

パケット伝送遅延時間の測定に基づく インターネットの busy level 評価

Busy level evaluation of the Internet based on measurements
of packet transmission delay time

清水 和宏[†], 小林 香[†], 片山 勁[†]

Kazuhiro Shimizu[‡], Kaori Kobayashi[‡], Tsuyoshi Katayama[‡]

[†]富山県立大学大学院工学研究科

〒 939-0398 富山県射水郡小杉町黒河 5180

[‡]Toyama Prefectural University

5180 Kurokawa Kosugi-machi Imizu-gun Toyama ZIP.939-0398

Abstract : 低遅延・低遅延揺らぎを要求する音声・動画等のインターネット通信における品質保証を目的に、2 端末間のパケット伝送遅延時間の測定データと要求品質 (許容遅延時間) に基づき busy level 評価手法を提案した。これにより、2 端末間のネットワークの混雑程度を IP パスに依存することなく定量的に 5 段階評価することができ、実際の評価を数例提示した。

1 まえがき

近年のアクセス回線における技術の進展は著しく、xDSL (DigitalSubscriber Line) や CATV (Community Antenna TeleVision), FTTH (Fiber To The Home) など、ブロードバンド接続サービスが開始され、世界で最も高速な通信環境が実現されるなど、大きな成果が上がりつつある [1]。これにより、マルチメディアデータが同一回線上で伝送されるようになり、一般利用者が快適にインターネットを楽しむことができるようになっただけでなく、電子商取引、医療、行政、教育など、さまざまなところでインターネットは利用され、重要な社会基盤として位置づけ

られている。

一方で、インターネットには、ベストエフォートという言葉で表現されるように、通信の信頼性やサービス品質 (QoS:Quality of Service) についての基準はないのが現状である。インターネットトラヒックは時々刻々と変化しているため、あらかじめどの程度の信頼性やサービス品質を得られるかを知ることが困難であり、ネットワーク計測を行って見積もる必要がある。このような要請から ping, traceroute, pchar 等さまざまな測定ツールの開発や実装が行われており、伝送遅延時間や通信経路の特定、帯域の推定などが可能となった [2]。

ネットワーク計測の分野では、非常に活発に議論が進められており、例えば米国では、IETF[3]のIPPM[4]を始め、CAIDA[5]、NLANR[6]等の団体がある。IPPMではインターネットの連結性、片方向遅延時間および往復遅延時間とパケットロス、パケットロス・パターン、リンク間の帯域幅等を測定基準として、品質、パフォーマンス、信頼性の標準化が進められている。国内では次世代IX研究会[7]やMAWI[8]等の団体があり、インターネットにおける通信の信頼性や品質を計測、可視化するとともに、これらの通信をより信頼性の高い、堅牢なものにするための技術について研究を行っている。また、Web上でpingを用いた計測結果を公表するDTI Looking Glass[9]のようなサイトや、Internet Weather[10]やInternet Traffic Report[11]に代表されるようにネットワーク計測を行い、独自の分析技術でネットワークの状態をユーザに通達するなど、一般利用者から見た分かりやすい情報提供を念頭においているところがある。しかし、これらの多くは平均遅延時間やパケットロス率の提示、またはそれを用いた指標の提供であり、異なる経路相互の品質の比較は難しいことが問題である。

インターネットの品質評価には、測定、分析、評価、対策といった幅広い内容が含まれているが、本論文では最終的に、ネットワークの積極的な制御につながるインターネット層、IP (Internet Protocol) レベルでの品質評価を行う。この基礎資料を得るために、評価項目の中でも特にパケット伝送遅延時間に着目し、計測を行う。計測、分析の両分野でインターネットの品質評価手法の確立を目指し、測定結果を「情報」として可視化することを目的とし、インターネットのIPパスに依存しない混雑程度が評価できる busy level 評価法を提案する。

以下、本論文の構成を述べる。まず2で本論文で扱うパケット伝送遅延時間の計測方法、提案評価法の概要、扱うパラメータ等について述べる。3では測定結果をいくつか示すとともに busy level 評価法の評価例を示す。最後に、まとめと今後の課題を述べる。

