ネットワークトラヒックの自己相似性が ネットワークのサービス品質に与える影響に関する検討

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 のトラヒックは自己相似性を有することが明らかになっている。さらに、このような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などのネットワーク性能に悪影響を与えることも指摘されている。しかし、トラヒックの自己相似性が、上位層のプロトコルによる再送処理等も含めたファイル単位の伝送遅延時間やスループットといった、ユーザが直接感じる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は検討が行われていない。そこで本稿では、トラヒックの自己相似性がユーザが感じるネットワーク性能にどのような影響を与えるかを、シミュレーション手法を用いて明らかにする。その結果、ファイル単位の転送遅延時間の平均値およびスループットはあまり自己相似性の影響を受けないが、ファイル単位の 99% 転送遅延時間は悪化することが分かった。

キーワード　ネットワークトラヒック、自己相似性、TCP/IP、サービス品質

Effects of Self-Similarity of Network Traffic on Quality of Services

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　The existence of self-similarity in network traffic measured in LAN and WAN environment has been pointed out by many researchers. It has also been reported that self-similarity of network traffic causes performance degradation of the network in terms of average packet transmission delay and packet loss probability. However, when upper-layer protocols like TCP/IP mechanism are adopted, effects of self-similarity on the QoS (Quality of Services) provided to the users such as file transmission delay and throughput have not been investigated. In this paper, we evaluate how the QoS perceived by users are affected by self-similarity of network traffic through simulation experiments. We reveal that long-term performance measures (e.g., average file transmission delay and throughput) are almost independent of self-similarity, but short-term performance measures (e.g., 99% file transmission delay) are heavily dependent on it.
英文 key words　Network Traffic, Self-Similarity, TCP/IP, Quality of Services

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、ポアソン到着過程、ON/OFF ソースによる多重化モデル、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というのはあくまで観測の結果であり、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。

我々はこれまで、文献 [7] において、上位層のプロトコルとして UDP もしくは TCP が用いられた場合に、トラヒックの自己相似性がパケット廃棄率やパケット伝送遅延時間といったネットワーク性能にどのような影響を与えるかについて評価を行った。さらに、ボトルネックリンクの帯域やスイッチのバッファサイズといった、ネットワークのパラメータが変化した場合に、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についても評価を行った。しかし、ユーザが直接感じるのはパケット廃棄率やパケット伝送遅延時間ではなく、ネットワークのスループットやファイル単位の転送遅延時間である。特に、トラヒックが強い自己相似性を有する場合には、ネットワークがユーザに提供するサービス品質が一時的に劣化することが考えられる。このため、トラヒックの自己相似性が、ユーザが感じることのできるサービス品質に対してどのような影響を与えるかについて検討する必要がある。

そこで本稿では、ネットワークに加わるトラヒック、あるいはネットワーク上において観測されるトラヒックの自己相似性が、ユーザが感じるネットワークの性能にどのような影響を与えるかを、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、文献 [7] と同様に、サーバー・クライアントモデルを用いる。上位層のプロトコルが TCP である場合に、サーバーからクライアントへ転送するトラヒックの自己相似性が変化した時、ユーザが感じるネットワーク品質にどのような影響を与えるかについて検討を行う。さらに、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とユーザが感じるネットワーク品質との関係を明らかにする。本稿では、ユーザが感じるネットワーク性能として、ファイル単位の転送遅延時間分布およびスループットを用いる。

以下、2 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。3 章では、シミュレーション結果に基づいて、上位層のプロトコルとして TCP が用いられている場合に、トラヒックの自己相似性がユーザが感じるサービス品質にどのような影響を与えるかについて検討を行う。最後に、4 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 シミュレーションモデル

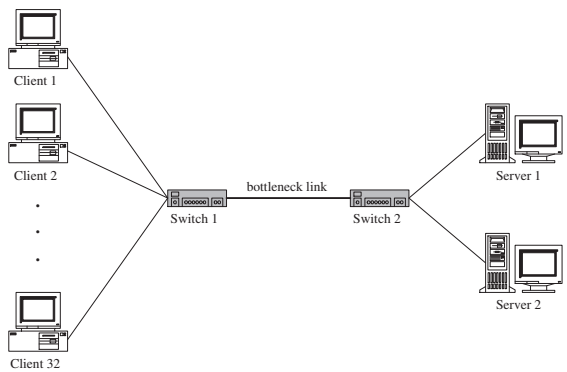

図 1: シミュレーションモデル

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 1,000 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 4.1k 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 [8]。

