

広帯域・遅延環境における TCP 伝送の性能と評価

北辻 佳憲[†] 窪田 歩[†] 山崎 克之[†] 小西 和憲[†] 江崎 浩^{††}

[†](株)KDDI 研究所 〒356-8502 埼玉県上福岡市大原 2-1-15

^{††}東京大学 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

E-mail: †{kitaji,kubota,yamazaki,konish}@kddilabs.jp, ††hiroshi@wide.ad.jp

あらまし 様々な研究分野でインターネットを広域かつ広帯域に利用する要求が高まってきてたが、遅延のある環境でのエンドホスト間の広帯域通信を安定して提供することは難しいのが現状である。ネットワーク運用の立場から、アプリケーションの要求を理解し、十分な性能を発揮させるためには、回線品質の維持、トラフィック特性の把握、計測ツールの拡充と計測環境の整備などについて対処すべきである。本稿では、実ネットワークを用いた遅延環境での TCP 伝送を行ない、APAN 東京 XP から大阪大学、九州大学、StarLIGHT の間のそれぞれの区間で、280Mbit/s、224Mbit/s、193Mbit/s を観測し、その評価を行なった。また、ネットワーク運用の立場から、高速なトラフィックを生成するアプリケーションを支援するために必要となる対処、性能計測を容易にするツール、遅延環境で広帯域通信を実現するための TCP のオプションを紹介する。

キーワード TCP, 伝送性能, JGNv6, APAN, StarLIGHT

The performance and evaluation of TCP transmission under the broadband and long distance environment

Yoshinori KITATSUJI[†], Ayumu KUBOTA[†], Katsuyuki YAMAZAKI[†], Kazunori KONISHI[†], and Hiroshi ESAKI^{††}

[†] KDDI R&D Laboratories, Inc. Ohara 2-1-15, Kamihukuoka-shi, Saitama, 356-8502 Japan

^{††} The University of Tokyo Hongo 7-3-1, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656 Japan

E-mail: †{kitaji,kubota,yamazaki,konish}@kddilabs.jp, ††hiroshi@wide.ad.jp

Abstract Although high performance and wide use of the Internet in the many research area is getting popular recently, It is not easy to provide high performance communication over networks. From point of view of the network operation, to understand the application traffic characteristic and to enable application to perform without any restriction as it is, it's important to keep the quality of links, to recognize its traffic characteristic, to expand of performance tools and to arrange the measurement points. In this paper, we evaluate TCP performance in the long delay environment which actually recorded: 280Mbit/s between APAN Tokyo XP and Osaka University, 224Mbit/s between APAN Tokyo XP and Kyushu University and 193Mbit/s between APAN Tokyo XP and StarLIGHT and evaluation of the reason why some sections are not good performance. We also introduce the the TCP options enabling high performance transmission and performance tool.

Key words TCP, transmission performance, JGNv6 APAN, StarLIGHT

1. ま え が き

天文、高エネルギー物理、地球観測、バイオテクノロジーなどの研究分野では、インターネットを利用したデータ解析の分散化や分散型データベースの構築が行なわれ、インターネットの広域かつ広帯域な利用がこれらの研究をより一層進展させる

鍵となっている。さらに、遠隔教育や Grid など、インターネットを広域・広帯域に利用する研究が重要性を増してきている。

一方、最近の学術系ネットワークは、ギガビットイーサネットに関するネットワーク機器や通信回線の低価格化、ダークファイバーの利用の拡大、WDM 装置の普及など、広帯域化が進んできたと言える。また、マルチポイント型実験ネットワー

クが多く設立され、それらが相互に接続するようになったため、広域な環境での研究プロジェクト、実験、デモンストレーションが可能になってきている。

しかし、広域に離れた遅延の大きい環境で、高速なファイル転送や大容量なストリームの伝送は容易には実現できず、以下にあげる項目を対処していかなければならない。

- 回線品質の維持
- ルーター・スイッチのインタフェースのバッファの拡大
- トラフィック特性の把握
- 性能計測ツールの拡充
- 性能計測環境の構築
- ネットワーク間の運用情報の交換