2 busy level 評価法の提案

2.1 計測の対象と測定ツール

1で述べたように、TCP/IPのIP層でのパケット伝送遅延時間から通信品質を規定する目的で、ICMP (Internet Control Message Protocol) [12]を使用したpingベースの測定用ツールを開発した。一般に使用されるpingではICMP Echo Requestを使用した試験パケットを相手先ホストに投げ、Echo Replyによって返送されるパケットから、往復伝送遅延時間 (RTT: Round Trip Time) とパケットロス率を得ることができる。しかしながら、ADSLのように上下のIPパスで帯域幅や回線速度が異なる場合やIPパス自体が上下方向で異なる場合には、往路と復路の伝送遅延時間を分離計測する必要があるため、ICMPのTimestamp Request & Replyを用いるように変更を加えたping[13]を計測に使用する。返送パケットに書き込まれた、送信元ホストでのパケット送信時刻 (Originate Time)、相手先ホストでのパケット受信時刻 (Receive Time)、そのパケット送信時刻 (Transmit Time) 及び送信元ホストでの返送パケットの受信時刻 (Current Time) から往路伝送遅延時間 (Outward Trip Time)、復路伝送遅延時間 (Inward Trip Time) を以下のように算出する。

$$\begin{aligned} \text{RTT} &= \text{Current Time} - \text{Originate Time} \\ \text{Outward Trip Time} &= \text{Receive Time} - \text{Originate Time} \\ \text{Inward Trip Time} &= \text{Current Time} - \text{Transmit Time} \end{aligned}$$

ICMPのTimestamp Request & Replyによると、Receive TimeとTransmit Timeは相手先ホストの時計によって打刻されるため、送信元ホストと相手先ホストで持っている時刻情報や時計の進み方にずれがあると、正確な片方向伝送遅延時間を計算できないことになる。この影響を可能な限り排除するために、Stratum 2以下の国内外の公開NTPサーバを相手先として選択した。また、GPS (Global Positioning System) の時刻情報を常に参照するホストを横須賀リサーチパーク (YRP) に設置したので、これも相

表 1: 測定ホストリスト

YRP	ホスト 1
韓国公開 NTP サーバ	ホスト 2
日本国内公開 NTP サーバ	ホスト 3

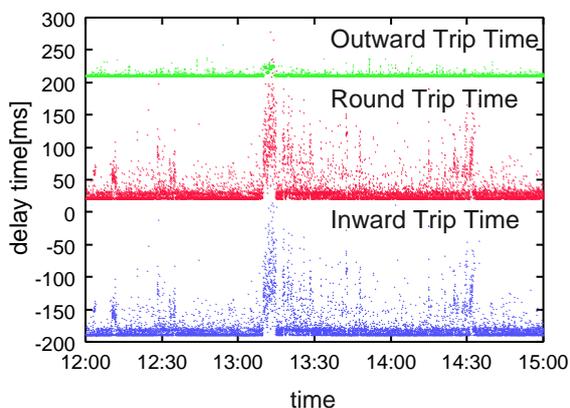


図 1: 計測データ

(富山県立大-ホスト 1 間 2005/02/01/12:00-15:00)

手先ホストの 1 つに含めた．相手先ホストのリストを表 1 に示す．

相手先ホストへのサービス攻撃にならないよう配慮し，試験パケットの送出間隔を 1 秒とした．また，Timestamp Request & Reply を用いたことにより試験パケットサイズは 40 byte に固定される．相手先ホストからの返送パケット上の Originate Time を書き込む領域が 31 ビットであることから連続する 3 時間の測定 (試験パケット数=10800) を 1 セットとし，3 時間ごとに新しい測定セットを開始する．

相手先をホスト 1 (YRP) としたときの富山県立大学設置ホスト間での計測結果の一例 (2005 年 2 月 1 日，12:00-15:00) を図 1 に示す．図中央部分 13:00-13:30 の間の往復遅延時間に見られる大きな変動は，往路 (Outward) よりも復路 (Inward) での遅延の影響を受けていることが，片方向遅延を分離することで明らかとなった．

ネットワークの混雑程度を指標化するために使用

表 2: 処理したデータセット数

	ホスト 1	ホスト 2	ホスト 3
2005/01	128	248	248
2005/02	224	224	224
2005/03	184	247	248
2005/04	No data	240	240
2005/05	No data	248	248
2005/06	No data	240	240
Total	536	1447	1448
All total	3431 セット		

