

自己相似トラフィックにおける TCP の寄与について

Self-similar Traffic Originating in the Transport Layer

福田健介* 高安秀樹† 高安美佐子‡
Kensuke Fukuda Hideki Takayasu Misako Takayasu

本研究では、ネットワークトラフィックで観測される自己相似性が、TCP のどのような機構によって生成されるかを明らかにするためにシミュレーションによる解析を行った。我々はまず、単純な分岐を持つトポロジにおいて、TCP コネクションの到着率がある率（臨界点）に達すると、ネットワークトラフィックに自己相似性が現れることを示す。しかしながらこの自己相似性は、トラフィックの持つ普遍的な性質ではなく、その統計的な挙動は、むしろ非輻輳相、輻輳相の間の相転移モデルとして捉えることが自然であることを示す。様々なトランスポートプロトコルを用いたシミュレーションを通して、TCP の基本的なアルゴリズムである確認応答に基づく単純なフロー制御が、ネットワークで観測される自己相似性の原因として、本質的な役割を果たしていることを明らかにする。

1 はじめに

近年インターネットトラフィックの統計的解析によって、ネットワークトラフィックの時間変動が自己相似性を持つことが指摘されている [7, 10, 1]。ここでいう自己相似性とは、トラフィックの時間ゆらぎが観測するタイムスケールによらないことを意味する。つまり、バースト性を持ったトラフィックは、時間の粒度を粗くしても、バースト性が失われないという性質を持つ。自己相似性を持つトラフィックの持つ重要な性質として、従来のポアソン過程を基本とする単純化されたトラフィックに比べて、バッファ入力時の待ち行列長の発散が起きやすくなることがわかっている [9, 2]。

しかしながら、最近、この自己相似性は必ずしも常に成立する性質ではなく、どちらかと言えば、統計物理で知られている相転移現象 [12] と捉えることが自然であるという指摘がされている [14, 5, 13, 4]。相転移モデルでは、ネットワークの状態を自明ではない臨界点を挟んで非輻輳相と輻輳相に分け、その臨界的な状態でのみ、自己相似性が成立するという立場をとる。自己相似性もしくは、自己相似性を内包した相転移現

象で特徴づけられるネットワークトラフィックがどのようにして生成されるのかを解明することは、将来のネットワークや、フロー制御の設計には必要なプロセスであると考えられる。実際、ここ数年の研究によって、ネットワークを構成する様々な要素が、それぞれ、自己相似性を生成する要因になっていることが指摘されている。

例えば、アプリケーション層では、アプリケーションが取り扱うファイルサイズの影響が指摘されている。ファイルシステム中のファイルサイズの分布や、web サーバ中に存在するファイルのファイルサイズ分布は、それ自体、自己相似性を持っていることがわかっている [1]。また、データリンク層では、イーサネットリンク上でのパケットの衝突および、その際の指数バックオフが自己相似性を生成する要因となっている [6]。同様に、ネットワーク層およびトランスポート層でも、単純な ARQ の再送の効果が自己相似性を作り出しているというシミュレーション結果が出ている [11]。Feldmann らは、TCP の確認応答パケットの圧縮が自己相似性の原因となっていることを指摘している [3]。ただし、イーサネットのシミュレーション結果以外の原因は、自己相似性の原因とはなるものの、常に自己相似性が成り立つことを暗黙的に仮定しており、相転移の概念が含まれていない。また、自己相似性が成立している場合の、べき分布の指数

*NTT 未来ネットワーク研究所. NTT Network Innovation Laboratories

†ソニーコンピュータサイエンス研究所. Sony Computer Science Laboratories

‡公立はこだて未来大学. Future University Hakodate

に関する議論にも触れられていない。

本研究では、現在広く利用されているトランスポートプロトコルである TCP の自己相似トラフィックへの寄与を解析する。TCP は、実際には、種々のアルゴリズム要素から成り立っており、我々ははその機能を部分に分離することで、その最小モデルを求めるアプローチをとる。興味ある機能部分は大きく分けると以下の 2 つである。

