

広域ネットワークにおける End-to-End 遅延の解析

福田 健介[†] 高安 秀樹^{††} 高安 美佐子^{†††}

本稿では、トラフィックの自己相似性の観点から、広域ネットワーク上のいくつかの経路における遅延のダイナミクスについて測定および解析を行った。測定は、経路上の全てのルータに対して定期的に ICMP echo パケットを送信しその往復時間 (RTT) を計測するものである。

本稿で行った、RTT の統計的な解析により、パケット遅延のダイナミクスは、常に自己相似的な振舞いをするわけではなく、むしろ統計物理的な相転移現象と捉えることができることを示す。すなわち、マクロ的なパケット遅延の振舞いは、指数分布、べき分布、さらに長時間相関を持つ分布という、3つの統計的な振舞いで特徴づけられる。また、実際の遅延の解析結果が、相転移理論に基づく理論的なモデルでモデル化可能であることを示す。

Analysis of End-to-End Packet Delay in the Internet

KENSUKE FUKUDA,[†] HIDEKI TAKAYASU^{††} and MISAKO TAKAYASU^{†††}

We analyze the wide-area network dynamics from the stand point of statistical physics. In order to investigate the self-similar behaviors of network traffic, we focus on macroscopic dynamics of packet behaviors. We measure the sequences of round trip time of ICMP probe packets which are sent at regular time intervals to all routers along a path simultaneously.

Our analysis shows the existence of a phase transition phenomena in Internet packet delay dynamics. The macroscopic packet delay behavior transits between three particular statistical states, namely exponential distribution, power law distribution, and longer-tail decay distribution. Also we show the theoretical modeling, which is based on the phase transition theory, for these states fits well with the results of real observations.

1. はじめに

コンピュータネットワークにおける高精度のトラフィック測定によって、パケットトラフィックは一般的に自己相似的な性質を持つことが、明らかになってきている^{7),10)}。ここでいう自己相似性とは²⁾、(1) パケットの到着間隔分布の分散が発散し、*(2) 長時間にわたる時間相関を持つことに対応する。これらの性質は従来の電話のトラフィック等で用いられている、ポアソン過程に基づくモデルにはない性質である。ポアソン過程では、(1) パケットの到着間隔分布の分散が

有限であり、(2) 短時間にわたる時間相関を持つもののみしか表現できないことがわかっている。つまり、現実のネットワークトラフィックを、従来のポアソンモデルとして正確に取扱うことが難しいことを示している。

このような自己相似的なトラフィックに関する測定・解析・モデリングに関しては、数多く研究がなされているが^{3),4),7),9)~11),16)}、自己相似性の生成原因等については未だ良くわかっていない。

最近、Willingerらは、これらの問題に対して、構造的なモデル化のアプローチを提案しており、^{15),16)} において、Ethernet トラフィックの個々のフローの ON/OFF 分布がべき分布

$$P(> x) \propto x^{-\alpha}$$

にしたがい、それらの個々のフローの統計的な重ね合わせが、集合的なネットワークトラフィックの自己相似性を生み出すモデルに成りうることを示している。このことは、拡張された中心極限定理が理論的に成立することに対応する。しかしながら、これらのモデル化ではべき分布を始めから仮定しているため、実際に

[†] 慶應義塾大学大学院 理工学研究科 計算機科学専攻
Department of Computer Science, Graduate School of Science and Technology, Keio University

^{††} (株) ソニーコンピュータサイエンス研究所
Sony Computer Science Laboratory Inc.

^{†††} 慶應義塾大学 理工学部 未来開拓プロジェクト
"Research for Future" project, Faculty of Science and Technology, Keio University

* 分散が発散するのは無限系での話であり、実際にはサンプルが有限であることから、サンプル数を増やすほど分散の値が大きくなりうることを示している。

なぜ自己相似性が生成されるかということについては何も言及していない。

それに対して本稿では、この問題に対して、統計的な観点から見た輻輳の振舞いに注目する。コンピュータネットワークにおけるトラフィックのマクロ的な振舞いは、輻輳という観点から考えた場合には、交通流におけるマクロ的な振舞いに似ていることが指摘されている。たとえば Ethernet における測定で観測される $1/f$ ゆらぎは車の流量密度でも同様に観測されている⁸⁾。さらに交通流の場合には、渋滞そのものから自己相似的なゆらぎが生成されることが指摘されており、その生成原因として相転移現象の存在が知られている^{11),13)}。

本稿では、自己相似性を持つネットワークトラフィックのモデルとして、交通流のモデルと同様な相転移の概念が適用可能であるかどうかを検討するために、広域ネットワーク上のいくつかの経路におけるルータの振舞いを、end-to-end 遅延の観点から測定・解析する。

