

## 多重リング・ネットワークとその性能について†

橋本浩一<sup>†\*</sup> 大前義次<sup>††</sup>

近年、分散設置された多数のコンピュータ、端末、各種オフィス機器等を相互に接続するローカル・エリア・ネットワーク (LAN) が重要となっている。LAN のリング型アクセス制御方式として、従来、単一リングによるトークン・パッシング方式が用いられている。しかし、高速伝送化をはかると伝送遅延によるオーバーヘッドが大きくなり、システム効率が低下する。この観点から、リングを多数並列に配置した多重リングによるトークン・パッシング方式を提案する。本研究では、単一リングの平均伝送時間を仕事量保存則を用いて求め、それを構成する期待時間の加法性の成立から多重リングの平均伝送時間算定のための理論式を導いた。理論値とシミュレーション値との比較を行い、システム効率から見て、単一リングの高速化をはかるより、リング数を増して多重リングにした方がはるかに優れていることを明らかにした。

### 1. ま え が き

近年、多数分散設置されたコンピュータ、端末、各種オフィス機器等を相互に接続するローカル・エリア・ネットワーク (LAN) が注目され、データの伝送にとどまらず、電話、ファクシミリ、画像などマルチメディア伝送能力が要請されている。

LAN の一形態であるリング型アクセス制御方式にはトークン・パッシング方式が多く利用されている。

トークン・パッシング・リングではトークンと呼ばれる特殊フィールドが周回しており、送信要求のあるノードはトークンをビジー状態に変えてフレームをリング上に送出する。送信ノードはすべてのフレームを送出後にトークンをフリー状態にし、再びトークンを送出し、他のノードに送信権を渡す。

これまで単一リングによるトークン・パッシング方式は伝送速度をあげることで効率の向上をはかってきた。本研究では、リングを多数並列に配置する多重リングによるトークン・パッシング方式を提案するものである。多重リングにおける平均伝送時間とスループットの関係を明らかにし、LAN 構築のための算定式を与えるものである。

以下、2章でリング型アクセス制御方式について述べ、3章では、従来、多重待ち行列として解かれていた単一リングの平均伝送時間を仕事量保存則を用いて算出し、4章で多重リングへの適用をはかった。5章では単一リングと多重リングの効率について論ずる。

† Performance on the Multiple Ring Networks by KOICHI HASHIMOTO and YOSHITSUGU OHMAE (Department of Information Science, Faculty of Engineering, University of Ibaraki).

†† 茨城大学工学部情報工学科

\* 現在 (株)東芝情報通信システム技術研究所

### 2. 方式の説明

$n$  個のノードが等間隔に配置され、制御機能が等しく分散されているリング・ネットワークについて考える。

トークン・パッシングのアクセス制御方式は以下に示すサービス方式<sup>1)</sup>とトークン制御方式<sup>2)</sup>による。

#### (1) サービス方式

a) **exhaustive** 方式: 各ノードにおいてフレーム (パケット+ヘッダ) がある限り、サービスを続ける方式 (全処理式) と、フリー・トークン到着時点までにノードに発生した待ちフレームのみにサービスを提供する方式 (ゲート式) がある。

b) **non-exhaustive** 方式: たかだか  $m$  個の待ちフレームをサービスする方式。

#### (2) トークン制御方式

a) **single-token** 方式: フレームの先頭が送信ノードに戻ってきたときにフリー・トークンを解放する。

b) **single-packet** 方式: フレームが送信ノードに読み込まれて消された時点でフリー・トークンを解放する。

c) **multiple-token** 方式: フレームを送出し終えたとすぐにトークンを解放する。

本研究では、これらのうちのゲート式サービスと multiple-token 制御方式をとっている。各ノードはフレームの発生率  $\lambda$  が等しい (symmetric) ポアソン到着で、フレームのサービス時間は一般分布に従う。送信ノードと受信ノード間の平均伝送遅延は各ノードでの遅延を含むリング一巡の電氣的伝送遅延時間  $\tau$  の半分とする。

本研究で提案する多重リングは図1のようにS本のリングからなり、すべてのノードによってアクセスされ得る。各リングのフリー・トークンは独立にサービスを提供する。フレームがサービスを受ける順序はFCFS (First-Come-First-Service) に基づく。リング数が2本である2重リングのサービス方式を図2に示す。各リングのフリー・トークンが別々にゲート式サービスを行えば、フレーム1とフレーム2はリング1でサービスされ、リング2ではフレーム3だけがサービスされる。この場合、フレーム1のサービス中にリング2のフリー・トークンが入手されるので、フレーム2がサービスされる前にフレーム3がサービスされ、FCFS とならない。ゲート式サービスを保ち、FCFS となるためには、フレーム1のサービス中に到着したリング2のフリー・トークンによってフレーム2がサービスされればよい。この2重リングのサービス方式を一般化したフローチャートを図3に示す。以下このフローチャートについて、図2のフレーム1~3を例として述べる。

