

## イーサネットLAN上におけるTCCS実現のための 帯域、ディレーの予測・制御について

中野 宣政<sup>†</sup>、安藤 勉<sup>†</sup>、佐藤 文明<sup>†</sup>、水野 忠則<sup>‡</sup>

<sup>†</sup>三菱電機、<sup>‡</sup>静岡大学

我々は、工場現場において普及の著しい、イーサネット上におけるタイムクリティカル通信の実現に関し、ユーザよりのネットワーク利用帯域を明示的に管理することによりその軽負荷状態を維持し、ディレー値を所定の値以下に抑える方式を提案した。また、その実現を目指して、先の研究会にて、同ネットワークの軽負荷におけるスループットの理論近似解析とシミュレーションによるその結果の検証を報告した。本稿では、イーサネットの帯域幅の定義について先回得られたスループットに関する知見より、その詳細を提案し、ユーザよりの雑多な利用帯域幅申請に対するその合算見積もり方式も合わせ示す。

さらに、スループットが極端に低下し、リアルタイム性を阻害する原因となる短伝文に関し、イーサネットの挙動の詳細とその解析結果を述べる。即ちパケットをオフターするカスタマー間に生ずるチャンネルアクセスの不公平性についてのシミュレーション結果とその理論的な考察を行い、タイムクリティカル通信への帯域管理としての対応策を検討する。

### Bandwidth and Transmission Delay Management Scheme to Realize TCCS on Ethernet LAN

Nobumasa Nakano<sup>†</sup>, Tsutomu Ando<sup>†</sup>, Fumiaki Sato<sup>†</sup>, Tadanori Mizuno<sup>‡</sup>

<sup>†</sup>Mitsubishi Electric, <sup>‡</sup>Shizuoka University

Recently we have proposed the architecture and mechanisms which will realize TCCS; a communication system which guarantees the message delivery in a certain upper limited time requested by user; on top of Ethernet LAN. And also we have analyzed the throughput and delay time of the LAN to establish the scheme of bandwidth management and control.

This paper describes first, the proposal of the estimation of Network Bandwidth for arbitrate requests of user messages being transmitted through Ethernet LAN, second, the related theoretical analysis and simulation result of relatively short packets which affects throughput to degrade and delay time to increase, and finally, the further development plan to be scheduled.

## 1. はじめに

我々は、工場現場においてもその普及著しいイーサネット上におけるタイムクリティカル通信の実現に関し、ユーザよりのネットワーク利用帯域を明示的に管理することによりその軽負荷状態を維持し、ディレー値を所定の値以下に抑える方式を提案した<sup>[1]</sup>。また、その方式の実現を目指して、95-DPS-75において、イーサネットの軽負荷におけるスループットの理論近似解析とシミュレーションによるその結果の検証を報告した<sup>[2]</sup>。結果として両者はよい一致を示した。本稿では、先の報告では結論として簡単に述べているイーサネットの帯域幅の定義について先回得られたスループットに関する知見よりその根拠を示す。また、ユーザよりの雑多な利用帯域幅申請に対するその合算見積もり方式も合わせ提案する。

本稿ではさらに、スループットが極端に低下し、ネットワークとしてのリアルタイム性を阻害する原因となる短伝文（そのネットワーク上の伝送遅延時間がスロット時間の数倍以下）に関し、イーサネットの挙動の詳細とそれへの対応を述べる。即ちパケットをオファーするカスタマー間に生ずるチャンネルアクセスの不公平性についてのシミュレーション結果とその理論的な考察を行い、タイムクリティカル通信への帯域管理としての対応策を検討する。

## 2. 申請値対応所要帯域の定義

### 定義1. イーサネットの帯域定義

イーサネットの利用帯域を以下と定義する。

(1.1) 伝文対応スロット占有率  $B_{ETH}$  :