- フロー制御
- 再送処理

フロー制御は、単純な確認応答を基本に、スロースタートや輻輳回避アルゴリズムに代表される機構を用いて、ネットワークの帯域状況を判断し、適切なレートでパケットをネットワークに送信する。また、再送処理としては、TCP は信頼性のある通信を提供しているため、タイマを利用した機構を用意している。

シミュレーションは、トポロジによる影響を排除するために、単純な分岐構造を持つネットワークトポロジで行った。本論文では、まず、TCP フロー群によって生成されたトラフィックが、実際に観測されるトラフィックと同様に、相転移現象として捉えることができることを示す。そして、臨界点では、観測と同じべき分布の指数を持つ自己相似性が観測されることを示す。次に、シミュレーションから、パケット落ちさらには再送タイマのタイムアウトによる再送がない場合でも、相転移現象が観測されることを明らかにする。同様に、TCP を単純化した stop-and-wait プロトコルでも相転移は生じ、パケット送信の際のレートの変更方式にも依存しないことがわかった。一方、ネットワークの状態に応じたフロー制御の仕組みを持たない、CBR 方式では相転移は生じるものの、臨界点でのべき分布の指数が、実トラフィックのそれとは異なることを示す。最終的に、トラフィックの方向が非対象な場合のシミュレーションから、self-clocking している確認応答パケットが、他のコネクションからのパケットによって割り込まれる効果が、実トラフィックで観測される自己相似性の生成に主たる役割を果たしていることを明らかにする。

2 シミュレーション設定および解析方法

2.1 シミュレーション設定

シミュレーションは、ns-2 を用いて図 1 に示すような単純分岐を持つ 3 つのホストと 1 つのルータからなるトポロジで行った。各ホストは、

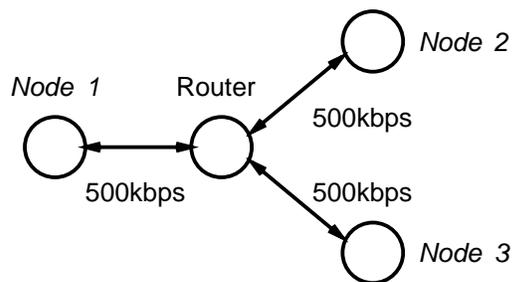


図 1: シミュレーショントポロジ

自ホスト以外のホストと TCP による通信を行い、1 つのホスト上では、複数の TCP コネクションを張ることが可能である。1 つの TCP コネクションでは、送信元ホストが送信先ホストに 100 パケットを送信するとコネクションは終了する。なお個々のパケットのサイズは固定である。個々のホストに対するコネクションの開始要求は、平均 r connection/sec で生じ、その到着時間分布は、ポアソン過程にしたがうものとする (コネクションは任意の 2 ホスト間で行われる)。つまり、コネクションの到着や、転送パケット量などの、アプリケーション依存の要素は、全て長時間相関を持たないことを仮定している。本研究では、この平均到着時間 r が変化した場合の、各種物理量の時間変化に着目する。

ルータおよび、ホストのバッファサイズは、シミュレーションの仮定によって変更しているが、ほとんどのシミュレーションでは、800 パケットとしている。これは、実際のホストやルータのサイズに比べて、大きなものとなっているが、解析時に自己相似性および相転移現象をより鮮明に識別するためにこのような値としている。また、バッファが許容量を越えたパケットを受け取った場合には、そのパケットは単に破棄され

るものとする。

1回のシミュレーションは、3600秒シミュレーション時間を行い、一つのシミュレーションあたり、8回の試行を行った。

2.2 解析方法

本研究では、ネットワークの挙動のうち、2つの物理量に注目する。一つは、ルータの出力バッファ内のパケット数の時間変動であり、もう一つは、ルータからリンクに送信されたパケットの時間あたりの変動である。バッファ内のパケット数の時間変動は、ある時間 t にバッファ内のパケット数が0となり、再び時間 $t+L$ にパケット数が0になるまでの再帰時間 L の分布を解析する。これは、ルータのバッファ内にパケットがどの程度溜るかを表す指標であり、トラフィックが自己相似性を持つ場合には、この再帰時間 (L) の累積分布が、べき分布 ($P(> L) \propto L^{-\alpha}, \alpha > 0$) となることが期待される。

