

## インラインネットワーク計測手法および その応用手法の実ネットワーク上での性能評価

森 一成<sup>†</sup> 浜 崇之<sup>††</sup> 長谷川 剛<sup>†††</sup> 村田 正幸<sup>†††</sup> 下西 英之<sup>††</sup> 村瀬 勉<sup>††</sup>

<sup>†</sup> 大阪大学大学基礎工学部 〒560-0043 豊中市待兼山町 1-3

<sup>††</sup> NEC システムプラットフォーム研究所 〒211-8666 神奈川県川崎市中原区下沼部 1753

<sup>†††</sup> 大阪大学大学院情報科学研究科 〒565-0871 吹田市山田丘 1-5

E-mail: kazumori@ics.es.osaka-u.ac.jp, t-hama@cb.jp.nec.com, hasegawa@cmc.osaka-u.ac.jp,  
murata@ist.osaka-u.ac.jp, h-shimonishi@cd.jp.nec.com, t-murase@ap.jp.nec.com

あらまし 我々の研究グループでは、これまでに利用可能帯域を高い精度で継続的に計測するインラインネットワーク計測手法である ImTCP、およびその計測結果を利用するバックグラウンド転送方式である ImTCP-bg の提案を行い、コンピュータ上のシミュレーション、および実験室ネットワークにおける実装実験によってその有効性を示した。しかし、実際のインターネット環境では、様々なネットワーク機器の特性やネットワークを流れるトラフィックのバースト性からラウンドトリップ時間が大きく変動することがあり、パケットの送信・受信間隔を用いて計測を行う提案手法が良好に動作しない可能性がある。そこで本稿では、実網を用いた実験結果を通して、ImTCP が公衆インターネット環境においてもエンド端末間パスの利用可能帯域を継続的に計測できること、および ImTCP-bg が他のトラフィックに影響を与えずにデータ転送を行うことができることを示す。

キーワード インライン計測, 輻輳制御, 利用可能帯域, TCP

## Implementation Experiments of Inline Measurement TCP and its Application Technique

Kazunari MORI<sup>†</sup>, Takayuki HAMA<sup>††</sup>, Go HASEGAWA<sup>†††</sup>, Masayuki MURATA<sup>†††</sup>, Hideyuki SHIMONISHI<sup>††</sup>, and Tutomu MURASE<sup>††</sup>

<sup>†</sup> School of Engineering Science, Osaka University Machikaneyama, 1-3, Toyonaka-shi, Osaka, 560-0043, Japan

<sup>††</sup> System Platforms Research Laboratories, NEC Corporation 1753, Shimonumabe, Nakahara-ku, Kawasaki, Kakogawa, 211-8666, Japan

<sup>†††</sup> Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University Yamadaoka, 1-5, Suita-shi, Osaka, 565-0871, Japan

E-mail: kazumori@ics.es.osaka-u.ac.jp, t-hama@cb.jp.nec.com, hasegawa@cmc.osaka-u.ac.jp,  
murata@ist.osaka-u.ac.jp, h-shimonishi@cd.jp.nec.com, t-murase@ap.jp.nec.com

**Abstract** In our previous studies, we proposed ImTCP, a novel inline network measurement technique which can obtain available bandwidth information continuously, and ImTCP-bg, a new background TCP data transfer mechanism by using measurement results. We investigated the effectiveness of ImTCP and ImTCP-bg through evaluation with simulation and experimental network. However, it is expected that ImTCP doesn't obtain preferable measurement results in an actual public network according to various factors. In this paper, we evaluate the performance of ImTCP and ImTCP-bg in the actual public network. We investigate the performance of the proposed mechanisms through the various experiments, and validate their effectiveness in terms of the measurement accuracy and the interference degree with the other traffic.

