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
—最大スループット解析—

Performance of an ATM LAN Switch with Backpressure Function
— Maximum Throughput Analysis —

准員 大崎博之　正員 若宮直紀

正員 村田正幸　正員 宮原秀夫

Hiroyuki Ohsaki, Associate Member

Naoki Wakamiya, Masayuki Murata and Hideo Miyahara, Members

大阪大学基礎工学部情報工学科, 豊中市

Faculty of Engineering Science, Osaka University,

Toyonaka, Osaka 560, Japan

著者分冊指定: B-I

連絡先: 大崎博之

大阪大学基礎工学部情報工学科

情報ネットワーク学講座

〒560 豊中市待兼山町1-3

TEL 06-850-6588

あらまし 次世代高速LANとして近年注目を浴びているATM LANにおけるトラヒック制御方式として、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する方式を対象とした性能評価を行なう.本稿では、バックプレッシャ機能を有するATMスイッチに、バースト性を有するトラヒックを収容したときの最大スループットを、数学的解析手法を用いて明らかにする.また、トラヒックが不均一な場合、音声や画像のように帯域をピークレートで占有するようなトラヒックが混在した場合についても解析を行なう.さらに、数値例によって、出力バッファサイズや到着トラヒックのバースト性がシステム性能に与える影響を明らかにする.

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

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、様々なメディア情報を、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 方式を用いた、ATM LAN が現在注目を浴びている[(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)、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、LAN においては、伝播遅延時間が小さいこと、そのプライベート性から課金の問題がなく、従ってQOS に対する要求条件が比較的緩やかであることなどから、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の一つとして、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する方式が提案されている[3]-[5].ここでのバックプレッシャ機能とは、出力バッファ内セル数がある閾値をこえたときに、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、一時的な輻輳による出力バッファでのセル棄却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.これまで、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が[3]-[5]、セル単位の幾何分布到着を仮定している.ところが、このスイッチを、ATM LAN においてデータ伝送系サービスへ適用することを考えると、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.そこで本稿では、バースト性を有するトラ

ヒックとして、1つのパケットを構成するセルが連続的に到着し、それらのセルがすべて同じ出力ポートを目指すようなモデルを対象とする.

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、まず、4.1節でトラヒックが均一な場合の最大スループットを求め、数値例を示す.次に、4.2節、4.3節で、出力側、入力側のそれぞれのトラヒック到着に偏りがある場合の最大スループットを求め、数値例を示す.また、4.4節では、音声や画像のように帯域をピークレートで占有するような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を求め、数値例を示す.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

評価の対象とするスイッチは、$N \times N$の入出力バッファ型ATMスイッチである(図1).入力バッファはセルを到着順に処理するFIFO方式とする.また、スイッチ内部速度は回線速度のN倍とする.すなわち、各出力バッファについて、1

スロットで最大N個のセルが入力バッファから転送可能であるとする．N倍のスイッチ内部速度を実現するためには、出力バッファメモリも高速化が必要になるため、出力バッファサイズが評価のポイントとなる．一方、入力バッファは回線速度に対応して低速動作でよいため、大容量のメモリが搭載可能である．そこで、本稿では解析の簡単化のため、出力バッファサイズは有限(N_O)とするが、入力バッファサイズ(N_I)は無限大と仮定する．

<図1挿入>

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閾値を越えたときに、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)．但し、FIFO方式では、このバックプレッシャ機能により、入力バッファの先頭でセルが待たされると、後続するセルも入力バッファ内で待たされてしまい、スイッチの性能劣化の要因となる(HOLブロッキング)．HOLブロッキングを防ぐために、各入力バッファにおいてセルを対応する出力ポートごとにバッファリングする方式(RIRO方式)が提案されている[6]．RIRO方式はFIFO方式よりも優れた性能を示す[7]が、ハードウェア構成が複雑になる．以下に示すように、FIFO方式もある程度のバッファを設けることにより、特に

低－中負荷の環境下では十分適用可能であり、本稿ではFIFO方式を評価の対象とする．ATM LANにおいてデータ伝送系サービスに適用することを考えると、上位層からのパケット到着、すなわちバースト性を有するトラヒック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対象とした評価を行なう．

<図2挿入>

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(パケット長)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ときに、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、

$$\overline{BL} = \sum_{i=1}^{\infty} i p^{i-1} = \frac{1}{1-p} \tag{1}$$

なる関係がある．

出力バッファのしきい値については、$N_O - N$とするのが現実的であるが[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、入力バッファ内セルの中からランダムに選んで出力バッファに転送するものとする．出力バッファに空きがなくなれば、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．また、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セルを出力バッファに転

送することが可能になる．つまり、HOLセルによって仮想的に待ち行列が形成されると考えることができる．以下、この仮想的な待ち行列を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も可能である．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ゆく．

スイッチサイズNについては、近似的に無限大として解析を進める．このとき、Nが有限の場合と比べると、最大スループットは下限値を与える．また、セルが幾何分布に従って到着する場合、Nが$16 \sim 32$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を無限大と仮定した場合の妥当性は、シミュレーションを用いて、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を無限大と仮定することによって、ある出力ポートに着目した解析が可能になる．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1セル転送時間に等しい離散時間システムを考える．すると、対象とするモデルの状態は、着目する出力

バッファ内セル数と、HOL待ち行列に並ぶセル数の2項組であらわされる.まず、次章において、この2項組の定常状態確率を求める.

