バックプレッシャ機能を有する ATM LAN スイッチの性能評価

大崎 博之　若宮 直紀　村田 正幸　宮原 秀夫

大阪大学基礎工学部

〒560 大阪府豊中市待兼山町 1-1

あらまし　多様なマルチメディアサービスを扱う ATM LAN におけるトラヒック制御方式としては、網が輻輳に陥ってから制御を施す輻輳適応型制御方式が有効であると考えられる。本稿では、その実現方式の 1 つとして、入出力双方にバッファを有する ATM スイッチにバックプレッシャ機能を付加した方式を対象とした評価を行なう。特に、ATM LAN においては、データ伝送系サービスとしてバースト性を持つトラヒックを収容することが不可欠であるが、これまで十分な解析がなされていないのが現状である。そこで本稿では、バックプレッシャ機能を有する ATM スイッチに、バースト性のあるトラヒックを収容した時の性能を解析的手法を用いて明らかにし、その評価結果を示す。

和文キーワード　ATM LAN、入出力バッファ型スイッチ、バックプレッシャ機能、バーストトラヒック

Performance Analysis of an ATM LAN Switch with Backpressure Function

Hiroyuki OHSAKI, Naoki WAKAMIYA, Masayuki MURATA, Hideo MIYAHARA

Faculty of Engineering Science, Osaka University

Toyonaka, Osaka 560, Japan

Abstract　Reactive congestion control mothod can be effective in an ATM based local area network. One possible scheme to realize efficient reactive congestion control is that an ATM switch with input and output buffers is equipped with backpressure function. Furthermore it becomes essential to support bursty traffic when data transfer is provided in ATM LANs. In this paper, we show performance of such an ATM switch with backpressure function through an analytic method.

英文 key words　ATM LAN, Input and Output Buffer Switch, Backpressure Function, Bursty Traffic

1 はじめに

ATM (Asynchronous Transfer Mode) 方式は、データ・音声 画像など様々なマルチメディア情報を非同期に扱うことによって、高速広帯域通信網 B-ISDN (Broadband Integrated Services Digital Network) を実現する。ATM 方式の有用性は、様々なメディアのトラヒックを、セルと呼ばれる固定長のパケットに分割し、多重化することにより網資源を有効に利用できることにある。これまで ATM 方式については、公衆網を対象とした研究開発、および標準化が行なわれてきた。

一方、コンピュータが急速に高速化、マルチメディア化されるにつれ、より高速なコンピュータ間通信の実現が要求されている。そこで、従来の Ethernet / FDDI に替わる次世代マルチメディア LAN として、これまで公衆網を対象としてきた ATM 方式を応用した、ATM LAN が注目を浴びている [1, 2]。

ATM 方式のような帯域共有型の通信方式では、網資源を効率的に利用するためにトラヒック制御をいかに行なうかが重要な課題である。ATM 方式におけるトラヒック制御方式としては、網が輻輳になってから制御を施す輻輳適応型制御方式 (Reactive Congestion Control) と、網が輻輳に陥らないように制御を施す輻輳回避型制御方式 (Preventive Congestion Control) が考えられる。公衆網では伝播遅延時間が大きいこと、QOS (Quality of Service) に対する要求条件の制約が厳しいことなどから輻輳回避型制御方式が有効であるとされてきた。しかし、伝播遅延時間が小さく、またそのプライベート性を考慮すると、ATM LAN では輻輳適応型制御方式も有効であると考えられる。

輻輳適応型制御方式として 入出力双方にバッファを有する ATM スイッチにバックプレッシャ機能を付加する方式が提案されている [3, 4, 5]。バックプレッシャ機能とは、出力バッファ内のセル数が、あるしきい値をこえた時に、入力バッファから出力バッファへの転送を止めることにより、一時的な輻輳を防ぐというものである。最近、文献 [6] においてバックプレッシャ機能を ATM LAN スイッチに適用することを目的として、その実現方式が提案されている。バックプレッシャ機能を有する ATM スイッチの性能は Iliadis らによって解析がなされている [3, 4, 5] が、セル単位の幾何分布到着を仮定している。ところが、ATM LAN において、データ伝送系サービスへの適用を考えると、バースト性を考慮したトラヒックのモデル化が不可欠である。本稿では、このようなバースト性を有するトラヒックが到着する場合の、バックプレッシャ機能を有する ATM スイッチの解析を行ない、その評価結果を示す。