その結果、end-to-end 遅延のマクロ的な振舞いは、常に自己相似性を示すわけではなく、むしろ交通流に見られるような相転移現象として解釈できることを示す。これは、解析的には RTT のパワースペクトルおよび輻輳の持続時間分布は、常にべき分布 ($\propto x^{-\alpha}$) で特徴づけられるわけではなく、経路の混み具合によって、指数分布的にも、べき分布的にも、さらに裾の長い分布をにもなりうる、しかも、特別な臨界点でフラクタル的なゆらぎが見られることを意味している。これらの結果は従来の流量ベースのデータの解析結果とは明らかに異なるものであり、輻輳制御やフロー制御等に RTT を用いるようなメカニズムを構築する際には、重要になると考えられる。

本稿の構成は次のようになっている。まず、2 節で測定方法・条件について説明する。そしてその後には 2 つの統計的な解析によって、RTT のゆらぎは常に自己相似的ではないことを示す。4 節では相転移現象に関する説明および相転移現象に基づくネットワークトラフィックのモデルが実際のデータを説明可能であることを示す。そして最後に応用および今後の課題について議論する。

2. 測定

現在のインターネットの規模の大きさから考えて、すべての経路上のパケットトラフィックのゆらぎを観測することは、現実には不可能である。そのため、国内のいくつかの典型的な経路について数日間 RTT のゆらぎの測定を行った。本稿では、その中でも統計的

に見た場合に興味深い、いくつかの典型的なデータ (比較的空いている経路/過度に混んでいる経路/適度に混んでいる経路) の結果を示す。より棄却率の高い、すなわち、より混んでいると考えられる経路を選択することも可能であるが、パケット棄却率が大きくなると棄却分の影響が大きくなり、ゆらぎの統計的な性質を正しく測定・解析することが困難になるため、本実験ではそのような経路は採用していない。

今回の測定条件を表 1 に示す。また、測定方法は以下のとおりである。

- (1) 測定する経路を決定し、その経路上に存在するルータをリストアップする (この際に、経路が測定時間内で安定であり、また経路が対称であることを traceroute コマンドを用いて定期的に確認する)。
- (2) 経路上の各ルータに対して 0.1 秒ごとに ICMP echo request パケットを送信する。
- (3) その reply パケットからラウンドトリップタイム (RTT) を計算する。

これにより、各経路上のおおのこのルータごとに RTT 時系列 (288,000 点) を記録する。

ここで注意すべき点は、ICMP パケットを測定に用いている点である。ある種のルータでは、ICMP パケットはルータ内の処理の優先順位が低く設定されている可能性がある。たとえば、ルータが隣接ルータからのメッセージにより、ルーティングテーブルの更新を定期的に行う場合には、ICMP echo パケットによる RTT は低優先度のために非常に大きな値となりうる。しかしながら、本稿での目的は、輻輳のマクロ的な (統計的な) 性質を知ることであり、このような周期的な振舞いが生じたとしても、輻輳のマクロ的な解析には影響を及ぼさない。さらに、仮にルーティングテーブルの更新等の特別な処理が行われていない場合であっても、ICMP echo パケットの優先度は小さいため、キューでの正確な遅延を測定することには問題があるかもしれない。しかし、個々のパケットの RTT に注目しているわけではなく、その集合的な振舞いに着目しているため解析には問題とならない。

3. 解析

本稿では、測定結果の解析方法として、自己相似的なトラフィックの解析によく用いられている 2 つの解析方法 (パワースペクトル解析、しきい値間隔分布解析) を用いた。

3.1 パワースペクトル解析

まず、パワースペクトル解析の結果を示す前に、実

表 1 測定条件

経路	測定時刻	パケット棄却率	ホップ数
東北大学 - 福井県立大学	1997年3月12日 0:00 - 8:00	0.002 %	9
東北大学 - ソニー CSL	1997年3月24日 10:00 - 18:00	7.59 %	10
慶應大学 - 九州大学	1997年11月18日 10:00 - 18:00	2.59 %	12

際の RTT の変動がどのようになっているかを示す。図 1 および図 2 は、東京 - 九州 経路での 4 番目のルータおよび 11 番目のルータのデータである。この経路では激しく輻輳しているルータは存在していない。図の x 軸は ICMP echo request パケットの送信時間、y 軸は対応する RTT を示している。

