

ユーザ視点に基づいたブロードバンドインターネット環境における
遅延・パケットロスの傾向分析

吉田 薫^{†a)} 藤井 資子^{††} 菊池 豊^{†††} 山本 正晃^{††††}
永見 健一^{††††} 中川 郁夫^{††††} 江崎 浩[†]

A Trend Analysis of Latency and Packet Loss in Broadband Internet Environment
through End Customers' View

Kaoru YOSHIDA^{†a)}, Yoriko FUJII^{††}, Yutaka KIKUCHI^{†††}, Masateru YAMAMOTO^{††††},
Ken'ichi NAGAMI^{††††}, Ikuo NAKAGAWA^{††††}, and Hiroshi ESAKI[†]

あらまし この10年間に、一般家庭には安価で高速なインターネット環境が広く提供されるようになってきている。一般家庭ユーザはこうしたインターネット環境を常時利用可能であるが、その通信環境は必ずしも一定していないのが現状である。これはインターネットが常に多くのユーザに利用されており、あるユーザの利用可能帯域やコアネットワークにおけるルータ負荷などが時間とともに変化しているからであり、こうしたネットワーク状態の変化が、通信における遅延の揺らぎやパケットロスを引き起こしていると考えられる。本論文では、国内各地14拠点に設置した計測ノードにおいてそれぞれ5つのISPに接続し、それらに対してフルメッシュで遅延、パケットロス、ホップカウントの計測を行った。これにより、ISPに接続しているユーザのエンド間通信においてネットワークのどの区間に遅延の揺らぎを発生させる要因が存在しているか、またその揺らぎがパケットロス、スループットにどのような影響を及ぼすかの分析を行った。観測された遅延のゆらぎの傾向によりパケットロスやスループットに与える影響は異なっており、遅延の揺らぎが大きい場合にはパケットロスを生じやすいという結果が得られた。

キーワード インターネット計測, 通信品質, エンドユーザ, 遅延, パケットロス, スループット

1. はじめに

この10年間に、一般家庭には安価で高速なインターネット環境が広く提供されるようになってきている。一般家庭ユーザはこうしたインターネット環境を常時利用可能であるが、その通信環境は必ずしも一定し

ていないのが現状である。これはインターネットが常に多くのユーザに利用されており、ユーザの利用可能帯域やコアネットワークにおけるルータ負荷などが時間とともに変化しているからであり、こうしたネットワーク状態の変化が、通信における遅延の揺らぎやパケットロスを引き起こしていると考えられる。

ユーザの通信品質がどのようになっているかを検証するため、[1], [2]をはじめとしてエンド間の遅延、パケットロスを計測する手法が提案されている。これらの研究では、エンド間でアクティブな計測を行うことにより、その時々遅延やパケットロス測定の評価や、ネットワーク内のどの区間に問題となる部分があるかの推定を行っている。これらの研究では通信品質に影響を与える要因の多くはアクセス網にあると結論づけている。しかしながら、これらの論文で述べられているアクセス網は、実際には通信回線事業者(キャリア)によって提供される物理回線網とインターネットサー

[†] 東京大学大学院 情報理工学系研究科, 東京都
Graduate School of Information Science and Technology,
The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo
113-8656, Japan.

^{††} 慶應義塾大学 SFC 研究所, 神奈川県
Keio Research Institute at SFC, 5322 Endo, Fujisawa-city,
Kanagawa 252-8520, Japan.

^{†††} 高知工科大学, 高知県
Kochi University of TECHNOLOGY, 185 Miyanokuchi,
Tosayamada-cho, Kami-city, Kochi 782-0003 Japan

^{††††} 株式会社インテック・ネットコア, 東京都
Intec Netcore, Inc. 1-3-3 Shinsuna, Koto-ku, Tokyo 136-
0075, Japan.

a) E-mail: kaoru@hongo.wide.ad.jp

ビプロバイダ (ISP) によって提供されている IP 網から成り立っており、そのどちらに問題があるかの指摘まではなされていない。また、遅延がどのような傾向を持っているかや、遅延によって発生するパケットロスやスループットへの影響までは評価されていない。

今回の計測では、札幌、仙台、秋田、東京、富山、静岡、名古屋、大阪、広島、高知、福岡×2、佐賀、沖縄の計 14 拠点において、Flet's 光 [3] をアクセス線とした (PPP over Ethernet) PPPoE [4] セッションをそれぞれ 5 つの ISP に対して張り、それらをフルメッシュで接続しネットワークを構築した。その構成の下、それぞれのエンドノード間における遅延、パケットロス、ホップカウント計測を数週間行った。長期間の計測を行うことにより、それぞれの ISP に接続しているユーザのエンド間通信において、ネットワークのどの区間に遅延の揺らぎを発生させる要因が存在しているかをより細かいネットワーク区間に分割し解析を行った。また揺らぎはどのように発生し、どの程度傾向が持続するかの分析を行った。さらに、遅延の揺らぎがパケットロス、スループットに対して与える影響に関しても分析を行った。

本論文の構成は、以下の通りである。第 2. 節では本論文で行った計測環境について述べ、第 3. 節では今回の計測によって得られた結果を基に、ネットワークのどの区間において遅延のゆらぎが発生していたかに関する分析を行う。その後、遅延の揺らぎとパケットロスとスループットの相関性について述べる。第 4. 節で分析を基に、遅延の揺らぎ、パケットロスがネットワークに与える影響を考察する。第 5. 節ではこうした計測の関連研究について簡単に述べ、最後に第 6. 節でまとめと今後の課題について述べる。