パケット有りスロットの、全体スロットに対する比率で表す。即ち、

$$B_{ETH} = \frac{\frac{H\sigma}{T_C}}{\tau} \cong \frac{\gamma}{T_C} \quad (1)$$

但し、 $T_C$ は問題領域に於ける十分な長さのスロット列対応の時間を表し、問題領域としてのタイムクリティカリティ（応用システムの最

小タイムウインドウ値）に依存し決る。 $\tau$ はスロットタイムを表す。 $n_m$ は $T_C$ 時間内のパケット有りスロットの総和である。 $H$ （スロット数/パケット）、 $\gamma$ （平均パケット数/伝文）、 $\sigma$ （伝文発生確率/スロット/ユーザ）は伝文の属性値である。

(1.2) 伝文帯域幅  $B_m(H, \gamma, \sigma)$  :

イーサネットを伝搬する伝文に関し、その仕様を表す $H$ （スロット数/パケット）、 $\gamma$ （平均パケット数/伝文）、 $\sigma$ （伝文発生確率/スロット/ユーザ）の3項組に対し、理論解析<sup>[2]</sup>によりスループットを求め、これを  $S(H, \gamma, \sigma)$  とする。このとき、

$$\text{伝文帯域幅 } B_m(H, \gamma, \sigma) = \frac{B_{mETH}}{S(H, \gamma, \sigma)} \quad (2)$$

但し、 $B_{mETH}$ は(1.1)に述べた伝文スロット占有率である。

定義1.の妥当性について：

帯域の定義により、また $H$ 、 $\sigma$ 、 $\gamma$ の定義により、任意の伝文のスロット占有率  $B_{ETH}$  は、 $\frac{H\sigma}{T_C}$  伝文の三つ組み  $H$ 、 $\sigma$ 、 $\gamma$  対応、 $B_{ETH} = \frac{\gamma}{T_C}$  で表せる。また、スループットは先の報告<sup>[2]</sup>において(16)式、(37)式で  $H$ 、 $\sigma$ 、 $\gamma$  対応計算され、その条件下でのチャンネルの利用効率を表す。

伝文帯域幅  $B_m$  は、伝文対応スロット占有率をその伝送効率  $S$  ( $0 < S < 1$ ) で無効スロット分割増した値となる。

定義2. 任意の伝文帯域の合算方式について

(2.1) マルチモーダル対応スループット簡易計算式

マルチモーダルにおけるトータルスループットは前回報告<sup>[2]</sup>の(37)式で求めることができる。その数値計算結果より、スループットは加算について同一の $\sigma$ に対してほぼ線形性を有することが判っている(95-DPS-72 p30 図7)。その特性を用いて、簡易計算式をヒューリスティックに求め以下に示す。

$$S_M = S_1(1-\alpha) + S_2\alpha \quad (3)$$

$\alpha$ は、クラス混合比で、シングルモーダル、クラスC1(スループット: $S_1$ )のメンバ数を $n_1$ 、同クラスC2(スループット: $S_2$ )メンバ数を $n_2$ とした場合、

$$\alpha = \frac{n_2}{n_1 + n_2} \quad (4)$$

以上(3)、(4)を敷衍して、クラスC<sub>i</sub>の構成メンバ数を $n_i$ とし、そのスループットを $S_i$ と一般化するとトータルスループットとして5式が得られる。

$$S_M = \frac{\sum S_i \times n_i}{\sum n_i} \quad (5)$$

定義1、2より、任意の申請伝文対応の合計伝文帯域幅の見積もり定理とその証明を以下に示す。

定理：同時に存在する任意の伝文対応合計伝文帯域幅の見積

同時にネットワークの負荷となる、複数の伝文の帯域幅の合計としての総帯域幅は、各伝文対応の伝文スロット占有率の和を、各伝文のスループットの加算平均で割った値である。

