

論 文

FDDI ネットワークにおけるトランスポートプロトコルの スループット解析

正員 石橋 豊[†] 正員 丸山 充^{††} 正員 阪本 秀樹^{††}

Throughput Analysis of Transport Protocol in an FDDI Network

Yutaka ISHIBASHI[†], Mitsuru MARUYAMA^{††} and
Hideki SAKAMOTO^{††}, Members

あらまし 本論文では、FDDI ネットワークにおける ISO トランスポートプロトコルクラス 4 (TP 4) および TCP (Transmission Control Protocol) 相当のトランスポートプロトコルのスループット特性を解析する。また、一つのステーションだけが送信すべきデータをもつとした非対称トラヒックの場合とすべてのステーションが送信すべきデータをもつとした対称トラヒックの場合の両者に対して、TTRT (Target Token Rotation Time), リング遅延, ウィンドウサイズ, ユーザデータ長等のパラメータが特性に及ぼす影響を明らかにする。更に、トランスポートプロトコルのオーバヘッドを定量的に示すため、トランスポートプロトコルを用いない場合の FDDI のスループット特性との比較を行う。その結果、ウィンドウサイズとユーザデータ長の特性に及ぼす影響は、TTRT の影響よりも大きく、より厳密に選択する必要があること等を示す。

キーワード 特性解析、スループット、FDDI、ISO トランスポートプロトコルクラス 4、TCP/IP

1. まえがき

FDDI (Fiber Distributed Data Interface)⁽¹⁾ に代表される高速 LAN の出現や B-ISDN (Broadband aspects of Integrated Services Digital Network)⁽²⁾ に関する研究の進展に伴い、エンド・エンドの通信プロトコル処理の高速化が研究されている。特に、FDDI については、オンボードで TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol) 処理を行う通信ボードが市販されるようになり、高速化が加速されつつある。

プロトコル処理の高速化には、文献(3), (4)に見られるように、高速通信に適したプロトコル仕様や処理手法を考えることに加えて、プロトコル処理のハードウェア化が必要である。プロトコル処理のハードウェア化は、文献(5), (6)におけるように、下位レイヤのプロトコルだけでなく、トランスポートレイヤまたはセッションレイヤまでの上位レイヤに至るまで広げ

られつつある。その結果、文献(6)において、アプリケーションレイヤを含めたプロトコル処理性能として 24 Mbit/s まで確認されている。今後、ハードウェア化が更に進められ、ネットワーク性能を十分に使いこなせるようになることが期待される。

このような状況において、プロトコル処理のハードウェア化により達成可能なプロトコル処理性能を明らかにし、プロトコル処理量に依存しない部分のオーバヘッドを定量的に明らかにしておくことが必要である。本論文は、このような観点から、FDDI における ISO トランスポートプロトコルクラス 4 (TP 4) (CCITT X.224 クラス 4 と同等) や TCP/IP 相当のトランスポートプロトコルのスループット特性の解析を行ったものである。

FDDI の特性については、文献(7), (8)等において理論的に解析されている。特に、文献(7)では、通信パターンの周期性に着目し、1 周期内に正しく送信されたデータ量を周期の長さで割ることによりスループット特性を解析している。一方、TCP/IP については、文献(9), (10)等において、それぞれプログラムの分析、実測により、プロトコル処理量やその内訳を明らかにしている。また、文献(11)では、TP 4 の特性を下

† 名古屋工業大学工学部電気情報工学科、名古屋市

Faculty of Engineering, Nagoya Institute of Technology,
Nagoya-shi, 466 Japan

†† NTT ヒューマンインターフェース研究所、武蔵野市

NTT Human Interface Laboratories, Musashino-shi, 180 Japan

位レイヤのプロトコルも含めてシミュレーションにより明らかにしている。

しかし、FDDI におけるトランスポートプロトコルの特性解析については、これまでに報告されていない。この種の階層型通信プロトコルの特性解析としては、文献(12)～(14)等がある。文献(12)は、トークンリングネットワーク (IEEE 802.5) におけるトランスポートプロトコルのスループット・平均遅延特性を MVA (Mean Value Analysis) の手法を用いて解析している。FDDI もトークンリングネットワークの一形態ではあるが、FDDI がタイムドトークンプロトコルを採用している点で異なるので、文献(12)の解析手法をそのまま適用することはできない。一方、文献(13), (14)では、特定のプロトコルやアーキテクチャに依存しない解析法を用い、その特性を明らかにしている。例えば、文献(13)では、文献(7)と同様に、通信パターンの周期性を見出すことにより、スループット特性を解析している。本論文でも、文献(7)や文献(13)と同様に、通信パターンの周期性に着目し、FDDI におけるトランスポートプロトコルのスループット特性を解析する。

以下では、まず 2. で FDDI とトランスポートプロトコルの概要について説明する。3. でスループット特性の解析の仮定や前提について明らかにし、4. でスループット特性の解析を行う。5. では、シミュレーションにより解析で用いた近似の妥当性を検証し、各種パラメータがスループット特性に及ぼす影響を明らかにする。

2. FDDI とトランスポートプロトコル

2.1 プロトコル構成

本論文で解析するプロトコルは、(a)レイヤ 1 とレイヤ 2 の下位サブレイヤ MAC (Media Access Control) に FDDI, (b)レイヤ 2 の上位サブレイヤに IEEE 802.2 LLC (Logical Link Control) タイプ 0, (c)レイヤ 3 に IP, (d)レイヤ 4 に TP 4 および TCP 相当のトランスポートプロトコル、という階層構成をしている。

