上位層のプロトコルを考慮した ネットワークトラヒックの自己相似性に関する検討

住田 義明　大崎 博之　村田 正幸　宮原 秀夫

大阪大学 大学院基礎工学研究科 情報数理系専攻
〒 560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3

(Phone) +81-6-850-6588
(Fax) +81-6-850-6589
(E-mail) y-sumida@ics.es.osaka-u.ac.jp

あらまし　これまでの研究で、LAN や WAN のトラヒックが自己相似性を有することが指摘されている。しかし、なぜネットワーク上のトラヒックに自己相似性が発生するか、トラヒックの自己相似性がネットワークの性能にどのような影響を与えるかは十分に明らかにされていない。そこで本稿では、上位層に TCP/IP を用いたネットワークにおいて、ネットワークを流れるトラヒックに自己相似性が発生する原因を、シミュレーション手法を用いて明らかにする。また、トラヒックの自己相似性がパケット伝送遅延時間やパケット廃棄率といったネットワークの性能にどのような影響を与えるかについても評価を行なう。

和文キーワード　自己相似性、長期依存性、ハーストパラメータ、TCP/IP

Effects of Upper-Layer Protocols on Self-similarity of Network Traffic

Yoshiaki Sumida　Hiroyuki Ohsaki　Masayuki Murata　Hideo Miyahara

Department of Informatics and Mathematical Science
Graduate School of Engineering Science, Osaka University
1-3 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka 560-8531, Japan

(Phone) +81-6-850-6588
(Fax) +81-6-850-6589
(E-mail) y-sumida@ics.es.osaka-u.ac.jp

Abstract　It has been pointed out by many researchers that network traffic in LAN and WAN environments has a self-similar nature, which is also known as long-range dependence. However, it has not been clear why self-similarity occurs on the network. Also, its impact on the network performance has not been fully examined. In this paper, we first investigate the cause of self-similarity on the network employing TCP/IP as upper-layer protocols through simulation experiments. We further show the effect of self-similarity on network performace in terms of packet transmission delay and packet loss probability.

英文 **key words**　Self-Similarity, Long-Range Dependence, Hurst Parameter, TCP/IP

1 はじめに

これまで、ネットワークを流れるトラヒックのモデル化を行なう際には、ON/OFF ソースモデルや、MMPP、MAP といったマルコフモデルがひろく用いられてきた。しかし、最近、イーサネット上のトラヒックを測定した結果 [1]、ネットワークを流れるトラヒックは自己相似性 (self-similarity) と呼ばれる性質を持っており、従来のマルコフモデルでは十分にモデル化できないことが指摘されている [2]。さらに、VBR (Variable Bit Rate) の動画像トラヒックも自己相似性を持つことが報告されている [3]。これらの結果、自己相似性を有するトラヒックのための数学モデルに関する研究や、そのような特性を持つトラヒックの多重化に関する研究も盛んに行われるようになっている。しかし、例えば、イーサネット上のトラヒックが自己相似性を有するのはあくまで結果であり、そのような結果が得られる原因をまず調べることが重要である。また、その場合にユーザに対する性能品質がどのように変化するのかを知る必要がある。

ネットワーク上で観測されたトラヒックがなぜ自己相似性を有するのか、また、自己相似性を有するトラヒックが、ネットワークの性能にどのような影響を与えるかについてもいくつかの研究は行なわれている。例えば、[4] では、ネットワークを流れるデータサイズ (ファイルサイズ) の分布が裾野部分の大きな分布 (heavy-tailed distribution) に従うために、それらのデータが多重化された結果、ネットワーク上ではトラヒックが自己相似性を示すと説明されている。また、文献 [4, 5, 6] では、TCP (Transmission Control Protocol) のような上位層のプロトコルの影響で、ネットワークトラヒックの自己相似性が変化することが指摘されている。さらに、トラヒックが自己相似性を持つ場合、自己相似性を持たない場合に比べて、ネットワークの性能が低下することも示されている。

しかし、TCP のような上位層のプロトコルが存在する場合に、なぜネットワークを流れるトラヒックの自己相似性が変化するかについての検討は十分行なわれているとはいえない。例えば、上位層に TCP が存在する場合、TCP のどの制御 (フロー制御や、パケット再送制御など) によって自己相似性が変化するのかについては明らかにされていない。さらに、ネットワークを流れるトラヒック量や、ボトルネックとなる帯域幅、ネットワーク内のノードが持つバッファサイズといった、さまざまな要因がトラヒックの自己相似性にどのような影響を与えるかについても明らかにされていない。また、ネットワーク内部でトラヒックの自己相似性の度合が変化した結果、ネットワークを利用するユーザが感じるサービス品質が変化することが考えられる。しかし、トラヒックに自己相似性が発生することによって、それがどのような影響を与えるかについては、これまでまったく検討が行われていない。