以下、2章において、本稿において扱う ATM スイッチの評価モデルを示す。3章において、定常状態における状態確率を求める。これを用いて、4章で最大スループットを求めるが、ストリーム型のトラヒックが混在した場合についても解析を行なう。最後に 5 章で、本稿のまとめと今後の課題について述べる。

2 バックプレッシャ機能を有する ATM スイッチとその評価モデル

本稿では、輻輳適応型のトラヒック制御法であるバックプレッシャ機能を有する $N \times N$ の ATM スイッチの性能を評価する。評価の対象とするスイッチは、入力側、出力側の両方にバッファを持ち (図 1)、バッファサイズをそれぞれ、N_I、 N_O とする。入力バッファは、セルを到着順にバッファに入れる FIFO 方式とする。また、交換速度は回線速度の N 倍とする。すなわち、入力バッファから出力バッファに、1 スロットで最大 N 個のセルが転送可能であるとする。

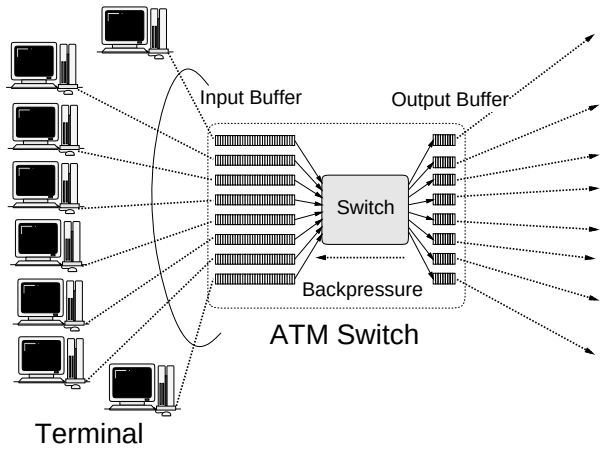

図 1: バックプレッシャ機能を有する ATM スイッチ

バックプレッシャ機能は、出力バッファ内の待ちセル数があるスレシホールド値を越えた時に、出力ポートから入力ポートへ制御信号を送り、入力側から出力側へのセルの転送を停止するものである [6]。この制御によって、出力バッファにおけるセル損失を無くすことが可能になる (図2参照)。ただし、このようなバックプレッシャ機能により、入力バッファでは HOL (Head Of Line) ブロッキングが発生し、スイッチの性能劣化の要因となる。特に、このスイッチを ATM LAN に適用し、データ伝送系サービスに適用する場合を考えると、トラヒックモデルとして上位層からのパケット到着を考慮した評価が必須になる。そこで、本稿では、以下のような解析モデルを評価の対象とする。

入力ポートには、同一パケットを構成するセルが連続的に到着し、その個数は平均$\overline{BL}$ の幾何分布に従うとする。あるスロットにセルが到着した時に、次のスロットでも連続して同じパケットを構成するセルが到着する確率を p とすると、

