社団法人　電子情報通信学会
THE INSTITUTE OF ELECTRONICS,
INFORMATION AND COMMUNICATION ENGINEERS

信学技報
TECHNICAL REPORT OF IEICE.

TCP over TCP の性能評価
— TCP トンネルがエンド–エンドのスループットおよび遅延に与える影響 —

本田　治[†]　大崎　博之[††]　今瀬　真[††]　石塚　美加[†††]　村山　純一[†††]

† 大阪大学 大学院基礎工学研究科
〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5
†† 大阪大学 大学院情報科学研究科
〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5
††† 日本電信電話株式会社 NTT 情報流通プラットフォーム研究所
〒 180-8585 東京都武蔵野市緑町 3-9-11
E-mail: †o-honda@ics.es.osaka-u.ac.jp, ††{oosaki,imase}@ist.osaka-u.ac.jp,
†††{ishizuka.mika,murayama.junichi}@lab.ntt.co.jp

あらまし　TCP トンネルは、エンド端末間で転送されるパケットを集約し、単一の TCP フローとして転送する技術である。TCP トンネルを用いることにより、集約したフロー間の公平性を向上させたり、ファイアウォールを透過的に利用することができる。しかし、エンド端末で動作するアプリケーションが TCP を使用する場合、エンド間の TCP およびトンネルの TCP の 2 種類のフィードバック制御が同時に動作することになる。ある条件下では、TCP トンネルを使用することにより、エンド間の TCP 性能が極端に劣化することが知られている。一方、他の条件下では、エンド間の TCP の性能が向上することも知られている。そこで本稿では、TCP トンネルが、エンド間の TCP 性能にどのような影響を与えるかを、シミュレーション実験により明らかにする。具体的には、リンクの伝搬遅延、SACK オプションの有無、TCP のソケットバッファサイズ、TCP トンネルの入側ルータのバッファサイズなどが、エンド間の TCP のグッドプットやラウンドトリップ時間にどのような影響を与えるかを定量的に明らかにする。
キーワード　TCP (Transmission Control Protocol)、TCP over TCP、TCP トンネル、性能評価、グッドプット、ラウンドトリップ時間

Understanding TCP over TCP: Effects of TCP Tunneling on End-to-End Throughput and Latency

Osamu HONDA[†], Hiroyuki OHSAKI[††], Makoto IMASE[††], Mika ISHIZUKA[†††], and Junichi MURAYAMA[†††]

† Gradauate School of Engineering Science, Osaka University,
1-5 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, Japan
†† Graduate School of Infomation Science and Technology, Osaka University,
1-5 Yamadaoka Suita, Osaka 565-0871, Japan
††† NTT Information Sharing Platform Laboratories, NTT Corporation,
3-9-11 Midori-cho, Musashino, Tokyo 180-8585, Japan
E-mail: †o-honda@ics.es.osaka-u.ac.jp, ††{oosaki,imase}@ist.osaka-u.ac.jp,
†††{ishizuka.mika,murayama.junichi}@lab.ntt.co.jp

Abstract　TCP tunnel is a technology that aggregates and transfers packets sent between end hosts as a single or multiple TCP connections. By using a TCP tunnel, the fairness among aggregate flows can be improved and several protocols can be transparently transmitted through an Internet firewall. However, since most applications running on end hosts generally use TCP, two TCP congestion controls (i.e., end-to-end TCP and tunnel TCP) operate simultaneously and might interfere each other. Under certain conditions, it has been known that using a TCP tunnel severely degrades the end-to-end TCP performance. On the contrary, under other conditions, it has been known that using a TCP tunnel significantly improves the end-to-end TCP performance. However, it is still an open issue — how, when, and why is TCP tunnel malicious for end-to-end TCP performance? In this paper, we therefore investigate effect of TCP tunnel on the end-to-end TCP performance using simulation experiments. Specifically, we quantitatively reveal effects of several factors on performances of end-to-end TCP (e.g., the link propagation delay, usage of TCP SACK option, TCP socket buffer size, and the buffer size of the ingress router) .
Key words　TCP (Transmission Control Protocol), TCP over TCP, TCP Tunnel, Performance Evaluation, Goodput, Round-Trip Time

1 はじめに

TCP トンネルは、2 つのノード (計算機またはルータ) 間でフロー (送受信 IP アドレスやポート番号などが等しいパケットの列) を集約し、単一の TCP コネクションとして転送することにより仮想的な回線を構築する技術である。TCP トンネルを用いることにより、集約したフロー間の公平性を向上させたり、ファイアウォールを透過的に利用することができる [1, 2]。TCP トンネルは、Vtun [3]、Htun [4]、SSH [5]、Soft Ether [6] などのアプリケーションでも広く用いられている。