FDDI の回線速度 C は 100 Mbit/s であり、トークンを受信したステーションが送信を行うことができる。トークンを受信したときに送信可能な時間は、トークンの巡回時間と密接な関係をもち、MAC サブレイヤのタイムドトークンプロトコルにより制御される。各ステーションは、トークンの巡回時間を監視す

る TRT (Token Rotation Timer) とトークンを解放しなければならない時間を監視する THT (Token Holding Timer) というタイマをもち、トークンを受信するごとに TRT の値を THT にセットし、TRT の値をリセットする (タイマはインクリメントカウンタのように動作する)。送信には同期転送と非同期転送があり、同期転送ではトークン巡回ごとにあらかじめ設定されている送信帯域で送信可能である。残りの帯域で送信を行う非同期転送では、THT が TTRT (Target Token Rotation Time : 目標とする TRT の初期値であり、リング初期化時に 4 ms から 165 ms の範囲で決定される) に達して満了するまでフレームを送信し続けることができる。従って、非同期転送における送信可能時間は、トークンの巡回時間、すなわち他のステーションがどの程度送信すべきフレームをもっているかに依存する。

トランスポートプロトコルは、TP 4 および TCP のように、通信の信頼性を保証するために、順序制御、チェックサム、再送制御を行うことにより、データ誤り、消失、重複、セグメント到着の順序ずれ等を検出・回復する機能をもつ。また、送受信間でバッファオーバーフローなどが起きないようにフロー制御の機能をもつ。このフロー制御は、ウィンドウフロー制御と呼ばれ、受信側から送信側に対して、受信可能なデータ量をバイト単位で肯定応答 (ACK) を用いて指定する†。送信側では、指定されたデータ量を送信し終えると、受信側から指示があるまで送信を控える。

なお、各レイヤにおいてデータの呼び方が異なるが、本論文では、ユーザデータを含むフレームをデータフレームと呼び、ACK と区別する。

2.2 フレームフォーマット

各レイヤのフレームフォーマットの相互関係を図 1

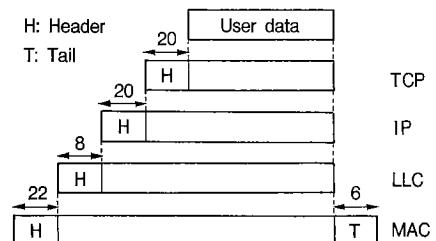


図 1 フレームフォーマット
Fig. 1 Frame format.

† TCP のウィンドウサイズの単位は Byte であるが、TP 4 ではパケットを単位としている。本論文では、ユーザデータを分割して送信することは行わないで、プロトコルの振舞いは同じである。

に示す。図中において、MAC ヘッダ長は $H_{mac}=28$ Byte (プリアンブルの 8 Byte, FCS, ED, FS⁽¹⁾ の 6 Byte を含む), LLC ヘッダ長は $H_{llc}=8$ Byte (LLC: 3 Byte, SNAP (Sub-Network Access Protocol) : 5 Byte), IP ヘッダ長は $H_{ip}=20$ Byte, トランスポートヘッダ長は TCP を例にとり $H_{tcp}=20$ Byte とする。なお、TCP/IP ヘッダ長にはオプションパラメータを含めていない。フレーム長 (プリアンブルを除く) は最大 4.5 kByte まで可能である。

2.3 データ送信の一例

FDDI におけるトランスポートプロトコルによるデータ送信の一例を図 2 に示す。図 2 では、ステーション 0 が他の二つのステーション (1 と 2) にデータフレームを送信する場合を示しており、ウィンドウサイズはウィンドウが閉じないよう十分に大きいとしている。

ステーション 0 は、1 回目のトークン受信時には、送信すべきデータフレームをもっていなかったが、2 回目のトークン受信時までにいくつかのデータフレームを発生したとしている。2 回目のトークン受信時の TRT の値は、リング遅延 (ring latency) R 秒であり、この値を THT にコピーすると共に、TRT を初期値にリセットし、THT が満了 (満了値は TTRT の値 T 秒である) するまでデータフレームを送信する。THT が満了すると、トークンを解放する。THT の満了時に、データフレームを送信しているときは、送信完了してからトークンを解放する。図中では、THT の満了時点と送信完了時点が一致するとしている。ステーション 1 がトークンを受信したとき、TRT は既に満了しているので、直ちにトークンを解放する。ステーション 2 も同様である。これにより、ステーション 0 は、トークンを解放してから、 R 秒後に再度トークンを受信することになる。しかし、ステーション 0 の TRT は、前のトークン獲得時にリセットされているため、この時点においても満了していることになる。従って、

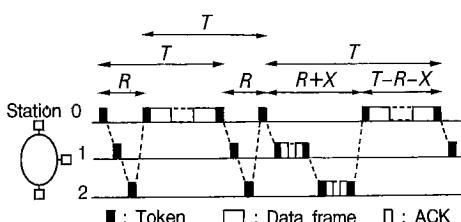


図 2 データ送信の一例

Fig. 2 An example of data frame transmission.