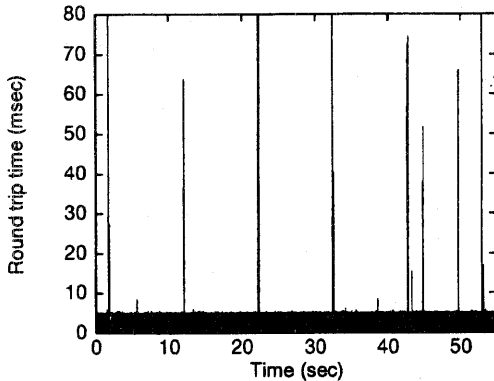


図 1 ルータ (4 番目) での RTT の変動

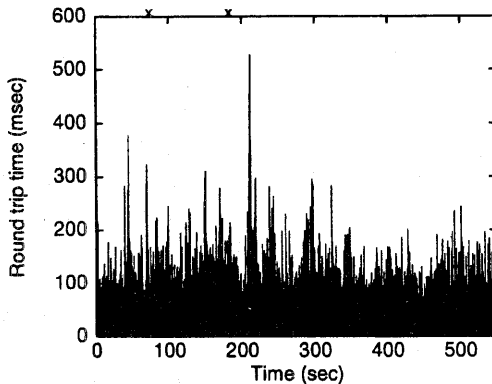


図 2 ルータ (11 番目) での RTT の変動

4 番目のルータは、パケットの送信ホストと同様に慶應大学のキャンパス内に位置しており、図 1 からわかるように、ほとんどの RTT は最小値の 5 ミリ秒に近い値となっている。しかしながら、約 10 秒おきに周期的な大きな RTT が観測されている。この周期的

な遅延は Floyd らが⁶⁾で示したルーティングメッセージの同期、またそれに伴うルーティングテーブルの計算によるものであると推測される。実際、慶應大学内では基幹ネットワークで OSPF を採用しており、その hello interval は 10 秒に設定されている。それゆえ、これらの周期的な振舞いはマクロ的なレベルでは、実際のネットワーク上の輻輳を反映するものではなく、このルータの輻輳レベルは非常に低いとみなせる。

11 番目のルータは送信ホストから約 1200km 離れた福岡に位置している。図 2 を見ると、図 1 と比較して明らかに個々の RTT がその前後の値と相関を持っていることがわかる。図 2 中の "x" はパケットが棄却されたことを示しており、このデータでは全体パケットのうち約 2.6% が棄却されている。RTT の最小値 (= 60.46 ミリ秒) は、経路上のおおまかな伝搬遅延を示しており、最小値からの変動は、経路上の全ルータでの遅延の総和を示していると期待できる。また、図 2 では周期的な変動は消えており、低優先度の処理による影響は観測されていないことがわかる。近傍に位置するルータの場合には、RTT の振舞いは一定値からの小さなゆらぎ (分散が小さい) で特徴づけられるのに対して、遠方に位置するルータの場合には、なんらかの時間相関が RTT データに生まれていることが直観的にわかる。

そこで、これらのデータのパワースペクトル解析の結果を示す。パワースペクトル $S(w)$ は、元の時系列を $x(t)$ 、その自己相関関数を $R(k)$ とすると、以下のように表現される。

$$R(\tau) = E[x(t)x(t + \tau)],$$

$$S(w) = \sum_k R(k) \exp^{-jwk}$$

一般に、 $S(w)$ が一定値になる場合は、時系列 $x(t)$ が無相関であることを示し (ホワイトノイズ)、 $S(w)$ が周波数 ($f = 1/w$) の -2 乗に比例する場合には、非定常過程、周波数 f の -1 乗に比例する場合には、自己相似的な性質 (1/f ゆらぎ) を持つことに対応する。ここでいう無相関とは、対象とするトラフィックがポアソンの性質であり、連続する RTT のゆらぎの間には相関がない。つまり、なんらかの拍子に大きな RTT が観測されるがそれはランダムに生じていることを意味している。同様に、非定常的であるということは、ユー

ザーの端末の利用の仕方(つまり人間の一日の生活リズム等)の影響が反映されていることを意味する。

前述の、図1, 2のパワースペクトルを計算した結果をそれぞれ図3, 4に示す。測定点数は、8時間データの先頭から262,144点を用いており、棄却されたパケットには観測された内で最も大きなRTTの1.5倍の値を持つとして処理している。図3, 4は両軸ともにlog-logスケールであることに注意されたい。