$$\overline{BL} = \sum_{i=1}^{\infty} i p^{i-1} = \frac{1}{1-p} \qquad (1)$$

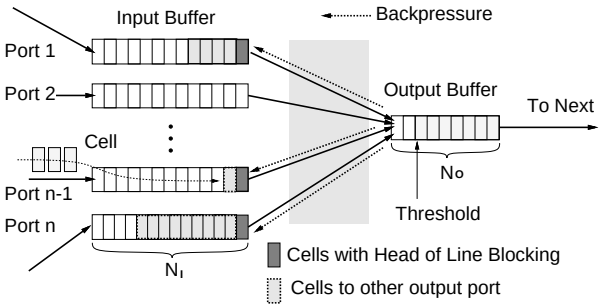

図 2: 解析モデル

なる関係がある。

出力バッファのスレシホールド値については、$N_O - N$ とするのが現実的であると考えられるが [6]、ここでは理想的な場合を考え、出力バッファに空きがなくなるまで HOL セルのなかからランダムに選んで転送するものとする。出力バッファが一杯になれば、入力バッファにセル転送停止信号を送ることにより、その出力ポートを目指すセルは、入力バッファの先頭で待たされる。以下、このようなセルを HOL セルと呼ぶ。出力バッファ内セルが出力リンクに送出されるごとに、HOL セルは出力バッファに転送することが可能になるため、HOL セルによって仮想的に待ち行列が形成されることになる。以下、これを HOL 待ち行列と呼ぶ。実際に HOL 待ち行列を構成するのは HOL セルであるが、それぞれの入力ポートでは、同じパケットに属するセルが連続的に到着するため、仮想的にパケットが HOL 待ち行列を構成しているとみなすことができる。従って、以下、 『HOL セル」と 『HOL パケット」を、場合に応じて使いわけていく。

また、スイッチサイズについては、近似的に $N \to \infty$ として解析を進める。この場合、N が有限の場合と比べて、例えば最大スループットは上限値を与えるが、$N = 16 \sim 32$ 程度になると、N が無限大の場合に近い値が得られることが知られている [4]。本稿においても、入出力線数 N を無限大とした場合の妥当性は、シミュレーション手法を用いて、有限の場合との比較によって検証する。スイッチサイズ N を無限大にすることによって、ある出力ポートに着目した解析が可能になる。さらに入力バッファサイズについては無限大を仮定する。有限とした場合のパケット廃棄率については別の機会に報告する。

今、評価の対象とするモデルとして、スロット時間が回線速度上でのセル転送時間に等しい離散時間システムを考えると、対象モデルは、出力バッファ内セル数 (k 番目のスロットにおける確率変数を Q_k とする) と、HOL 待ち行列に並ぶセル数 (H_k) の組であらわされる。次章以降、まず、この 2 項組 $(H_k$、$Q_k)$ の定常状態確率を求める。

3 定常状態確率の導出

まず、到着トラヒックに偏りがない場合を考える。すなわち、各入力ポートへのパケット到着率はすべて等しいものとし、入力ポートに到着した各パケットは均等な確率で出力ポートを選ぶものとする。従って、以下、一般性を失なうことなく、ある出力ポートのみを考える。k 番目のスロットにおいて、入力ポートの先頭に並んでいる、着目する出力ポート向けの HOL セルの数を確率変数 H_k であらわし、出力バッファ内セル数を確率変数 Q_k であらわす。ただし Q_k には、サービス中のセルも含むとする。また、k 番目のスロットの直前において、着目する出力バッファに向けて、新たに HOL 待ち行列に並ぶパケットの個数を A_k であらわす。記号 $(x)^+ = \max(0, x)$ を導入すると、以下のような関係式が成立する。

1. $H_{k-1} + A_k \le N_O - (Q_{k-1} - 1)^+$ の時、すなわち、全ての HOL セルを出力ポートに転送できる時。

   まず、

   $$Q_k = (Q_{k-1} - 1)^+ + H_{k-1} + A_k \tag{2}$$

   また、$H_{k-1} + A_k$ 個の HOL パケットのうち、次の k 番目のスロットにおいても同じパケットに属するセルが続いて発生する個数を B_k 個とする。すなわち、

   $$H_k = B_k \tag{3}$$

   ただし、i 個の HOL セルがある時に、B_k が j 個になる確率は次のようにして与えられる。

   $$b_{i,j} = \binom{i}{j} p^j (1-p)^{i-j} \tag{4}$$

2. $H_{k-1} + A_k > N_O - (Q_{k-1} - 1)^+$ の時、すなわち、全ての HOL セルを出力ポートに転送できないため、バックプレッシャ機能が働き、HOL セルのいくつかは HOL 待ち行列で待たされる時。

   $N_O - (Q_{k-1} - 1)^+$ 個の HOL セルが出力バッファに転送され、そのうち、C_k 個の HOL パケットが次のスロットでもセルを発生するとする。この時、$H_{k-1} + A_k - (N_O - (Q_{k-1} - 1)^+)$ 個のセルが HOL 待ち行列に残される。すなわち、

   $$\begin{aligned} Q_k &= N_O & (5)\\ H_k &= H_{k-1} + A_k - (N_O - (Q_{k-1} - 1)^+) \\ &\quad + C_k & (6) \end{aligned}$$