すなわち

定義1より、

総伝文帯域幅 =

(総伝文スロット占有率) / (総スループット)

$$\frac{\sum \frac{H_i \sigma_i}{\gamma_i}}{\frac{S_M}{T_C}} \text{ とかける。}$$

$$\text{また、(5)式より、} S_M = \frac{\sum (S_i \times n_i)}{\sum n_i}$$

$n_i = 1$  (for all i) とすれば、

$$\text{総伝文帯域幅} = \frac{\left( \frac{\sum \frac{H_i \sigma_i}{\gamma_i}}{T_C} \right)}{\frac{\tau}{\sum S_i}} = \frac{\tau}{n}$$

4. 短伝文のイーサネット上の振る舞いについて

95-DPS-72における報告では、複数カスタマー間におけるネットワークのアクセス $\lambda$ は同一である、と言う前提で解析しているが、シミュレーション結果より、特に短伝文の負荷の増大につれて、ランダムに特定されるカスタマーに対しそのアクセスが著しく有利となる現象が生じる。即ち、カスタマーA、Bがたまたま同一スロットで伝文をチャンネルにオフアーし衝突したとするとそれぞれバックオフシーケンスに入り、初回の衝突であるので、両者とも、0か1スロットのディレーのいずれかを選択し、その時間後再度伝文をオフアーする。そのときたまたまAが1スロット、Bが0スロットを選択し、結果としてBがチャンネルを取得する。その後Bの送信終了を待って、再度Aは同一伝文を送信しようとするが、その時カスタマーCが新たに送信伝文を得たとすると、今度はAとCが衝突する。今回のバックオフシーケンスではAは2回衝突したから、そのタイムディレー値は0、1、2、3スロットのいずれかを選択する。Cは一回目だから0、1スロットのいずれかを選択し、この場合も確率的にCがチャンネルを取得する可能性が強い。と言うことで、短伝文のオフアーロードが大きくなると、初回に負けたカスタマーはどんどんチャンネルを取得する確率が低下していき、16回(初回+リトライ15回)に達しリセットされるまで負け続ける。これは衝突するカスタマー数が多数居る場合も同様であり、常に新規参入者がチャンネルを獲得する可能性が高く、一度負けた(複数の)カスタマー達は、その後もずっと負け続け、いずれかの敗残者が16回に達したと

カスタマー数 $N=5$ 、パケット長 $(H=)$ 2スロット長、伝文長 $(1/\gamma) = 1$ 、 シミュレーション時間=100,000スロット					
$\sigma$	0.001	0.005	0.010	0.050	0.100
$G=NH\sigma/\gamma$	0.010	0.050	0.100	0.500	1.000
全データ無し	498,995 (slot)	494,449	486,627	303,282	158,866
全待ち時間	1 (slot)	244	1,134	20,487	25,481
全送信時間	1,004 (slot)	4,972	9,898	32,452	35,684
全ジャム時間	0 (slot)	124	766	19,764	24,389
全バックオフ	0 (slot)	211	1,575	124,015	255,579
平均データ無し	99,799.00 (slot)	98,889.80	97,325.40	60,656.40	31,773.20
平均待ち時間	0.20 (slot)	48.80	226.80	4,097.40	5,096.20
平均送信時間	200.80 (slot)	994.40	1,979.60	6,490.40	7,136.80
平均ジャム	0.00 (slot)	24.80	153.20	3,952.80	4,877.80
平均バックオフ	0.00 (slot)	42.20	315.00	24,803.00	51,115.80
パケット送信 平均時間	200.80 (slot)	994.40	1,979.60	6,490.40	7,136.80
標準偏差	19.92	67.96	155.68	519.46	1,481.23
ネットワーク 利用率	0.0100	0.0497	0.0990	0.3245	0.3568