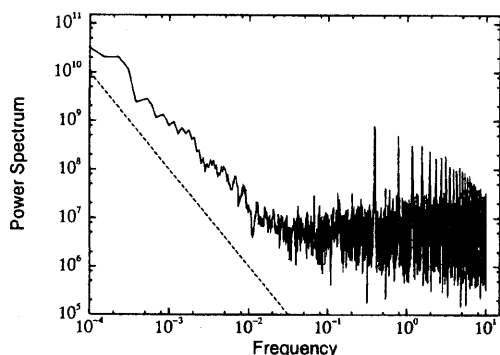


図3 ルータ(4番目)でのRTTの変動のパワースペクトル

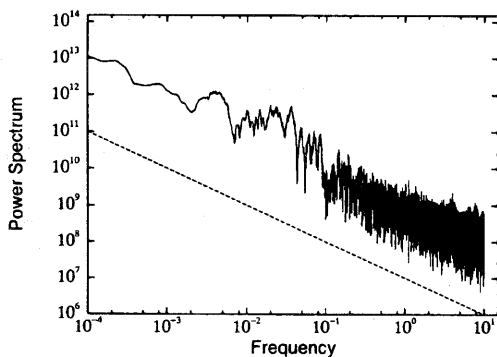


図4 ルータ(11番目)でのRTTの変動のパワースペクトル

近傍のルータでの結果は、高周波領域でのホワイトノイズと低周波領域での非定常性の重ね合わせとして捉えることができる(図3中の破線は、 $1/f^2$ に比例するものである)。つまりRTTのゆらぎに関しては、10秒より短いタイムスケール($> 10^{-1}$)では、ゆらぎは自己相似的であるというよりはむしろポアソンのであることを意味している。この場合には、たとえパケットが棄却されたとしても、それは相関がなくランダム性に由来することになると考えられる。高周波領域での、周期的なパワースペクトルのゆらぎは、前述

のルータ上での優先度の問題に起因するものであり、実際のトラフィックによる混み具合を反映しているわけではない。

近傍のルータのポアソンの振舞いに対して、集約されたトラフィックの影響を受けている遠方のルータでは、そのパワースペクトルは明らかに異なったものとなっている。図4では、パワースペクトルはほぼ周波数の逆数($1/f$)に比例していることがわかる(図4中の破線は、 $1/f$ の傾きに対応するもの)。周波数の逆数に比例するパワースペクトルを持つこのゆらぎは、一般に $1/f$ ゆらぎと呼ばれるもので、広く自然界にも見られるものである。つまり、遠方のルータに対するRTTの時系列は、統計的な自己相似性を持つことを意味している。言い換えると、RTTの変動は非常に長いタイムスケールにわたる相関を持つことに対応する。すなわち、個々のパケットに対するポアソンの独立性はもはや仮定することはできない。

このルータの違いによるパワースペクトルの遷移は、多くのルータを経由してゆく過程で、トラフィックのゆらぎが自己相似性を生成していると解釈可能である。しかしながら、ここで問題になるのは、ルータを経由することが本質であるかという点である。つまりプローブされるパケットが、単なるキューイングの方式によって自己相似性を得るのか、それとも、トラフィックの流量によって得るのかが問題となる。この流量の違いによる差異を比較するために、仙台-福井の経路と仙台-東京の経路における、同一ホップだけ離れた(9番目の)ルータに対するパワースペクトルのデータを示したものが、図5, 6である。仙台-福井間の経路では、パケット棄却はほぼ0に等しいのに対して、仙台-東京間では、SINET-WIDEを経由するため、かなりのパケットが棄却されている。図6のデータはボトルネックルータ以遠のルータに対する結果である。図5は、空いている経路での結果であるが、この結果は、図3の近傍ルータでの結果に類似したものとなっている。つまりRTTのゆらぎは自己相似的ではなく、明らかにポアソンのである。同様に混んでいる経路に関する結果もまた、常に自己相似的な振舞いを示しているわけではない。図6では、パワースペクトルは、再び $1/f$ の傾きからはずれて、高周波部分($> 3 \times 10^{-1}$)では、ホワイトノイズ的になっていることがわかる。つまり、経路が空いている場合および過度に混んでいる場合には、自己相似性は観測されず、むしろポアソンのに近似できると言える。この結果は、パケット流量に関してLelandらが⁷⁾で述べているような、常に自己相似性が成り立つという結果と

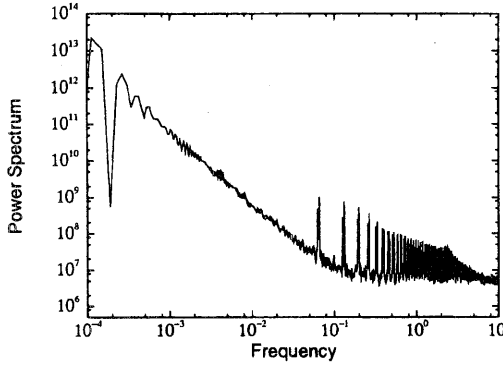


図5 仙台 - 福岡間での RTT の変動のパワースペクトル

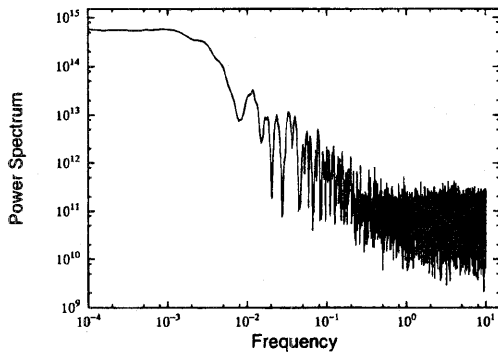


図6 仙台 - 東京間での RTT の変動のパワースペクトル

は明らかに異なるものとなっている。以上の RTT のゆらぎのパワースペクトル解析の結果をまとめると、以下の条件に当てはまる場合には、自己相似性は観測されないことがわかる。