出力パケットの時間変動は、実トラフィックの解析等で用いられる、パケット流量の時間変動と同様のものである。今回は、相転移現象の解析に用いられている手法である、IDL (Interval Distribution of Level set) 解析 [14] を用いる。IDL では、まず元の時系列を二値化した時系列に変換する。変換は、ある閾値を越えた時系列の値は1、それ以下の値を0とし、変換後の時系列のうち連続する1の数の累積分布を計算する。つまり、連続する1の数は、ネットワークトラフィックの場合には、ある閾値を越えた変動を輻輳状態とみなし、その輻輳の持続時間の分布を求めると同じである (以下では輻輳持続時間分布と呼ぶ)。いわゆる $1/f$ ゆらぎと呼ばれる自己相似性を持つゆらぎは、その定義よりパワースペクトルが $f^{-1.0}$ のべき分布で減衰する。そして、このパワースペクトルの指数と輻輳持続時間分布のべき分布の指数は一致することが明らかになっている [14]。本論文では紙面の都合上、主として輻輳持続時間分布の解析結果を載せているが、臨界点では、パワースペクトルが-1.0乗のべき分布になることを確認している。さらに、元の時系列が、自己相似な状態からはずれている場合には、持続時間の分布もまた

べき分布からはずれ、非輻輳状態の場合には長時間の相関、輻輳状態の場合には系を支配するほどの大きさの輻輳が生じる確率が0でなくなるため、大きなサイズの輻輳の効果が分布に反映される。

図2は、実際のネットワークの観測から得られた、輻輳の持続時間の分布である。測定点は、慶

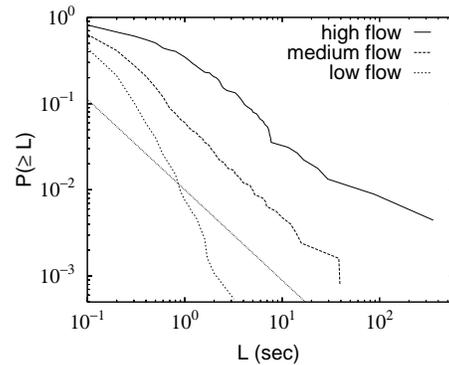


図2: 実トラフィックの輻輳持続時間分布. 直線は傾き-1.0のべき分布を示している。

應義塾大学のキャンパスネットワークの出口であり、測定したトラフィックのうち90%がTCPによるものであった。グラフの水平軸は輻輳の長さ (L)、垂直軸は累積の輻輳持続時間を示している。平均フロー密度の異なる3本のプロットは、それぞれ、ネットワークが非輻輳状態にある場合、輻輳状態にある場合、そして、その中間の臨界的な状態に対応している。図より、臨界状態では、分布がほぼべき分布になっていることがわかる (図は両対数グラフになっていることに注意)。グラフ内の直線は、傾き-1.0のべき分布であり、臨界点でのプロットもまたほぼ-1.0の傾きを持っていることがわかる。それに対して、トラフィックが少ない場合には、分布は短期の相関しか持たずに自己相似というよりはむしろポアソンのになっていることがわかる。同様に、輻輳相では100秒を越える大規模な輻輳のために分布が再びべき分布から外れている。

この図より、実際のネットワークトラフィックでは、単純に常に自己相似性が成り立っているわけではなく、むしろ相転移的な視点が重要であることがわかる。また、注目すべきは、臨界点