**Key words** inline network measurement, congestion control, available bandwidth, TCP

## 1. はじめに

近年のネットワーク速度の飛躍的な向上やインターネット利用者数の爆発的な増加にともないインターネットが急速に発展していくにつれて、提供されるサービスも多種多様なものとなってきている。例えば、コンテンツ配信を目的とした Contents Delivery Network (CDN)、ピア同士の直接的な通信を実現する P2P ネットワーク、ネットワーク上で分散計算環境を提供するグリッドネットワーク、IP ネットワーク上に仮想網を構築する IP-VPN などのサービスオーバーレイネットワークが挙げられる。これらのネットワークサービスの品質を向上させるためには、ネットワークの基盤となる IP ネットワークの資源状況を把握し、有効に利用することが重要となる。特に、ネットワークパス・リンクの帯域に関する情報を得ることによって、様々なネットワークサービスの品質を向上させることができると考えられる。

そこで我々の研究グループでは、エンドホスト間の利用可能帯域を計測するための新たなインラインネットワーク計測手法 ImTCP [1] を提案している。利用可能帯域を計測するための手法はこれまでも多く提案されている (たとえば [2-4]) が、それらの手法の多くは、計測を行う際に多くの計測用パケットを必要とするためにネットワークへ大きな影響を与える、計測に長い時間がかかるなどの問題が存在する。一方 ImTCP は TCP コネクションがデータ転送に用いるデータパケットとそれに対する ACK パケットのみを用いてネットワークの利用可能帯域を計測するため、計測用パケットを必要とすることなく高い精度のアクティブ計測を可能としている。また、非常に短い周期 (ラウンドトリップ時間 (RTT) の 1-4 倍) で継続的に計測結果を取得することが出来るため、ネットワーク状況の変化に素早く追従することができる。

また我々は、この計測結果に基づいた応用手法として、バックグラウンド転送方式 ImTCP-bg [5] を提案している。バックグラウンド転送とは、他のトラフィックに影響を与えずにネットワークの空き帯域のみを利用して行うデータ転送のことである。バックグラウンド転送が実現されることによって、優先度の異なるデータ転送が可能となり、サービスの品質が向上する場合がある。例えば、前述した CDN ではユーザからのコンテンツ閲覧要求を受けて行われるデータ転送以外にもバックアップ、キャッシング、プリフェッチなどによってデータ転送が発生する。このとき、バックアップ等のデータ転送をバックグラウンド転送によって行うことで、バックアップ等のデータ転送中にもユーザからのコンテンツ要求に迅速に対応することが可能となる。

ImTCP-bg は、ImTCP によって計測された利用可能帯域を基に送信ホスト側の TCP が持つ輻輳ウィンドウサイズの上限值を動的に設定することで、輻輳を発生させることなく空き帯域を効率的に利用したバックグラウンド転送を行うことが出来る。一方、従来提案されているバックグラウンド転送手法 [6, 7] は、輻輳制御のために RTT の最小値や最大値を用いている。これらの手法においては、RTT の最大値は、ボトルネックリンクのバッファが一杯であるときの RTT 値であることを前提としている。すなわち、制御のた

めに必要となる最大 RTT を取得するにはネットワーク輻輳を発生させる必要があり、バックグラウンド転送の趣旨に合致しているとはいえない。また、[6, 7] においては輻輳発生時のウィンドウサイズの減少幅がネットワーク状況に関係なく固定であるため、ネットワークの空き帯域を有効に利用できない [5]。

[1, 5, 8] においては、ImTCP および ImTCP-bg の効果をシミュレーション、および実験室ネットワークにおける実装評価により評価した。[1, 5] においては、提案手法の有効性を ns-2 [9] を用いたシミュレーションによって評価し、ImTCP が提案した計測手法が少ないパケット数で高い精度の計測結果を継続的に導出することができること、および ImTCP-bg が優先されるべきトラフィックにほとんど影響を与えずにネットワークの空き帯域のみを用いてデータ転送を行うことができることを確認している。[8] においては、ImTCP および ImTCP-bg を FreeBSD [10] のカーネルシステムに実装し、実験室ネットワークにおける実装実験によって ImTCP の計測精度や ImTCP-bg のスループットおよび他のトラフィックに与える影響度に関して、シミュレーションによる評価結果と同等の有効性があることを示した。

しかし、インターネットではネットワーク機器の負荷増大やネットワーク輻輳レベルの変動などのさまざまな要因による瞬間的な RTT の変動があるため、このようなネットワークノイズに対して、パケットの送信・到着間隔を用いて計測を行う提案手法が、期待通りの挙動をしない可能性がある。したがって、提案手法の有効性を示すためには、シミュレーション、実験室ネットワークのみの評価では不十分であり、インターネット上での評価が不可欠であるといえる。そこで本稿においては、公衆インターネット回線を用いた実験を行うことで、ImTCP が高い精度で利用可能帯域を計測できること、また、ImTCP-bg が他のトラフィックに影響を与えず、かつネットワークの利用可能帯域を有効に利用できることを確認する。