- 対象となるルータが近傍に位置している。
- 明らかなボトルネックルータが存在する。
- 経路上のトラフィック量が非常に大きい、もしくは非常に少ない。

3.2 しきい値間隔分布解析

次に RTT 時系列の別の統計的解析手法である、しきい値間隔分布解析 (Interval Distribution of Level Sets (IDL) analysis)¹²⁾の結果を示す。しきい値間隔分布解析の目的は、輻輳の持続時間の分布がどのように表現されるかを知ることにある。解析の方法は以下のとおりである。図7も併せて参照のこと。

- (1) RTT 時系列から、二値化のためのしきい値 (x_{th}) を決定する。今回の解析では、RTT 時系列の平均 $+ 2 \times$ 標準偏差の値とした。
- (2) しきい値以上の RTT $(x_{th} \leq x(t))$ を持つタイムステップ t を輻輳状態、しきい値未満の値

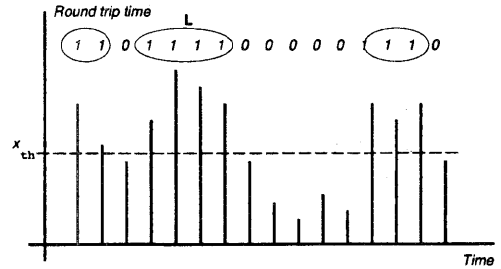


図7 しきい値間隔分布解析

$(x_{th} > x(t))$ を持つタイムステップ t を非輻輳状態と定義する。同様に棄却されたパケットは輻輳状態として扱う。

- (3) 連続する輻輳状態のタイムステップ数と時間量子ステップの積 (L) を計算する。 L は個々の輻輳の持続時間に対応する。
- (4) L の累積分布を計算する。

このしきい値間隔分布が仮に指数分布 $(P(x < L) \propto e^{-\alpha x})$ で表現される場合には、ネットワーク上の輻輳は、短時間相関を持ちランダム時間だけ持続することを意味する。それに対して、分布がべき分布 $(P(x < L) \propto x^{-\alpha})$ になる場合には、輻輳の持続分布が長時間相関を持ち、自己相似的な振舞いを示すことに対応する。

図8は、東京 - 九州 経路上のデータである。 x 軸は輻輳の長さ L を示し、 y 軸は対応する累積確率分布である (両軸とも log-log スケールであることに注意)。図中の3本のプロットは、経路上の代表的なルータ

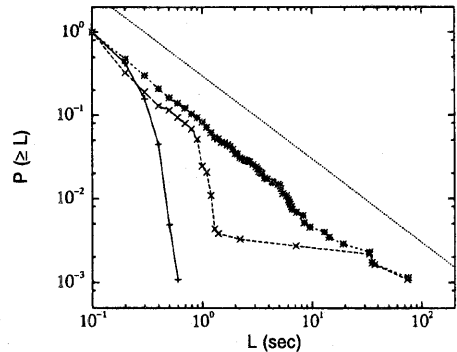


図8 東京 - 九州間での輻輳の持続時間分布

示しており、シンボル “+”, “x”, “*” はそれぞれ、4, 7, 11 番目のルータに対応している。また、図中の破線は、傾き-1 のべき分布のプロットである。図8を見てわかるように、近傍のルータでは、輻輳の持続時間

の分布は、指数関数的であり、1秒以上の長さの輻射は存在していない。つまり、非常に小さな輻射がランダム時間持続していることを意味している。それに対して、経路上のルータを通過してゆくにしたがって、分布は指数的な振舞いから、べき的なものへと遷移していることがわかる。11番目のルータでは、ほぼ、輻射の持続時間分布は、広範なタイムスケール ($10^{-1} \sim 10^2$ 秒) でべき分布 ($\propto x^{-1.0}$) となっている。これは、RTT 時系列から定義した輻射の持続が非常に長時間にわたる時間依存性を持っていることに対応し、この状態ではあらゆるサイズの輻射が存在しうることの意味している。この11番目のルータのRTTのパワースペクトル(図4)は、前述のとおり $1/f$ ゆらぎであることを示しており、このしきい値間隔分布のデータとともに、ネットワークのトラフィックのゆらぎが、自己相似的であることを意味している。しかしながら自己相似的な振舞いはどの経路、どのルータでも成立する性質ではなく、ルータを通過してゆく過程で生じていることに注意されたい。

