ち時間の割合を示す。

2.3 ストール率とトラヒック特性

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。したがって、

- R_{CS} はネットワークの負荷が高いほど大きな値を示す。
- 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

Ethernet における衝突後の待ち時間 T_{WT} は、二進指数バックオフ調停アルゴリズムによって決定される

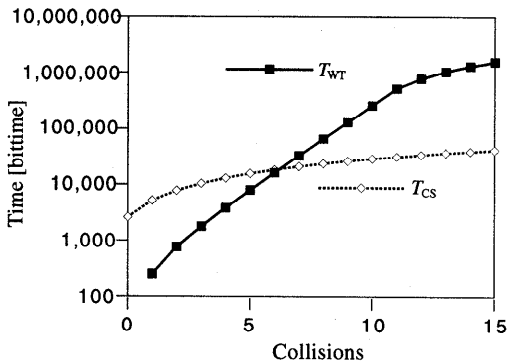


図1 連続衝突回数に対する T_{CS} , T_{WT} 累積値の変化
Fig. 1 T_{CS} and T_{WT} changes to collision count.

ので1つのパケット送信あたりの衝突回数に対して指数的に増加する。一方、1回の送信試行あたりの T_{CS} は最大で最大パケット長と等しく、全送信試行において伝送路が他の端末に専有されていた場合においても、 T_{CS} の平均はネットワーク全体の平均パケット長の半分である。

図1に連続衝突回数に対する1つのパケット送信における T_{WT} , T_{CS} の累積値を示す。ここでは平均パケット長を 649 bytes とした。この図より、連続衝突回数が少ないときには T_{CS} が T_{WT} よりも大きいですが、連続衝突回数が増加すれば T_{WT} が劇的に増加し T_{CS} を上回ることが明らかである。したがって、

- 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。
- 連続した衝突の発生により、 R_{WT} の値は R_{CS} を上回る。
- 大きな R_{CS} はネットワーク負荷の増大を意味するが、 R_{WT} が小さい場合、連続した衝突の発生は少ない。

■ トータルストール率

トータルストール率 R_T は R_{CS} と R_{WT} の和であるから、

- R_T はネットワークへの送信が滞った割合を示す。
- $1 - R_T$ は送信ノードから見た実効スループットを示す。
- 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。

表1で示したパケット長分布⁷⁾のデータトラヒ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2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

あわせて示した。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 10m 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^{8),9)}を使用した。

図2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フェースが送信処理を行っていても実際には信号が送信されなくなることが分かる。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分かる。端末数が少ない場合には、負荷 70% を超えると衝突率は低下しているが、依然として衝突後の待ち時間により送信効率が低下していることがはっきりと読みとれる。

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 台のクライアントワークステーション WS が1台の HUB に 10m のケーブルを介して接続されている Ethernet 10 BASE-T (10 Mbps) LAN。

■ トラヒック発生源

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いつせいにネットワークアクセスをとまな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 WS がサー

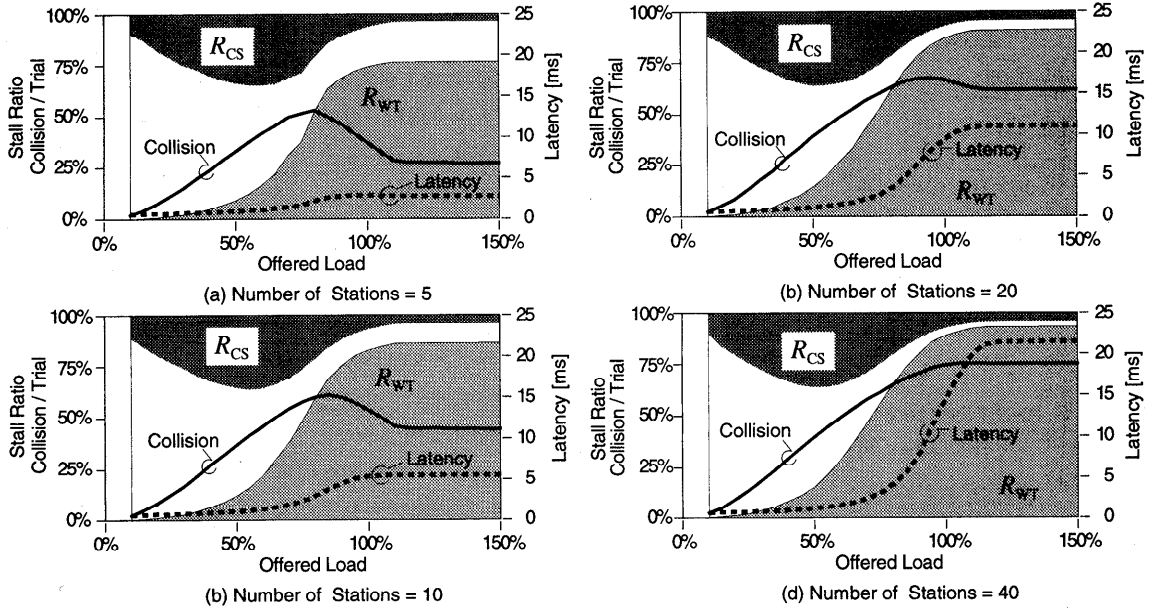


図2 データトラフィック発生時の平均ストール率
 Fig. 2 Mean stall ratio of random data traffic.

