

# オーバーレイネットワークにおける計測結果統合手法の精度評価

長谷川 剛<sup>†</sup> 村田 正幸<sup>††</sup>

<sup>†</sup> 大阪大学 サイバーメディアセンター 〒560-0043 大阪府豊中市待兼山町 1-32

<sup>††</sup> 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

E-mail: <sup>†</sup>hasegawa@cmc.osaka-u.ac.jp, <sup>††</sup>murata@ist.osaka-u.ac.jp

**あらまし** オーバーレイネットワークにおけるネットワーク性能の計測においては、複数のオーバーレイ経路における計測競合が原因となって発生する、計測精度の低下やネットワーク負荷の増大が問題となる。我々の研究グループにおいて、計測競合を削減するための方式として、2つのオーバーレイノード間の経路上に他のオーバーレイノードが存在する場合に、その経路の計測を行わず、部分経路の計測結果を統合することによって全体経路の計測結果を推定する、計測結果統合手法を提案している。本稿では、計測結果統合手法の精度評価を、PlanetLab 環境における計測結果を用いて行った結果を示す。評価結果より、遅延時間、パケット廃棄率および TCP スループット理論値について、推定手法により高い精度で全体経路の計測結果を推定することができることが明らかとなった。また、中間オーバーレイノードの負荷が原因となり、計測そのものや推定精度が悪化する場合があることもわかった。

**キーワード** オーバーレイネットワーク、ネットワーク計測、計測結果統合、精度評価

## Accuracy evaluation of spatial composition of measurement results in overlay networks

Go HASEGAWA<sup>†</sup> and Masayuki MURATA<sup>††</sup>

<sup>†</sup> Cybermedia Center, Osaka University 1-32, Machikaneyama-cho, Toyonaka, Osaka, 560-0043 Japan

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

E-mail: <sup>†</sup>hasegawa@cmc.osaka-u.ac.jp, <sup>††</sup>murata@ist.osaka-u.ac.jp

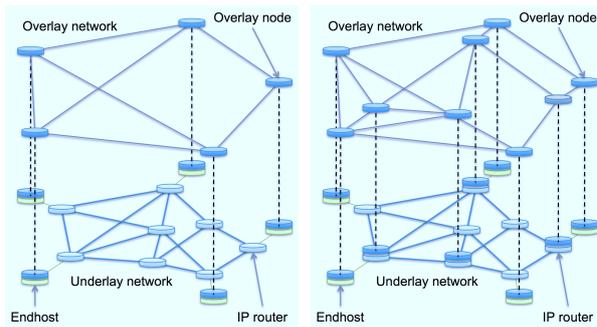
**Abstract** In network performance measurement in overlay networks, measurement conflict occurs when multiple overlay paths share the underlay network route when they are measured at the same time, which increase the network load and the measurement accuracy degrades. We have proposed the spatial composition method of measurement results, where we estimate the network performance of the longer overlay path from the measurement results of partial paths, when the longer path includes other overlay nodes. In this report, we evaluate the accuracy of the composition method in terms of delay, packet loss ratio, and TCP throughput, by utilizing the measurement results in PlanetLab environment. From the evaluation results, we confirm that the estimation error is enough small for all metrics, but sometimes the error becomes large especially when the load of the internal overlay node is high.

**Key words** Overlay networks, network measurement, spatial composition of measurement results, accuracy evaluation

### 1. はじめに

インターネットを利用したアプリケーションの提供形態、あるいは、IP ネットワークを変更することなくネットワークに新たな機能を導入する手法として、オーバーレイネットワーク技術が近年着目されている。本稿におけるオーバーレイネットワークは、下位層ネットワーク (アンダーレイネットワーク) として

IP ネットワークを用い、その上位にアプリケーション層プログラムなどによって実現されるオーバーレイノードによって独自の論理ネットワークを構築し、サービス提供を行うものとする。例えば P2P 技術を用いた Skype [1] などのサービスや、グリッド、IP-VPN サービスなどが挙げられる。これらのアプリケーションは、ある特定のサービスを前提として論理ネットワークを構築し、それぞれのアプリケーションのポリシーにしたがっ