でのべき分布が指数 -1.0 となっている点である。単一のバッファに対してランダムにパケットを入力するシミュレーションでは、臨界点では、輻輳持続時間分布が -0.5 の傾きを持つべき分布になることが知られている [14]。しかしながら実トラフィックの測定では、傾きは -1.0 となっており、単純なバッファの効果以外の働きが作用していると考えられる。以下では、これらの解析法を通して、TCP のどのような機構が自己相似性 (とりわけ -1.0 の指数を持つべき分布) を形成しているかを明らかにしていく。

3 TCP シミュレーション結果

3.1 TCP Reno

図 3 は、TCP Reno を用いた場合のシミュレーションの解析結果である。(a) は輻輳持続時間分布

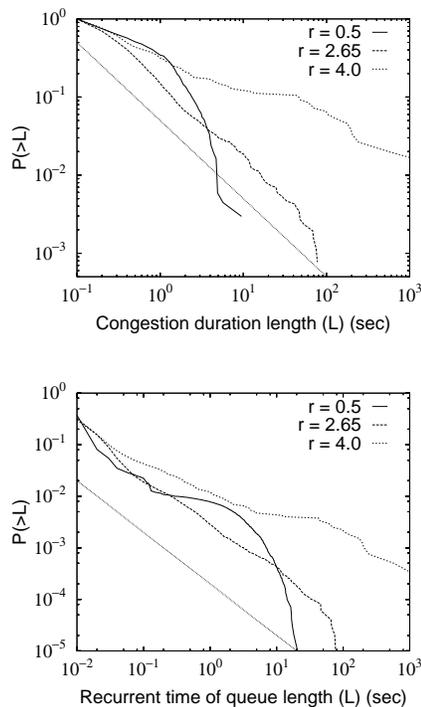


図 3: TCP Reno トラフィックでの (a) 輻輳持続時間分布, (b) バッファの再帰時間分布。図中の直線は傾き -1.0 のべき分布を示している。

布, (b) はルータでのバッファの再帰時間の分布である。輻輳持続時間の分布からは、図 2 の実

トラフィックの解析同様に、相転移現象が起きていることがわかる。図中の 3 本のプロットは、ホストへの TCP コネクションの到着レートの違いを示している。 $r = 2.65$ が臨界点付近であり、べき分布の傾きは、実トラフィックの解析同様 -1.0 となっている。バッファの再帰時間の分布もまた、輻輳持続時間分布同様、相転移現象が起きていることを示している。再帰時間の分布の場合でも、臨界点では、べき分布の傾きは -1.0 となっている。つまり、ランダムな入力方式で、固定サイズのパケット送信量であっても、TCP 自身の働きによって、生成されるトラフィックは自己相似状態を含んだ相転移現象を引き起こしているわけである。しかも重要な点は、臨界点でのべき分布の指数が -0.5 ではなく -1.0 となっており、TCP の効果の中に、実際のトラフィックの統計的な性質を決定する要素を内包している点である。

3.2 パケット再転送の影響

次に、パケットロスの際の再送処理と生成されるトラフィックの自己相似性との関係について解析する。図 4 は、ルータ上のバッファのサイズと、パケットロス、臨界点の関係を示している。図中のパケットロスは、対応するコネク

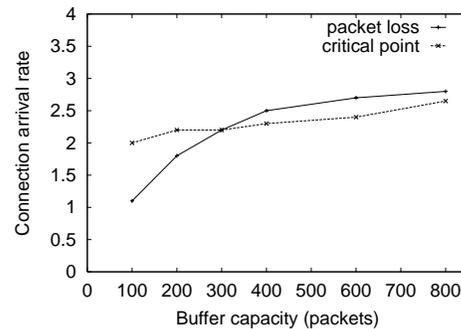


図 4: パケットロスおよび臨界点とバッファ容量の関係

ション到着レートの際にバッファ上で初めてパケットロスが生じたことを示している。図より、バッファサイズが小さい場合には、臨界点より前にパケットロスが生じているが、バッファサ