2. 計測環境

前述のように、今回の計測では地理的に分散された日本各地の 14 拠点において、Flet's 光網を利用して 5 ISP (ISP A, ISP B, ISP C, ISP D, ISP E) を接続し、それらの間をフルメッシュで UDP エコー要求/応答型 (UDP ping) の遅延・パケットロス計測を行った (図 1)。

各計測拠点で準備した計算機 (ノード) では、PPPoE セッション毎に独立した計測用ツールにより、10 秒毎に全ての計測対象 (14 ホスト × 5ISP = 70IP アドレス) に対して連続する 3 発の計測用エコー要求パケットを送出する。エコー要求パケット (64[byte]) を受信

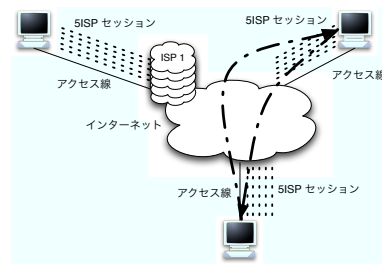


図 1 ネットワーク基本構成
Fig.1 Basic Network Construction

した対向の計測ノードでは対応するエコー応答パケット (64[byte]) を生成し、送信元に対して送り返す。エコー要求パケットを送出した時刻を送出時刻、その応答パケットを受信した時刻を受信時刻とし、受信時刻から送付時刻を引いた時間を計測対象区間の遅延時間とする。連続する 3 発の計測パケットのうち最も遅延時間の短かったものを最小遅延として記録し、1 秒以内に応答パケットを受信できなかった場合には、その計測はパケットロスとして識別する。なお、計測ノード自身が持つ IP アドレスに対して計測を行う場合には、ppp インターフェイスにそのアドレスを終点アドレスとする計測用パケットを強制的に書き込むことで ppp 対向地点との折り返し計測を行う。ある時刻に対して、その時刻の最小遅延、及びその前後それぞれ一回分の計測での最小遅延のうち最も小さい値をその時刻における移動最小遅延と定義する。以降では、移動最小遅延のある時刻における遅延とし、それぞれのネットワーク区間の遅延分析を行う。

計測用パケットサイズとして 64[byte] を採用した理由は、東京、札幌間の遅延計測において 64,512,1400[byte] で計測を行ったところ、パケットサイズを大きくするにつれ、遅延の最小値は 3[msec] 程度ずつ大きくなっていったが、遅延の揺らぎ傾向には変化がなかったため、ネットワークに与える影響が最も小さくなるものを採用したからである。また、計測期間中、各ノードでは、毎日午前、午後 6 時に計測データをサーバへ転送する以外の定期的な通信は行わず、計測用ツール以外のプロセスは起動していなかった。

3. 遅延傾向解析

PPPoE によって接続されている計測ノードが持つアドレス間の遅延計測において遅延の揺らぎを発生

させる要因がネットワークのどの区間に存在するかを把握するために、遅延の揺らぎを発生させるネットワーク区間を図2のように以下の4つに分類して解析を行った。

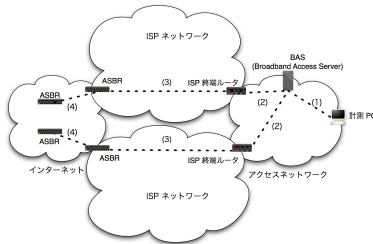


図2 遅延を発生させるネットワーク区間
Fig.2 Network Areas where latency occurs

- (1) 計測拠点 ↔ BAS 間
- (2) BAS ↔ ISP 終端ルータ 間
- (3) ISP コアネットワーク内部
- (4) 異なる ISP の接続ポイント

個々のユーザが利用する PPPoE セッションは、通常キャリアが提供するアクセス網を介してBAS(Broadband Access Server)まで到達し、BASでPPPoEの認証が行われる(図2,(1))。今回の計測では、一つの拠点から5つの異なるISPに対してPPPoEセッションを張っており、この区間の回線は全てで共有されている。認証が行われた後のユーザの通信は、常にBASで一旦終端された後、ISPが提供するデフォルトゲートウェイ(ISP終端ルータ)を経由してインターネットへの接続性が確保される(図2,(2))。ISP終端ルータは各々のISPで用意されており、ISPによって計測拠点のキャリアの近接局舎に設置されている場合や、東京、大阪といった大都市にのみ設置されている([5])場合があるが、基本的にBAS,ISP終端ルータ間の回線はISP毎に異なっている。同一のISPに接続している別のユーザとの通信は、それぞれのユーザのISP終端ルータより先、そのISPが提供するコアネットワーク内を経由することによって行われる(図2,(3))。また、別のISPに接続しているユーザやサーバと通信を行う際には、それぞれのISPコアネットワークを接続するISP接続ポイントを経由することになる(図2,(4))。なお、二つのISPが直接に接続されていない場合には、中継ネットワークに遅延の揺らぎが発生していたとしてもその場所を厳密に特定することはできない。このような状況において観測さ

