

Heavy-tailed な特性をもつ Web サーバパフォーマンス評価に関する考察

築地原 護, 中嶋 卓雄

九州東海大学 応用情報学部 情報システム学科
{40mie102@stmail,taku@ktmail}.ktokai-u.ac.jp

本研究では、インターネットに偏在する Web サーバ全体の Heavy-tailed な特性に注目し、その Heavy-tailed な特性をもたらす要因を分析し、負荷が高いと思われる Web サーバの性能を評価する手法を、リモートからのアクティブ計測による評価実験を行うことによって考察した。Heavy-tailed となる要因の分析においては、TCP のコネクション処理を含む転送時間の特性は、からなずしもファイルサイズの Heavy-tailed な分布特性によるのみならず、TCP のコネクションが確立し、最初にデータ送信を開始する初期化時間も影響していることが分かった。また、個々のサーバの特性が存在しても、全体としては Heavy-tailed な特性となり Robust な現象であることが分かった。また、負荷が高いと思われるサーバを分類しそれぞれに対して性能の傾向を評価した結果、初期化時間に時間を要しているサーバについては、分散値が小さく安定した動作をするサーバが少ないことがわかった。

A Study of Evaluation Method for Web Performance with Heavy-tailed Property

Mamoru Tsuichihara, Takuo Nakashima

Kyusyu Tokai University

{40mie102@stmail,taku@ktmail}.ktokai-u.ac.jp

In this research, we focused on the Heavy-tailed property on the Web servers, and analyzed factors of tail part of Heavy-tailed distribution, and then we studied a evaluation method based on evaluation experiments using active measurement method for over-loaded Web servers. As for the analysis of factors of tail part of Heavy-tailed distribution, we show the total transmission time including the connection establishing time of TCP is dominated by not only the file size but also first data transmission time just after establishing TCP connection. And we illustrate the robustness of Heavy-tailed property for Web data transmission even if each Web server has s different performance. We classified Web servers by the initial transmission time, and evaluated servers. As the result of experiments, servers with a heavy load of initial transmission rarely have stable activities.

1 はじめに

インターネットのトラフィックを理論的に評価する時、以前はポアソン過程に基づくモデルとして説明されてきたが、近年では、ネットワークトラフィックは広範囲な時間領域において、自己相似 (Self-similar) な特性を持つことが示されている。これは直観的にはある固定点で観測したパケット数の分布が異なる時間領域、例えば 10 秒とか 1 秒など、の集約化に関して相似な形状を持つことから理解されている。Leland などによる自己相似性をもつトラフィックに関する独創的な研究 [1] 以来、トラフィックのモデル化とパフォーマンス評価において、トラフィックの自己相似性は幅広く扱われている。

この自己相似性は、プロトコルスタックの各層において発見されている。まず、Web サイトのファイルサイズが Heavy-tailed な分布を持ち、同時に Web におけるファイル転送時間も Heavy-tailed な分布となることが発見されており [2]、文献 [4] においてファイルサイズと自己相似トラフィックとの関係が議論されており、また、シミュレータを利用してファイルサイズの分布が自己相似性を持つならば、ファイル転送の重ね合わせによるトラフィックもまた自己相似性を持つことも示されている [6]。このような自己相似性は Web 固有の現象ではなく、例えば、UNIX ファイルシステムがおおよそべき乗 (power law) に従った分布であり [5]、Web が一般的となる以前の FTP トラフィックも Heavy-tailed な特性を

持つ $0.9 < \alpha \leq 1.1$ の Pareto 分布となることが示されている [3]。さらに、このような Web トラフィックはユーザの振舞いの分析によるアプリケーションの特徴化および TCP の介在による影響についての 2 点に関して研究が行われている。

一方で、Web サーバのパフォーマンス評価に関しては、サーバ上のプロセスやメモリ利用効率などを測定するサーバにローカルな評価と、クライアントを想定したリモートからのアクセスによるサーバの応答に注目したリモートからの評価とがある。

