

End-to-Endパスにおけるパケット到着間隔および損失の特性解析

串田 高幸[†] 柴田 義孝^{††}

インターネットは、ベストエフォート型サービスを提供しているネットワークであり QoS (Quality of Services) 制御を持っていない。そのため、このネットワークでは、End-to-End パスのパフォーマンスが保証されないために、その特徴を測定解析することが重要になってくる。本研究では、まず、End-to-End パフォーマンスを、パス固有の特徴と動的な変化の特徴と大きく 2 つに分けて定義し、そのうち、動的な変化の特徴について、パケット到着時間間隔とパケット損失の測定解析を行った。この結果、パケット到着時間間隔とパケット損失は、Self-similar で Long-range dependence の性質を持っていることが分かった。また、輻輳時には、パケット到着時間間隔とパケット損失との明確な関係がないことが分かった。

Characteristics of Inter-arrival Packet Times and Packet Losses on the End-to-End Path

TAKAYUKI KUSHIDA[†] and YOSHITAKA SHIBATA^{††}

The Internet provides a best-effort service, and there is no control mechanism of Quality of Service (QoS) for users. Since the end-to-end performance isn't guaranteed on the Internet, a measurement and an analysis of the end-to-end performance is important task for an application. This paper describes a definition of the end-to-end performance, two major characteristics which are static characteristics and dynamic characteristics. The dynamic characteristics have been analyzed with inter-arrival packet times and packet losses. In this results, inter-arrival packet times and packet losses have self-similarity with the property of long-range dependence. The evident relation between inter-arrival packet times and packet losses wasn't recognized at the congestion state.

1. はじめに

インターネットは、ベストエフォート型のサービスを提供しているネットワークであり、途中のルータは、経路テーブルによってパケットの転送を行う機能を持っているだけで、それ以外の QoS (Quality of Services) 制御を行う機構を持っていない。つまり、インターネットでは、ネットワークのサービスとして End-to-End パフォーマンスが保証されていない。そのため、パフォーマンスをなんらかの方法で測定して、その特徴を調べることが必要になってくる。たとえば、高いパフォーマンスを必要とするアプリケーションでは、その値を見積もって正しく報告する付加機能が重要になる。

また、インターネットの代表的なアプリケーション

である WWW において、コンピュータのパワーが十分にあって、さらに複数のサーバに対する応答時間にほとんど差がない場合、ネットワークにおける End-to-End パフォーマンスの差によってユーザの満足度が上がることが分かっている。これはいい換えると、サーバからの応答が早ければ、ユーザの操作性が向上して、その結果、サーバにアクセスした同じユーザが、再び同じサーバにアクセスする確率が増加するということである。このようにインターネットのサービスにおいて、End-to-End のパフォーマンスを改善することに対する重要性が増大してきている。

一方、最近、パフォーマンスを改善するための分散処理やキャッシュの技術を使って、より短い時間で大量のコンテンツを配信するための CDN (Contents Delivery Network) や CDS (Contents Delivery Service) のようなネットワークやサービスがインターネットにおいて実用化されてきている。このサービスは、ベストエフォート型ネットワーク上で、より改善されたサービスを提供するために使われている。このような背景から考えると、End-to-End パフォーマンスを見

[†] 日本アイ・ビー・エム株式会社東京基礎研究所
Tokyo Research Laboratory, IBM Japan Ltd.

^{††} 岩手県立大学ソフトウェア情報学部
Faculty of Software and Information Science, Iwate
Prefectural University

積もって計算することは、ネットワークサービスにおいて重要な要素であることが分かる。

インターネットで使用されている TCP/IP プロトコルでは、一般に、IP パケットが転送の最小単位になっている。ネットワークで使用されているルータにおいて、パケットヘッダに記録されている宛先アドレスと、ルータの経路テーブルにあるアドレスが一致したとき、その経路テーブルの次のアドレスに、この IP パケットが転送される。そして、宛先ホストに到達するまで IP パケットは、転送されることになる。

もし、ルータの処理能力以上のパケットが流入したり、あるいは次のリンクの転送速度以上にパケットを転送しなくてはならなくなったりしたとき、いったん、到着したパケットはルータに一時的に蓄えられる。この一時的に蓄えられることが、途中にある複数のルータで起こると、End-to-End パスでは遅延として観測される。

つまり、このような遅延が生じる主な原因は、途中のリンクでの輻輳によって引き起こされると考えられる。また、輻輳した直前のリンクでのバッファの溢れは、End-to-End のホストにおいて、パケット損失として検知される。

このようにインターネットでは、輻輳により遅延の変動が生じて、それに加えてパケット損失が起こるため、ネットワークにおいて End-to-End パフォーマンスを保証することができない。もし、アプリケーションからパフォーマンスの特徴を測定して見積もることができる機能を持つことができれば、アプリケーションは、効率良くネットワークを利用することができると思われる。

本研究では、End-to-End パフォーマンスを見積もるための基本的な特徴を知るために、パケットレベルでのパフォーマンスに影響する特徴について測定解析によって調べることを行った。次の章では、最初に End-to-End パフォーマンスに関して、その特徴を大きく 2 つに分けてモデルによって述べる。また、この 2 つの特徴のうち、1 つになっている動的な特徴であるパケット到着間隔およびパケット損失に関して、インターネット上で実際に測定した解析した結果について述べる。

