

自己トークンプロトコルとその性能評価

丹野 州宣* 武田 利浩* 小山 明夫* 野口 正一**

*山形大学工学部、 **日本大学工学部

規模の拡大、周辺装置の高速化、分散コンピューティングあるいはマルチメディア通信などに対処するためLANの高速化が強く求められている。本文はリング上の各ステーションに「自己トークン」と呼ばれる固有のトークンを割り当てることにより、チャネルアクセスに対する公正さ(fairness)を備え、しかも各ステーションの並行なリングアクセスとバンド幅の空間再利用(spatial bandwidth reuse)を実現するリングLANプロトコルとその性能評価について述べる。

1. はじめに

近年、コンピュータの急速な普及や高速化・高性能化により、それらを結ぶ高速なLANの必要性が求められている[1]。その主な適用範囲は、スーパーコンピュータと高速な周辺デバイスを持つメインフレームを接続するバックエンドネットワーク、多くの中・低速LANを結ぶバックボーンネットワーク、あるいはキャンパスやビル内でのリソースの共有を図るフロントエンドネットワークなどである。事実、これらの目的に適するLANが多数提案され、実用化もされている。しかし、情報のマルチメディア化によりさらに高速なLANの出現が望まれている。最近、光ファイバ技術を用いた100MbpsのFDDIが高速LANプロトコルとして標準化されたが[2]、FDDIは来たるべきマルチメディア通信に対処するには不十分であり、すでに数百Mbpsあるいは数Gbpsの次世代LANが検討されている[3]。新しいギガビットLANの技術は2つある。従来のLANプロトコルの改良とATM交換による新しいプロトコルの開発である。前者は従来のLAN技術を引き継ぎ、利用することができ

る[4]。一方、後者は新規技術の開発が必要であるが、ATM交換による新しいサービスが期待できる[5]。

本文は前者の立場から、リングLANに対し、高スループットが期待できる「自己トークン方式」と呼ばれる新しいチャネルアクセス法を提案し、その特性を明らかにする。

トークンリング(IEEE802.5)はシングルトークン方式であり[6]、パケットの送信は1つのステーションに限られ、しかもリング上には1つのパケットの存在しか許さない。FDDIはアーリートークンリリース方式を採用し、複数のパケットの存在を許すマルチプル・トークン方式にすることにより、スループットを改善したが、パケットの送信はやはり1つのステーションに限られる。リングのスループットを改善するためにはリング上に複数のパケットの存在を許すだけでなく、複数のステーションが並行してパケットを送信できるようにし、いわゆるバンド幅の空間再利用(spatial bandwidth reuse)を行なうことである。バンド幅の空間再利用により、リングのスループットを飛躍的に高めることができる[7]、[8]。

Performance Evaluation of Self-Token Protocol

Kuninobu TANNO*, Toshihiro TAKETA*, Akio KOYAMA* and Syoichi NOGUCHI**

* Department of Engineering, Yamagata University

**Department of Engineering, Nihon University

本文で述べる自己トークン方式は、効果的にバンド幅の空間再利用を実現するために、マルチプル・トークン方式とレジスタ・インサージョン方式〔9〕を併用する。リング上の各ステーションは自己トークンと呼ばれる複数のトークンと、レジスタ・インサージョン方式のためのレジスタ（長さは最大パケット長×トークン数）を持つ。レジスタ・インサージョン方式による空間再利用はあるステーションを飢餓（starvation）に陥れる可能性がある。しかし、自己トークン方式においては、各ステーションはパケットの送出に際し、自己トークンをパケットの先頭に付ける。したがって、各ステーションからのパケット送出が制限され、空間再利用により発生する恐れのある飢餓を防止できる。さらに、各ステーションに対する公正さ（fairness）も保たれる。本プロトコルは、各ステーションのトークン数を変えることによりプライオリティ付き送信も用意している。また、マルチプル・トークン方式で問題になるトークンの紛失、無効パケットの発生などにも比較的容易に解決される〔10〕。

以上のように、本プロトコルはマルチプル・トークン方式とレジスタ・インサージョン方式の両者の長所を合わせ持ち、互いの欠点を補ったチャネルアクセス方式となっている。すなわち、トークン方式から導かれるチャネルアクセスに対する公正さ（fairness）と、レジスタインサージョン方式から導かれるスループットと応答時間の特性の良さを合わせ持っているプロトコルになる。