以下、2 章ではインラインネットワーク計測手法 ImTCP およびバックグラウンド転送方式 ImTCP-bg のアルゴリズムの概略の説明を行う。3 章では実験で用いるネットワークを説明する。4 章では、実インターネットを用いてこれらの提案方式の評価を行った結果を示す。最後に 5 章で本稿のまとめと今後の課題を示す。

## 2. インラインネットワーク計測手法とその応用手法

本章では、我々の研究グループが提案している、インラインネットワーク計測手法 ImTCP およびその応用手法 ImTCP-bg のアルゴリズムについて、その概要の説明を行う。

### 2.1 インラインネットワーク計測手法 ImTCP [1]

ImTCP は、送受信エンドホスト間のネットワークパスにおける現在の利用可能帯域を計測する。TCP によるデータ転送においては、送信側端末が受信側端末にパケットを送信し、受信側端末が ACK パケットを返送する。この性質を利用することにより、送信側端末で設定したデータパケットの送信間隔に対して、その ACK パケットの到着間隔の変化

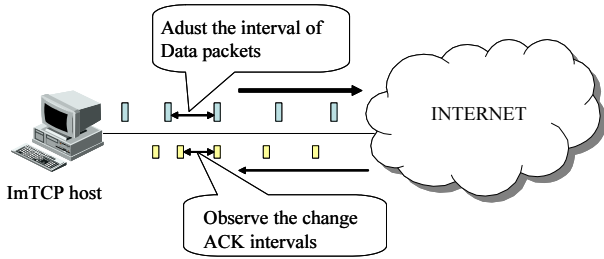


図 1 ImTCP の動作概要

を観察することによって利用可能帯域の計測を行う (図 1)。ImTCP は、TCP コネクションがデータ転送に用いるデータパケットおよび ACK パケットのみを用いてネットワークの利用可能帯域を計測するため、計測用パケットを必要とすることなく計測を可能としている。また、非常に短い周期 (1-4 RTT) で継続的に計測結果を取得することができるため、ネットワークの状況の変化に素早く追従することができる。

利用可能帯域を計測する際には、現在の利用可能帯域が含まれていると考えられる帯域の上限と下限を過去の計測結果を用いて設定し、この区間の中から利用可能帯域を探索する。この区間のことを探索区間と呼ぶ。探索区間を設定することで、不必要に高いレートでパケットを送出することが避けられるため、ネットワークに与える影響を最小限に抑えることができる。また、探索する帯域の範囲が狭くなるため、計測の精度を保ちながら用いるパケット数を減少させることができる。探索区間は過去の計測結果を基に設定するため、ネットワーク状況の変化に伴い利用可能帯域が急激に変化した場合、探索区間に利用可能帯域が存在しない場合が存在する。ImTCP では、そのような場合においても、数回の計測で新たな利用可能帯域を発見することが出来る。ImTCP の動作概略を以下に示す。それぞれのステップにおける詳細なアルゴリズムについては、[11] を参照されたい。

(1) Cprobe アルゴリズム [12] に基づいて、初期探索区間を決定する

(2) 探索区間を複数の小区間に分類する

(3) 各小区間に対応する計測ストリームを計測アルゴリズムに基づいて決定されたタイミングで送信し、送信間隔とそれらの ACK パケットの受信間隔の比較を行い、パケット間隔が増加したかを確認する

(4) パケットの送受信結果から、利用可能帯域が含まれていると考えられる小区間を選択する

(5) 選択した小区間に対応する計測ストリームの送受信結果から、利用可能帯域を導出する

(6) 過去の計測結果から 95%信頼区間を導出する。その区間を次回の探索区間として設定し、(2) へ戻る

## 2.2 バックグラウンド転送手法 ImTCP-bg [5]

ImTCP-bg は、インラインネットワーク計測によって利用可能帯域を計測する ImTCP を基に、計測結果を輻輳ウィンドウサイズの制御に用いることによってバックグラウンド転送を行う TCP を実現する。