2. バックグラウンド

2.1 2 つの特徴

インターネットにおいて、End-to-End パフォーマンスの解析を行うとき、特徴を大きく 2 種類のパラメータとして分けて考えることができる。これらの 2

種類のパラメータとは、「パスが固有に持っている特徴 (パスに固有の特徴)」と「他のパケットから受ける影響によって起こる特徴 (動的な変化の特徴)」である。

A. パス固有の特徴：

パスに固有の特徴は、End-to-End のパスが固有に持っている静的な値として定義する。一般に End-to-End にある各リンクと途中ルータにおいて、パケットを転送するために回線速度に反比例した時間が必ずかかる。これは、転送のために必要となるパスに固有な時間である。

固有な特徴であるルータ内部での転送時間や処理時間は、パケット動的な処理や転送されている他のトラフィックには関係なく、つねに一定の値になる。このほか、パケット転送処理時間以外にも処理すべきパケットがない場合に、一定の処理時間が必要になる。

これらのパケット転送処理時間は、バンド幅が十分に大きいと、一般にリンクを転送する時間に比べて十分に小さくなる。

さらに途中のパスにパケットが流れている場合、それらに加えて、キュー遅延時間も見積もっておく必要があるが、これは、次の動的な変化の特徴である。

インターネットにおいてリンクのパス固有の特徴を見積もるためのツールとして pathchar が有名である。本研究と関連する研究として、この pathchar を使ってリンクの特徴を調べた結果が報告されている¹⁾。この結果によると、pathchar は、遅延の見積もりが容易であるが、バンド幅の見積もりに関しては、その値が大きくなると困難になると報告された。

一方、バンド幅の測定を行うために packet-pair と packet-tailgating の 2 つの方式を使ってリンクのバンド幅を調べた結果が報告されている²⁾。この報告では、packet-tailgating は、少なめのパケット数で比較的正確にリンクのバンド幅を調べることができることが述べられている。しかし、この方法は、ホップ数が小さいときは結果が正確であるが、ホップ数が大きくなると不正確になることも同時に報告されている。

また、パス固有の特徴としてルータのホップ数がある。実際の測定によって複数のパスについて、ルータのホップ数と遅延の関係を調べたが、ホップ数と遅延には、強い相関関係がみられなかったことが報告されている³⁾。しかし、平均遅延は、ホップ数が増加するに従って少しだけ増加する傾向がみられた。この報告から遅延は、ホップ数よりもリンク速度やリンクが敷設された距離が大きく関係していることが考えられる。

このように End-to-End パフォーマンスのうち、特にパス固有の特徴については、ツールを使って実際の

ネットワークを測定解析した結果が報告されている。

ここでは、パス固有の特徴について、簡単なモデルをもとにして述べる。End-to-Endのパスにおいて、 k 番目に転送されているパケットが、リンク l の手前のルータに到着する時間を t_l^k とする。このパスが、 $(0 \dots l)$ と l 個のノードで構成されている仮定すると、 k 番目のパケットの絶対遅延時間 t_l^k は、次の式で定義される²⁾。

$$t_l^k = t_0^k + \sum_{i=0}^{l-1} \left(\frac{s^k}{b_i} + d_i + q_i^k \right) \quad (1)$$

式(1)において、 b_i は、 i 番目のリンクのビットレート(バンド幅)であり、また、 s^k はデータ長(バイト)で s^k/b_i は、 i 番目のリンクでの転送レートと定義する。また、 i 番目のルータでのテーブル参照時間や固定処理時間の和の遅延時間をすべて含めて d_i として、 i 番目リンクのキューでの遅延時間を q_i^k と定義する。このとき、この遅延時間 q_i^k は、キューの長さによって時間的に変化する関数になる。

もし、途中のリンクにおいて輻輳が何もないと仮定すると、キューの待ち時間がなくなるので、パス固有の特徴だけとなり、時間的な変動がなくなることが分かる。これは、キューの遅延が $q_i^k = 0$ の状態である。このとき、転送されるパケットは、単に転送されるだけでルータのキューにとどまらない。

B. 動的な変化の特徴：

もし、他のトラフィックとして、途中のリンクに、ある程度の量のパケットが流入してくる状態があれば、リンクの直前のルータにパケットのキューが存在する状態がある。このとき、キューの内部では、時間的にほとんど変化がないか、あるいはゆっくりとした変化しかしないと仮定する。

すぐ前に送られた $k-1$ 番目のパケットによって、 k 番目のパケットが一時的にキューされるときの状態を表してみる。このとき、式(1)での遅延 q_l^k は、

$$q_l^k = \max(0, t_{l+1}^{k-1} - d_l - t_l^k) \quad (2)$$

の式となつて、最大値をとると定義する。また、式(2)は、 $k-1$ が次のリンクに送られた後に、続いて送られるリンク l の遅延 d_l を引いた結果になる。これと同様な結果は、別な文献においても述べられている⁴⁾。