ステーション 0 も同様にトークンを解放する。

次に、トークンを受信するステーション 1 では、TRT の値は R 秒となっており、ステーション 0 から受信したデータフレームに対する ACK をすべて返送し、トークンを解放する。ステーション 2 も同様に ACK を返送する。その後、ステーション 0 がトークンを受信したときの TRT の値は、ステーション 1 とステーション 2 の ACK 送信時間を X 秒とすると、 $R + X$ 秒となる。従って、時間 $T - R - X$ 秒内にデータフレームを送信することが可能であり、その数は、前に送信したデータフレームの数に依存すると共に、値も異なる可能性がある。

以上示したように、送信データフレーム数や ACK 数は、相互に影響し、THT の満了時点とデータフレームの送信完了時点の関係にも依存するので、その関係は煩雑となる。また、図 2 では、ウィンドウサイズが十分大きく、ウィンドウが閉じることがないとしているが、ウィンドウの開閉を考慮すると、更に煩雑となる。

3. 解析の前提と仮定

FDDI ネットワークには N_{total} ($N_{total} \geq 2$) 個のステーションが存在し、 N ($2 \leq N \leq N_{total}$) 個のステーションがデータの送受信を行うものとし、既にコネクションは設定されているとする。送信すべきデータフレームを有する送信ステーションは、残り $N-1$ 個のステーションに対して、均等に (サイクリックに) データフレーム送信を行うものとする。この送信は、FDDI の非同期転送により行うとし、同期転送は本論文では扱わない。また、優先権も扱わないものとする。受信ステーションは、データフレームを受信すると、受信データフレームごとに一つ ACK を送信ステーションに返送する。複数の受信データフレームに対して一つの ACK を返送することも可能であるが、本論文では制御が簡単な受信データフレームごとに一つ ACK を返送する方式を対象とする。更に、データフレームの分割・組立は行わないものとする。なお、TCP では、ウィンドウサイズを適応制御するようになっているが、本論文では固定とする。

本論文では、トラヒックとして、一つのステーションだけが送信すべきデータをもつ非対称トラヒックの場合とすべてのステーションが送信すべきデータをもつ対称トラヒックの場合を扱う。非対称トラヒックの場合のような通信形態の一例としては、FDDI ネット

ワーク上で画像ファイルサーバを構築し、複数ステーションから大量の画像ファイルを読み取るような場合を考えられる。対称トラヒックの場合のような通信形態の一例としては、画像ファイルを複数ステーション間で転送するような場合が考えられる。対称トラヒックの場合の ACK の返送方法は、トークン受信時にまず受信したデータフレームに対する ACK を返送した後、新たなデータフレームを送信するものとする。また、この場合、ACK をデータフレームに相乗りさせることも可能であるが、本論文では、解析の複雑さを避けるためだけでなく、安全側の評価とすることから、相乗りさせずに ACK として返送することにする[†]。

本論文では、スループット ρ_{max} を解析するため、送信ステーションは、常に送信すべきデータを有すると仮定する。ここで、スループットとは、単位時間当たりに送信できるユーザデータの平均ビット数の回線速度に対する比率と定義する。また、プロトコル処理時間はハードウェア化により無視できるものと仮定すると共に、トークンの送信時間も無視できるものと仮定する。更に、伝送誤りやデータ紛失も無視できるものと仮定する。

4. スループット解析

前節の条件のもとでは、LLC と IP が単に固定ヘッダを付与・削除するだけとみなすことができるるので、スループット解析においては、MAC のタイムドトークンプロトコルとトランスポートプロトコルのウインドウフロー制御の関係を明確にすることが必要である。

まず、ステーション遅延 (station latency) を S 秒 ($S=1 \mu\text{s}/\text{ステーション}$)、ケーブル伝搬遅延を V 秒/ km ($V=5.085 \mu\text{s}/\text{km}$)、ケーブル長を L_c (km) とすると、リング遅延 R (秒) は次のように与えられる^{(7),(8)}。

$$R = L_c V + N_{total} S \\ = 5.085 \times 10^{-6} L_c + 1 \times 10^{-6} N_{total} \quad (1)$$

また、ユーザデータ長を L (Byte) で表し、データフレーム伝送時間を F (秒)、ACK 伝送時間を A (秒) で表すと、これらは図 1 から次のようになる。

$$H = H_{mac} + H_{llc} + H_{ip} + H_{tcp} \quad (2)$$

$$F = (H + L)/C \quad (3)$$

$$A = H/C \quad (4)$$

上式において、 H (Byte) は、データフレームに含まれるヘッダ長であり、ACK 長にもなる。なお、 $C=12.5 \text{ MByte/s}$ (100 Mbit/s) である。

4.1 非対称トラヒックの解析

各ステーションのウインドウサイズを W_s (Byte) で表すと、一つのステーション (これをステーション 0 とする) は論理多重した $N-1$ 個のステーションに送信するので、ACK を得ることなく送信できる最大データフレーム数 W は、次のようになる。

$$W = \lfloor W_s/L \rfloor (N-1) \quad (5)$$

但し、 $\lfloor x \rfloor$ は、 x 以下の最大の整数を意味する。

通信パターンの周期性を見出そうとするとき、2.(3)で説明したように、THT の満了時点とデータフレームの送信完了時点の不一致や ACK の送信から生じる煩雑さが問題となる。このうち、THT の満了時点とデータフレームの送信完了時点の不一致による煩雑さは、文献(7)からも類推することができる。そこで、この煩雑さを避け、通信パターンの周期性を容易に見出すため、ACK の送信時間を無視すると共に、THT の満了時点はデータフレーム送信完了時点に一致すると近似する。本論文では、このような近似により、通信パターンの周期性 (サイクルと呼ぶ) を見出し、スループットを導出するときには精度を高めるために、ACK の送信時間を考慮すると共に、THT の満了時点とデータフレームの送信完了時点が一致しないときを考慮とした近似解析を行う。近似の精度については、5.においてシミュレーション結果との比較により検証する。なお、解析では Late-Ct と呼ばれる TRT の満了をカウントするカウンタ⁽⁷⁾の影響を無視するが、シミュレーションではこの影響を考慮に入れている。