これまで、TCP 自体の性能評価に関しては、非常に多くの研究が行われてきた [7-11] 。また、TCP トンネルを用いた場合の、エンド間の TCP の性能に関する研究もいくつか行われている [1, 9, 12]。TCP トンネルを用いた場合の、エンド間の TCP の性能に関する研究では、ある条件下で、エンド間の TCP の性能が劣化することが指摘されている [1, 9, 12]。一方、他の条件下では、エンド間の TCP の性能が逆に向上することも指摘されている [9]。しかし、TCP トンネルを用いた場合の、エンド間の TCP の性能に関する既存の研究では、ネットワークのパラメータや TCP のパラメータの設定などの要因が、エンド間の TCP の性能にどのような影響を与えるのかが、十分に明らかにされていない。

本稿では、TCP トンネルが、エンド間の TCP の性能にどのような影響を与えるかを明らかにする。特に、TCP トンネルが、エンド間の TCP フロー (以下、簡単のため「 TCP フロー」とも呼ぶ) のグッドプットおよびラウンドトリップ時間に与える影響を明らかにする。これにより、TCP トンネルを使用する場合、エンド間の TCP の性能を劣化させないために、ネットワークパラメータや、ネットワークに対するワークロードなどの要因に応じて、TCP のパラメータをどのように設定すればよいのかを明らかにする。

いくつかの初期的なシミュレーション実験の結果、エンド間の TCP の性能は、エンド端末から TCP トンネルまでの伝搬遅延と、TCP トンネル自体の伝搬遅延の大小関係によって大きく変化することが分かった。そこで本稿では、特に、エンド端末から TCP トンネルまでの伝搬遅延と、TCP トンネル自体の伝搬遅延の大小関係に着目して評価を行う。

エンド間の TCP の性能に影響を与える可能性がある要因として、ネットワークのパラメータ (リンクの帯域、伝搬遅延、MTU (Maximum Transmission Unit)、TCP トンネルの入側ルータのバッファサイズ)、ネットワークに対するワークロード (TCP フロー数、TCP トンネル数、TCP フローのトラヒックパターン、バックグランドトラヒック)、エンド間の TCP およびトンネルの TCP のパラメータ (TCP のバージョン (Tahoe、Reno、New Reno、Vegas など)、SACK オプションの有無、ソケットバッファサイズ、RTO (Retransmission Time Out) の設定) などが考えられる。

本稿では、TCP トンネルに関する従来の研究 [1, 9, 12] では考慮されていない要因に着目した評価を行う。具体的には、ネットワークのパラメータであるリンクの伝搬遅延および TCP トンネルの入側ルータのバッファサイズや、TCP のパラメータである SACK オプションの有無、ソケットバッファサイズに着目して評価を行う。

本稿の構成は以下の通りである。まず、2 章で、TCP トンネルに関する関連研究を紹介する。3 章では、シミュレーションの設定を述べた後、シミュレーション結果を示し、TCP トンネルがエンド間の TCP フローに与える影響を定量的に明らかにする。最後に、4 章でまとめと今後の課題を述べる。

2 関連研究

文献 [1] は、TCP トラヒックと UPD トラヒックがボトルネックリンクを共有している場合に、TCP トラヒックと UPD トラヒックをそれぞれ別の TCP トンネルに収容することで、TCP と UDP 間の公平性を実現する方式を提案している。その中で、TCP トンネルを用いることにより、TCP フローのラウンドトリップ時間が約 4 倍に増加すること、TCP フローのグッドプットが約 60% 低下することを示している。また、TCP トンネルを用いることにより、TCP フローの経路上に MTU の小さいネットワークが存在した場合に発生するグッドプットの低下が、最大で 約 34% 軽減されることを示している。

しかし、文献 [1] では、リンクの帯域や伝搬遅延、TCP トンネルの入側ルータのバッファサイズなどの影響が明らかにされていない。また、TCP フロー数、TCP トンネル数、TCP フローのトラヒックパターン、TCP のバージョン、SACK オプションの有無、ソケットバッファサイズ、RTO の設定などの影響も明らかにされていない。