また、式(2)では、同じ送信者からのパケットが連続して届くと仮定して固定的なキューの遅延に基づいたモデル化がなされている。さらに、この式を単純にしたキューのモデルによって、その値を得る計算を行うことが可能であることは、以前に報告されている⁵⁾。

しかし、キューの遅延 q_l^k が、時間的な変動をとまなう場合、このキューが特定の分布を持っていると仮定して解析する必要がある。まず、送信側から送られている2つの連続したパケット $k, k+1$ が、時間的に十分に離れている(途中のノードで連続してキューされない)とすると、 k 番目のパケットと $k+1$ 番目のパケットの受信到着間隔 $t_{arrival}$ は、

$$t_{arrival} = t_l^{k+1} - t_l^k = \sum_{i=0}^{l-1} (q_i^{k+1} - q_i^k) \quad (3)$$

として定義することができる。この式からパケットの到着間隔 $t_{arrival}$ には、パスに固有の特徴がなく、途中リンクのキューにおける遅延時間の差の総和だけになることが分かる。

つまり、パケットの到着間隔を測定することによって、式(3)の値が求められ、その結果、パスの途中にあるキューの動的な変化に関する特徴だけを調べることができる。この途中リンクのキューの特性が、パスにおける遅延の値を変動させていることになる。このようなことから、パスが持っている特徴を知ることができる。

この研究では、パケット到着間隔の測定解析を行って、End-to-Endのパスが持っている特徴を調べることが目的としている。また、パケット損失は、さらにキューの溢れによることで起こるため、パケット損失の特徴も同時に測定して解析を行った。

式(2)の q_l^k は、 k 番目のパケットが一時的にキューされているだけあって、その動的な変化の特徴を表している。このキューは、リンクが輻輳しているために、ルータにおいて他のパケットにとともに一時的に蓄えられるために起こる。そのため、キューの長さは、時間によって動的に変化する。

2.2 Self-similar と Long-range dependence

パケット交換ネットワークにおけるパケットの到着確率は、ポアソン分布ではなく、Self-similar で Long-range dependence の特徴を持つことが、ネットワークに対する多くの実験データを解析した結果として報告されている^{6)~9)}。

この特徴に加えて、このデータは、Heavy-tailed 分布になることも分かっている。Heavy-tailed 分布の特徴は、指数減少分布とは異なり、値が大きくなったとしても、その分布は、ゆっくりと減少する特徴を示している。また、パケットの遅延特性も同様に Self-similar で Long-range dependence になることが知られている¹⁰⁾。

一方、実際に稼動しているインターネットの動作状

態を一般的なモデルとして、シミュレーションすることは、大変難しいとされている¹¹⁾。これは、ネットワーク自身が巨大であることも原因であるが、いろいろな種類の接続方式と、それぞれのリンク特性の変化が転送されているパケットの量に応じて動的に起こるためである。また、パケットの到着に関して、Self-similarの特徴を持っているが、一方で人間がイベントを起こしている telnet や FTP のセッションの開始の特徴は、ポアソン分布になることも分かっている¹¹⁾。

一般にパケット交換ネットワークのトラフィックの特徴が Self-similar であるということは、Queuing 理論で仮定している Poisson 分布を持っている仮定で求めてきた結果と、まったく異なるところにある。その結果、Self-similar の特徴を持っているトラフィックは、Queuing 理論で求めた結果よりも、より大きな遅延があって、またより多くのバッファを必要することが分かっている⁷⁾。もし、パスの途中のリンクにおいて、輻輳が起こっている場合、この影響を必ず受けるはずであり、ネットワークの資源予測も変わってくる。

ここでは、まず、本研究の測定解析に関連する特徴に関して定義を記述して、どのようにその特徴を判定するかについて述べる。

最初に、時系列の関数を定義する。変化のゆるやかな時間系列の変数を x とすると、 m 個の時間系列の変数 x は、 $x^{(m)} = x_k^{(m)}$, $k = 0, 1, 2, \dots$ として定義される。このとき、時系列の平均 $x_k^{(m)}$ は、

$$x_k^{(m)} = \frac{1}{m} \sum_{i=km-(m-1)}^{km} x_i \quad (4)$$

として表される。この $x_k^{(m)}$ において、 k が十分に大きいと仮定したとき、式 (5) に近似しているとき、その特徴は、Self-similar であると定義される。

$$Var(x^{(m)}) = \frac{Var(x)}{m^\beta} \quad (5)$$

これが、Self-similar と Long-range dependence の一般的な式 (5) になる。式 (5) において、 $Var(x)$ は、 x の分散であり、この式を対数で表記すると

$$\log[Var(x^{(m)})] = \log[Var(x)] - \beta \log(m) \quad (6)$$

となる。また、式 (6) において、 $\beta(0 < \beta < 1)$ は、 $H = 1 - (\beta/2)$ として定義される。このパラメータ H は、Hurst パラメータと呼ばれ、Self-similar の度合いを表すパラメータに利用する。

さらに Self-similar を調べるもう 1 つの方法として、R/S の比を計算する方法がある。時系列関数 X_k に対する最大値 MAX と最小値 MIN を次の式で定義