フレーム1は最初の発生なので他のフレームのサービスによる送信待ちは起こらない。ところがこのフレームの発生時点にはフリー・トークンは入手されないで、新たなフリー・トークンが到着するまで送信待ちをしなければならない。フレーム2の

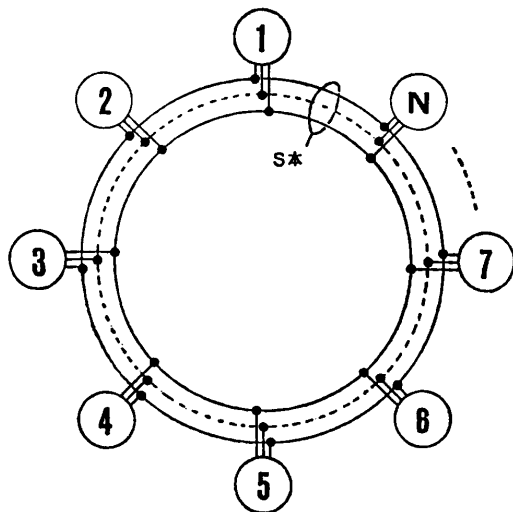


図1 多重リング・ネットワークの形態  
Fig. 1 Diagram of a multiple ring network.

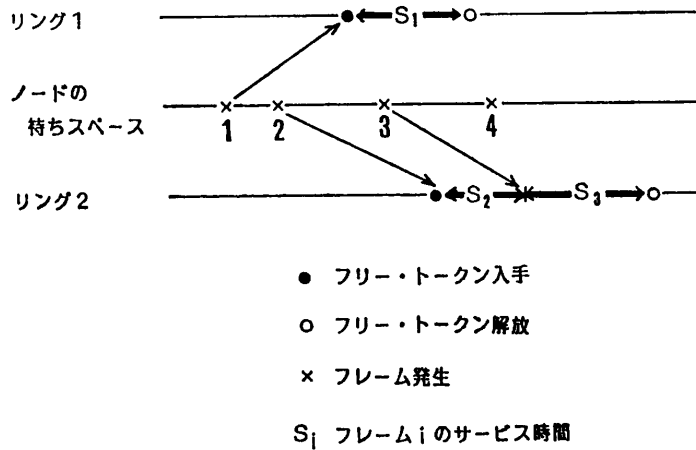


図2 2重リングの一つのノードでのサービス方式  
Fig. 2 Service order at each node of 2-multiple rings.

発生時点ではまだフレーム1がサービスされていないので送信待ちとなる。リング1に新たなフリー・トークンが到着すると、送信待ち状態であったフレーム1はサービスを開始する。フレーム2はフレーム1のサービスによって送信待ちを一時解除されるが、リング1のフリー・トークンはフレーム1のサービス中であるため、このサービスが完了するか、リング2に新しいフリー・トークンが到着するまで再度送信待ちとなる。フレーム3が発生した時点ではフレーム2がサービスされていないので送信待ちとなる。リング2

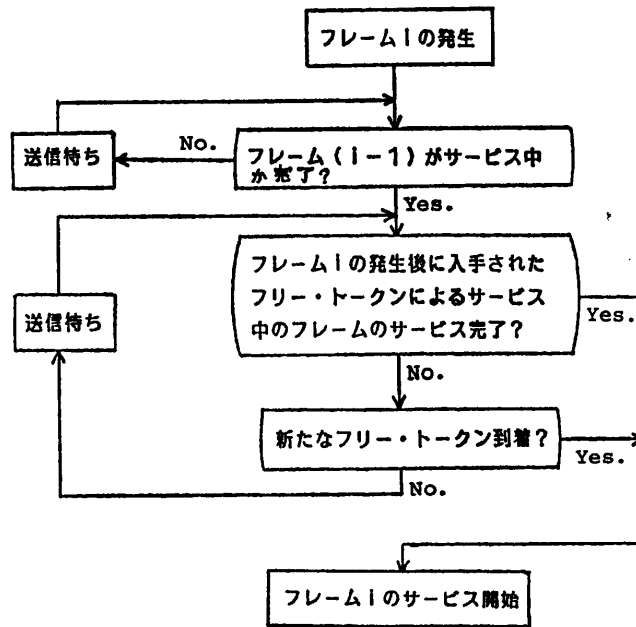


図3 多重リングのサービス方式フローチャート  
Fig. 3 Flow chart for service order of multiple rings.