3. 定常状態確率の導出

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、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、着目する出力バッファ内セル数を確率変数Q_kであらわす.但し、Q_kにはサービス中のセルも含むものとする.また、k番目のスロットの直前までに、新たにHOL待ち行列に並ぶ、着目する出力バッファ向けのパケットの個数をA_kであらわす(図 3).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. $H_{k-1} + A_k \leq N_O - (Q_{k-1} - 1)^+$のとき、すなわち、すべてのHOLセルを出力ポートに転送可能なとき:

   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、

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

但し、i個のHOLパケットがあるときに、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. $H_{k-1} + A_k > N_O - (Q_{k-1} - 1)^+$のとき、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セルのいくつかがHOL待ち行列で待たされるとき:

$N_O - (Q_{k-1} - 1)^+$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同じパケットに属するセルを発生するとする.このとき、$H_{k-1} + A_k - (N_O - (Q_{k-1} - 1)^+)$個のセルがHOL待ち行列に残される.すなわち、

$$Q_k = N_O \tag{5}$$

$$H_k = H_{k-1} + A_k - (N_O - (Q_{k-1} - 1)^+) + C_k \tag{6}$$

今、スイッチサイズNは無限大を仮定しているため、パケットはポアソン分布に従って到着すると仮定する[8].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.

今、定常状態確率$r_{n,m}$を、

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

と定義する.状態$[Q_{k-1} = n, H_{k-1} = m]$から、次のスロットで状態$[Q_k = n', H_k = m']$へ遷移する確率$s_{n,m,n',m'}$は以下のようにして得ることができる.

1. $n' < N_O$のとき、すなわち、バックプレッシャ機能が働かないとき:

   式(2)より、

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

   すなわち、新たに到着するパケットがA_k個で、$Q_k - (Q_{k-1} - 1)^+$個のHOLパケットのうち、m'個が次のスロットでも同じパケットに属するセルを発生する場合、次の関係が成立する.

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

2. $n' = N_O$ のとき、すなわち、バックプレッシャ機能が働くとき:

式 (6) より、

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

すなわち、新たに到着するパケットが A_k 個で、$N_O - (Q_{k-1} - 1)^+$ 個の HOL パケットのうち、C_k 個が次のスロットでも同じパケットに属するセルを発生する場合、次の関係が成立する．

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

となる．

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、

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

  但し、ρ 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 N_I を無限大と仮定しているため、定常状態が存在するとすれば ρ はセル単位の到着率 λ_c と等しくなる．

- $m=0$、$0<n\leq N_O$ のとき

状態$[Q=n-1、H=0]$に注目して、この状態に遷移しうる全ての状態を考えると(図4参照)、

$$r_{n,0} = \frac{1}{s_{n,0,n-1,0}}\left\{r_{n-1,0}-\sum_{i=0}^{n-1}\sum_{j=0}^{i}s_{i,j,n-1,0}r_{i,j}\right\} \quad (15)$$

<図4挿入>

- $0<m$、$n<N_O$ のとき

状態$[Q=n,H=m]$に注目して、この状態に遷移しうる全ての状態を考えると(図5参照)、

$$r_{n,m} = \frac{1}{1-s_{n,m,n,m}}\left\{\sum_{i=0}^{n-1}\sum_{j=0}^{i}s_{i,j,n,m}r_{i,j}+\sum_{k=0}^{m-1}s_{n,k,n,m}r_{n,k}\right\} \quad (16)$$

<図5挿入>

- $0<m$、$n=N_O$ のとき

状態$[Q=N_O,H=m-1]$に注目して、この状態に遷移しうる全ての状態を考えると(図6参照)、

$$r_{N_O,m}=\frac{1}{s_{N_O,m,N_O,m-1}}\left\{r_{N_O,m-1}-\sum_{i=0}^{N_O-1}\sum_{j=0}^{i}s_{i,j,N_O,m-1}r_{i,j}-\sum_{k=0}^{m-1}r_{N_O,k}\right\} \quad (17)$$

<図6挿入>

4. 最大スループット

本章では、3.章において導出した、定常状態確率を用いて、スイッチに与えるトラヒックが均一な場合(4.1節)、

出力側のトラヒックに偏りがある場合(4.2節)、入力側のトラヒックに偏りがある場合(4.3節)、画像や音声のようにピークレートで帯域を占有するトラヒックが混在した場合(4.4節)のそれぞれについて最大スループットを求めてゆく.

4.1 トラヒックが均一な場合

入力ポート、出力ポート共に、トラヒックの偏りがない場合を考える.すなわち、入力ポートへのパケット到着率がすべて等しく、また、パケットが出力ポートを選ぶ確率もすべて等しい場合を考える.

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待ち行列に常にセルが存在していることになる.このとき、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、新たに到着するパケットの先頭のセルの数)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、$N \to \infty$とすることにより、

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

が得られる.ここで、$\overline{H}$はHOLセルの数Hの平均であり、3.章で導出した$r_{n,m}$を用いて、

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

とあらわされる.式(8)より、

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

となる.最大スループットρを求めるためには、式(21)において、λ_cをρとおけばよい.$\overline{H}$はρに依存するが、ρもまた$\overline{H}$に依存するので反復計算が必要になる.ρは区間$[0,1]$にただ1つの解を持つため、例えば二分法によりρを求めることができる.

まず、図7に、出力バッファサイズN_Oを変化させたときの、平均パケット長と最大スループットの関係を示す.また、図8に、平均パケット長を変化させたときの、出力バッファサイズと最大スループットの関係を示す.これらより、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7挿入
＜図8挿入

図9に、解析結果と共に、シミュレーションで得られた、$N_O = 1$、50の場合の、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.なお、ここでのシミュレーションの信頼区間はすべて0.02以下であった.本解析では、ポート数が無限大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、$N_O = 1$の場合は、Input Queueing[8]となり、$\overline{BL} = 1$の場合に良く知られている結果(最大スループット0.585)と一致していることがわかる.