(a) エンドホストによって構成されるオーバーレイネットワーク

(b) ネットワーク内ノードによって構成されるオーバーレイネットワーク

図1 オーバーレイネットワークの構成

てトラヒックの制御を行う。

従来のオーバーレイネットワークにおいては、図1(a)に示すように、サーバやユーザクライアントなどのエンドホスト上のプログラムがオーバーレイノードになることが多い。この場合、オーバーレイネットワーク上の通信は全てエンドホスト間通信となる。そのため、エンドホスト間通信が通過するネットワーク内でのトラヒック制御やルーティングを行うことができず、近年研究が進んでいるオーバーレイルーティング技術[2-4]などの効果が限定的になることが考えられる。それに対し、図1(b)に示すように、ネットワーク内のルータ上に直接オーバーレイノードを設置してオーバーレイネットワークを構築することで、ユーザに対してより効率的なオーバーレイネットワークを提供することが考えられる。本研究ではこのようなオーバーレイネットワークを主に対象とする。

オーバーレイネットワークはアンダーレイネットワーク上に論理的に構築されるネットワークであるため、オーバーレイノード間の経路がどのようなネットワークであり、どのような性能を持つのかは未知であることが一般的である。そのため、オーバーレイネットワークの性能を向上し、ユーザの体感性能を改善するためには、オーバーレイネットワークが利用するアンダーレイネットワークの品質(物理的キャパシティ、利用可能帯域、遅延時間、パケット廃棄率など)に関する情報を正確に、かつリアルタイムに得た上で、オーバーレイネットワークの構築やオーバーレイルーティングにおける経路選択を行うことが重要である。ここで、オーバーレイネットワークが $N$ 台のオーバーレイノードから構成されるとすると、トポロジ構築や経路選択の候補となるのは $N(N-1)$ 対のオーバーレイノード間の経路(オーバーレイ経路と呼ぶ)となるため、それら全ての性能を計測する必要がある。そのため、 $N$ が大きくなると計測対象となるオーバーレイ経路が急激に増加する。また、ネットワーク内のオーバーレイノード数が増加すると、複数のオーバーレイ経路がアンダーレイネットワークのルータやリンクから構成されるIPパスを共有することが頻繁に発生する。その際、それらのオーバーレイ経路の計測を同時に行うと、計測の衝突が発生し、ネットワーク負荷の増

大や計測精度の低下を引き起こす。そのため、例えば Resilient Overlay Networks (RON) [2] においては、参加するオーバーレイネットワークノードがフルメッシュに計測および情報交換を行い、オーバーレイネットワークにおいて経路制御を行うことが提案されているが、参加可能なオーバーレイノード数が50程度に制限されることが指摘されている。一方、計測するオーバーレイ経路数を減らすことによって計測負荷を低減する手法も提案されている[5]。しかし、そのような手法はトポロジ構築や経路選択の際の情報量を減らすことになるため、効率的なオーバーレイネットワークの制御のためには適しているとは言えない。

この問題に対して我々の研究グループにおいては、オーバーレイネットワークにおいて全ての経路の計測結果を得ることを維持しながら、計測オーバーヘッドを削減する、オーバーレイネットワーク計測戦略に関する研究を行っている[6-8]。これらの研究においては、複数のオーバーレイ経路がIPパスを共有する状態を分類し、それぞれの共有状態に対して求められるネットワーク計測手法について検討した。また、IPパスの共有を知ることができるオーバーレイ経路の計測に関して、計測精度を低下させることなく、オーバーレイネットワーク全体での計測回数を削減する手法を提案した[6, 7]。さらに、IPパスの共有を知ることができないオーバーレイ経路の計測に関して、IPパスを共有しているオーバーレイ経路数を推定することによって計測周期を制御し、ランダムなタイミングで計測を行うことで計測衝突を確率的に回避する手法を提案した[8]。