に新しいフリー・トークンが到着すると、それまで送信待ちであったフレーム 2 がサービス開始となる。フレーム 2 のサービス中にフレーム 1 のサービスが終了するが、リング 1 のフリー・トークンはフレーム 3 の発生以前に到着したのでフレーム 3 のサービスは行わない (ゲート式サービス)。したがってフレーム 3 発生後に入手されたリング 2 のフリー・トークンによってサービスされる。サービス中であるフレーム 2 のサービスが完了すると、フレーム 3 のサービスが開始される。

3. 単ーリングの平均伝送時間

各ノードに発生したフレームの受信ノードまでの伝送時間は

- ① フレームがノードに発生してからサービスを受けるまでの送信待ち時間
  - ② フレームの送信時間 (サービス時間)
  - ③ 受信ノードまでの伝送遅延時間
- に分けられる。これらの期待値のうち、平均送信待ち時間を仕事量保存則<sup>9)</sup>を用いて算出する。

任意のノードで送出されたフリー・トークンは他のノードのサービスを順次行う。そのフリー・トークンがリングを一巡するのに必要な時間をスキャン・タイムという。図 4 は各ノードの残余仕事量とスキャン・タイムの関係を示している。ノードに発生したフレームの送信時間  $T_i$  は発生時点で残余仕事量として加えられる。サービス中、すなわちノードでフリー・トークンを保持している間に発生したフレームは現在サービスされている残余仕事量に加えられない。フリー・トークン入手後、残余仕事量は -1 の傾きで減り続け、0 になった時にフリー・トークンを解放する。点線は他のノードの残余仕事量とフリー・トークンが移行するのに要する時間の和である。スキャン・タイムとフリー・トークンを保持している時間をそれぞれ確率変数  $X_0, X_1$  とし、その密度関数のラプラス変換を  $X_0^*(S), X_1^*(S)$  とする。また、送信待ち時間  $W$  のラプラス変換を  $W^*(S)$  とする。

$$W^*(S) \triangleq \int_0^\infty e^{-st} dW(t) = E[e^{-sW}] \quad (1)$$

$W(t)$  は  $W$  の確率分布関数。

待ち行列の規則は FCFS と仕事量保存を仮定する。新しいフレームが到着する事象で計算を条件付ける。このフレームの送信待ち時間  $W$  は、 $X_0$  区間の残余時間  $Y_0$  と  $X_0$  区間にそのフレームより以前に到着したすべてのフレームの送信時間の和に等しい。送信時間の密度関数のラプラス変換を  $B^*(S)$  とすると、 $W^*(S)$  は三つの変数  $X_0, Y_0$  および  $M_0$  (注目フレームより以前に到着するフレーム数) によって求められる。

$$E[e^{-sW} | X_0=x, Y_0=y, M_0=m_0] = e^{-sy} [B^*(S)]^{m_0} \quad (2)$$

$(x-y)$  区間に  $m_0$  個のフレームが到着することから、

$$E[e^{-sW} | X_0=x, Y_0=y] = e^{-sy-\lambda(x-y)+\lambda(x-y)B^*(S)} \quad (3)$$

$Y_0$  は  $X_0$  の残余時間であることから、その結合密度  $dX_0(x)dy/E[X_0]$

$X_0(x)$  は  $X$  の確率分布関数

によって (3) 式の  $X_0$  と  $Y_0$  の条件を取り除くと次式を得る。

$$E[e^{-sW}] = \frac{X_0^*(S) - X_0^*[\lambda - \lambda B^*(S)]}{[-S + \lambda - \lambda B^*(S)]E[X_0]} \quad (5)$$

また、 $X_1$  の区間長は  $X_0$  区間に到着するフレームの送信時間の和に等しいことから、

$$E[e^{-sX_1} | X_0=x, M_1=m_1] = [B^*(S)]^{m_1} \quad (6)$$

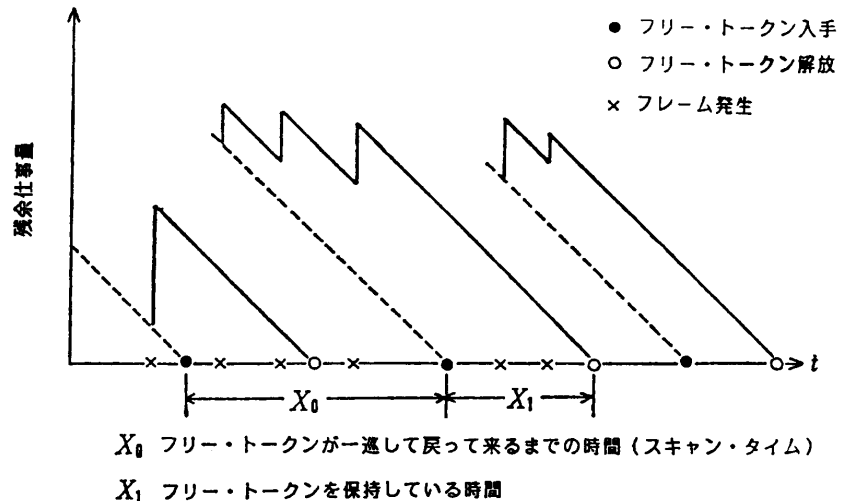


図 4 各ノードの残余仕事量とスキャン・タイムの関係  
Fig. 4 Relationship among the unfinished work at each node and the scan time.

