

# ネットワークトラフィックの自己相似性とその生成モデル

NTT 未来ねっと研究所

福田 健介

*fukuda@t.ecl.net*

## トラフィックのゆらぎかた

我々は日頃何も考えずにインターネットを利用している。ご存じの通り、ユーザやシステムがやりとりするすべてのデータ（音、画像、テキスト）はパケットに分割されてインターネット上を流れる。パケットは直接相手に専用線で届けられるわけではなく、中継ノード（ルータ）を順々に送られ相手に届く。パケットにはデータの送り元および宛先のアドレスが含まれており、経路上のルータではその宛先アドレスをもとに独自に次のルータへの経路を決定する。ルータでは個々のユーザパケットに関する細かい制御は行われず、単にパケットが転送されるだけである。インターネットのデータ転送と電話とが最も異なるのは、インターネットでは各送信者によって生成されたパケットが途中のルータで非同期に合流する（集約する）点である。これにより、自分の送ったパケットとパケットの間に、他人が送ったパケットが割り込む。

ネットワークに転送能力以上のパケットが送り込まれると、パケットはボトルネックにあたるルータで一時的にバッファに蓄えられる。つまりネットワークが混雑してくると、バッファに溜められ遅延が生じる。日々の生活では、これはクリックした画像がなかなか表示されなくなりイライラするというかたちで現れる。さらにネットワークが混雑し、バッファ容量以上のパケットが到着した場合には、IP レベルで最近到着したパケットが棄却される。このような状態が続く現象を輻輳（分かりやすくいえば渋滞のこと）と呼び、スムーズなデータのやりとりが乱される<sup>☆1</sup>。

インターネットではパケットトラフィックの制御はエ

ンド（ユーザ）側で行われており、中央集権的な制御ではなく自律分散したシステムとなっている。そのため、人工的なシステムでありながら全体としての挙動は非常に複雑で分かりにくい。たとえば、パケットを送るルール（プロトコル）は厳格に定められているが、パケットが個々のユーザ（もしくはプログラム）によって生成されるために、ユーザの挙動によってネットワークに流れるパケットの量（ネットワークトラフィック）が大きく変動する。容易に想像できるように、バックボーンにおける単位時間当たりのネットワークトラフィックは1日のうちでも大きくゆらいでおり、非常に多数のユーザの（集合的な）挙動が反映されている。図-1 は NTT 研究所ネットワークにおける 24 時間のトラフィックデータである。このネットワークには数千のユーザがおり、ユーザの生成するトラフィックが時刻とともに変動していることが分かる。たとえば、ユーザアクティビティが低い 24 時から 8 時では平均 0.25Mbps であるが、ユーザアクティビティの高い 10 時から 19 時では平均 1.25Mbps となる。