[6, 7]において提案した計測回数削減手法は、オーバーレイ経路中に他のオーバーレイノードが含まれる場合には、部分経路の計測のみを行い、全体経路の計測結果は部分経路の計測結果から推定する、計測結果の統合を利用するものである。ネットワーク内に存在するオーバーレイノード数が多い場合には、オーバーレイ経路中に他のオーバーレイノードが含まれることが多くなるため、大幅な計測回数の削減が可能となる。しかし、[6, 7]における検討においては、計測回数の評価のみを行っており、全体経路の計測結果を部分経路の計測結果から推定する際の推定精度については評価していない。そこで本稿では、部分経路の計測結果から、全体経路の計測結果を推定する際の推定精度の評価を行う。評価に際しては、PlanetLab環境[9]におけるノード間の遅延時間およびパケット廃棄率の計測結果を利用することによって、実インターネット環境にオーバーレイネットワークが構築された状況を想定した精度評価を行う。

以下、2.章において、複数のオーバーレイ経路がIPパスを共有する状態を分類し、それぞれの状態において求められるネットワーク計測手法についてまとめる。3.章では計測結果統合手法の精度評価を行った結果を示し、計測結果統合手法の有効性について評価する。最後に4.章で本稿のまとめと今後の課題について述べる。

## 2. オーバーレイネットワークにおける経路共有と計測手法

図2は、2本のオーバーレイ経路がIPパスを共有、すなわち、オーバーレイ経路の一部が同じルータおよびルータ間リンクを

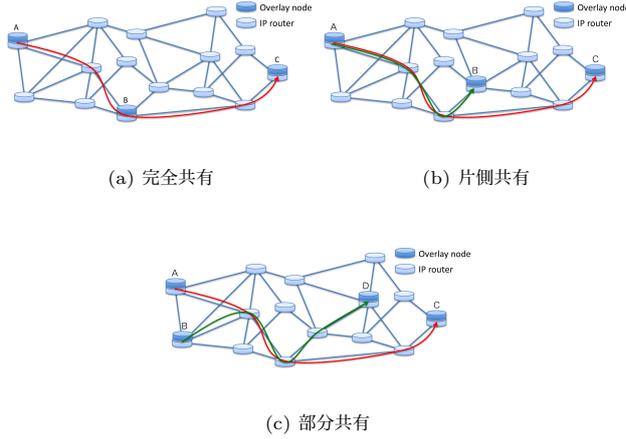


図2 オーレイパスの経路共有

通過している状態を分類したものである。なおここでは、計測する方向については区別をしていないが、逆方向の計測については、計測を行うオーレイノード間で情報交換を行うことによって適切に行うことができる。図2は、オーレイ経路の両端となるオーレイノードの両方あるいは片方がIPパスの共有を認識している場合、およびIPパスの共有を認識できない場合を示している。本稿においては、各オーレイノードは他のオーレイノードのアドレスを知っており、tracerouteコマンドによって各オーレイノードまでのルータレベル経路を得ることができると仮定する。

### 2.1 完全共有

図2(a)は、完全共有、すなわち、オーレイ経路の両端のオーレイノードがIPパスの共有を認識できる場合の例を示している。ここでは、オーレイノードA、C間のオーレイ経路上に、オーレイノードBが存在する。そのため、オーレイノードAは、経路ACと経路AB、および経路ACと経路BCがIPパスを共有しており、これらの経路の計測を同時に行うことで、計測が競合することを認識することができる。

この場合においては、オーレイ経路ACの計測は行わずに、経路ABおよび経路BCの計測結果を基に、経路ACの計測結果を推定する計測結果統合を行うことによって、計測するオーレイ経路数を削減し、計測の競合を回避することができる[6, 7]。経路ABおよびBCの遅延時間の計測結果をそれぞれ $T_{AB}$ 、 $T_{BC}$ とすると、経路ACの遅延時間は計測せずに、下記のように推定する。

$$T'_{AC} = T_{AB} + T_{BC} \quad (1)$$

$T'_{AC}$ は経路ACの遅延時間の推定値である。パケット廃棄率については、下記のように推定することができる。

$$P'_{AC} = 1 - (1 - P_{AB})(1 - P_{BC}) \quad (2)$$

ここで、 $P_{AB}$ および $P_{BC}$ はそれぞれ経路ABおよびBCのパケット廃棄率の計測値、 $P'_{AC}$ はそれぞれ経路ACのパケット廃棄率の推定値である。また、利用可能帯域やTCPスループット理論値などの帯域情報は、下記のように推定する。