表 3: 処理したデータの最小遅延時間

	最小遅延時間
ホスト 1	20 msec
ホスト 2	60 msec
ホスト 3	40 msec

した計測データは，表 2 に示すように連続する 3 時間を 1 セットとして，ホスト 1，2，3 に対してそれぞれ 536，1447，1448 セットの合計 3431 セットに達する (なおホスト 1 は 2005/3/23 に回収したため，以降のデータはない)．全 3431 セットの計測結果をふまえ，異なる IP パスにおいても相互比較可能な busy level という指標の評価方法について次節で述べる．

IP パスを構成する全てのルータを遅滞なく最短時間で通過したパケットの伝送遅延時間はその最小値として記録され，これはほぼ物理的な距離により定まることが知られている．IP パスの大きな変更のなかった 5ヶ月間におけるそれぞれの IP パスでのおおよその最小遅延時間を表 3 に示す．ホスト 2 は国外にあるため最小遅延時間が大きくあらわれている．また，日本国内の地方にあるホスト 3 では，全てのパケットが東京を経由するため，関東にあるホスト 1 の最小遅延時間の倍の値になっている．

2.2 busy level 評価の提案

1 ではネットワークの計測結果を Web で公表するサイトについて述べたが 2 端末間経路の混雑状況を指標化することができても、異なる経路相互での混雑状況を単純に比較することができない。そこで、ネットワークの混雑状況を反映する遅延時間の揺らぎの大きさ、伝送遅延時間の物理的な限界値である最小遅延時間、パケットロス率などを盛り込んだネットワークの混雑程度の品質指標である busy level を次のように提案する。また、今回 2.1 で往路、復路の伝送遅延時間を分離計測しているが、時間分解能が低い場合があるため、busy level 評価においては RTT のみを扱うことにする。

使用するデータは、パケット送出時刻に対応するシーケンス番号 (0 ~ 10799) とそれに対応する RTT から構成されており、このデータから以下 2 つのパラメータとなる遅延揺らぎの情報を取り出す。ここで n , n_1 , n_2 の関係を図 2 に示す。

$T_{n_1}^*$: シーケンス番号 ($n - n_1$) から n の間の RTT をソートし、上位 $\alpha\%$ の RTT. α は別途指定

MIN_{n_2} : シーケンス番号 ($n - n_2$) から n の間の RTT の最小値

MIN_{n_2} で IP パスの伝送遅延時間の物理的な最小値を取り込み、 $T_{n_1}^*$ で IP パスを構成する各ルータの遅延揺らぎの幅を考慮し、式 (1) でシーケンス番号 n の時刻での B_n を定める。

$$B_n = \frac{1}{T_{n_1}^* - MIN_{n_2} + 1} \times 100 \quad (1)$$

次節で説明する B_n から busy level への変換の際に、統一的に一定の範囲内に指標値を収める必要があること、また、今後本遅延時間計測・提案手法による評価とその表示をリアルタイムに行いたいことをふまえ、式 (1) に決定した。なお、表 2 に示す 3431 セットでの処理を通じて本手法の適用外のケースは無かったものの、今後、式 (1) の妥当性について定量的に検証する必要がある。