今、$k \to \infty$ として定常状態を考える。さらに、$N \to \infty$ とし、入出力ポート数を無限大とする。この時、パケットはポアソン分布に従って到着すると仮定する [7]。すなわち、

$$a_j \equiv P[A = j] = \frac{\lambda_p^j e^{-\lambda_p}}{j!} \tag{7}$$

ここで、λ_p は、ある出力ポートを目指して入力ポートに到着するパケット単位の到着率である。すなわち、セル単位の到着率を λ_c とすると、

$$\lambda_c = \lambda_p \overline{BL} \tag{8}$$

の関係がある。また、各スロットでの定常状態確率を $r_{n,m}$ で定義する。すなわち、

$$r_{n,m} = P[Q = n, H = m] \tag{9}$$

状態 $[Q = n, H = m]$ から、状態 $[Q = n', H = m']$ へ遷移する確率 $s_{n,m,n',m'}$ は以下のようにして得られる。

1. $n' < N_O$ の時、すなわち、すべての HOL セルが出力ポートへ転送される時:

   式 (2) より、

   $$A_k = Q_k - (Q_{k-1} - 1)^+ - H_{k-1} \tag{10}$$

   すなわち、新たに到着するパケットが $n' - (n-1)^+ - m$ 個で、$n' - (n-1)^+$ 個の HOL パケットのうち、新たに m' 個がさらにセルを発生する場合に、以下の関係が成立する。

   $$s_{n,m,n',m'} = a_{n'-(n-1)^+-m} b_{n'-(n-1)^+,m'} \tag{11}$$

2. $n' = N_O$ の時、すなわち、バックプレッシャ機能が働く時:

   式 (6) より、

   $$\begin{aligned} A_k &= N_O - (Q_{k-1} - 1)^+ - H_{k-1} \\ &\quad + (H_k - C_k) \end{aligned} \tag{12}$$

   すなわち、新たに到着するパケットが $n' - (n-1)^+ - m + (m' - C_k)$ 個で、$n' - (n-1)^+$ 個の HOL パケットのうち、$m' - (m' - C_k)$ 個がさらにセルを発生する場合であるが、今、$H_{k-1} + A_k > N_O - (Q_{k-1} - 1)^+$ であるから、$m' - C_k \geq 0$ となり、以下のような関係式が成立する。

   $$s_{n,m,n',m'} = \sum_{i=0}^{m'} a_{n'-(n-1)^+-m+i} b_{n'-(n-1)^+,m'-i} \tag{13}$$

詳細は省略するが、定常状態確率 $r_{n,m}$ は式 (11)、(13) を用いて以下のように求めることができる。

- $m = 0$、$n = 0$ のとき

  このときに限り着目する出力ポートは空き状態となる。従って、

  $$r_{0,0} = 1 - \rho_c \tag{14}$$

  但し、ρ_c は出力ポートにおけるセル単位のスループットである。入力ポートのバッファサイズを無限大と仮定し、定常状態が存在するとすれば ρ_c はセル単位の到着率 λ_c に等しい。

- $m = 0$、$0 < n \leq N_O$ のとき

  $$\begin{aligned} r_{n,0} &= \frac{1}{s_{n,0,n-1,0}} \Bigg\{ r_{n-1,0} \\ &\quad - \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{i} s_{i,j,n-1,0} r_{i,j} \Bigg\} \end{aligned} \tag{15}$$

- $0 < m$、$n < N_O$ のとき

  $$\begin{aligned} r_{n,m} &= \frac{1}{1 - s_{n,m,n,m}} \Bigg\{ \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{i} s_{i,j,n,m} r_{i,j} \\ &\quad + \sum_{k=0}^{m-1} s_{n,k,n,m} r_{n,k} \Bigg\} \end{aligned} \tag{16}$$