そこで本稿では、上位層に TCP が存在する場合に、なぜネットワークのトラヒックの自己相似性が変化するのか、トラヒックの自己相似性がネットワークの性能にどのような影響を与えるのかを、シミュレーション手法を用いて明らかにする。シミュレーションモデルとしては、サーバー・クライアントモデルを用いて、サーバーからクライアントへ転送されるデータサイズの分布がネットワークで観測されるトラヒックの自己相似性にどのような影響を与えるかについて評価を行う。また、トラヒックの負荷や、ボトルネックリンクの帯域、ノードのバッファサイズを変化させた場合に、トラヒックの自己相似性がどのように変化するかについても評価を行う。特に、上位層で再送制御などの処理をを行わない UDP の場合と比較して、TCP の制御によってどれだけ自己相似性が変化するかに着目した評価を行う。また、ネットワークの性能指標として、サーバーからクライアントまでのパケット伝送遅延時間、ネットワーク内でのパケット廃棄率、ノードにおけるパケットの待ち行列長などを用いる。

以下、2 章において、自己相似性の定義と、自己相似性の度合をあらわすハーストパラメータを推定する手法を紹介する。次に、3 章において、本稿で用いるシミュレーションモデルについて説明する。4 章では、シミュレーション結果に基づいて、TCP がトラヒックの自己相似性に与える影響、およトラヒックの自己相似性がネットワークの性能に与える影響について、さまざまな観点から検討を行う。最後に、5 章において、本稿のまとめと今後の課題について述べる。

2 自己相似性

本章では、自己相似性の定義と、自己相似性の度合を表す ハーストパラメータについて簡単に説明する。厳密な定義については、例えば [7] を参照されたい。

2.1 自己相似性の定義

ある離散時間上の確率過程 $X = \{X_t : t = 0, 1, 2, \ldots\}$ において、

$$X_n^{(m)} = \frac{1}{m} \sum_{j=(n-1)m+1}^{nm} X_j \tag{1}$$

となる、新たな確率過程 $X^{(m)} = \{X_n^{(m)} : n = 0, 1, 2 \ldots\}$ を考える。この時、$X^{(m)}$ の自己相関関数 $r^{(m)}(k)$ が十分大きな m に対して以下の性質を満たすとき、確率過程 X は自己相似性を有すると定義される [7, 8]。

$$r^{(m)}(k) \sim k^{-(2-2H)} \quad \frac{1}{2} < H < 1$$

なお、ここで H は自己相似性の強さをあらわす指標であり、ハーストパラメータと呼ばれている。

2.2 ハーストパラメータの推定方法

ある観測されたプロセスが自己相似性を持つかどうか、さらに自己相似性を持つ場合そのプロセスのハーストパラメータの値がいくらかを推定する方法が数多く提案されている [7, 9]。ここでは、本稿で使用する、3 種類の推定方法 Variance-Time プロット、R/S プロット、Whittle の推定法 (Whittle's estimator) について簡単に説明する。

Variance-Time プロットでは、まず、観測されたプロセス X から、プロセス $X^{(m)}$ を式 (1) を用いて生成する。このプロセスが自己相似性を有する場合、$X^{(m)}$ の分散を Var$[X^{(m)}]$ とすると、Var$[X^{(m)}] \approx am^{2H-2}$ (a は定数) となる性質を持つ。この性質を利用して、$\log(\mathrm{Var}[X^{(m)}])$ を、$\log m$ に対してプロットし、十分大きな m に対して適合する直線の傾き $2H-2$ を求めることによって、ハーストパラメータを推定する。

また、R/S プロットでは、観測されたプロセス X から、

$$R(n)/S(n) = \frac{1}{S(n)}\{\max(0, W_1, W_2, \ldots, W_n) - \min(0, W_1, W_2, \ldots, W_n)\}$$

ただし、

$$W_l = (X_k, X_2, \ldots, X_k) - k\overline{X}(n)$$

を計算する。ここで、$\overline{X}(n)$、$S(n)$ はそれぞれ $X_1, \ldots, X_n$ の平均および標準偏差である。自己相似性を持ったプロセスの場合、n が無限大に近付くにつれ、$R(n)/S(n)$ の平均 $E[R(n)/S(n)]$ が $E[R(n)/S(n)] \approx an^H$ (a は定数) となる。この性質を利用して、$\log(R(n)/S(n))$ を $\log n$ に対してプロットし、適合する直線の傾き H を推定する。

Variance-Time プロットおよび R/S プロットでは、与えられた確率過程が自己相似性を持つかどうかの判定や、おおよそのハーストパラメータの値を推定するには有効であるが、統計的に厳密な方法でハーストパラメータの値を求めることができない。一方、Whittle の推定法では、統計的な手法でハーストパラメータを推定し、信頼区間を求めることが可能である。対象とするプロセス X がガウス過程である場合に、X のスペクトル密度を $f(\lambda; z)$ (z は H に依存する)、ピリオドグラムを $I(\lambda)$ としたとき、

$$W(z) = \int_{-\pi}^{\pi} \frac{I(\lambda)}{f(\lambda; z)} d\lambda$$

を最小化する z を求め、これより H を求めるという方法である [9]。なお、プロセス X がガウス過程でない場合は、式 (1) により求めた $X_n^{(m)}$ が $m \to \infty$ の場合ガウス過程に収束するという性質を用いて、$X_n^{(m)}$ に対して Whittle の推定法を適用する。

