

衛星インターネット用TCPゲートウェイの提案

三宅 優 長谷川 輝之 長谷川 亨 加藤 聰彦

KDD 研究所

衛星回線を利用する衛星インターネットでは、伝送遅延の影響により、ウィンドウサイズが制限されているフロー制御を使用したTCPによる通信では高速なデータ転送が不可能である。この問題を解決するために、本稿では、衛星インターネットにおいてデータ転送を高速化する衛星インターネット用TCPゲートウェイを提案する。これは、衛星回線の送信局でTCPのコネクションに介在してパケットの転送や生成を行なうことにより、データ通信を行なっている計算機に伝送遅延が小さい相手と通信を行なっていると認識させ、通信速度を向上させることを可能としている。さらに、この提案した方式の有効性を実証するために提案方式に基づくTCPゲートウェイを試作し、伝送遅延により低下したTCPによるデータ転送速度が20倍以上高速化されることを確認したので、報告する。

A Proposal of TCP Gateway System for Satellite-based Internet Access

Yutaka Miyake Teruyuki Hasegawa Toru Hasegawa Toshihiko Kato

KDD R&D Laboratories

Because transmission delay is large on satellite-based internet access, TCP using default window size for flow control restricts throughput of data transfer. To accelerate the throughput, this paper proposes TCP gateway system for satellite-based internet access. This gateway is located in satellite transmission center, and generates acknowledgment packets for servers and forwards more data packets than advertised window size to clients via satellite link. By this approach, servers and clients can obtain high TCP throughput as if they were connected through link with small round trip delay. In order to evaluate this proposal, we made the TCP gateway and confirm that communication speed using TCP gateway is about twenty times faster than the traditional one on large delay network.

1 はじめに

インターネットの普及と共に、そのアクセス方式も専用線、電話網、ISDNに加えて、衛星回線やCATVネットワークを利用したものが導入されようとしている。これらの新しいアクセス方式では、従来の方

式に比べて高速な伝送路が利用可能となることから、インターネットへの快適なアクセスが実現すると共に、この高速性を活用した新しいアプリケーションの導入も期待されている。

衛星回線を用いたインターネットアクセス(衛星インターネット)では、インターネットから各加入者

への通信経路に広帯域な伝送路である衛星回線を使用し、加入者からインターネットへの経路には、電話網または ISDN 等の公衆網を利用するのが一般的な形式である。インターネットからの情報取得を目的とする多くの加入者にとって、インターネットから加入者への伝送路が高速化されれば、データの転送時間が短くなり快適なアクセスが実現する。

しかし、WWW アクセスや FTP によるファイル転送等の TCP を使用したデータ転送においては、伝送遅延の影響によりデータ転送速度が著しく低下してしまう。これは、TCP ではフロー制御により受信バッファのオーバーフローを抑制しており、受信側が通知したウィンドサイズ以上のデータを送信側が送信できないようになっているためである。ウィンドサイズ分のデータを送信するとその確認応答が返送されるまで次のデータが送信できないため、伝送遅延の増加により単位時間に送信可能なデータ量が減ってしまうことになる。

そこで筆者らは、衛星インターネットにおいて TCP によるデータ転送のスループットを向上させる衛星インターネット用 TCP ゲートウェイを提案する。これは、衛星回線の送信局内の通信経路上に設置される装置であり、インターネット上に存在する各種サーバと加入者の間で張られた TCP のコネクションに介在し、送受信が行なわれている TCP のパケットを操作することにより、インターネット上のサーバから各加入者へのデータ転送速度を高速化する。また、この装置の導入に関しては、加入者側の通信設備に対する変更や新たなソフトウェアの導入等は必要ないため、加入者が使用するオペレーティングシステムやアプリケーションソフトウェア等に対する制約は一切ない。本稿では、衛星インターネット用 TCP ゲートウェイの動作原理を説明するとともに、これに基づいて試作したゲートウェイ装置を用いたときの通信性能の評価について述べる。

2 衛星インターネット用 TCP ゲートウェイの設計方針

筆者らは、先に TCP 通信の高速化を行なう TCP ゲートウェイを開発した [1]。この TCP ゲートウェイは、ネットワークの遅延区間の両端に 1 対のゲートウェイ装置を設置し、このゲートウェイを通過する TCP のコネクションに対して高速なデータ転送が可能なプロトコル変換を行ない、ゲートウェイ間では高速なデータ通信を、ゲートウェイと送受信計算機間では TCP による通信を行なうようにする。伝送遅延に強く高速なデータ転送が可能な独自プロトコルはゲートウェイ間の通信のみで使用するため、送受信計算機に実装されている TCP、および、TCP のために設定されている各種パラメータを一切変更せずに、遅延が大きい高速伝送路を介した通信の速度を大幅に向上させることに成功した。