まず、インライン計測によって取得された利用可能帯域に対して平滑化を行う。 $A_{cur}$  をインライン計測によって取得

された最新の利用可能帯域、 $\bar{A}$  を平滑化が行われた利用可能帯域とすると、 $\bar{A}$  は平滑化パラメータ  $\gamma$  ( $0 < \gamma < 1$ ) を使用して次式を用いて求める。

$$\bar{A} \leftarrow (1 - \gamma) \times \bar{A} + \gamma \times A_{cur} \quad (1)$$

次に、送信側 TCP の輻輳ウィンドウサイズの上限值  $maxcwnd$  を次式によって決定する。

$$maxcwnd \leftarrow \bar{A} \times RTT_{min} \quad (2)$$

ここで、 $RTT_{min}$  は、今までに観測された RTT の最小値を表す。

ImTCP-bg のアルゴリズムの性能は、ImTCP の利用可能帯域の計測精度に大きく依存する。しかし ImTCP はそのアルゴリズムの性質上、利用可能帯域の計測が不正確になる場合がある。たとえば、他のトラフィックが高いバースト性を持つデータ転送を行った場合、そのトラフィックが計測結果に大きく影響を与え、計測結果が不正確になる。そこで、ImTCP-bg は以下のような方式を用いることによって計測結果が不正確である場合の対策を行う。

計測誤差によって輻輳ウィンドウサイズが適切な値よりも大きい状態でデータ転送を続けると、ボトルネックとなっているルータの出力リンクバッファにパケットが蓄積され始め、輻輳が発生する。その結果、TCP コネクションの RTT が増大する。そこで ImTCP-bg は、RTT の増大が観測された場合には、輻輳ウィンドウサイズを強制的に減少させることによって輻輳回避を行う。ボトルネックとなっているルータの出力リンクバッファにパケットが蓄積されているかどうかの判断は、現在の RTT の値およびこれまでに計測された RTT の最小値の比を用いて行う。 $\overline{RTT}$  を TCP が保持している平滑化された RTT の値、これまでに観測された RTT の最小値を  $RTT_{min}$  とし、次式が真となる場合に出力リンクバッファにパケットが蓄積されていると判断する。

$$\frac{\overline{RTT}}{RTT_{min}} > \delta \quad (3)$$

ここで、 $\delta$  はしきい値を表し 1.0 以上の値である。(3) 式が真となり出力リンクバッファにパケットが蓄積されていると判断されると、現在の輻輳ウィンドウサイズ  $cwnd$  を次式を用いて減少させる。

$$cwnd \leftarrow cwnd \times \frac{RTT_{min}}{\overline{RTT}} \quad (4)$$

## 3. 実験環境

本実験では、NEC(東京側)と大阪大学(大阪側)の間に図 2 に示すような通信回線を準備し、通信実験を行う。この環境を用いたのは、日本国内では通信量が多いと考えられる東京-大阪間のネットワーク環境を用いることが望ましく、また本環境におけるエンド端末間のホップ数は 16 ホップであり、特異なルータのみでネットワークパスが構成されている可能性が軽減できると考えたためである。

実験ネットワークはインターネットを介した 100 Mbps のイーサネットによって構築され、イーサネットスイッチを介してクロストラフィックを発生させるエンドホスト (Traffic