イズが大きくなるにつれて、逆転し必ずしもパケットロスが生じなくても自己相似性が観測されることを読みとることができる。また、TCPでは実際にパケットロスが生じていない場合にも、再転送タイマのタイムアウトによって、パケットの再送が生じる可能性があるが、今回のシミュレーションでは、バッファサイズ 400 以上の場合には再転送タイマのタイムアウトも生じていないことを確認している。つまり、パケットロスやタイムアウトによる再転送処理が生じない場合であっても、TCP によって生成されたトラフィックは自己相似性をもちうることを意味している。

3.3 送信レート増加アルゴリズムの影響

TCP では、ネットワークの現在の状況に応じて、2つのパケット送信レートの増加アルゴリズムを採用している。一つは、スロースタートアルゴリズムと呼ばれる、指数的にパケット送信レートを増加させる方式、もう一つは、輻輳回避フェーズでの線形にパケット送信レートを増加させる方式である。また、実際にパケットを送信する際には、送信者、受信者の保持する現在のウィンドウサイズにしたがってパケットの送信が行われる。これらのアルゴリズムは、バースト的なトラフィックを生成する可能性があり、これらの要素が自己相似性の生成になんらかの影響を与えている可能性が考えられる。そこで、これらの可能性を調べるために、バースト的な送信が起こりうる要素を排除した、単純な 1bit の stop-and-wait 方式のシミュレーションを行った。

1bit stop-and-wait 方式では、1つのコネクションあたり、ネットワーク中に存在するパケットは常に1つであり、受信者からの確認応答があった場合のみ、次のパケットを送信可能となる。つまり、パケットの送信レートは単純にネットワークの状態（パケットの往復時間）にのみ依存する。図5は、1bit stop-and-wait 方式でのシミュレーション結果である。図からもわかるように、複雑な TCP の場合と同様に相転移が起きていることがわかる。しかも臨界点での

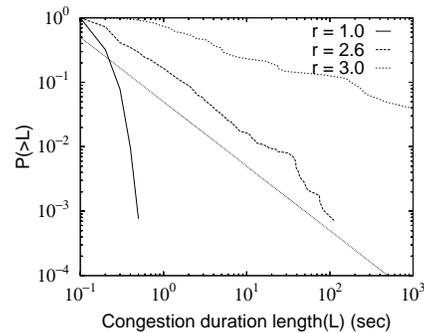


図 5: stop-and-wait プロトコルでの輻輳持続時間分布. 図中の直線は-1.0のべき分布を示している。

べき分布の指数 (-1.0) は一致している。このシミュレーションではパケットロスが生じた場合にデッドロック状態にならないよう、通常の TCP の再送処理が行われるように設定してあるが、臨界点では、再送処理は一切生じていなかった。

以上の結果は、自己相似性の形成には、パケットの送信の仕方は問題にならないことを意味している。重要な点は、送信レートの増やし方ではなく、ネットワーク中に流れるパケットの送信レートが臨界点付近に位置することであると考えられる。

3.4 確認応答パケットの影響

前節では、TCP を単純化した 1bit stop-and-wait 方式でも、TCP で観測される自己相似性が生成可能であることを示した。つまり、現在のネットワークの状態にしたがってパケットを送信する方式そのものが自己相似性生成の原因となっていると考えられる。さらに、原因をしばるために、この節では、確認応答パケットの効果について解析する。

まず、ネットワークの状態を考慮しない送信方式 (CBR) についてのシミュレーションを行った。CBR 方式では、1つのコネクションの中では、常に一定の送信レートでパケットを送信する。おのおののパケット間の送信間隔は、10 ms