文献 [9] は、TCP フローの経路上に衛星回線が存在する場合に、TCP トンネルを衛星回線上で使用することにより、エンド間の TCP の性能がどのように変化するかを調べている。その中で、TCP トンネルを使用することにより、TCP フローのグッドプットが約 10% 低下することを示している。この TCP フローのグッドプットの低下は、TCP の再送制御が 2 重に働くことが原因であると指摘している。また、TCP トンネルが SACK オプションを有効にしている場合は、TCP フローのグッドプットが約 45% 向上することを示している。さらに、TCP トンネルのソケットバッファサイズが帯域遅延積と等しいとき、TCP フローのグッドプットが最大で 30% 向上することを示している。

しかし、文献 [9] では、リンクの帯域や伝搬遅延、TCP トンネルの入側ルータのバッファサイズなどの影響が明らかにされていない。また、TCP フロー数、TCP トンネル数、TCP フローのトラヒックパターン、TCP のバージョン、SACK オプションの有無、ソケットバッファサイズ、RTO の設定などの影響が明らかにされていない。

文献 [12] は、TCP フローのグッドプットの低下は、TCP が再送制御に用いるタイマ RTO の影響であると説明している。つまり、エンド間の TCP の RTO が、トンネルの TCP の RTO よりも小さい状況では、エンド間の TCP が、トンネルの TCP が処理できるよりも高速にパケットを再送してしまうことが原因であると説明している。しかし、定性的な現象の説明にとどまっており、どのような条件下において、このようなグッドプット

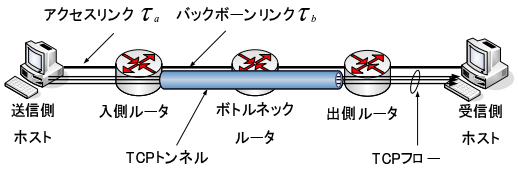

図 1　シミュレーションで使用したネットワークトポロジー

Fig. 1　Network topology used in simulation

表 1　シミュレーションにおけるパラメータ設定

Table 1　Parameter configuration in simulation

アクセスリンクの伝搬遅延	0, 0.01, 0.05, 0.1	[s]
バックボーンリンクの伝搬遅延	0, 0.01, 0.05, 0.1	[s]
その他のリンクの伝搬遅延	0	[s]
バックボーンリンクの帯域	10	[Mbit/s]
その他のリンクの帯域	1	[Gbit/s]
リンクの MTU	1500	[byte]
コアルータのバッファサイズ	50	[packet]
入側/出側ルータのバッファサイズ	10	[Mbyte]
TCP トンネル数	1	
エンド間の TCP フロー数	1	

の低下が発生するのかなどは明らかにされていない。

3　シミュレーション

3.1　シミュレーション設定

シミュレーションに用いたネットワークのトポロジーを図 1 に示す。図 1 における、アクセスリンクおよびバックボーンリンクの伝搬遅延を変化させてシミュレーションを行った。シミュレーションでは、図中の入側ルータと出側ルータ間で TCP トンネルを設定し、送信側ホストから受信側ホストへ TCP フローとして連続的にデータを送信した。なお、シミュレーションには、OPNET 社の OPNET modeler 9.1A [13] を修正して使用した。

シミュレーションで用いたパラメータ設定を表 1 に示す。以降のシミュレーションでは、特に断りのない限り、表 1 のパラメータを用いる。エンド間の TCP およびトンネルの TCP のパラメータは、ソケットバッファサイズを 6,400[Kbyte]、ウインドウスケールオプションを有効、TCP トンネルの入側ルータのバッファサイズを 10 [Mbyte] とした。その他のすべてのパラメータに関しては、OPNET 9.1A における TCP Reno モジュールの初期値を用いた。なお、OPNET 9.1A における TCP Reno モジュールの初期値では、SACK オプションは無効となっている。

エンド間の TCP の性能指標として、TCP フローのグッドプットおよびラウンドトリップ時間を測定した。グッドプットおよびラウンドトリップ時間は、TCP フローが定常状態となってから 180 [s] 間の平均値を測定した。

3.2　伝搬遅延の影響

以下では、エンド端末から TCP トンネルまでの伝搬遅延と、TCP トンネル自体の伝搬遅延の大小関係に着目し評価を行う。このため、アクセスリンクの伝搬遅延 τ_a およびバックボーンリンクの伝搬遅延 τ_b を変化させてシミュレーションを行った。