<図9挿入>

4.2 出力ポートにトラヒックの偏りがある場合

次に、出力ポートにトラヒックの偏りがある場合として、以下のようなモデルを考える.出力ポートを2つのグループO_1、O_2に分け、

$$q_O \equiv \frac{|O_1|}{N} \tag{22}$$

とする.ただし、$|O_1|$、$|O_2|$はそれぞれグループO_1、O_2に属する出力ポートの数とする.すべての入力ポートへのパケット到着率は等しいが、それぞれの入力ポートに到着したパケットは、グループO_1に属する出力ポートをP_{G1}の確率で、グループO_2に属する出力ポートをP_{G2}の確率で選ぶものとする.以下、一般性を失うことなく

$P_{G1} \geq P_{G2}$ とする．今、相対確率 r_O を

$$r_O \equiv \frac{P_{G1}}{P_{G1} + P_{G2}} \geq 0.5 \tag{23}$$

と定義する．このとき、均一なトラヒックは $q_O = 0$、1 または $r_O = 0.5$ とすればよい．また、あるパケットが、グループ O_1、O_2 のそれぞれのポートを選ぶ確率を P_1、P_2 とすると、式 (22、23) より、

$$P_1 = \frac{q_O r_O}{1 - q_O - r_O + 2q_O r_O} \tag{24}$$

$$P_2 = \frac{1 - q_O - r_O + q_O r_O}{1 - q_O - r_O + 2q_O r_O} \tag{25}$$

となる．各入力ポートへのパケット到着率がすべて等しく λ_p であるとすると、グループ O_1、O_2 に属する出力ポートに対する到着率をそれぞれ λ_{p1}、λ_{p2} とすると、

$$\lambda_{p1} = \frac{r_O \lambda_p}{1 - q_O - r_O + 2q_O r_O} \tag{26}$$

$$\lambda_{p2} = \frac{(1 - r_O)\lambda_p}{1 - q_O - r_O + 2q_O r_O} \tag{27}$$

となる．今、最大スループットを求めるため、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と、

$$\sum_{i=1}^{N} A^i = N - \left(\sum_{i=1}^{|O_1|} H_1^i + \sum_{i=1}^{|O_2|} H_2^i \right) \tag{28}$$

なる関係が成立する．ここで、確率変数 H_1^i、H_2^i はそれぞれ、グループ O_1、O_2 に属する、i 番目の出力ポートを目

指すHOLセル数をあらわす.両辺をNで割り、$N \to \infty$とすると、

$$\lambda_p = 1 - \{q_O \overline{H}_1 + (1 - q_O)\overline{H}_2\} \tag{29}$$

ここで、$\overline{H}_1$、$\overline{H}_2$は、それぞれグループO_1、O_2を目指す平均HOLセル数である.式(8)より、

$$\lambda_c = \left[1 - \{q_O \overline{H}_1 + (1 - q_O)\overline{H}_2\}\right] \overline{BL} \tag{30}$$

となる.最大スループットを求めるためには、λ_cをρとおいて、4.1節の解析と同様にしてρを求めればよい.

図10、11にそれぞれ、$\overline{BL} = 1$、10の場合のq_Oと最大スループットの関係を示す.これらより、トラヒックの偏りが大きくなるにつれて最大スループットが低下していることがわかる.また、$\overline{BL}$が大きくなるにつれ、最大スループットが全体的に大きく低下している.

< 図10挿入
< 図11挿入

4.3 入力側のトラヒックに偏りがある場合

次に、入力ポートのトラヒックに偏りがある場合として、以下のようなモデルを考える.入力ポートを2つのグループI_1、I_2に分け、

$$q_I \equiv \frac{|I_1|}{N} \tag{31}$$

とする.ただし、$|I_1|$、$|I_2|$はそれぞれグループI_1、I_2に属す

る入力ポートの数とする．グループI_1、I_2へのパケット到着率をそれぞれλ_{p1}、λ_{p2}とする．以下、一般性を失なうことなく$\lambda_{p1} \geq \lambda_{p2}$とする．但し、全ての入力ポートにおいて、各パケットはN個の出力ポートを等しい確率で選ぶとする．今、相対確率r_Iを

$$r_I \equiv \frac{\lambda_{p1}}{\lambda_{p1} + \lambda_{p2}} \geq 0.5 \tag{32}$$

とする．このとき、均一なトラヒックは、$q_I = 0$、1または$r_I = 0.5$とすればよい．また、出力ポートにおける平均パケット到着率をλ_pとすると、λ_{p1}、λ_{p2}は、

$$\lambda_{p1} = \frac{\lambda_p r_I}{1 - q_I - r_I + 2q_I r_I} \tag{33}$$

$$\lambda_{p2} = \frac{\lambda_p (1 - r_I)}{1 - q_I - r_I + 2q_I r_I} \tag{34}$$

とあらわすことができる．定常状態を考えると、$\lambda_{p1} \geq \lambda_{p2}$より、グループ$I_1$に属する入力ポートが先に飽和する．従って、グループI_1に属する入力ポートに注目すると、

$$\sum_{i=1}^{|I_1|} A_1^i = |I_1| - \sum_{i=1}^{N} \frac{\lambda_{p1}}{\lambda_p} \frac{|I_1|}{N} H^i \tag{35}$$