となる。よって、次式を得る。

$$X_1^*(S) = X_0^*[\lambda - \lambda B^*(S)] \quad (7)$$

これを(5)式に代入すると、

$$W^*(S) = \frac{X_1^*(S) - X_0^*(S)}{[S - \lambda + \lambda B^*(S)]E[X_0]} \quad (8)$$

を得る。したがって、平均送信待ち時間は(8)式の一次微係数として

$$E[W] = -W^{*(1)}(0) = \frac{[1 + \lambda E[T_r]]E[X_0]}{2E[X_0]} \quad (9)$$

となる。(9)式の  $X_0$  の1次と2次のモーメントは次式で与えられる<sup>4)</sup>。

$$E[X_0] = \frac{\tau}{1 - \rho} \quad (10)$$

$$E[X_0^2] = \frac{\tau}{(1 - \rho)^2} \left\{ \frac{E[T_r^2]\rho}{(1 + \rho/n)E[T_r]} + \tau \right\} \quad (11)$$

$$\rho \triangleq n\lambda E[T_r] \quad (12)$$

よって、平均送信待ち時間は

$$E[W] = \frac{\rho E[T_r^2]}{2(1 - \rho)E[T_r]} + \frac{\tau(1 + \rho/n)}{2(1 - \rho)} \quad (13)$$

(13)式はフリー・トークンのノード間移行時間を一定としたゲート式多重待ち行列の式<sup>1)</sup>と一致する。よって、単一リングの平均伝送時間  $\bar{T}_s$  は次式で与えられる。

$$\bar{T}_s = \frac{\rho E[T_r^2]}{2(1 - \rho)E[T_r]} + \frac{\tau(1 + \rho/n)}{2(1 - \rho)} + E[T_r] + \frac{\tau}{2} \quad (14)$$

#### 4. 多重リングへの拡張

本章で多重リングの平均伝送時間の算定式を導く。その前に多重リングの各ノードから見たフリー・トークン到着間隔の期待値、すなわち合成スキャン・タイムの平均値を算出する。

##### 4.1 合成スキャン・タイム

3章で述べた単一リングのスキャン・タイムの定義を多重リングの場合に適用する。単一リングのスキャン・タイムはフリー・トークンが一巡するのに必要な時間であるが、言い換えると、これはフリー・トークン到着間隔である。ノードにあるフレームは到着したフリー・トークンによってサービスされる。多重リングでは、どのリングのフリー・トークンでも早く到着したものによってサービスされるので、各ノードにおいて、どのリングのフリー・トークンにかかわらず、フ

リー・トークンの到着する間隔が多重リングのスキャン・タイムとなる。これを単一リングのスキャン・タイムと区別するために合成スキャン・タイムという。単一リングのスキャン・タイムと合成スキャン・タイムの関係を図5に示す。

合成スキャン・タイムは単一リングが並列化された場合のスキャン・タイムの最小時間で与えられる。

単一リングのスキャン・タイムの分布を(10)式の逆数をパラメータとした指数分布関数

$$F_s(t) = 1 - \exp\left(-\frac{1 - \rho_t}{\tau}\right) \quad (15)$$

で近似した結果を図6に示す。指数分布の無記憶性より、 $S$ 本のリングからなる多重リングの合成スキャン・タイムの分布関数  $F_M(t)$  は次式を満たす。

$$1 - F_M(t) = [1 - F_s(t)]^S \\ = \exp\left[-\frac{S(1 - \rho_t)}{\tau}\right] \quad (16)$$

