

シミュレーションを用いた広域 ATM 網における TCP の性能評価

長谷川 亨

阿野茂浩

加藤 聰彦

国際電信電話（株） 研究所

〒 356 埼玉県上福岡市大原 2-1-15

近年、広域 ATM 網の普及に伴い、TCP/IP プロトコルに従った LAN 間通信を収容する技術の確立が重要となっている。特に、ATM 網の輻輳時の性能を向上するために、各種の ATM 網の輻輳制御方式に対する TCP トラヒックの性能解析が、シミュレーションを用いて行われてきた。しかし、これらの研究では、伝送遅延などについて、必ずしも実際の広域 ATM 網を考慮した条件を使用していない。さらに、ATM 網の利用効率だけを評価し、パケット長などが異なる不均一な TCP トラヒックのスループットの公平性の評価が行われていない。これに対して、筆者らは、UBR (Unspecified Bit Rate) および VBR (Variable Bit Rate) を対象として、伝送遅延が大きく、TCP コネクション数が多く、さらに TCP トラヒックが均一でないような、現実的な広域 ATM 網を想定した条件でシミュレーションを行った。本稿では、その結果について述べる。

Performance Evaluation using Simulation of TCP over Wide Area ATM Networks

Toru Hasegawa

Shigehiro Ano

Toshihiko Kato

KDD R & D Laboratories

Ohara 2-1-15, Kamifukuoka, Saitama 356, JAPAN

As wide area ATM networks become popular, it becomes important to accommodate TCP/IP based LAN traffic with the ATM networks. In order to improve TCP performance during the ATM network congestion, many simulation studies which evaluate a number of ATM congestion control mechanisms have been done. The studies, however, do not use the simulation conditions which take into account the actual wide area ATM networks and TCP software. They evaluate only the network utilization and does not evaluate fairness to TCP traffic which is not uniform. We have evaluated not only the network utilization but also the fairness of TCP traffic over ATM networks of UBR (Unspecified Bit Rate) and VBR (Variable Bit Rate) using the simulation, in which the actual conditions are taken into account. The paper describes the results.

1 はじめに

広域 ATM 網の普及に伴い、TCP/IP プロトコルに従った LAN 間通信を収容する技術の確立が重要となっている。特に、ATM 網の輻輳時における TCP の性能を向上するために、各種の輻輳制御方式に対する TCP トラヒックの性能解析が、シミュレーションを用いて、行われてきた [1-5]。しかし、これらの研究では、伝送遅延は数ミリ秒以下で、TCP コネクション数も 10 本程度の小規模な ATM 網を対象としているものが多い。また、同一の TCP トラヒックを多重させる場合のみを考慮しており、評価の対象も主に ATM 網の利用効率である。しかし、実際の広域 ATM 網に即した評価結果を得るためには、伝送遅延などだけでなく、パケット長などが異なる不均一な TCP トラヒックの多重を想定するような、現実の広域 ATM 網を考慮した条件でシミュレーションを行なうことが重要である。さらに、ATM 網の利用効率だけでなく、不均一な TCP トラヒックに対するスループットの公平性を評価することが必要である。

そこで、筆者らは、初期の広域 ATM 網において提供されたと考えられる UBR (Unspecified Bit Rate) および VBR (Variable Bit Rate) を対象として、伝送遅延が大きく、TCP コネクション数が多く、さらに TCP トラヒックが均一でないような、現実的な広域 ATM 網を想定した条件でシミュレーションを行った。本稿では、その結果について述べる。

2 ATM 網の輻輳制御方式と TCP のフロー制御

2.1 対象とする輻輳制御方式

UBR の ATM 網や、端末が契約以上のトラヒックを送出することを想定する VBR の ATM 網においては、ネットワーク輻輳時には、ATM スイッチのバッファから溢れてセルが廃棄される。そこで、輻輳によるセル廃棄の影響が最小限になるように各種の輻輳制御方式が検討されている。本稿では、以下の 4 つの輻輳制御方式を評価の対象とする。