$$B'_{AC} = \min(B_{AB}, B_{BC}) \quad (3)$$

$B_{AB}$ および $B_{BC}$ はそれぞれ経路ABおよびBCの帯域情報の計測値、 $B'_{AC}$ はそれぞれ経路ACの帯域情報の推定値である。

このような推定手法は、中間ノード(オーレイノードB)における様々な処理による影響が無視できる場合や、部分経路の計測タイミングの影響が無視できるような環境においては非常に高い精度が得られるが、現実の環境においては、中間ノードにおける処理遅延や、計測タイミングの違いなどが原因となり、推定誤差が生じる。3.章においては、PlanetLabノード間の計測結果を利用することにより、オーレイノード間の遅延時間、パケット廃棄率、およびTCPスループット理論値について、経路ACの実際の計測値と、推定値をそれぞれ比較する。これにより、推定手法の精度を評価し、[6, 7]において提案した手法の有効性を明らかにする。

### 2.2 片側共有および部分共有

図2(b)は、片側共有、すなわち、オーレイ経路の片方のオーレイノードが、IPパスの共有を認識できる場合の例を示している。具体的には、オーレイノードAが、オーレイノードBおよびCまでの経路を知ることによって、経路ABと経路ACが途中までのIPパスを共有していることを認識することができる。一方、本稿における検討では、オーレイノード間の情報交換は行わないと仮定しているため、オーレイノードBおよびCは、オーレイノードAまでの経路が競合していることを知ることはできない。この場合においては、オーレイノードAが、経路ABおよび経路ACの計測を逐次的に行うことで、計測の競合を避けることができる。

図2(c)は、部分共有、すなわち、オーレイノードがIPパスの共有を認識できない場合を示している。具体的には、オーレイ経路ACおよびオーレイ経路BDは、ルータ1、2間のIPパスを共有しているが、オーレイノードAおよびBは、お互いの経路情報を交換しない限り、そのことを知ることはできない。この場合においては、完全共有(図2(a))および片側共有(図2(b))の場合と異なり、オーレイノード間で経路情報を交換しない限り計測の競合を完全に避けることはできない。しかし、IPパスを共有しているオーレイ経路数を知ることができれば、その数に応じて計測周期を設定し、ランダムなタイミングで計測を行うことによって、確率的に計測の競合を回避できると考えられる。

## 3. 精度評価

本章においては、2.1節において説明した計測結果推定手法の精度評価を行う。まず、3.1節において計測環境および計測データについて説明し、3.2節、3.3節、および3.4節において、それぞれ遅延時間、パケット廃棄率、TCPスループット理論値に関して、推定精度の評価結果を示す。

### 3.1 評価環境

本稿における評価においては、PlanetLab環境を利用する。すなわち、PlanetLab上のノード間のネットワーク性能の計測を行い、推定精度の評価のために用いる。計測は遅延時間およ

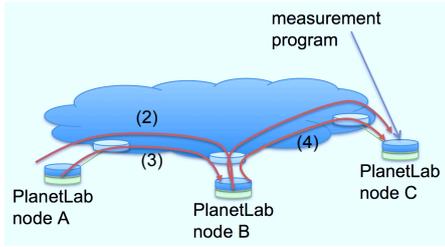


図3 計測手法

びパケット廃棄率に関して行い、UDP パケットを送受信する計測専用のアプリケーションを用いた。具体的な計測手法は下記の通りである。

- (1) 3 台の PlanetLab ノードを選出する (ノード A、ノード B、ノード C とする)
- (2) ノード AC 間の計測を行う。ここで、AC 間の経路は、B を経路するようにアプリケーションによって制御する。
- (3) ノード AB 間の計測を行う。
- (4) ノード BC 間の計測を行う。
- (5) (2)(3)(4) を再度行う

図3に、計測手法を図示する。PlanetLab はサーバ上にノードが設置されるため、エンドホストから構成されるオーバーレイネットワーク (図1(a)) を想定した評価に相当する。しかし、ルータ上にオーバーレイノードを設置した環境においては、特に遅延時間に関しては推定精度は向上すると考えられるため、本稿における評価は最悪時の評価であると言える。