れる遅延の揺らぎはISP間接続ポイントでの遅延の揺らぎとして分類する。

また今回の計測では、それぞれの区間において発生した遅延の揺らぎのパターンとして、以下の3つが観測された。

a) 周期的な揺らぎ

遅延の移動最小値が昼間は小さく夜間は大きいなどのように、計測期間をある一定の時間区間に区切ると、その区間での遅延の揺らぎが周期的に繰り返される揺らぎを周期的な揺らぎとする。今回の計測では周期的なものとしては、一日を周期とするもののみが観測された。

b) 定常的な揺らぎ

前述のような周期性を持たず、計測期間を任意の時間区間で区切った場合、どのような区間の切り方をした場合にも、定常的に観測される揺らぎを定常的な揺らぎとする。

c) 突発的な揺らぎ

周期的、定常的のどちらにも分類されず、計測期間を通じてある時間区分においてのみ観測される揺らぎを突発的な揺らぎとする。

本論文では、これらの遅延の揺らぎのパターンによって、パケットロスやスループットに対してどのような影響を与えるかの分析も行った。

3.1 計測拠点 ↔ BAS 間の遅延傾向

図3(a)は、大阪計測ノードにおける2007/11/12~12/1間のそれぞれのISPでのISP終端ルータとの折り返し遅延計測の移動最小値及び一時間毎にまとめたパケットロスの数をプロットしたものである。遅延傾向の形状は異なるが、計測期間を通じ全てのISPで移動最小遅延が最小遅延の帯(2~3[msec])より高くなっている点(≈ 10 [msec])が多数観測された。図3(b)は、図3(a)で得られた移動最小遅延を一日の周期である24時間の各一時間毎にまとめ、その標準偏差の値を算出したものである。どのISPも各時間を通して、標準偏差の値は1.5[msec]を下限としてそれ以上の揺らぎを示している。

図4は、各拠点の同一ISP折り返し計測において、前述と同様の方法を用いて各一時間毎の標準偏差を求めた後、24時間分での平均を計算し(破線形のインパルス)、更にISP Dを除く4つのISPでの平均値(箱形の棒グラフ)を計算したものである。大阪以外の全ての拠点では、4つのISPの標準偏差の平均が1[msec]以下に収まっているのに対し、大阪では、3.09[msec]

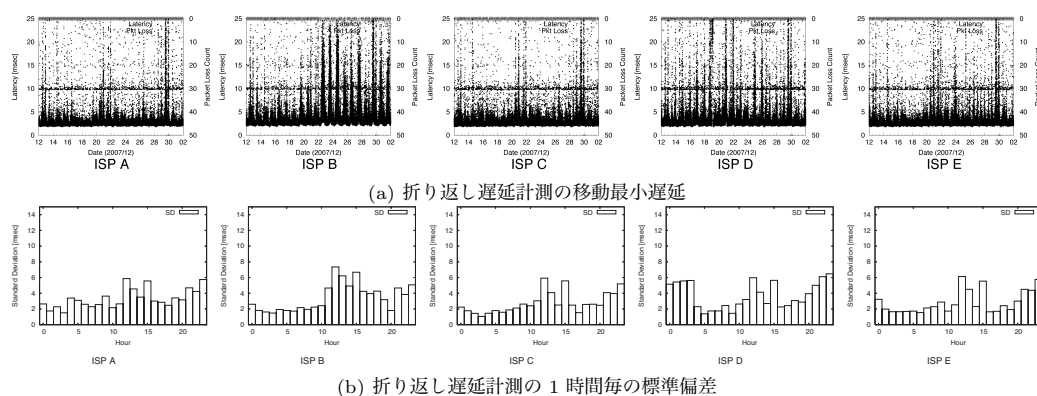


図3 大阪の同一 ISP の折り返し遅延計測 (2007/11/12~2007/12/1)
Fig.3 Loop back measurements of all ISPs at Osaka

となっており、折り返し計測の標準偏差が他拠点と比較して大きくなっているのがわかる。また、大阪以外の拠点では、ISP D を除くと、任意の1時間において標準偏差の値が1[msec]を越えることは数拠点の数時間分しか存在しなかった。ISP D を除いてこの計算を行ったのは、全拠点において ISP D の標準偏差の値が大きかったため、その値により各拠点の遅延の揺らぎが押し上げられてしまうのを避けるためである。

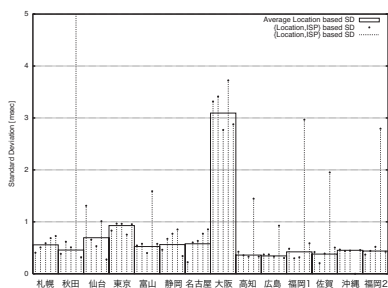


図4 地域毎折り返し計測における遅延の標準偏差 [msec]
Fig.4 Standard deviations of latency at all cities

このように、大阪の計測拠点ではどの ISP も他の拠点と比較して遅延の揺らぎが大きくなっていることから、全 ISP が回線を共有している計測拠点から BAS までの間にこの揺らぎを発生させる要素が存在すると推定することができる。また、この遅延の揺らぎは時間を問わず定期的に発生しているので、前節で述べた遅延の揺らぎのパターンとしては、定常的な揺らぎに分類することができる。大阪以外の計測拠点では、このように全ての ISP の遅延の揺らぎが同時に大きくなるという現象はどの遅延の揺らぎのパターンでも観測されなかった。