本研究では、Web サーバを利用するユーザから見たときのパフォーマンスに注目しており、リモートからの計測手法を採用する。また、パフォーマンス評価に際しては、インターネット中に存在する他のサーバと比較が可能な評価手法を考えることにする。その理由は、ユーザがサーバを構築する場合、必ずしも高価な高速のサーバを用意できるわけではなく、コンテンツの構成とのトレードオフのもと、全体のサーバの構成要素を決める場合があり、その時に他のサーバとの性能比較がサーバ構築の大きな要因となる可能性があるからである。

従来から、httpperf[8] によりリモートからサーバを評価することは可能であるが、詳細な評価にはカスタマイズが必要であり、また、SPECweb[9] などサーバに対するベンチマークテスト基準も存在するが、サーバの高速性に特に注目しており、低コストのサーバを構築する場合には、あまり参考にならず、また、データ基準の検討も不足していることなどから、新たにパフォーマンス評価用のシステムを構築することとした。また、ENMA[10] やそれを IPv6 対応に拡張した性能計測システム [11] も存在するが、比較データが近距離のサーバであり、データサイズも小さく、高負荷に対する応答に注目しているため、本研究の目的とは異なる。

まず、本研究の背景となる Heavy-tailed な特性について説明し、次に、提案するシステムについて述べる。その後、従来の結果と比較しながらサーバの評価実験の結果について議論する。

2 Heavy-Tailed な特性の定義

確率変数 X が次の確率分布を満たすとき Heavy-Tailed と呼ばれる。

$$P[X > x] \sim x^{-\alpha}, \quad \text{as } x \rightarrow \infty, \quad 0 < \alpha < 2. \quad (1)$$

小さな値に対する分布の特性にかかわらず、分布の漸近的な形状が双曲線のならば、その分布は Heavy-Tailed である。最も簡単な Heavy-Tailed な分布は Pareto 分布であり、次の確率密度関数を持つ。

$$p(x) = \alpha k^\alpha x^{-\alpha-1}, \quad \alpha, k > 0, \quad x \geq k$$

この時累積分布関数は次のように与えられる。

$$F(x) = P[X \leq x] = 1 - (k/x)^\alpha.$$

ここで、 k は location パラメータと呼ばれ、確率変数の値がこの値より大きな値を取ることを意味している。

通常、確率変数 X に関して排他的累積分布関数 $\bar{F}(x) = 1 - F(x) = P[X > x] = (k/x)^\alpha$ を $\log - \log$ スケールでプロットすることにより、データの Heavy-Tailed 性を評価する。このプロットを用いると、Heavy-Tailed な分布はある θ に対して次の特性を持つ。

$$\frac{d \log \bar{F}(x)}{d \log x} = -\alpha, \quad x > \theta$$

したがって、このプロットが重要なスケール部分で直線となるか否かによって、Heavy-Tailed 性を判定することができる。このような Heavy-Tailed な特性が、自己相似性の特徴である長期間依存性を引き起こすものと考えられている。

一方、確率分布が Poisson 分布であれば、排他的累積分布関数は $\bar{F}(x) = P[X > x] = e^{-\lambda x}$ で表され、

$$\frac{d \log_e \bar{F}(x)}{dx} = -\lambda$$

となるため、関数値のみの \log スケールでプロットした時が直線となる。

3 評価実験環境

本研究では、サーバ側の TCP の動作を含む詳細な時間に関する処理データを収集するため、独自の計測プログラムを実装した。

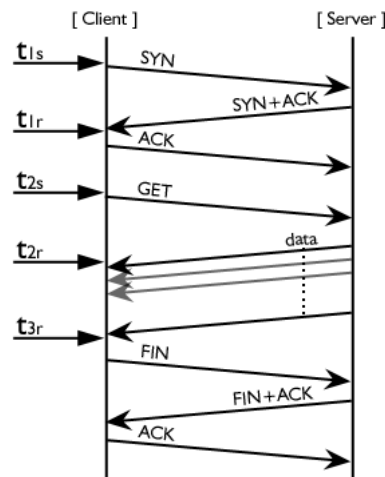


図 1: 評価プログラムのパケットシーケンス

図 1 は評価プログラムのパケットシーケンスである。クライアント側で時刻 $t_{1s}, t_{1r}, t_{2s}, t_{2r}, t_{3r}$ を取得する。 t_{1s} は TCP のコネクション確立時の SYN 直前、 t_{1r} はサーバからの ACK 直後、 t_{2s} は GET を送信する直前、 t_{2r} は GET によってサーバより最初のデータが送られてきた直後、 t_{3r} はサーバからすべてのデータ送信が完了した直後である。