(16)式をシミュレーション結果と比較したものを図7に示す。良く適合していることがわかる。

多重リングでは、単一リングより処理能力が  $S$  倍に増えるのでスループットは、

$$\rho^* \triangleq n\lambda^* E[T_r]/S \quad (17)$$

となる。よって、平均合成スキャン・タイムは

$$\frac{\tau}{S(1 - \rho^*)} \quad (18)$$

となる。

#### 4.2 多重リングの平均伝送時間

(13)式の単一リングの平均送信待ち時間は次の二つの時間に分けられる。

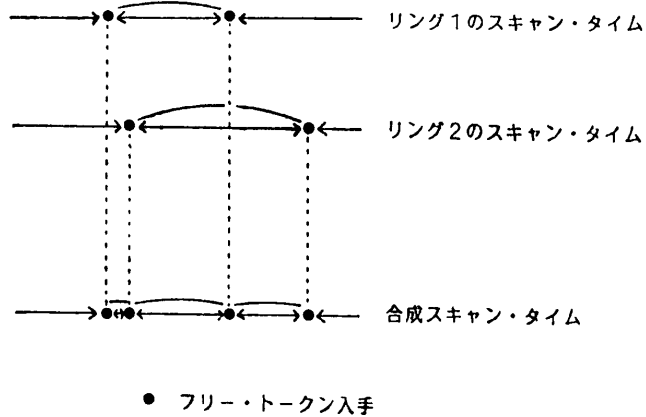


図5 スキャン・タイムと合成スキャン・タイムの関係 ( $S=2$ )  
Fig. 5 Relationship among the scan time and the composite scan time ( $S=2$ ).

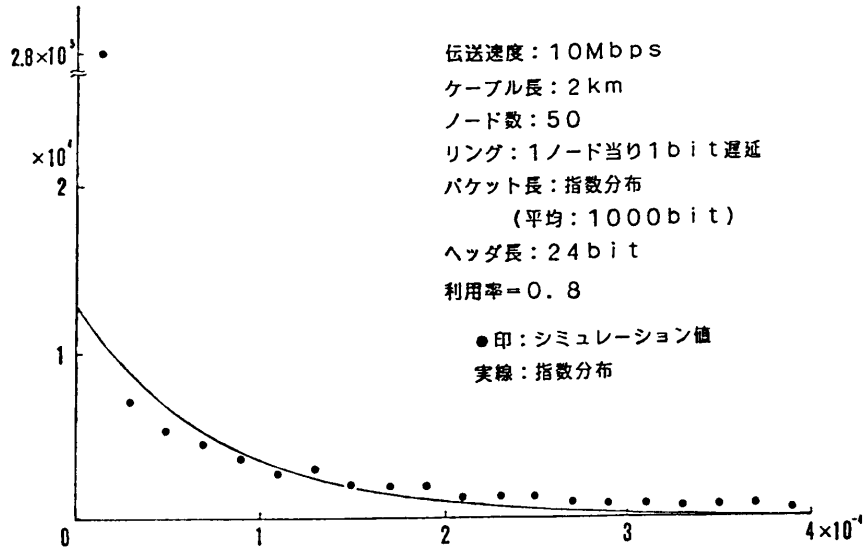


図 6 単一リングのスキャン・タイムの分布  
 Fig. 6 The scan time distribution of single ring.

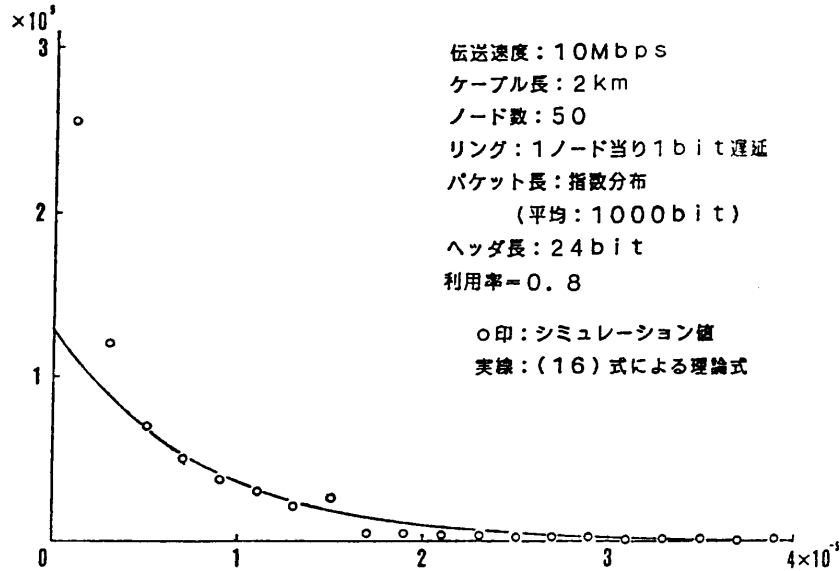


図 7 10重リングの合成スキャン・タイムの分布  
 Fig. 7 The composite scan time distribution of 10-multiple rings.