が成立する．ここで、A_1^iは、グループI_1に属し、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数である．両辺を$|I_1|$で割り、$N \to \infty$とすると、

$$\lambda_{p1} = 1 - \frac{r_I \overline{H}}{1 - q_I - r_I + 2q_I r_I} \tag{36}$$

また、式(8)より、

$$\lambda_{c1} = (1 - \frac{r_I \overline{H}}{1 - q_I - r_I + 2q_I r_I})\overline{BL} \tag{37}$$

ここでλ_{c1}は、グループI_1へのセル単位の到着率である．最大スループットを求めるためには$\rho \leftarrow \lambda_{c1}$とし、4.1節の解析と同様にして、$\rho$を求めればよい．

図12、13にそれぞれ$\overline{BL} = 1$、10の場合のq_Iと最大スループットの関係を示す．これらより、トラヒックの偏りが大きくなるにつれて最大スループットが低下していることがわかる．また、出力側のトラヒックに偏りがある場合(図10、11)に比べ、良い性能を示していることがわかる．これは、出力側のトラヒックに偏りがある場合に比べ、HOLブロッキングによる性能の劣化が小さいためと考えられる．

< 図12挿入
< 図13挿入

以上から、本稿で取り扱った方式のように、全入力ポートに対して均一にバックプレッシャを施す方式では、不均一なトラヒックに対して不公平性が生じることがわかる．従って、この不公平性を防ぐために、例えば、到着トラヒックの負荷が高い入力ポートに対して選択的にバックプレッシャを施すなどの制御を行なうことにより性能の改善が可能であると考えられる．

4.4 ストリームトラヒックが混在する場合

最後に、スイッチへの入力トラヒックとして、バースト性を有するトラヒック(バーストトラヒック)に加えて、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(ストリームトラヒック)が混在した場合を考える．これは、例えば、符号圧縮を行わない画像転送に相当する．

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$m(\leq \lfloor 1/R \rfloor)$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同じリンクを共有するが、ストリームトラヒックに優先権を与え、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、常にそのセルが優先的に送出されるものとする[(6)]．つまり、n本のストリームトラヒックが接続されているときには、バーストトラヒックは$1-nR$の帯域が使用可能となる．なお、ストリームトラヒックとして、符号圧縮を行なう画像転送を考えた場合には、$1-nR$は、バーストトラヒックに対して最低限保証されている帯域と考えることができる．

今、ストリームトラヒックのみに着目すると、これは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[9].

$$\pi_n = \left[\sum_{n=0}^{m}\left(\frac{\lambda_{CBR}}{\mu_{CBR}}\right)^n \frac{1}{n!}\right]^{-1}\left(\frac{\lambda_{CBR}}{\mu_{CBR}}\right)^n \frac{1}{n!} \tag{38}$$

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と仮定すれば、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ときの、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、

$$\rho_n = (1-nR)\rho \tag{39}$$

となる[6].但し、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とき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、

$$\rho' = \sum_{n=0}^{m}\pi_n\rho_n \tag{40}$$

のようにして求めることができる．

図14に、バーストトラヒックの平均パケット長を変化させたときの、ストリームトラヒックの負荷と、バーストトラヒック、ストリームトラヒックそれぞれ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．これより、平均パケット長が増加するにつれ、バーストトラヒックの最大スループットが低下していることがわかる．また、ストリームトラヒックの負荷が増加するにつれて、バーストトラヒックの最大スループットが低下している．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、何らかの帯域制限を加える必要があると考えられる． ＜図14挿入

図15に、$\overline{BL} = 1$のときの、最大受付可能本数mを変化させた場合の、ストリームトラヒックに与える負荷と、バーストトラヒック、ストリームトラヒックそれぞれのスループットの関係を示す．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ある程度まで防ぐことが可能になることがわかる． ＜図15挿入

5. まとめ

本稿では、バックプレッシャ機能を有する入出力バッファ型ATMスイッチの性能を、数学的解析手法により明らかにした.平均パケット長および出力バッファサイズが、対象とするATMスイッチの最大スループットに与える影響の定量的な評価を可能とした.なお、本稿で示した解析手法は、スイッチ内部速度が回線速度のL倍$(1 \leq L \leq N)$の場合、さらに、同時に$L'(> L)$個のセルが同じ出力ポートを目指すときに$(L' - L)$個のセルを棄却する場合や入力バッファで待たせる場合などへの適用は容易である.今後の課題としては、パケット単位の遅延時間、入力バッファが有限の場合のパケット棄却率の評価が重要である[7].また、スイッチが複数段接続された場合に、単体のスイッチでは対応しきれないような入力バッファでの輻輳発生に対して、前段のスイッチにバックプレッシャをかける場合の性能評価などが考えられる.

謝辞

本稿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.なお,本研究の一部は文部省科学研究費(受付番号04650288)

の補助を受けて実施されました．

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) 大崎博之, 若宮直紀, 村田正幸, 宮原秀夫, “バックプレッシャ機能を有するATM LANスイッチの性能解析—平均パケット遅延時間とパケット廃棄率—,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. SSE-94-5, pp. 25–30, 1994.

(8) 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.

(9) D. Bertsekas and R. Gallager, *Data Networks*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1987.