$t_1 = t_{1r} - t_{1s}$ を RTT (Round Trip Time) とみなし, $t_2 = t_{2r} - t_{2s}$ を RTT を含むサーバ側の初期処理時間, $t_3 = t_{3r} - t_{2r}$ をサーバ側のデータ処理時間, $t = t_1 + t_2 + t_3 = t_{3r} - t_{1s}$ を全体の処理時間と考える. また, ファイルサイズによってデータ処理時間が影響を受けるとされるため, 1 パケットを 1460 バイトと仮定した時のパケット単位の処理時間 (t'_3) について比較検討する.

また, この評価プログラムは Web サーバのテキストデータのみを収集するプログラムとしており, 通常のブラウザのようにコンテンツにより繰り返し画像データなどを GET できるような処理はしていない.

なお, 事前の実験で評価プログラムの読み込みバッファサイズは, 最も一般的な MSS と同じサイズである 1460bytes の場合が, 最小処理時間となる結果を得ているので, 評価プログラムのバッファサイズは 1460bytes としている. また, この評価プログラムはマルチコネクションを利用しておらず, 1 回のアクセスとはコネクションの確立から解放までの処理を示す.

この評価プログラムを利用して 1999 サイトの Web サーバに対してそのトップページのテキストデータを 3 回収集した. そのテキストデータの平均ファイルサイズは 1 サーバ当たり 13815bytes となった.

4 特性の評価実験

4.1 ファイルサイズ

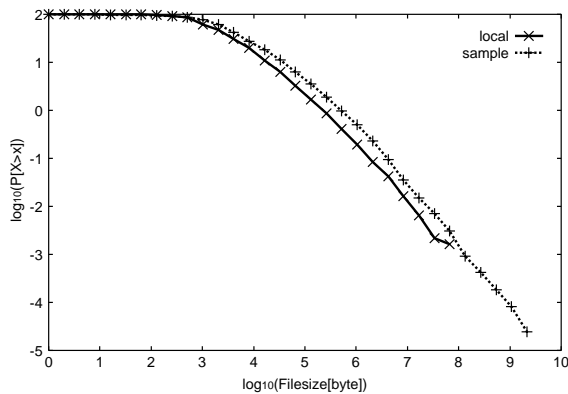


図 2: UNIX ファイルサイズの特長

図 2 に UNIX におけるファイルサイズの排他的累積分布特性を示す. "local" と記述したデータは OS が FreeBSD 5.21 で 40Gbytes の HD を持つホストのシステムデータに関する特性を示しており, "sample" と記述したデータは文献 [5] にリストされているデータを対象としている. 図 2 からどちらのデータについても, ほぼ $\alpha = 0.91$ となった. また, 図 2 の曲率から考えて, power-law の特性を示すのではなく, 1000bytes 以上のファイルサイズに関して,

双曲線的な特性を持つ tail 部分であることを示している. また, どちらもほぼ同様の形状となりここ 10 年あまり変化していないことがわかる.

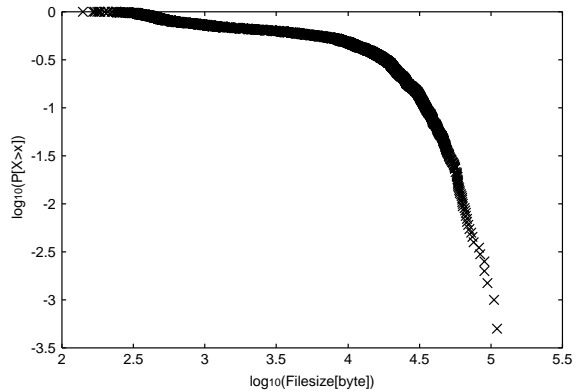


図 3: Web ファイルサイズの特長

図 3 に実験で収集した Web サーバのテキストデータに関するファイルサイズの排他的累積分布特性を示す. 図 2 と比べて分布は一部, 特に 10Kbytes を越えるファイルサイズに集中している. また, この部分は $\alpha = 3.00$ となっている. テキストファイルに関する曲線は, 文献 [2] で示されているテキストファイルの場合とほぼ同様である. 現在の分布の方が全体としてファイルサイズが小さくなっている理由として, ホームページのトップページは画像や他のページへのリンクなど, 実際の情報よりインデックス的な情報が増えていることによると考えられる.