3.2 BAS ↔ ISP 終端ルータ間の遅延傾向

図5は、2007/11/12~2007/12/02間の福岡の二拠点(福岡1, 福岡2)及び高知におけるISP Dの計測ノードとISP終端ルータとの間の折り返しの計測である。ISP Dは、これらの拠点でのpppセッションの終端を大阪で行っており、折り返し計測の移動最小遅延の下限は福岡の場合24[msec]程度、高知の場合17[msec]程度である。また、それぞれの拠点のISP Dは、ppp終端アドレスの情報から福岡2と高知は11/27以降同一のISP終端ルータに接続され、福岡1は計測期間を通じてそれとは異なるISP終端ルータに接続されていることがわかっている。

福岡2(図中央)では、計測期間を通じておよそ午前0時をピークとする移動最小遅延の揺らぎが日周的傾向を持っており、同様の傾向は11/27以降の高知(図右側)でも見ることができる。一方、福岡1(図左側)では遅延の揺らぎの日周的な傾向は小さく、11/14深夜から11/16未明のおよそ一日の間に突発的な遅延の揺らぎが発生しているのが特徴的なものとなっている。同時期の福岡1, 福岡2, 佐賀それぞれにおいて、第3.1節で述べたような全ISPで似通った遅延の揺らぎの傾向を示すことはなかった。また、福岡1のISP Dで観測された突発的な遅延も福岡1の他のISPでは観測されなかったため、第3.1節で述べたような計測拠点 ↔ BAS間にはこの遅延の揺らぎを発生させる要素はなかったと考えられる。つまり、これらの遅延変化の傾向は、BAS ↔ ISP終端ルータ間で発生しているものと推定できる。さらに、11/27以降福岡2と高知では地理的に離れているにもかかわらず、遅延の揺らぎの形状が同形である。この場合には、BAS ↔ ISP終

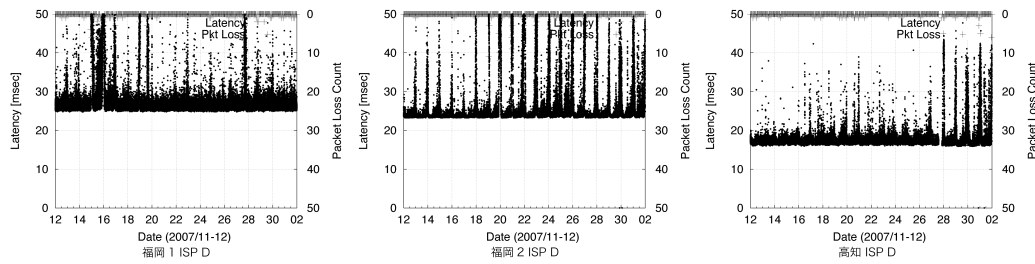


図5 福岡の二拠点及び高知における ISP D の折り返し計測
Fig. 5 Look back measurements of ISP D at Fukuoka1, Fukuoka2 and Kochi

端ルータ間でも特に ISP 終端ルータもしくはその近傍においてこの揺らぎを発生させる要因が存在していると推定できる。

このようにある拠点において、特定の ISP でのみ他の ISP と異なる遅延傾向を示すものは、周期的な揺らぎのパターンを持つものとしては ISP D で多く見られ、突発的なパターンとしては各拠点の ISP A, B, C, E それぞれで独立した時間帯に観測された。

3.3 ISP コアネットワーク内部の遅延傾向

図6は、東京拠点及び札幌拠点における ISP D の折り返し遅延計測の 2007/11/12~2007/12/1 間での移動最小遅延をプロットしたものである。東京の折り返し遅延の最小値がおよそ 5[msec] 程度であるのに対して、札幌の折り返し遅延の最小値が 37[msec] 程度となっているのは、札幌拠点から接続された ISP D の ppp セッションの ISP 終端ルータが東京に設置されているためである。

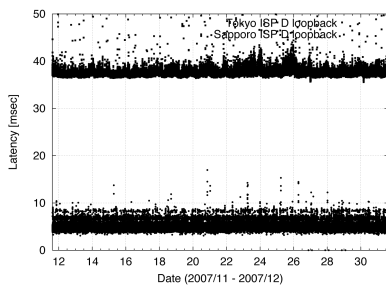


図6 東京・札幌 ISP D での折り返し遅延計測
Fig. 6 Loop back measurement of ISP D at Tokyo and Sapporo

この図を見てわかる通り、東京、札幌 ISP D それぞれの折り返し遅延計測では、定常的、周期的、突発的のどのパターンの遅延の大幅な揺らぎも計測期間を通して観測されなかった。また、東京、札幌の他の ISP の折り返し計測でも同一期間中、大きな遅延の揺らぎ

が観測されなかった。つまり、計測拠点から ISP 終端ルータまでの間には、遅延の揺らぎを発生させる要因がなかったと言える。

一方、同一期間における札幌 ISP D から東京 ISP D のエンド間での遅延計測 (図7) では、遅延傾向として午前 0 時前後をピークとする日周期的な遅延の揺らぎ及び 11/23,25 には突発的な揺らぎが発生していることが確認できる。同形の遅延の揺らぎは、札幌計測ノードの ISP D を始点とした折り返しを除く全ての計測において確認された。前述のように札幌の ISP D では、計測拠点から ISP 終端ルータまでの間にこのような遅延の揺らぎが存在していないことから、ISP D の ISP 終端ルータより先のネットワーク、つまり ISP D のコアネットワーク内部、にこの遅延の揺らぎを発生させる要因があったと推定できる。