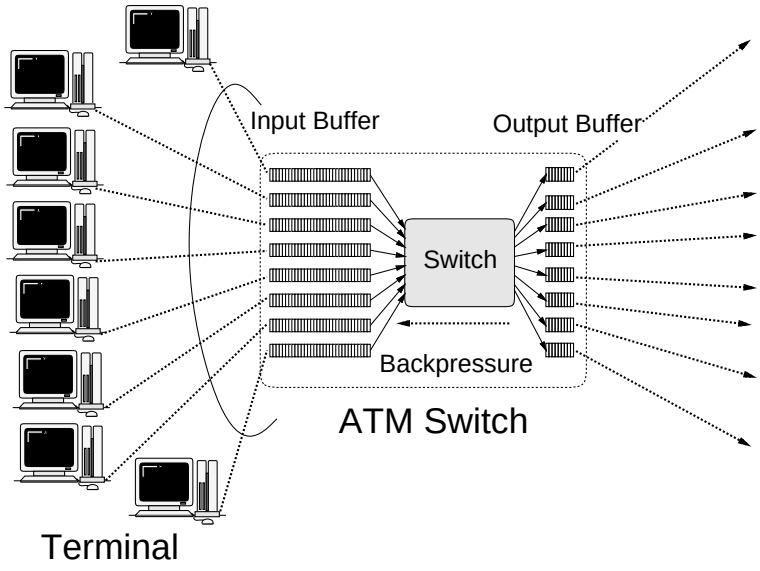

図 1: バック プ レッシャ機 能 を 有 す る ATM ス イッチ

Fig. 1: An ATM switch with backpressure function.

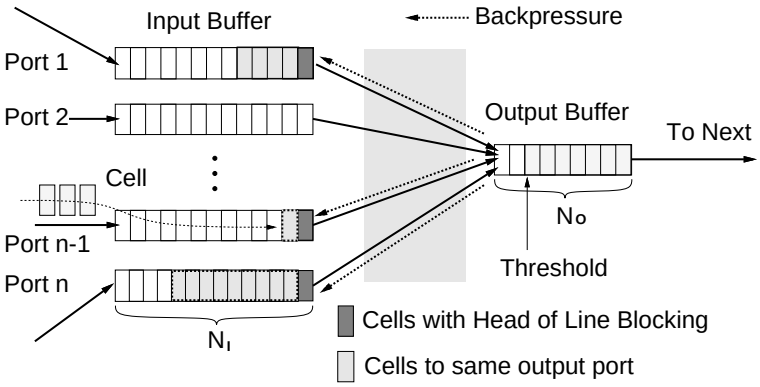

図 2: 解 析 モ デ ル

Fig. 2: The analytical model.

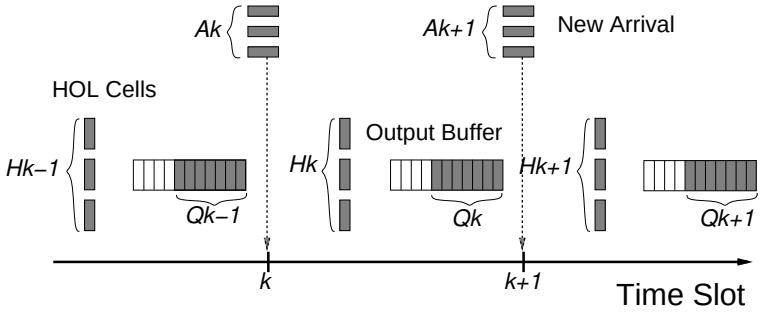

図 3: 確 率 変 数 の タ イ ム チャー ト

Fig. 3: Time chart for random variables.

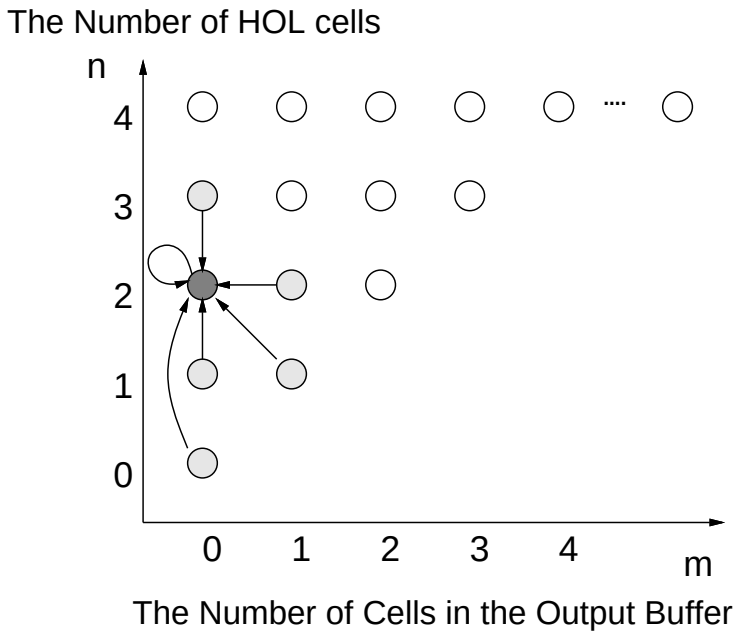

図 4: 状 態 遷 移 図: $m = 0$、$0 < n \leq N_O$ の と き

Fig. 4: State transition diagram when $m = 0$ and $0 < n \leq N_O$.