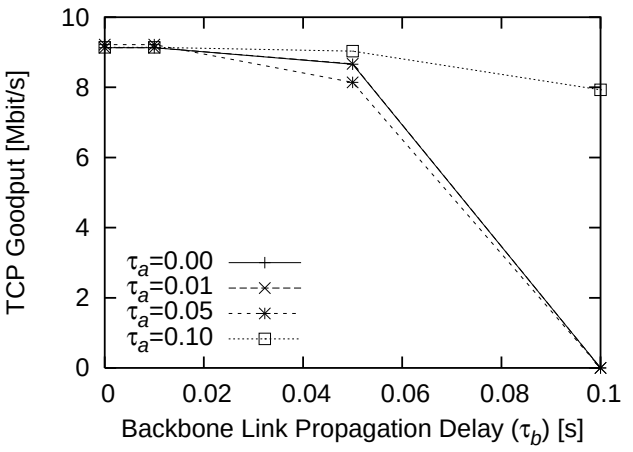

図 2　TCP トンネルを使用した時の TCP フローのグッドプット (アクセスリンクおよびバックボーンリンクの伝搬遅延を変化させた場合)

Fig. 2　TCP goodput with TCP tunnel (effect of propagation delays of access link and bottleneck link)

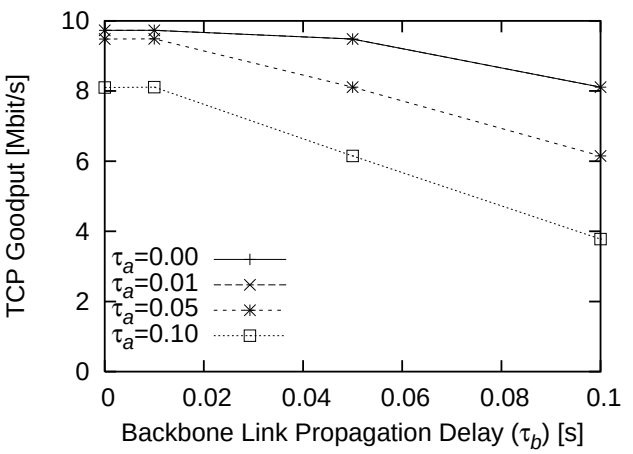

図 3　TCP トンネルを使用しない時の TCP フローのグッドプット (アクセスリンクおよびバックボーンリンクの伝搬遅延を変化させた場合)

Fig. 3　TCP goodput without TCP tunnel (effect of propagation delays of access link and bottleneck link)

TCP トンネルがどのような条件下で、エンド間の TCP の性能を向上 / 劣化させるのかを明らかにするため、TCP トンネルを使用しない場合のシミュレーションもあわせて行った。

まず、TCP フローのグッドプットに着目する。図 2 に、TCP トンネルを使用した場合のエンド間の TCP フローのグッドプットを示す。また、図 3 に TCP トンネルを使用しない場合の TCP フローのグッドプットを示す。これらの図より、アクセスリンクの伝搬遅延 τ_a が大きい場合、TCP トンネルを使用することにより、TCP フローのグッドプットが 1.1 倍から 2 倍程度に向上していることが分かる。ただし、バックボーンリンクの伝搬遅延が $\tau_b = 0.1$ [s] の時は、逆に TCP フローのグッドプットが極端に低下していることが分かる。

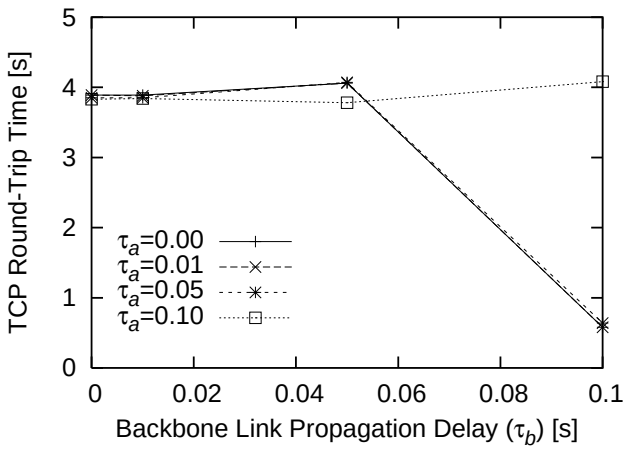

図 4　TCP トンネルを使用した時の TCP フローのラウンドトリップ時間 (アクセスリンクおよびバックボーンリンクの伝搬遅延を変化させた場合)

Fig. 4　TCP round-trip time with TCP tunnel (effect of propagation delays of access link and bottleneck link)