(13-a) M/G/1 の平均待ち時間

(13-b) 各ノードの負荷に依存する平均スキャン・タイム, すなわち

$$\frac{\tau(1+\rho/n)}{2(1-\rho)} = F\left(\frac{\rho}{n}\right) \cdot [\text{平均スキャン・タイム}] \quad (19)$$

$$\text{ここで } F\left(\frac{\rho}{n}\right) \triangleq \frac{1}{2}\left(1 + \frac{\rho}{n}\right) \quad (20)$$

(13-a) は各ノードですでにフリー・トークンを入手していることを仮定したときの平均送信待ち時間で,

(13-b) はそのフリー・トークンを入手するまでの期待時間と考える。

単一リングの(13)式の期待時間の加法性の成立から, 多重リングの平均送信待ち時間は,

(13-a)' M/G/S の平均待ち時間. ポラチェック・ヒンチンの公式を用いて, M/M/S の平均待ち時間より求める。

(13-b)' 各ノードの負荷に依存する平均合成スキャン・タイム. すなわち, (18)式より,

$$F\left(\frac{\rho^*}{n}\right) \cdot \frac{\tau}{S(1-\rho^*)} = \frac{\tau(1+\rho^*/n)}{2S(1-\rho^*)} \quad (21)$$

の和で与えられると考える。

よって、多重リングの平均伝送時間の算定式は、

$$\bar{T}_m = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{V[T_f]}{E[T_f]^2} \right) \bar{W}_m + \frac{\tau(1+\rho^*/n)}{2S(1-\rho^*)} + E[T_f] + \frac{\tau}{2} \quad (22)$$

$\bar{W}_m$ : M/M/S の平均待ち時間

$V[T_f]$ : 送信時間の分散

で与えられる。

### 5. 多重リングの評価と有効性

多重リングの算定式の妥当性を検証するためにシミュレーションとの比較を図8に示す。多重リングはリング数を2, 4, 10とし、各リングの長さは2kmで、50のノードをもった場合である。また、ケーブルのもつ信号伝送遅延時間は5μsec/kmとする。

グラフの縦軸はフレームの平均伝送時間とパケット（ヘッダを含まない）の平均送信時間の比を表している。この比はリング・ネットワークの効率を示している。横軸はスループットと伝送速度の比を表し、これは利用率を示している。図8から明らかなように、結果はきわめて良い一致を示しており、多重化を行うと効率が明らかによくなることわかる。

同じ伝送容量を条件としたときの単一リングと多重リング（リング数10）の効率の比較を図9に示す。単一リングのフレーム発生率は(12)式より

$$\lambda = \frac{\rho}{nE[L_f]} \cdot v \quad (23)$$

$L_f$ : フレーム長

となり、多重リングのフレーム発生率は(17)式より、

$$\lambda^* = \frac{\rho^*}{nE[L_f]} \cdot v^* \cdot S \quad (24)$$

となる。同じ伝送容量をもつことは、

$$v = v^* \cdot S \quad (25)$$

であるから、利用率が同じならば、発生率も一致する。

図9に示した単一リングの場合の伝送時間に

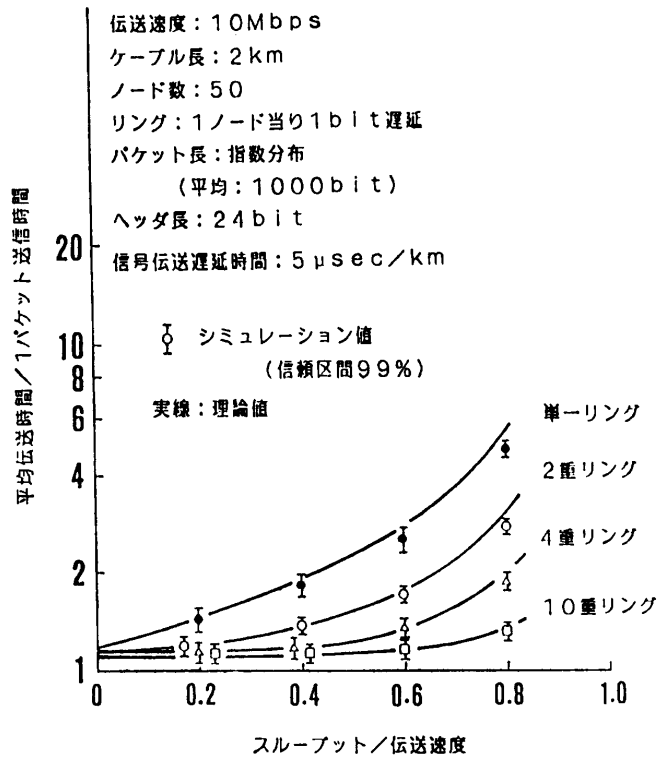


図8 単一リングと多重リングの利用率-伝送時間特性  
Fig. 8 Transfer time-throughput characteristics for single ring and multiple rings.