(1) 輻輳制御を行わない UBR

ベストエフォート型の通信を提供する UBR において、最も単純な方法は、バッファが一杯の場合、新たに到着したセルを廃棄するものである。

(2) EPD (Early Packet Discard) [1] を行う UBR

(1) では、AAL タイプ 5 の PDU (CPCS-PDU) で転送される IP パケットの一部のセルだけが廃棄され、残りのセルが無駄に転送されることがある。そこで、EPD では、以下の方法で、CPCS-PDU 単位で廃棄する。

- スイッチのバッファ使用率があるしきい値 (thr_{epd}) を越えると、輻輳した出力回線に送出する全てのセルをモニタし、CPCS-PDU の最後のセルを探す。

- 輻輳が継続する間、上記のセルの ATM コネクションに対応する全てのセルを廃棄する。また、輻輳が終了しても、CPCS-PDU の最終セルまで廃棄する。

(3) SCD (Selective Cell Discard) を行う VBR

VBR では、SCR (Sustainable Cell Rate: セル送出の平均速度) や MBS (Maximum Burst Size: 連続に送出可能なセル数) などを加入者と ATM 網が契約する。ATM スイッチの UPC (Usage Parameter Control) は、SCR や MBS を保証するために、加入者からのセルを監視し、トラヒック契約に違反したセルを廃棄あるいはタギングする (Cell Loss Priority Bit を 1 にする)。タギングされたセルは、輻輳時には優先的に廃棄される (SCD)。SCD を実装する ATM スイッチはバッファの使用率があるしきい値 thr_{scd} を越えると、タギングしたセルを優先的に廃棄する。これにより、輻輳が発生しない限り全てのセルを転送し、さらに、輻輳が発生しても SCR を保証する。

(4) SCD と EPD の組み合わせ (SCDEPD と呼ぶ)

輻輳時に探した CPCS-PDU の最後のセルがタギングされている場合のみ、その ATM コネクションを EPD による廃棄対象とする。この方式は本稿で独自に検討されているものであり、ATM 網の利用効率と TCP コネクション間の公平性の双方を高めることが期待される。

2.2 TCP のフロー制御

TCP [6] では、フロー制御に 2 種類のウィンドウを導入している。第 1 は受信側から通知されるウィンドウで、受信側の受信可能なバッファサイズを示す。第 2 は送信側が管理するウィンドウ (輻輳ウィンドウ) で、ネットワークの輻輳を回避するために使用される。TCP パケット (TCP ではセグメントと呼ばれるが、本稿ではこの用語を用いる) の送出は、通常は受信側から通知されるウィンドウに従って行なわれるが、パケット紛失を検出すると、輻輳ウィンドウに従って行なわれる。送信側は、送信パケットの受信確認 (ACK) が RTO (Retransmission TimeOut Value) 時間以上受信しないと、パケットの紛失を検出する。この時、輻輳ウィンドウを一旦 1 パケット分まで減少させて、送信パケットに対する ACK の受信に対して、以下のように徐々に増加させる。まず、送信バッファの 1/2 まで指数関数的に増加させ (スロースタート)、それ以降はほぼ線形に増加させる (輻輳回避アルゴリズム)。また、送信側は、3 個連続して重複した ACK (Duplicate ACK) を受信すると、対応する TCP パケットを再送した後に、輻輳回避アルゴリズムに従う (Fast Retransmit and Fast Recovery)。

3 シミュレーションの条件

各種の輻輳制御方式を評価するために、汎用のパケット網シミュレータ REAL [7] を拡張することにより、UBR ならびに VBR に基づく ATM 網のシミュレータを作成した [8]。具体的には、ATM のセルを扱えるようにシミュレーションパッケージを拡張するとともに、AAL タイプ 5 ならびに ATM スイッチを模擬するプログラムを作成した。TCP の送信側、受信側のプログラムに関しては、REAL が提供するプログラムを用いた。ただし、受信側のプログラムに対しては、Delayed Ack 機能を追加している。