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

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。なお、3 章におけるシミュレーションでは、パレート分布が生成するファイルサイズの平均値を一定としながら α の値を変化させるため、α の値に応じて k の値も変化している。例えば、ファイルサイズの平均が 4.1 K バイトの時、$\alpha = 1.05$ なら $k = 420$ バイト、$\alpha = 1.95$ ならば $k = 2000$ バイトとなる。また、ON 期間および OFF 期間がパレート分布に従うような ON/OFF ソーストラヒックを無限本多重化した時、多重化されたトラヒックは、そのハーストパラメータが $(3 - \alpha)/2$ で与えられるような FGN (Fractional Gaussian Noise) となることがわかっている [4]。

また、本稿では、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–1.5 M bit/s 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 10Mbit/s 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 [9] 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。

3 シミュレーション結果

3.1 ファイルサイズ分布の影響

本節では、サーバからクライアントに転送されるファイルの大きさの分布を変化させた時に、ユーザが感じるネットワーク品質 (サービス品質) がどのように変化するかについて検討を行う。以下のシミュレーションでは、ファイルサイズ分布の裾野部分を決定するパラメータ α を変化させて評価を行なう。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 1.5Mbit/s、ネットワークに加わるトラヒックの負荷を 1.12 (ボトルネックリンクの帯域で正規化したもの) とする。

まず、図 2 に、α を、1.05、1.35、1.65、1.95 と変化させた時の、サーバーからクライアントまでの平均パケット転送遅延時間および平均ファイル転送遅延時間を示す。なお、これらの値にはパケット廃棄が発生した場合の TCP による再送処理時間も含んでいる。つまり、パケット転送遅延時間は、サーバーがパケットを送出してから、サーバーがそのパケットに対する ACK を受け取るまでの時間である。また、ファイル転送時間は、サーバーがファイルを構成する先頭のパケットを送出してから、最後のパケットに対する ACK を受け取るまでの時間である。さらに、この時のスイッチにおけるパケット廃棄率を図 3 に示す。

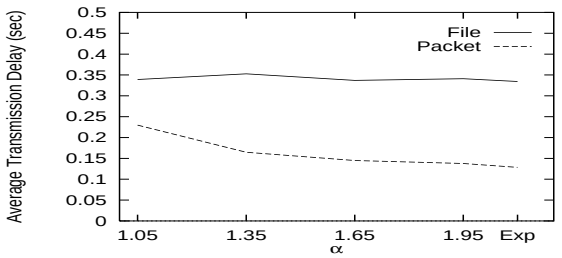

図 2: α と平均パケット/ファイル転送遅延時間の関係

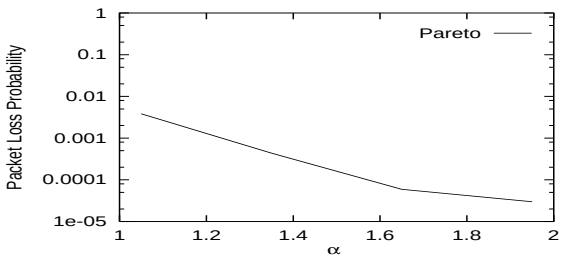

図 3: α とパケット廃棄率の関係

図 2 より、平均パケット転送遅延時間は、α が小さくなる (入力トラヒックの自己相似性が強くなる) につれて大きくなっていることがわかる。これは、トラヒックの自己相似性が強いために、スイッチにおいて大量のパケット廃棄が発生 (図 3) し、その結果 TCP によって廃棄されたパケットの再送が行なわれるためと考えられる。これにもかかわらず、図 2 より、平均ファイル転送遅延時間は α の値にかかわらずほぼ一定となっている。この現象は以下のように説明することができる。