4.2 サーバ処理時間の分析

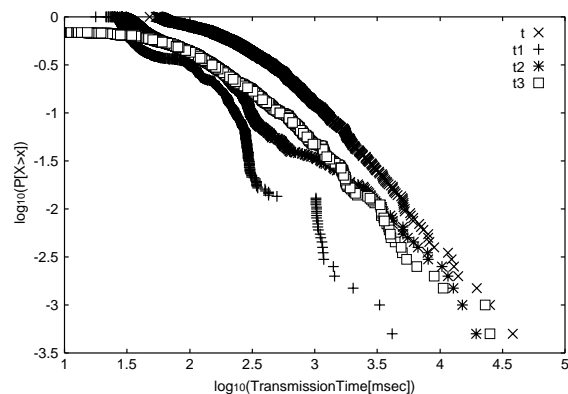


図 4: 転送時間の特長

図 4 に TCP のコネクション確立時間を含む Web クライアントからみた, Web サーバの全体の転送時間の排他的累積分布特性を示しており, Heavy-tailed な特性を持つと言える. 文献 [2] では, およそ

$\alpha = 1.29$ であるが、この図4では、 $\alpha = 1.34$ となり、ほぼ同様の曲率となっている。しかし、値としては1桁ほど小さくなっており、処理が高速になっていることが分かる。また、図4には、 t を構成する t_1, t_2 , および t_3 の分布特性も示している。

このように評価プログラムを利用することにより、クライアント側でこれらの転送時間を詳細に分析することが可能となる。次に、 t と t_2 および t と t_3 の関係を以下に示す。

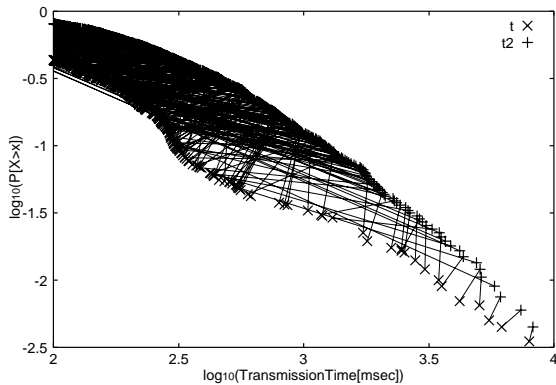


図 5: t および t_2 の関係

図5に t および t_2 のプロットと、同一のサーバのデータ、すなわち t を構成する t_2 を直線で結んでいる。また、同様に図6では、 t を構成する t_3 を直線で結んでいる。

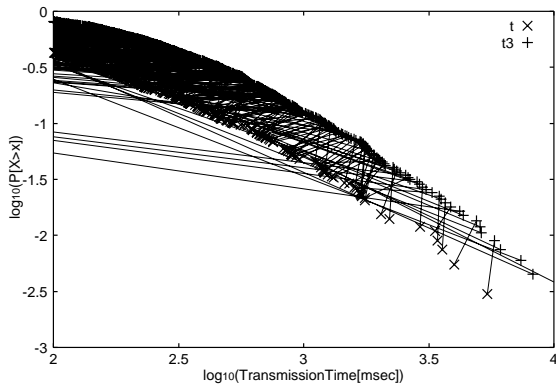


図 6: t および t_3 の関係

これらの図5および図6から、 t を支配する要因は必ずしも t_3 だけではなく、 t_2 も支配する要因となることがわかる。

これらの結果から、まず、サーバのテキストファイルのみに限定した場合においても、転送時間の分布特性は Heavy-tailed な特性を持ち、Heavy-tailed な特性は Robust であると言える。また、コネクション開始時の初期データ転送までに時間がかかる場合と、実際のファイル転送が全体の処理時間を支配している場合など、個々のサーバには特性があるが、