パワースペクトルの結果と同様に、仙台 - 福井 経路(空いている経路)および、仙台 - 東京 経路(過度に混んでいる経路)のしきい値間隔分布の結果を、図9, 10に示す。図9, 10ともに、シンボル "x" は6番目

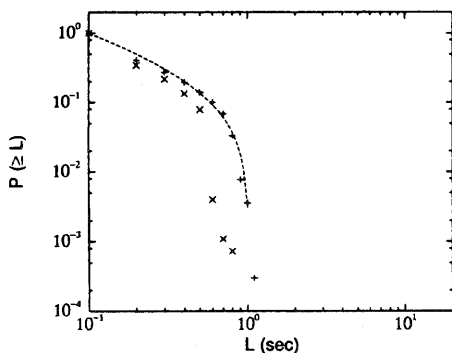


図9 仙台 - 福井間での輻射の持続時間分布

のルータ、"x" は9番目のルータを示しており、点線は後述する相転移理論に基づく理論曲線である。図9のように空いている経路では、図8の近傍のルータ同様、輻射の持続時間は指数分布で近似できることがわかる。それに対して、混んでいる経路では、ルータを経由してゆく過程で、分布が指数分布からべき分布を通り越して、より長時間相関を持つ分布へと遷移していることがわかる。図10では、少なくとも遷移の過程で、100秒以上の長さの輻射が存在している。この

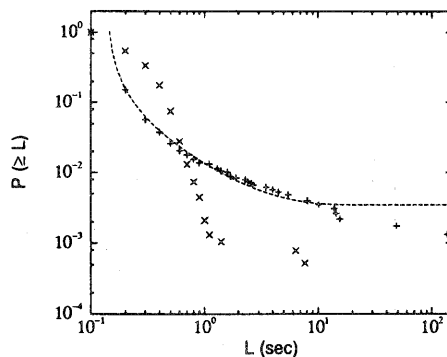


図10 仙台 - 東京間での輻射の持続時間分布

分布はパワースペクトル解析では、べき分布をはずれてふたたび低周波領域でホワイトノイズが現われることに対応すると考えられる。

理論的なモデルを作る上では、図10の9番目のルータのデータは非常に興味深いものとなっている。なぜなら従来のモデルの提案は、指数的に減衰する分布(ポアソンの確率過程)や、べき的に減衰する分布(フラクタル的な確率過程)によるものがほとんどであるが、図10のような分布を表現するには、これら既存のモデル化のみでは難しいからである。次節では、このようないくつかの分布の遷移を説明可能である、相転移の概念について概説する。

4. 相転移現象としてのネットワークトラフィック

前節では、RTT 時系列のパワースペクトルおよび輻射の持続時間分布が、経路の輻射の状況によって3つのパターンに分類できることを示した。ここでは、これらの遷移が統計物理における相転移現象に基づくモデルで表現可能であることを示す。

一般的に統計物理では、(自明でない)臨界点の周辺で、システムのマクロ的な振舞いが根本的に変化するような現象を相転移現象と呼んでおり、多くの自然現象が相転移現象で説明可能であることが示されている。そして、相転移現象が持つ重要な性質として、臨界点でシステムがフラクタル的(自己相似的)な性質を示すという点が挙げられる。たとえば、交通流の解析・モデル化では、車の流量密度 ρ が臨界点の前後にある場合には、マクロ的なトラフィックの特性として渋滞相および、非渋滞相が存在する。それに対して流量

☆ このようにシステムの振舞いを左右するミクロ的な量をコントロールパラメータと呼ぶ。

密度がある値になった場合には、つまり臨界点では、渋滞の持続時間分布に自己相似性が見られることがわかっている^{1),13)}。このように考えると、交通流のモデルを、そのままネットワークトラフィックでのモデルに適用可能であるとも考えられる。実際、図3, 4, 5で見てきたようなパワースペクトルの遷移や、図8, 9, 10のような輻輳の持続時間の分布の遷移は交通流のシミュレーション等でも見られるものである。Takayasuらによるネットワークトラフィックの相転移理論に基づくモデル¹⁴⁾では、(実際のネットワークでは測定不能な量ではあるものの)輻輳のルータ間での伝搬および解消の確率のみでネットワーク上の輻輳の時間分布をモデル化している。ここでは結果のみを示すが、一次元上の経路上に存在するルータ群を考え、そのルータ上での輻輳の伝搬、解消のレートをそれぞれ p, q とすると、輻輳の持続時間が t よりも長い確率 ($P(\geq t)$) は以下のように計算できる¹⁴⁾。

$$P(\geq t) = \frac{\delta}{1 - e^{-p\delta(t+t_c)}}, \quad \delta = 1 - \frac{r}{p}.$$