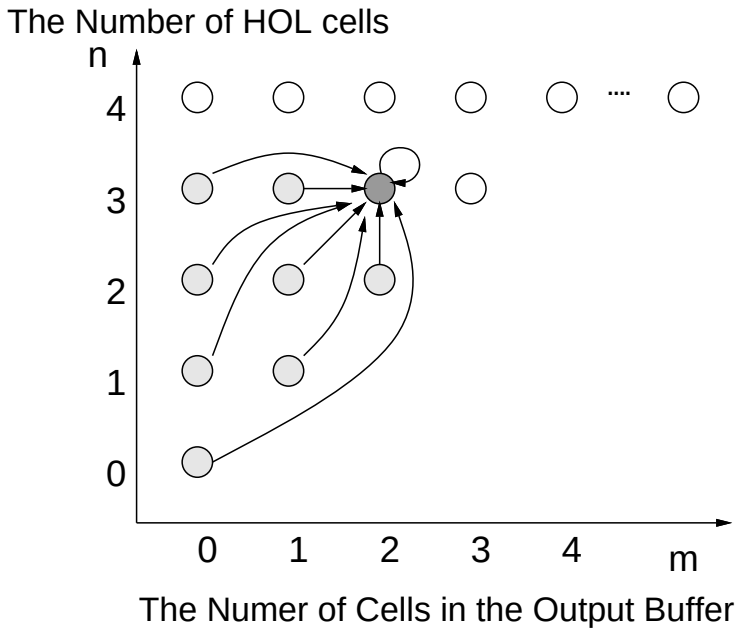

図 5: 状 態 遷 移 図: $0 < m$、$n < N_O$ の と き

Fig. 5: State transition diagram when $0 < m$ and $n < N_O$.

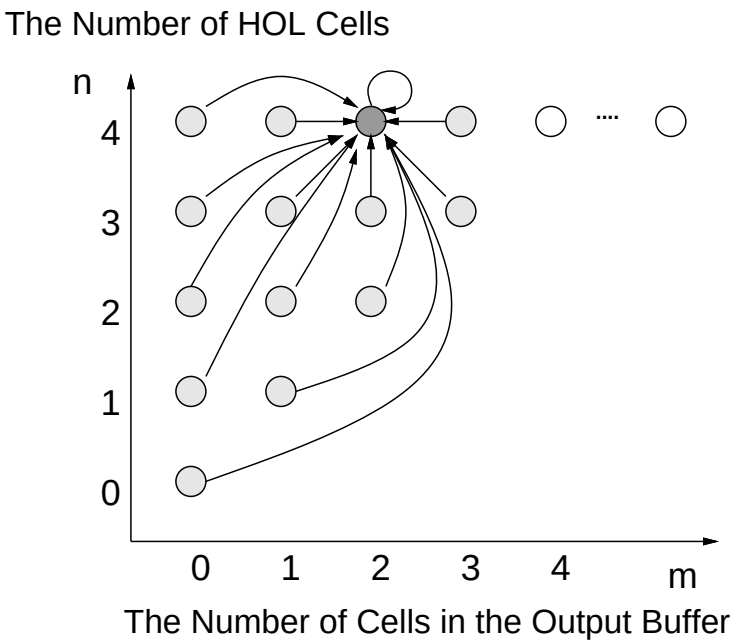

図 6: 状 態 遷 移 図: $0 < m$、$n = N_O$ の と き

Fig. 6: State transition diagram when $0 < m$ and $n = N_O$.

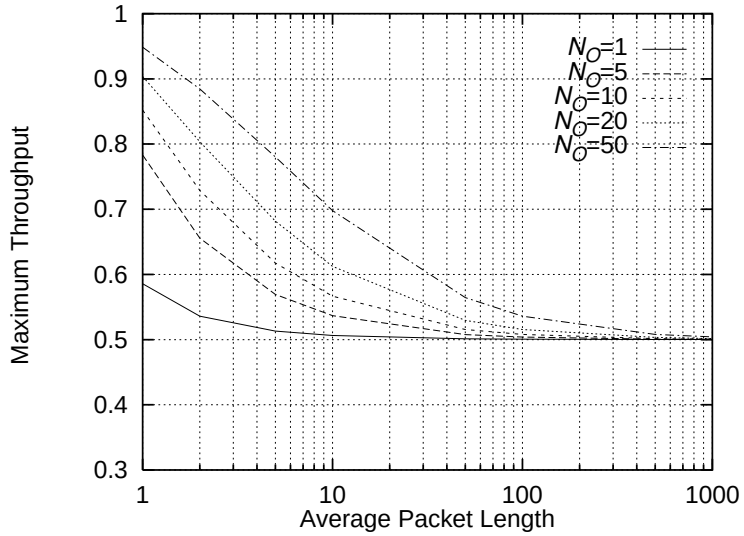

図 7: 平 均 パ ケ ッ ト 長 と 最 大 ス ル ー プ ッ ト の 関 係

Fig. 7: Average packet length vs. maximum throughput.

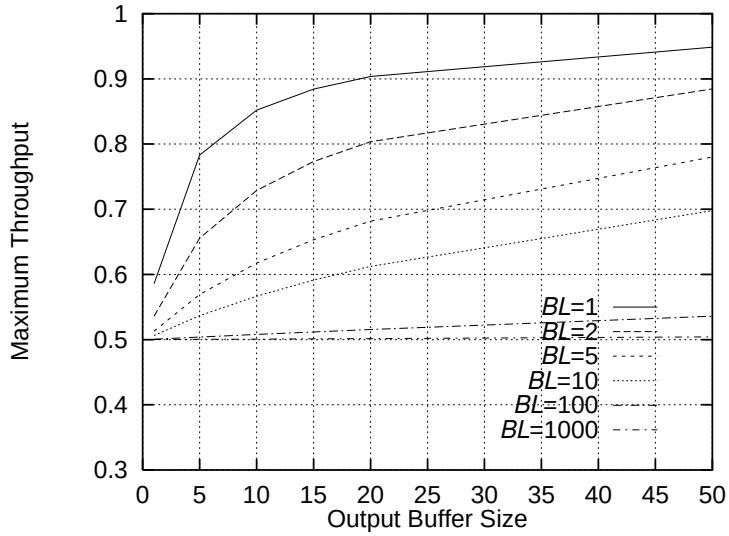

図 8: 出 力 バッファサ イ ズ と 最 大 ス ル ー プットの 関 係

Fig. 8: Output buffer size vs. maximum throughput.