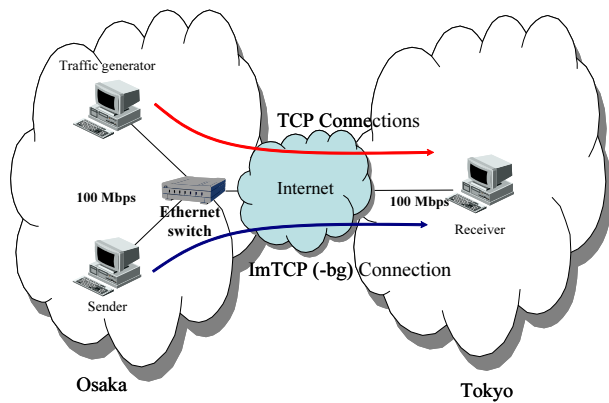


図 2 実験環境

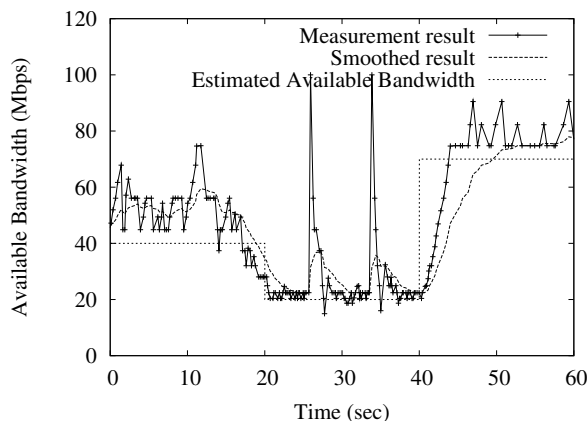


図 3 ImTCP 計測結果 (クロストラフィックが UDP の場合)

generator)、ImTCP および ImTCP-bg が実装されたエンドホスト (Sender)、それぞれのエンドホストからパケットを受信するエンドホスト (Receiver) が接続されている。それぞれ、Traffic generator, Sender は大阪側、Receiver は東京側に設置されている。

また、以降の実験では、大阪側のエンドホスト (Sender) を送信側ホスト、東京側のエンドホスト (Receiver) を受信側ホストとして用いた実験結果を示す。

## 4. 実験結果と考察

### 4.1 ImTCP の計測精度の評価

本節では、クロストラフィックとして UDP トラフィックおよび TCP トラフィックを用いて ImTCP の計測精度の評価を行う。

#### 4.1.1 クロストラフィックが UDP トラフィックの場合

まず、クロストラフィックとして UDP トラフィックを用いた場合の ImTCP の計測精度の評価を行う。

図 3 は、発生させる UDP トラフィックの量を時間の経過と共に変動させたときの、ImTCP の計測結果、平滑化した計測結果、および推定される利用可能帯域の値を示している。インターネット回線においては、正確なネットワーク帯域の値を得ることが出来ないが、本実験においては、最大で 70 Mbps 程度の値を示すことが多かった。そこで本節の実験では、UDP トラフィックを 0 sec から 20 sec までは

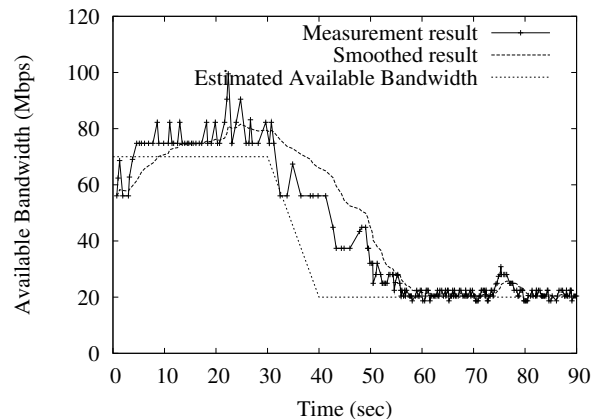


図 4 ImTCP 計測結果 (クロストラフィックが TCP の場合)

30 Mbps、20 sec から 40 sec までは 50 Mbps、40 sec から 60 sec までは 0 Mbps と変化させた。したがって、利用可能帯域の推定値は 0 sec から 20 sec までは約 40 Mbps、20 sec から 40 sec までは約 20 Mbps、40 sec から 60 sec までは約 70 Mbps となる。

図 3 より、UDP トラフィックのレートに応じて変動するネットワークの利用可能帯域の推定値に追従し、高い精度の計測結果が得られていることが分かる。また、図 3 の 25 sec、35 sec 付近で急激に計測値が大きくなっているが、これは実網において非常に生存時間の短い TCP コネクションがパースト的に混入したためと考えられる。これは、生存時間の短い TCP コネクションのためにボトルネックリンクのバッファにおいてキューイングが発生すると、ImTCP のパケット群もキューイングされ、ImTCP が送信側で設定したパケット間隔が縮小することにより、計測結果が実際の空き帯域に比べて大きくなるためである。このような生存時間の短い TCP コネクションは Web ドキュメント転送などに代表されるように、インターネットでは多く存在するが、図 3 に示すように、計測結果を平滑化することによって、このような瞬間的な変動を除去することができる。また、ここで得られた結果は、[8] における実験室ネットワークにおける性能評価とほぼ同じ精度を示している。