3 シミュレーションモデル

図 1 に、本稿で用いるシミュレーションモデルを示す。32 個のクライアントが、2 個のサーバに接続されているようなサーバー・クライアント型のモデルを考える。各クライアントは、ランダムに選択したサーバにファイル転送を要求し、サーバはこれを受けてクライアントに要求されたファイルを転送する。ファイルは固定長のパケットに分割して転送されるが、本シミュレーションではパケットサイズを 1K バイトとする。上位層のプロトコルとして、TCP (TCP-Reno) もしくは UDP を用いる。サーバからクライアントに転送されるファイルサイズの平均は 4,100 バイト、リクエスト間隔の平均は 600 ms とする。なお、リクエスト間隔とは、クライアントが前回要求したファイルを受信し終えてから、次のリクエストを発生するまでの時間である。また、ファイルサイズの分布は、指数分布 (Exponential Distribution) もしくはパレート分布 (Pareto Distribution) に従うものとし、リクエスト間隔の分布は指数分布に従うものとする。なお、パレート分布の確率分布関数は以下の式で与えられる。

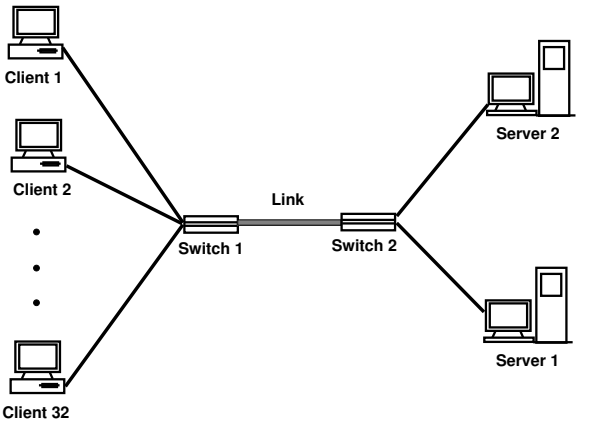

図 1: シミュレーションモデル

$$P[X \le x] = 1 - \left(\frac{k}{x}\right)^{\alpha} \quad 1 < \alpha < 2,\ 0 < k \le x$$

パレート分布は、裾野部分が大きい (heavy-tailed) 分布であり、上式の α が小さいほど裾野部分が大きくなる。また、k は確率変数のとり得る最小の値を示す。

スイッチのバッファサイズは 2–256 K バイト、スイッチ–スイッチ間のリンクの帯域は 150 K–15 M bps と変化させて評価を行う。なお、端末–スイッチ間のリンクの帯域は全て 10Mbps に固定する。また、ネットワークに加わるトラヒックの負荷については、リクエスト間隔を変化させることによって 0.2–1.3 と変化させて評価を行う。このシミュレーションモデルでは、スイッチに接続されているリンクがボトルネックリンクとなるため、ボトルネックリンクにおけるトラヒック特性に着目した評価を行う。なお、シミュレーションには ns[10] と呼ばれるシミュレーションパッケージを一部変更して使用した。

4 シミュレーション結果

4.1 上位層のプロトコルが UDP の場合

本節では、上位層で再送制御などの処理を行わない UDP の場合について評価を行う。以降のシミュレーションでは、特に記述のない場合には、スイッチのバッファサイズを 64K バイト、ボトルネックリンクの帯域を 1.5Mbps、ネットワークに加わるトラヒックの負荷は 1.12 (ボトルネックリンクの帯域で正規化している) とする。図 2 に、パレート分布の裾野分布の大きさを決定するパラメータである $\alpha(1 < \alpha < 2)$ を変化させた時の、ボトルネックリンクで観測したトラヒックのハーストパラメータを示す。図中では、ファイルサイズの分布がパレート分布の場合に、Variance-Time プロット、R/S プロット、Whittle の推定法を用いてハーストパラメータの値を求めている。また、ファイルサイズの分布が指数分布に従う場合は Whittle の推定法を用いて得られた結果を示している。なお、Whittle の推定法を用いて得られたハーストパラメータには、95% の信頼区間を示してある。また図 3 に、この時のパケット棄却率を示す。

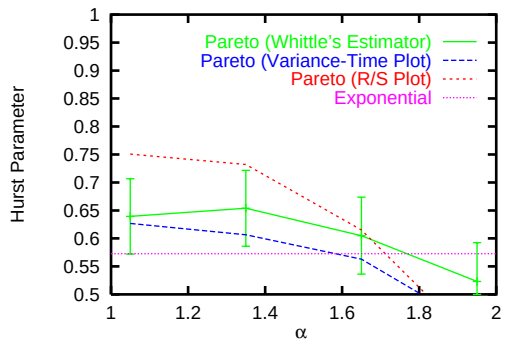

図 2: α とハーストパラメータの関係 (UDP の場合)