2. 基本動作

自己トークン方式では、マルチプル・トークン方式をサポートするために、各ステーションに「自己トークン」と呼ばれる固有のトークンを割当てておく。ここで、ステーションが保持している自己トークンの状態をフリー、送信されたパケットの先頭に付けられた自己トークンの状態をビジーと呼ぶことにする。各ステーションは、自己トークンがフリーであれば、いつでも送信を開始できる。ただし、ステーションを通

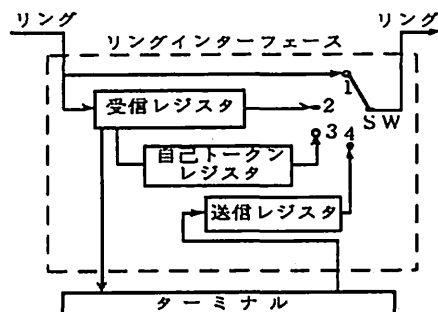


図1 ステーションの構成

過中のパケットがあれば、そのパケットが通過してから送信を始める。すなわち、ステーションプライオリティ方式となる〔11〕。しかし、ここでは、パケットを送信（またはリピート）した先のステーションが送信中であった場合、パケットの衝突を起す。そこで、送信中に到着した受信パケットを一時的に蓄える受信レジスタを用意する。自己トークン数が1個であればこの受信レジスタは送信中に到着したパケットだけを蓄えればよいので、レジスタ長はパケット長の最大値となる。また、送信を待つパケットのための送信レジスタ、自己トークンを保持するための自己トークンレジスタ、これらのレジスタの切替を行うスイッチも用意する。すると、ステーションの構成は、図1のようになる。図示のステーションの動作をスイッチの切替条件で説明すると、次のようになる。

- (1) 受信レジスタ・送信レジスタが共に空き、
- (2) 受信レジスタにパケットがあり、送信レジスタが空きもしくは自己トークンがビジー、
- (3) 自己トークンがフリーで、送信レジスタにパケットがある、
- (4) (3) で自己トークンが送られたのに続いて、送信レジスタからデータの送信が行われ、(3) と(4) の操作で新しいパケットが作られる。

ここで、自己トークンがフリーかビジーかは、自己トークンレジスタが空きか否かを調べることによって判定される。また、パケットを取り除く責任のあるステーションは、送信ステーシ

ン自身である。各ステーションは、リングの上位に位置するステーションからリピートされてきたパケットの自己トークンが自ステーションのものであるかどうかをチェックし、もし自分が送信したパケットであれば、パケットをリングから取り除く。そのために、各ステーションにおいては、自己トークン（実際には15バイトのヘッダフィールド）のチェックのための遅延を生じることになる。

3. パケットフォーマット

図2は、自己トークン方式のパケットフォーマットである。このフォーマットは、PCFs（スタート・フィジカル・コントロール・フィールド）を除いては、トークンリング方式（IEEE 802.5）のフォーマットと同じである。また、トークンリング方式と同様にパケット長に上限を設ける。これによって、ステーションの受信レジスタ長を有限にする。なぜなら、各ステーションが送信する間に到着するパケットを蓄えるための受信レジスタであるから、パケット長に上限を設ければ、受信レジスタ長も有限となる。また、プライオリティ送信のための自己トークン番号を入れるフィールドとしてNSTを、また、自己トークンのエラー検出と回復を行なうのに送信アドレスのパリティビットとしてPRT、モニタカウントとしてMCを設ける[10]。

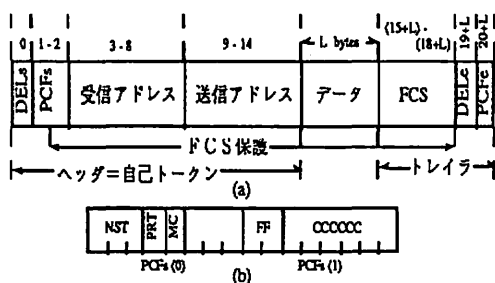


図2 パケットフォーマット：(a) パケット全体、(b) PCFs フィールド

4. プライオリティ送信

自己トークン方式は、自己トークンがフリーかビジーかによってチャネルアクセスを制御するので、全てのステーションに公正なチャネルアクセスの機会を与えることができる。しかし、全てのステーションを平等に扱うのではなく特定のステーションを優先したい場合もある。例えば、大容量のファイルサーバ、あるいは音声や画像処理装置は、他の装置よりも多くの伝送速度を必要とする。このような時は、次に示すようなプライオリティ送信を提供する。