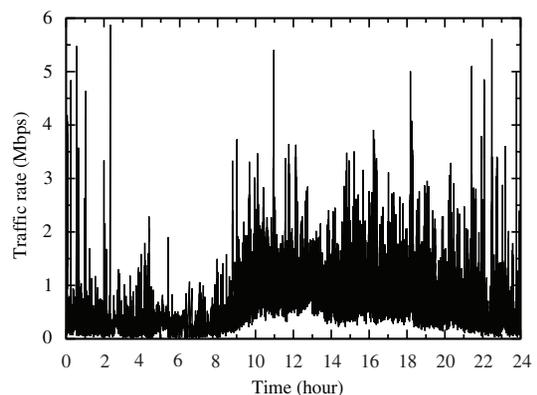


図-1 インターネットトラフィックのゆらぎ

☆1 これに対して電話では呼自体が受け入れられなくなる。

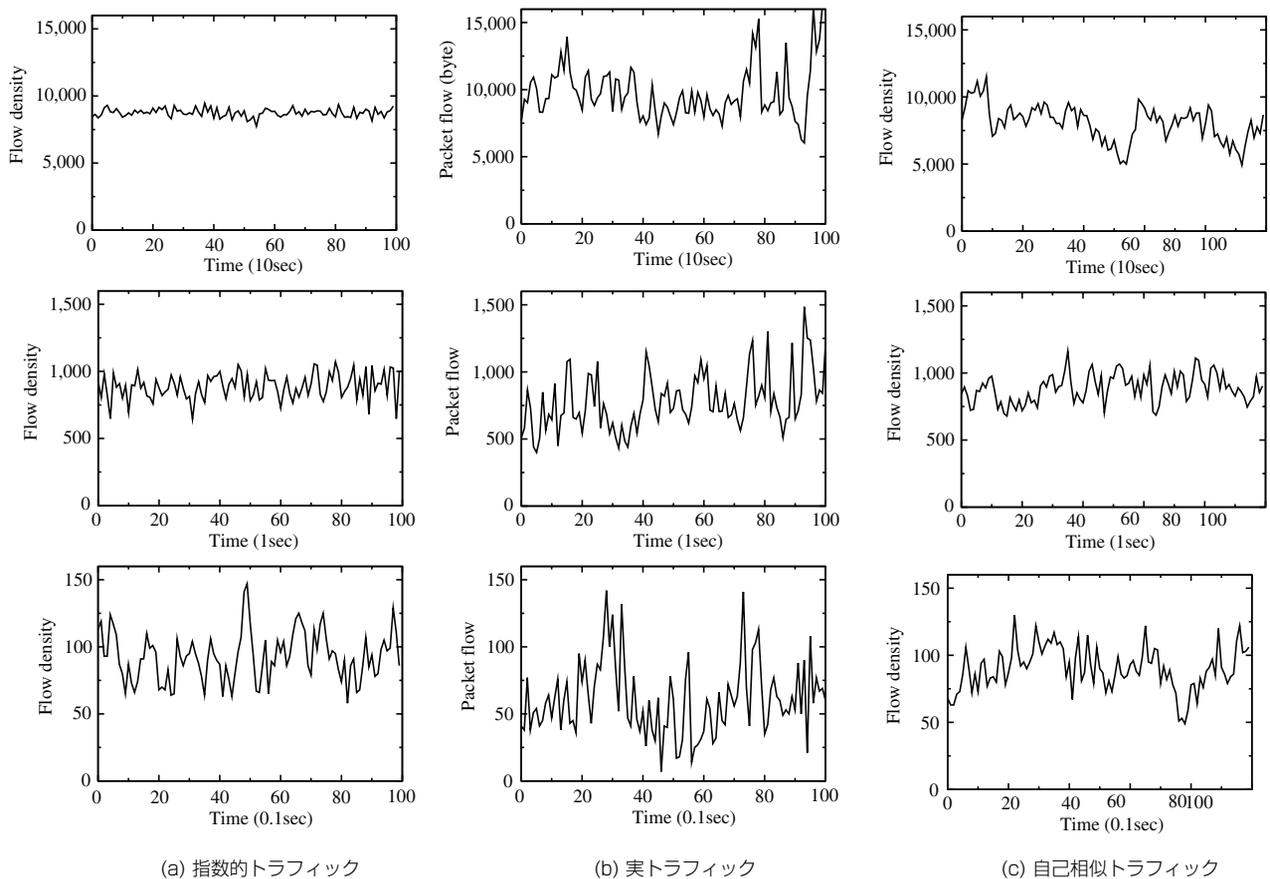


図-2 トラフィックモデルによる相違

上段のグラフは粗い時間スケール、下段のグラフは細かい時間スケールでの表示

このように時間とともにゆらぐトラフィックを統計的に解釈する試みは古くから行われていた。これはネットワークの設計や必要なバッファ容量の見積もりには必須であり、インターネット以前の電話のネットワークにおいても重要な課題であった。古典的なトラフィック理論では、トラフィックの時間変動は指数的な振舞いでモデル化できた<sup>1)</sup>。指数的なモデルでは、トラフィックは1つのパラメータ(平均)で決定され、現在のトラフィック変動量が過去のトラフィック量に依存しないか、依存しても短時間の影響しか受けないという性質を持つ。過去は振り返らずに「明日は明日の風が吹く」といえる。この指数的なモデルの大きなポイントは、大数の法則が成立することである。大数の法則とは平たくいえば、個々の時間帯の個々のユーザトラフィックにはばらつきはあるが、時間ごとに集約すると平均化されることである。この性質はネットワークを設計する側からみると非常に心強い。なぜなら、個々のフローがある時間帯に大きなゆらぎを持つとしても、集約された回線では平均化され、回線容量を効率的に利用できるからである。また、トラフィックの平均と分散をみれば、トラフィックが増加した際にパケットがどの程度の確率で棄却されるかも容易