回線品質を維持するためには、光ファイバーの接続面の清掃や、ネットワーク機器のインタフェースが要求する仕様通りのUTPを使用するなど、運用上、当然行われるべきことを行っていく。接続の段階でこれらを怠ると、運用に入ってから性能不全が認識されても、回線品質の不良を見つけ出すまでには時間が掛かってしまう。

トラフィック特性の把握などは、アプリケーションの利用者とネットワークの運用者の間で十分な情報の共有が基本となるが、双方の技術知識の違いから、情報共有に時間が掛かることが多い。一般に、TCPによる広帯域通信では、TCPの伝送特性を理解し、オプションを有効にする必要がある。また、UDPによるストリームの伝送では、瞬間伝送速度のばらつきを許容できるよう、ルーターおよびスイッチでバッファの調整が必要不可欠となる。

性能計測ツールの拡充は、現状では、1つのツールを使って経路上の性能不全の箇所を特定することが難しいため、複数のツールを使って問題箇所を割当てていく必要がある。また、計測地点については、エンドホスト近辺に計測装置または計測コンピュータを設置しても性能不全の原因を特定することは難しく、トラフィックが通過するネットワークの経路毎、区間毎の性能計測が必要である。

以下、2.節では広帯域・遅延環境におけるTCP伝送を行なうために必要となるTCPオプションを、3.節では広帯域伝送を対象とする場合の性能計測ツールを紹介し、4.節では実ネットワークを用いた遅延環境でのTCP性能の検証を行ない、5.節で考察する。

特に、TCP性能の検証では、Gridなど広帯域・遅延環境においてTCPの高性能化が求められてきたこと、IPv6時代を向かって、JGNv6[1]をはじめ実ネットワークによる相互接続技術および運用管理技術の研究が活発に行なわれ、プロダクションレベルの運用が求められてきたことなどから、国内の性能計測についてはIPv6を用いて行なった。

2. 高遅延・広帯域伝送のためのTCPのオプション

TCPが利用されるようになってから20年以上が既に経過した。現在TCPが利用される環境は、仕様策定当時では想像できないほど、帯域および距離の双方で飛躍した環境となってい

る。そのため、以下にあげる機能がオプションとしてTCPに取り込まれ、多くのコンピュータおよび装置で実装されている。

● ウィンドウスケール

送信ホストと受信ホストの間に十分な帯域が得られる場合、TCPの伝送速度は次式で求めることができる。

$$\text{ウィンドウサイズ/往復遅延時間} \quad (1)$$

TCPの仕様が発定された頃は、ウィンドウサイズは32KBが最大であったため、送信ホストと受信ホストの間の往復遅延時間が増大すれば、伝送性能は低下していた。

RFC1323[2]ではウィンドウサイズを2のn乗倍拡大(=nビットシフト)するウィンドウスケールオプションが定められ、TCPコネクション確立時に送信ホストと受信ホストがお互い通知するウィンドウサイズを何ビットずらすかを合意する仕様が発定されている。ビットシフトの最大値は14ビットで、例えば、往復遅延時間に1秒かかるような環境であっても、理論上、最大8 Gbit/s (= $2^{(16+14)} \text{Byte/sec}$)の伝送が可能となっている。

● SACKオプション

TCPの基本仕様では、伝送データにロスが発生すると再送処理を行って、ロスが起こったところから、既に伝送済みのデータであっても再度送信することになる。ウィンドウスケールオプションによってウィンドウサイズを拡大できるようになると、ロスの後の再送データ量も多くなり、ロスによる影響がより大きくなる。

RFC2018[3]では、SACK(Selective Acknowledgement)オプションが定められ、受信ホストがロスを検出した時に、ロスを起こしたシーケンス番号以降で、再送の必要のない(歯抜け状態で受信した)部分を送信ホストに伝え、再送データの量を減らす機能を提供する。SACKのネゴシエーションはコネクション確立時に行なわれる。

● タイムスタンプオプション

TCPの基本仕様では16ビットのシーケンス番号が一周するまでに、先に伝送したデータの確認応答を得られるよう、ウィンドウサイズの最大値が32Kバイト(15ビット分)までとなっている。しかし、ウィンドウスケールオプションが利用されるようになると、容易に16ビットのシーケンス番号を越えて先送りを行なうことになり、受信ホスト側でデータのシーケンス番号が何週目シーケンス番号に当たるかを確認する情報が必要となる。