- $0 < m$、$n = N_O$ のとき

  $$\begin{aligned} r_{N_O,m} &= \frac{1}{s_{N_O,m,N_O,m-1}} \Bigg\{ r_{N_O,m-1} \\ &\quad - \sum_{i=0}^{N_O-1} \sum_{j=0}^{i} s_{i,j,N_O,m-1} r_{i,j} - \sum_{k=0}^{m-1} r_{N_O,k} \Bigg\} \end{aligned} \tag{17}$$

4 最大スループットの導出

ここではトラヒックが均一な場合について最大スループットを求めるが、入力側のトラヒックに偏りがある場合、出力側のトラヒックに偏りがある場合についても解析が可能である。それについては別途報告する。

4.1 トラヒックが均一な場合

最大スループットを求めるために、入力ポートが飽和し、常にパケットが入力バッファ内に存在する状態を考える。このような状態では、HOL 待ち行列につねにセルが存在していることになる。この時、次の関係式が成立する。

$$\sum_{i=1}^{N} A^i = N - \sum_{i=1}^{N} H^i \tag{18}$$

ここで A^i は、各スロットで出力ポート i を目指して到着するパケットの数 (実際には、パケットの先頭のセルが 新たに到着する) を表す確率変数、H^i は、各スロットで出力ポート i を目指す HOL セルの数をあらわす確率変数である。両辺を N で割り、$N \to \infty$ とすると、

$$\lambda_p = 1 - \overline{H} \tag{19}$$

が得られる。ここで $\overline{H}$ は HOL セルの数 H の平均をあらわし、

$$\overline{H} = \sum_{n=0}^{N_O} \sum_{m=1}^{\infty} m r_{n,m} \tag{20}$$

によって与えられる。また、λ_p はパケット単位の到着率であり、最大スループットを求めるたには $\rho_p = \lambda_p$ とおけばよい。セル単位で考えた場合、式 (8) より、

$$\rho_c = \lambda_c = (1 - \overline{H})\overline{BL} \tag{21}$$

$\overline{H}$ は ρ_c に依存するが、ρ_c はまた式 (21) より、$\overline{H}$ に依存するので反復計算が必要になる。ρ_c は区間 $[0, 1]$ にただ 1 つの解を持つので、例えば 2 分法により ρ_c を求めることができる。

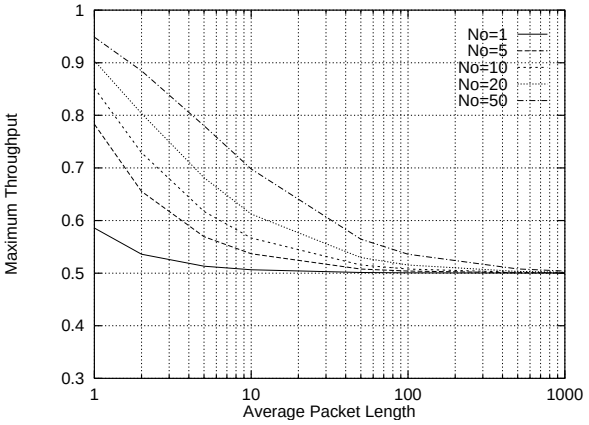

図 3: 平均パケット長と最大スループットの関係

図 3に、出力バッファサイズ N_O を変化させた時の、平均パケット長と最大スループットの関係を示す。これより、平均パケット長が大きくなるとスループットは急激に低下し、また、平均パケット長に比べて、出力バッファサイズをかなり大きくしなければ十分なスループットが得られないことがわかる。