本方式は、各ステーションに割当てられる自己トークンの数で、プライオリティを与えることができる。プライオリティ送信のために用意されたNSTの3ビットによって0～7レベル、8段階のプライオリティレベルを設定できる。つまり、通常のステーションには、最低のプライオリティレベル0を割当て、自己トークンを一つだけ与える。一方、より高速な送信を要求するステーションには、より高いプライオリティレベル p を割当て、 $(p+1)$ 個の自己トークンを与える。これにより、より高速な送信を必要とするステーションは、通常のステーションよりも短い平均伝達時間で送信ができる。なお、プライオリティ送信においては、 p レベルのステーションの受信レジスタ長は、パケット長の最大値の $(p+1)$ 倍必要になる。

5. 性能評価

自己トークン方式の性能評価を行うが、本方式のようにマルチプル・トークンとレジスタ・インサージョン方式を併用したプロトコルの解析は一般に困難である。ここでは、先ずシミュレーションにより性能を評価し、その後待ち行列による近似解析について論じる。性能評価の尺度としては一般的に使用されているスループットと平均伝達時間の関係を用いる。ここで、平均伝達時間（応答時間）とは、送信ステーションでのパケット発生から待ち時間を経て、送信され、受信ステーションでのコピーが終るまでの時間である。スループットとは、1秒間にリング上を流れたパケットの合計ビット数である。

5. 1 シミュレーション

リングの諸条件は次のように仮定する。

- (1) 送信するパケット長は、指数分布とする、
- (2) 送信するパケットの到着は、ポアソン分布とする、
- (3) 送信ステーションに対して、受信ステーションはリング上に一様に分布する、
- (4) 全てのステーションでこれらのパラメータが全て等しい均等システムである（一部のプライオリティ送信のシミュレーションを除く）。

次の諸量がモデルに与えられるパラメータである： C =リングの伝送速度、 N =ステーション数、 H =パケットのヘッダとトレイラの長さ、 L =パケットのメッセージの長さ、 T_c =自己トークン数。

自己トークン方式およびトークンリング方式については、それぞれのプロトコルを忠実にシミュレートした。一方、FDDIには、同期/非同期送信の二つの送信モードがある。同期送信モードは、リング上のステーションの一番速い要求に合せて設定されたターゲット・トークン・ローテーション・タイム（TTRT）に関係なくトークンを受け取るたびに送信出来ることを保証したものである、同期送信分はコンス

タントに使われることになる[12]。したがって、性能評価の際は、非同期送信モードを扱うだけで十分であると考えられている[13]。したがって、本論文でも、非同期送信モードのみを取り扱う。

図3は、リングの伝送速度が100Mbpsの時のトークンリング、FDDI及び自己トークン方式のスループットと平均伝達時間の特性である。図示のように、本方式は他の2つの方式より優れた特性を示している。トークンリング方式においては、スループットの増加に対し平均伝達時間の増加が顕著である。トークンリング方式では、送信ステーションはビジートークンが戻ってからフリートークンを送出するので、伝送速度に対してデータ長が相対的に短い場合には、送信が終わってからフリートークンを送出するまでの時間が長くなり、リング上のどのステーションも送信していない「空き」の時間の割合が極端に増えるためである。FDDIにおいては、送信後ただちにトークンを送出するが、トークンが次のステーションに届くまでは、どのステーションも送信できないので、データ長が伝送速度に対して相対的に短くなると、空きの時間の割合が増えることになる。それに対し、本方式は空間再利用により複数のス