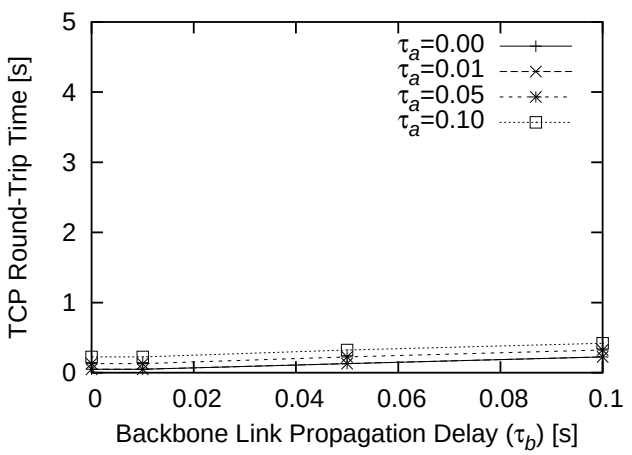

図 5　TCP トンネルを使用しない時の TCP フローのラウンドトリップ時間 (アクセスリンクおよびバックボーンリンクの伝搬遅延を変化させた場合)

Fig. 5　TCP round-trip time without TCP tunnel (effect of propagation delays of access link and bottleneck link)

TCP トンネルを使用することにより、エンド間の TCP フローのグッドプットが増加する理由は、以下のように説明できる。パケット棄却がボトルネックリンク上で発生した場合、エンド間の TCP ではなく、トンネルの TCP が棄却されたパケットの再送を行うことになる。このため、エンド間の TCP からは、ネットワーク中でパケットの棄却は発生していないように見える。従って、エンド間の TCP はウインドウサイズを増加させ、TCP トンネルの入側ルータへ高速にデータを転送することが可能となる。一方、TCP トンネルの伝搬遅延は、TCP フローの伝搬遅延よりも小さい。TCP の特性として、ラウンドトリップ時間の大きなコネクションよりも、ラウンドトリップ時間の小さなコネクションのほうが、グッドプットが大きくなることが知られている [7, 8]。このため、伝搬遅延の小さい TCP トンネルは、伝搬遅延の大きな TCP フローよりもグッドプットが大きくなる。その結果、TCP トンネルを使用した場合、TCP フローのグッドプットも向上すると考えられる。

図 2 および 図 3 より、バックボーンリンクの伝搬遅延が $\tau_b = 0.1$ [s] であり、なおかつアクセスリンクの伝搬遅延が $\tau_a = 0.05$ [s] 以下の時、TCP トンネルを使用することにより、TCP フローのグッドプットが極端に低下していることが分かる。紙面の都合上詳細なシミュレーション結果は省略するが、これは文献 [12] で指摘されている現象が発生しているためである。つまり、エンド間の TCP の再送タイマ RTO の値が、トンネルの TCP の再送タイマ RTO の値より小さくなり、エンド間の TCP が無駄な再送を繰り返しているためである。

次に、エンド間の TCP フローのラウンドトリップ時間に着目する。図 4 に、TCP トンネルを使用した場合の、TCP フローのラウンドトリップ時間を示す。一方、図 5 に、TCP トンネルを使用しない場合の、 TCP フローのラウンドトリップ時間を示す。これらの図より、TCP トンネルを使用することで、TCP フローのラウンドトリップ時間が 10 から 40 倍程度に増加していることが分かる。

これは、エンド間の TCP が送出したパケットは、TCP トンネルの入側ルータで一旦バッファリングされ、トンネルの TCP の転送速度に合わせて少しずつ転送されるからと考えられる。つまり、増加した TCP フローのラウンドトリップ時間の大半は、TCP トンネルの入側ルータのバッファにおける待ち時間である。通常 TCP は、ある程度の遅延を許容できる、データ系アプリケーションに用いられる。このため、TCP フローのラウンドトリップ時間が増加しても、実用上はほとんど問題ないと考えられる。また、TCP フローのグッドプットが極端に低下するという問題が発生しなければ、TCP トンネルを用いることにより、TCP フローのグッドプットが向上する。このため、TCP フローのパケット単位のラウンドトリップ時間は増加するが、アプリケーションレベルでのファイル単位の転送時間は短縮されると考えられる。

以上の考察により、TCP トンネルを使用することにより、アクセスリンクの伝搬遅延が、バックボーンリンクの伝搬遅延より大きい場合に、TCP フローのグッドプットが増加することが分かった。ただし、TCP トンネルを使用することで、TCP フローのラウンドトリップ時間が増加することも分かった。また、バックボーンリンクの伝搬遅延が、アクセスリンクの伝搬遅延より大きい場合に、エンド間の TCP フローのグッドプットが極端に低下することが分かった。