パレート分布によって生成されたファイルサイズを N とし、TCP のパケットサイズを P とすれば、このファイルは $\lceil N/P \rceil$ 個のパケットに分割されて転送される。一方、転送開始直後には、TCP のスロースタート機能のために、パケットが途中で廃棄されないと仮定すれば、n 個のパケットを転送するには、サーバーとクライアント間で $\lceil \log_2(n+1) \rceil$ 回の往復伝搬遅延時間が必要となる。また、α が 1.05 の時は、パレート分布によって生成されるファイルサイズの最小値 $k = 420$ のため、ファイルを構成する最小のパケット数は 1 であり、α が 1.95 の場合は $k = 2000$ のため最小のパケット数は 2 となる。このためファイル転送時間の最小値に差が生じると考えられ、結果として α が小さい場合には平均ファイル転送遅延時間が小さくなると予想される。しかし、図 2 では平均ファイル転送遅延時間が α の値にかかわらずほぼ一定となっている。これは、α が小さい場合、最小パケット数の影響によって生じる平均ファイル伝送遅延時間の減少が、スイッチにおけるパケット廃棄率の増大 (図 2) によって生じる再送遅延によって相殺されているためだと考えられる。つまり、上位層のプロトコルが TCP であり、なおかつ平均ファイルサイズが小さい時には、たとえ入力トラヒックの自己相似性が強くても平均ファイル伝送遅延時間にはあまり影響を与えないといえる。

そこで、最小パケット数の影響を明らかにするため、TCP のパケットサイズを 100 バイトに変化させた時の、

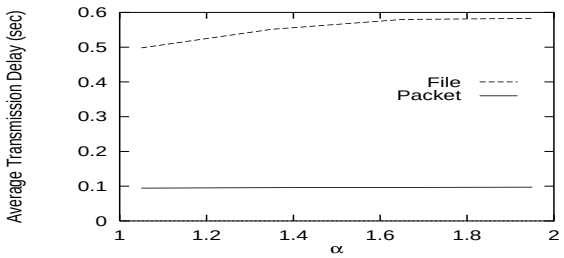

図 4: α と平均パケット/ファイル転送遅延時間の関係 (パケットサイズが 100 バイトの時)

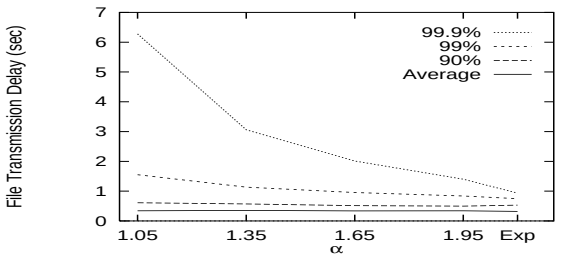

図 5: α と $n\%$ ファイル転送遅延時間の関係

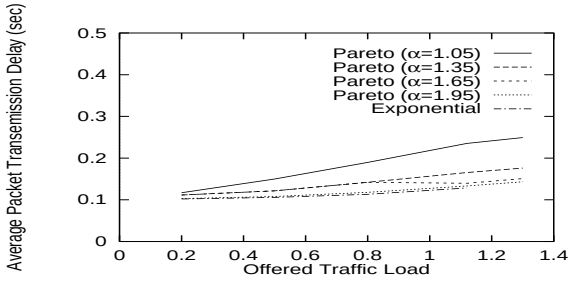

図 6: ネットワークの負荷と平均パケット転送遅延時間の関係

平均パケット/ファイル転送遅延時間を図 4 に示す。この図より、パケットサイズが 1k バイトの時と逆の傾向を示していることがわかる。つまり、平均パケット転送遅延時間は α の値にかかわらずほぼ一定となっており、一方、平均ファイル転送遅延時間は α が小さくなるにつれて小さくなっている。この理由も先程と同様に、以下のようにして説明できる。α の値にかかわらず、平均ファイルサイズを一定 (4.1 K バイト) としているため、α が小さい時には α が大きい時に比べて、平均的に小さなファイルが生成される。しかし、ごく稀に巨大なファイルが生成されることになる。また、TCP のスロースタート機能のため、小さなファイルを複数転送するよりも、巨大なファイルとしてまとめて転送したほうが、結果としてファイル転送遅延時間が短かくなる。つまり、最小パケット数の影響が無視できる場合には、α の値が小さい (稀に巨大なファイルが生成される) ほうが、平均ファイル転送遅延時間が小さくなる。

次に、図 5 に、パケットサイズが 1 K バイトの時の、90%、99%、99.9% のファイル転送遅延時間を示す。ここで、$n\%$ ファイル転送遅延時間とは、転送遅延時間分布のうち $n\%$ がこの範囲に収まるような値を意味する。また図中には、比較のため平均ファイル転送遅延時間もあわせて示している。これより、α の値が変化しても、平均ファイル転送遅延時間に影響はないが、$n\%$ ファイル転送遅延時間は α の値に大きく影響されていることがわかる。特に、99.9% ファイル転送遅延時間に着目すると、$\alpha = 1.05$ の時の 99.9% ファイル転送遅延時間は、$\alpha = 1.95$ の時の 6 倍以上となっている。以上の考察から、入力トラヒックが自己相似性を持つ場合には、平均ファイル転送遅延時間にはあまり影響がないが、99.9% ファイル転送遅延時間がきわめて大きくなるといえる。しかし、平均ファイルサイズがパケットサイズに近いといった状況では、逆に α が小さいほうが α が大きい場合に比べて平均ファイル転送遅延時間が小さくなるという現象が発生する。