3.2 節における遅延時間の評価のためには、1 回の計測は、上記手法の (2)(3)(4) においてそれぞれ 0.5 秒間隔で 20 回 UDP パケットを送信し、往復の遅延時間を計測した。すなわち、一度の計測で各経路 AC、AB、BC に対して  $20 \times 2 = 40$  個の UDP パケットを送信した。本稿においては、上記計測を 96,036 個のノード A,B,C の組み合わせについて行った。

パケット廃棄率の評価のためには、(2)(3)(4) においてそれぞれ 0.5 秒間隔で 5,000 回 UDP パケットを送信し、相手先に到着したパケット数を計測した。そのため、一度の計測で各経路に対して  $5,000 \times 2 = 10,000$  個の UDP パケットに対するパケット廃棄率を導出することができる。本稿においては、上記計測を 1,384 個のノード A,B,C の組み合わせについて行った。

TCP スループット理論値に関しては、[10] において示されている、TCP スループットの解析式を用いる。式は以下のように示される。

$$B(p) = \min \left( \frac{W_{max}}{RTT}, \frac{1}{RTT \sqrt{\frac{2bp}{3}} + RTO \cdot \min(1, 3\sqrt{\frac{3bp}{8}})p(1 + 32p^2)} \right)$$

ここで、 $B$  は TCP スループット (packets/sec)、 $p$  はパケット廃棄率、 $W_{max}$  は最大ウィンドウサイズ (packets)、 $RTT$  および  $RTO$  はラウンドトリップ時間および再送タイムアウト時間 (sec)、 $b$  は delayed ACK オプションに関するパラメータ (delayed ACK を用いない場合には 1) である。本稿における評

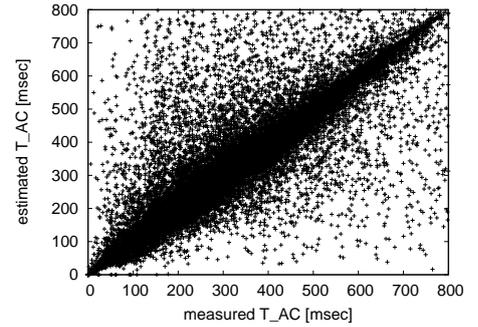


図4 遅延時間の精度評価結果

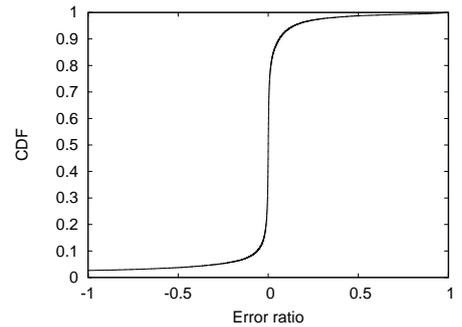


図5 遅延時間の誤差分布

価では、 $p$  には計測したパケット廃棄率、 $RTT$  には計測した遅延時間、 $RTO$  には  $RTT$  を 4 倍した値をそれぞれ用いることで、TCP スループット理論値を導出し、精度評価を行う。

### 3.2 遅延時間

図4に、遅延時間の精度評価結果を示す。図の横軸は実際に計測した経路 AC の遅延時間 ( $T_{AC}$ ) を、縦軸は式 (1) によって推定した経路 AC の遅延時間 ( $T'_{AC}$ ) をそれぞれ表す。なお、全体の平均対数誤差は 0.112 となった。図より、式 (1) による推定が概ね高い精度で全体経路の遅延時間を推定できると言える。また、推定結果が計測結果よりも大きくなる場合が、小さくなる場合よりも多いことがわかる。これは、中間ノード (図3におけるオーバーレイノード B) における処理負荷が原因となっていると考えられる。

図4に、遅延時間の誤差の分布を示す。ここで誤差は、下記で定義されるものを用いている。

$$\Delta_{A,C} = \frac{T'_{AC} - T_{AC}}{T_{AC}} \quad (4)$$

図より、約 90% の計測結果について、計測誤差が 10% 以内に収まっていることがわかる。このことから、式 (1) による推定が概ね高い精度で全体経路の遅延時間を推定できると言える。