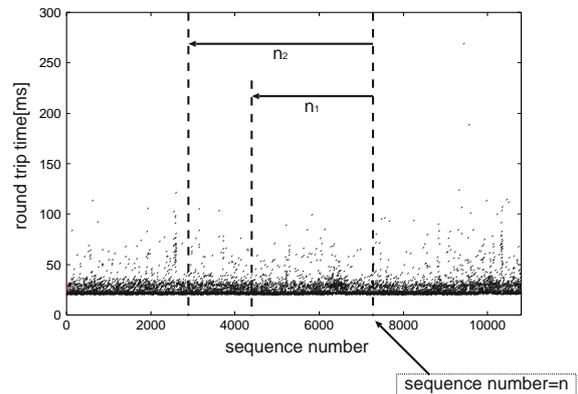


図 2: n , n_1 , n_2 の関係

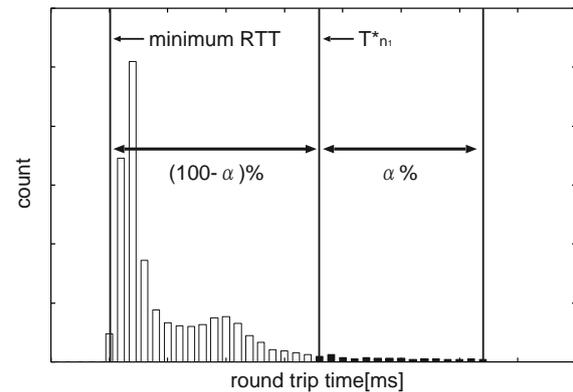


図 3: $T_{n_1}^*$ の導出法

式 (1) より、 B_n は 0 から 100 の間の値を取り、 B_n が 0 に近ければ IP パスが混雑、逆に 100 に近ければ IP パスには十分な余裕があることがわかる。まずは、計測データから式 (1) に使用する諸量、 n_1 , n_2 , $T_{n_1}^*$, MIN_{n_2} を求める過程を示し、次に遅延揺らぎを表す B_n の値から、異なる IP パスでも一律に比較できる busy level を得る過程を示す。

IP パスへの擾乱を考慮して試験パケットの送出間隔を 1 sec としているので、揺らぎを評価するための十分なサンプル数を確保したいが、時々刻々変化する計測対象の IP パスの混雑状態を評価するには計測をできる限り短時間で済ませる必要がある。そこで、閑散時間帯や繁忙時間帯での実際の計測結果

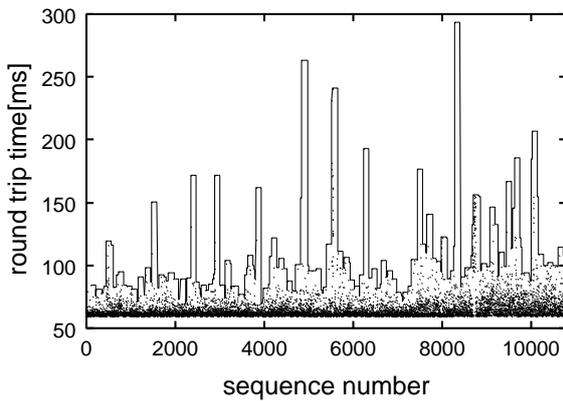


図 4: 計測データと MAX_{n_1}
(富山県立大-ホスト 2 間 2004/10/21/06:00-09:00)

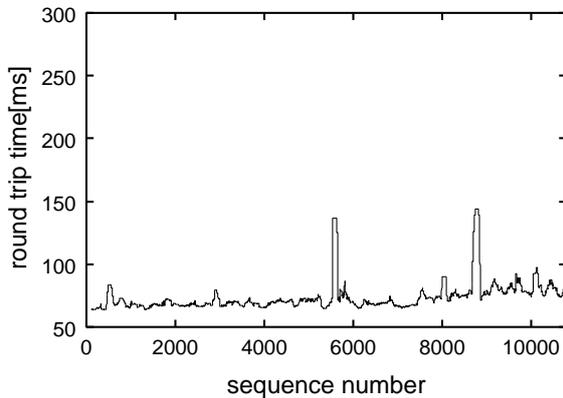


図 5: $T_{n_1}^*$
(富山県立大-ホスト 2 間 2004/10/21/06:00-09:00)

に基づき、計測時間を 2 分間 (サンプル数 $n_1 = 120$) と定めた [14] .

連続する 120 sec (パケットロスがなければサンプル数 $n_1 = 120$) の RTT を用いて頻度分布を描画すると図 3 のようになる . ここで、相手先からの返送パケットがロスしたデータは、RTT の値自体は持たないが、サンプル数にはカウントする . ロストせずに戻ってきた返送パケットから得られる RTT の最大値を MAX_{n_1} とし、比較的揺らぎが大きい IP パスであるホスト 2 を相手先とした実際の計測データと MAX_{n_1} を重ねたプロットを図 4 に示す . この例では、06:00-09:00 の 3 時間の計測全体を通じて

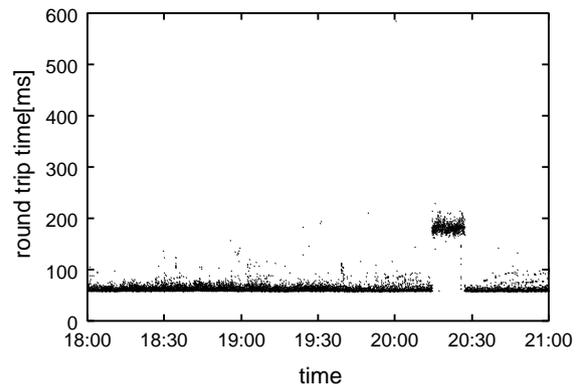


図 6: 計測データ
(富山県立大-ホスト 2 間 2005/01/15/18:00-21:00)