本シミュレータを用いて、各種の輻輳制御方式に対して、輻輳した回線の利用効率、ならびに不均一な TCP トラフィックに対する公平性を評価した。まず、図 1 および 2 の構成を用いて、ネットワーク構成が均一な場合、および不均一な場合の回線の利用効率を評価した。次に、不均一な TCP トラフィックとして、パケット長が異なるトラフィック、ならびに中継 ATM スイッチの入力回線での TCP コネクション数が異なるトラフィックに対する公平性を評価した。前者での公平性に関しては、図 1 の構成を用いて評価し、後者での公平性を用いて図 2 の構成を用いて評価した。

また、いずれの試験においても、中継 ATM スイッチ間の回線において輻輳が発生するように、他の ATM スイッチには十分なバッファを持たせている。

以下では、シミュレーションの条件を示す。

- 広域 ATM 網を想定して、中継 ATM スイッチ間の伝送遅延を 80ms または 10ms にする。
- 80 本の TCP コネクションを同時に通信させ、30 秒間のシミュレーションを行なう。また、シミュレーションでは、ATM スイッチや TCP 端末での処理時間については考慮しない。
- TCP のパケット長 (TCP/IP のヘッダを含む) としては、552 バイト、1500 バイト、ならびに 4352 バイトを使用する。
- TCP トラフィックとしては ftp を想定し、TCP のウィンドウサイズは、パケット長の整数倍で、4.3BSD の ftp ソフトウェアが用いている 24K バイトに最も近い値を使用する。
- ATM スイッチおよび中継 ATM スイッチは、出力回線ごとにバッファを有する。
- 中継 ATM スイッチでは、入力回線毎に SCR と MBS を定め、入力回線単位でタギングを実施する。一方、CPCS-PDU 単位の廃棄は、TCP コネクション毎に実施する。すなわち、1 本の TCP コネクションは 1 本の VC (Virtual Channel) コネクションで転送され、中継 ATM スイッチでは複数の VC コネクションをまとめた、VP (Virtual Path) コネクションを単位としてタギングを実施する。

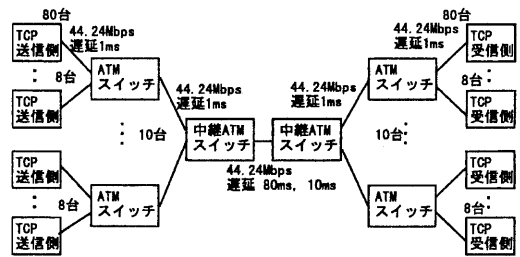


図 1: ネットワーク構成 (1)

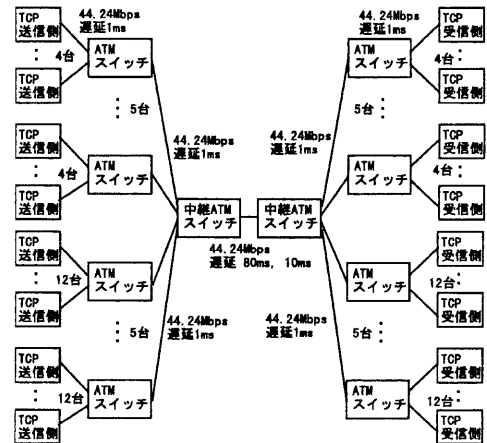


図 2: ネットワーク構成 (2)

- 図 1 の中継 ATM スイッチの入力回線での SCR と MBS として、中継回線の速度とバッファ量を 10 本の入力回線で等分した値を設定する。図 2 の中継 ATM スイッチの 10 本の入力回線では、TCP コネクション数に応じた SCR と MBS を設定する。
- SCD のしきい値 thr_{scd} はバッファの 90% で、EPD のしきい値 thr_{epd} は TCP パケットの 40 個分相当の値である。
- TCP のフロー制御は、4.3BSD Tahoe 版に準拠する [6]。
- TCP 端末は物理回線速度でセルを送出する。