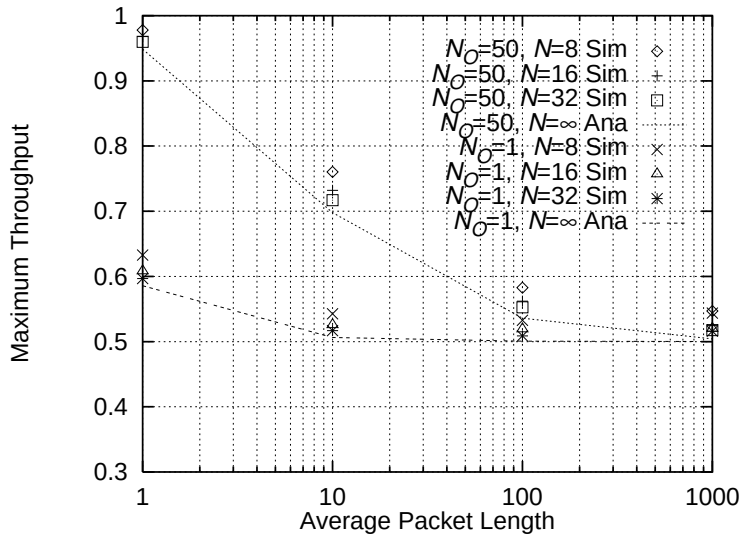

図 9: シ ミュレ ー ション 結 果 と の 比 較

Fig. 9: Comparison with simulation results.

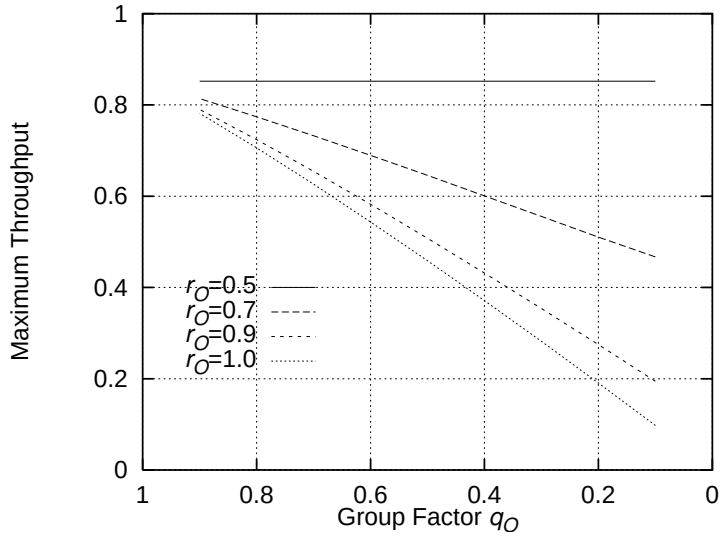

図 10: 出 力 に ト ラ ヒ ッ ク の 偏 り が あ る 場 合 ($N_O = 10$, $\overline{BL} = 1$)

Fig. 10: Unbalanced traffic at output ($N_O = 10$, $\overline{BL} = 1$).

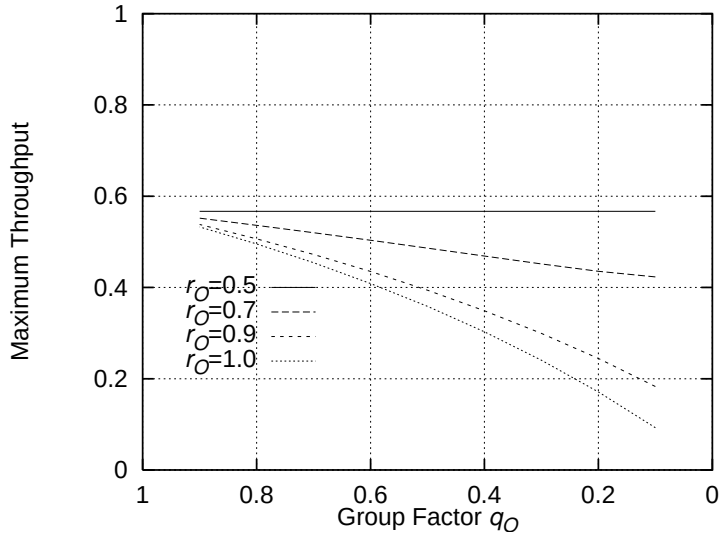

図 11: 出 力 に ト ラ ヒック の 偏 り が あ る 場 合 ($N_O = 10$, $\overline{BL} = 10$)

Fig. 11: Unbalanced traffic at output ($N_O = 10$, $\overline{BL} = 10$).

