

遅延計測による日本のインターネットトポロジーの推定

菊池 豊[†] 藤井 資子^{††} 山本 正晃^{†††} 永見 健一^{†††} 中川 郁夫^{†††}

[†] 高知工科大学 総合研究所

〒782-0003 高知県香美市土佐山田町宮ノ口185 高知工科大学連携研究センター 306B

^{††} 慶應義塾大学 SFC 研究所

^{†††} 株式会社インテック・ネットコア

E-mail: kyu@kikuken.org

あらまし われわれは、インターネットの通信遅延の実測値に基づき、ISPのネットワークトポロジーを推定することを試みた。本研究では、ISPのネットワークトポロジーのモデルを仮説として示し、複数ISPを利用して計測した遅延時間と利用可能な公開データに基づいて、仮説がどの程度妥当なものかの検証を行った。

キーワード ネットワークトポロジー、通信遅延、IX

Inferring the Internet topology in Japan through end-to-end latency measurement

Yutaka KIKUCHI[†], Yoriko FUJII^{††}, Yamamoto MASATERU^{†††}, Ken'ichi NAGAMI^{†††},
and Ikuo NAKAGAWA^{†††}

[†] Research Institute, Kochi University Of Technology

306B Research Collaboration Center, 185 Miyanakuchi, Tosayamada-cho, Kami-city, Kochi 782-0003 Japan

^{††} Keio Research Institute at SFC

^{†††} Intec NetCore Inc.

E-mail: kyu@kikuken.org

Abstract In this paper, we try to infer the Japanese Internet topology based on collected delay data from four ISPs. We first propose a hypothetical model of the Japanese Internet topology, then conduct the hypothesis testing using observed delay data and publicly accessible information.

Key words Network Topology, Communication Delay, Internet eXchange

1. はじめに

我々は、日本のインターネットの品質計測調査を行い、P2P型アプリケーションの通信品質を明らかにする試みを行った[1]。この結果より、計測したISPのトポロジーやISP間のトラフィック交換が、東京・大阪といった大都市を中心として構成されているという推測を行った。

これは、従来より指摘されてきていることであり、地域間格差の原因であるとの意見もある。しかしながら、ISP内のネットワーク構造や相互接続に関する情報は、通信事業者の企業秘密であり公開されることは少ない。

我々は、通信遅延が主に通信経路長に依存するという仮説を元に、ネットワーク構造と遅延との関連のモデルを考案し、さらに実測した遅延よりISPのトポロジーおよび相互接続点の構

造を推定した。

以下では、まず、計測手法を説明する。次に、トポロジーを推測するためには最小遅延を元にすることが適切であること、および遅延の主たる原因は通信路の長さによるものであることを示す。さらに実測した通信遅延より、ISPのトポロジーと相互接続関係を明らかにする。最後にまとめと今後の課題について述べる。

2. 計測手法

日本国内の5地域、札幌・仙台・東京・大阪・福岡から完全グラフ状に計測を行った。計測対象のISPは4事業者である。アクセス線は、データリンクメディアの影響を極力避けるため、光ファイバを用いたNTT東西地域会社のBフレッツサービスを用いた。

測定は ping コマンドで RTT を計測した。すなわち ICMP echo request/reply による手法で、パケット長はデフォルトの 64byte である。10 回の ping による計測を行い、この最小・平均・最大値を記録した。これを 5 分に 1 度の間隔で行っている。

この他、本計測ではスループットやパケット損失等の計測も行った。詳細は [1] を参照して頂きたい。

3. 通信遅延

本節では、通信遅延が何によって発生するかについて説明する。ブロードバンドの環境においては、通信遅延の大部分は光ファイバを進む光の進行によって起こる遅延であり、このため通信経路長にほぼ比例した値となる。

遅延は 4 つの成分からなる [2]。

- 転送遅延 (propagation delay)

入出力インターフェースがパケットの入出力を行う時間。

- 伝搬遅延 (transmission delay)

伝送路上の通信媒体を光もしくは電気信号が伝わる時間。

- 処理遅延 (nodal delay)

パケットヘッダの内容に従ってパケットの処理を行う時間。

- キューイング遅延 (queuing delay)