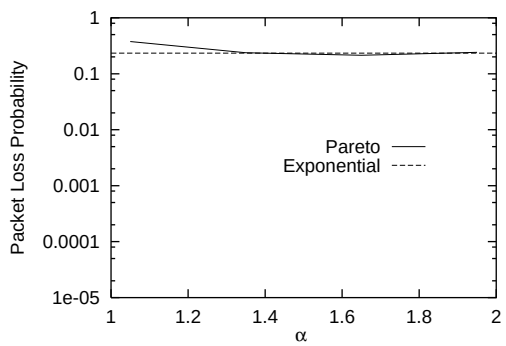

図 3: α とパケット廃棄率の関係 (UDP の場合)

上位層が UDP の場合は、スイッチに到着したトラヒックがそのまま多重化されてリンクに出力されるため、ファイル転送時を ON 期間、リクエスト間隔を OFF 期間と考えると、ボトルネックとなるリンクを流れるトラヒックは ON/OFF ソーストラヒックを多重化したものになると考えられる。ON/OFF 期間の分布がともに指数分布に従う場合、理論的にはハーストパラメータは 0.5 になるはずであるが [8]、図 2 よりハーストパラメータの値はおよそ 0.58 となっていることがわかる。これは、図 3 からわかるように、スイッチのバッファあふれによるパケット廃棄が大量に発生 (10 % 以上) しており、パケットが連続して廃棄されるために多重化されたトラヒックの特性が変化しているからだと考えられる。

また、ファイルサイズの分布がパレート分布に従う場合は、α の値が大きくなるにつれてハーストパラメータの値が減少している。しかし、α が 1.35 より小さくなると、ハーストパラメータの値がほぼ一定となっていることがわかる。これは以下のように説明できる。α の値が小さい時は、ファイルサイズの分布の裾野部分がきわめて大きく、図 3 からもわかるように、スイッチのバッファで大量にパケット廃棄が発生している。このため、スイッチを通過した後のトラヒックでは、トラヒックのバースト性が減少するために、結果としてハーストパラメータが小さくなっていると考えられる。

パケット廃棄率が、トラヒックの自己相似性に与える影響を明らかにするため、ネットワークに加えるトラヒックの負荷を 0.2–1.2 と変えた時の、ハーストパラメータおよびパケット廃棄率を、それぞれ図 4 および図 5 に示す。図 4 より、ファイルサイズの分布がパレート分布の場合、負荷が高くなるにつれてハーストパラメータが 0.6 前後に近づくという傾向が見られる。また、図 5 から、この時パケット廃棄率がきわめて大きな値となっていることがわかる。つまり、パケット廃棄率が非常に大きい状況では、スイッチから出力されるトラヒックの特性は、スイッチのバッファでパケットが廃棄されるパターンにだけ依存するためと考えられる。なお、ファイルサイズの分布が指数分布の場合、負荷が 0.2 程度ならば、ハーストパラメータの値はほぼ 0.5 となっており、これは理論的な値と一致している。しかし、負荷が高くなるにつれてパケット廃棄率が大きくなり、その結果ハーストパラメータの値が 0.6 に近づいていることがわかる。

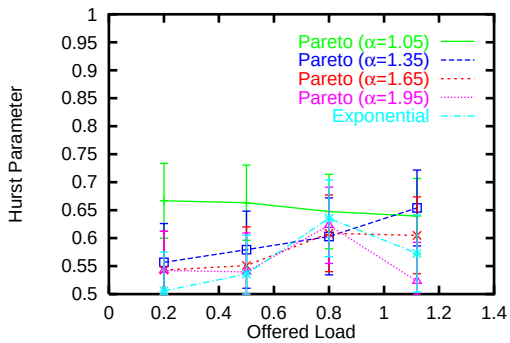

図 4: 負荷とハーストパラメータの関係 (UDP の場合)

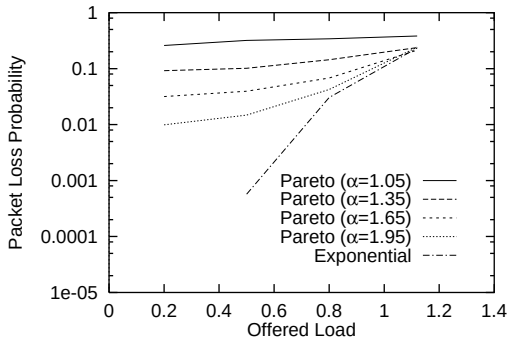

図 5: 負荷とパケット廃棄率の関係 (UDP の場合)