表1 バケット長分布

Table 1 Distribution of packet length for simulation of random data traffic.

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

バ WS に対してリクエストを送信する時刻 t_s の分布は次式により与えられる密度関数 $f(t_s)$ に従うとした。

$$f(t_s) = \begin{cases} \frac{\exp\{-\frac{(t_s - \mu)^2}{2\sigma^2}\}}{\int_0^\infty \exp\{-\frac{(e - \mu)^2}{2\sigma^2}\} de} & (t_s > 0) \\ 0 & (t_s \leq 0) \end{cases} \quad (4)$$

式(4)は正規分布において $f(t_s)|_{t_s < 0} = 0$ とした分布である。パラメータ μ, σ の決定には、情報処理教育環境¹⁰⁾におけるユーザの応答時間の実測結果¹¹⁾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応答するまでの時間を計測している。この結果より $\mu = 2.2$ [sec], $\sigma = 1.6$ [sec] とした。図3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

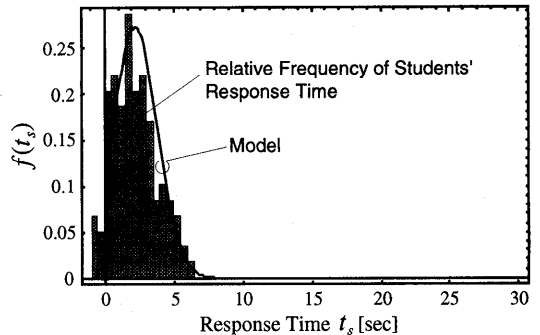


図3 学生の反応時間のモデル
 Fig. 3 Students' response-time model.

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先に示した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取ることを想定し、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 1 度だけ転送要求を送信すればよい。一方、NFS は最大 8 KB の転送しか要求することができないので、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節と同じく文献 8), 9) 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

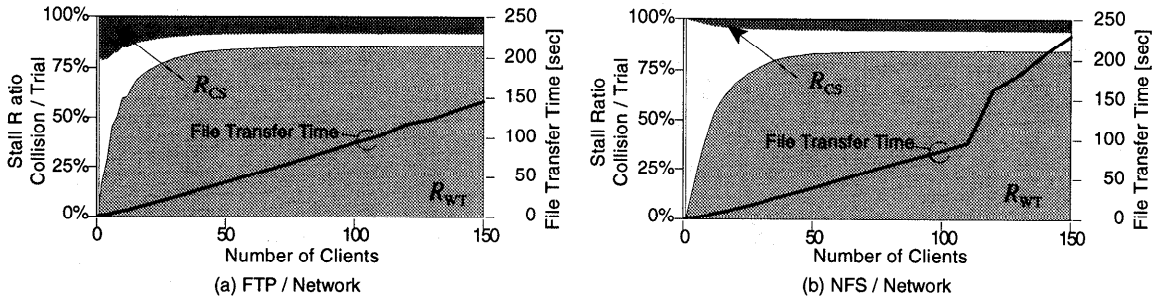


図4 アプリケーション利用時のファイル転送時間とネットワーク平均ストール率
Fig. 4 Mean network stall ratio and file transfer time when applications are running.

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。

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4にFTPおよびNFS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ともなって 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ヒック特性の差を知ることにはできるが、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できない。

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、その数は多い。

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うえでは、ネットワーク全体の単純な統計値のみによる評価では不十分である。

図5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分かる。サーバがほとんどのパケットを最大パケット長(1518 bytes)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、クライアントは複数のクライアント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分かる。

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われる。したがって、再送タイムアウトが発生した場合、NFSの方がより多くの端末からトラヒ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4(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6)によって初めて原因が特定可能である。