の RTT の揺らぎはそれほど大きくないものの、ところどころに現れる大きな遅延の影響が著しいことがわかる . そこで、伝送遅延時間の揺らぎを表す量として MAX_{n_1} の代わりに、120 の返送パケットの RTT の値を小さい順に並べて、全体の $(100 - \alpha)\%$ のパケットが返送される RTT の値 $T_{n_1}^*$ を採用することにした . 図 4 のデータで $\alpha = 10\%$ としたときの $T_{n_1}^*$ を図 5 に示す . 図 4 にみられる単発の大きな遅延時間をもつパケットの影響は、図 5 には現れないが、大きな遅延時間が集団的に現れる時間帯の 2ヶ所 (sequence number が 5500 と 8000 の辺り) は図 5 に反映されていることが明らかである .

はじめは 120 sec の計測結果のみで B_n を得るつもりであったので、遅延揺らぎを表す量 T^* と IP パスの物理的境界である最小遅延時間 MIN を決めるために使うサンプル数は n_1 と同じ 120 を使用していた ($n_2 = 120$) . しかし、計測結果の蓄積・評価処理を進めるうちに図 6 に示すような、 n_2 の変更が必要とされるデータがでてきた . この図中の 3 時間のうちほとんどの時間帯では伝送遅延時間の最小値には変化がみられないが、20:15 からおよそ 15 分の間伝送遅延時間の最小値のみに倍近くの上昇が現われている . IP パス途中の全てのルータを最小時間で通過する場合に伝送遅延時間の最小値が計測されるので、IP パスの変更がなければこの値に変更はないと

考えられる．図 6 の 15 分間の計測例でサンプル数を $n_1 = n_2 = 120$ とした場合には，伝送遅延時間の最小値が上昇しているが，確認できる ICMP Echo Reply パケットの TTL (Time To Live) に変化はないことから IP パスの変化ではないと考えられる．また，伝送遅延時間の揺らぎの幅にもそれほど変化がみられず，算出される B_n は上昇した最小遅延時間と $T_{n_1}^*$ で評価される．伝送遅延時間の最小値自体が変化しているのは，IP パスの混雑程度に何かしらの変化が発生しているということなので，本来の最小遅延時間と $T_{n_1}^*$ で B_n が評価されなければ矛盾した状況であると言える．

そこで，この 15 分間を挟む前後では伝送遅延時間の最小値に変化は見られないため，IP パスに変更はなく，最小値に見られる変化は一時的なものであると判断し，この影響を除去するために，伝送遅延時間の最小値を定めるときに用いるサンプル数 n_2 を，伝送遅延揺らぎを表す $T_{n_1}^*$ を定めるサンプル数 n_1 よりも大きく取ることとした．具体的には $n_2 = 1800$ とし，30 分間の RTT サンプルの中の最小値を MIN_{n_2} とする．一時的ではない IP パスの変更に対しては，30 分後にその影響が B_n に取り込まれることになる．

最後に，一時的に MIN_{n_2} が下がる図 6 とは逆のケースが考えられるが，今回の 3000 余りの測定セットには一例もみられないため，評価対象外とする．ただし，IP パスの変更により MIN_{n_2} の恒常的変更が発生した場合，今の処理方式では 30 分後に B_n に反映されるため，TTL の値の変化により IP パスの変更が検出されたら， n_2 の値を変えて B_n に早めに反映させる等の改善が考えられる．

2.3 B_n から busy level への変換

前述したように，式 (1) の B_n では遅延揺らぎの情報を取り出し，評価したにすぎず，ある IP パスの長期間の変化を議論することができても，異なる IP パスの混雑状態を相互比較することができない．そこで，各 IP パスの最小遅延時間に対する品質の統一性を図るため， B_n をベースに，異なる IP パスに