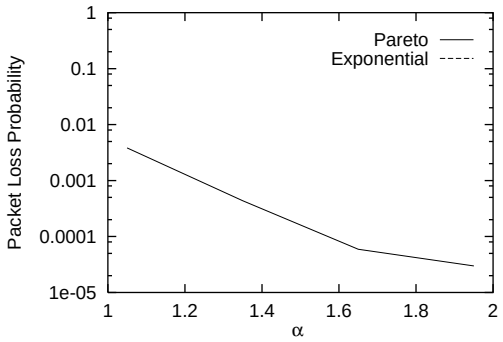

図 7: α とパケット廃棄率の関係 (TCP の場合)

4.2 上位層のプロトコルが TCP の場合

本節では、上位層が TCP である場合のシミュレーション結果を示す。なお、4.1 節 (UDP の場合) の図 2–5 が、本節の図 6,7,11, 12 にそれぞれ対応する。まず、パレート分布のパラメータ α と、ボトルネックとなるリンクを流れるトラヒックのハーストパラメータの関係を図 6 に示す。上位層が UDP の場合 (図 2) と比較すると、TCP の制御が加わったことにより、特に α の値が小さい時にハーストパラメータの値が大きくなっていることがわかる。これは図 3 と図 7 を比較すればわかるが、TCP の制御によってスイッチで廃棄されるパケット数が大幅に減少し、スイッチに多重化して入力されるトラヒックの特性がそのまま保持されてリンクに出力されるためと考えられる。また、ファイルサイズの分布が指数分布の場合は、UDP の時と比べてハーストパラメータの値が少し小さくなっている (UDP の場合 0.58、TCP の場合 0.56)。これは、TCP の制御によってパケット廃棄が起こりにくくなり、ON/OFF 期間が指数分布に従う ON/OFF ソーストラヒックを多重化した場合の理論値である 0.5 に近付いていると考えられる。

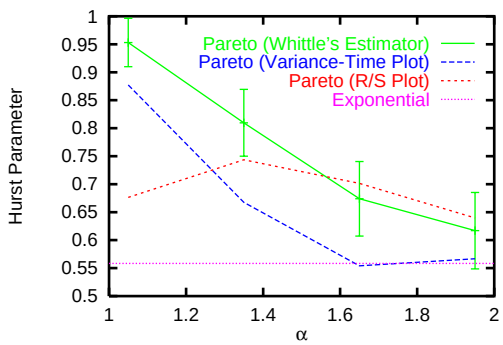

図 6: α とハーストパラメータの関係 (TCP の場合)

図 8 に、α を変化させた時の、サーバーからクライアントまでの平均パケット伝送遅延時間 (再送による遅延時間も含む) を示す。また、図 9 にパケット伝送遅延時間の分布を示す。これより、上位層が TCP の場合、α が小さくなるにつれて平均パケット伝送遅延時間が大きくなっていることがわかる。これは、図 9 においてパケット伝送遅延時間の分布が広がっている ($\alpha = 1.05$ のとき) ことからもわかるように、α が小さくなるとパケット廃棄率が大きくなり、その結果 TCP によってパケットの再送が行われるためだと考えられる。

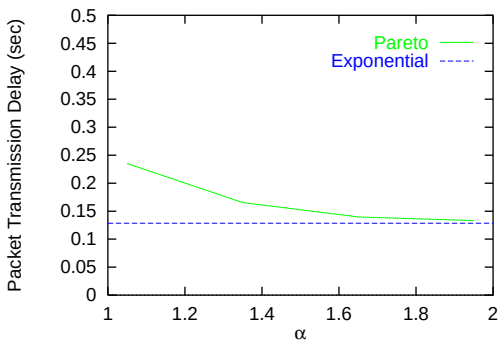

図 8: α と平均パケット伝送遅延時間の関係 (TCP の場合)

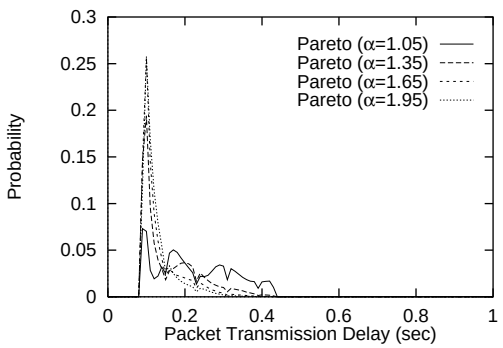

図 9: パケット伝送遅延時間の分布 (TCP の場合)

さらに、図 10 に α とスイッチにおけるバッファの平均待ち行列長の関係を示す。これから、α が小さくなると、バッファの平均待ち行列長が大きくなり、これもパケット伝送遅延時間が大きくなる要因となっていると考えられる。

このように、たとえ上位層に TCP を使用していたとしても、トラヒックの自己相似性が強くなるに従ってパケットの伝送遅延時間が大きくなってしまう。このため、ユーザから見たネットワークの性能品質 (例えばファイ