しかし、衛星インターネットでは遅延の大きな衛星回線が加入者回線として使用されており、伝送遅延区間の両端に導入するには各加入者毎に 1 組の TCP ゲートウェイを導入しなければならない。これでは、設備コストが大幅に増加することとなるため、この TCP ゲートウェイをそのまま衛星インターネットに流用することは得策でないと考えられる。したがって、以下のような方針により新たなゲートウェイ装置を開発することとした。

1. 加入者側に新たな設備を設置したり、加入者が所有するパソコン等の端末に新規にソフトウェアを組み込むことは現実的でない。そこで、衛星回線区間の送信側のみにゲートウェイ装置を設置することにより TCP の通信速度を高速化させる。ゲートウェイ装置の通信相手は両側とも何の変更もされていない TCP であるため、独自プロトコルは使用しない。
2. TCP による通信の高速化は、衛星回線の送信側から加入者への経路のみとし、加入者からインターネットへのデータ転送は高速化しない。

3 TCP による通信の問題点と衛星インターネット用 TCP ゲートウェイの処理

3.1 TCP の通信シーケンスと問題点

図 1 に衛星インターネットにおける通常の TCP の通信シーケンスを示す。このシーケンスは、FTP のデータ転送を想定して、インターネット側計算機からコネクションが確立され、インターネット側計算機から加入者のパソコンへデータが転送されている。

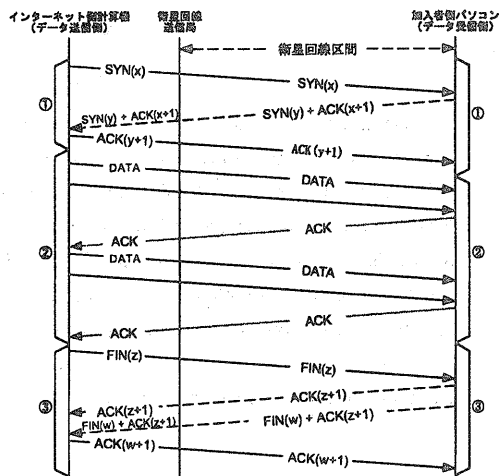


図 1: 衛星インターネットを経由した時の TCP の通信シーケンス

通信シーケンスは、コネクション確立 (①)、データ転送 (②)、コネクション解放 (③) の 3 つのフェーズから構成される。これらのうち、データ転送フェー

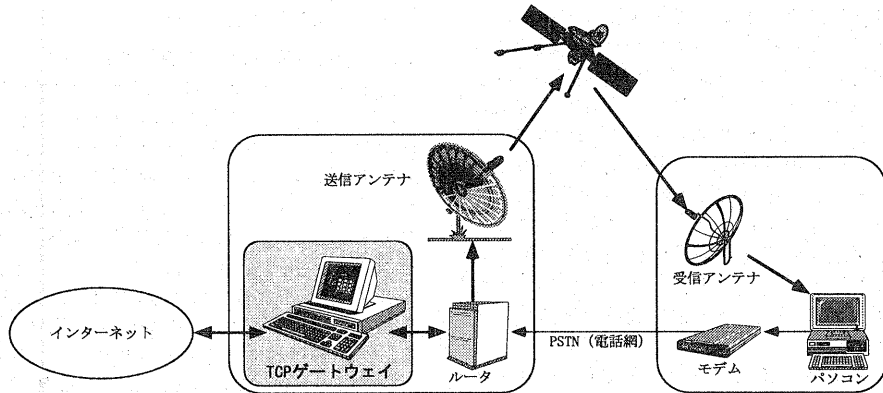


図 2: 衛星インターネット用 TCP ゲートウェイを導入したときのネットワーク構成

ズでのデータ転送効率が通信スループットに最も影響を与える。TCP のデータ転送ではフロー制御を使用しており、データ送信側は受信側が通知したウィンドウサイズ以上の DATA パケットを送信できない。図 1 では、②のフェーズにおいて DATA パケットが 2 つ送信されると、それらに対する ACK(確認応答) パケットが到着するまで次の DATA パケットの送信が停止している。遅延が小さい相手との通信であれば、ウィンドウサイズ分の DATA パケットを送信した後に、即座にそれらに対応する ACK パケットが到着するため、連続して DATA パケットを送信できる。しかし、衛星回線のような伝送遅延が大きなネットワークを経由する場合には、ACK パケットの到着に時間がかかり、連続した送信を行なうことができない。したがって、伝送遅延が大きくなると通信スループットが極端に低下してしまう。