全体の処理時間としてみた分布特性は Heavy-tailed な特性をもち、個々のサーバの特性に依存せず維持されている特性という意味において Robust であると言える。

5 サーバの性能評価に関する考察

今までの実験結果より、個々のサーバには性能に差があり、全体の処理能力に関する Heavy-tailed な分布の tail 部分においても、その性能が影響していることが明らかとなった。ここでは、まず、複数のパケット転送が含まれる t_3 を1パケット単位のデータに分割することにより、分布の特性を考察し、次に、 t_2 および t_3 が支配的なサーバを分類し、それぞれについて性能を考察する。

5.1 1パケット当たりの処理時間の分析

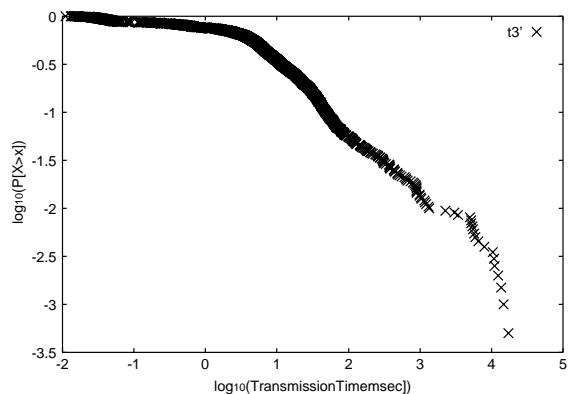


図 7: 1パケット当たりの処理時間の特性

図7に1パケット当たりの処理時間の排他的累積特性を示す。この図7の10msec以上の処理時間を持つ部分の曲率は、 $\alpha = 0.64$ となる。全体として、1パケット当たりに換算した場合においても Heavy-tailed な特性を持つと言える。したがって、従来言われていた転送時間が Heavy-tailed な特性を持つことの原因がファイルサイズにあるというのは、一つの要因となっていると見なすことができる。

図8に t_3 および t'_3 のプロットと、同一のサーバのデータに対応する t_3 と t'_3 を直線で結んでいる。この図からどちらの tail 部分に関してもあまり関係がないことが分かる。 t'_3 は、パケット数で割っていることにより、ファイルサイズの影響がなくなったと考えることができるが、現実的には転送するファイルサイズが大きくなれば TCP による信頼性を維持した転送機能により、 t'_3 も大きくなる可能性がある。しかし、図8からは、 t_3 と t'_3 が独立していることから、 t'_3 はファイルサイズと無関係なパラメータとして見なすことができる。