とし¹, 送信パケット数は 100 に設定した. 図 6 は, CBR 方式での輻輳持続時間分布および, バッファの再帰時間を示している. 図よりコネ

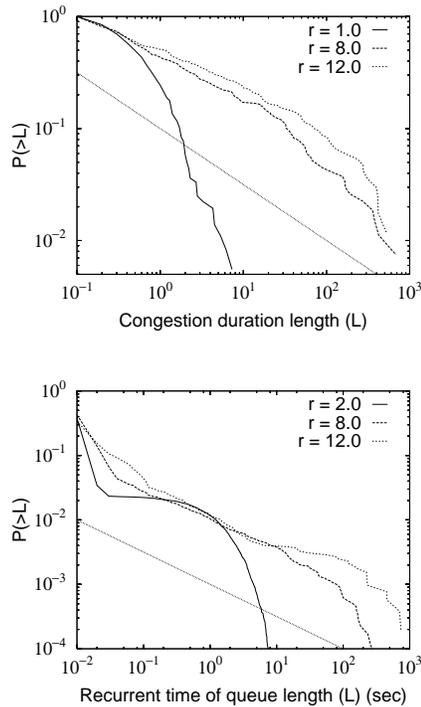


図 6: CBR での輻輳持続時間分布 (a), バッファでの再帰時間分布 (b). 図中の直線は指数-0.5 のべき分布を示していることに注意.

クションの到着レートが増えるにつれて分布が変化し, 相転移が起きていることがわかる. しかし, 臨界点 ($r = 8.0$) では, プロットはべき分布に近づくものの, その指数は今までのシミュレーションの結果とは異なり, -0.5 となっている. -0.5 のべき分布は, 先にも述べたように, 単純な 1 つの有限バッファにランダムな入力を与えた場合の, 臨界点の指数と一致している (これはパワースペクトルが $f^{-0.5}$ にしたがうことを意味する). つまり, 確認応答を元にパケットを送信することが, 自己相似性のタイプを決める, べき分布の指数を変える効果を持っていることを示している.

次に, 他のコネクションによるパケットが確認

¹100 ms の場合にも 10 ms の結果と傾向は同じであった.

応答パケットの到着間隔にどのような影響を与えているかを解析した. 前節までのシミュレーションでは, 各ホストから自ホスト以外のホストにコネクションを任意に張ることが可能であった. 今回のシミュレーションでは, 図 1 中のホスト 1 からホスト 3, もしくはホスト 2 からホスト 3 のみにコネクションを張るように送信ホストを限定した. 言い替えると, それぞれのコネクションは, 送信側のパケットはルータや自ホスト内のバッファで他のパケットに割り込まれることはあるものの, 確認応答パケットは一切他のパケットには割り込まれることはないということである. 図 7 は, 上記の一方向コネクション時の, ルータからホスト 3 へのリンクにおけるパケット流量に基づく輻輳持続時間分布である. 図から明らかなように, 臨界点では, プ

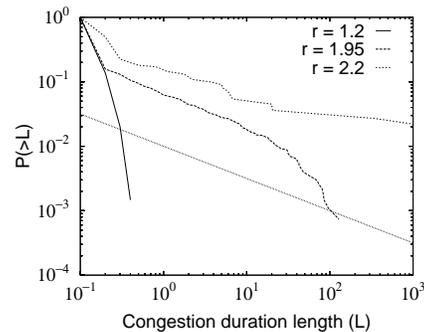


図 7: 一方向トラフィックでの輻輳持続時間分布. 図中の直線は傾き-0.5 のべき分布を示す.

ロットはべき分布に近づくものの, その指数は, CBR 方式の場合と同じく -0.5 となっている. このシミュレーション結果より, 確認応答が他のコネクションによるパケットによって割り込まれることが TCP で観測される自己相似性の本質であることがわかる.

4 議論

前章までに, ネットワークトラフィックで観測される自己相似性に関する, TCP の寄与を明らかにするために行った, 一連のシミュレーション結果について説明してきた. 単純なネットワークポロジにもかかわらず, TCP Reno