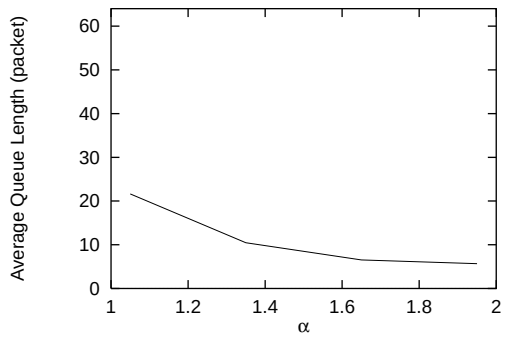

図 10: バッファの平均待ち行列長 (TCP の場合)

ル転送遅延時間) はさらに劣化すると予測される。

図 11 に、ネットワークに加わる負荷とハーストパラメータの関係を示す。これより、負荷が小さくなるに従ってハーストパラメータの値が増加していることがわかる。これは、負荷を変化させた時のパケット廃棄率 (図 12) からわかるように、トラヒックの負荷が小さくなるにつれてパケット廃棄率が小さくなり、その結果、ファイルサイズの分布がそのままボトルネック上のトラヒックに影響していると考えられる。

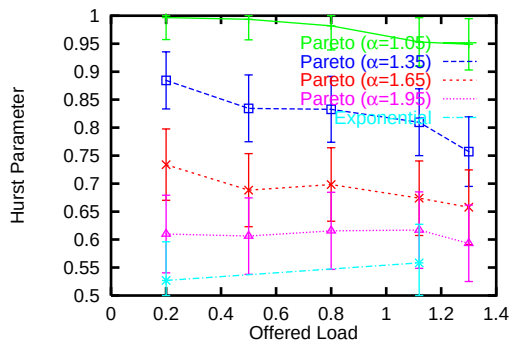

図 11: 負荷とハーストパラメータの関係 (TCP の場合)

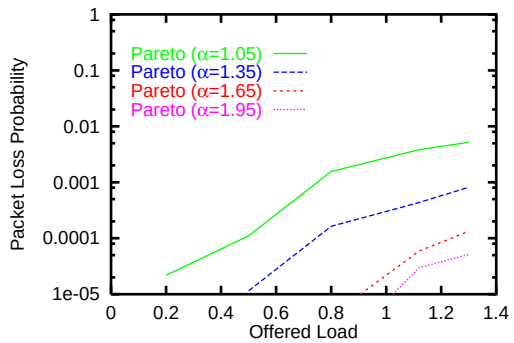

図 12: 負荷とパケット廃棄率の関係 (TCP の場合)

また、ネットワークに加わる負荷と、パケット伝送遅延時間の関係を図 13 に示す。これを見ると、α が小さいほど遅延時間が大きくなっている (負荷が 1.2 の時 2 倍程度) ことが分かる。これは、図 7 からも分かるように、α の小さい場合にはパケット廃棄率が高くなり、その結果再送が行われパケット伝送遅延時間が大きくなっていると考えられる。以上の結果より、特に中–高負荷時に、トラヒックの自己相似性がネットワーク性能に与える影響が大きくなることがわかる。従って、自己相似性の影響を受けにくい、もしくは自己相似性の発生を抑えるような何らかの制御を考えてゆく必要がある。

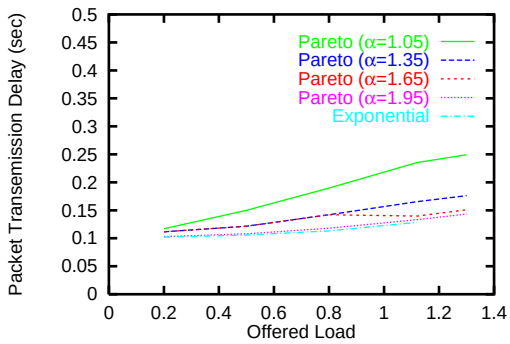

図 13: 負荷と平均パケット伝送遅延時間の関係 (TCP の場合)

4.3 システムパラメータの影響

これまで、ネットワークに入力されるトラヒックの特性 (ファイルサイズ分布やトラヒックの負荷) を変化させた時に、ボトルネックとなるリンクで観測されるトラヒックの自己相似性がどのように変化するかについて検討を行った。その結果、ネットワークを流れるトラヒックの自己相似性は、パケット廃棄率に強く影響されることがわかった。しかし、例えばパケット廃棄率はスイッチのバッファサイズやリンクの帯域に依存するため、トラヒックの自己相似性もこれらのシステムパラメータによって変化すると考えられる。そこで本節では、ファイルサイズの分布は平均 4,100 バイトのパレート分布、さらにリクエスト間隔を平均 600 ms の指数分布に固定し、スイッチのバッファサイズおよびボトルネックとなるリンクの帯域を変化させてシミュレーションを行う。