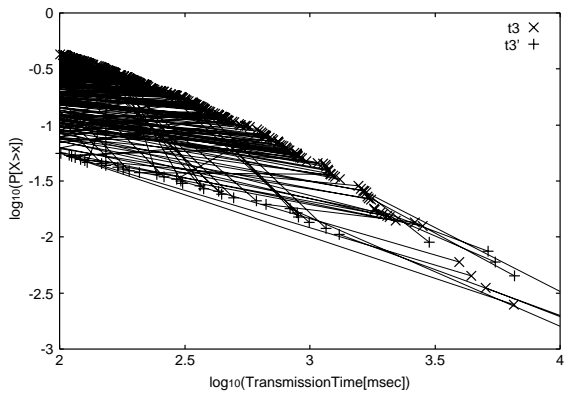


図 8: t_3 と t_3' の関係

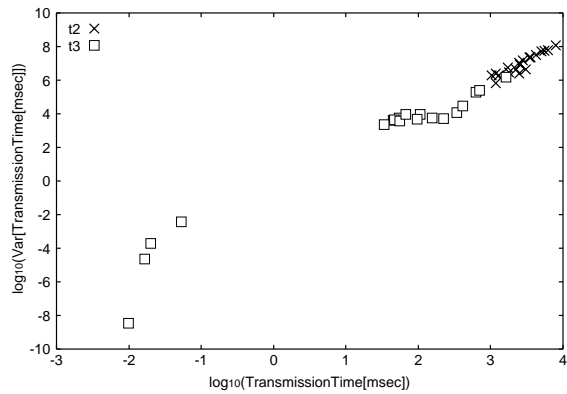


図 10: t_2 が支配的なサーバに関する性能評価

5.2 t に支配的な要因によるサーバの分類

すべてのサーバに関して t_3 の値に基づき性能の分布特性を示したのが、図 9 である。この図は、平均値と分散の分布図を $\log - \log$ オーダーでプロットしている。この図から、分散値の上限を見たとき、ゆるやかに線形に値が上昇しており、また下限値については幅広く分散していることがわかる。全体の上昇傾向の中で、分散値が小さな値を取るサーバは、システムの処理能力が安定していると見なすことができる。

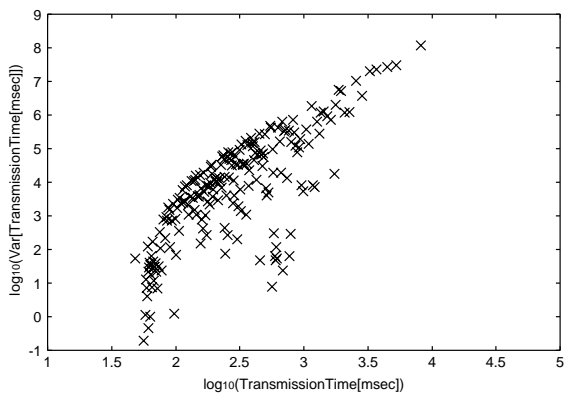


図 9: t_3 に基づくサーバの性能評価

次に、図 5 および図 6 のデータから転送時間が 1sec 以上となるサーバをそれぞれ 19 個および 32 個抽出し、それらのサーバの計測データに基づき、平均値と分散の分布図を $\log - \log$ オーダーでプロットした。

図 10 は、 t_2 が支配的なサーバにおける t_2 と t_3 の性能分布である。図から明らかなように全体として初期データ処理、転送処理に時間がかかり、分散値も大きな値をとることから、あまり安定せず動作していることがわかる。このように t_2 が支配的なサーバについては、処理能力の限界が動作に影響をおよぼしていると考えられる。

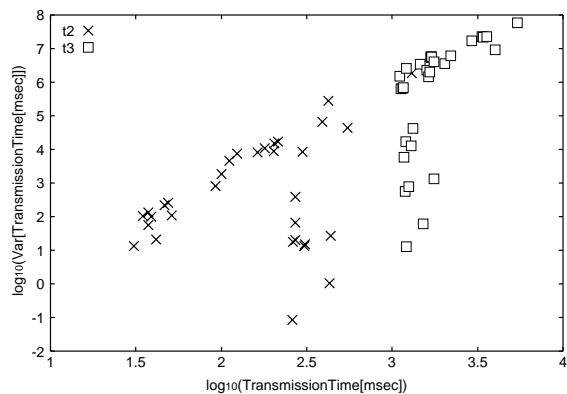


図 11: t_3 が支配的なサーバに関する性能評価

一方、図 11 は、 t_3 が支配的なサーバにおける t_2 と t_3 の性能分布を示している。図 10 と異なって図 11 では、線形的に上昇するエリアにサーバが分布するだけでなく、一部のサーバについては、分散値が押えられており、安定した動作をしていることがわかる。

しかし、図 11 では、ファイルサイズの増加が負荷の増加に関係する可能性があるため、図 12 に、 t_3 が支配的なサーバにおける t_2 と t_3 の性能分布を示した。また、図中の t_2 と t_3 のプロットにおいて同一のサーバのデータは破線で接続している。この図から、 t_2 において分散値が押えられている安定したサーバは同様に t_3 の分散値も同様に押えられて安定していることが分かる。

6 おわりに

本研究では、インターネットに偏在する Web サーバ全体の Heavy-tailed な特性に注目し、リモートからのアクティブ計測によりサーバの動作を観測した。Web サーバの転送時間は Heavy-tailed な特性を持