3.2 衛星インターネット用 TCP ゲートウェイの概要

衛星インターネット用 TCP ゲートウェイは、TCP コネクションに介在することにより衛星回線を経由する伝送遅延の大きな通信でも高速なデータ転送を可能とする装置である。これは、衛星回線区間の送信側に設置され、TCP のコネクション情報を取得するとともに、受信した TCP パケットに対して高速化のための処理を行なう。図 2 は、この TCP ゲートウェイを衛星インターネットに導入した場合のネットワーク構成である。また、図 3 は、TCP ゲートウェイを導入したときの TCP の通信シーケンスである。

TCP ゲートウェイは、コネクション確立フェーズ(①)でコネクション情報を取得とパケットの転送を行なう。そして、得られたコネクション情報を利用して、データ転送フェーズ(②)で以下の処理を行なうことにより、このフェーズでの転送速度を高速化する。

1. インターネット側計算機が DATA パケットを連

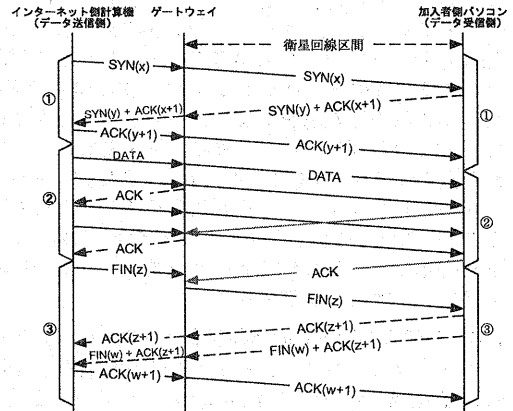


図 3: 衛星インターネット用 TCP ゲートウェイを使用した場合の TCP の通信シーケンス

続して送信できるように、ACK パケットを生成してインターネット側計算機に送信する。

2. 加入者側パソコンからの ACK パケットの到着を待たずに、DATA パケットを転送する。
3. ゲートウェイと加入者側パソコン間では、伝送遅延と上記の処理を考慮した誤り回復手順を導入する。

これらの処理内容の詳細については、以降の節で述べる。

3.3 ゲートウェイでの ACK パケットの生成

インターネット側計算機は、ウィンドウサイズ分の DATA パケットを送信すると、送信した DATA パケットに対する ACK パケットを受信してウィンドウが更新されるまで、次の DATA パケットが送信できない。そこで、インターネット側計算機が連続して DATA パケットを送信できるように、衛星インターネット用ゲートウェイは、インターネット側計算機から送信された DATA パケットを受信したら、その DATA パケットに対する ACK パケットを加入

者側パソコンになりすまして生成し、返送する。このパケットによりインターネット側計算機でフロー制御に使用しているウィンドウが更新されるため、次のDATAパケットが送れるようになり、連続したパケット送信が行なわれることになる。すなわち、インターネット側計算機は、通信相手となるパソコンが、ゲートウェイが設置されている場所に存在すると判断して通信を行なう。これにより、衛星回線による伝送遅延の影響を受けずにACKパケットが返送されることになるため、インターネット側計算機からのDATAパケットの送出速度が高速化されることになる。

ゲートウェイがACKパケットを生成してインターネット側計算機に返送していることから、そのACKパケットで受信が確認されたDATAパケットはインターネット側計算機の送信バッファから取り除かれることになる。したがって、このDATAパケットは加入者側パソコンからのACKパケットにより確認されるまではゲートウェイのバッファ内に保持され、転送中に紛失した場合には、ゲートウェイが保持しているものが再送される。また、加入者側パソコンから送られてきたACKパケットは、既にゲートウェイが作成してインターネット側計算機が受信しているため、これを受信したゲートウェイは、このパケットが確認しているDATAパケットをバッファから取り除き、パケットを破棄する。