3.3　SACK オプションの影響

次に、TCP トンネルを使用した場合に、エンド間の TCP やトンネルの TCP の SACK オプションを有効にすることが、エンド間の TCP の性能にどのような影響を与えるかを明らかにする。

図 6 に、TCP トンネルの SACK オプションを有効にした場合の、エンド間の TCP フローのグッドプットを示す。図 6 および図 2 を比較すると、TCP フローのグッドプットが極端に低下するという問題が発生していないことが分かる。なお、紙面の都合上シミュレーション結果は省略するが、エンド間の TCP およ

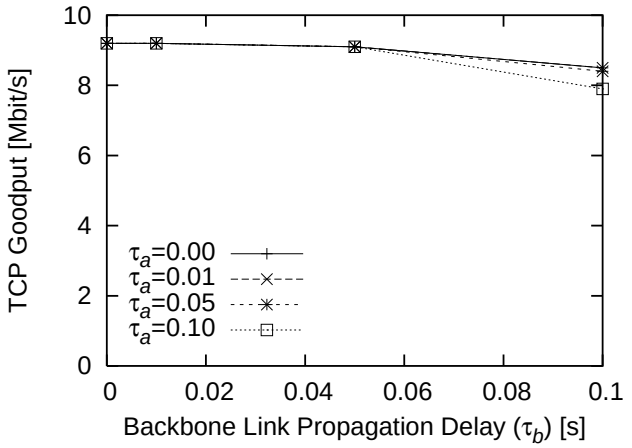

図 6　TCP トンネルの SACK オプションを有効にした時の TCP フローのグッドプット
Fig. 6　TCP goodput with SACK-enabled TCP tunnel

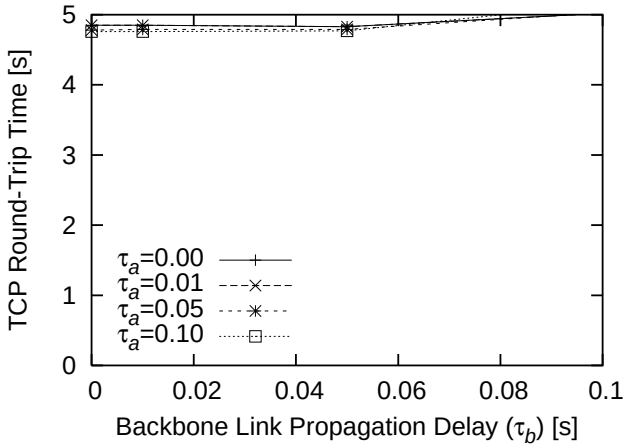

図 7　TCP トンネルの SACK オプションを有効にした時の TCP フローのラウンドトリップ時間
Fig. 7　TCP roundtrip time with SACK-enabled TCP tunnel

びトンネル TCP の両方の SACK オプションを有効にした場合も、TCP フローのグッドプットが極端に低下するという問題は発生しなかった。ただし、エンド間の TCP のみ SACK オプションを有効にした場合には、TCP フローのグッドプットが極端に低下するという問題が発生した。トンネルの TCP の SACK オプションを有効にすることにより、TCP フローのグッドプットが極端に低下しなくなる理由は、文献 [9] で指摘されている理由のためと考えられる。つまり、トンネルの TCP の SACK オプションが有効となっている場合、トンネルの TCP は、ACK パケットを受信した時に、パケットの再送を高速に行うことができるからと考えられる。

以上の考察により、トンネルの TCP の SACK オプションを有効にすることにより、TCP フローのグッドプットが極端に低下するという問題が回避できることが分かった。これは、バックボーンリンクの伝搬遅延が、アクセスリンクの伝搬遅延より大きい場合に有効である。

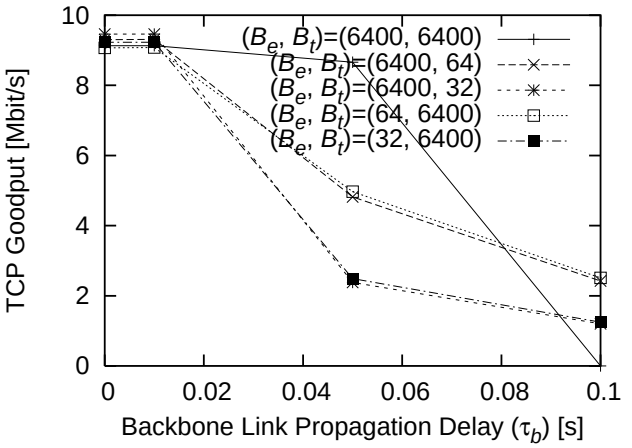

図 8　ソケットバッファサイズが TCP フローのグッドプットに与える影響 (バックボーンリンクの伝搬遅延を変化させた場合)
Fig. 8　Effect of TCP socket buffer size on TCP goodput (effect of propagation delays of backbone link)