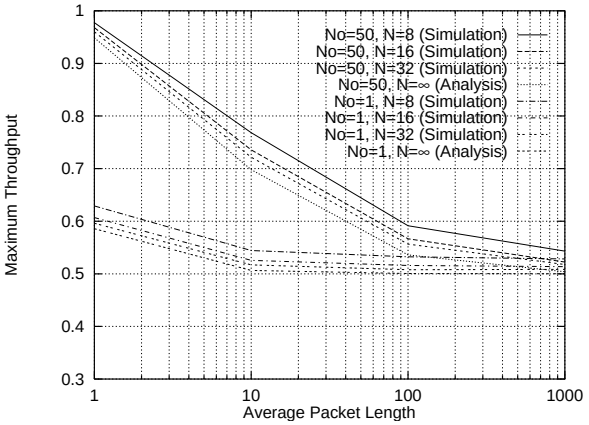

図 4: シミュレーションとの比較

図 4に、解析結果と共に、シミュレーションで得られた、ポート数 N を有限とした場合の平均パケット長と最大スループットの関係を示す $(N_O = 1、N_O = 50)$。本解析では、ポート数が無限大であると仮定しているため、スループットはポート数が有限の場合よりやや小さな値となっている。また、$N_O = 1$ (含サーバ) の場合、Input Queueing [7] となり、$\overline{BL} = 1$ の場合に良く知られている結果 (0.585) になっていることがわかる。

4.2 ストリームトラヒックが混在する場合

次に、スイッチへの入力トラヒックとして、前章で考えたバースト性を有するトラヒック (以降、バーストトラヒックと呼ぶ) の他に、画像のように帯域をピークレートによって占有するストリーム型のトラヒック (以降、ストリームトラヒック) が混在した場合を考える。今、リンク容量で正規化した、ストリームトラヒックのピークレートを R とし、リンク上ではピークレート R で最大 $m(\leq R)$ 本のストリームトラヒックを受付可能であるとする。ストリームトラヒックは平均到着率λ_{CBR} のポアソン分布に従って到着し、その接続時間は平均 $1/\mu_{CBR}$ の指数分布に従うと仮定する。バーストトラヒック、ストリームトラヒックはリンクを共有するが、ストリームトラヒックには優先権があり、ストリームトラヒックからのセルがバッファにある場合、常にそのセルが送出されるものとする [6]。すなわち、n 本のストリームトラヒックが接続されている時には、バーストトラヒックは $1 - nR$ の帯域が使用可能である。

今、ストリームトラヒックのみに着目すると、これは $\mathrm{M/M/m/m}$ 待ち行列モデルとみなすことができる。従って、定常状態において n 本のストリーム型のトラヒックが接続されている状態確率 π_n は次のようにして与えられる [8]。

$$\pi_n = \left[\sum_{n=0}^{m} \left(\frac{\lambda_{CBR}}{\mu_{CBR}}\right)^n \frac{1}{n!}\right]^{-1} \left(\frac{\lambda_{CBR}}{\mu_{CBR}}\right)^n \frac{1}{n!} \tag{22}$$

一方、ストリームトラヒックの接続時間は、バーストトラヒックが転送される時間に比べて十分に大きいので、ストリームトラヒックの接続本数に応じて、バーストトラヒックに利用可能な帯域は固定になるとみなすことができる。今、n 本のストリームトラヒックが接続されている時のバーストトラヒックの最大スループットを ρ_n とすれば、