ここで、オーバーレイネットワークにおいて、ノード間経路を選択するオーバーレイルーティングにおいて、遅延時間の短い経路を選択することを想定する。式 (1) を用いて推定した全体経路の遅延時間を用いるものとし、ある 2 つのオーバーレイ経路の遅延時間を比較した際に、誤った判断をする確率を評価する。すなわち、下記の条件を満たす計測結果の割合を導出する。

$$T_{A_1C_1} < T_{A_2C_2} \text{ かつ } T'_{A_1C_1} > T'_{A_1C_1}$$

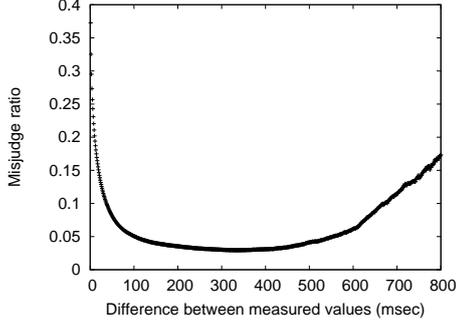


図6 遅延時間の大小関係の誤判断確率

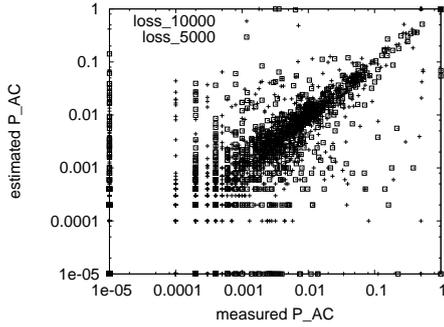


図7 パケット廃棄率の精度評価結果

表1 パケット廃棄率の推定手法における平均対数誤差

	0	<0.001	<0.01	<0.1	<0.5	<1.0	overall
10,000 trials	0.755	0.565	0.376	0.302	0.676	2.759	0.474
5,000 trials	0.650	0.671	0.454	0.316	0.798	0.007	0.514

あるいは、

$$T_{A_1C_1} > T_{A_2C_2} \text{ かつ } T'_{A_1C_1} < T'_{A_1C_1}$$

図6に評価結果を示す。図の横軸は2つのオーバーレイ経路の実際の計測値の差 ( $|T_{A_1C_1} - T_{A_2C_2}|$ ) を、縦軸は上記条件を満たす計測結果の割合をそれぞれ示している。図より、実際の計測値の差が大きくなるにつれ、誤判断の確率が低下しているのがわかる。これは、図4および図5の結果より、推定精度が高いためであると言える。しかし、実際の計測結果の差が500msecよりも大きくなると、誤判断の確率が増加している。これは、実際の計測値の差が500msec以上あるというのは、PlanetLabのノード負荷の高さなどの何らかの原因により、遅延時間の計測そのものに不具合が生じていることがあるためであると考えられる。

### 3.3 パケット廃棄率

図7に、パケット廃棄率の精度評価結果を示す。図の横軸は、実際に計測した経路ACのパケット廃棄率 ( $P_{AC}$ ) を、縦軸は式(2)によって推定した経路ACのパケット廃棄率 ( $P'_{AC}$ ) をそれぞれ表す。図には10,000回の計測結果を基にしたパケット廃棄率、および計測手法の(2)(3)(4)において行った5,000回の計測結果を基にしたパケット廃棄率を用いた場合の結果を示している。なお図中の1e-05は、10,000回あるいは5,000回のパケット送信においてパケット廃棄率がゼロであったことを意味している。表1には、実際の計測値と推定値の平均対数誤差

の、実際の計測値による変化を示している。図7および表1より、特に実際の計測によって得られた廃棄率がおよそ0.01以上の場合においては、式(2)による推定が概ね高い精度で全体経路のパケット廃棄率を推定することができると言える。一方、実際のパケット廃棄率が小さい場合には、計測精度が大幅に劣化する場合がある。これは、パケット廃棄率の計測のために用いた最大で10,000回のパケット送信では十分な精度のパケット廃棄率が得られないことを意味している。このことは、図7および表1において、10,000回の計測結果に基づく評価結果と、5,000回の計測結果に基づく評価結果を比較することによってわかる。