したとき、

$$MAX = \max_{1 \leq j \leq N} \left[\sum_{k=1}^j (X_k - M(N)) \right] \quad (7)$$

$$MIN = \min_{1 \leq j \leq N} \left[\sum_{k=1}^j (X_k - M(N)) \right] \quad (8)$$

時間間隔 N での R/S の比は、

$$\frac{R}{S} = \frac{MAX - MIN}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (X_k - M(N))^2}} \quad (9)$$

と定義することができる。式 (9) で、このとき

$$M(N) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N X_j \quad (10)$$

であって、時間 N に対する平均を表している。もし時系列関数が、Self-similar であるとすると式 (11) が成り立つ。

$$\log[R/S] \sim H \log(N) - H \log(2) \quad (11)$$

R/S と N を log-log グラフでプロットして、そのデータに対して線形近似を行うと H がその傾きになることが、式 (11) から分かる。一方、autocovariance を $C(k)$ とすると、

$$C(k) \sim |k|^\beta \quad \text{as } |k| \rightarrow \infty \quad 0 < \beta < 1 \quad (12)$$

となる特徴がある。この特徴は、Long-range dependence であって、すべての時間スケールにおいてクラスターやバーストの特徴があることを表している。この式において、つねに $H = 1 - (\beta/2)$ となることが分かっている。このパラメータの範囲が、 $1/2 < H < 1$ であると定義すると Self-similar であって、Long-range dependence の特徴を持つということが出来る。また、もし $H \rightarrow 1$ であれば、より強く Self-similar で Long-range dependence であることを示している。

また、もう 1 つの別な特徴として、Heavy-tailed 分布がある。これは、確率密度分布として表すことができる。独立した系列のランダム変数 X の確率分布が、

$$Pr[X > x] \sim \frac{1}{x^\alpha} \quad \text{as } x \rightarrow \infty, \quad 0 < \alpha \quad (13)$$

で近似される場合、分布が Heavy-tailed になっているということが出来る。式 (13) を log-log として、 $\bar{F}(x) = 1 - F(x) = Pr[X > x]$ とすると、

$$\frac{d \log \bar{F}(x)}{d \log x} \sim -\alpha \quad x > \theta \quad (14)$$

の特徴を持つことになる。式 (14) で適切な θ の値を

とることによって、式 (14) で直線に近似することで Heavy-tailed 分布を調べることができる。

また、Heavy-tailed 分布の単純な例は、Pareto 分布と呼ばれ、

$$f(x) = \frac{\alpha}{k} \left(\frac{k}{x}\right)^{\alpha+1} \quad (15)$$

の式で表される。また、この分布は、

$$F(x) = 1 - \left(\frac{k}{x}\right)^{\alpha} \quad (x > k; \alpha > 0) \quad (16)$$

の式で表される。ここで k は、分布によってとることができる最小値であって、また、 α は、ランダム変数の平均と分散から得られる値である。これらの固有の特徴とキューの長さが転送されている間隔と同じ特性を持っている。

パスの動的な特徴の変化について、式 (2) の q_i^k を使った式 (3) が、Self-similar でまた Long-range dependence であって、Heavy-tailed distribution を持つかどうかについて、次章での実際の測定解析によって調べていく。

3. 測定解析

この章では、パケット到着間隔とパケット損失の特性を測定によって調べて、どのような特性になるのかについて述べる。

3.1 測定方法

最初にパケットの到着間隔の測定を行う方式について述べていく。パケットの到着間隔の測定は、送信側で一定の間隔で複数のパケットを送出して、途中のリンクにおいて生じるパケットの到着間隔の遅延分布を測定する。図 1 の Host (Source) から Host G, Host T, Host Z に一定の間隔でパケットを送出すると、ネットワーク内の途中のリンクの転送条件の影響によって、それぞれのパケット到着間隔が異なる結果が出る。送信時間を t として、受信時間は t' になる。このとき、 t' を記録することで、パケット到着間隔を測定することができる。

図 2 は、パケットの送出間隔および到着間隔について説明している。この図において、送出側のパケット送出間隔が $t_1 = t_2 = t_3 = t_4 = t_5 = T$ のように一定の値にすれば、受信側の到着間隔は、 t'_1, t'_2, t'_3, t'_4 として測定することができる。

もし、途中に変動がなく、受信側ではつねに一定の遅延になると仮定すると、受信側のパケットの到着間隔の値は、絶対遅延だけになる。つまり、この到着間隔は、送信間隔と同じであって一定の間隔になる。このような結果になる理由は、つねにルータの処理時間

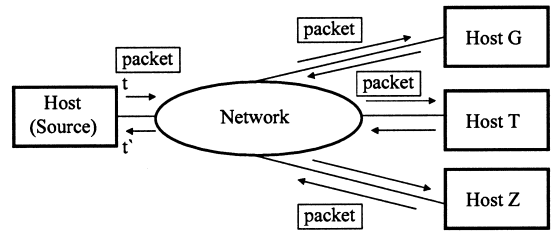


図 1 測定の構成図

Fig. 1 Configuration of measurement.

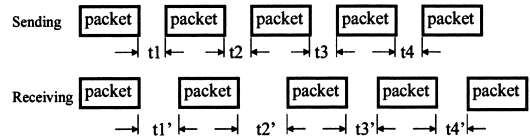


図 2 送出および到着のパケット間隔

Fig. 2 Sending packets and receiving packets.