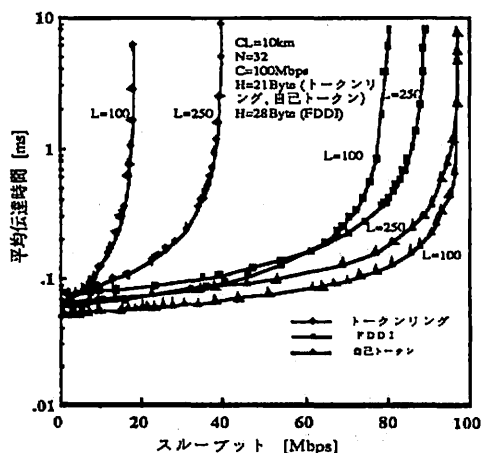


図3 トークンリング、FDDI、自己トークン方式の比較

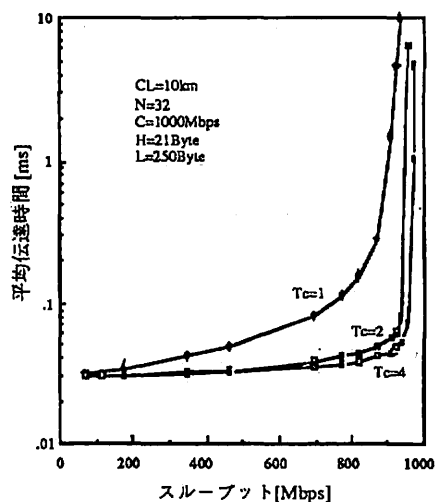


図4 プリオリティ送信

ステーションが並行してパケットの送信ができるので、リングの伝送速度を大きくすることや伝送速度に対して相対的にデータ長を短くすると、トークンリングやFDDI方式より良い特性が得られることがわかる。

図4は、通常の（プライオリティの最も低い）ステーションのなかに、4ステーションおきにプライオリティの高いステーションを混在させ配置した場合の特性である。プライオリティレベル0と1、0と3（自己トークン数は1個と2個、1個と4個）のスループット対平均伝達時間の特性である。この時、伝送速度に対するスループットが小さい時はほとんど変らないが、スループットが増すにつれプライオリティ送信の効果が現われ、プライオリティの高いステーションの方が平均伝達時間が短くなっている。これは、スループットが小さいときは、複数ある自己トークン全てを有効に使うことがなく、ステーションが保持していることが多いためである。しかし、スループットが大きくなると複数ある自己トークンが無駄なく使われステーションが保持している時間より、リング上（受信レジスタ中も含む）にいる時間が長くなるためである。また、同図より、自己トークンをあまり

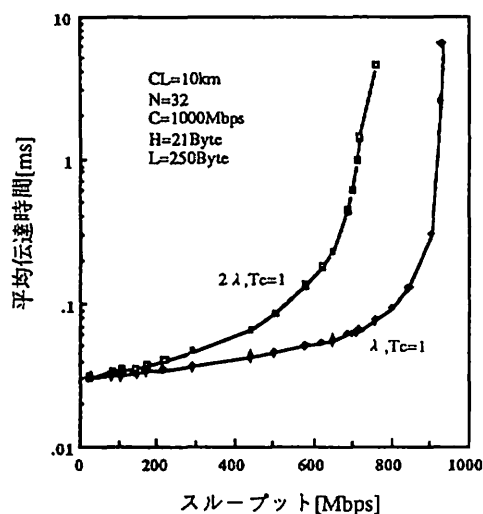


図5 トラフィックとトークンの関係 ($T_c = 1$)

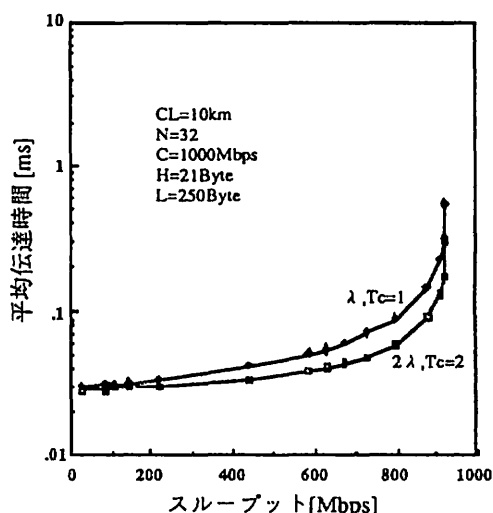


図6 トラフィックとトークンの関係 ($T_c = 1$, $T_c = 2$)