そこで、RFC1323では、ウィンドウスケールオプションに加え、送信ホストでデータを転送するときのタイムスタンプをオプションとして付加し、受信ホストでシーケンス番号とタイムスタンプから何週目のシーケンス番号かを確認できる、タイムスタンプオプションが定められている。

表1にLinuxおよびFreeBSDのTCPオプションの実装状況を示す。TCPオプションはカーネルが持つTCPプロトコルスタックに実装される機能で、LinuxおよびFreeBSDとも、sysctlコマンドを用いて、オプションを有効/無効にできる。オプションを有効にすれば、以降確立されるTCPコネクション

でオプションが用いられる。ウィンドウスケールオプションはソケットからウィンドウサイズを指定しなければ、ウィンドウサイズが 64KB 未満に設定されるため、コネクションを確立するたびに、ウィンドウサイズを拡張する処理が必要である。

表 1 Linux および FreeBSD の TCP オプションの実装状況
Table 1 Status of TCP options of Linux and FreeBSD kernels

OS	Window scale option	SACK option SACK option	Timestamp option
Linux kernel 2.4.18	○	○	○
FreeBSD 4.5	○	×	○

3. 広帯域通信の環境構築に利用されるツール

広帯域通信を実現するために、ネットワークの性能を調査する代表的なツールを以下に紹介する。多くのネットワーク環境で、アプリケーションが要求する伝送性能をいきなり実現できることは少なく、ネットワークの構成変更や事前試験の段階で、ツールを使って要求性能を達成できるか、確認することになる。その場合に以下のツールが広く利用されている。

- iperf

サーバ・クライアント型の TCP および UDP 伝送性能計測ツールで、エンドエンドの伝送性能を計測する場合に用いられる。毎秒の平均伝送速度を表示できるなど出力が利用者に理解し易いのが特徴である。TCP の試験であればウィンドウサイズ、MSS、コネクション確立数を設定でき、UDP の試験であれば送信レートを設定でき、パケットロス、遅延、ジッタを計測できる。送受信の状況が容易に掴めるため、高遅延・広帯域通信の試験に広く利用されている。UNIX の主な OS および Microsoft Windows で動作し、最近のバージョンでは IPv6 に対応している。[4]

- netperf

サーバ・クライアント型の TCP 伝送性能計測ツールで、エンドエンドの性能を計測する場合に用いられる。UDP や ICMP を用いて、TCP 通信の送受信処理を模擬できる。ウィンドウサイズを変更できるため、高遅延・広帯域通信の試験に利用されるが、トラフィック生成に重点がおかれた設計なため、詳細な計測結果が得られない。UNIX の主な OS で動作し、IPv6 の拡張も行なわれている。[5]

- pchar

様々なサイズのペケットを連続して送出し、計測対象までの各ルータ区間の利用可能帯域および伝送遅延を計測するツールである。ルータ区間の利用可能帯域は、UDP または ICMP Echo による送信ペケットサイズとその応答時間の解析で求められるため、計測ホストが直接接続されていない区間であっても計測ができる。しかし、計測対象の回線が高速になるほど時間精度が求められ、汎用のコンピュータの時刻制度では 1 Gbit/s 以上の回線の利用可能帯域の計測が難しい。UNIX の主な OS で動作し、IPv6 の拡張も行なわれている。[6]

- traceroute

ネットワークの運用では ping とともに広く用いられるツールで、計測対象までのホップ毎の往復遅延時間、パケットロスの計測および経路の特定に用いられる。通常、UDP による計測が行なわれるが、ICMP による計測も可能である。UNIX の主な OS および Microsoft Windows (コマンド名は「tracrt」) で動作する。IPv6 対応版は traceroute6 である。

以上のツールは、アクティブツールに分類され、アプリケーションを利用する前の段階で、必要な性能が得られるかを試験する場合に用いられる。これらのツールでエンドエンドの性能を計測し、期待通りの性能が得られない場合に、ルータのホップ毎に性能を計測しなければ、問題箇所の特定は難しい。さらに、エンドホストが異なるネットワーク組織にある場合、ネットワーク組織間の関係が必要不可欠となる。