3.4　ソケットバッファサイズの影響

文献 [9] では、トンネルの TCP のソケットバッファサイズを、ネットワークの帯域遅延積に応じて設定することにより、TCP フローのグッドプットが向上することを示している。しかし、エンド間の TCP のソケットバッファサイズが、その性能に与える影響は明らかにされていない。そこで、エンド間の TCP およびトンネルの TCP のソケットバッファサイズを変化させ、シミュレーションを行った。具体的には、エンド間の TCP もしくはトンネルの TCP のソケットバッサイズのどちらか一方を、32、64 [Kbyte] に設定しシミュレーションを行った。

図 8 は、エンド間の TCP のソケットバッファサイズ B_e およびトンネルの TCP のソケットバッファサイズ B_t を変化させた時の、バックボーンリンクの伝搬遅延とエンド間の TCP フローのグッドプットの関係を示している。この図より、エンド間の TCP またはトンネルの TCP のソケットバッファサイズが小さくなるにつれ、TCP フローのグッドプットが低下していることが分かる。特に、バックボーンリンクの伝搬遅延が大きい場合に、TCP フローのグッドプットが大きく低下している。この結果より、トンネルの TCP のソケットバッファサイズだけでなく、エンド間の TCP のソケットバッファサイズも、ネットワークの帯域遅延積に応じて設定する必要があることが分かる。

図 9 は、エンド間の TCP およびトンネルの TCP のソケットバッファサイズを変化させた時の、エンド間の TCP フローのラウンドトリップ時間を示している。この図より、TCP フローのラウンドトリップ時間は、トンネルの TCP のソケットバッファサイズの設定の影響をほとんど受けないが、エンド間の TCP のソケットバッファサイズの設定の影響を受けることが分かる。これは、次のように説明できる。エンド間の TCP のソケットバッファサイズを小さくすると、エンド間の TCP が送信するトラヒック量が減少し、その結果、TCP トンネルの入側ルータのバッファで待たされるパケット数が減少する。これにより、TCP フローのラウンドトリップ時間が減少すると考えら

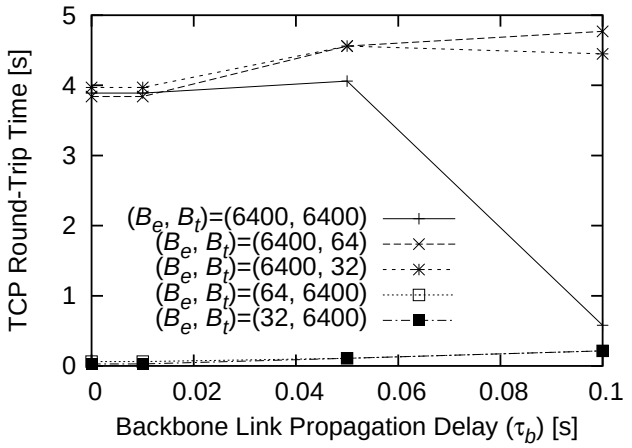

図 9　ソケットバッファサイズが TCP フローのラウンドトリップ時間に与える影響 (バックボーンリンクの伝搬遅延を変化させた場合)
Fig. 9　Effect of TCP socket buffer size on TCP roundtrip time (effect of propagation delays of backbone link)

れる。これは、エンド間の TCP のラウンドトリップ時間の大半は、TCP トンネルの入側ルータのバッファにおける待ち時間であるためである。

以上の考察より、エンド間の TCP およびトンネルの TCP のソケットバッファサイズは、ネットワークの帯域遅延積に応じて設定する必要があることが分かった。

3.5　TCP トンネルの入側ルータのバッファサイズの影響

これまでのシミュレーションでは、TCP トンネルの入側ルータのバッファサイズは、エンド間の TCP が送信するファイルサイズと比較して、十分大きな値 (10 [Mbyte]) としていた。具体的に、TCP トンネルの入側ルータのバッファサイズが、エンド間の TCP の性能に与える影響を明らかにするため、TCP トンネルの入側ルータのバッファサイズを変化させてシミュレーションを行った。具体的には、TCP トンネルの入側ルータのバッファサイズを、1、5、10 [Mbyte] に変化させてシミュレーションを行った。