に予測できる。

指数的な性質は電話トラフィックをうまく説明することができ、従来の研究ではインターネットトラフィックにおいても同様の性質を満たすと考えられていた。しかし、1993年 Bellcore の研究チームによるローカルネットワークのトラフィックの統計的解析によって、インターネットトラフィックは指数的な性質が成立しないことが明らかとなった<sup>2)</sup>。これがインターネットトラフィックモデリングにおける一大転機となった。図-2は、指数的なモデルによるトラフィック例 (a) および、図-1のデータの一部を抜き出したもの (b) である。それぞれ3つのサブグラフは集約する時間スケールを下から0.1秒、1秒、10秒と変更した場合のトラフィックを表している。図を見ると、指数的なトラフィックでは縮尺が変わるに従ってでこぼこがなくなるのに対して、実際のインターネットトラフィックでは時間尺度が変化しても平均化されないことが見てとれる<sup>☆2</sup>。

図-2 (b) のトラフィックパターンは、観測する縮尺

☆2 もちろんインターネットトラフィックは現実の系であり、最小の粒度と最大の粒度が存在する。

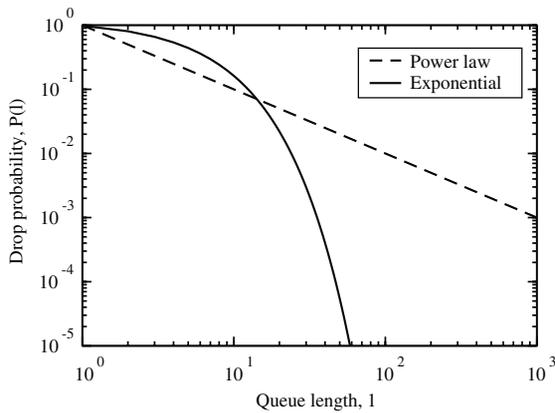


図-3 バッファでのパケット棄却確率

を変化させてもでこぼこが同じように見えることから自己相似と呼ばれる。自己相似性の広く知られた定義は、時間領域から周波数領域への変換であるパワースペクトル<sup>☆3</sup>がべき的な減衰  $S(f) \propto f^{-\beta}$ ,  $0 < \beta \leq 1$  を満たすことである。ここで、 $f$ は周波数、 $\beta$ はべき指数と呼ばれるパラメータである。 $\beta$ は元の時系列の統計的性質を表し、 $\beta > 1$ では平均が発散し $\beta > 0$ で分散が発散する。べき的減衰は、直感的には現在の事象が過去の事象に大きく影響を受けることを意味し、文献2)では実際のトラフィックがべき的減衰を示すことが報告されている。これに対し、相関のない指数的なゆらぎはパワースペクトルが一様 ( $\beta = 0$ ) となり、ホワイトノイズと呼ばれる。すなわち  $\beta = 0$  の場合、現在の事象と過去の事象には関連性がない。そして、 $\beta$ が1に近づくにつれて過去の影響を受けやすくなる。 $\beta = 1.0$ は  $1/f$  ゆらぎと呼ばれ、各種現象で広く観測されるゆらぎとして知られている。たとえば、心拍のゆらぎ、モーツァルトの音楽等が有名であり、人間が心地よく感じるゆらぎということで  $1/f$  ゆらぎを発生する扇風機も売られている。図-2 (c)は  $1/f$  ゆらぎに基づくトラフィックの変動の変化を表している。集約する時間単位を変更しても、(a)のようにトラフィックが一定の値に落ち着かないことが分かる。

### 自己相似トラフィックのインパクト

前章でみてきたように、インターネットで観測されるトラフィックのゆらぎは、ランダムではない長時間に

☆3 パワースペクトルは時系列中の各周波数成分の強度を表し、フーリエ係数の二乗平均である。

わたる時間相関を持つ。実際的な問題として、このトラフィックの自己相似的なゆらぎはインターネットを設計/制御する上でどのような影響を与えるだろうか？単純に考えると、バックボーンに集まったトラフィックが平均化されない（つまりでこぼこはでこぼこのまま）ので、ボトルネックとなるルータでのパケットの棄却確率が大きくなることが予想される。