上記ツールの内、TCP 伝送を可能とする iperf および netperf は TCP オプションを利用することができ、前節に述べたとおり、kernel レベルで有効になる SACK オプションおよびタイムスタンプオプションについては特に設定の必要はない。しかし、ウィンドウスケールオプションについては、コネクション確立時にウィンドウサイズを拡大する必要があるため、コマンドのオプションでウィンドウサイズを与える。

4. TCP 伝送性能

実環境での TCP の高遅延・広帯域通信がどれくらい可能かを調べるため、伝送実験を行なった。計測を行なった区間は、図 1 に示す APAN 東京 XP [7] と、JGNv6 ルータ拠点の大阪大学 (吹田) および九州大学 (箱崎)、StarLIGHT (シカゴ) [9] のそれぞれを結ぶ 3 つの区間と、シカゴでループにした ATM PVC で構成する区間である。各拠点には、ギガビットイーサネットに接続された Linux USAGI kernel 2.4 が動作する PC を設置し、PC 間の伝送性能を計測した。Linux を採用した理由は、FreeBSD で SACK オプションがサポートされていないためである。測定は、1 つの TCP コネクションの 1 分間の平均伝送速度を 10 回求め、最大と最小を除いた 8 回の平均を区間の伝送速度とした。TCP コネクションは、区間の遅延を考慮して性能が十分に大きいウィンドウサイズを与え、SACK およびタイムスタンプオプションを有効にした。計測トラフィックの生成には Iperf を用いた。

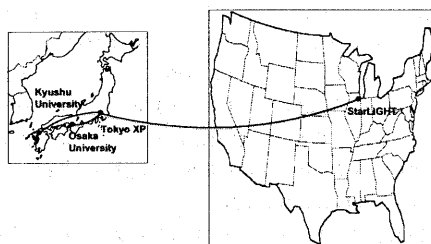


図 1 バックボーンネットワークの接続構成

Fig.1 Configuration of R&D Backbone Network Network

計測 PC のハードウェアの仕様は、シカゴに設置する PC を

除き、Pentium III 1GHz、メモリ 1GB、64ビット 66MHz PCI 対応ギガビットイーサネット NIC を装備しており、2 台を直接接続した場合の TCP の伝送性能は 800Mbit/s 以上であった。シカゴに設置する PC は Pentium III 860MHz、メモリ 512MB、64ビット 66MHz PCI 対応ギガビットイーサネット NIC を装備している。計測は実ネットワークで行なったため、実験トラフィックと並行して実トラフィックが流れていた。

以下にそれぞれの区間の計測環境を示す。

[試験 1] APAN 東京 XP と大阪大学の間のネットワーク構成を図 2 に示す。APAN 東京 XP と JGNv6 はギガビットイーサネットで接続され、JGNv6 内では、3 台のルータが ATM OC12 回線で接続される構成となっている。JGNv6 内でトラフィックを中継するルータは、同一の ATM OC12 ポートにそれぞれの PVC を確立する構成となっている。PC 間の往復遅延時間は平均 15ms で、IPv6 による TCP 伝送の結果は方向によって若干の差が出て、280Mbit/s および 244Mbit/s であった。

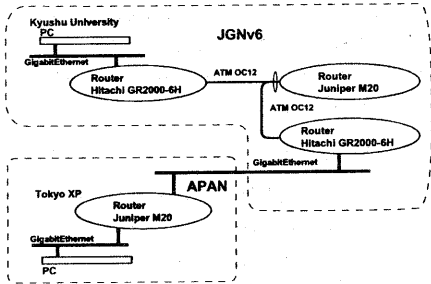


図 2 APAN 東京 XP と大阪大学の区間の構成

Fig. 2 Configuration between APAN Tokyo XP and Osaka University

[試験 2] APAN 東京 XP と九州大学の間のネットワーク構成を図 3 に示す。構成は大阪大学の試験と類似しており、JGNv6 内の経路が一部異って、中継ルータが Juniper Networks 社製 M20 から CISCO 社製 GSR に入れ替わる。途中の CISCO GSR では、大阪大学の試験と同様に、接続するルータへの PVC を同一の ATM のポートに収容している。PC 間の往復遅延時間は 22ms で、IPv6 による TCP 伝送の結果は 224Mbit/s および 213Mbit/s であった。