### 3.4 TCPスループット理論値

図8に、TCPスループット理論値の精度評価結果を示す。図の横軸は実際に計測したRTTおよびパケット廃棄率に基づいて算出した経路ACのTCPスループット理論値 ( $B_{AC}$ ) を、縦軸は経路ABおよび経路BCのTCPスループット理論値を導出し、式(3)を用いて推定した経路ACのTCPスループット理論値をそれぞれ表す。TCP接続の最大ウィンドウサイズ  $W_{max}$  を8 KBytes、64 KBytes、および1024 KByteとした場合の評価結果をそれぞれ図8(a)、8(b)、および8(c)に示している。図中には、それぞれの評価結果における平均対数誤差 (MLE) の値を示している。図より、最大ウィンドウサイズの値にかかわらず、全体経路のTCPスループット理論値を高い精度で推定できることがわかる。また、 $W_{max}$  が大きくなるにつれ、誤差が大きくなっていることがわかる。これは、式(4)に示すTCPスループットの理論値は、 $W_{max}$  が小さい場合には、式中のminの第1項 ( $\frac{W_{max}}{RTT}$ ) で決定されることが多くなるため、誤差が比較的大きいパケット廃棄率の影響を受けにくいためである。一方、 $W_{max}$  が大きくなるにつれ、TCPスループット理論値が第2項で決定される場合が多くなるため、パケット廃棄率の推定誤差の影響を受けやすくなる。

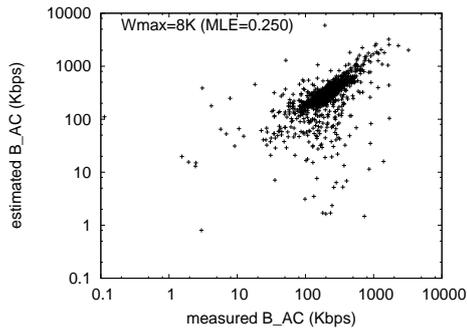
図9に、図6と同様の評価をTCPスループット理論値について評価した結果を示す。すなわち、ノード間経路を選択するオーバーレイルーティングにおいて、TCPスループットの高い経路を選択することを想定し、2つのオーバーレイ経路のTCPスループット理論値を比較した際に、誤った判断をする確率を評価する。すなわち、下記の条件を満たす計測結果の割合を導出する。

$$B_{A_1C_1} < B_{A_2C_2} \text{ かつ } B'_{A_1C_1} > B'_{A_1C_1}$$

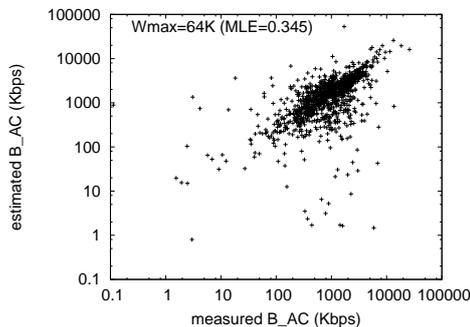
あるいは、

$$B_{A_1C_1} > B_{A_2C_2} \text{ かつ } B'_{A_1C_1} < B'_{A_1C_1}$$

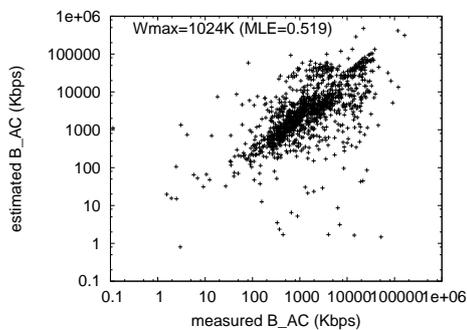
図9の横軸は2つのオーバーレイ経路の実際のTCPスループット理論値の差 ( $|B_{A_1C_1} - B_{A_2C_2}|$ ) を、縦軸は上記条件を満たす計測結果の割合をそれぞれ示している。図より、TCP接続の最大ウィンドウサイズが8KBの場合にはおよそ100KBps、64KBあるいは1024KBの場合にはおよそ1Mbps以上の差がある場合には、誤判断確率を15%程度に抑えることができるといえる。