従来の待ち行列理論では指数的な性質 — 過去に左右されずに現在の状態が決まる — を用いてトラフィックをモデル化してきた。指数的なトラフィック入力に対するバッファ長  $l$  でのパケットの棄却確率  $P(l)$  は、図-3に示すように指数的に減衰する ( $P(l) \sim \exp(-l)$ )。しかし、自己相似的なトラフィックデータを用いたシミュレーション結果によれば、その確率分布は指数関数よりも緩やかに減衰する（いわゆる heavy-tailed）分布となることが分かっている<sup>3)</sup>。この結果の意味は重要である。指数関数は一般的にシステムが典型的なサイズを持つことを表している。たとえば図-3では、バッファサイズが100以上になる確率はほぼ0であり、必要なバッファサイズのスケールが特定できる。これに対して、裾の長いべき分布  $P(l) \sim l^{-\alpha}$  では、システムは特徴的な大きさを持たずにスケールフリー的な性質を持つ。たとえば、バッファサイズの大部分（90%）は10以下であるにもかかわらず、バッファサイズが100以上になる確率は1%程度であり、1,000以上になる確率も依然0.1%程度存在する。すなわち、ルータ上のバッファサイズを大きくしても、棄却確率は劇的に小さくならない。つまり、自己相似的なトラフィックを入力とする場合には、指数的なモデル下で想定しているバッファ量よりも格段に多くのバッファを必要とする。これはネットワークの設計者にとっては悲観的な示唆である。

### 相転移によるインターネットトラフィックのモデル化

前章までに、インターネットトラフィックには自己相似的な性質があることを説明した。しかし、この性質はいかなる状況のトラフィックにも成立するのだろうか？

たとえば、ネットワークが非常に空いている場合も、輻輳下にある場合にも、同じように自己相似的な強い相関は現れるのだろうか、という疑問が生じる。

この疑問に対して、高安らはインターネットトラフィックの挙動を、相転移現象と呼ばれる統計物理的な観点からモデル化している<sup>4)</sup>。相転移現象は多くの自然

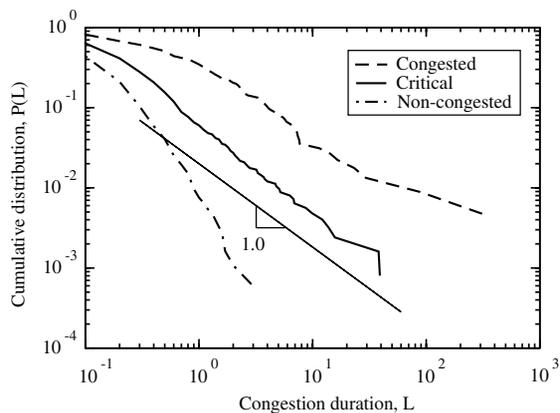


図-4 輻輳持続時間分布

現象に見られる現象で、システムのマイクロな制御パラメータがある臨界的な値を超えた場合に、システムのマクロな統計性が大きく変化する現象である。たとえば、磁石における相転移では制御パラメータである温度が臨界温度を超えると磁力がなくなる。相転移現象の興味深い点は、臨界点でシステムの振舞いに自己相似的な性質が現れることである。

インターネットトラフィックの場合、ネットワーク全体の混み具合を表す単位時間当たりのトラフィック量が制御パラメータに相当する。相転移モデルでは、トラフィック量が少ない場合もしくは過度に多い場合にはトラフィックのゆらぎは指数関数的であり、非輻輳相および輻輳相の際の臨界点に近づくともトラフィックのゆらぎが自己相似的となる。

図-4は、インターネットトラフィックの輻輳持続時間分布である。図中の水平軸は生じた輻輳の時間的長さL、垂直軸はその累積存在分布  $P(L)$  であり、このグラフは輻輳の持続時間を確率的に表したものである。ここで、輻輳とはある閾値以上のトラフィック密度とし、その輻輳状態が持続する時間（閾値を下回るトラフィック密度を観測するまでの時間）を輻輳持続時間とした。個々のプロットは、1日のうちの異なる時間帯（つまり制御パラメータの異なる）のトラフィックデータを示している。ネットワークが非輻輳相にある場合には、輻輳の持続時間は指数関数的  $P(L) \propto \exp(-L)$  となる。これは個々の輻輳の長さは短く、特徴的なサイズが存在することに对应する。それに対して、輻輳相では測定時間中のほとんどが輻輳となるため、少数の短い輻輳と測定時間規模の1つの長い輻輳からなる分布となる。この2つの分布の中間の状態では、べき的な減衰を持つ分布  $P(L) \propto L^{-\gamma}$  が観測される。 $\gamma$  は輻輳持続時間分布におけ