3.2 ネットワークに加わるトラヒックの負荷の影響

図 6 および図 7 に、負荷を 0.2 から 1.3 と変化させた時の、平均パケット転送遅延時間および平均ファイル転送遅延時間を示す。さらに、図 8 に、この時の 99% ファイル転送遅延時間をあわせて示す。

図 6 より、ネットワークに加わるトラヒックの負荷が小さい場合には、平均パケット転送遅延時間は α の値によらずほぼ一定となっていることがわかる。これは、負荷が小さい場合には、スイッチにおいてパケット廃棄がほとんど起こらないため (パケット廃棄率が 10^{-6} 以下)、再送処理による遅延時間がほとんど発生しないためと考えられる。また、中–高負荷時においても、$\alpha = 1.05$ の場合を除くと、平均パケット転送遅延時間は α の影響をあまり受けていない。次に、平均ファイル転送遅延時間 (図 7) に着目すると、トラヒックの負荷が小さい場合には、$\alpha = 1.05$ の場合を除いて平均ファイル転送遅延時間が一定となっていることがわかる。これは、低負荷時にはスイッチにおいてパケット廃棄が 10^{-5} 以下とほとんど発生しないため、平均パケット転送遅延時間がそのまま平均ファイル転送遅延時間に反映されているためだと考えられる。なお、$\alpha = 1.05$ の時の平均ファイル転送遅延時間が小さくなっているのは、図 2 の場合と同じように最小パケット数が影響しているためだと考えられる。

しかし、99% ファイル転送遅延時間 (図 8) に着目すると、α の値が小さい時には、トラヒックの負荷が増加すると、99% ファイル転送遅延時間が急激に増加していることがわかる。例えば、負荷が 1.3 の場合には、α の値によって 99% ファイル転送遅延時間が 0.85 秒から 1.9 秒まで変化している。これは以下のように説明できる。

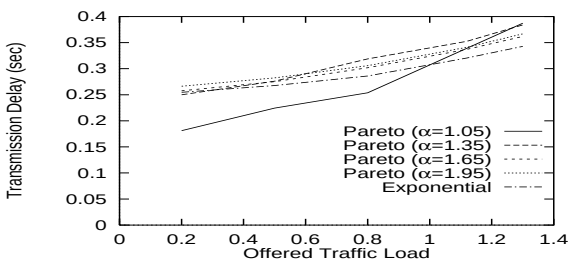

図 7: ネットワークの負荷と平均ファイル転送遅延時間の関係

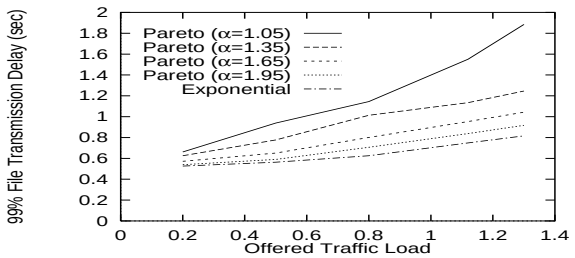

図 8: ネットワークの負荷と 99% ファイル転送遅延時間の関係

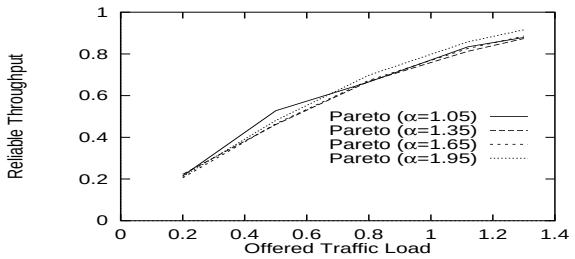

図 9: ネットワークの負荷と実効スループットの関係

高負荷時に巨大なファイルが発生すると、スイッチにパケットが連続して到着するために、スイッチのキュー長が伸びてしまう。このため、α が大きな時には、スイッチにおいて頻繁にパケット廃棄が発生し、TCP の再送制御によって遅延時間がさらに増大すると考えられる。