紙面の都合上、シミュレーション結果は省略するが、TCP トンネルの入側ルータのバッファサイズが 1 または 5 [Mbyte] の時、TCP フローのグッドプットが極端に低下する問題が発生していた。このようなグッドプットの極端な低下は、アクセスリンクおよびボトルネックリンクの伝搬遅延にかかわらず、すべての場合において発生していた。これは、TCP トンネルの入側ルータのバッファにおいて大量のパケット棄却が発生し、エンド間の TCP がタイムアウトによってグッドプットが低下するためと考えられる。

以上の考察から、TCP トンネルを用いる場合は、TCP トンネルの入側ルータにおけるバッファサイズを大きくすることが不可欠であることが分かった。

4　まとめと今後の課題

本稿では、TCP トンネルがエンド間の TCP に与える性能を明らかにし、エンド間の TCP の性能を発揮させるための TCP のパラメータの設定条件を示した。

まず、TCP トンネルは、TCP トンネル自体の伝搬遅延より、エンド端末から TCP トンネルまでの伝搬遅延が大きいネットワークにおいて有効であることが分かった。逆に、TCP トンネル自体の伝搬遅延が、エンド端末から TCP トンネルまでの伝搬遅延より大きいネックワークでは、TCP フローのグッドプットが大幅に低下する問題が発生することが分かった。しかし、この問題はトンネルの TCP の SACK オプションを有効にすることで解決することが分かった。また、エンド間の TCP およびトンネルの TCP のソケットバッファサイズは、十分大きな値でなければグッドプットが極端に低下することも分かった。さらに、TCP トンネルの入側ルータのバッファサイズは、パケットがあふれないほど十分大きな値でなければならないことも分かった。

今後の課題として、今回評価を行わなかったシステムパラメータや TCP パラメータなどの要因が、エンド間の TCP の性能に与える影響を調査することがあげられる。具体的には、アクセスリンクおよびバックボーンリンクの帯域や、TCP フローの数、TCP トンネルの数、TCP フローのトラヒックパターン、TCP のバージョン、RTO の設定などの要因に関する調査が必要である。

文　献

[1] B. P. Lee, L. Jacob, W. K. G. Seah, and A. L. Ananda, “Avoiding congestion collapse on the Internet using TCP tunnels,” *Computer Networks*, vol. 39, pp. 207–219, Dec. 2002.

[2] H. T. Kung and S. Y. Wang, “TCP trunking: Design, implementation, and performance,” in *Proceedgings of IEEE ICNP’99 (International Conference on Network Protocols)*, Oct. 1999.

[3] “VTun - virtual tunnles over TCP/IP networks.” `http://vtun.sourceforge.net`.

[4] M. Jacobson, O. Nordstrom, and R. J. Clark, “HTun: Providing IP service over an HTTP proxy.” `http://htun.runslinux.net/docs/htun-paper.pdf`.

[5] “OpenSSH.” `http://www.openssh.com/`.

[6] 登 大遊, “SoftEther による Ethernet の仮想化とトンネリング通信,” 情報処理学会 第 *45* 回プログラミングシンポジウム, Jan. 2004.

[7] L. Qiu, Y. Zhang, and S. Keshav, “On individual and aggregate TCP performance,” in *Proceedings of Internetl Conference on Network Protocols*, pp. 203–212, Oct. 1999.

[8] S. Floyd, M. Handley, and J. Padhye, “A comparison of equation-based and AIMD congestion control,” 2000.

[9] L. Jacob, K. Srijith, H. Duo, and A. Ananda, “Effectiveness of TCP SACK, TCP HACK and TCP trunk over satellite links,” in *Proceedings of IEEE International Conference on Communications*, vol. 5, pp. 3038–3043, Apr. 2002.

[10] E. Altman and K. Avrachenkov, “A stochastic model of TCP/IP with stationary random losses,” in *Proceedings of ACM SIGCOMM 2000*, pp. 231–242, Sept. 2000.

[11] M. Mathis, J. Semke, and J. Mahdavi, “The macroscopic behavior of the TCP congestion avoidance algorithm,” *ACM SIGCOMM Communication Review*, vol. 27, July 1997.

[12] O. Titz, “Why TCP over TCP is a bad idea.” `http://sites.inka.de/sites/bigred/devel/tcp-tcp.html`.

[13] Opnet Technologies, Inc., “OPNET.” `http://www.opnet.com/`.