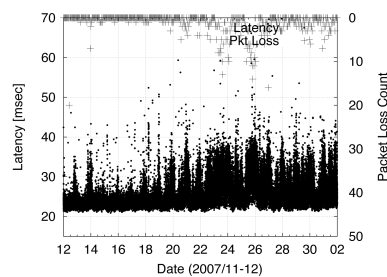


図7 札幌 ISP D から東京 ISP D への計測
Fig. 7 Latency measurement of ISP D between Sapporo and Tokyo

札幌の ISP D を除く、全拠点、ISP の同一 ISP 内エンド間の遅延計測において、このようなそれぞれの計測拠点 ↔ ISP 終端ルータ間では見られなかった遅延の揺らぎがエンド間で観測されることはなかった。

3.4 異なる ISP 接続ポイントにおける遅延傾向

今回計測を行った ISP は、全て東京に ISP 間接続ポイントを持ち、ISP C と ISP D の間には大阪にも ISP

間接続ポイントが存在した。2007/11/12~2007/12/1における東京の各ISP間の移動最小遅延の平均及びその標準偏差を表1に示す。同一ISPの折り返し区間は 5.3 ± 0.3 [msec]、異なるISP間は 7.8 ± 0.4 [msec]程度である。計測対象区間のどの部分も1 [msec]程度の標準偏差を持っており、これは同一ISPの折り返しでも同様である。つまり、折り返し区間以外に遅延変動を発生させる要素がなかったと推定することができる。

表1 東京ISP間の移動最小遅延の平均値(標準偏差) [msec]

Table 1 Averages and standard deviations of cross ISPs measurement at Tokyo

始点 \ 終点	ISP A	ISP B	ISP C	ISP D	ISP E
ISP A	5.647 (0.832)	7.709 (0.878)	7.410 (0.886)	7.492 (1.021)	8.068 (0.943)
ISP B	7.788 (0.952)	5.647 (0.966)	7.455 (0.927)	7.558 (1.104)	8.205 (1.017)
ISP C	7.462 (0.949)	7.425 (0.911)	5.679 (0.962)	7.487 (1.135)	7.720 (0.995)
ISP D	7.394 (0.999)	7.364 (1.009)	7.311 (1.087)	5.048 (0.754)	7.597 (1.025)
ISP E	7.992 (0.924)	8.022 (0.884)	7.552 (1.008)	7.615 (1.054)	5.373 (0.954)

大阪のISP C, ISP Dそれぞれの折り返し、及びISP C ↔ D間の2007/11/12~2007/12/1までの移動最小遅延を一日の周期である24時間の各一時間毎にまとめ、その平均値を算出したものを図8に示す。ISP CとISP D間の遅延は変動しているが、ISP C, ISP Dの折り返しの遅延の合算値に連動しており、ISP C ↔ D間の遅延からISP C, ISP Dの折り返し遅延を引いたものは、全日を通して5 [msec]程度で安定している。つまり、ISP CとISP DのISP接続ポイントでは、遅延値は安定しており、遅延変動を発生させる要素がなかったと推定することができる。

以上から、今回の計測では東京、大阪に存在するISP間の接続ポイントには遅延を変動させる要因はなかったと考えられる。

3.5 遅延の揺らぎに起因するパケットロス分析

前節までで述べたように、遅延の揺らぎを発生させる要因の多くは、計測拠点からそれぞれのISPのISP終端ルータまでの間に多く存在していた。本節ではその考察を基に折り返し計測における遅延の揺らぎとパケットロスの関係について分析を行う。

図9は、福岡1拠点におけるISP C, ISP D及び、

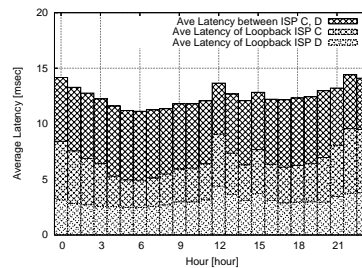


図8 大阪ISP C, D間での遅延傾向
Fig. 8 Latency trend between ISP C and ISP D at Osaka

大阪拠点におけるISP A, Bそれぞれの折り返し遅延計測における移動最小遅延の標準偏差(揺らぎ)とパケットロス数をプロットしたものである。標準偏差は、前述同様、計測期間中(2007/11/12~2007/12/1)の移動最小遅延を一日の周期である24時間の各一時間毎にまとめた後、平均を取りその標準偏差を求めたものであり、パケットロス数は各時間に観測されたパケットロス数の平均値である。福岡1のISP Cのように一日を通して遅延の揺らぎが小さい環境ではパケットロスはほぼ観測されなかった。一方、福岡1のISP Dのように時間によって遅延の揺らぎが変動する環境では、その揺らぎの小さい時間帯(福岡1の場合は午前5時から14時)ではパケットロスがほぼ観測されなかったのに対して、揺らぎが大きくなっている時間帯(夕方から夜間)にかけては、パケットロスが多く観測されている。遅延の揺らぎが大きくなると、パケットロスが発生するという傾向は周期的な遅延の変動傾向を持つISPで多く観測された。一方、東京でpppセッションの端末を行っている札幌ISP Dのように移動最小遅延が同一拠点の他のISPに比べて大きい環境であってもその揺らぎ幅が小さい場合には、福岡1のISP C同様にパケットロスはほぼ観測されなかった。つまり、ユーザ通信におけるパケットロスは遅延の絶対値そのものではなく、遅延の揺らぎと相関が強いと考えられる。