表1. カスタマー間スループットの相違

ころでリセットされる。リセットされた後の新たな衝突とバックオフシーケンスは（チャンネルへのオフロードが変わらなければ）前回と全く同様の様相を呈し、カスタマーの役割は交代するがやはり、初回負けたものが負け続け、新参者がチャンネルを取得していく。上記状況で言えることは、先の理論モデルにおける“カスタマー全体がバックオフシーケンスのある回数で一樣に平衡状態に落ち込みスループットが低下する”状態には成らず、オフロードが高くなっても新参者が、初回か、または低い衝突回数でチャンネルを取得し続けるということである。

表1. に、シミュレーションより取得したカスタマー間のスループットの相違を標準偏差値と

して示す。

#### 4. 1 解析モデル再検討

図1. に解析モデルを再掲する。

- ・ $m$ 回の衝突後、カスタマーは $B_0$ 状態へリセットされる。

- ・各カスタマーに於いて、 $B_i$ 状態で1-パーシステントにチャンネルに伝文をオファーできるが、衝突の回数 $j$ 対応、そのオファーするスロット確率 $\lambda_j$ は、衝突回数によりそのバックオフシーケンスの平均長とジャミングスロット時間 $k$ の和に反比例し減少することになる。

即ち、

$$\lambda_0 = 1,$$

$$\lambda_j = \frac{1}{k + \frac{2^j - 1}{2}} = \frac{1}{0.5 + 2^{j-1}} \quad (1 \leq j \leq 9, k = 1)$$

$$\lambda_j = \frac{1}{k + 511.5} \cong 0 \quad (10 \leq j \leq m, k = 1)$$

(6)

トータルとしてチャンネルにオフアーされる伝文を $\lambda$ とすれば、それは、各チャンネル対応のマルコフ課程の存在確率での重み付けされた平均値となるから、

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{\sum_{i=0}^m \lambda_i x^{B_i}}{\sum_{i=0}^m x^{B_i}} = \frac{x^{B_0}}{1-f^{m+1}} \sum_{i=0}^m \lambda_i f^i \\ &= \frac{1-f}{1-f^{m+1}} \left( 1 + \sum_{i=1}^9 \frac{f^i}{k + \frac{2^i - 1}{2}} + \sum_{i=10}^{m+1} \frac{f^i}{K + 511.5} \right) \\ &= \frac{1-f}{1-f^{16}} \left( 1 + \frac{f}{2.5} + \frac{f^2}{4.5} + \frac{f^3}{8.5} + \dots + \frac{f^9}{256.5} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

(但し、 $m=15, k=1, i=10$  以上を省略)

$$\text{所で、} f = 1 - e^{-\lambda(N-1)} \quad (8)$$

(7), (8) 式を満たす $\lambda$ を、固有値(不動点)として繰り返し代入法で求め、得た解を(8)式に代入することで $f$ を求める。

$N$ を可変として求めた $\lambda$ を表2.に示す。また、この結果を先に報告済みのスループット計算し、結果を図1.に示す。また、同一条件で行ったシミュレーション結果を図2.に示す。両者は良い一致を示している。

N	$\lambda$	$\lambda/N$
5	0. 3618	0. 0723
10	0. 2323	0. 0232
15	0. 1830	0. 0122
20	0. 1572	0. 0079

表2. 固有値としての $\lambda$ 計算結果

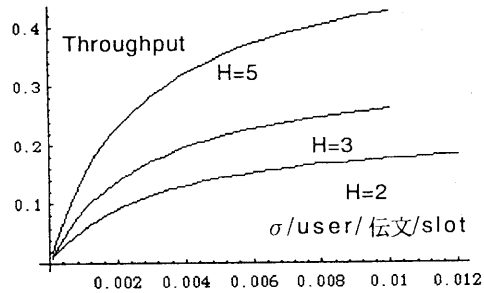


図1. スループット(計算値)