ここで、 t_c は定数であり、 δ は輻輳の生成と消滅の割合の比であり、 $\delta < 0$ は定常状態での非輻輳相を示し、 $\delta > 0$ は輻輳相を示している。図9, 10の理論曲線は実際のデータに上式をフィットさせたものである。さらに、 $\delta = 0$ の場合はちょうど臨界点に対応し、この場合の輻輳の持続時間分布は、上式より

$$P(\geq t) \propto 1/(t+t_c)$$

にしたがう。これは、持続時間分布が -1 の傾きを持つ、べき分布であることを示しており、ちょうど東京-九州経路のデータ(図7)に一致することがわかる。このようにマクロな近似ではあるものの、輻輳の伝搬・解消に基づく相転移モデルによって、RTT時系列の統計的な性質および、輻輳の持続時間分布は説明可能であることがわかる。

5. 議 論

5.1 輻輳のマクロ的な振舞い

本稿の解析結果から、経路上の end-to-end 遅延に基づく輻輳状態には、非輻輳状態の相と輻輳状態の相という2つの相転移的な振舞いが存在することがわかった。空いている経路上では、小さなサイズの輻輳が他の輻輳の影響を受けずに持続し、RTTのゆらぎはホワイトノイズ的に振舞う。これは理論モデルの上では、輻輳が他のルータに伝搬する割合が低く、しかも消滅する割合が高い場合に対応する。それに対して経路が混んでくるにしたがって、輻輳の伝搬レートが大きくなり、RTTのゆらぎに長時間相関が生じ、経

路上には徐々に大きなサイズの輻輳も生じはじめる。そして、臨界点では、理論的には系は $1/f$ ゆらぎのような自己相似的な振舞いを示す。これは輻輳の伝搬と消滅のバランスが取れている場合に対応する。実際のデータでも、東京-福岡経路では、パワースペクトルの $1/f$ ゆらぎ、輻輳の持続時間の自己相似性を観測しており、この経路ではネットワークの状態はちょうど臨界点付近の振舞いであったと考えられる。そしてさらに経路が混んでいる場合には、RTTのゆらぎおよび輻輳の持続時間分布から自己相似性が失われ、ふたたびホワイトノイズ的な振舞いとなる。これらの結果は、ルータ上の輻輳の伝搬および消滅というマクロなモデルでも非常に良くフィットしていることがわかる。

この相転移によるモデル化を考える場合に、ミクロ的な個々のパケットの転送速度とマクロ的な輻輳の持続時間のタイムスケールを考えることは重要である。個々のパケットの転送速度はミリ秒のオーダーでありRTT自身も数百ミリ秒のオーダーである。それに対して、輻輳の持続時間の分布は数秒~数百秒のオーダーとなっている。つまり統計的には個々の輻輳の持続には非常に大きな数のパケットが関与しており、個々のパケット自身の影響はほとんど関係なく、それゆえ、本稿で採っている統計物理的なアプローチは物理的な観点から見た場合にも妥当であると考えられる。

5.2 本研究の応用に関して

相転移によるモデルでは、輻輳の伝搬および消滅の比が重要な要素となっており、特にその比が等しくなる点が臨界点、すなわち自己相似性が成立する領域、となっている。つまり、臨界点ではネットワーク全体に対するパケットの流入と全体としてみた帯域のバランスが取れていることを意味する。これは、マクロ的にみたネットワークの効率が最も良い点と捉えることができ、制御する観点から考えた場合には、パケットのネットワークへの流入を臨界点に近傍になるように制御することが効率の良い制御につながることを意味している。行列理論の結果では、臨界点はキューの長さが発散する可能性が生まれる状態に対応するが、これは確率的な問題で常に発散するわけではないことに注意されたい。相転移理論の考えからすると、臨界点近傍は不安定ではあるものの効率がもっとも良い領域であると解釈できる。

今回のモデルで示したパラメータ δ は RTT や流量密度と比較すると直接的な量ではなく、相対的なものである。また実際には、 δ は直接測定可能な物理量ではない。しかしながら、経験的にサンプルから分布を同定することは可能であり、RTT や流量密度を一定

時間測定することで、現在測定しているネットワークがどのような状態にあるかを知ることができる。このパラメータはマクロ的に見たネットワークの混み具合を示している量であり、ネットワークを制御する際に粗視化された情報を表していると考えられる。現在、end-to-endでのフロー制御のためのパラメータ、および、RED⁵⁾等に代表されるキューイングアルゴリズムのための粗視的なパラメータ等に応用可能であると著者らは考えている。