また、第3.1節で述べたように、大阪では計測拠点からBASまでの間に遅延の揺らぎを発生させる要因があると考えられるが、パケットロスの傾向はISPによって異なっていた。ISP Aでは遅延の揺らぎが5 [msec]を越える時間帯であってもパケットロスはほぼ観測されなかったのに対して、同様の時間帯にISP Bではパケットロスが観測されていた。大阪の他の

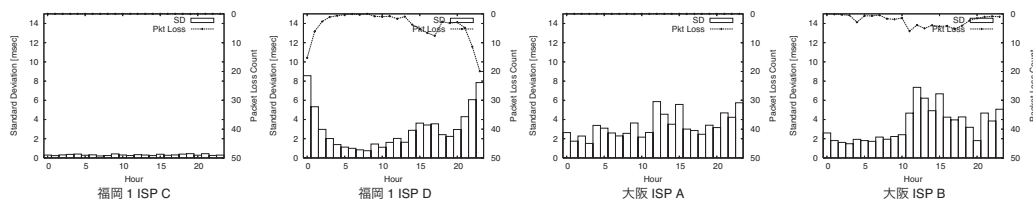


図9 福岡1(ISP C,D)及び大阪(ISP A,B)の折り返し計測における遅延標準偏差及びパケットロス

Fig.9 Latency Standard Deviations and packet losses at Fukuoka's ISP C and ISP D and at Osaka's ISP A and ISP B

ISP(ISP C, D, E)のパケットロスの傾向はISP Aとほぼ同様であったことから、計測拠点、BAS間の遅延の揺らぎではパケットロスは発生せず、ISP Bで観測されたパケットロスはBAS、ISP 終端ルータ間において発生したものと考えられる。

3.6 遅延、パケットロスがスループットへ与える影響

本節では、計測から得られた遅延の揺らぎ、パケットロスが、ユーザが実際に行う際にどのような影響を及ぼすかをスループットの観点から分析を行う。これを行うため、東京のデータセンタにWebサービスを提供する一台のサーバを用意し、各計測拠点、それぞれのISPから1[MByte]のファイルをダウンロードするのにかかる時間の計測を行った。図10は、左端から福岡ISP Bからサーバに対する、福岡ISP Dからサーバに対する、大阪ISP Cからサーバに対するそれぞれの移動最小遅延、パケットロス、1[MByte]のファイルをダウンロードするのにかかった時間をプロットしたものである。ファイルサイズとして1[Mbyte]を採用した理由は、ファイル転送時間の50%以上をTCPの最大ウィンドウサイズで行うことができ、かつネットワークへ与える影響を最小とするためである。

札幌ISP Bからサーバへの計測のように移動最小遅延が計測期間を通して安定している拠点もしくはISPでは、ファイルのダウンロードにかかる時間も安定する傾向にある。一方札幌ISP Dからサーバへ計測のように、遅延の移動最小値が変動していて、その揺らぎの大きい時間帯にはパケットロスを発生する環境では、ファイルのダウンロードにかかる時間も安定せず、特にパケットロスを多く発生している時間帯では、ファイルのダウンロードにかかる時間も正常に比べて悪くなっていることがわかる。また、大阪ISP Cのように定常的な遅延の揺らぎが発生しているネットワークでは、計測を行うタイミングによってダウンロードに

よって大きく異なっている。第3.1節で述べたように大阪では計測ノードからBASの間に遅延の揺らぎを発生させる要因がある推定され、全てのISPでダウンロードにかかる時間は安定していなかった。

4. 考察

第3.1節の結果より、あるノードから異なるノードと通信を行う際に、その通信における遅延の揺らぎを発生させる要因の多くは、それぞれのノードからそれらが接続しているISPの終端ルータまでに存在している。大阪で観測された定常的な遅延の揺らぎは、移動最小遅延の最小値に対してその増加分は5~10[msec]程度に収まっており、その揺らぎに起因すると推定されるパケットロスは観測されなかった。しかし、サーバからのファイルのダウンロードにかかる時間は試行毎にばらついており、スループットは安定していないと言える。一方、周期的、突発的な遅延の揺らぎが発生した拠点・ISPでは、揺らぎの変動度が大きいケース(最小移動遅延に対して、一時間あたりの標準偏差が5[msec]以上の揺らぎ)が多く存在し、それに伴いパケットロスも観測された。こうしたケースでは、遅延の揺らぎ、パケットロスに起因すると推定されるスループットに対する影響も観測された。

今回の計測では計測ノードは物理的に固定された場所に設置されており、それぞれの物理的な距離は変動しておらず、任意の計測区間における遅延最小値はほぼ一定した。つまり、遅延の揺らぎを発生させる要因の多くはネットワーク上に設置された機器を通過する際のキューイング遅延によるものだと考えられる。定常的に遅延の揺らぎを発生している環境では常にキューイング遅延が安定していないということであり、利用者の利用状況に対して十分な回線を提供できていないと言える。周期的な遅延の揺らぎを発生している環境では、その多くで夜間に遅延の揺らぎ幅が大き