[試験 3] APAN 東京 XP 内の 2 台のルータを ATM PVC で接続し、その PVC を米国シカゴで折り返す設定を行なった。ネットワーク構成を図 4 に示す。計測トラフィックは一方の PC から送り、シカゴを経由する PVC を通過して、他方の PC へ転送する。確認応答は、PVC を通さず、ルータ間を直接接続するギガビットイーサネットを経由して戻す方法を採用し、往復遅延時間を日米間の通信に模擬した。

本計測は、バーストラフィックによるパケットロスが頻繁に発生して、最大転送速度に達するまでに 10 分～20 分かかった。そのため、10 回の平均速度は最大伝送速度に達する直前の 1 分間の平均速度とした。計測は片方向について行ない、遅延時間が 187ms で、IPv4 による TCP 伝送の結果は 245Mbit/s

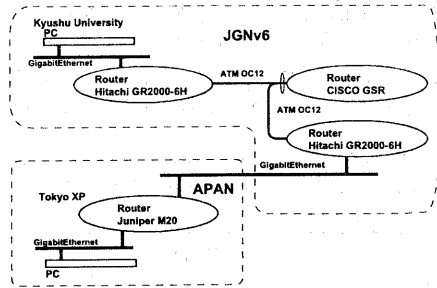


図 3 APAN 東京 XP と九州大学の区間の構成

Fig. 3 Configuration between APAN Tokyo XP and Kyushu University

であった。

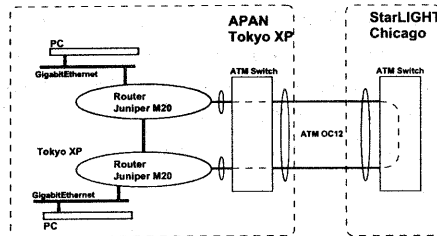


図 4 APAN 東京 XP での ATM PVC のループの構成

Fig. 4 Configuration between APAN Tokyo XP and TransPAC in Seattle

[試験 4] APAN 東京 XP と StarLIGHT(シカゴ)の間のネットワーク構成を図 5 に示す。本試験では東京 XP から Abilene [10] を経由して StarLIGHT(シカゴ)へ接続する経路を採用した。APAN 東京 XP と Abilene の間は ATM OC12 回線で接続され、Abilene 内部を通り抜け、StarLIGHT までギガビットイーサネットで接続される。PC とルータの接続はギガビットイーサネットである。PC 間の往復遅延時間は平均 189ms で、IPv4 による TCP 伝送の結果は 181Mbit/s および 193Mbit/s であった。

本試験も試験 3 と同様、最大転送速度に達するまでに、10 分～20 分かかったため、10 回の平均速度は最大伝送速度に達する直前の 1 分間の平均速度とした。

以上の試験 1～4 の性能を表 2 に示す。

表 2 TCP 伝送試験の性能結果

Table 2 The result of the TCP performance test

exam	To Tokyo XP	From Tokyo XP
1	280Mbit/s	244Mbit/s
2	224Mbit/s	213Mbit/s
3	245Mbit/s	-
4	181Mbit/s	193Mbit/s

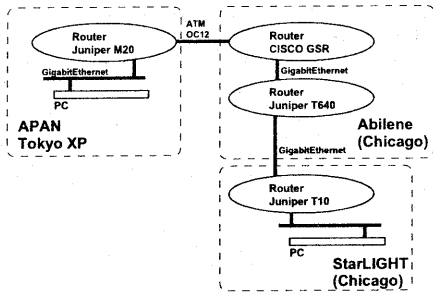


図5 APAN東京XPとTransPACの区間の構成

Fig.5 Configuration between APAN Tokyo XP and StarLIGHT in Chicago

5. 考 察

試験1~4の全ての計測において、ウィンドウスケールオプション、SACKオプション、タイムスタンプオプションを有効にして試験を行なった。SACKが機能したかを確認するために、10回の測定とは別に伝送トラフィックをキャプチャした。全ての試験でパケットロスが発生したため、SACKが有効に機能して消失した送信データが再送されることが確認できた。