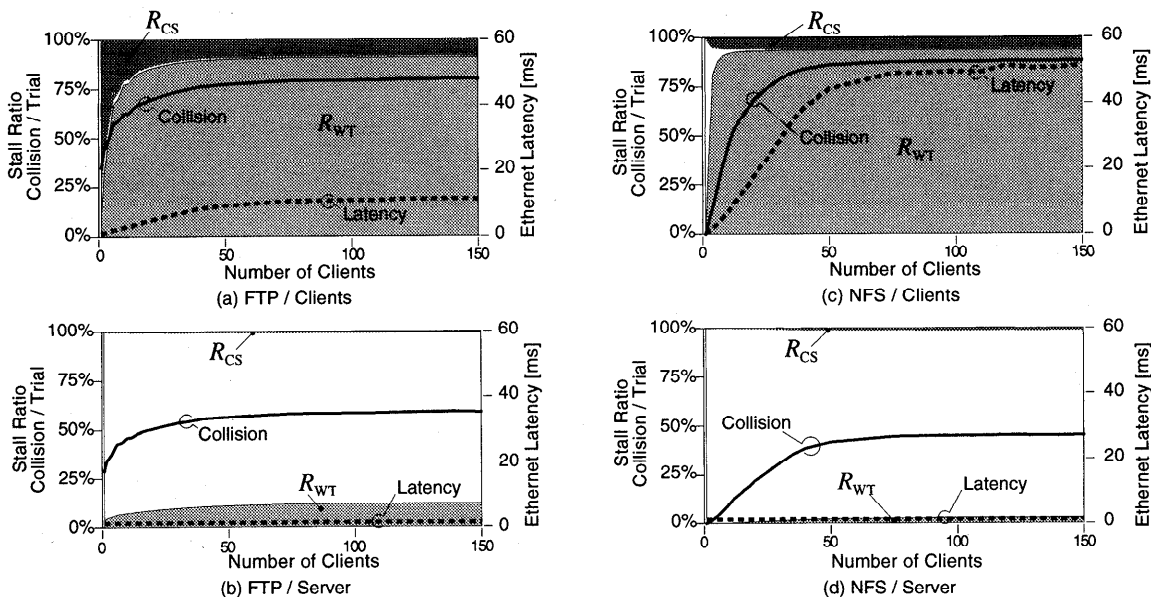


図5 クライアントとサーバのストール率と衝突率

Fig. 5 Stall ratio and collision ratio of clients and server.

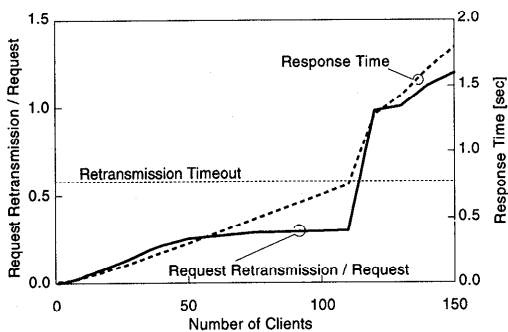


図6 NFS の平均応答時間と平均要求再送回数
Fig. 6 Mean response-time of NFS and mean retransmission count of request message.

3.3 ユーザストール率

ストール率の定義では MAC 層の性能に重点をおいている。しかしながら、ユーザアプリケーションレベルでは、MAC 層におけるエンドツーエンド遅延よりも、アプリケーションの動作に直接影響を与える上位層におけるエンドツーエンド遅延が問題になる。そこで、ユーザ側の視点にたったストール率として、ストール率の定義における分母 T_{XMT} に MAC 層における待ち行列遅延を含めて、以下のようにユーザストール率を定義する。

平均バッファリングストール率

$$\tilde{R}_Q = \frac{\sum_{i=1}^N T_Q^{(i)}}{\sum_{i=1}^N (T_{XMT}^{(i)} + T_Q^{(i)})} \quad (5)$$

平均 CS ストール率

$$\tilde{R}_{WT} = \frac{\sum_{i=1}^N T_{WT}^{(i)}}{\sum_{i=1}^N (T_{XMT}^{(i)} + T_Q^{(i)})} \quad (6)$$

平均 WT ストール率

$$\tilde{R}_{CS} = \frac{\sum_{i=1}^N T_{CS}^{(i)}}{\sum_{i=1}^N (T_{XMT}^{(i)} + T_Q^{(i)})} \quad (7)$$

平均トータルストール率

$$\tilde{R}_T = \tilde{R}_Q + \tilde{R}_{CS} + \tilde{R}_{WT} \quad (8)$$

上の定義で平均バッファリングストール率 \tilde{R}_Q は MAC 層における待ち行列遅延の割合を示す。この値は各端末において Ethernet の処理率に対して過剰な入力負荷がかかっている場合に大きくなる。

図7にサーバ・クライアントのユーザストール率を示す。FTP、NFSともにサーバにおける \tilde{R}_Q が高い値を示している。これはクライアントが TCP の確認応答パケットおよび NFS のリクエストメッセージしか送信しないのに対し、サーバが大量のデータを全クライアントに送信するためである。特に (d) の NFS サーバの場合には、クライアント数 100 台程度で \tilde{R}_Q がほぼ 100% に達している。この結果としてサーバ応