この近似のもとでは、非対称トラヒックの場合には、図 3 に示すように、TRT の満了とウインドウの開閉との関係から、通信パターンを三つに分類することができる。図中のサイクル (cycle) が通信パターンの周期を表す。図 3(a) は、TRT がウインドウが閉じる前に満了したり、次にトークンを受信する前に満了する場合を示す ($T \leq W(F+A)+R$)。ここで、 T は TTRT の値である。また、図 3(b) は、TRT が次にトークンを受信し、ウインドウが閉じる前に満了する場合を示しており ($W(F+A)+R < T \leq W(2F+A)+R$)。図 3(c) は、次にトークンを受信し、ウインドウが閉じた後に TRT が満了する場合を示す ($T > W(2F+A)+R$)。この場合には、TRT の満了は考慮する必要はなく、ウインドウの開閉だけを考慮すればよいことになる。

[†] TCP では相乗りできるようになっているが、TP 4 では相乗りさせないようになっている。

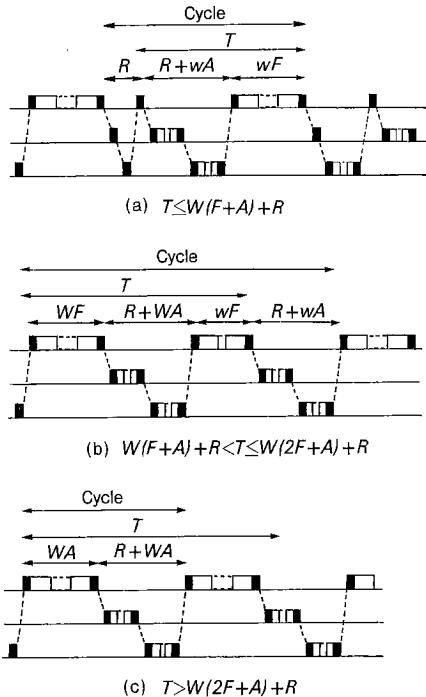


図 3 非対称トラヒックの場合の通信パターン

Fig. 3 Communication sequence in asymmetric traffic.

上記の各通信パターンに対するスループット解析を以下に示す。

(1) $T \leq W(F+A)+R$ の場合

図 3(a)からわかるように、図中のサイクル内にステーション 0 が送信するデータフレーム数を w で表すと、サイクル内に転送されるデータフレームの平均数と ACK の平均数が等しいことから、

$$w = \lceil (T - R - wA) / F \rceil \quad (6)$$

という関係式を得る†。但し、 $\lceil x \rceil$ は、 x 以上の最小の整数を表す。上式は、 w に関して解くことができ、解 w がサイクル内に送信される平均データフレーム数となる。

サイクル長は ACK の送信時間を考慮すると共に、THT の満了時点とデータフレーム送信完了時点とが一致しないときを考慮すると、図 3(a)から $w(F+A) + 2R$ となる。スループットは、サイクル内に送信されたデータフレームの送信時間 wF のサイクル長に対する比率にヘッダによるオーバヘッド $L/(H+L)$ を掛けることによって得られる。

$$\rho_{max} = \frac{L}{H+L} \cdot \frac{wF}{w(F+A) + 2R} \quad (7)$$

上式において、THT の満了時点とフレーム送信完了時点とが一致するとき、 $A=0$ と置くことにより、上式は文献(8)の FDDI のスループットの解析結果と一致することが確認できる。この場合、式(6)より、 $wF = T - R$ となるので、上式は次のようになる。

$$\rho_{max} = \frac{L}{H+L} \cdot \frac{T-R}{T+R} \quad (8)$$

上式において、ヘッダによるオーバヘッドを除けば、文献(8)に示されている結果と一致する。

(2) $W(F+A)+R < T \leq W(2F+A)+R$ の場合

図 3(b)のサイクルにおいて、ステーション 0 は、最初にデータフレームを最大データフレーム数 W 個送信する。次のトーン獲得時に、ステーション 0 が送信するデータフレーム数を w とすると、これは

$$w = \lceil (T - R - W(F+A)) / F \rceil \quad (9)$$

で与えられる。サイクル長は、(1)の場合と同様にして、図 3(b)から $W(F+A) + w(F+A) + 2R$ となる。以上より、スループットは次のようにになる。

$$\rho_{max} = \frac{L}{H+L} \cdot \frac{(W+w)F}{(W+w)(F+A) + 2R} \quad (10)$$

(3) $T > W(2F+A)+R$ の場合

図 3(c)のサイクルにおいて、ステーション 0 が送信するデータフレーム数およびステーション 0 以外のステーションが送信する ACK 数はともに W である。従って、サイクル長は $W(F+A) + R$ となるので、スループットは次のようになる。

$$\rho_{max} = \frac{L}{H+L} \cdot \frac{WF}{W(F+A) + R} \quad (11)$$

トランスポートプロトコルのオーバヘッドを明確にするため、文献(7)より得られる FDDI のスループットを以下に示す。

$$F' = (H_{mac} + H_{tc} + L) / C \quad (12)$$

$$w = \lceil (T - R) / F' \rceil \quad (13)$$

$$\rho_{max} = \frac{L}{H_{mac} + H_{tc} + L} \cdot \frac{wF' + T - R}{wF' + T + 3R} \quad (14)$$

上式において、THT の満了時点とデータフレーム送信完了時点とが一致するとすれば、(1)の場合と同様に、文献(8)の結果(式(8))と一致することが確認できる。

4.2 対称トラヒックの解析

対称トラヒックの場合には、図 4 に示すように、

† 図 3(a)のサイクルは、ACK の送信時間を考慮すると、厳密にはサイクルとなっていないことに注意されたい。サイクル内のすべての ACK の送信時間がデータフレーム数に影響を及ぼすとしたこの関係式は安全側の評価となる。この近似の妥当性もシミュレーションにより検証する。