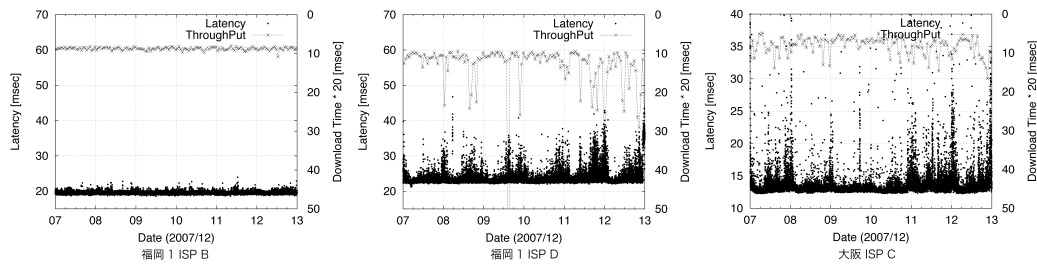


図 10 スループット計測 (2007/12/7 ~ 2007/12/12)
Fig. 10 Throughput Measurement(2007/12/7 - 2007/12/12)

くなっており, [6] で述べられているように日本のインターネットの傾向として夜間にそのトラフィックが増加することを考慮すれば, その時間帯のトラフィックを収容するのに十分な回線を準備できていないと言える。さらに, 突発的な遅延の揺らぎは発生するケースは, 定常的なトラフィックを収容するには十分な回線を提供しているが, 突発的に回線を利用しているユーザが広帯域を利用するなどによってネットワークに負荷を生じさせた場合に発生すると考えられる。

5. 関連研究

長らは, [6] において日本のインターネットの総計としてのトラフィック変動を計測している。日本のインターネットのトラフィックの傾向を知ることはできるが, 個々のユーザレベルの視点に立ったとき, どのような通信品質を得られているかということを知ることはできない。本論文では, ユーザ視点に立ち遅延, パケットロスがユーザの利用可能な帯域, 通信品質にどのような影響を与えるかに主眼をおいており, この点でこの論文とは異なる。

Csabai らは, ヨーロッパのインターネットにおいて大都市間の通信でどの区間に大きな遅延が観測されるかの測定手法を提案している [7]。本論文でも, 国内の都市間の遅延の測定を行っているが, 主目的はユーザが利用する環境の通信品質の変化を把握することであり, その遅延の大きさ自体ではなく, その遅延の揺らぎを分析の対象としている点で異なる。

神谷らは, [8] で計測ノードから特定の web サーバにアクセスしファイルをダウンロードするのにかかる時間の測定を行っている, 同時にサーバまでの traceroute を行うことで, スループットの変化を発生させる要因がネットワーク区間のどこに存在しているかの推定を行っている。この研究では, 計測ノードから一本のア

クセス線を介した測定しか行っていないため, 何ホップ目に遅延を発生させる要因が存在するかの把握は可能であるが, 具体的に, 計測ノード, BAS 間, BAS, ISP 終端ルータなどのようにどの区間に問題あるかまでは知ることができない。また, 遅延の揺らぎによるパケットロスについても調査されておらず, この点において本論文とは異なる。

[1] で立花らは異なるエンド間で遅延測定を行うことで, 遅延変動を引き起こす区間を特定する手法の提案を行っている。同手法により, 遅延の揺らぎを発生する要因の多くは ISP のアクセス線に存在すると指摘している。これは本論文と同様の主張であるが, ISP のアクセス線をさらにエンドノード, BAS, ISP 終端ルータまで分割しておらず, この点で本論文と異なる。また, この手法は遅延の揺らぎにのみ着目しており, その揺らぎに起因すると推定されるパケットロスやスループットへの変化は評価していない。

6. 結 論

本論文では, 安価で高速なインターネットを利用可能となった一般家庭ユーザの視点に基づき通信品質計測を行った, インターネットを介して通信を行う際, 実際にどのような通信品質が得られるかの分析を主に遅延, パケットロスに注目し行った。この結果, 遅延の揺らぎを発生させる要因の多くは, 計測ノードからその接続している ISP 終端ルータまでの間に存在していた。また, その区間内をより詳細に解析することにより, キャリアのアクセス網内に要因があると推定される拠点と ISP の IP 網内に要因があると推定される ISP が存在した。また, 揺らぎの発生パターンとしては, (1) 定常的, (2) 周期的, (3) 突発的な 3 パターンが観測された。また, それぞれのパターンによって, パケットロスやスループットへ与える影響は異なっ

いた。今回の計測では、定常的な遅延の揺らぎはパケットロスやスループットへ与える影響は比較的小さかったのに対し、周期的、突発的な揺らぎは、パケットロスを引き起こし結果としてスループットが低下するという現象が確認された。また、ユーザ視点に立てば、ユーザノードから ISP 終端ルータまでに遅延の揺らぎが発生する要因の多くが存在していることから、その区間より先のネットワーク上の任意のノードに対して定期的な遅延、パケットロスの計測を行うことによりその時点のネットワークの状況を推定することができると言える。