のシミュレーションでは、入力トラフィックの統計的な性質に依らずに、臨界点では自己相似性が観測され、そのべき分布の指数も実際に観測されるものと一致した。すなわち、観測されるトラフィックの統計的な挙動には、TCP のメカニズムの影響が大きく反映されているものと考えられる。実際、解析に利用した実トラフィックデータでは、90%が TCP によるものであった。本研究の結果は、TCP で生成されるトラフィックは単純な自己相似性だけで特徴づけられるわけではなく、むしろ自己相似性を内包した相転移モデルで説明可能であることを示している。しかし、本研究の結果は、ネットワークの使用状態が比較的臨界点近傍に集まりやすい傾向にあるという解釈をとれば、従来の自己相似性トラフィックの研究とは矛盾しない結果であると考えている。例えば、ネットワークが利用されていない場合には、端末側では帯域をより使うよう制御が行われ、逆に輻輳時にはトラフィック量を下げる方向に制御が働くことを考えれば、上記の仮定は、さほど特異なものではあるまい。また、このような単純な分岐構造を持つトポロジで簡単に自己相似性が現れることは、インターネットのトポロジを考えた場合には、ある程度のトラフィックが存在する場合には、自己相似性はかなり容易に観測されうるものであると考えられる。

さらに、本研究では、TCP の個々の機能を分離していきながら、相転移現象をひき起こす最小の TCP の要素を明らかにした。シミュレーションでは、単純な stop-and-wait によって制御されるトラフィックでも TCP 同様の結果が得られ、特に確認応答のパケットが他のコネクションからのパケットによって割り込まれる効果が大きな役割を果たしていることを示した。これは、従来から指摘されている TCP での確認応答パケットの圧縮の問題 [15, 8] と密接な関係があるとも考えられる。ただし、今回のシミュレーションで示した結果は、確認応答パケットが単に圧縮された効果ではなく、割り込まれた効果が大きく働いていることを示した点で異なっている。CBR トラフィックとの対比を考えた場合には、stop-and-wait プロトコルでは、(遅延として観測される) 現在のネットワークの状態に

じて自コネクションのトラフィックが制御される。そして、ネットワークが混んでくるにしたがって、この遅延のゆらぎが徐々に大きくなり、臨界点に達した状態では生成されるトラフィックに自己相似性が現れるわけである。ここで重要な点は、ネットワーク上に存在する全てのコネクションが現在のネットワークの状態を間接的に監視しながらトラフィックを生成しているという点である。つまり、あるコネクションのトラフィックはまわりのコネクションのトラフィックと(意識的ではない暗黙的な)協調動作を行うことで、そのトラフィックを相関のないものから $1/f$ ゆらぎと呼ばれる長時間相関をもつものへと変化させているのである。CBR 方式では、この暗黙的な協調がないため、相転移現象は観測されるものの、べき分布の指数が実際のトラフィックの値とは異なっているものと考えられる。

次に、性能の観点から本シミュレーションの結果を考えてみる。ネットワークの使用効率という観点から考えると、臨界点はネットワークにとって最も効率の良い点であると考えられ、制御の際の一つの指針となるものと考えられる。輻輳持続時間や再帰時間の分布を見た場合には、臨界点ではべき分布が観測されている。このべき分布の解釈は、システムの中では小さな輻輳が大部分で非常にまれな確率で大きな輻輳が現れることを意味している。例えば、図 2 の臨界点では、90%以上の輻輳は 1 秒以内に終わり、100 秒近い輻輳は、0.1%の以下の確率でしか生じないことを意味している。そして臨界点を越えた場合には、無限のサイズの輻輳が起こる確率が 0 ではないことを意味しており、臨界点はその境になっているのである。次に観測されるべき分布の指数であるが、CBR トラフィックや一方向のトラフィックの場合には指数は -0.5 であり、フィードバックがあり確認応答パケットが割り込まれるケースでは指数は -1.0 であった。べき分布では関数形から容易にわかるように、指数が小さいほどその値は速く減衰する。よって、CBR トラフィックや一方向のトラフィックでは、適切にフロー制御されているトラフィックに比べて、平均フロー密度が同じであっても、より大きな輻輳が生じる確率が高く、またルータ上の

バッファにもパケットが溜りやすい状態になることを意味している。

5 結論

本研究では、実際のトラフィックで観測される自己相似性が、アプリケーションの持つ相関とは無関係に、TCP の機能自身で生じる可能性があることを示した。また、トラフィック中の自己相似性は、とくに普遍的な性質ではなく、システムへの流入トラフィック量をコントロールパラメータとする、相転移現象と解釈可能であることを明らかにした。