入出力キュー (FIFO バッファ) をパケットが通過する時間。

3.1 キューイング遅延の排除

トポロジーの推定には通信遅延のうち、最小の値を用いる。これはトラフィック量の揺らぎや輻輳の影響をさけるためである。

ルータ等の通信機器は、入出力にキューを持つ。通信量が増えるとキュー長が増え、パケットが到達して処理されるまでの時間も変化する。このため、ある 2 点間で遅延を連続して計測する場合、トラフィックの揺らぎに従った遅延の揺らぎが発生する。

連続して計測を行っている時、キュー長の長い場合も短い場合も計測される。このため、短い遅延の場合はキュー長が短い場合と推測できる。このため、長時間の測定を行った際には、最も小さい遅延がキューイングの影響を最も受けていない値となる。

3.2 伝搬遅延

キューイング遅延を除いた残りの遅延については、現在の日本のブロードバンド環境を考えると、伝搬遅延が支配的となる。

図 1 は [3] によって示された遅延の構成である。このうち、処理遅延はハードウェアの進歩により無視しうる程度になった。また、転送遅延に関しては、例えば 100baseT のインターフェースが 64byte のパケットを受け渡す時間は 5μs 程度であり、これも無視しうる。

伝搬遅延は、伝送媒体中を光もしくは電気信号が伝わる速度であり、例えば真空中の光速 3.0×10^8 m/s に対して、光ファイバ中では 2.0×10^8 m/s 程度と言われており、これは 100km を往復すると 1ms かかることになる。

これらより、ほとんどの遅延は伝搬遅延であると結論できる。(図 2)。

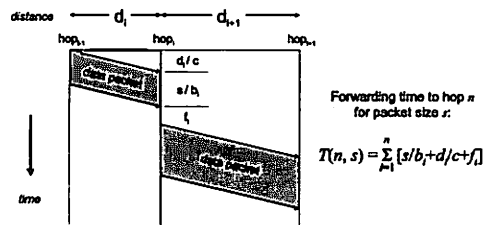


図 1 遅延のフローグラフ

Fig. 1 Flow Diagram of the Delay Model

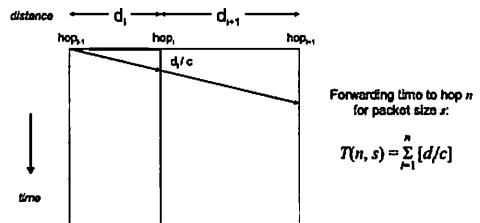


図 2 遅延の近似フロー

Fig. 2 Approximately Flow Diagram of Delay Model

4. トポロジーと遅延モデル

ここでは、まず ISP のトポロジーを分類する。つぎに、トポロジーの違いによって遅延にどのような違いが出てくるのかを示す。

4.1 トポロジーの分類

図 3 は、我々が想定した ISP のトポロジーの分類である。ここで、☆型とそれを結ぶ線は ISP のバックボーンを示している。○型とそれを結ぶ線は ISP のアクセス線、すなわち NTT 東西地域 IP 網 (フレッツ網) を示している。

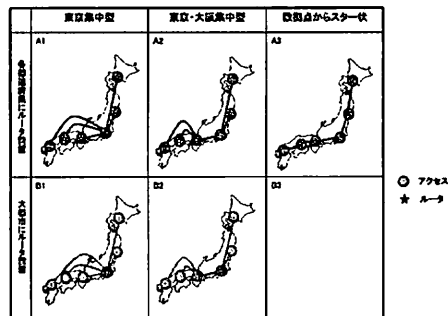


図 3 トポロジーの分類

Fig. 3 Topology Criteria

図 3 の上下、すなわち A 側と B 側との違いは、ISP がアクセス網をどのように利用しているかの違いである。上側 A1~A3 は各都道府県にバックボーンを持ち、都道府県ごとに設置した

ルータからフレッツ網に接続している構造である。下側 B1~B2 は、フレッツ網でユーザのトラフィックを集約し、ISP の用意するバックボーンが多くて東阪程度にしかない構造である。

図 3 の左右、すなわち 1~3 の違いは、ISP のバックボーンの構造の違いによる。1 は東京を中心とする場合、1 は東京と大阪との 2 箇所を中心とする場合、3 は隣接ルータを接続して接続する場合である。