るべき指数である。これは、輻輳には典型的なサイズが存在せず、いろいろなサイズの輻輳があることを意味する。言い換えると、大部分の輻輳は小さいが、観測時間を大きくすればするほど長いサイズの輻輳が現れる可能性が高いことを示唆している。また、トラフィックの輻輳持続時間分布におけるべき指数は、同じデータから算出したパワースペクトル解析におけるべき指数と関係がある ( $\gamma = \beta$ )。臨界点でトラフィックは、自己相似となっているのである。つまり、相転移的な見方では、トラフィックは常に自己相似であるわけではなく、制御パラメータの値によっては指数関数的な性質も持つことに注意されたい。以上の結果の他にも、臨界点に近づくとも相関長が発散傾向にあることが示されており、ネットワークトラフィックは平均トラフィック量を制御パラメータとする相転移現象とみることができる。

さらに突き詰めると、制御パラメータはどのようにゆらいでいるのだろうか、という疑問が湧くかもしれない。これは、粗視化された混み具合がいかに変化するかということだが、直感的には我々が生活している時間帯では輻輳相、活動が少ない夜間には非輻輳相にあると考えられる。実際、インターネットトラフィックの定常性解析の結果、制御パラメータが安定している（定常性を満たす）時間の分布もまた昼夜を問わずべき分布でモデル化されることが指摘されている。すなわち、大部分の時間帯では制御パラメータは非常に細かく変動しているのに対して、時折、制御パラメータが非常に長い時間安定していることがある。興味深いことに、昼夜の制御パラメータの安定時間分布の変化を比較した場合、昼間は夜間に比べてべき指数が大きいことが分かっている。この結果は、確率的には昼間は夜間よりも安定している期間が短いことを示しており、我々の直感にも合致している。

相転移的な振舞いは、インターネットトラフィックだけでなく交通流のダイナミクスにおいても観測される。インターネット上のパケットは、高速道路上の車と見立てると、同じような振舞いとなる。主な違いは、交通流では道路自身がバッファの役割をする点と、パケットは棄却されるが車は間引かれないという点である。

### 自己相似性はどのように生成されるのか？

前章でみたように、インターネットトラフィックの挙動は相転移現象としてモデル化可能である。次の興味は、相転移現象を含む自己相似性は何を起因として生じるのだろうか？という点である。以下では、相転移現象モ

デルにおいて自己相似性を生み出す2つの要因 — バッファへの入出力, 送信者間の協調 — について説明する。

### ■バッファへの入出力

ネットワークを構成する上で最も基本的な構成要素は、ルータ・スイッチにおけるパケット用のバッファ（キュー）である。通常、パケットがルータ上に到着するとパケットは転送用のバッファに送られる。バッファ上でパケットはFIFOで処理されるため、新たに到着したものがキューの後方に置かれる（図-5）。これはルータ上のバッファを経るに従ってパケットの転送時間に非線形性が生じることを意味する。直感的にも分かるように、単位時間当たりの入力量（ $\rho$ ）が単位時間当たりの出力量（ $\mu$ ）より小さい場合（ $\rho < \mu$ ）、キュー内のパケットの数はほとんどの場合ゼロとなる。逆の場合（ $\rho > \mu$ ）では、バッファ長が無限ならばキュー内のパケット量は時間とともに増加し発散する。ただし、実際のネットワークでは、バッファサイズは有限のためパケットはルータ上で棄却される。もしパケットの到着が指数分布に従う場合、 $\rho < \mu$ では単位時間当たりの出力パケット数に関する時系列は指数的な（つまり短期的な）時間相関を持つ。入ったトラフィックがほとんどそのままのかたちで出力されるため、この結果は自明である。それに対して、 $\rho > \mu$ では出力量は常に最大となり時系列は常に一定の値をとる。では、臨界的な状態  $\rho \approx \mu$  ではどのような振舞いが観測されるのだろうか？ 待ち行列理論に詳しい方であれば、 $\rho \approx \mu$ でもバッファでのパケット長は発散すると思われるかもしれないが、実際の有限な時系列では常に発散しているわけではないということに注意が必要である。臨界状態では依然として大部分の時間のバッファ長は短かく、その出力時系列には興味深いことに自己相似性が現れる。たとえば、輻輳持続分布は  $\rho \approx \mu$ ではベキ指数0.5のベキ的減衰（ $P(L) \propto L^{-0.5}$ ）となる（図-5）。つまりバッファの持つ非線形性は、相関のない入力源から自己相似性を伴う相転移を生み出す構成要素なのである。