ユーザが感じるネットワーク性能としては、ファイル単位の転送遅延時間の他に、ネットワークのスループット重要である。そこで、図 9 にネットワークの負荷を変化させた場合のサーバーからクライアントに転送されるトラヒックの実効スループットを示す。この図より、ネットワークに加わる負荷を増加させるにつれて、実効スループットがほぼ線型的に増加していることがわかる。これは平均ファイル転送遅延時間が α の影響をあまり受けていないのと同様に、トラヒックの自己相似性は平均したネットワークの性能にはあまり影響を与えないため考えられる。

3.3 スイッチのバッファサイズの影響

次に、スイッチのバッファサイズが、ユーザが感じるネットワーク性能にどのような影響を与えるかについて評価を行う。図 10 に、バッファサイズを 2 K バイトから 256 K バイトまで変化させた時の、平均パケット転送遅延時間を示す。これより、バッファサイズを大きくするに従って、平均パケット転送遅延時間が小さくなっていることがわかる。しかし、$\alpha = 1.05$ の場合には、バッファサイズを 16 K バイト以上にすると、逆に平均パケット転送遅延時間が大きく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。TCP のウィンドウフロー制御により、バッファサイズが 100 K バイト程度あれば、スイッチにおいてパケット廃棄がほとんど発生しなくなる。このため、それ以上バッファサイズを大きくすると、逆にバッファにおけるキューイング遅延時間が大きくなるためだと考えられる。

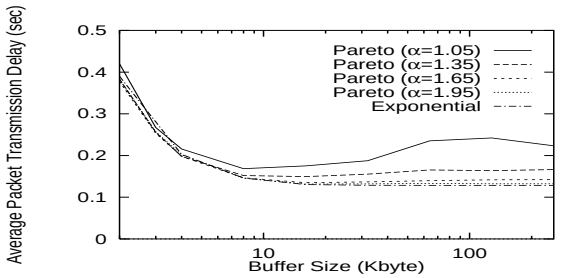

図 10: バッファサイズと平均パケット転送遅延時間の関係

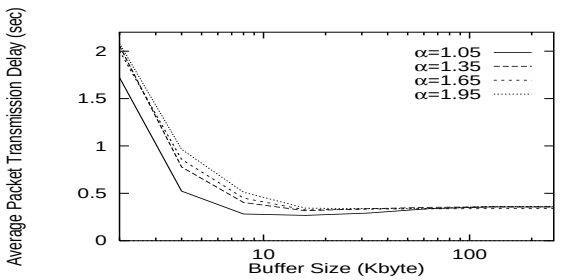

図 11: バッファサイズと平均ファイル転送遅延時間の関係

しかし、ファイル単位の転送遅延時間に着目すると、以下に示すように、キュー長が伸びることによる転送遅延時間の増加はほとんど無視できるようになる。図 11 および図 12 は、それぞれスイッチのバッファサイズを変化させた時の、平均ファイル転送遅延時間および 99% ファイル転送遅延時間を示している。この図からわかるように、バッファサイズが 100 K バイト程度あれば、$\alpha = 1.05$ の平均ファイル転送遅延時間は α が大きい時とほとんど差がない。これは 3.1 の場合と同様に、最小のパケット数が影響しているためだと考えられる。また、99% ファイル転送遅延時間 (図 12) については、バッファが大きい場合、α が小さいほど大きくなっている。これは、バッファが大きい場合、バースト的に到着した大きなファイルがバッファに蓄えられたままになるためであると考えられる。

3.4 ボトルネックリンクの帯域の影響

最後に、ボトルネックとなるリンクの帯域を変化させた場合の評価を行う。以下のシミュレーションでは、リクエスト間隔を変化させることによって、ネットワークにかかる負荷をボトルネックリンクの帯域にかかわらず一