3.4 DATAパケットの加入者側パソコンへの先送り

ゲートウェイがインターネット側計算機から受信したDATAパケットを加入者側パソコンへ転送する際、TCPの仕様にしたがった処理を行なうとすると、加入者側パソコンが提示したウィンドウサイズ以上のデータを送信した後は、ウィンドウを更新するためのACKパケットを受信するまで次のDATAパケットの送信ができなくなる。このままでは、遅延の影響により前述のようにデータ転送速度が低下してしまう。そこで、ゲートウェイ装置は、加入者側パソコンが提示しているウィンドウサイズを越えたDATAパケットを送信するようにした。すなわち、通信経路となる衛星回線部分の伝送遅延と伝送速度に適したより大きなウィンドウサイズを使用して、DATAパケットを転送する。受信側パソコンが提示しているウィンドウサイズを越えて送信するが、伝送遅延の影響により、ウィンドウサイズを越えて送出したDATAパケットが到着する時点では、そのDATAパケットより早く到着したDATAパケットに対するACKパケットが送出されて受信側のバッファに空きができることにより、加入者側のパソコンで受信可能な状態になっている可能性が高い。ただし、加入者側のパソコンで処理できない速度でDATAパケットが到着すると、受信バッファのオーバーフローが発生してパケットの紛失となることから、ゲートウェイはパケットの紛失状況等を考慮してDATAパ

ケットを送信する必要がある。

3.5 先送りに対応した誤り回復手順

衛星インターネット用TCPゲートウェイは、TCPコネクションに介在してパケットの生成、破棄、転送を行なっているため、パケット紛失等により誤りが発生した場合には、その回復のための処理を行なわなければならない。この誤り回復手順は、ゲートウェイを介していることを前提とせずにTCPによる通信を行なっている計算機に対して行なうため、TCPの手順に従うものでなければならない。

TCPでは、パケットの紛失を検出するとネットワークが輻輳状態になったと判断し、Slow StartおよびCongestion Avoidanceによる輻輳回避手順[2]によりパケットの送出量を抑制する。これらの手順では、受信側が通知しているウィンドウサイズとは別に、送信側が輻輳ウィンドウサイズと呼ばれるウィンドウサイズを持ち、これらの値の小さい方をウィンドウサイズとしてパケットを送信する。パケットの紛失が発生すると輻輳ウィンドウサイズを小さくし、通信相手からのACKパケットを受信する毎に徐々に輻輳ウィンドウサイズを拡大していく。これにより、パケットの紛失発生後には、輻輳ウィンドウサイズ以内でしかDATAパケットが送出できなくなり、パケットの送出量が抑制されることになる。

この輻輳回避手順はインターネットにおける通信においては有効である。そこで、インターネット側計算機とゲートウェイ間では、伝送遅延の影響が小さく、また、Slow StartおよびCongestion Avoidanceによる輻輳回避手順を持つことを前提として運用されているネットワークを経由しているため、TCPに使用されている誤り回復手順をそのまま適用することとする。

一方、伝送路が高速で遅延が大きい場合には輻輳ウィンドウサイズの拡大に時間がかかり、スループットが極端に低下してしまう。そこで、衛星回線の部分については、以下の点を考慮して、パケット紛失後の誤り回復手順を変更することとした。

1. 衛星インターネットの衛星回線に対してパケットを送信しているのは、ゲートウェイのみである。その他の計算機からパケットが流入する可能性はほとんどなく、ゲートウェイが適切な速度でDATAパケットを送信していれば、衛星回線で輻輳が発生する可能性は低い。したがって、パケット紛失の原因の多くは、伝送誤り、または、ゲートウェイがウィンドウサイズ以上のDATAパケットを転送したことによるバッファオーバーフローであると考えられる。
2. 輻輳ウィンドウサイズによるパケットの送出量の調整は送信側のみの問題であり、受信側はパケット紛失後であっても、提示しているウィンドウサイズ内であれば連続したDATAパケット