4 利用効率の評価

本章では、図 1 の中継 ATM スイッチ間の回線の利用効率の評価結果を示す。ここで、利用効率は、TCP スループットの総和を中継回線の ATM レイヤのペイロード速度で割った値である。

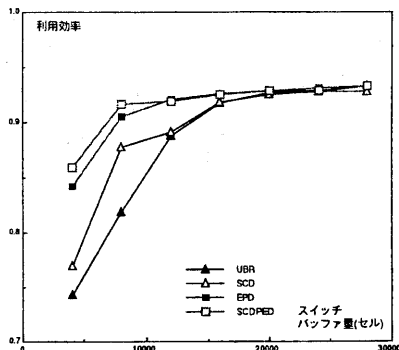


図 3: 回線の利用効率: 1500 バイト、伝送遅延 80ms

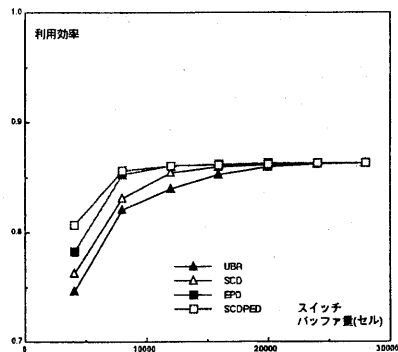


図 5: 回線の利用効率: 552 バイト、伝送遅延 80ms

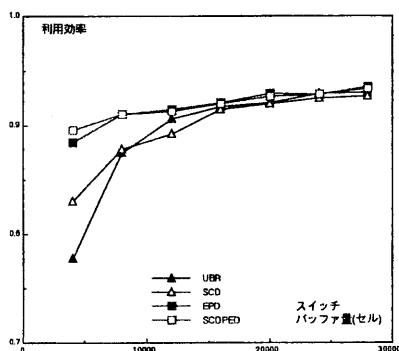


図 4: 回線の利用効率: 1500 バイト、伝送遅延 10ms

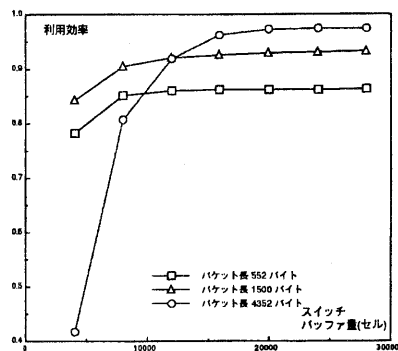


図 6: 回線の利用効率: EPD、伝送遅延 80ms

4.1 均一なネットワーク構成

図 3、図 4 に、80ms と 10ms の伝送遅延に対して、1500 バイトの packets 長を用いて通信した場合の、図 1 の中継 ATM スイッチ間の回線の利用効率を示す。図においては、中継 ATM スイッチのバッファ量を変化させた場合の利用効率を示している。また、図 5 に、伝送遅延が 80ms で、TCP packets 長が 552 バイトの場合の中継回線での利用効率を示す。さらに、図 6 に、中継 ATM スイッチで EPD を実行した場合の、552 バイト、1500 バイト、ならびに 4352 バイトの packets に対する利用効率を示す。

(1) 従来の研究 [1] と同様に CPCS-PDU 単位の廃棄により、利用効率は向上している。さらに以下のことが明らかとなった。

伝送遅延が大きいほど、CPCS-PDU 単位の廃棄を行う方式と行わない方式間の利用効率の差が大きい。例えば、packets 長が 1500 バイトの場合、両者での利用効率の差が小さくなるのに必要なスイッチのバッファ量は、伝送遅延が 10ms では 12000 セル以上であるが、80ms の場合は