まず、図 14 にスイッチのバッファサイズを 2–256 K バイトと変化させた時の、ネットワークで観測されるトラヒックのハーストパラメータを示す。さらに、この時のパケット廃棄率と平均パケット伝送遅延時間を図 15 および図 16 に示す。図 14 より、バッファサイズが大きくなるにつれてハーストパラメータが大きくなり、バッファサイズが 100 K バイト程度を超えるとハーストパラメータの値が一定となっていることがわかる。これは、バッファサイズが 100 K バイト程度あれば、TCP のフロー制御によってほとんどパケット廃棄が発生せず、ファイルサイズの特性がそのまま保存されるためだと考えられる。

しかし、バッファサイズが 2K バイトときわめて小さい場合は、α の値にかかわらずハーストパラメータの値

が 0.7 前後となっているが、これは以下のようにして説明できる。バッファサイズが 2K バイトの場合、シミュレーションで用いた TCP のパケットサイズが 1K バイトであるため、バッファに収容できるパケット数がたかだか 2 個となる。このため、図 15 からわかるように、α が小さい時にパケット廃棄率がきわめて大きく (およそ 10%) なっている。このために、ファイルサイズの分布の特性が失われ、なおかつバッファの待ち行列長の変動が単純であるために、α の値にかかわらずハーストパラメータが一定になっていると考えられる。

また、図 16 より、α の値が大きい時にはバッファサイズを大きくしても平均パケット伝送遅延時間はほとんど変化しないが、α の値が小さい時 ($\alpha = 1.05$) にバッファサイズを大きくすると、かえって平均パケット伝送遅延時間が大きくなっていることがわかる。このため、トラヒックが自己相似性を持つ場合には、スイッチのバッファサイズを慎重に決定する必要があるといえる。

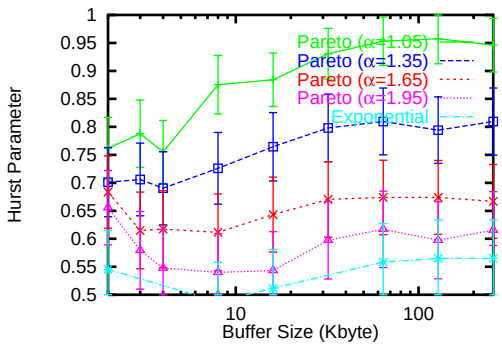

図 14: バッファサイズとハーストパラメータの関係 (TCP の場合)

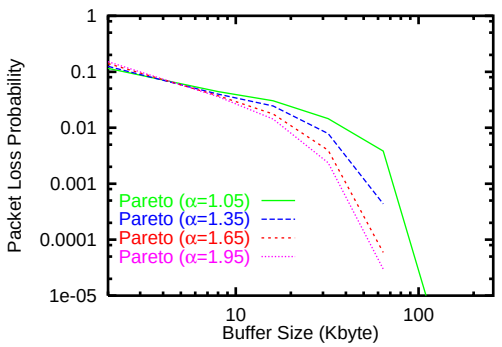

図 15: バッファサイズとパケット廃棄率の関係 (TCP の場合)

最後に、ボトルネックとなるリンクの帯域を 150 Kbps–15 Mbps と変化させた時の、ネットワークで観測されるトラヒックのハーストパラメータ、パケット廃棄率、平均パケット伝送遅延時間を、それぞれ図 17 – 19 に示す。なお、ここではリンクの帯域にあわせて平均リクエスト間隔を変更し、ネットワークに加わる負荷を常に 1.12 としている。図 17 より、ボトルネックとなるリンクの帯域が大きくなるにつれて、α の違いがハーストパラメータに与える影響が強くなっていることがわかる。これは、帯域が大きくなると、スイッチのバッファあふれによるパケット廃棄が発生しにくくなり (図 18)、その結果、ファイルサイズ分布の特性がそのままボトルネックリンク上のトラヒックに反映されるためだと考えられる。また図 19 より、リンクの帯域が十分にあれば、パケット伝送遅延時間はファイルサイズ分布の α に依存していないことがわかる。これは、図 18 からも分かるように、リンクの帯域が十分にあればパケット廃棄が発生しないためだと考えられる。

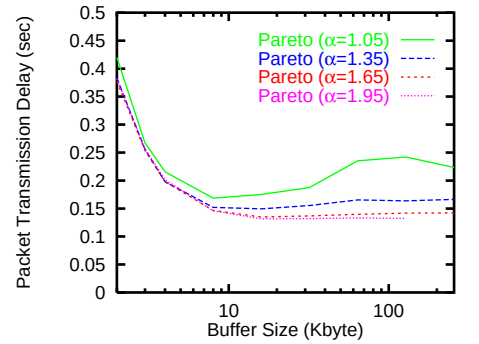

図 16: バッファサイズと平均パケット伝送遅延時間の関係 (TCP の場合)