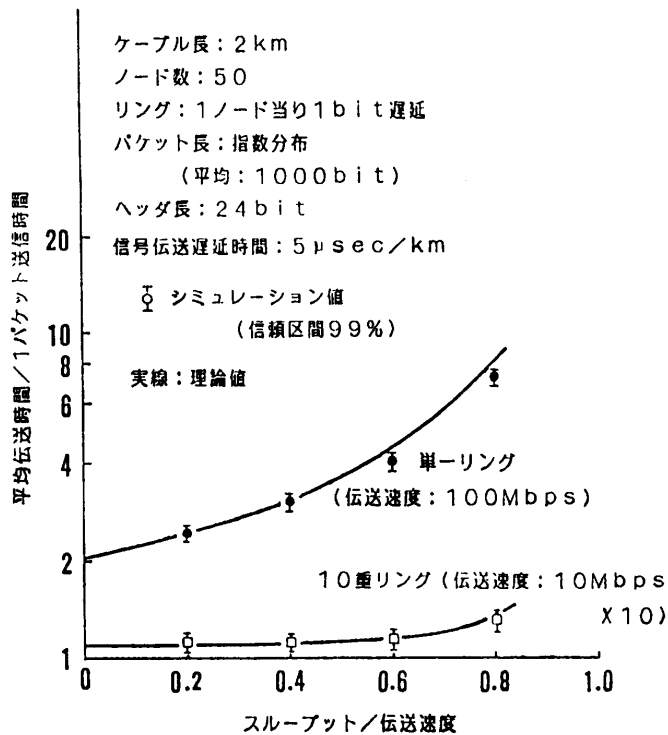


図9 単一リングと多重リングの性能比較  
Fig. 9 Comparison of performance for single ring and multiple ring.

ついて、その構成要素に分解したものを図10に示す。図から伝送時間に占める送信待ち時間、フリー・トークン入手するまでの期待時間、伝送遅延時間等の占める割合が明らかである。これらが多重化によってそれぞれ大幅に短縮され、図9の多重リングのように効率化される。以上により、単一リングより多重リングの方が高い効率を示すことが明らかとなった。

多重リングの有効性について要約すると次のように考えられる。

(1) 単一リングと多重リングについて、リングの総伝送速度を同一にした場合、パケット送信時間に対する平均伝送時間(システム効率)は、多重リングの方が大幅に改善される(図9)。

(2) システム効率が、単一リングの場合、スループットの増加とともに急速に低下するが、多重リングではこの低下は少なく、安定な伝送ができる(図8, 図9)。

(3) 高いスループット状態で、長短パケットが混在する場合、長大パケットに続く短パケットは、待合わせのため伝送時間が増大する。しかし本方式では並列伝送によるパイプライン効果によって伝送の効率化をはかることができる。

(4) リングの並列化により、単一リングの場合に比べて、信頼性の向上が期待できる。

## 6. 方式に関する補足事項

### (1) 受信フレームの順序の逆転

送信ノードではFCFSでフレームを送信している。しかし本方式では多重リングのため受信ノードにおいてフレームの順序が逆転することが起こりうる。この場合の対策として次の二通りの方法が考えられる。

① 順序性のある情報は同一フレームで送る。すなわち、すべてのフレームは独立として取り扱う。したがってこの場合の制御方式は単一リングの場合と変わらない。

② 通常のデータリンクレイヤのほかに上位レイヤを設け、この中にフレームごとの順序情報を挿入する。この方法によってシステムの自由度が向上する。しかし制御方式は①に比べて複雑となる。

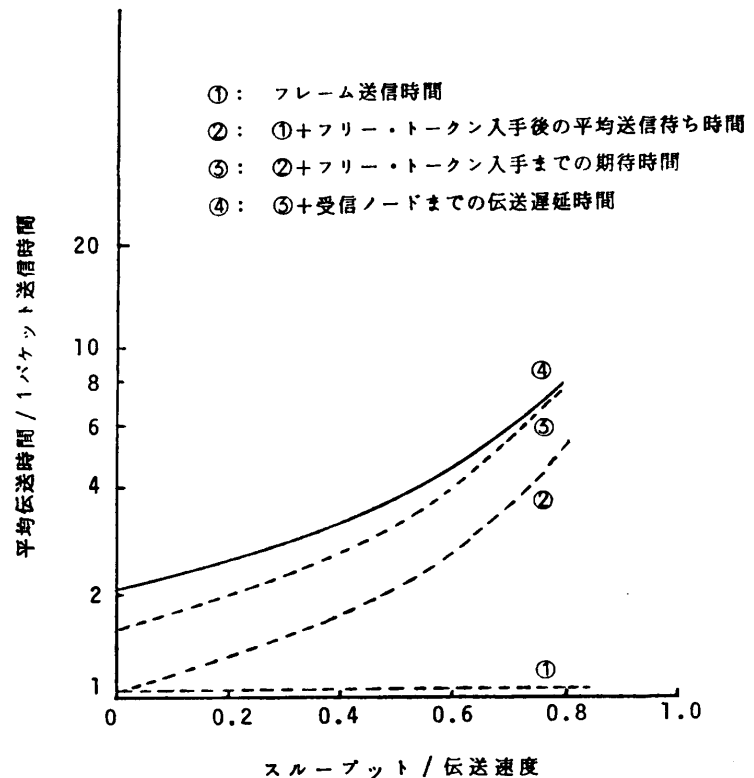


図10 単一リングの平均伝送時間の構成要素  
Fig. 10 Constituent elements of transfer time for single ring.