やリンクの転送時間があるが、その値が一定であるために、パケット到着間隔も一定になるからである。

一方、送信側でパケットが、同じ時間間隔 T で送出されている場合、受信側でパケット到着間隔が、測定時刻によって、異なって受信されていれば、パケットが転送されているパスの途中で遅延があつて、その遅延に分散があることが分かる。この結果、受信側でのパケット到着間隔は、 $t'_1(x), t'_2(x), t'_3(x), t'_4(x)$ として時間 x の関数として、動的な変化することになる。この現象は、途中のリンクに輻輳があり、また、その輻輳リンク手前のバッファにパケットが、一時的にキューされるために遅延が起こるためと考えられる。そのため、パケット到着間隔の式 (3) の $t_{arrival}$ における時間的な変動の度合いは、途中のリンクのどこかに生じた輻輳に依存していると考えられる。

ここで述べた時間間隔を測定する方式の利点は、仮にインターネット上で送信側ホストと受信側ホストの絶対時間がまったく異なっていたとしても、送出間隔が、受信側ホストで測定したデータを解析するときに分かっていれば、受信間隔のみを測定すればよいところにある。

もし、一方の絶対遅延時間の特性測定を行うことが必要となると、単純な測定方式を使う場合、送受信ホストの時刻合わせが重要となる。この場合、順方向および逆方向のそれぞれのパスの特性データを測定した結果が、同じ特徴を持っているという前提で解析を行うことで、現在の方式で十分に対応可能である。あるいは、エコーバックによって順方向と逆方向のすべてを End-to-End のパスとした測定をすることで対応することが可能である。

このことから、本研究で使っている測定方式であれば、送受信ホストにおいて、絶対時刻を合わせる必要がなく、インターネット上で測定を行うことができる。

測定の精度：測定データを取得する前に測定の精度がどの程度になるかを調べる必要がある。この試験は、実測した値が、どの程度の精度で測定することができたかを調べて、あとの解析において、その誤差を見積もる必要があるかどうかを判断するときに利用することができる。精度を測定する方法は、基準とするネットワークを決めて、そこで測定を行ってエラーあるいは、誤差を見積もる。

この測定で精度を出す場合、基準とするネットワークとして他のパケットが、まったく転送されていない 100 Mbps Ethernet を利用することとした。このトラフィックがまったくない同じ Ethernet セグメントに、実際に測定に使用するパケット 36,000 個を、送信ホストから受信ホストに転送して、受信したパケットの到着間隔を測定した。複数回、この測定を行った結果、遅延の頻度の分布の幅は、すべて 1 ms 以下になった。今回のパケットの到着間隔の測定では、約 1 ms 程度の精度が必要であるために、精度の実験結果の測定装置の誤差は、十分に低く、誤差については、解析時に特に考慮しないで、測定結果をそのまま利用することができることを確認した。

この測定では、3つのホスト Host G (16 ホップ)、Host T (22 ホップ)、Host Z (25 ホップ) に対して、1KB のパケットを 36,000 個転送して、そのエコーバックの時間間隔を記録した。図 3 は、測定対象になっている 3つのホストに対するパケット到着間隔の頻度分布を示している。図 3 において横軸は、パケットの到着間隔 (inter-arrival time) の中心から差であって、また、縦軸は、時間間隔の頻度を表している。この実験において、送出間隔を 1 秒 (1,000 ms) としているが、受信側で測定した受信間隔から送出間隔を引いた値を、横軸のパケット到着間隔の差として表している。

図 3 をみると、3つのホストの半値幅は、約 50 ~ 52 ms 程度と比較的大きな値になっている。この頻度分布の半値幅が、大きな値をとるということは、到着間隔の頻度に大きな振幅があることを示している。この理由は、パスの途中にあるルータにおいて、パケットが転送される時、他のパケットで転送されていて、パケットがキューに入って、待ち時間が長くなる傾向があることを示している。つまり、キューに入っているパケットの数が多くなると、パケットの到着間隔が大きくなることを表している。

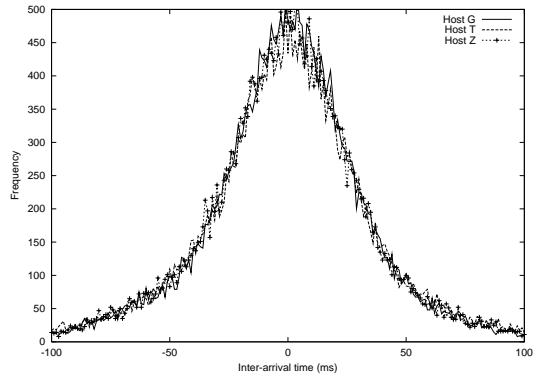


図 3 パケット受信間隔の分布
Fig. 3 Distribution of inter-arrival packets.