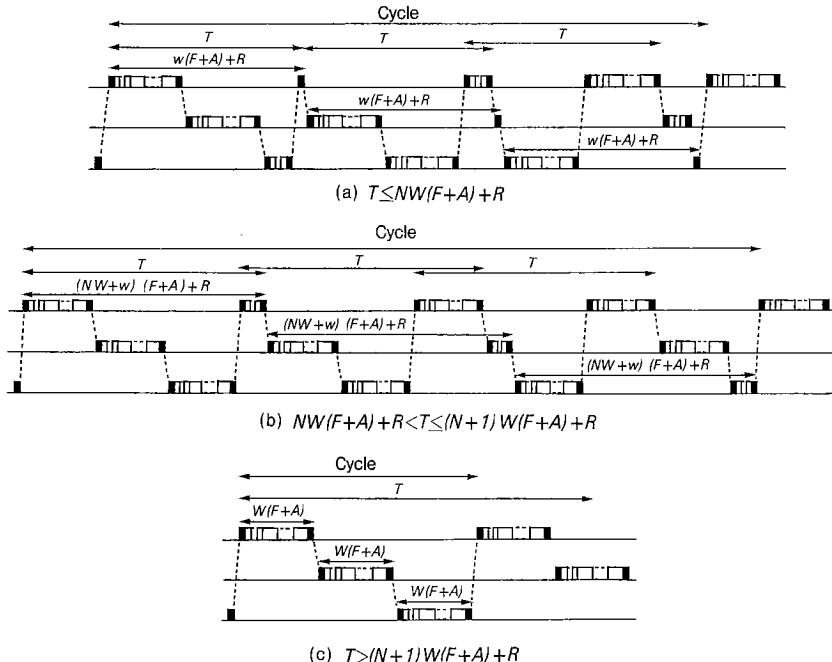


図 4 対称トラヒックの場合の通信パターン
Fig. 4 Communication sequence in asymmetric traffic.

TRT の満了とウィンドウの開閉との関係から、通信パターンを三つに分類することができる。図 4 は、ステーション 0 の周期性に着目したものである。ここで、各ステーションが ACK を得ることなく送信できる最大データフレーム数 W は、非対称トラヒックの場合と同様に、式(5)で与えられる。

図 4(a)は、TRT がウィンドウが閉じる前に満了したり、次にトーケンを受信する前に満了する場合を示す($T \leq NW(F+A)+R$)。また、図 4(b)は、TRT がウィンドウが閉じてから、次にトーケンを受信し、ウィンドウが閉じる前に満了する場合を示しており($NW(F+A)+R < T \leq (N+1)W(F+A)+R$)、図 4(c)は、次にトーケンを受信し、ウィンドウが閉じた後に TRT が満了する場合を示す($T > (N+1)W(F+A)+R$)。

上記の各通信パターンに対するスループット解析を以下に示す。

(1) $T \leq NW(F+A)+R$ の場合

図 4(a)において、ステーション 0 が最初にトーケンを受信し、次にトーケンを受信するまでの期間 (TRT が満了するまでの期間) に全ステーションが送信できる平均データフレーム数を w とすると、その期

間内に送信される平均 ACK 数も w となるので、

$$w = [(T - R - wA)/F] \quad (15)$$

という関係式を得る。図 4(a)では、この期間内の通信パターンがまずステーション 0 に現れ、ステーション 1 から順に周期的に現れる。サイクル長は、図 4(a)から、 $Nw(F+A)+(N+1)R$ となり、サイクル内に送信されるデータフレーム数は Nw であるので、スループットは次のようになる。

$$\rho_{max} = \frac{L}{H+L} \cdot \frac{NwF}{Nw(F+A)+(N+1)R} \quad (16)$$

上式において、 $N=1$ とおくと、式(7)と一致する。また、上式において、THT の満了時点とデータフレーム送信完了時点とが一致するとし、 $A=0$ と置くことにより、上式は文献(8)の FDDI のスループットの解析結果と一致することが確認できる。この場合、非対称トラヒックの場合の解析(1)の場合と同様に、 $wF = T - R$ となるので、上式は次のようになる。

$$\rho_{max} = \frac{L}{H+L} \cdot \frac{N(T-R)}{NT+R} \quad (17)$$

上式において、ヘッダによるオーバヘッドを除けば、文献(8)に示されている結果と一致する。

(2) $NW(F+A)+R < T \leq (N+1)W(F+A)$
+R の場合

図4(b)からわかるように、各ステーションは最初にデータフレームを W ずつ送信する。ステーション 0 の 2 回目のトークン獲得時に送信するデータフレーム数を w とすると、これは

$$w = \lceil (T - R - NW(F+A)) / F \rceil \quad (18)$$

で与えられる。この通信パターンがステーション 0 の後にステーション 1 から順に周期的に現れる。従って、サイクル長は、図4(b)から、 $N\{(NW+w)(F+A)+R\} + R$ となる。サイクル内に送信されるデータフレーム数は、 $N(NW+w)$ となるので、スループットは次のようにになる。

$$\rho_{max} = \frac{L}{H+L} \cdot \frac{N(NW+w)F}{N\{(NW+w)(F+A)+R\} + R} \quad (19)$$