5.3 今後の課題

本研究の結果と従来のパケット流量ベースの測定結果は異なるものとなっている。Lelandらの研究に代表される測定・解析では、LANにおいてもまたWANにおいても自己相似性は広く成立する結果となっている。直観的に考えると、どちらも同じような統計量を観測していると考えられるにもかかわらず、なぜ遅延に関する結果が相転移的に解釈可能で、流量に関しては相転移的ではないという結果となるのかは理由づけできていない。現在、いくつかのルータで流量の測定および同様の解析を行っており、この両者の関係を明確化することは今後の課題となっている。また、理論モデルでの重要な仮定である、空間的な輻輳の振舞いに関してはまだまだあまり良くわかっておらず、より精密な測定・解析が必要であると考えられる。

6. 結 論

本稿では、いくつかの経路上のルータに対して、一定期間ICMP echo パケットを送信し、そのRTT時系列を計測することで広域のネットワークトラフィックの遅延のゆらぎの測定を行った。本稿の主たる結果は、RTTに基づくネットワークのゆらぎの解析では、マクロ的な観点から見たネットワークの状態が、常に単純な自己相似性を持ったものではなく、むしろ統計物理で言う相転移現象として捉えられることを示した点である。これらの結果は、今後、ネットワークトラフィックのグローバルなモデル化さらに輻輳制御やフロー制御への応用が期待されるものであると考えられる。

参 考 文 献

- 1) O. Biham, A. Middleton, and D. Levin. Self organization and a dynamical transition in traffic-flow models. *Phys. Rev. A*, Vol. 46, pp. 6124-6127, 1992.
- 2) D. Cox. Long-range dependence: A review. In *Statistics: An Appraisal, Proceedings 50th Anniversary Conference*, pp. 55-74. The Iowa

State University Press, 1984.

- 3) M. Crovella and A. Bestavros. Self-similarity in world wide web traffic, evidence and possible causes. *IEEE/ACM Transaction on Networking*, Vol. 4, No. 2, pp. 209-223, 1996.
- 4) A. Erramili, O. Narayan, and W. Willinger. Experimental queueing analysis with long-range dependent traffic. *IEEE/ACM Transaction on Networking*, Vol. 4, No. 2, pp. 209-223, 1996.
- 5) S. Floyd and V. Jacobson. Random early detection gateways for congestion avoidance. *IEEE/ACM Transaction on Networking*, Vol. 1, No. 4, pp. 71-86, 1993.
- 6) S. Floyd and V. Jacobson. The synchronization of periodic routing messages. In *SIGCOMM*, pp. 33-44. ACM, September 1993.
- 7) W. Leland, M. Taqqu, W. Willinger, and D. Willson. Self-similar nature of ethernet traffic (extended version). *IEEE/ACM Transaction on Networking*, Vol. 2, No. 1, pp. 1-15, 1994.
- 8) T. Musha and H. Higuchi. The $1/f$ fluctuation of a traffic current on an express way. *Japanese J. Appl. Phys.*, Vol. 15, pp. 1271-1275, 1976.
- 9) I. Norros. A storage model with self-similar input. *Queueing Systems*, Vol. 16, pp. 387-396, 1995.
- 10) V. Paxson and S. Floyd. Wide-area traffic: The failure of poisson modeling. *IEEE/ACM Transaction on Networking*, Vol. 3, No. 3, pp. 226-244, 1995.
- 11) P. Pruthi and A. Erramili. Heavy-tailed on/off source behavior and self-similar traffic. In *ICC*, pp. 445-450. IEEE, sep 1995.
- 12) M. Takayasu. Characterization of violent fluctuations by interval distributions of level sets. *Physica A*, Vol. 197, pp. 371-378, 1993.
- 13) M. Takayasu and H. Takayasu. $1/f$ noise in a traffic model. *Fractals*, Vol. 1, No. 1, pp. 860-866, 1993.
- 14) M. Takayasu, H. Takayasu, and T. Sato. Critical behaviors and $1/f$ noise in computer networks. *Physica A*, Vol. 233, pp. 924-934, 1996.
- 15) W. Willinger and V. Paxson. Discussion of "heavy tail modeling and teletraffic data" by s.r.resnick. <ftp://ftp.ee.lbl.gov/papers/heavy-tail-discuss.ps.gz>, 1997.
- 16) W. Willinger, M. Taqqu, R. Sherman, and D. Willson. Self-similarity through high-variability: Statistical analysis of ethernet lan traffic at the source level. *IEEE/ACM Transaction on Networking*, Vol. 5, No. 1, pp. 71-86, 1997.