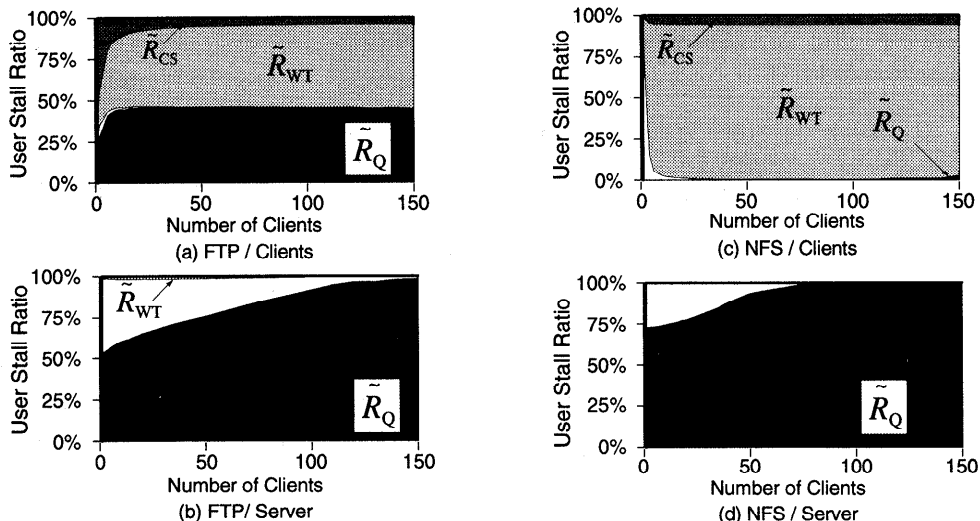


図 7 ユーザストール率
Fig. 7 User stall ratio.

答遅延が増大し、クライアントにおける再送要求の発生、ファイル転送時間の急増に至ると推測できる。

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。ストール率による評価では、可視化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ヒ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。また、特にアプリケーション動作時の性能評価を行う場合には、Ethernet の送信待ち行列遅延を考慮したユーザストール率が有効であることが分かった。

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。今後の課題として、Capture Effect のようなネットワークの動的な挙動を視覚的に評価できる指標の検討である。

参 考 文 献

- 1) Boggs, D.R., Mogul, J.C. and Kent, C.A.: Measured capacity of an Ethernet: Myths and reality, *SIGCOMM '88*, ACM (1988).
- 2) Molle, M.: A new binary logarithmic arbitration method for Ethernet, Technical Report CSRI-398, Computer Systems Research Institute, University of Toronto, Toronto, Canada (1994).
- 3) 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).
- 4) Whetten, B., Steinberg, S. and Ferrari, D.: The packet starvation effect in CSMA/CD LANs and a solution, *Proc. Conference on Local Computer Networks*, Vol.19, pp.206-217 (1994).
- 5) 石田陽子, 高原幹夫: イーサネット上のトラヒック特性によるパケット発生モデルについて, *電子情報通信学会論文誌*, Vol.J78-B-I, No.11, pp.664-671 (1995).
- 6) ANSI/IEEE Std 802.3: Carrier sense multiple access with collision detection (CSMA/CD) access method and physical layer specifications (1993).
- 7) Gusella, R.: A measurement study of diskless workstation traffic on an Ethernet, *IEEE Trans. Commun.*, Vol.38, No.9, pp.1557-1568 (1990).
- 8) 石原 進, 岡田 稔: イベント駆動方式による LAN 通信量解析モデル, *電子情報通信学会論文誌*, Vol.J-78-A, No.8, pp.961-964 (1995).

- 9) 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).
- 10) 岡田 稔, 櫻井桂一, 岩田 晃: 教育用大規模分散型 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).
- 11) 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 (1995).

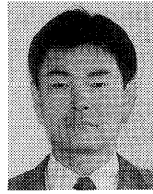
(平成 10 年 5 月 6 日受付)

(平成 10 年 10 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 8 年名古屋大学大学院博士前期課程 (電子工学) 修了, 工学修士. 平成 10 年度日本学術振興会特別研究員. 現在同大学院博士後期課程電子情報学専攻在学中. 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各賞受賞.



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後期課程 (情報工学) 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 年同助教授を経て, 平成 10 年同大学院工学研究科情報工学専攻助教授, 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. 画像の認識と理解, 計算幾何学, 画像合成, 情報ネットワークの構成理論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 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), 「OpenWindows によるワークステーション入門」(朝倉書店), 「情報科学基礎論」(朝倉書店) 等.