図6に試験1での伝送中にパケットロスが起こり、SACKによって消失したシーケンス番号のデータが再送される様子を示す。横軸がトラフィックの転送を開始してからの経過時間で、縦軸がシーケンス番号である。グラフの点(O印)は送信データのシーケンス番号(セグメントの最後尾のデータの番号)で、線は確認応答のAcknowledgement(以下ackと略す)の値である。グラフは送信ホストで送受信されるパケットを基に作成したため、送信データの特定のシーケンス番号の時刻と同じ値のackが得られる時刻の差が往復遅延時間を示す。

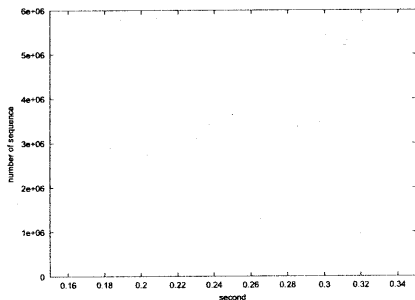


図6 SACKが機能した場合のシーケンス番号の変化

Fig.6 variation sequence numberliner when SACK working

図では、0.25秒の時点で、送信データのシーケンス番号が戻り、次の送信では再び元の値に戻っていることがわかる。この時、0.25秒の少し前でのackでSACKの情報が付加され、消失したデータ部分が示されたため、0.25秒に消失した部分のデータが再送信されている。図の例では、消失したデータは1パケットであったため、SACKが有効に機能したと言える。

JGNv6を経由する試験1および試験2では、540Mbit/s(OC12)が伝送速度のボトルネックと推測されるにも関わらず、実測値はその半分の性能しか得られなかった。大阪大学からAPAN東京XPの間で各ルータにギガビットイーサネットを装備した計測用PCを設置し、ホップ毎の性能計測を行なったところ、Juniper社製M20と日立製作所社製GR2000-6H(図中下)の区間で、伝送速度が300~330Mbit/sを越えるとパケットロスが発生し、性能が半減する様子が観測された。九州大学とAPAN東京XPの間でも、CISCO社製GSRと日立製作所社製GR2000-6Hの区間で同様の現象が見られ、これらの区間のパケットロスが試験1および試験2の性能不善の原因と推測される。

試験3および試験4で利用したATM回線は同じ回線であるが、PVCが確立されるATM回線には約10本のPVCが確立され、その半数以上が他のルータによって確立されていたために、試験トラフィックが発生するバーストラフィックが輻輳を起こしてパケットロスを頻繁に起こしていた。そのため、試験トラフィックが通過するPVCに273Mbit/sのシェーブを適用して(設定の最大値)、パケットロスの頻度を押えた。試験3はシェーブの適用を考慮すればほぼ理想の性能が得られたと言えるが、試験4は十分な性能とはいえない。試験4では、回線の空き具合から他のトラフィックとの輻輳は考えられず、東京XPの機器およびATM回線が同じことを考慮すると、シカゴの機器または同回線の品質に問題がある可能性が高い。しかし、筆者らにシカゴ内で他に操作できるPCがないため十分な原因追求ができなかった。

試験3および試験4では、高遅延な環境でLinuxの輻輳回避制御が働いたために、伝送速度の最大値に達するまでに長い時間を要した。輻輳回避制御は、スロースタート処理と違い、1ウィンドウサイズ分のデータを転送するとウィンドウサイズを拡大する。そのため、輻輳回避制御では伝送速度が時間に対して線形増加する特徴を持つ。Linuxの場合、TCPコネクションで一度パケットロスが発生してウィンドウサイズを半減させると、パケットロスがおきたウィンドウサイズをキャッシュする。以後、スロースタートによって、ウィンドウサイズがキャッシュされたサイズまで達すると、輻輳回避制御に入る。ウィンドウサイズのキャッシュは、同一宛先であれば、異なるコネクションであっても有効である。図7は、試験4での最大伝送速度に達するまでの1秒おきの伝送速度を示しており(10回の計測の一つ)、輻輳制御によって伝送速度が線形増加していることがわかる。