増やしてもその効果がそれほど顕著でなくなることが知れる。

図5は、トラフィックバランスが不均一な場合である。4ステーションおきに、トラフィックが2λで、あとのステーションはλである。また、各ステーションの自己トークンの数は、1個である。図示のように、トラフィック2λのステーションの方が平均伝達時間が長くなっていることがわかる。さらに、トラフィックλのステーション間にトラフィック2λのステーションとの相対位置による影響はみられない。図6は、図5と同じトラフィックパターンで、トラフィック2λのステーションに対してだけ、自己トークンを2個与えたものである。このとき、自己トークンを2個与えられたステーションの方が平均伝達時間が短くなっている。また、この影響でトラフィックλのステーションも影響を受けて平均伝達時間が遅くなっているが、相対位置による影響はみられない。したがって、プライオリティ送信によって、平均伝達時間を短くすることができ、しかも、プライオリティの低いステーションとプライオリティの高いステーションとの相対位置によって特性が影響を受けることもなく、公正さを実現できる。

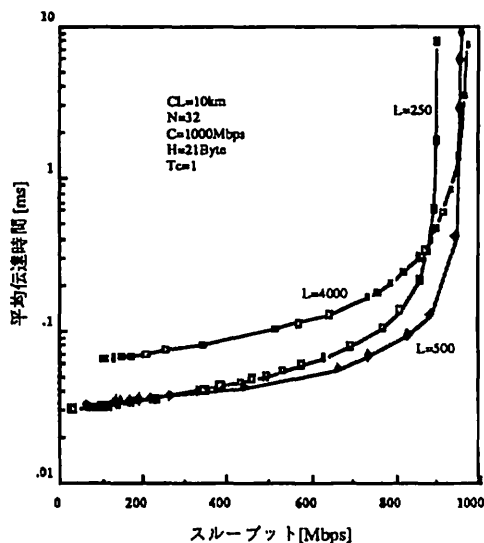


図7 パケット長の影響

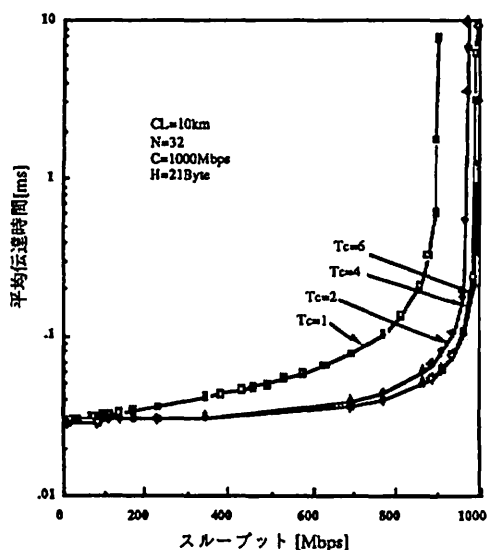


図8 トークン数の影響

図7は、媒体の伝送速度が1ギガbpsで、パケット長をパラメータとした時のスループット対平均伝達時間の特性である。なお、自己トークン数は1個である。データ長が250バイトでは、スループットに対する平均伝達時間の増加が速い。そこで、データ長を倍の500バイトとしてみると、スループットの上限は大きく

なっている。さらに、データ長を4000バイトにするとさらにスループットが大きくなることがわかる。しかし、自己トークンを1個のままデータ長を大きくすると送信時間が長くなりその分平均伝達時間は長くなる。

図8は、媒体の伝送速度が1ギガbpsで、自己トークン数をパラメータとした時のスループット対平均伝達時間の特性である。なお、データ長は250バイトである。自己トークン数を2個にすると、1個に比べ、スループットの上限が増加し、平均伝達時間も短くなっている。さらに、自己トークン数を4個、8個とすると、スループットと平均伝達時間の両方がさらに良くなっている。したがって、スループットの上限に対しては、パケット長を大きくすることと、自己トークン数を増やすことの二つが選択できる。その効果は、パケット長を大きくすることの方が大きい。しかし、伝達時間の点からは、自己トークン数を増やすことの方が有利である。

5.2 近似解析

自己トークン方式におけるステーションの近似解析モデルを図9に示す(図1参照)。図において、ステーションに到着したパケットは、送信レジスタでの送信待ち時間 w_l 、自己トークン待ち時間 w_o 、パケットの送信時間 E