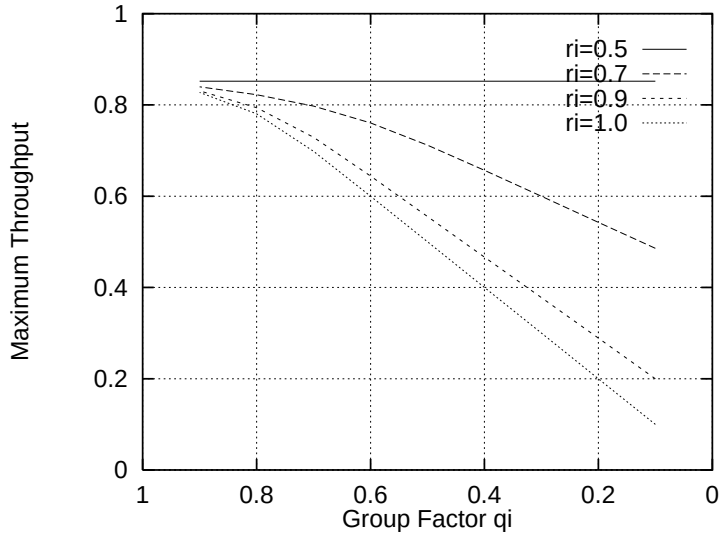

図 12: 入 力 に ト ラ ヒ ッ ク の 偏 り が あ る 場 合 ($N_O = 10$, $\overline{BL} = 1$)

Fig. 12: Unbalanced traffic at input ($N_O = 10$, $\overline{BL} = 1$).

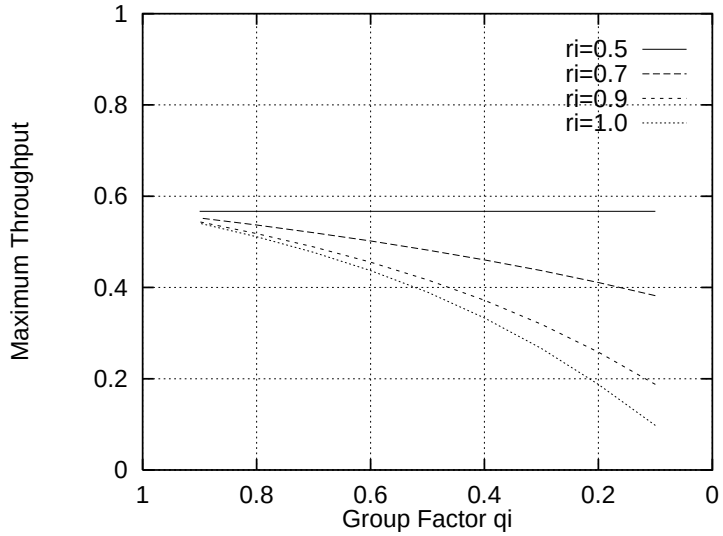

図 13: 入 力 に ト ラ ヒック の 偏 り が あ る 場 合 ($N_O = 10$, $\overline{BL} = 10$)

Fig. 13: Unbalanced traffic at input ($N_O = 10$, $\overline{BL} = 10$).

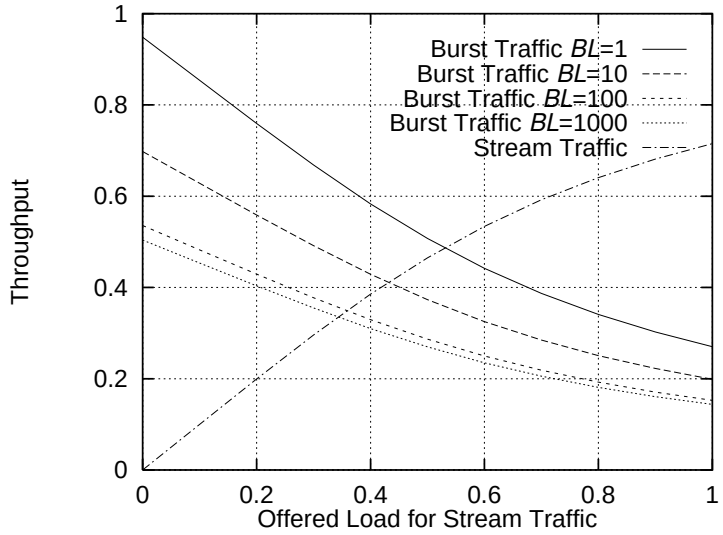

図 14: ス ト リ ー ム ト ラ ヒ ッ ク の 負 荷 と ス ル ー プ ッ ト の 関 係

Fig. 14: Load of stream traffic vs. throughput.

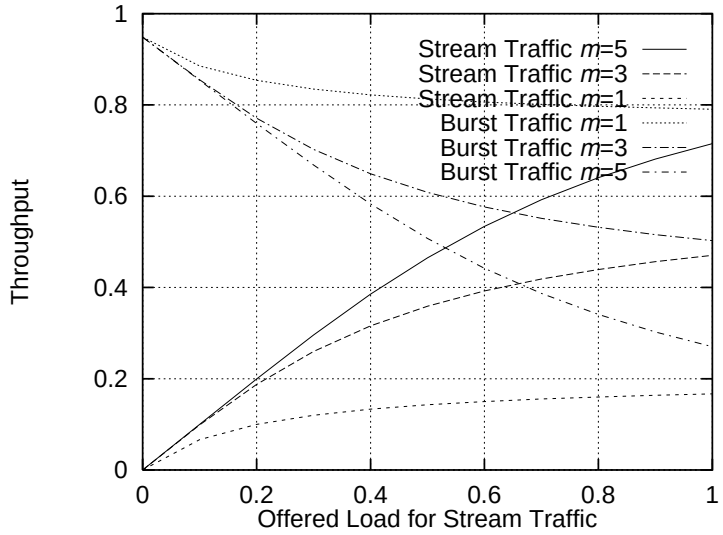

図 15: ストリームトラヒックに帯域制限を施した場合

Fig. 15: Effect of bandwith restriction for stream traffic.