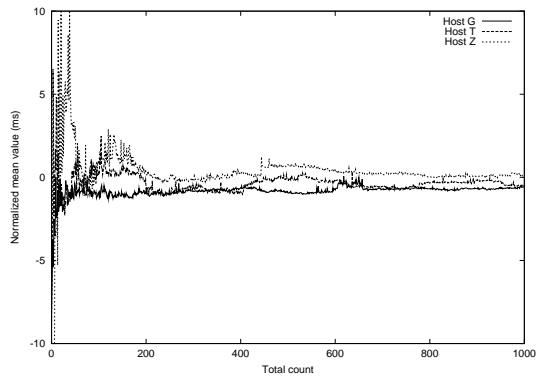


図 4 平均値の収束について
Fig. 4 Convergence of mean values.

一方、ルータのキューにおいて、パケットが待ち時間が少なくなれば、パケットは、そのまま、転送されるだけであるので、送信したときと同じ時間間隔で受信側ホストにも届くことになるはずである。つまり、この場合、図 3 で測定した半値幅は、小さくなり、転送時のルータやリンクでの小さい変動のみになる。また、図 3 において、3つのホストは、同様な特性を示している。これは、3つのホストの測定を同じ時間に行っていて、途中まで同じパスであることが理由である。

一方、測定を行ったとき、どの程度のデータ数を集めて、そのデータをもとにして解析したらよいかということを考える必要がある。この問題に対して、本研究では、パケット到着間隔時間の測定を行う場合の適切なデータ数を調べるために、パケット到着間隔時間の数と平均値の間の収束の特徴について調べた。図 4 は、横軸をパケット到着間隔の数として、縦軸をパケット到着間隔時間の平均値をグラフと表している。図 4 のパケット到着間隔の平均値を調べてみた場合、測定したパケットが 250 から 300 程度のサンプル数にな

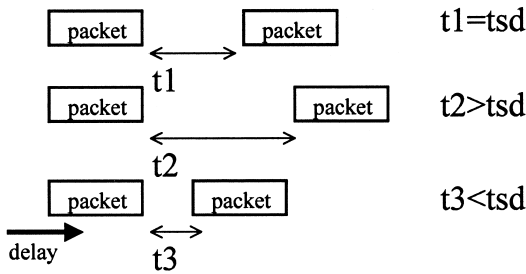


図5 パケット到着間隔の3つの状態
 Fig. 5 Three states of inter-arrival packets.

れば、平均値が、ほぼ収束していくことが分かる。また、パケットのサンプル数がこれよりも少ないと、平均値が測定ごとに変化してしまうために、測定の精度が悪くなることが分かった。

3.2 パケットの到着間隔の解析

測定データを解析する前に、本研究では、パケット到着間隔の状態について、1. 間隔が等しい、2. 到着間隔が大きい、3. 送信間隔が大きい、という3種類の状態に分けて定義する。

パケット到着時間の間隔の変化は、パケットの送信時間間隔を t_{sd} として、受信時間間隔 $t_{rd} = t_1, t_2, t_3$ と定義した場合、図3での測定結果でも分布している1. $t_{sd} = t_{rd}$, 2. $t_{sd} < t_{rd}$, 3. $t_{sd} > t_{rd}$ の3種類の状態になる。図5が、3種類の状態を表している。ここでは、これら3種類の状態をとる理由について述べる。

1. の場合、図5の t_1 は、送信時間間隔 t_{sd} と受信時間間隔 t_{rd} がまったく同じで変わらないことを表している ($t_{sd} = t_{rd} = t_1 = t_2$)。この場合、パケット転送に対して、パスの途中では、必要な絶対時間の遅れだけがあり、それ以外の変化がないため、2つの連続したパケットが到着した時間間隔は、変化しないことを示している。

2. の場合、図5の t_2 は、送信時間間隔 t_1 に比べて受信時間間隔が大きい場合、 $t_2 > t_{sd}$ であって、これは、連続したパケットのうち、後のパケットがパス途中のルータのなかのキューで待ち時間があって、そのため到着時間間隔が大きくなる。

3. の場合、図5の t_3 は、送信時間間隔に比べて受信時間間隔が小さくなる場合、 $t_3 < t_{sd}$ であって、これは、この直前のパケットが、すでにルータでのキューの待ち時間によって遅れてしまっているが、次のパケットの処理はキューの遅れなく行われることで起こる現象であると考えられる。つまり、キューでの待ち時間遅れの復旧が、すぐ次のパケットで起こっている場合、この状態になると考えられる。

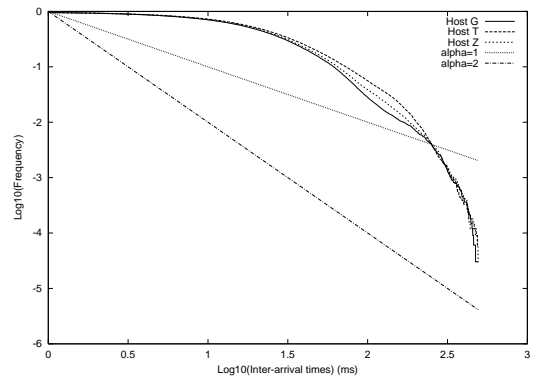


図6 パケット到着間隔の分布
 Fig. 6 Distribution of inter-arrival packets.