実ネットワークでは、ルーティングの問題等で数秒間の不到達が発生することは十分考えられ、ルータによっては、宛先アドレスのソフトウェア検索からハードウェア検索に切替える場合に転送遅延が増大するルータもある。送信データのパケットロスは、SACKによってロスの影響を小さくできるが、確認応答のパケットロスは確実にタイムアウトを引き起こす。そのため、特に広帯域通信を行なう場合にできるだけ輻輳機構に入らないアルゴリズムを検討する必要がある。

試験1から4の計測は、これまで、ネットワークの立ち上げ、

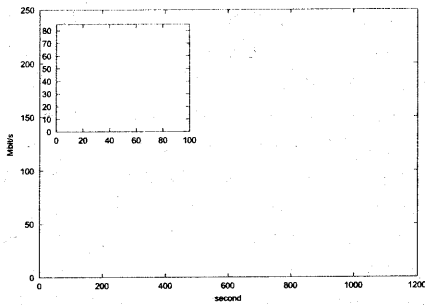


図7 輻輳制御による伝送速度の線形増加の例

Fig. 7 liner increase of bandwidth with congestion avoidance

実験での利用、デモンストレーションの事前準備などで、学術系ネットワークを実際に利用していくために行なってきた調整の一つである。今後、複数の実ネットワークを経由する広帯域通信が更に活用されることを考えると、アプリケーションの要求を満たすためにネットワーク運用の立場から、次のことを容易に確かめられる環境を整備することが望ましい。

- ルータの区間毎の伝送可能帯域および時間特性
- traceroute/ping などによる制限のない、共通した経路および遅延の確認手段
- 経路毎の性能の特性を容易に把握する方法

6. むすびに

本稿では、まず、複数の実ネットワークを介した高遅延環境での広帯域通信を用いた実験およびデモンストレーションについて解説し、アプリケーションの要求を満たすために、ネットワークの性能試験および接続調整を行なう上で、有効な性能計測ツールを紹介した。さらに、JGNv6、APAN 東京 XP、StarLIGHT、の広帯域通信を提供する環境が比較的整った実験ネットワークにおいて、TCP 伝送性能を評価し、TCP のウィンドウスケール、SACK、タイムスタンプオプションを利用することで、APAN 東京 XP と大阪大学、九州大学、StarLIGHT の間のそれぞれの区間で 280Mbit/s、224Mbit/s、193Mbit/s の性能を示した。また、最後に、アプリケーションの要求を実現するために、ネットワーク運用の立場から、自ネットワークの性能の把握や、計測環境の整備の重要性を示した。

謝辞 APAN 東京 XP の構築および運用に関わる機会を与えて頂いた、科学振興事業団、通信総合研究所、農林水産省情報ネットワーク (MAFFIN)、KDDI 研究所の関係各位、JGNv6 ネットワークの構築および運用に関わる機会を与えて頂いた、総務省、通信・放送機構の関係各位、本稿の TCP 性能計測で用いた PC の設置に御協力下さった大阪大学 下條真司教授、東京大学 中山雅哉助教授、九州大学 岡村耕二助教授、NTT スマートコネクスト株式会社 岡本裕子様に心から感謝する。

文 献

- [1] 小林和真, 勝野悟, 江崎浩, 他, “JGN IPv6 ネットワーク” 電子情報通信学会誌 B Vol. J85-B No.8 pp1156-1163, 2002
- [2] RFC1323, “TCP Extensions for High Performance”, Network working group IETF, 1992

- [3] RFC2018, “TCP Selective Acknowledgement Options”, Network working group IETF, 1996
- [4] National Laboratory for Applied Network Research (NLANR), <http://dast.nlanr.net/Projects/Iperf/>
- [5] Rick Jones, <http://www.netperf.org/netperf/NetperfPage.html>
- [6] Bruce A. Mah, <http://www.employees.org/~bmah/Software/pchar/>
- [7] <http://www.apan.net/>
- [8] <http://www.transpac.org/>
- [9] <http://www.startup.net/starlight/>
- [10] <http://abilene.internet2.edu/>