上式において、 $N=1$ とおくと、式(10)と一致する。

(3) $T > (N+1)W(F+A)+R$ の場合

この場合、図4(c)のサイクルにおいて、各ステーションが送信するデータフレーム数および ACK 数はともに W である。従って、サイクル長は $NW(F+A)+R$ となるので、スループットは次のようになる。

$$\rho_{max} = \frac{L}{H+L} \cdot \frac{NWF}{NW(F+A)+R} \quad (20)$$

上式において、 $N=1$ とおくと、式(11)と一致する。

トランスポートプロトコルのオーバヘッドを明確にするため、トランスポートプロトコルおよび IP を用いないとした FDDI のスループットは、文献(7)より以下の式で与えられる。

$$\begin{aligned} \rho_{max} &= \frac{L}{H_{mac} + H_{tsc} + L} \\ &\times \frac{N \lceil (T-R)/F \rceil F' + N^2(T-R)}{N \lceil (T-R)/F \rceil F' + N^2(T-R) + (N^2 + 2N + 1)R} \end{aligned} \quad (21)$$

上式において F' は、式(12)で与えられる。また、上式において、THT の満了時点とデータフレーム送信完了時点とが一致するとすれば、(1)の場合と同様に、文献(8)の結果(式(17))と一致することが確認できる。

5. 数値例と考察

以下の数値例では、リング遅延の影響を調べるときを除いて、文献(8)と同様に、 $N_{total}=16$, $L_c=20$ km とする。このとき、リング遅延は $R=118 \mu s$ となる。

5.1 非対称トラヒックの場合

(1) TTRT の影響

ユーザデータ長 L をパラメータとしたときの TTRT に対するスループットを図5に示す。図5では、 $N=2$, $W_s=64$ kByte としている。図中の実線が理論結果を表し、記号がシミュレーション結果(送信データフレーム数: 30000)を表す(以下、同様)。シミュレーションは、3.の前提・仮定のもとで行っており、4.の近似は行っていない。シミュレーション結果と理

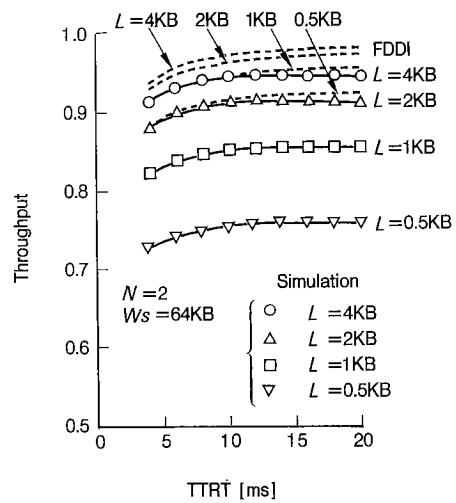


図 5 TTRT とユーザデータ長の影響
Fig. 5 Influence of TTRT and user data length on throughput in asymmetric traffic.

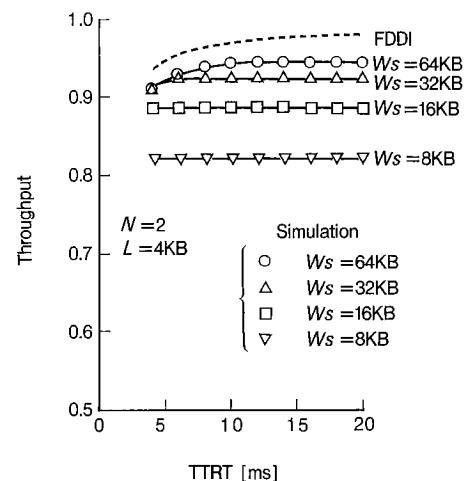


図 6 TTRT とウィンドウサイズの影響
Fig. 6 Influence of TTRT and windowsize on throughput in asymmetric traffic.

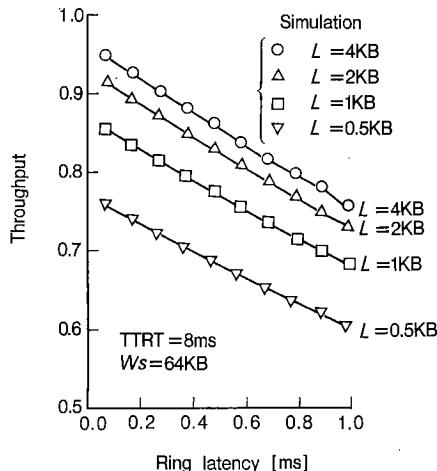


図 7 リング遅延の影響

Fig. 7 Influence of ring latency on throughput in asymmetric traffic.

論結果とを比較すると、全般によく一致しており、理論は十分に正確であることがわかる。

この図から、TTRT 値は、10 ms 程度に設定すればよいことがわかる。しかし、TTRT の選択はそれほど厳密に行わなくてもよいことがわかる。また、図中には、トランスポートプロトコルを用いない場合の FDDI のスループットを破線で示している。これによると、トランスポートプロトコルのオーバヘッドは、ユーザデータ長が小さいほど大きくなることが確認できる。

ウィンドウサイズ W_s をパラメータとしたときの TTRT に対するスループットを図 6 に示す。図 6 では、 $N=2, L=4 \text{ kByte}$ としている。この図からも、TTRT 値は 10 ms 程度に設定すればよいことがわかる。この図にも FDDI のスループットを破線で示している。これによると、ウィンドウサイズが小さいほど、トランスポートプロトコルのオーバヘッドが大きくなることが確認できる。

(2) リング遅延の影響

ユーザデータ長 L をパラメータとしたときのリング遅延に対するスループットを図 7 に示す。図 7 では、 $TTRT=8 \text{ ms}, W_s=64 \text{ kByte}$ としている[†]。この図から、リング遅延が大きくなるにつれて線形的にスループットが減少することが確認できる。この結果は、文献(8)の結果と一致する。