この3つの状態が、パケットごとに異なっているために、図3で示したような送信間隔を中心とした分布になる。パケットの受信間隔は、送信時間間隔との差がどの程度になるかによるので、 $(t_{sd} - t_{rd})$ の絶対値に対する確率分布として解析を行う。図6は、3つのホストのパケット到着間隔の差分の分布と、 $\alpha = 1$ および $\alpha = 2$ を log-log グラフとして表している。ここで、 α は、式(14)にある項であって、 $Pr[X > x]$ と x を図6のようなグラフにすることによって、Heavy-tailed の関係を調べることができる。

もし、図6において横軸の到着間隔の差が、1以下であれば、 $\alpha = 1$ に近い値であって、それよりも少し大きい値であると $\alpha = 2$ になる。さらに横軸の到着間隔の差が1.5以上になると、 α の値が増えていくことが分かる。このことから α が、1.5以上であれば、確率分布が急激に減少していくことが分かる。

この結果、式(13)で表されているように測定したパケット到着間隔の差は、横軸が、2よりも小さいときは、Heavy-tailed 分布に従っている。

一方、パケットの到着間隔の Self-similar と Long-range dependence について調べるため、測定値の数 m と分散の関係を調べてみる。この関係は、式(6)から $-\beta$ の傾きがあつて、また、この β は、 $H = 1 - (\beta/2)$ になる。ここで、Hurst パラメータ $1/2 < H < 1$ であれば、Self-similar であつて Long-range dependence の特徴を持っていることを示している。この特徴は β であれば、 $0 < \beta < 1$ となることを表している。つまり、測定したグラフの傾きがこの間にあれば、Self-similar であつて、また Long-range dependence の特徴を持っていると結論づけることができる。

図7は、3つのホストに対するデータの解析結果と $\beta = 1$ を表したグラフである。この図において、 m が1.5までは、 $\beta = 1$ に従っていて、 m が1.5より大

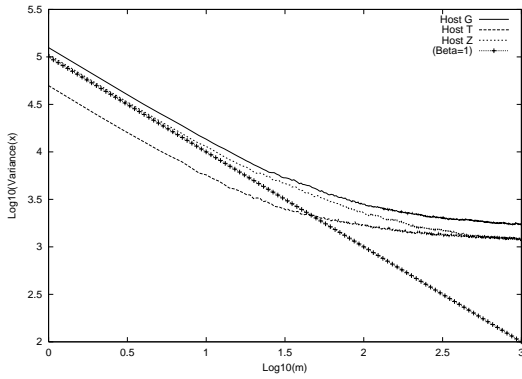


図 7 m と分散の関係
Fig. 7 Relation of m and variance.

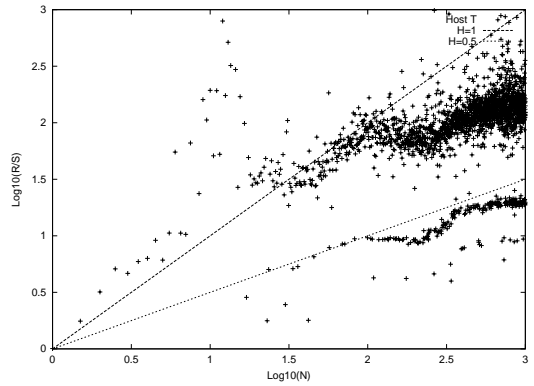


図 9 Host T の R/S 計算
Fig. 9 R/S of Host T.

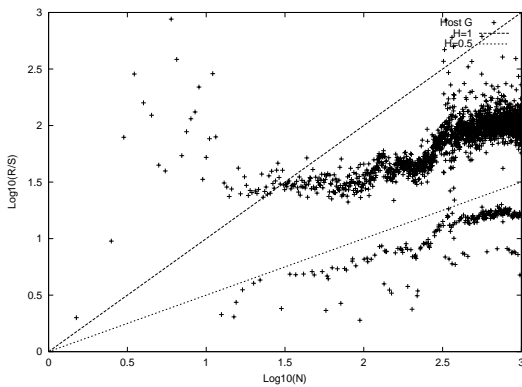


図 8 Host G の R/S 計算
Fig. 8 R/S of Host G.

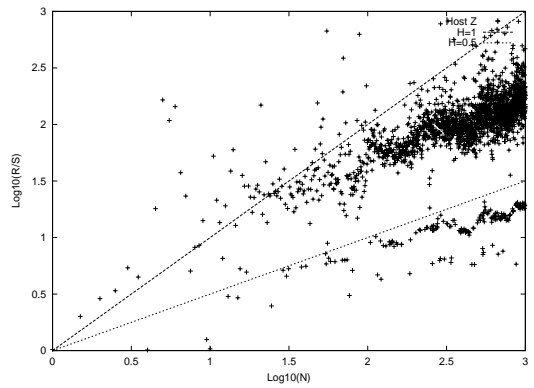


図 10 Host Z の R/S 計算
Fig. 10 R/S of Host Z.