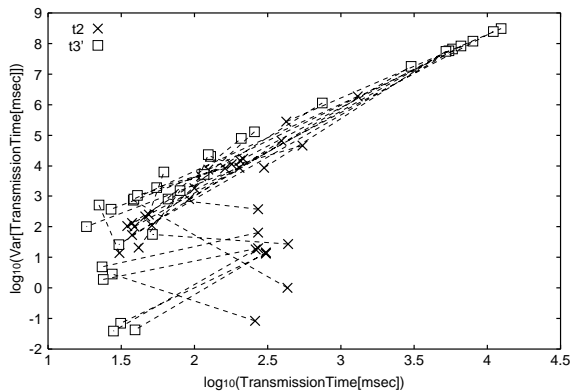


図 12: t_3 と比較した性能評価

ち、その要因がファイルサイズに起因すると言われているが、実験では TCP のコネクションが確立し、最初にデータ送信を開始する初期化時間も Heavy-tailed な特性に影響していることがわかった。また、個々のサーバの特性が存在しても、転送時間全体としては Heavy-tailed な特性となり Robust な現象であることが分かった。

さらに、Heavy-tailed 分布の tail 部にあたる負荷が高いと思われるサーバを転送時間の各要素に準じて分類し、それぞれに対して性能の傾向を評価した結果、初期化時間に時間を要しているサーバについては、分散値が小さく安定した動作をするサーバが少ないことがわかった。また、初期化時間が安定する傾向にあるサーバについては、1 パケットあたりの転送時間も同様に安定する傾向があることがわかった。

今後も、リモートからの評価に視点を置きながら、サーバの動作を詳細に定義し、その性能評価の指標を実験的に考察していきたい。

参考文献

- [1] Leland, W., Taquq, M., Willinger, W. and Wilson, D.: On the Self-Similar Nature of Ethernet Traffic (Extended Version), *IEEE/ACM Trans.Networking*, Vol.2, No.1, pp.1-15, February (1994).
- [2] Crovella, M. and Bestavros, A.: Self-similarity in World Wide Web traffic: evidence and possible causes, *Proc. of the 1996 ACM SIGMETRICS International Conference on Measurement and Modeling of Computer Systems*, pp.160-169, May, (1996).
- [3] Paxson, V. and Floyd, S.: Wide-Area traffic: the failure of Poisson modeling, *IEEE/ACM Trans. Networking*, Vol.3, No.3, pp.226-244 (1995).
- [4] Park, K. kim, G. and Crovella, M.: On the relationship between file sizes, transport protocols, and self-similar network traffic, *Proc. IEEE International Conference on Network Protocols*, pp.171-180, (1996).
- [5] Irlam, G.: Unix file size survey-1993. <http://www.base.com/gordoni/ufs93.html>, September (1994).
- [6] Park, K. ,Kim, G. and Crovella, M. E.: The Protocol Stack and Its Modulating Effect on Self-similar Traffic, *Self-Similar Network Traffic and Performance Evaluation*, K.Park and W.Willinger,Eds.,Wiley-Interscience, New York, pp.349-366, (2000).
- [7] Park, K. and Willinger, W.: Self-similar Network Traffic: An Overview, *Self-Similar Network Traffic and Performance Evaluation*, K.Park and W.Willinger,Eds.,Wiley-Interscience, New York, pp.1-38, (2000).
- [8] D. Mosberger and T. Jin, "httpperf:A Tool for Measuring Web Server Performance",First Workshop on Internet Server Performance, ACM, pp.59-67(1998).
- [9] S.P.E.Corporation, "http://www.spec.org/osg/web99/,"(2000).
- [10] 中村 豊, 知念 賢一, 砂原 秀樹, 山口 英, "ENMA : パケットモニタによる WWW サーバの性能計測システム的设计と実装", 電子情報通信学会論文誌 D-I Vol.J83-D-I No.3 pp.329-338,3 月 (2000).
- [11] 中山 貴夫, 中村 豊, 砂原 秀樹, "IPv6 環境を考慮した WWW ベンチマークシステム", 電子情報通信学会論文誌 B Vol.J86-B No.8 pp.1515-1522,8 月 (2003).