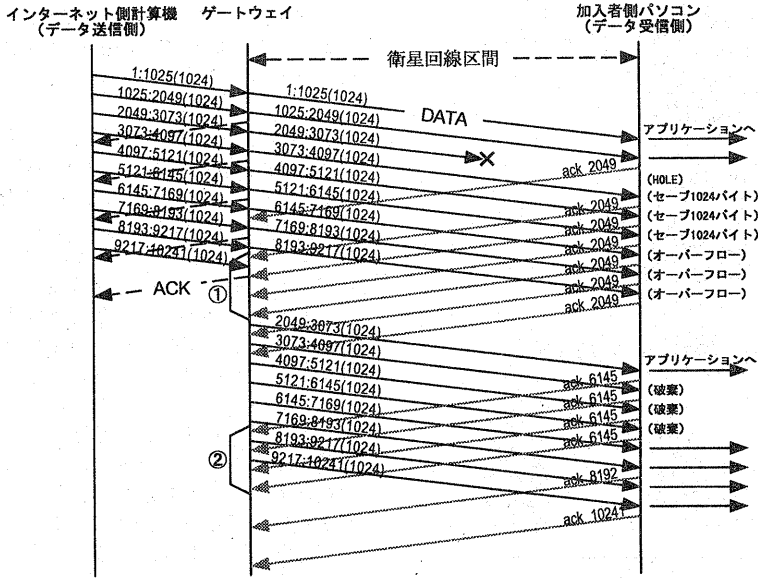


図 4: ゲートウェイと加入者側パソコン間の誤り回復手順

の受信は可能である。

- 1 往復時間以内に紛失したパケットが1つの場合に適用される Fast Retransmit & Fast Recovery を使用しても、再送不要となる DATA パケット数は相対的に少ないため、go-back-N で十分である。

変更した誤り回復手順は以下の通りである。

- 送信した DATA パケットに対する ACK パケットが返送されずタイムアウトが発生した場合
 1. タイムアウトが発生した時点で、誤り回復手順に移行する。
 2. TCP に使用されているものと同じ手順で、go-back-N により確認がされていない最初の DATA パケットから順次再送する。このとき、Slow Start 等の輻輳回避処理を行わない。
- 同じ確認応答番号を含む ACK パケット (Duplicate ACK) を連続して 3 パケット受信した場合
 1. 3 つめの Duplicate ACK パケットを受信したら、その ACK パケットで確認している DATA パケットの次の DATA パケットが紛失したと判断して、誤り回復手順に移行する。
 2. go-back-N により、Duplicate ACK で確認された DATA パケットの次のパケットから再送する。このとき、Slow Start 等の輻輳回避処理を行わない。
 3. 受信側が Fast Retransmit & Fast Recovery に対応して、紛失した DATA パケット以降の DATA パケットを受信バッファ内に保持

している場合は、go-back-N でそれらのパケットを再送しているために、同じ確認応答番号を持つ ACK パケットが返送される。これらを Duplicate ACK として扱わないために、再送後は受信バッファサイズに格納可能な DATA パケットの数だけ、受信した ACK パケットを Duplicate ACK のカウント対象としない。

図 4 は、受信バッファは 4K バイトで TCP のデータ長が 1K バイトのときに、上記の誤り回復手順が動作している場合の典型的なシーケンスを示している。この図では、3 番目の DATA パケットが紛失し、それ以降の DATA パケットの受信より加入者側パソコンが同じ確認応答番号を持つ ACK パケットを送信している。Fast Retransmit & Fast Recovery に対応するために、受信した DATA パケットは受信バッファに空きがあれば格納(セーブ)され、バッファがすべて埋められた時点で、パケットは破棄される。この図の場合では、受信バッファサイズが 4K バイトで、1K バイト分の DATA パケットが紛失しているため、残りの 3K バイトの部分に DATA パケットが格納される。ゲートウェイでは、3 つめの Duplicate ACK を受信 (①) すると、再送を開始する。go-back-N により紛失した DATA パケットから順に送信されが、紛失した DATA パケットに続く 3 つの DATA パケットは、既に受信バッファに格納されているため、加入者側のパソコンで受け取る必要がない。そこで、これらの DATA パケットは破棄されて ACK パケットが返送されるが、この ACK パケットはすべて同じ応答確認番号を持つ (②)。これらをパケット紛失による Duplicate ACK と判断しないために上述の

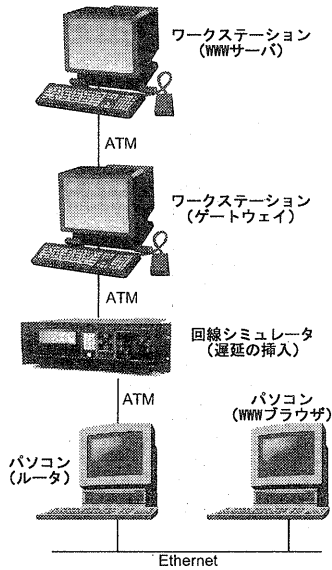


図 5: 評価に使用したネットワークの構成

表 1: 衛星インターネット用 TCP ゲートウェイの性能評価

ビット誤り率	Throughput (Mbps)			
	0.0	1.0E-9	1.0E-8	1.0E-7
TGW なし	0.18	0.17	0.18	0.18
TGW あり	4.19	3.83	3.36	2.06