謝辞 本研究の一部は平成 19 年度総務省「インターネットのトラヒック品質に関する調査研究」事業の支援を受けています。ここに記して謝意を表します。

文 献

- [1] A. Tachibana, S. Ano, T. Hasegawa, M. Tsuru, and Y. Oie, "Locating Congested Segments over the Internet Based on Multiple End-to-End Path Measurements," IEICE Trans. Commun., vol.E89-B, pp.1099-1109, April 2006.
- [2] J.W. Byers, "Inference and labeling of metric-induced network topologies," IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst., vol.16, no.11, pp.1053-1065, 2005. Member-Azer Bestavros and Member-Khaled A. Harfoush.
- [3] FLET'S 光 東日本. <http://fleets.com>, <http://fleets-w.com>.
- [4] L.Mamakos, K.Lidl, J.Evarts, D.Carrel, D.Simone and R.Wheeler, A Method for Transmitting PPP Over Ethernet(PPPoE), RFC2516, February 1999.
- [5] 菊池 豊, 藤井 資子, 山本 正晃, 永見 健一, 中川 郁夫, "遅延計測による日本のインターネットポロジ推定," 電子情報通信学会論文誌, vol.J87-D1, no.5, pp.572-579, July 2007.
- [6] K. Cho, K. Fukuda, H. Esaki, and A. Kato, "The impact and implications of the growth in residential user-to-user traffic," SIGCOMM '06: Proceedings of the 2006 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications, New York, NY, USA, pp.207-218, ACM, 2006.
- [7] I. Csabai, P. Hága, P. Matray, G. Simon, J. Steger, and G. Vattay, "Results of large-scale queueing delay tomography performed in the etomic infrastructure," INFOCOM, IEEE, 2006.
- [8] 神谷 正人, 山崎 育夫, 川村 龍太郎, 岩下 克, "マルチレイヤプロトコル解析を用いた ISP 網運用方式の検討," Internet Conference 2002, October 2002.

(平成 xx 年 xx 月 xx 日受付)

吉田 薫

2003 年 3 月東京大学工学部電子情報学
科卒業。2005 年東京大学大学院情報理
工学系研究科修士課程修了。2005 年 4 月よ
り同博士課程在籍中。2005 年 8 月より 1
年間米国コーネル大学留学。

藤井 資子

2007 年 3 月慶應義塾大学大学院政策・
メディア研究科後期博士課程単位取得退
学。2006 年 9 月より、中央大学兼任講師。
2007 年 9 月より、慶應義塾大学大学院政
策・メディア研究科助教。

菊池 豊 (正員)

1992 年東京工業大学博士課程単位取得退
学。同年より同大学情報工学科助手。1997
年より高知工科大学情報システム工学科助
教授。2004 年より高知工科大学総合研究
所助教授、同時に(有)ナインレイヤーズ
を設立、同社取締役役に就任。地域指向型の
インターネット技術の研究を行うと同時に、地域情報化を支援
する活動に従事。2007 年より准教授。博士(工学, 東京工業大
学, 1994)。

山本 正晃

1998 年和歌山コンピュータビジネス専
門学校卒業。2002 年株式会社サイバーリン
クス入社。2007 年より株式会社インテッ
ク・ネットコアに所属し、インターネット
の品質研究に従事。

永見 健一 (正員)

1992 年 東京工業大学理工学研究科修士
課程終了。同年 株式会社東芝入社。IETF
MPLS WG で標準化活動を行い、CSR お
よび MPLS に関する RFC を提出。2002
年 株式会社インテック・ネットコア入社。
現在、同社で MPLS および次世代ネット
ワーク研究に従事。博士(工学, 東京工業大学, 2001)。

中川 郁夫

1968 年 8 月 26 日生。1991 年 東京工業
大学理学部数学科卒業。1993 年 東京工業
大学大学院総合理工学研究科システム科学
専攻修士課程終了。同年 株式会社インテッ

ク入社. 同社研究所にてネットワーク管理, 大規模経路制御技術, 次世代インターネットに関する研究に従事. 2002年 株式会社インテック・ネットワーク設立 同社取締役就任. 2005年 東京大学大学院情報理工学系研究科 博士号取得. 博士 (情報理工学).



江崎 浩 (正員)

1987年九州大学・工・電子 修士課程了. 同年 (株) 東芝 入社. 1990年米国ニュージャージー州 ベルコア社. 1994年コロンビア大学・客員研究員. 1998年東京大学 大型計算機センター・助教授. 2001年同大学大学院・情報理工学系研究科・助教授. 2005年同大学大学院・同研究科・教授, 現在に至る. 工学博士 (東京大学). MPLS-JAPAN 代表, IPv6 普及・高度化推進協議会専務理事, JPNIC 理事, ISOC 理事

Abstract During this decade, broadband Internet connectivities have been widely deployed to residential users. Even though users are able to access to the Internet through such connectivities anytime, the quality of services is not constant. This is mainly because an environment of the Internet, e.g. loads of intermediate routers, has been changing time to time. Such an environmental change causes a fluctuation of end users' quality of services. In this paper, we have measured latency and packet losses between end-to-end residential users, which are located at 14 different cities in Japan, and analyzed in which points of the Internet we observed latency oscillations and packet losses. The result shows latency oscillations affect communications' throughput and sometimes cause packet losses.

Key words Internet measurement, communication quality, end-users, latency, packet loss, throughput