(2) ゲート式サービス, multiple-token 制御方式を取り上げた理由と、他の方式との比較

サービス方式として、代表的なものに全処理式とゲート式がある。いずれも実用的な方式といえる。単一リングの場合について、全処理式については、すでに Bux<sup>2)</sup>が詳細な性能研究を発表している。したがって本研究ではゲート式を取り上げ、その性能を明らかにした。しかしながら研究の結果、両者の性能上の違いは、フリー・トークン入手までの期待時間だけであり、それは次式に示すとおりである。

$$\text{全処理式の場合 [文献 2)] : } \frac{\tau(1-\rho/n)}{2(1-\rho)} \quad (26)$$

$$\text{ゲート式の場合 [(14)式] : } \frac{\tau(1+\rho/n)}{2(1-\rho)}$$

すなわち、分子の  $\rho/n$  の項の符号が異なるだけである。これから明らかなことは、ゲート式は全処理式より時間が延びる方向にあることである。しかし、 $\rho < 1$  であり、ノード数  $n$  が増すにつれてこの差は僅小であると考えられる。

また、本研究では、トークン制御方式として multiple-token 方式を取り上げている。他の single-packet

方式, single-token 方式の場合との違いについて述べる。三者の違いは, 方式の定義から, フレーム当りの平均送信時間  $E[T_p]$  だけにあらわれる。  $T_p$  をフレーム当りの純送信時間とすると, 次式の関係で与えられる。

$$E[T_p] = \begin{cases} \max[T_p, \tau] : \text{single-token 方式} \\ T_p + \tau : \text{single-packet 方式} \\ T_p : \text{multiple-token 方式} \end{cases} \quad (27)$$

上式から, リングの規模が大きくなるほど ( $\tau \rightarrow$ 大), また伝送速度が速くなるほど ( $T_p \rightarrow$ 小), multiple 方式が効率的に有利であることがわかる。しかし障害復旧対策上からは, 常時ただ1個のトークンが周回する single 方式の方が優れているといえる。

## 7. むすび

アクセス制御方式にトークン・パッシング方式を用いた単一リングのフレーム平均伝送時間を仕事量保存則に基づいて算出した。これを拡張して, 多重リングによるトークン・パッシング方式を提案し, 平均伝送時間の算定式を与えた。

システムの効率的見地から, 単一リングの高速化をはかるより, リング数を増し, 多重リング化をはかる方がはるかに優れていることを明らかにした。

## 参考文献

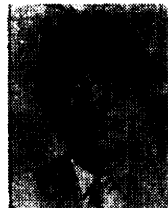
- 1) 橋田, 中村: 多重待ち行列の解析 [I], 通研実報, Vol. 19, No. 6, pp. 1125-1136 (1970), 橋田: [II], 通研実報, Vol. 19, No. 10, pp. 1855-

1864 (1970).

- 2) Bux, W.: Local-Area-Subnetworks: A Performance Comparison, *IEEE Trans. Comm.*, Vol. COM-29, No. 10, pp. 1465-1473 (1981).
- 3) Kleinrock, L.: *Queueing Systems*, Vol. I, pp. 219-223, John Wiley & Sons (1975).
- 4) Carsten, R. T., Newhall, E. E. and Posner, M. J. M.: A Simplified Analysis of Scan Times in an Asymmetrical Newhall Loop with Exhaustive Service, *IEEE Trans. Comm.*, Vol. COM-25, No. 9, pp. 951-957 (1977).

(昭和60年8月30日受付)

(昭和61年8月27日採録)



橋本 浩一 (正会員)

1961年生。1984年茨城大学工学部情報工学科卒業。1986年同大学院修士課程修了。同年(株)東芝に入社, 情報通信システム技術研究所勤務。コンピュータ・ネットワーク・サービスの研究・開発に従事し, 現在に至る。



大前 義次 (正会員)

1952年日本大学工学部卒業。1968年工学博士。現在茨城大学工学部情報工学科教授。教育・研究分野は, 情報システム科学とコンピュータ・ネットワークの解析等, 著書は, 「タイムシェアリングシステム」(オーム社), 「応用待ち行列理論」(日科技連)等。電子通信学会, OR学会各会員。