#### 4.1.2 クロストラフィックが TCP トラフィックの場合

次に、クロストラフィックとして TCP トラフィックが存在している場合について、4.1.1 節と同様に ImTCP の計測精度の評価を行う。

TCP コネクションは通常、受信バッファサイズを十分大きく設定している場合、ネットワークの空き帯域を使い切る性質を持つ。そこで、背景トラフィックを構成する TCP コネクションの受信側バッファサイズを 12.5 Kbytes に設定することで、1 本あたりのスループットが約 5 Mbps に制限されるようにする。本節の実験では TCP コネクションの本数を変化させることによって利用可能帯域の推定値を変化させた。図 4 に示す実験は以下のシナリオにしたがっている。0 sec から 30 sec までは 0 本、30 sec から 40 sec で 1 秒おきに合計 10 本の TCP コネクションを確立、40 sec から 90 sec までは 10 本とする。したがって、利用可能帯域の推定値は 0 sec から 30 sec までは約 70 Mbps、30 sec から 40 sec で

約 70 Mbps から約 20 Mbps まで減少、40 sec から 90 sec まででは約 20 Mbps となる。

図 4 は、このシナリオに従った場合の経過時間に対する ImTCP の計測結果、平滑化された計測結果の変化、および利用可能帯域の推定値を示したものである。図 4 より、TCP トラヒックの変動により変化した利用可能帯域の推定値を高い精度で計測できていることがわかる。また、ImTCP の計測結果が 4.1.1 節と同程度の精度を示していることがわかる。このことから、クロストラヒックが TCP トラヒックの場合においても ImTCP はシミュレーション環境、および実験室ネットワーク環境と同様の高い精度で計測を行うことができることが分かる。以上より、[1] で示された計測アルゴリズムが実インターネット環境においても有効であることが示された。

#### 4.2 ImTCP-bg の性能評価

本節においては、クロストラヒックとして TCP トラヒックを発生させたネットワーク環境下で ImTCP-bg を用いたバックグラウンド転送を行い、その性能の評価を行う。

##### 4.2.1 実験方法

TCP コネクションを用いたクロストラヒックは、4.1.2 節における実験と同様に、受信側ウィンドウサイズを 17.5 Kbytes に制限することによって、TCP コネクション 1 本あたりのスループットを約 7 Mbps に設定し、本数を変動させることによってトラヒックを変動させる。最大 10 本の TCP コネクションを用いてクロストラヒックのスループットを約 70 Mbps とすることで、推定されるネットワーク帯域のほとんどを使用することができる。本節においては、以下のシナリオにしたがって実験を行った。0 sec から 60 sec まではクロストラヒックはなし、60 sec から 120 sec までは TCP コネクションを 5 本用いて 35 Mbps、120 sec から 180 sec までは TCP コネクションを 10 本用いて 70 Mbps、180 sec から 300 sec までは TCP コネクションを 5 本用いて 35 Mbps とした。ImTCP-bg トラヒックは 0 sec から 240 sec までパケットを送信する。

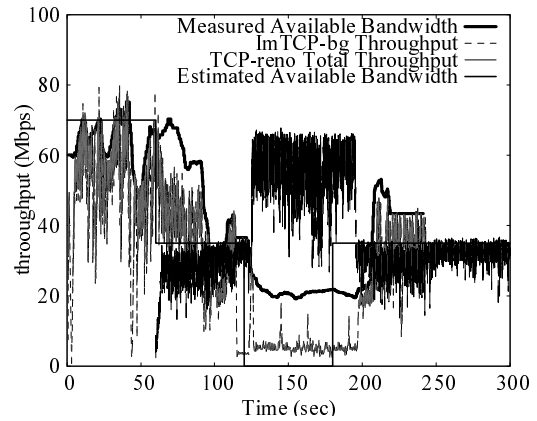
また、ImTCP-bg の比較として既存のバックグラウンド転送手法である TCP-LP [7] を用いる。TCP-LP の実装コードは Web サイト上 (<http://www-ece.rice.edu/networks/TCP-LP/>) で公開されている。以上の実験により、ImTCP-bg がバックグラウンド転送に求められる以下の二つの性質を満たしているかどうかを確認することでその評価を行う。