$k=1, m=16, N=10, \gamma=0.25$

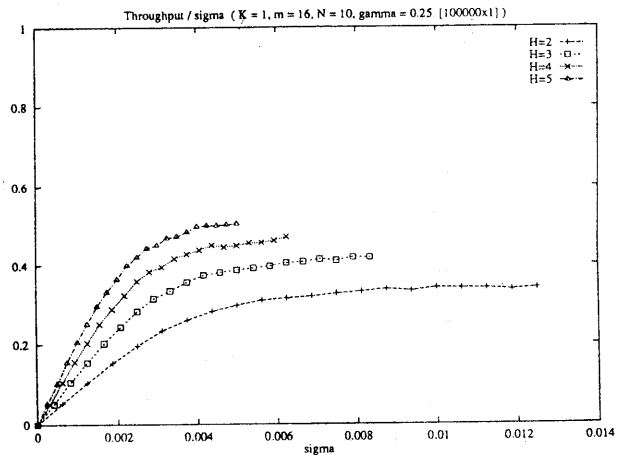


図2. スループット(シミュレーション)

## 5. 課題

(5.1) TCCS システムシミュレーション実証 2節に示した帯域見積方式に関し、適当な規模のネットワークを想定し、帯域管理方式の計算機シミュレーションを行い、本提案理論/スキーム/メカニズムによるトータル帯域管理を行い、スループット、およびディレー値を予測し、これとシミュレーションデータによる検証を行うことを計画中である。

### (5.2) 実装検討

本提案のTCCS理論/スキーム/メカニズムの実 Ethernet LAN への実装を検討する。以下の機器を検討中である。

- ・TCCSルータ

本提案方式では、ネットワークの帯域全体を把握するために、LANのセグメントを独立に持つ必要がある。また、本システムと外部との接続をかねた簡易ルータを検討する。

・アプリケーションパッケージ

アプリケーション層に実装しTCCSを実行するエージェントシステムの開発。具体的には、関連機能オブジェクトクラスの開発となる。

・ノードアダプター

アプリケーション層へのエージェント実装が困難な場合を想定して、物理層への出口にとりつけたアダプターでの帯域管理を実現する手法である。即ち、擬似的にチャンネルをビジーと見せることにより、チャンネルアクセスを間接的に制御する。

#### 参考文献

- [1] 中野宣政、太田賢、渡辺尚、水野忠則；分散TCCS実現のためのグループ管理機能、情報処理学会論文誌、Vol.36, No.8, pp. 2027-2036, Aug. 1995.
- [2] 中野宣政、安藤勉、佐藤文明、水野忠則；STOC対応ネットワーク帯域・性能見積とその管理、情報処理学会研究報告、95-DPS-72, Sept. 1995.
- [3] ISO/ TC184/ SC5/ WG2 ; User Requirement for systems supporting time critical communications, ISO DTR 12178, 1993.
- [4] 中野宣政、安藤勉、太田賢、渡辺尚、水野忠則、：TCCS仕様記述対応LOTOST実行環境構築をベースとするソフトTCCSメカニズムの研究、情報処理学会マルチメディアと分散処理ワークショップ予稿集、
- [5] 福田 明：アロハ形システムの平衡点における特性解析、電子通信学会論文誌、Vol. 61-B No.11 pp 959-966 (November 1978)
- [6] Fukuda, A., Mukumoto, K., Hasegawa, T.,: Adaptive Retransmission Randomization Schemes for a Packet Switched Random Access Broadcast Channel, Proc. 4th Int'l Conf. on Computer Communication, pp.543-548 (1978).
- [6] 福田 明、田坂修二：確率的フローシステムと平衡点解析、電子通信学会誌、Vol. 66, No. 12, pp.1228-1233, (December 1983).
- [7] Tasaka, S.,: Dynamic Behavior of a CSMA-CD System with a Finite Population of Buffered Users ,IEEE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS, VOL. COM.-34,NO.6, pp576-586 (June 1986).
- [8] Woodward, M.,:Communication and Computer Networks,IEEE Coputer Society Press, (1994).