(3) ユーザデータ長の影響

ユーザデータ長の影響を更に調べるために、TTRT を

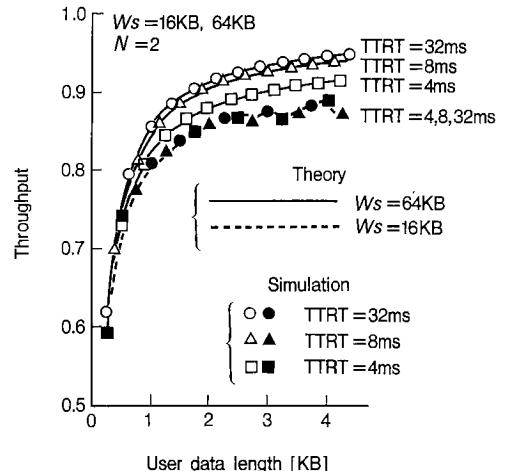


図 8 ユーザデータ長の影響

Fig. 8 Influence of user data length on throughput in asymmetric traffic.

パラメータとしたときのユーザデータ長に対するスループットを図 8 に示す。図 8 では、 $N=2, W_s=16 \text{ kByte}$ および $W_s=64 \text{ kByte}$ としており、 $W_s=16 \text{ kByte}$ のときのスループットを破線、 $W_s=64 \text{ kByte}$ のときのスループットを実線で示している。この図から、ユーザデータ長は、2 kByte 以下に設定するとスループットが急激に劣化し、TTRT の選択よりも厳密に行う必要があることがわかる。この図からは、ユーザデータ長は 3 kByte 以上程度に設定するのがよいと言える。

また、この図において、 $W_s=16 \text{ kByte}$ のとき、スループットが不連続的に変化している。これは、式(5)の影響によるものであり、小さいながらも $W_s=64 \text{ kByte}$ のときにも現れる現象である。

(4) ウィンドウサイズの影響

ユーザデータ長 L をパラメータとしたときのウィンドウサイズに対するスループットを図 9 に示す。図 9 では、 $N=2$ および $N=8, TTRT=8 \text{ ms}$ としており、 $N=2$ のときのスループットを実線、 $N=8$ のときのスループットを破線で示している。この図から、ウィンドウサイズは、20 kByte 以下に設定するとスループットが急激に劣化し、TTRT の選択よりも厳密に行う必要があることがわかる。この図からは、 $N=2$ のと

[†] リング遅延は、ステーション数 N_{total} とケーブル長 L_c の値を変えることにより、変化させている。この変化は、2 km というステーション間距離の制約を無視すれば、 $N_{total}=16$ のまま、 L_c を 10 km から 200 km まで変化させるのに相当する。

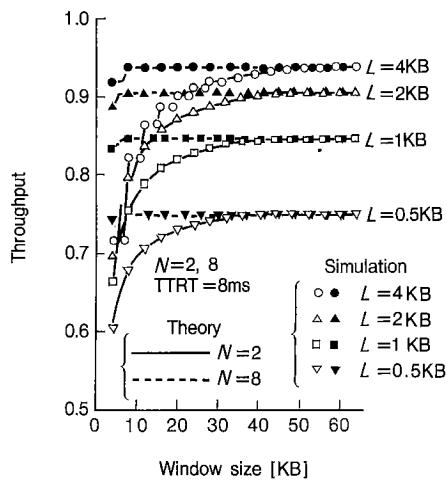


図 9 ウィンドウサイズの影響

Fig. 9 Influence of window size on throughput in asymmetric traffic.

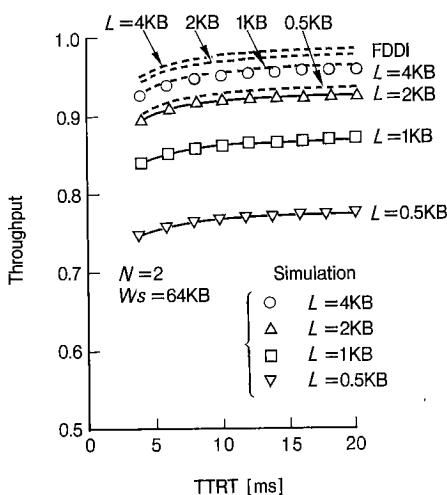
図 10 TTRT とユーザデータ長の影響
(対称トラヒックの場合)

Fig. 10 Influence of TTRT and user data length on throughput in symmetric traffic.

き、ウィンドウサイズは 40 kByte 以上程度に設定するのがよいと言える。一方、 $N=8$ のとき、ほとんどのウィンドウサイズについてスループットが飽和しており、ウィンドウサイズは 10 kByte 程度に設定しておけばよいことがわかる。

また、ユーザデータ長の影響で見られたような不連続的变化がこの図にも見られる。式(5)から、ウィンドウサイズの変化に対してもスループットが不連続的に変化する。

5.2 対称トラヒックの場合

ユーザデータ長 L をパラメータとしたときの TTRT に対するスループットを図 10 に示す。図 10 では、 $N=2$ 、 $W_s=64$ kByte としている。図中にはシミュレーション結果も示している(30000 データフレーム送信時間分)。シミュレーション結果と理論結果とを比較すると、全般によく一致しており、理論は十分に正確であることがわかる。この図からは、非対称トラヒックの場合の図 5 と同じことが言える。この他、各種パラメータがスループットに及ぼす影響を調べたところ、非対称トラヒックの場合に比べて若干高めのスループットが得られる点を除き、非対称トラヒックの場合と同様の結論が得られた。