なお、フレッツ網の構造から考えて、B3 に相当する構造は存在しない。

4.2 遅延モデル

エンドエンドの通信に置いて、通信はユーザを収容するアクセス網と、アクセス網を結ぶバックボーンを通過する。それぞれで発生する遅延をアクセス遅延とコア遅延と呼ぶ。

まず、ISP の構造によって遅延がどのように構成されるか考察する。図 4 は A1 型の ISP において、大阪と福岡とのユーザが通信する場合である。経路が東京を経由するため、コア遅延が福岡-東京と大阪-東京との遅延の和になることに注意して欲しい。A2 もしくは A3 型の ISP で同様の通信を行うとすると、経路が東京を経由しないため、コア遅延は A1 型 ISP より小さくなる。

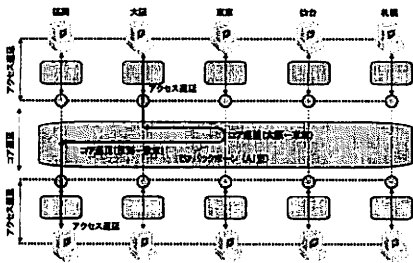


図 4 A1 型 ISP
Fig.4 A1 type ISP

つぎに、ISP 間の相互接続の状況によって遅延がどのように構成されるか考察する。図 5 は ISP-X と ISP-Y とが東京にて相互接続している場合である。この場合、経路が東京を経由するため、コア遅延が福岡-東京と大阪-東京との遅延の和になる。東京以外に大阪でも相互接続している場合、経路が東京を経由せず、コア遅延は福岡-大阪のみとなる。

最後に、バックボーンとアクセス網との接続による差異について考察する。A 型の ISP で同一地点での通信を行う場合、コア遅延として伝搬遅延がないので、遅延のほとんどはアクセス遅延で構成される。図 6 は、同じ区間の通信が B2 型の ISP で行われる場合を示している。この場合も、コア遅延は A 型同様ほとんどなく、遅延のほとんどはアクセス遅延で構成される。しかしながら、バックボーンが大阪にあるため、アクセス網で福岡-大阪を往復することになり、A 型とは遅延が大きく

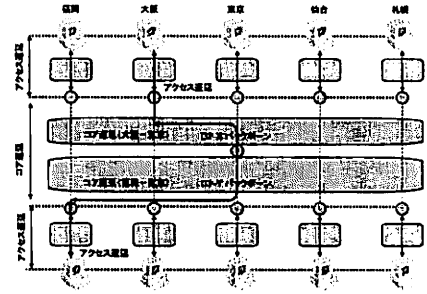


図 5 東京での相互接続
Fig.5 Peering in Tokyo

異なる。

このように、トポロジーによって遅延を構成する要素は大きく変化する。逆に、同一の区間に置いて遅延が大きく異なる場合は、トポロジーが異なっていることを推測することができる。

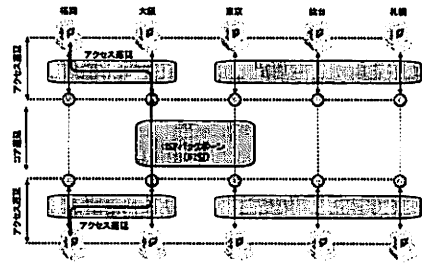


図 6 大阪での折り返し
Fig.6 Access Lines to Osaka

5. トポロジーの推測

我々の計測した遅延を表 1 に示す。分かりやすくするために、遅延が 10ms を越えるごとに色を濃くしてある。おおよそ、東京間の遅延が低く、東京からの距離が遠くなるほど遅延が大きくなっているのが分かる。これから、ISP のトポロジーと、相互接続関係を推定していく。

5.1 同一 ISP の同一地域内通信

まず、同一 ISP 間の遅延を見てみる。すると ISP-A, ISP-B, ISP-C は同一地域内では遅延が小さいことが分かる。これよりアクセス網の構成が A 型であると推定できる。