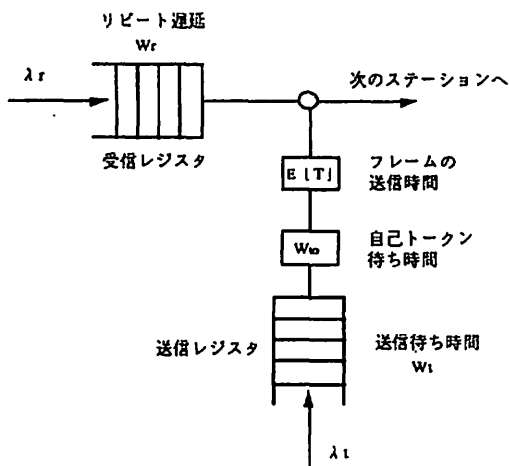


図9 解析モデル

[T] を経過の後リング上に送信される。なお、このモデルでは、ステーションプライオリティを仮定しているため、送信レジスタと受信レジスタにパケットが存在している場合、送信レジスタの方が優先される。リングの諸条件及びパラメータはシミュレーションの場合と同じであるが、さらに次の諸量を導入する：メッセージの長さの平均 $\bar{L}$ と 2 乗平均 $\bar{L}^2$ 、 λ_i = 各ステーションへのメッセージ到着率、 λ_r = リピートバッファへのメッセージ到着率、 τ = パケットがケーブルを 1 周するのに要する時間（ケーブル長 $\times$ $5 \mu s$ ）、 h = 送受信アドレスを解釈するのに要する時間。

パケットの送信時間の平均 $E[T]$ と 2 乗平均 $E[T^2]$ はそれぞれ、

$$E[T] = (H + \bar{L}) / C \quad (1)$$

$$E[T^2] = (H + 2H\bar{L} + \bar{L}^2) / C^2 \quad (2)$$

送信レジスタでの送信待ち時間 w_i 、中継ステーションでのリピート待ち時間 w_r は、文献 [14] よりそれぞれ式 (3)、式 (4) のように与えられる。

$$w_i = \frac{(\rho_i + \rho_r) E[T^2]}{2(1 - \rho_i) E[T]} \quad (3)$$

$$w_r = \frac{\rho_i (1 + \rho_r (1 - \rho_i - \rho_r)) E[T^2]}{2(1 - \rho_i - \rho_r)(1 - \rho_i)(1 - \rho_r) E[T]} \quad (4)$$

ただし、 $\rho_i = \lambda_i E[T]$ 、 $\rho_r = \lambda_r E[T]$ である。

次に自己トークンの待ち時間 w_{to} を求める。まず、トークン待ちがない場合、リングを 1 周するのに要する時間を R とすると、

$$R = w_{to} + (N - 1)w_r + hN + \tau \quad (5)$$

各ステーションの平均サービス率（単位時間当たりのパケットの処理数）を μ とすると、

$$\mu = \frac{1}{R + w_{to}} \quad (6)$$

また、ステーションのトラフィック密度を ρ とすると、

$$\rho = \frac{\lambda_i}{\mu} = \lambda_i (R + w_{to}) \quad (7)$$

ここで、 ρ は単位時間にパケットの送信を要求する割合（確率）を表わすので、自己トークンの待ち時間 w_{to} は、トラフィック密度とリングを

1 周する時間 R の積として、

$$w_{to} = \rho R \quad (8)$$

と表わされる。したがって式 (7) より、

$$w_{to} = \frac{\lambda_i R^2}{1 - \lambda_i R} \quad (9)$$

式 (1)、(3)、(4)、(9) より、リングのスループット S と、パケットの平均伝達時間 w を求めると、

$$S = \lambda_i N (H + \bar{L}) \quad (10)$$

$$w = w_i + w_{to} + E[T] + (N/2 - 1)h + N/2 + \pi/2 \quad (11)$$

式 (11) において第 1 項は送信レジスタでの平均待ち時間、第 2 項は自己トークンの平均待ち時間、第 3 項は平均送信時間、第 4 項は受信ステーションに届くまでの平均リピート待ち時間、第 5 項は受信ステーションに届くまでの送受信アドレス平均チェック時間、第 6 項は受信ステーションに届くまでの平均ケーブル遅延である。

図 10 は、ステーション数 32、伝送速度 1000 Mbps、ケーブル長 10 km で、データ長をパラメータとした時の解析値とシミュレーション値を示している。同図において、横軸がスループットで縦軸が平均伝達遅延である。解析値とシミュレーション値を比較すると、解析