処理を行っており、この ACK パケットの受信による再送は発生していない。

4 性能評価

本稿で提案した衛星インターネット用 TCP ゲートウェイの有効性を確認するために、提案したアルゴリズムに従ってパケットを処理する TCP ゲートウェイを試作した。本節では、この TCP ゲートウェイを使用した性能評価試験の結果について述べる。

図 5 は、性能評価に使用したネットワークの構成である。パソコン上で動作する WWW ブラウザがワークステーションで動作している WWW サーバにアクセスするには、イーサネットを経由してルータとして動作するパソコンにより ATM ネットワークへ変換され、伝送遅延を挿入するための回線シミュレータと TCP の通信速度を高速化するゲートウェイを経由する。回線シミュレータでは、衛星インターネットによるアクセスをシミュレートするために、WWW サーバから WWW ブラウザへの伝送には 300 ミリ秒の遅延を、WWW ブラウザから WWW サーバへの伝送には 50 ミリ秒の遅延を挿入している。

表 1 は、衛星インターネット用 TCP ゲートウェイを使用して WWW によりデータを転送したとき (TGW あり) と、使用せずにデータ転送をしたとき

(TGW なし) のデータ転送速度を示している。回線シミュレータにより、 1.0×10^{-9} 、 1.0×10^{-8} 、 1.0×10^{-7} のビット誤り率でエラーを挿入した場合のデータ転送についても計測した。

TCP ゲートウェイを使用せずにデータ転送を行なうと、伝送遅延の影響により 0.18Mbps 程度のスループットでしか通信が行えない。また、伝送帯域をほとんど使用していないため、 1.0×10^{-7} 程度のビット誤り率では、ビット誤りによるパケット紛失がほとんどなく、スループットに影響を与えない。これに対し、TCP ゲートウェイを動作させることにより、伝送路上でエラーが発生しない場合には 4.19Mbps のスループットを得ることができた。この伝送においても、先送りによるバッファオーバーフローが発生したが、誤り回復手順の変更によりパケット紛失後も急速にスループットが回復して高いスループットを維持することができた。伝送エラーを発生させた場合には、誤り率が大きくなるにつれてスループットが低下しているが、回線の使用率が TGW なしに比べて高いために、ビット誤りによるパケット紛失の確率が高くなったと思われる。しかし、極端にスループットは低下していない。

5 おわりに

本稿では、衛星インターネットにおいて伝送遅延による TCP 通信のスループット低下を解消する衛星インターネット用 TCP ゲートウェイを提案した。これは、衛星回線の送信局側で TCP コネクションに介在して通信を行なっている計算機に対して、伝送遅延が小さい通信相手と通信を行なっていると思わせることにより、通信速度を向上させることを可能としている。また、これは、インターネット上の計算機や各加入者が所有しているパソコン等の通信パラメータの設定変更や、それらへの新規ソフトウェアのインストールを行なうことを要求しないため、各加入者に何ら負担をさせることなく高速化が実現する。本提案方式の有効性を確認するために、提案したアルゴリズムを実行する試作機を作成して通信評価を行ない、TCP ゲートウェイを使用することで通信速度が 20 倍以上高速化されることが確認された。最後に、日頃ご指導頂く KDD 研究所 村谷所長、鈴木副所長、山本副所長に感謝します。

参考文献

- [1] 長谷川輝之、長谷川亨、加藤聡彦、鈴木健二、“広域 ATM 網を介した LAN 間接続のための TCP ゲートウェイの実装と性能評価、” 信学論、VOL. J79-B-I、No.5、pp.262-270、May 1996.
- [2] W. Stevens, “TCP Slow Start, Congestion Avoidance, Fast Retransmit, and Fast Recovery Algorithms,” RFC-2001, January 1997.
- [3] 三宅優、長谷川輝之、長谷川亨、加藤聡彦、“非対称衛星通信用 TCP ゲートウェイ、” 1998 年電子情報通信学会総合大会、B7-99、pp.220、March 1998.