20000 セル以上である。

(2) 図 6 に示すように、CPCS-PDU 単位の廃棄を実施しても、packets 長が長いほど、利用効率が飽和するのに必要なスイッチのバッファ量が多い。例えば、packets 長が 4352 バイトの場合は、利用効率が 85% を越えるには、約 12000 セルのバッファが必要であるが、一方、552 バイトの場合は 8000 セル程度で良い。しかし、552 バイトに AAL5 のトレイラの 8 バイトを加えた 560 バイトは、ATM セルのペイロード 48 バイトの整数倍でなく、CPCS-PDU の最終セルに 16 バイトの無駄が生じるため、TCP レベルでの利用効率は最大でも約 89% である。本実験においては、中間の 1500 バイトの packets の場合が、スイッチのバッファ量が 16000 セル分の大きさまでの範囲で、最も高い利用効率であった。

(3) どの輻輳制御方式においても、伝送遅延が大きい方が利用効率が高くなることはあまりなかった。例えば、packets 長が 1460 バイトの場合、図 3 と図 4 を比較してみれば明らかなように、どのような条件においても、伝送遅延が 10ms の場合の利用効率が、80ms より小さくなること

はほとんどない。これは、パケット紛失後の輻輳ウィンドウの増加が、往復伝送遅延に比例するためと考えられる。(4) TCP コネクション数が増加すると、ATM スイッチに必要なバッファ量も増加する。例えば、文献 [1] のシミュレーションでは、パケット長が 1500 バイトで、TCP コネクション数が 10 本の場合は、輻輳制御をしない UBR において利用効率が 85% を越えるには約 2000 セル (約 100K バイト相当) 必要であった。一方、コネクション数が 80 本の本実験では、伝送遅延が 10ms の場合でも約 8000 セル分必要である。

4.2 不均一なネットワーク構成

図 7 に、図 1 の均一な構成、および図 2 の不均一な構成における、UBR および EPD での利用効率を比較して示す。ここで、伝送遅延は 80ms でパケット長は 1500 バイトである。図 7 に示すように、UBR および EPD の双方において、不均一な構成の方が均一な構成と比較して、少し利用効率が高いが、その差は顕著ではない。また、他の条件においても、同様な傾向を示している。

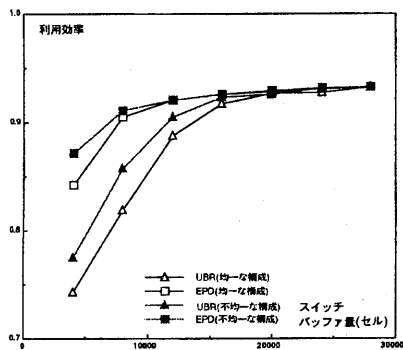


図 7: 回線の利用効率：均一な構成と不均一な構成

5 不均一な TCP トラヒックに対する公平性の評価

5.1 パケット長が異なる TCP トラヒック

図 1 の構成で、40 本の TCP コネクションのパケット長を、それぞれ 552 バイトおよび 1500 バイトにした場合の、それぞれの TCP スループットの平均値を表 1 に示す。表 1 では、伝送遅延が 80ms と 10ms で、スイッチのバッファ量が 8000 セルと 16000 セルの場合の結果を示す。また表 2 に、それぞれの 40 本の TCP コネクションに対して、輻輳による TCP パケットの紛失回数の総和を示す。ここで、

紛失回数の計算では、同時に 1 個以上のパケットが紛失しても、1 回と数えている。

表 1: パケット長 552 バイトと 1500 バイトのスループット

バッファ量 /遅延	パケット 長 (byte)	UBR	EPD	SCD	SCD- EPD
8000 セル 80ms	552	0.31	0.34	0.37	0.37
	1500	0.49	0.51	0.45	0.48
8000 セル 10ms	552	0.32	0.29	0.40	0.40
	1500	0.52	0.56	0.44	0.45
16000 セル 80ms	552	0.33	0.37	0.37	0.38
	1500	0.54	0.48	0.48	0.48
16000 セル 10ms	552	0.26	0.26	0.39	0.39
	1500	0.61	0.61	0.47	0.47