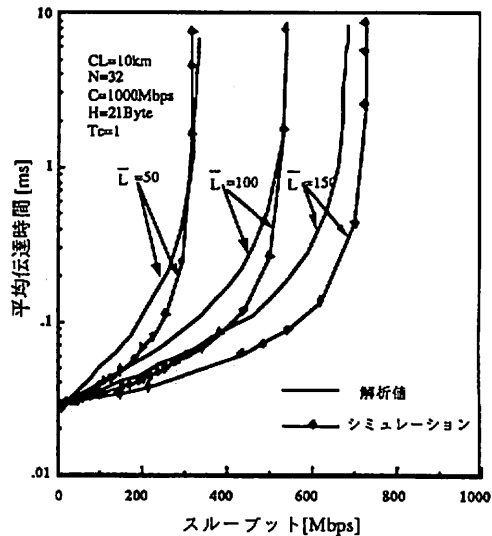


図 10 解析値とシミュレーション値の比較

値の平均伝達遅延の方がシミュレーション値より大きくなっているが、解析値とシミュレーション値は同じ様な傾向を示していることがわかる。特に、パケット長が短ければ解析値とシミュレーション値がよく合うことがわかる。

6. むすび

リング上の各ステーションに自己トークンと呼ばれる各ステーションに固有のトークンを配し、バンド幅の空間再利用を行なうことにより、スループットの増加と伝達時間の短縮を目的としたLANプロトコルを提案した。まず、自己トークンプロトコルの基本動作について説明し、ついでパケットフォーマットやプライオリティ送信について述べた。さらに、シミュレーションと近似解析により、本プロトコルの性能を評価した。その結果、

- (1) 本プロトコルはトークンリングやFDDIプロトコルより優れたスループット対伝達時間特性を持っている。
- (2) 本プロトコルはリング上の各ステーションに公正なチャネルアクセスを保証しながら、選択されたステーションにはプライオリティ送信を与えることができる。
- (3) パケット長を長くするか、各ステーションの自己トークン数を増やすことにより、スループットを大きくできる。ただし、伝達時間を考慮すると、自己トークン数を増したほうがよい。

今後、同期、非同期通信への対応や解析モデルの改良などについて研究を続けたい。

文献

- [1] G. Stix, "Data Communications," IEEE Spectrum, pp.35-37, Jan. 1990.
- [2] R. Jain, "Introduction to FDDI," 15th Conf. on Local Computer Networks Tutorial, Oct. 1990.
- [3] R. L. Fink and F. E. Ross, "Following the Fiber Distributed Data Interface," IEEE Network, Mar. 1992.
- [4] M. M. Nassehi, "Cyclic-Reservation Multiple-Access Scheme for Gbit/s LANs and MANs Based on Dual-Bus Configuration," IBM Res. Rep. R2, 1969 (#69551), Jun. 1990.
- [5] H. T. Kung, "Gigabit Local Area Networks: A System Perspective," IEEE Commun. Magazine, Apr. 1992.
- [6] "Token Ring Access Method and Physical Layer Specifications," IEEE Press, Apr. 1985.
- [7] I. Cidon and Y. Ofek, "Distributed Fairness Algorithms for Local Area Networks with Concurrent Transmissions," IBM Res. Rep. RC 15051(#67227), Oct. 1989.
- [8] I. Cidon and Y. Ofek, "MetaRing - A Full-Duplex Ring with Fairness and Spatial Reuse," IEEE Trans. COMM., vol. 41, No.1, pp.110-120, Jan. 1993.
- [9] D. E. Huber, W. Steinlin, and P. J. Wild, "SILK: An Implementation of a Buffer Insertion Ring," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. SAC-1, No.5, pp. 766-774, Nov. 1983.
- [10] T. Takeda and K. Tanno, "Register Insertion/Self-Token Protocol for High Speed Ring LANs," Proc. of IEEE LCN'90, pp.60-64, 1990.
- [11] A. Thomasian and H. Kanakia, "Performance Study of Loop Networks Using Buffer Insertion," Computer Networks, vol.3, pp.419-425, 1979.
- [12] J. F. McCool, "FDDI: Getting to know the inside of the ring," Data Communications, pp.185-192, March, 1988.
- [13] E. M. Spiegle, "Performance Analysis the Timed-token Protocol: A Vacation Model," Trans. of Conf. High-Speed Networking, Sep. 1990.
- [14] W. Bux and M. Schlatter, "An Approximate Method for the Performance Analysis of Buffer Insertion Rings," IEEE Trans. Commun., vol.COM-31, No.1, pp. 50-55, Jan. 1983.