- (1) 他のトラヒックに影響を与えない
- (2) ネットワークで利用可能な帯域を有効に利用する

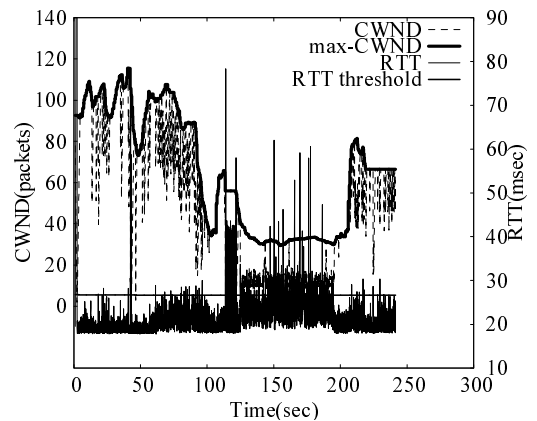
##### 4.2.2 実験結果

図 5 に、ImTCP-bg の実験結果を示す。図 5(a) はクロストラヒック (TCP Reno) および ImTCP-bg コネクションのスループット、利用可能帯域の計測結果、および利用可能帯域の推定値を示している。図 5(b) は ImTCP-bg のウィンドウサイズ、最大ウィンドウサイズ、RTT、および輻輳制御に用いる RTT の閾値の変化を示している。

図 5(a) の 60 sec から 120 sec において、ImTCP-bg コネクションが利用可能帯域の推定値の計測結果に応じたスループットを獲得できていることが確認できる。また、図 5(a) の 120 sec から 180 sec において、クロストラヒックのレー



(a) スループットおよび利用可能帯域の推定値の計測結果

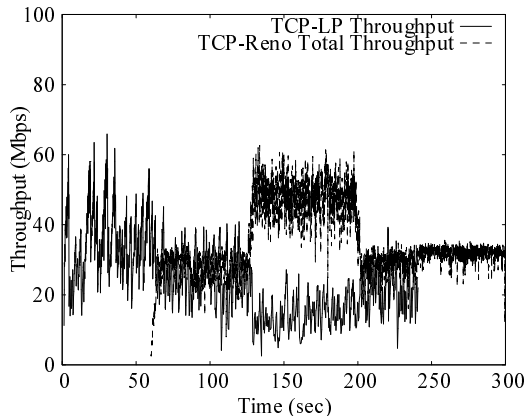


(b) ウィンドウサイズおよび RTT

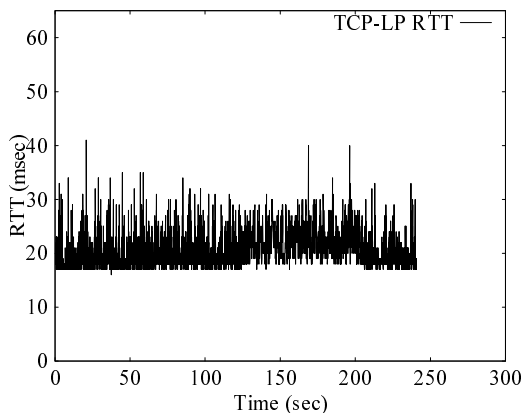
図 5 ImTCP-bg 計測結果

トが約 70 Mbps とネットワーク帯域とほぼ等しいにもかかわらず、ImTCP の計測結果が約 20 Mbps と大きくなっている。しかし、ImTCP-bg のスループットは計測結果に比べて低い。これは、図 5(b) に示すように RTT が大きくなっているために、ImTCP-bg が RTT を用いた輻輳制御を行い、スループットを下げることでクロストラヒックに対する影響を少なくしているためである。

図 6 に、TCP-LP の実験結果を示す。図 6(a) はクロストラヒックおよび TCP-LP コネクションのスループットを示す。図 6(b) は TCP-LP の RTT の変化を示している。図 6(a) の 120 sec から 180 sec において、クロストラヒックがネットワーク帯域の推定値をほぼ使い切っていると考えられる状況においても TCP-LP のスループットは約 10 Mbps であり、クロストラヒックのスループットが低下していることがわかる。しかしながら、実験ネットワークにおける TCP-LP の評価結果 [5] では、利用可能帯域の推定値がほとんど存在しない場合には、TCP-LP はウィンドウサイズを十分小さくし、スループットを低く抑えることが確認されている。これは、実ネットワークで発生している RTT の変動が悪影響を与えているためであると考えられる。そのため、