スループットは Mbps

表 2: 552 バイトと 1500 バイトのパケット紛失回数

バッファ量 /遅延	パケット 長 (byte)	UBR	EPD	SCD	SCD- EPD
8000 セル 80ms セル	552	205	186	173	152
	1500	286	226	302	227
8000 セル 10ms	552	612	596	622	507
	1500	658	628	640	563
16000 セル 80ms	552	111	100	91	69
	1500	112	61	159	99
16000 セル 10ms	552	340	369	321	243
	1500	458	357	478	358

UBR や EPD のように ATM コネクション単位での制御を行わない方式では、輻輳時に TCP トラヒックの特性とは独立に、廃棄されるパケットがランダムに選択される。従って、表 2 に示すように、552 バイトと 1500 バイトのパケット長を用いる TCP コネクションでのパケット紛失回数の差が小さい。例えば、伝送遅延が 80ms でスイッチのバッファ量が 16000 セルの場合、それぞれ、111 回と 112 回である。パケット紛失後の輻輳ウィンドウは、1500 バイトのパケットの方が早く増加するため、表 1 に示すように、パケット長が 552 バイトの場合に比較して、1500 バイトの場合の方が、TCP スループットの平均値が高い。

一方、SCD や SCDEPD のようにタギングを用いる方式では、SCR や MBS などのトラヒック契約に違反したセルを優先的に廃棄するため、輻輳ウィンドウの増加が早い 1500 バイトの TCP パケットが廃棄される機会が増える。例えば、上述の条件で、SCD の場合には、552 バイトと 1500 バイトのパケットのコネクションにおける紛失回数は 91 回と 159 回である。この結果、表 1 から明らかなように、伝送遅延やスイッチのバッファ量にかかわらず、タギングを用いた SCD ならびに SCDEPD では、UBR および EPD に比較して、パケット長の異なる TCP コネクションのスループットの差が小さく、公平性を高めている。

5.2 コネクション数が異なる TCP トラヒック

図2の構成で、1500 バイトのパケットに対して、中継 ATM スイッチの入力回線での TCP コネクション数が4本および12本の場合の、1本当たりの TCP スループットの平均値を表3に示す。また表4に、4本および12本の場合の、1本当たりの輻輳による TCP パケットの紛失回数の平均を示す。

表3: パケット長 1500 バイトの4本および12本の平均スループット

バッファ量 /遅延	本数 (本)	UBR	EPD	SCD	SCD- EPD
8000 セル	4	0.51	0.51	0.43	0.48
80ms	12	0.38	0.42	0.43	0.43
8000 セル	4	0.60	0.77	0.49	0.53
10ms	12	0.36	0.33	0.40	0.41
16000 セル	4	0.51	0.48	0.44	0.44
80ms	12	0.42	0.43	0.44	0.45
16000 セル	4	0.75	0.63	0.46	0.47
10ms	12	0.34	0.38	0.43	0.44

スループットは Mbps

表4: 1 コネクション当りのパケット紛失回数

バッファ量 /遅延	本数 (本)	UBR	EPD	SCD	SCD- EPD
8000 セル	4	31.5	27.6	34.5	26.0
80ms	12	43.8	33.8	36.4	29.1
8000 セル	4	61.0	72.8	76.5	71.2
10ms	12	67.8	66.3	74.4	65.2
16000 セル	4	11.3	10.3	18.3	12.8
80ms	12	18.3	15.3	20.1	14.3
16000 セル	4	34.8	40.3	56.5	38.8
10ms	12	59.4	49.3	58.1	46.8