6. むすび

本論文では、一つのステーションだけが送信データをもつ場合とすべてのステーションが送信データをもつ場合の両者について、FDDI ネットワーク上で ISO トランスポートプロトコルクラス 4 および TCP/IP 相当のトランスポートプロトコルを用いて非同期に送信するときのスループットの近似解析を行った。また、シミュレーションを行うことにより、解析結果がよい近似となることを示した。解析結果を用いて、各種パラメータがスループットに及ぼす影響について考察した結果、本論文の数値例からは、(1) TTRT は 10 ms 程度に設定すればよいが、その選択はユーザデータ長やウィンドウサイズほど厳密に行わなくてよい、(2) ユーザデータ長は 3 kByte 以上に設定するのがよい、(3) ウィンドウサイズは 40 kByte 以上に設定するのがよい、等の結論が得られた。このように、本論文の解析結果を用いることにより、各種パラメータの決定方法を明らかにすることことができた。また、FDDI のスループットとの比較を行い、トランスポートプロトコルのオーバヘッドを定量的に示した。

今後の課題としては、ACK をデータフレームに相乗りさせたり、複数の受信データフレームに対して ACK を一つ返送する場合、同期転送を行う場合、優先権を設けた場合、および回線誤りを考慮した場合のスループット解析、平均遅延解析を行うことが考えられる。

謝辞 本研究を進めるにあたり、御指導頂いた NTT ヒューマンインターフェース研究所メディア応用システム研究部の山川修三前部長、中野博隆グループリーダーに深く感謝致します。また、日ごろ御討論・

御助言頂く西村一敏主幹研究員、中野治主任研究員、名古屋工業大学の田坂修二教授に深謝します。更に、本論文をまとめるにあたり、有益なコメントを頂いたNTT通信網総合研究所の池川隆司研究主任に感謝します。

文 献

- (1) Ross F.E.: "An overview of FDDI: The fiber distributed data interface", IEEE J. Sel. Areas Commun., 7, 7, pp.1043-1051 (Sept. 1989).
- (2) Miyahara H.: "ATM: A most promising switching technique for B-ISDN", Trans. IEICE, E74, 4, pp. 747-751 (April 1991).
- (3) Chesson G.: "XTP/PE overview", 13th Conference on Local Computer Networks, pp. 292-296 (Oct. 1988).
- (4) 石橋 豊, 阪本秀樹, 丸山 充, 西村一敏: "階層型通信プロトコルの処理方式と評価", 信学技報, SSE91-74 (1991-09).
- (5) Terada M., Yokoyama T., Hirata T. and Matsui S.: "A high speed protocol processor to execute OSI", Proc. INFOCOM'91, pp. 944-949 (April 1990).
- (6) Maruyama M., Sakamoto H., Ishibashi Y. and Nishimura K.: "High speed hardware architecture for high definition videotex system", SPIE Proc. Visual Communications and Image Processing'91, 1605, pp. 916-927 (Nov. 1991).
- (7) Dykeman D. and Bux W.: "Analysis and tuning of the FDDI media access control protocol", IEEE J. Sel. Areas Commun., 6, 6, pp. 997-1010 (July 1988).
- (8) Jain R.: "Performance analysis of FDDI token ring networks: Effect of parameters and guidelines for setting TTTR", ACM SIGCOM '90 Symposium, Computer Communications Review, 20, pp. 264-275 (Sept. 1990).
- (9) Clark D.D., Jacobson V., Romkey J. and Salwen H.: "An analysis of TCP/IP processing overhead", IEEE Commun. Mag., pp. 23-29 (June 1989).
- (10) 岩田 淳, 田宮弘一, 西田竹志, 竹内崇夫: "通信プロトコルのルーティング処理性能評価", 信学技報, SSE91-173 (IN91-183) (1992-03).
- (11) Meister B. W.: "A performance study of the ISO transport protocol", IEEE Trans. Commun., 40, 3, pp. 253-262 (March 1991).
- (12) Murata M. and Takagi H.: "Two-layer modeling for local area networks", IEEE Trans. Commun., 36, 9, pp. 1022-1034 (Sept. 1988).
- (13) Saito T., Aida H. and Shirahata A.: "A performance evaluation of computer network using multi-layered protocol", 12th International Teletraffic Congress, Torino (June 1988).
- (14) 稲井 寛, 横平徳美, 村田正幸, 宮原秀夫: "階層型通信プロトコルの性能評価", 信学論(B-I), J73-B-I, 5, pp. 505-515 (1990-05).

(平成4年11月13日受付, 5年10月7日再受付)



石橋 豊

昭56名工大・工・情報卒。昭58同大大学院修士課程了。同年日本電信電話公社入社。NTTヒューマンインターフェース研究所主任研究員を経て、平5より名工大・電気情報・助教授。情報ネットワークの性能評価、ネットワークアーキテクチャの研究に従事。情報処理学会、テレビジョン学会、ACM、IEEE各会員。工博。



丸山 充

昭60電通大大学院修士課程了。同年日本電信電話(株)入社。以来、データフロー計算機によるメッセージ通信処理システムの研究、高精細ビデオテックスシステムに関する研究に従事。現在、NTTヒューマンインターフェース研究所メディア応用システム研究部主任研究員、電通大非常勤講師。ソフトウェア科学会、IEEE各会員。



阪本 秀樹

昭59阪大・工・通信卒。昭61同大大学院修士課程了。同年日本電信電話(株)入社。以来、メッセージ通信処理システム、高精細画像情報提供システムの研究開発に従事。現在NTTヒューマンインターフェース研究所主任研究員、情報処理学会、IEEE各会員。