(a) スループット



(b) RTT

図 6 TCP-LP 計測結果

TCP-LP を実ネットワークで使用する際には、RTT の閾値を大きくするなどのパラメータ調整を行い、RTT の揺れを吸収する必要があると考えられる。

## 5. おわりに

本稿では、我々の研究グループがこれまでに提案したインラインネットワーク計測手法 ImTCP およびその計測結果に基づいたバックグラウンド転送方式である ImTCP-bg の有効性を、公衆インターネット環境におけるデータ転送実験を通じて検証した。その結果、ImTCP の計測精度や ImTCP-bg の他のトラフィックに与える影響の大きさに関して、シミュレーション、および実験室ネットワークにおける評価結果と同等の有効性があることを示した。なお、ImTCP および ImTCP-bg の実装コードは Web サイト上 (<http://www.anarg.jp/imtcp/>) で公開している。

今後の課題としては、高速・高遅延ネットワーク環境における提案手法の評価、およびインラインネットワーク計測手法の計測結果に基づいた応用手法の提案、実装、および評価が挙げられる。

## 謝 辞

本研究の一部は、総務省における研究プロジェクトである戦略的情報通信研究開発推進制度委託研究「ネットワークサービスの早期展開を実現するオーバレイネットワーク基盤の研究開発」によっている。ここに記して謝意を示す。また本稿を執筆するにあたり、大阪大学の Man Le Thanh Cao および津川知朗の両氏に的確な助言を頂いた。ここに記して謝意を示す。

## 文 献

- [1] C. L. T. Man, G. Hasegawa, and M. Murata, "Available bandwidth measurement via TCP connection," in *Proceedings of IFIP/IEEE MMNS 2004 E2EMON Workshop*, Oct. 2004.
- [2] M. Jain and C. Dovrolis, "End-to-end available bandwidth: Measurement methodology, dynamics, and relation with TCP throughput," in *Proceedings of ACM SIGCOMM 2002*, Aug. 2002.
- [3] V. Ribeiro, R. Riedi, R. Baraniuk, J. Navratil, and L. Cottrell, "pathChirp: Efficient available bandwidth estimation for network paths," in *Proceedings of NLNRPAM 2003*, Apr. 2003.
- [4] N. Hu and P. Steenkiste, "Evaluation and characterization of available bandwidth probing techniques," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 21, Aug. 2003.
- [5] T. Tsugawa, G. Hasegawa, and M. Murata, "Background TCP data transfer with inline network measurement," in *Proceedings of Asia-Pacific Conference on Communications 2005*, Oct. 2005.
- [6] A. Venkataramani, R. Kokku, and M. Dahlin, "TCP Nice: A mechanism for background transfers," in *Proceedings of the 5th Symposium on Operating Systems Design and Implementation*, Dec. 2002.
- [7] A. Kuzmanovic and E. W. Knightly, "TCP-LP: A distributed algorithm for low priority data transfer," in *Proceedings of IEEE INFOCOM 2003*, Apr. 2003.
- [8] 津川知朗, 長谷川剛, 村田正幸, "インラインネットワーク計測手法 ImTCP およびその応用手法の実装および性能評価," *電子情報通信学会技術研究報告*, vol. 105, pp. 61-66, Dec. 2005.
- [9] The VINT Project, "UCB/LBNL/VINT network simulator - ns (version 2)." available at <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- [10] FreeBSD Home Page. available at <http://www.freebsd.org/>.
- [11] C. L. T. Man, G. Hasegawa, and M. Murata, "A new available bandwidth measurement technique for service overlay networks," in *Proceedings of 6th IFIP/IEEE International Conference on Management of Multimedia Networks and Services Conference, MMNS 2003*, Sept. 2003.
- [12] R. L. Carter and M. E. Crovella, "Measuring bottleneck link speed in packet-switched networks," *International Journal on Performance Evaluation*, vol. 27-28, pp. 297-318, Oct. 1996.