ISP-D は東京と大阪では同一地域内での遅延が小さく、札幌、仙台、福岡では同一地域内でも遅延が大きい。これより B2 型と推定できる。

ISP-A~ISP-C の同一地域内での遅延を平均することで、各

表3 トポロジーを勘案した実測値/理論値比

Table 3 Measured Delay and Theoretical Delay Ratio with Inferred Topology

計測地点	札幌				仙台				東京				大阪				福岡			
	ISP-A	ISP-B	ISP-C	ISP-D	ISP-A	ISP-B	ISP-C	ISP-D	ISP-A	ISP-B	ISP-C	ISP-D	ISP-A	ISP-B	ISP-C	ISP-D	ISP-A	ISP-B	ISP-C	ISP-D
札幌	ISP-A	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34
	ISP-B	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42
	ISP-C	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42
	ISP-D	1.35	1.35	1.35	1.35	1.47	1.47	1.47	1.47	1.18	1.18	1.18	1.18	1.20	1.20	1.20	1.44	1.44	1.44	1.30
仙台	ISP-A	1.58	1.41	1.47	1.38	1.42	1.42	1.42	1.34	1.35	1.38	1.39	1.49	1.38	1.40	1.48	1.55	1.40	1.38	1.37
	ISP-B	1.38	1.38	1.38	1.38	1.42	1.42	1.42	1.41	1.41	1.39	1.34	1.43	1.43	1.48	1.48	1.38	1.48	1.48	1.48
	ISP-C	1.33	1.33	1.38	1.38	1.45	1.45	1.45	1.34	1.40	1.38	1.35	1.43	1.37	1.41	1.58	1.42	1.48	1.48	1.48
	ISP-D	1.34	1.34	1.38	1.38	1.44	1.45	1.45	1.36	1.35	1.37	1.34	1.43	1.38	1.44	1.54	1.41	1.41	1.41	1.41
東京	ISP-A	1.37	1.33	1.33	1.33	1.41	1.34	1.31	1.40	1.40	1.40	1.40	1.48	1.30	1.32	1.45	1.39	1.39	1.39	1.39
	ISP-B	1.37	1.33	1.33	1.33	1.41	1.34	1.31	1.40	1.40	1.40	1.40	1.38	1.37	1.43	1.34	1.40	1.40	1.40	1.40
	ISP-C	1.34	1.34	1.34	1.34	1.36	1.40	1.32	1.41	1.41	1.24	1.24	1.41	1.42	1.41	1.42	1.38	1.42	1.42	1.42
	ISP-D	1.39	1.35	1.35	1.35	1.39	1.39	1.32	1.44	1.44	1.44	1.44	1.50	1.48	1.39	1.48	1.38	1.38	1.38	1.38
大阪	ISP-A	1.43	1.43	1.43	1.43	1.51	1.44	1.37	1.38	1.42	1.53	1.49	1.58	1.42	1.49	1.49	1.41	1.52	1.52	1.52
	ISP-B	1.34	1.34	1.34	1.34	1.32	1.39	1.35	1.35	1.32	1.30	1.30	1.37	1.39	1.39	1.42	1.38	1.42	1.42	1.42
	ISP-C	1.34	1.34	1.34	1.34	1.47	1.42	1.45	1.32	1.32	1.36	1.37	1.37	1.37	1.41	1.48	1.42	1.44	1.44	1.44
	ISP-D	1.30	1.38	1.38	1.38	1.48	1.48	1.47	1.45	1.45	1.40	1.42	1.38	1.43	1.49	1.41	1.44	1.45	1.45	1.45
福岡	ISP-A	1.43	1.42	1.44	1.35	1.40	1.39	1.42	1.44	1.40	1.35	1.38	1.37	1.43	1.37	1.43	1.45	1.57	1.44	1.44
	ISP-B	1.30	1.38	1.38	1.38	1.48	1.48	1.47	1.45	1.45	1.40	1.42	1.38	1.43	1.49	1.41	1.44	1.45	1.45	1.45
	ISP-C	1.37	1.38	1.38	1.38	1.46	1.49	1.41	1.38	1.40	1.39	1.37	1.43	1.41	1.45	1.44	1.43	1.43	1.43	1.43
	ISP-D	1.34	1.42	1.42	1.45	1.46	1.53	1.44	1.58	1.40	1.41	1.48	1.48	1.44	1.45	1.44	1.58	1.58	1.58	1.58

が顕著に小さく、その他の ISP の組み合わせでは大きな通信遅延が発生している。これより、ISP-A と ISP-D のみ大阪でもトラフィックを交換していること、ISP-B と ISP-C は他の ISP と大阪でトラフィック交換をしていないことが推定できる。

5.4 推定トポロジー

以上をまとめる。

- ISP-A: A2 型。ISP-B や ISP-C とは東京で、ISP-D とは東京・大阪で相互接続している。
- ISP-B: A1 型。他の ISP とは東京で相互接続している。
- ISP-C: A1 型。他の ISP とは東京で相互接続している。
- ISP-D: B2 型。ISP-B や ISP-C とは東京で、ISP-A とは東京・大阪で相互接続している。