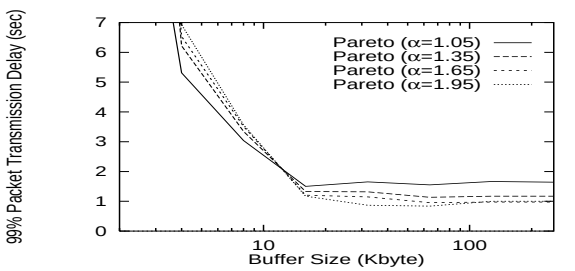

図 12: バッファサイズと 99% ファイル転送遅延時間の関係

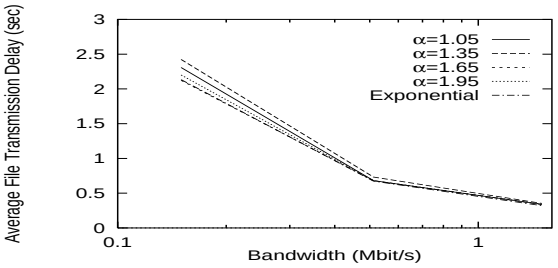

図 13: ボトルネックリンクの帯域と平均ファイル転送遅延時間の関係

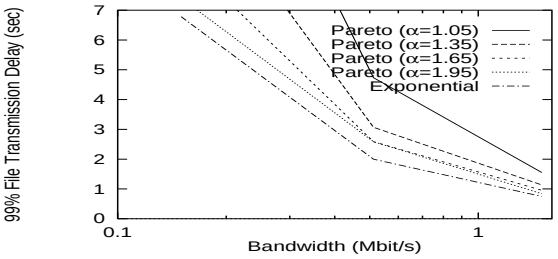

図 14: ボトルネックリンクの帯域と 99% ファイル転送遅延時間の関係

定 (1.12) となるように、リクエスト間隔を変更している。図 13 および図 14 に、ボトルネックリンクの帯域を 150Kbit/s から 1.5Mbit/s まで変化させた時の、平均ファイル転送遅延時間、および 99% ファイル転送遅延時間を示す。

これらの図より、ボトルネックリンクの帯域が大きくなるにつれて、α の違いがファイル転送遅延時間に与える影響が小さく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。ボトルネックリンクの帯域が 150 Kbit/s の場合、平均ファイル転送遅延時間の違いは、スイッチのバッファにおける平均キュー長の違い ($\alpha = 1.05$ の時は 20 パケット、$\alpha = 1.95$ の時は 10 パケット) が原因となっている。しかし、ボトルネックリンクの帯域が大きくなるにつれて、バッファにおけるキューイング遅延が小さくなるため、α の値による平均ファイル転送転送遅延時間の差が小さくなっていると考えられる。

また、図 14 は、α が小さい場合には、ボトルネックリンクの帯域を増やすことによって、99% ファイル転送遅延時間が大きく改善されることを示している。例えば、ファイルサイズの分布が指数分布に従う時には、ボトルネックリンクの帯域を 150Kbit/s から 1.5Mbit/s へと増加させたとしても、99% ファイル転送遅延時間は 6.8 秒から 0.75 秒にしか減少しない。一方、入力トラヒックが強い自己相似性を持つ場合 ($\alpha = 1.05$) には、17.7 秒から 1.55 秒へと 99% ファイル転送遅延時間が大きく減少している。

4 まとめ

本稿では、上位層のプロトコルが TCP の場合に、ネットワークに加わるトラヒックの自己相似性がユーザが感じるネットワーク性能にどのような影響を与えるかについての検討を行なった。シミュレーションモデルとしては、サーバ– 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、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を変化させることによってユーザへの性能がどのように変化するか検討を行なった。その結果、平均パケット遅延時間は、入力トラヒックの自己相似性が強いほど大きくなるが、ユーザが感じるネットワークの性能指標の一つである平均ファイル転送遅延時間はほとんど変化しないことがわかった。また、平均スループットも自己相似性の影響をほとんど受けないことがわかった。しかし、99 % ファイル転送遅延時間は、トラヒックが自己相似性持つことにより非常に大きくなってしまうことがわかった。つまり、トラヒックに自己相似性が存在する場合、ユーザが感じる長期的なサービス品質にはあまり影響がないが、短期的にサービス品質がひどく劣化してしまう、ということがわかった。

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*, vol. 24, pp. 269–280, October 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,” in *Proc. ACM Sigcomm*, pp. 100–113, August 1995.

[5] K. Park, G. Kim, and M. Crovella, “On the relationship between file sizes, transport protocols, and self-similar network traffic,” in *Proceedings 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] 住田 義明、大崎 博之、村田 正幸、宮原 秀夫, “上位層のプロトコルを考慮したネットワークの自己相似性に関する検討,” 信学技報 *IN97-158*, January 1998.

[8] N. L. Jhonson and S. Kotz, *Continuous Univariate Distributions-1*. New York: Wiley-interscience, 1970.

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