さらに、TCP を簡素化した stop-and-wait プロトコルを用いた場合にも、TCP で得られる結果と同様の結果が得られることを確認した。すなわち、パケットロスに関する再送機構や、バースト的なトラフィックを生成する可能性のあるレート制御機構は、自己相似性の生成に関しては、主たる原因とはなっていない。また、CBR 方式や、一方向 TCP のシミュレーションでは、相転移現象は生じる点では双方向の TCP の場合と同じであるが、臨界点で観測されるべき分布の指数は異なり、実際のトラフィックで観測される指数とも一致しないことがわかった。最終的に、実際のネットワークで観測されるトラフィックの挙動は、アプリケーションレベルでの相関の他に、TCP 自身の作用によって形成される可能性があり、そのうちでも特に、確認応答パケットが他のパケットに割り込まれる効果が大きく働いていることが明らかとなった。

参考文献

- [1] M. Crovella and A. Bestavros. “Self-Similarity in World Wide Web Traffic: Evidence and Possible Causes”. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 5(6):835–846, 1997.
- [2] A. Erramili, O. Narayan, and W. Willinger. “Experimental queueing analysis with long-range dependent traffic”. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 4(2):209–223, 1996.
- [3] A. Feldmann, A. C. Gilbert, P. Huang, and W. Willinger. “Dynamics of IP Traffic: A Study of the Role of Variability and the Impact of Control. In *Proceedings of SIGCOMM '99*, pages 301–313, Cambridge, USA, 1999. ACM.
- [4] K. Fukuda. “*A Study on Phase Transition Phenomena in Internet Traffic*”. PhD thesis, Department of Computer Science, Keio University, Feb. 1999. <http://www.t.onlab.ntt.co.jp/~fukuda/research/thesis.ps.gz>.
- [5] K. Fukuda, H. Takayasu, and M. Takayasu. “Observation of Phase Transition Behavior in Internet Traffic”. *Advances in Performance Analysis*, 2(1):45–66, 1999.
- [6] K. Fukuda, M. Takayasu, and H. Takayasu. “Origin of Critical Behavior in Ethernet Traffic”. *Physica A*, 287:289–301, 2000.
- [7] W.E. Leland, M.S. Taqqu, W. Willinger, and D.V. Willson. “On the Self-Similar Nature of Ethernet Traffic (Extended Version)”. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2(1):1–15, 1994.
- [8] J. Mogul. “Observing TCP Dynamics in Real Networks”. In *Proceedings of SIGCOMM '91*, pages 305–317, Baltimore, USA, 1991. ACM.
- [9] I. Norros. “On the Use of Fractional Brownian Motion in the Theory of Connectionless Networks”. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 6(13), 1995.
- [10] V. Paxson and S. Floyd. “Wide-Area Traffic: The Failure of Poisson Modeling”. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 3(3):226–244, 1995.
- [11] J.M. Peha. “Protocols Can Make Traffic Appear Self-Similar”. In *Proceedings of the 1997 IEEE/ACM/SCS Communication Networks and Distributed Systems Modeling and Simulation Conference*. IEEE/ACM/SCS, 1997.
- [12] H.E. Stanley. “*Introduction to Phase Transition and Critical Phenomena*”. Oxford University Press, New York, 1971.
- [13] M. Takayasu, H. Takayasu, and K. Fukuda. “Dynamic Phase Transition Observed in the Internet Traffic Flow”. *Physica A*, 277:248–255, 2000.
- [14] M. Takayasu, H. Takayasu, and T. Sato. “Critical behaviors and $1/f$ noise in computer networks”. *Physica A*, 233:924–934, 1996.
- [15] L. Zhang, S. Shenker, and D. Clark. “Observations on the Dynamics of a Congestion Control Algorithm: The Effects of Two-Way Traffic”. In *Proceedings of SIGCOMM '91*, pages 133–147, Zurich, Switzerland, 1991. ACM.