6. 推定トポロジーの妥当性

前章で推定したトポロジーが妥当かどうかの確認を行う。これは、モデルから演繹される理論上の遅延と、計測に基づく遅延とがどの程度一致するかを調べることで行う。

6.1 伝搬遅延の推測

ほとんどの遅延は伝搬遅延であることを述べた。よって経路中の光ファイバ長がわかれば遅延を知ることができる。しかしながら光ファイバがどこに敷設されているかは公表されていない。よってここでは、高速道や国道に沿って光ファイバが敷設されていると仮定し、札幌・仙台・東京・大阪・福岡の各区間をそれぞれ、741km, 368km, 544km, 614km とした。これと、光の速度は真空中の 2/3、すなわち 2.0×10^8 m/s と仮定して算出した。

実測値と求めた伝搬遅延との比を求めたのが表 2 である。平均が 2.90 であるのに対して標準偏差が 4 を越えており、理論による推定と実際とが乖離していることを示している。表で色が付いていないマスが $\pm 0.5\sigma$ 内、色が濃くなるに従いそれぞ

れ $\pm\sigma$ 内、 $\pm 2\sigma$ 内、それ以上、を示している。

これは推定した ISP のトポロジーを勘案していない例である。これは、あえて言うと全ての ISP が A3 型であり、かつ全ての ISP 間の相互接続が各地域で行われていると仮定した場合の、理論と実測とのずれを示している。

6.2 推定トポロジーの適用

推定した各 ISP のトポロジーと相互接続点を勘案して伝搬遅延の計算を行い、実測値との比を求めたのが表 3 である。値が大きいほど実測値の方が理論値より大きくなっていることを示している。この場合、平均 1.44 に対して標準偏差が 0.28 弱であり、基本的に推定トポロジーが妥当であることを示している。

6.3 誤差の考察

ここで、理論値と実測値とのズレについて考察してみる。以下は、確認の手段がないので、あくまで推測にすぎない。

まず、比が $\pm 2\sigma$ を越える部分に着目する。これは大部分が ISP-A の仙台以南の区間に出現している。この部分は比の平均が 2.15 であり、これ以外の部分の比の平均 1.38 に比較して、1.6 倍程度の差がある。

仮定に基づいて、ここでの遅延の原因を伝搬遅延に求めると、ISP-A の用いている光ファイバは、道路距離ベースの算出に比較して 1.6 倍近い長さを持っていることになる。これは、例えば ISP-A のバックボーンが外洋を経由する海底光ケーブルを利用している可能性を示唆する。

つぎに、上述以外のズレに着目する。理論値と実測値との比は平均して約 1.38 である。これについては、道路距離を基準としていることによる誤差の他、敷設されている光ファイバが道路距離に比較して若干長いことを予想している。光ファイバは、工事等で切断・再融合するときに備えて十分な余長を取っている上、想定外の張力がかかったときに破断しないように、敷設方向に対して緩やかに波を画くように敷設されるからである。

この他には、誤差の原因とはなっていないものの、札幌と東京のアクセス遅延が大きいことについて理由が判明していない。これについては、アクセス網を集約するルータが都市中心部になり可能性や、常にトラフィックの混雑があることで最小遅延にキューイング遅延が入っている可能性を疑っている。

7. まとめと今後の課題

通信遅延の計測により、ISP のトポロジーと ISP 間の相互接続点とを推測する手法を示した。また、実際の計測により手法の確認を行った。推定したトポロジーはおおよそ妥当と考えるものの、一部に原因を特定できない遅延が存在している。

ISP 数や地域数を増やして推定の例を増やすこと、長期間にわたる測定を行い実測値の有効性を確かめることなどが、今後の課題である。

謝 辞

本研究の一部は平成 18 年度総務省「インターネットのトラフィ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] 山本正晃, 永見健一, 菊池豊, 藤井資子, 中川郁夫, “ユーザ視点からのインターネット品質計測と解析,” 信学技法 IA2007-05, vol.107, no.74, pp.23-28, May 2007.
- [2] B.Y. Choi, S. Moon, Z.L. Zhang, K. Papagiannaki, and C. Diot, “Analysis of point-to-point packet delay in an operational network,” IEEE Infocom, March 2004.
- [3] V. Jacobson, “a tool to infer characteristics of Internet paths,” , Apr. 1997, MSRI Presentation.