### ■通信者間の相互作用

単一のバッファの非線形性から臨界点において自己相似性が生成されると述べたが、このモデルには1つの問題がある。臨界点でのベキ指数の値  $\gamma$  (0.5) が観測結果 (1.0) と合わない。つまり実トラフィックの統計的な挙動は、バッファ以外の要素にも大きく影響を受けることを表している。実際、IPレベルではパケットはルータ間を転々とするだけで、パケットを送信するタイミ

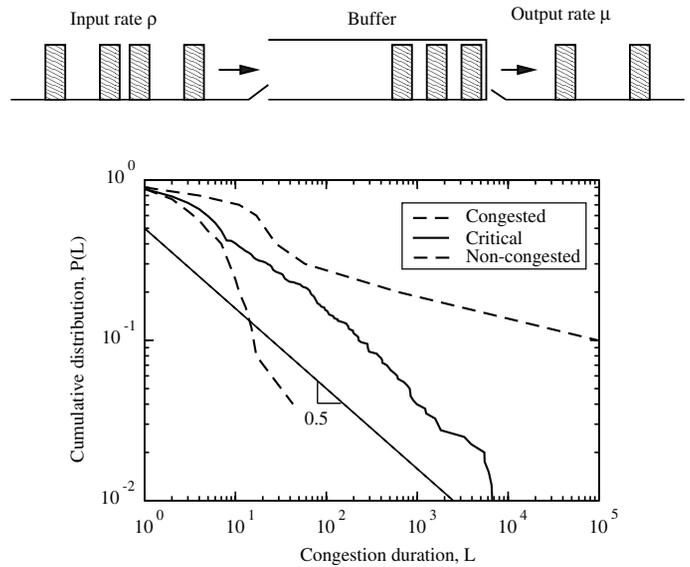


図-5 バッファの非線形性

ングや再送の処理は上位層で行われる。以下では、上位層にあたるトランスポート層プロトコルの自己相似トラフィックへの影響を説明する<sup>5)</sup>。

現在のインターネットでのエンド間のデファクトスタンダードトランスポートプロトコルはTCPである（たとえば、図-1で示したトラフィックデータのうち90%以上でTCPが使用されている）。TCP自身は15年近く改良が続けられているプロトコルであり、多くの機能が追加された結果、非常に複雑なものとなっている。TCPの機能は大きく分けると、(1) スロースタートや輻輳回避等のアルゴリズムを用いて、現在のネットワーク環境に適したトラフィック送信レートでパケットを送信する機能（輻輳/フロー制御）、(2) 信頼性確保のため、パケット棄却が生じた場合パケットを送信側で再送する機能からなる。TCPのアルゴリズムは厳密に定められているが、その全体を解析することは複雑で困難であるので、上記の2つの機能に着目した解析が行われている。以下では(1)のフロー制御に関して、ノード間でトラフィック送信量に関して協調が生まれると、トラフィックが相転移し臨界点でベキ指数1.0を持った自己相似性が現れることを説明する。

図-6 (a) はシミュレーションで用いたネットワークモデルである。送信者・受信者間の接続がノード間で確立し一定数のパケット送受信後に終了する。図はある瞬間のスナップショットを表しており、ノード1-3間に2本、ノード2-3間に1本、ノード1-3間に1本の接続が張られている。各接続の