表3から明らかなように、入力回線での TCP コネクション数が異なる場合にも、タギングを用いる SCD および SDCEPD は TCP コネクション毎の公平性を高めている。また、表4に示すように、UBR や EPD では、多重するコネクション数が多い方が、1 コネクション当りのパケット紛失回数が多い。これは、輻輳時には、TCP コネクション数が多い入力回線からのトラヒック量が多いため、廃棄の対象になりやすいためと考えられる。一方、入力回線でのトラヒック量に応じた SCR と MBS を設定することにより、タギングを行なう方式でのパケット紛失回数は、入力回線でのトラヒック量にほぼ比例している。

6 考察

シミュレーション結果より、以下のことが明らかとなった。

(1) どの輻輳制御方式においても、伝送遅延が大きい場合に、輻輳時の網の利用効率が低い傾向がある。特に、ATM スイッチのバッファ量が十分でない時に顕著である。

(2) TCP コネクション数が多い場合、どの輻輳制御方式においても、ATM スイッチに必要なバッファ量が多くなる。

(3) パケット長や多重するコネクション数が異なるような、不均一な TCP トラヒックに対して、UBR や EPD のように ATM コネクション単位の制御を行なわない方式では、スループットの公平性が低い。これに対して、タギングを用いる SCF および SCDEPD は、不均一な TCP トラヒックに対する公平性を高めるのに有効な手法である。

(4) 輻輳時の網の利用効率については、全ての条件において、EPD と SCDEPD がほぼ等しく、最も高く、以下、SCD、UBR の順である。この結果、4 種類の輻輳制御方式の内、SCDEPD が、網の利用効率ならびにスループットの公平性の双方に対して、最も有効な方式であった。

7 まとめ

本稿では、UBR ならびに VBR を用いた ATM 網に対して、ATM 網が輻輳した時の TCP の性能をシミュレーションにより解析した。この解析においては、TCP コネクション数、伝送遅延、TCP トラヒックの分布などにおいて、現実の ATM 網を想定した条件を用いた。この結果、伝送遅延が大きく、通信する TCP コネクション数が多い広域 ATM 網においても、CPCS-PDU 単位の廃棄を行なうことが、輻輳時の網の利用効率を高めることに有効であった。また、パケット長などが異なる TCP トラヒックのスループットの公平性を保証するには、VBR に基づく輻輳制御方式が有効であった。最後に、日頃御指導いただく村上研究所長に感謝する。

参考文献

- [1] A. Romanow, et. al., "Dynamics of TCP Traffic over ATM Networks," IEEE Journal of Selected Areas in Communications. Vol.13, No.4, pp.633-641, May 1995.
- [2] M. Perloff, et. al., "Improvements to TCP Performance in High-Speed ATM Networks," Communications of the ACM, Vol. 38, No. 2, pp.90-109, February 1995.
- [3] H. Li, et. al., "Performance of TCP over UBR Service in ATM Networks with Per-VC Early Packet Discard Schemes," Proc. of IPCCC'96, pp. 350-357. 1996.
- [4] H. Saito, et. al., "Performance Issues in Public ABR Service," IEEE Communication Magazine, Vol.34, No.11, pp.40-48, November 1996.
- [5] 長谷川他, "上位層に TCP を適用した場合の ATM サービスクラスの性能比較評価," 信学技報, SSE95-170, IN95-114, pp.53-60, March 1996.
- [6] W. Stevens, "TCP/IP Illustrated, Volume 1 [The Protocols]," Addison-Wesley, February 1994.
- [7] S. Keshav, "REAL: A Network Simulator," Computer Science Department Technical Report 88/472, UC Berkeley, December 1988.
- [8] 阿野他, "Available Bit Rate (ABR) 上で動作する TCP のためのプロトコルシミュレータ," 情報処理学会第 52 回全国大会, 1Bb-2, vol.1, pp.185-186, March 1996.