(a) パケットサイズ 1500 Bytes,  $W_{max}=8$  KBytes



(b) パケットサイズ 1500 Bytes,  $W_{max}=64$  KBytes



(c) パケットサイズ 1500 Bytes,  $W_{max}=1024$  KBytes

図8 パケット廃棄率の精度評価結果

#### 4. おわりに

本稿においては、オーバーレイネットワークにおける計測負荷削減手法として、部分経路の計測結果を組み合わせることによって全体経路の計測結果を推定する計測結果統合手法の精度評価を行った結果を示した。評価に際しては、PlanetLab 環境において遅延時間およびパケット廃棄率を計測した結果を用いて、オーバーレイノード間の遅延時間、パケット廃棄率、および TCP スループット理論値の推定手法の精度を評価した。評価の結果、いずれの推定手法においても、全体経路のネットワー

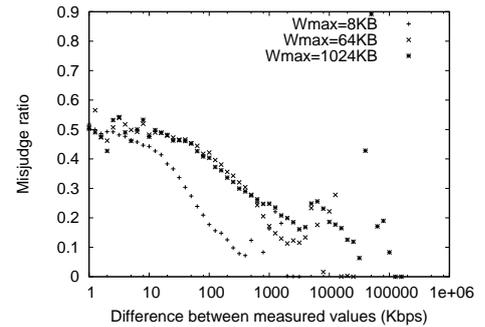


図9 TCP スループット理論値の大小関係の誤判断確率

ク性能を高い精度で推定できることがわかった。また、遅延時間の推定結果を用いてオーバーレイルーティングを行った場合に、遅延時間の小さい経路を正しく選択できる確率が十分大きいこともわかった。一方、オーバーレイノードの負荷が原因となり、計測そのものや推定結果の精度が悪化する場合があることも明らかとなった。

今後の課題としては、異なるネットワーク環境における精度評価を行うことが挙げられる。また、計測精度や計測結果のばらつきを考慮した経路選択手法を確立することも重要である。

#### 謝 辞

本研究の一部は、情報通信研究機構からの委託研究「ダイナミックネットワーク技術の研究開発 課題カ」によっている。ここに記して謝意を示す。

#### 文 献

- [1] Skype Web page. available at <http://www.skype.com/>.
- [2] D. G. Andersen, H. Balakrishnan, M. F. Kaashoek, and R. Morris, "Resilient overlay networks," in *Proceedings of 18th ACM Symposium on Operating Systems Principles*, Oct. 2001.
- [3] Z. Li and P. Mohapatra, "QRON: QoS-aware routing in overlay networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 22, pp. 29–40, Jan. 2004.
- [4] J. Shamsi and M. Brockmeyer, "QoSMap: Achieving quality and resilience through overlay construction," in *Proceedings of ICIW 2009*, May 2009.
- [5] A. Nakao, L. Peterson, and A. Bavier, "Scalable routing overlay networks," *ACM SIGOPS Operating Systems Review*, vol. 40, pp. 49–61, Jan. 2006.
- [6] G. Hasegawa and M. Murata, "Scalable and density-aware measurement strategies for overlay networks," in *Proceedings of ICIMP 2009*, May 2009.
- [7] 森弘樹, 長谷川剛, 村田正幸, "オーバーレイネットワークにおける経路重複を利用した計測手法," *電子情報通信学会技術研究報告 (ICM2008-67)*, vol. 108, pp. 53–58, Mar. 2009.
- [8] 長谷川剛, 村田正幸, "確率的手法に基づくオーバーレイネットワーク計測の競合軽減," *電子情報通信学会技術研究報告 (ICM2009-39)*, vol. 109, pp. 25–30, Jan. 2010.
- [9] PlanetLab | An open platform for developing, deploying, and accessing planetary-scale services. available from <http://www.planet-lab.org/>.
- [10] J. Padhye, V. Firoiu, D. Towsley, and J. Kurose, "Modeling TCP throughput: a simple model and its empirical validation," in *Proceedings of ACM SIGCOMM'98*, pp. 303–314, Aug. 1998.