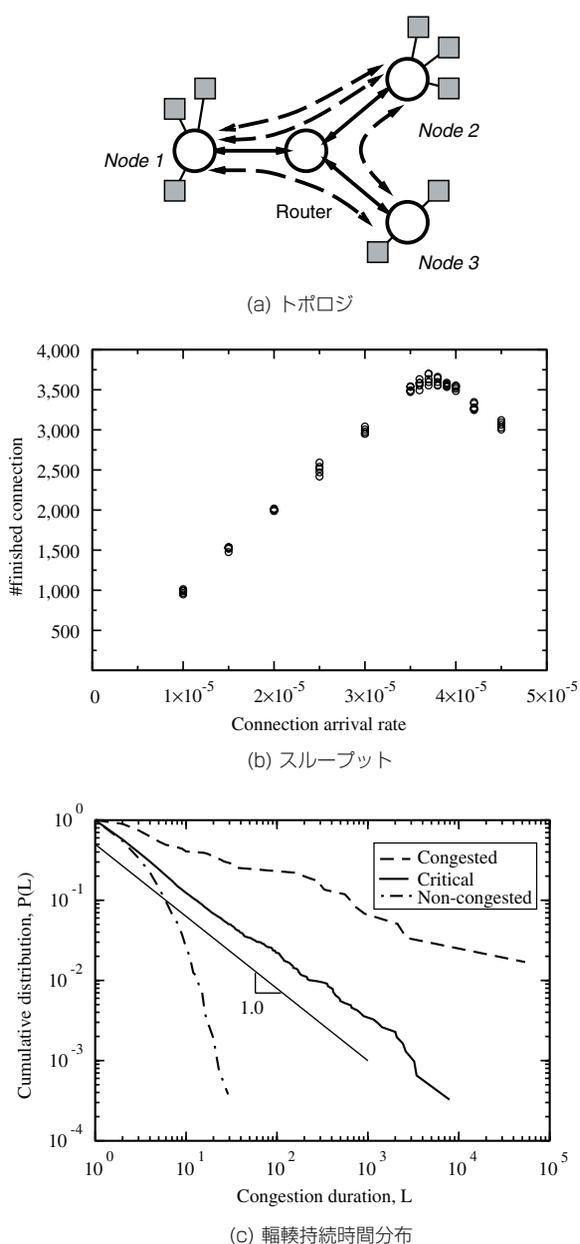


図-6 フィードバック制御に基づく相転移トラフィックモデル

フロー制御は、TCPのフロー制御を単純化したストップアンドウェイトプロトコルを用いる。ストップアンドウェイトプロトコルは、送信者がパケットを送信した後、受信者から確認応答を受け取った場合に初めて次のパケットを送信するフロー制御である。つまり、各時刻では1つの接続当たり1つのパケットのみがネットワーク中に存在する。このシステムでは、制御パラメータは接続生成レート $\rho$ であり、その生成間隔には時間的な相関はないもの(ランダム)とする。送信パケット数は固定であり到着間隔に相関がないことから、単一バッファのケースと同様に入力側に長時間相

関がないことに注意されたい。また、再送アルゴリズムを用いないため、ノードおよびルータのバッファは無制限としている。図-6(b)は、 $\rho$ が変化した場合の終了した接続数をプロットしたものである。図より $\rho < 3.75 \times 10^{-5}$ 付近までは投入した接続と終了した接続との間に線形の関係がある(非輻轉相)。それに対して $\rho > 3.75 \times 10^{-5}$ では、ネットワークが輻轉したためシミュレーションが終了するまでに終了する接続数が減少している。つまり、 $\rho \approx 3.75 \times 10^{-5}$ がこのネットワークにおける非輻轉相と輻轉相の臨界点と考えられる。

図-6(c)は、非輻轉相、臨界点、輻轉相でのリンク上を流れるトラフィック時系列の輻轉持続時間分布である。トラフィックが臨界点より低い場合には、トラフィックの統計的な性質は指数的になることがこの図から分かる。また、臨界点を越えた場合には、出力トラフィックは上限付近でほぼ一定となり、ネットワークリンクは単一の大きな輻轉に左右される。臨界点付近ではトラフィックの統計的な性質はべき的減衰となり、その指数は単純なバッファモデルとは異なる1.0に近づく。この結果から、ストップアンドウェイトモデルは、実際のトラフィックの特徴を生成するモデルであると分かる。

ストップアンドウェイトモデルでは、パケット送信レートはラウンドトリップタイムに依存している。ラウンドトリップタイムは、経路上にあるルータのバッファでの待ち時間と伝送遅延の合計である。伝送遅延はネットワークの混み具合に依存しないが、待ち時間は他の接続で生成されたパケットの影響を受ける。つまり、ラウンドトリップタイムに応じて送信レートを変更することは、他の接続と暗黙的な協調動作(これも非線形な作用である)を行い、系全体の効率を上げていると考えられる。言い換えると、(自分では気づいていないが)周りの人全体を思いやってパケットの送信を行うと、効率のよい状態(臨界点)ではトラフィックにべき指数1.0で特徴づけられる自己相似性が生まれるわけである。

このモデルが実トラフィックの統計性を説明する最小のものなのかどうか疑問を持つ方がいるかもしれない。実際、同じトポロジにおいてラウンドトリップタイムに基づかない固定レート(CBR: Constant Bit Rate)でパケットを送信しても相転移は生じるが、臨界点でのべき指数は0.5となる。これは単一のバッファによる効果がそのまま反映したものと解釈できる。つまり、他者への思いやりなしでパケットを送信するとべき指数は1.0とならないわけである。また、ノード数が3のスター