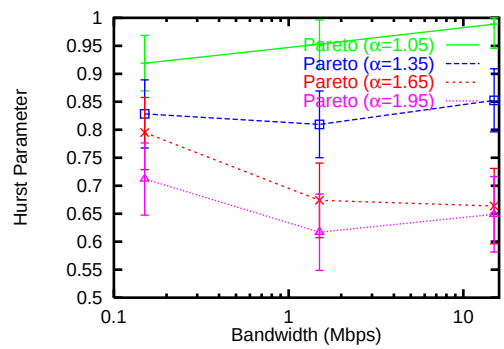

図 17: リンクの帯域とハーストパラメータの関係 (TCP の場合)

5 まとめと今後の課題

本稿では、上位層に TCP が存在する場合に、なぜネットワークのトラヒックに自己相似性が変化するのか、トラヒックの自己相似性がネットワーク性能にどのような影響を与えるのかについて検討を行った。シミュレーションモデルとしては、サーバー・クライアントモデルを用い、サーバーからクライアントへ転送されるデータサイズの分布やネットワークに加えられるトラヒックの負荷、さらには、ボトルネックとなるリンクの帯域、ノードのバッファサイズといったシステムパラメータがネッ

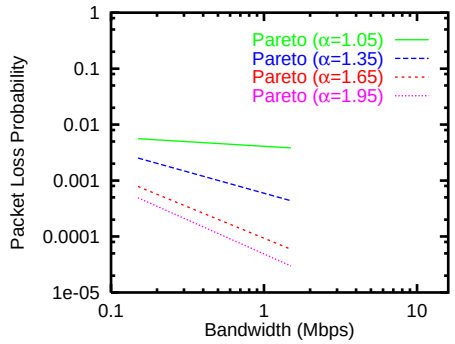

図 18: リンクの帯域とパケット廃棄率の関係 (TCP の場合)

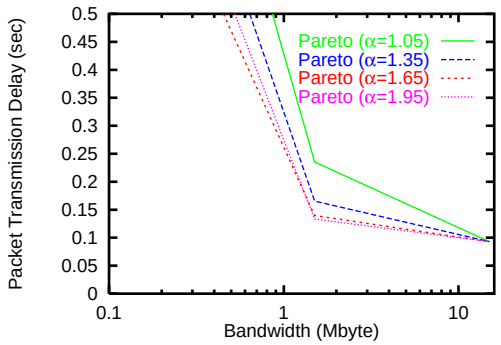

図 19: リンクの帯域と平均パケット伝送遅延時間の関係 (TCP の場合)

トワークで観測されるトラヒックの自己相似性にどのような影響を与えるかについて評価を行なった。特に、上位層で特別な制御を行わない UDP の場合と比較することによって、TCP の制御によってどれだけ自己相似性が変化するかについて評価を行った。

今後の課題として、実際のイーサネット上のトラヒックで自己相似性が発生している原因を明らかにするために、より下位層のプロトコル (例えば CSMA/CD) の影響も考慮に入れた評価を行ってゆく必要があると考えられる。また、本稿ではネットワークの性能品質として、パケット単位の伝送遅延時間やパケット廃棄率に着目して評価を行った。今後はさらに、ファイル単位の伝送遅延時間やネットワークのスループットについても評価を行う必要がある。

参考文献

[1] W.E.Leland and D.V.Wilson, "High time-resolution measurement and analysis of LAN traffic: Implications for LAN interconnection," in *Proceedings of IEEE INFOCOM '91*, (Bal Harbour, FL), April 1991.

[2] W. E. Leland, M. S. Taqqu, W. Willinger, and D. V. Wilson, "On the self-similar nature of ethernet traffic (extended version)," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 2, pp. 1–15, Feburary 1994.

[3] M. W. Garrett and W. Willinger, "Analysis, modeling and generation of self-similar VBR video traffic," *SIGCOMM 94*, pp. 269–280, 1994.

[4] W. Willinger, M. S. Taqqu, R. Sherman, and D. Wilson, "Self-similarity through high-variability: statistical analysis of Ethernet LAN traffic at the source level," *Statistical Science*, vol. 10, no. 1, pp. 67–85, 1995.

[5] K. Park, G. Kim, and M. Crovella, "On the relationship between file sizes, transport protocols, and self-similar network traffic," in *Proceeding of International Conference on Network Protocols*, pp. 171–180, October 1996.

[6] K. Park, G. Kim, and M. Crovella, "On the cause and effect of self-similar network traffic," tech. rep., Boston University Computer Science Department, May 1996.

[7] J. Beran, *Statistics for Long-Memory Processes. Monographs on Statistics and Applied Probability*. New York NY: Champman and Hall, 1994.

[8] B. K. Ryu, *Fractal Network Traffic : From Understanding to Implicatrions*. PhD thesis, Columbia Univ., 1996.

[9] M.S.Taqqu, V.Teverovsky, and W.Willinger, "Estimators for long-range dependence: An empirical study," *Fractals*, vol. 3, no. 4, pp. 785–798, 1995.

[10] "LBNL network simulator (ns)." available at http://www-nrg.ee.lbl.gov/ns/.