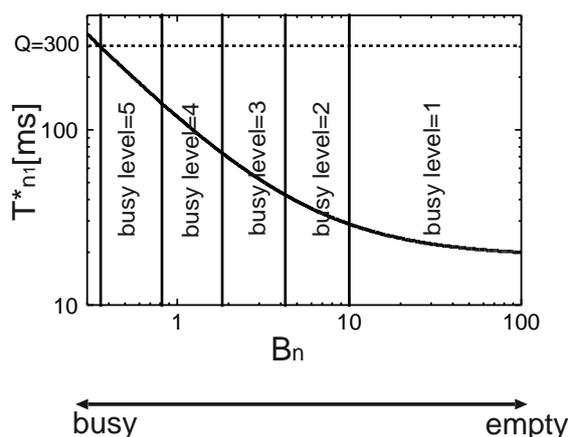


図 7: $B_n - T_{n_1}^*$ 特性 ($MIN_{n_2} = 20$ msec)

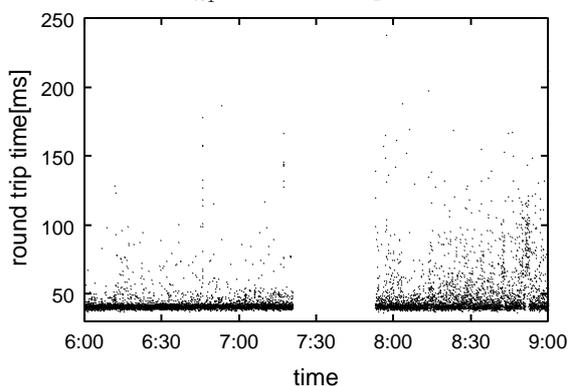


図 8: 計測データ
(富山県立大-ホスト 3 間 2005/01/24/06:00-09:00)

においてもネットワークの混雑状態を比較することが可能な 5 段階での busy level 評価を考える．

式 (1) において IP パスに依存する MIN_{n_2} を与えると， B_n と $T_{n_1}^*$ は一意に定まる．富山県立大学-ホスト 1 間の実測データでの $MIN_{n_2} = 20$ msec を与えたときの $B_n - T_{n_1}^*$ 特性を図 7 に示す．両軸を対数表現した場合， B_n が 10 を越えて大きくなると急激に $T_{n_1}^*$ の減少率が減る．これは異なる MIN_{n_2} の値でも同じ傾向を示すため， $10 < B_n < 100$ の区間を busy level 1 と割り当てる．

また，busy level=2~5 の割り当てについて説明する．まず，品質許容最大遅延時間を Q とし， $T_{n_1}^*$ の

表 4: パラメータ諸量

遅延揺らぎ幅決定用サンプル数	120
遅延時間最小値決定用サンプル数	1800
α	10%
許容パケットロス率 P	0.5
品質許容最大遅延時間 Q	300 msec

上限値を図 7 の点線のように決める。 B_n が 10 未満の区間ではほぼ直線とみなすことができることから、 Q と $B_n - T_{n_1}^*$ 特性の交点から $B_n = 10$ の間を logscale 上で等分割し、図 7 のように busy level を割り当てる。今回の例では $Q = 300$ msec とした。

最後に、IP パスに問題が発生して、連続して発生したパケットロスあるいは単発的に頻発するパケットロスが観測される計測結果がいくつか得られた (図 8) ので、これを B_n の計算に取り込むことを検討した。提案方法では、パケットロスを伝送遅延時間が無限大のパケットとしてとして扱うので式 (1) の諸量には直接反映されることはないが、120 sec の中でパケットロス率が高くなるということはサンプル数が少なくなるということなので、適切な伝送遅延時間の揺らぎの幅を得ることができなくなる。そこで、許容パケットロス率 P を設定し、120 sec 間のデータのパケットロス率が P 以上の場合は busy level を負の符号でマークし、信頼性が低いことが分かるようにした。

以上の操作をすることにより、本論文で提案する busy level 評価法のインターネットの混雑程度の 5 段階評価を可能にした。

3 評価例

busy level を評価するためのパラメータについて表 4 に再掲する。相手先がそれぞれホスト 1, ホスト 2, ホスト 3 の場合の RTT の計測結果 (点) と評価された busy level (実線) を重ねたものを図 9~11 に示す。図 9~11 をみても判るようにそれぞれの最小遅延時間は異なり、異なる IP パス間のデータに