状の配置であることに意味があるかであるが、ノード数3以上のトポロジでは、ノード数3の場合と同じ統計的な性質が得られることが示されている。しかし、ノード数2の場合には、ストップアンドウェイトアルゴリズムを使用しても、臨界点での指数はやはり0.5にしかない。これは、2つのノード間のラウンドトリップタイムが第三者のノードから送信されるパケットによって割り込まれるためゆらぎが生成されていることを示している。もちろん、3番目のノードから見れば、自ノードもフィードバックによってレートを制御しているので、ノード間で均等に他のノードのトラフィックの影響を受けていることになる。

(2)のTCPの再送機構自身についても、指数バックオフ<sup>☆4</sup>による効果によって、ベキ指数が変化するという報告がなされている<sup>6)</sup>。また、Ethernet (CSMA/CD)でも同様の結果が報告されているが、この場合には、ラウンドトリップタイムによるフィードバックがない代わりに、送信者間のパケット送信の競合および指数バックオフによる競合解消が主たるメカニズムとなっている<sup>7)</sup>。

## ネットワークの効率

相転移現象の観点からネットワークの効率を考えてみると、単一バッファやTCPのシミュレーションから明らかかなように、臨界点のリンク使用効率が一番高いことが分かる（これは輻輳相・非輻輳相の際だから当然である）。つまり、トラフィックが臨界点付近にとどまるよう制御することが、使用効率の点では望ましいと考えられる。非常におおざっぱに考えると、ネットワークが空いていると、ユーザは「空いてるから気兼ねなくもっと使おう」というフィードバックが働きトラフィックが増える方向にある。また、ネットワークが混んでいる場合には、「なかなかつながらないから使うのをやめよう」という負のフィードバックが働きトラフィックが減る方

につながる。システムレベルでも、空いている場合にはTCPはリンク帯域を埋めるよう送信レートを増加させ、混んでいる場合にはレートを下げる。さらには、インフラ的には過度に混んでいるリンクはより帯域の大きなリンクに変更される確率が高い。このように考えてみると、我々の使っているネットワークは比較的臨界点に近づきやすいと考えることもできる。これは、多くの測定ポイントで比較的自己相似性が観測されやすいという事実からも裏づけられる。

ただし、現実には広域ネットワークにおいても、制御パラメータ（平均トラフィック量）自身がゆらいでおり、常に臨界的な状態にとどまっていない。そのため、今後は臨界点近傍にトラフィックの状態を制御できるようなネットワークの設計やプロトコルの改良が望まれる。今までの研究では、解析によるトラフィックの統計的な特徴付けや統計性の生成メカニズムの探求に重きが置かれてきたが、近年、自己相似性を示すトラフィックの制御と予測に関する提案も行われ始めている。制御と予測における困難な問題は、ネットワークの局所的な制御によってあるリンクが臨界点に近づいたとしても、系全体として効率がどうか不明であるという点である。しかし、将来的にはルータレベルや端末レベルの制御において各種知見を組み合わせることで、系全体としてネットワークをより効率よく使うことが可能となるかもしれない。

### 参考文献

- 1) Kleinrock, L.: Queueing Systems, John Wiley & Sons, New York (1975).
- 2) Leland, W. E., Taqqu, M. S., Willinger, W. and Willson, D. V.: On the Self-Similar Nature of Ethernet Traffic, IEEE/ACM Transactions on Networking, 2, pp.1-15 (1994).
- 3) Park, K. and Willinger, W. (ed) : Self-Similar Network Traffic and Performance Evaluation, John Wiley & Sons, New York (2000) .
- 4) Takayasu, M., Takayasu, H. and Fukuda, K.: Dynamic Phase Transition Observed in Internet Traffic Flow, Physica A, 277, pp.248-255 (2000).
- 5) Fukuda, K., Takayasu, M. and Takayasu, H.: Minimal Model of Internet Traffic, Proc. of Traffic and Granular Flow 01, pp.389-400 (2001) .
- 6) Feldmann, A., Gilbert, A. C., Huang, P. and Willinger, W.: Dynamics of IP Traffic: A Study of the Role of Variability and the Impact of Control, Proc. of SIGCOMM 99, pp.301-313 (1999).
- 7) Fukuda, K., Takayasu, M. and Takayasu, H.: Origin of Critical Behavior in Ethernet Traffic, Physica A, 297, pp.289-301 (2000).

(平成16年4月30日受付)

☆4 パケット棄却が起きるたびに指数的に再送時間を伸ばすアルゴリズム。