$$\rho_n = (1 - nR)\rho \tag{23}$$

となる [6]。ただし、ρは帯域すべてをバーストトラヒックが使用可能であるとした時の最大スループットであり、これは 4.1節の解析により求めることができる。

以上から、ストリームトラヒックが混在した場合の、バーストトラヒックの最大スループットは、

$$\rho' = \sum_{n=0}^{m} \pi_n \rho_n \tag{24}$$

により得ることができる。

図 5に、バーストトラヒックの平均パケット長を変化させた時の、ストリームトラヒックの負荷とバーストトラヒ

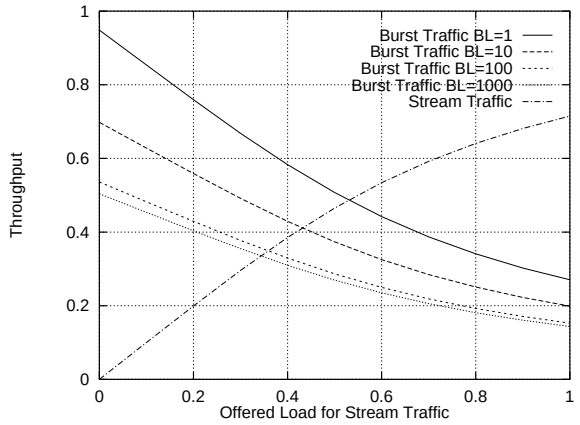

図 5: 平均パケット長を変化させた場合

ックの最大スループット、ストリームトラヒックのスループットの関係を示す。ここでは、$N_O = 50$、$\mu_{CBR} = 0.1$、$R = 0.2$、$m = 5$ とし、λ_{CBR} を変化させている。図より、ストリームトラヒックに優先権を与えているにもかかわらず、ストリームトラヒックの負荷の増大がそのままバーストトラヒックの性能劣化につながることはないことがわかる。これはストリームトラヒックの呼損によるものであるが、当然、ストリームトラヒックの負荷の増大によって、バーストトラヒックの性能劣化はある。そのため、バーストトラヒックの性能劣化をある程度防ぐためには、ストリームトラヒックに対して、帯域制限を加える必要がある。

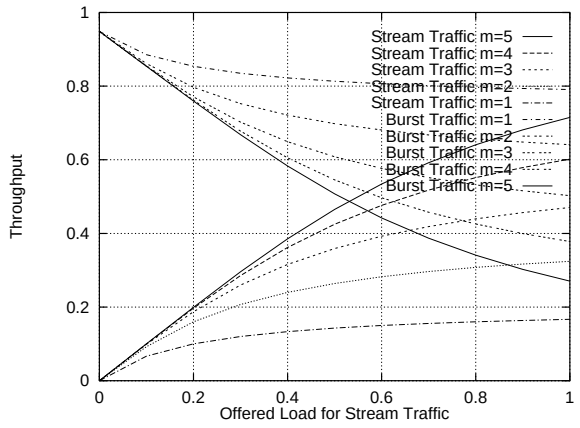

図 6: 最大受付可能本数 m を変化させた場合

例えば、$\overline{BL} = 1$ の時に、最大受付可能本数 m を変化させた場合の結果を図 6に示す。これより、m を適切に選ぶことにより、バーストトラヒックの性能劣化を防ぐことが可能になる。

5 まとめ

本稿では、入出力双方にバッファを有する ATM スイッチにバックプレッシャ機能を付加する方式に対して、その最大スループット解析を与えた。パケット単位の平均遅延、入力バッファサイズ N_I が有限の場合のパケット廃棄率は今後、引き続き報告する予定である。

謝辞

本報告に関して貴重な御討論を頂いた日本電気株式会社 鈴木洋氏、および同社 樊瑞雪氏に深謝いたします。

参考文献

[1] 清水 洋, 西田 竹志, 鈴木 洋, “ATM-LAN へ至る道 (上) LAN の高速化、マルチメディア化,” 日経コミュニケーション, vol. 165, pp. 88–90, 1 1994.

[2] 西田 竹志, 鈴木 洋, 清水 洋, “ATM-LAN へ至る道 (下) LAN の高速化、マルチメディア化,” 日経コミュニケーション, vol. 166, pp. 88–90, 1 1994.

[3] I. Iliadis, “Performance of a packet switch with input and output queueing under unbalanced traffic,” in *Proceedings of IEEE Infocom '92*, vol. 2, (Florence, Italy), pp. 743–752 (5D.4), May 1992.

[4] I. Iliadis, “Head of the line arbitration of packet switches with input and output queueing,” in *Fourth International Conference on Data Communication Systems and their Performance*, (Barcelona, Spain), pp. 85–98, June 1990.

[5] I. Iliadis, “Synchronous versus asynchronous operation of a packet switch with combined input and output queueing,” *Performance Evaluation*, no. 16, pp. 241–250, 1992.

[6] 樊 瑞雪, 鈴木 洋, 山田 健治, “バッファ容量拡張可能な ATM スイッチ : *XATOM*,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. SSE-93-6, pp. 31–36, 1993.

[7] M. J. Karol, M. G. Hluchyj, and S. P. Morgan, “Input vs. output queueing on a space-division packet switch,” in *Proceedings of IEEE GLOBECOM '86*, (Houston, Texas), pp. 659–665, Dec. 1986.

[8] D. Bertsekas and R. Gallager, *Data Networks*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1987.