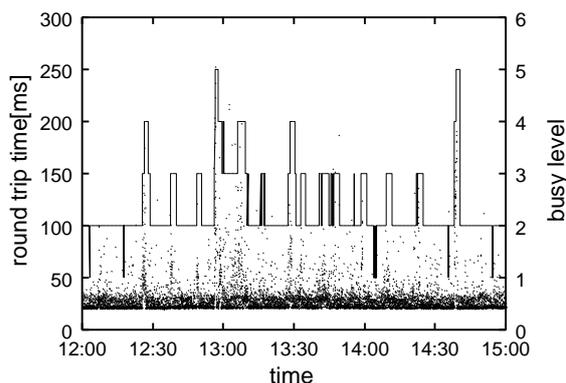


図 9: 計測データ
(富山県立大-ホスト 1 間 2005/02/07/12:00-15:00)

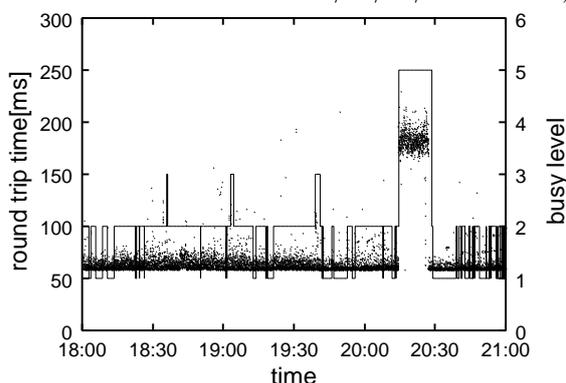


図 10: 計測データ
(富山県立大-ホスト 2 間 2005/01/15/18:00-21:00)

おいて相互比較は難しい。しかし、提案手法を用いることによってネットワークの経路に依存しない混雑程度の評価が可能になり、視覚的にも現状のネットワークがどの程度混雑しているのかわかる。

図 9 においては 12:00~15:00 という繁忙時間帯のため busy level = 2 をベースにやや安定したネットワークの状態であるが、13:00 前や 14:40 に突発的に大きな busy level がでていることがわかる。昼休み後の仕事の再開がネットワークに影響を与え、busy level の高い時間が継続されるようであれば回線の増強が必要とされる。

相手先がホスト 2 である計測例 (図 10) において

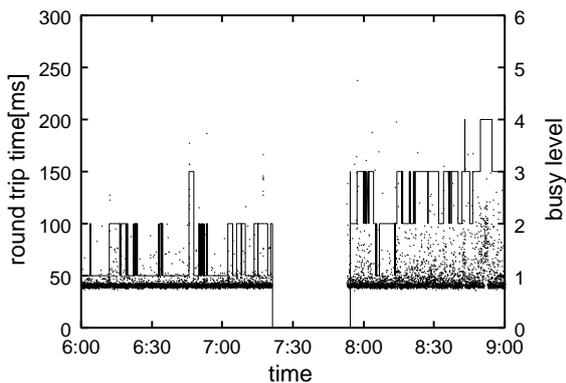


図 11: 計測データ
(富山県立大-ホスト 3 間 2005/01/24/06:00-09:00)

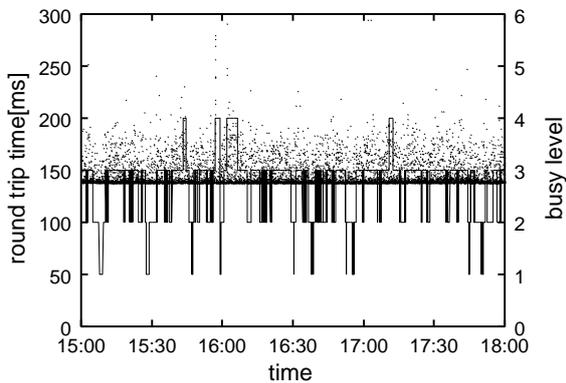


図 12: 計測データ
(富山県立大-ホスト 4 2005/06/25/15:00-18:00)

は、海外回線を経由するためともと伝送遅延時間の最小値が 60 msec と大きい値をとっている (表 3 参照) が、20:15 ~ 20:30 の間で伝送遅延時間のゆらぎが大きくなるだけでなく、その最小値が上がる形での大きな遅延が計測されている。この最小値を決めるサンプル数 n_2 を 1800 とすることで、IP パスに依存する本来の 60msec が得られ、この時間帯で高い busy level として評価できる。

相手先がホスト 3 である図 11 の計測例では、途中におよそ 40 分間の連続的なパケットロスがみられる。このパケットロスが発生する前は busy level がほとんど 1 で良好な状態であるが、この大規模なパ

ケットロスが終了したのちも遅延揺らぎの幅が大きな状態が続き、busy level が 2 ないし 3 と、大規模なパケットロスと原因が共通する現象が完全には収束していないことがわかる。

最後に米国の公開 NTP サーバを相手先としたときの busy level 評価例を図 12 に示す。伝送遅延時間の最小値が 140 msec と、今までの相手先と比べて 2 倍以上であることと、遅延揺らぎの幅がほぼ一定ではあるが大きいことが影響して busy level が多くの時間帯で 3 と評価されている。この busy level にあられるように、即時性を要求するアプリケーションを使用するためには、揺らぎ幅を抑えるための何らかの改善が必要となると考えられる。

4 むすび

ネットワークに要求される通信品質が、到達確実性の確保から、パケット伝送遅延時間またはその揺らぎが小さいことへと変化している昨今、ある IP パスでのネットワークの混雑状況に関する情報を提供する組織が多数現われている。その多くは平均伝送遅延時間やパケットロス率を評価項目としており、遅延揺らぎに関する情報提供や別の IP パスと比べての通信品質評価はなされていない。そこで、本論文では、ある IP パスにおけるネットワークの混雑状況を別の IP パスのそれと相互比較が可能となる、測定用ツールの開発及びその運用方法も含めた busy level 評価手法を提案し、実際の測定結果に基づいて IP パスの品質の相互比較を報告した。得られた busy level の数値は IP パスの往復伝送遅延時間 (RTT) を時系列にしたがってプロットした図と重なり、計測データから受ける印象を正しく数値化している。また、品質許容最大遅延時間 Q を導入することで可能となったネットワークの伝送遅延時間に関する通信品質の数値表現は、5 段階という粒度ではあるが、非常に分かりやすい情報の提供方法であると言える。

多くの実測結果に基づいて busy level 評価のための諸パラメータを算出したが、これらがどの IP パスについても適当なものであるかについては更なる

検討が必要であろう。また、計測するために IP パスに投入する試験パケットがネットワークに掛ける負荷を減らすための改善も考慮する必要がある。

今後、まずは busy level 評価数値をリアルタイムに情報提供できるよう、データ計測及び処理の一連の過程をまとめることを試みる。また、時間分解能を高めた片方向伝送遅延時間の計測を通じて、往路及び復路での busy level 評価を進めたい。最後に、ネットワークの積極的な制御のために、毎秒計測されるパケットの伝送遅延時間のデータを並行して時系列的に解析し、高い busy level が現われる時の前兆現象となる特徴的パターンの抽出を検討したい。

参考文献

- [1] 総務省, “情報通信白書平成 17 年版 第 1 章 特集「u-Japan の始動」,”
<http://www.johotsusintokei.soumu.go.jp/whitepaper/ja/h17/index.html>
- [2] “Performance Measurement Tools Taxonomy,”
<http://www.caida.org/tools/taxonomy/performance.xml>
- [3] “IETF,”<http://www.ietf.org/home.html>
- [4] “IP Performance Metrics,”
<http://www.ietf.org/html.charters/ippm-charter.html>
- [5] “The CAIDA Web Site,”<http://www.caida.org/>
- [6] “National Laboratory for Applied Network Research,” <http://www.nlanr.net>
- [7] “Next Generation IX Consortium,”
<http://www.distix.net/index.html>
- [8] “WIDE Project: Working Groups,”
<http://www.wide.ad.jp/wg/mawi/indexj.html>
- [9] “DTI Looking Glass,”<http://neptune.dti.ad.jp>
- [10] “Internet Weather,”
<http://noc.ucdavis.edu/~noc/weather.html>
- [11] “Internet Traffic Report,”
<http://www.internettrafficreport.com>
- [12] J.Postel, “Internet Control Message Protocol,” RFC-792 USC/Information Science Institute, September 1981.
- [13] K.Kobayashi and T.Katayama, “Analysis and Evaluation of Packet Delay Variance in the Internet,” IEICE Trans., vol.E85-B, no.1, January 2002.
- [14] 清水和宏, 小林香, 片山勤, “パケット転送遅延時間のヒストグラム作成最小サンプル数の検討,” 平成 16 年度電気関係学会北陸支部連合大会, E-46, 2004.