きい場合、 $\beta < 1$ になり、さらに m が 3 に近くなると β は、0 に近くなっていく。このように変化しているが、Self-similar で Long-range dependence の特徴を持っているということが出来る。

Self-similar を調べるもう 1 つの方法として、式 (11) で示した R/S を計算して、近似させる方法がある。ここでは、測定結果のデータから式 (11) を使って R/S の計算結果を出す。その結果をグラフとして、 H の傾きを持った直線を示す。ここで、使っているデータが H の傾きを持った直線に近似させることができれば、測定データは、Self-similar の特徴を持っているということが出来る。図 8, 9, 10 は、それぞれ Host G, Host T, Host Z の R/S の計算をグラフにした図である。また、それぞれの図の中の 2 つの直線は、 $H = 0.5$ および $H = 1$ の直線を示している。この R/S の計算と線形近似を調べると、パケット到着間隔の特性は、Self-similar で Long-range dependence になっていることが分かる。

表 1 損失率

Table 1 Packet loss rate.

	Host G	Host T	Host Z
損失率 (%)	4.05	3.48	3.45

3.3 パケット損失の解析

まず、パケット損失の解析をする前に、測定データから平均パケット損失率を調べてみた。表 1 は、Host G, Host T, Host Z の平均パケット損失率を表にしている。

インターネットにおけるパケット損失率は、年々減少してきて、北米でのパケット損失率の指標は、1%以下になることが報告されている¹¹⁾。しかし、この測定では、途中リンクに比較的損失率の多いデータを使用しているため、表 1 で示すように平均 3.45% から 4.05% 程度のパケット損失率が生じており、以前のパケット損失率の報告よりも高い値になっている。また、別な実験では、途中のリンクに輻輳がない場合、パケット損失率の平均が約 0.85% 程度になっている。

この実験結果から得た高い損失率は、パスの途中リンク輻輳によって起こっており、その結果、直前のルー

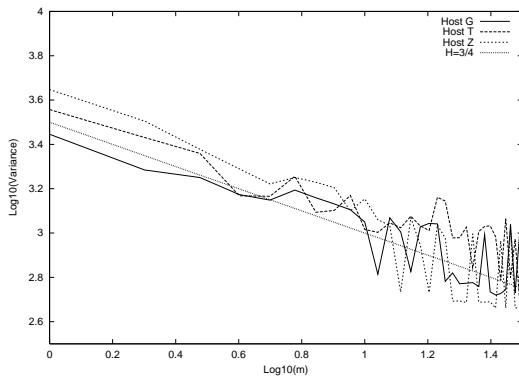


図 11 パケット損失間隔の分散の特徴

Fig. 11 Inter-packet losses and variance.

タのバッファ上のパケットが棄却されることが原因になっている。もし、パスの途中で輻輳が起こっていないならば、パスのルータのバッファにキューができない。もし、パスの途中で輻輳が起こっているときは、バッファのキューにパケットが一時的に蓄積され、そのバッファの容量を超えると蓄えられたパケットを除去することになる。このとき、パスの両端のホストでは、パケットの損失として検知される。この状態になったとき、TCP では、輻輳制御によって送出レートが減少するので、その後の輻輳状態を回避する状態にすることができる。しかし、マルチメディアのストリーム配信のような場合、コンテンツのビットレートで転送しているために、輻輳状態を回避する方向には働かない。

本研究では、パケット損失率が、Self-similar で Long-range dependence の関係があるかどうかについて調べた。図 11 は、パケット損失間隔の分散と m に関する関係をグラフにして表している。図 11 は、log-log スケールのグラフであって、そこに傾きが $1/2$ の直線もグラフとして入っている。この図 11 において、傾きは、式 (6) の β であって、このことから傾き $\beta = 1/2$ ということは、 $H = 3/4$ であり、つまり、これは、 $1/2 < H < 1$ の範囲になっていることが分かる。このことからパケット損失間隔も、やはり Self-similar で Long-range dependence の特性を持つことが分かる。つまり、図 11 のパケット損失の間隔の特性においても、パケット到着間隔の特性と同様な特性を持つことが、この解析から分かった。

一般にインターネットにおいて、パケット損失の起こる主な原因は、パス上の輻輳リンクの手前のルータにおいて、流入してくるパケットに対してバッファが一時的に足りなくなることである。このことから、パケット損失の頻度とパケット到着間隔の間になんらかの関係があると考えられる。そこで、この解析では、

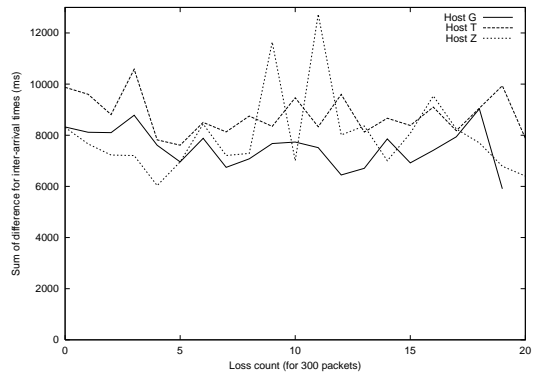


図 12 パケット損失とパケット到着間隔の関係

Fig. 12 Packet losses and inter-arrival packets.

パケット損失数とパケット到着間隔の差をすべて足し合わせた値の間の関係を調べた。

図 12 は、300 個の送信したパケットあたりのパケット損失の数を横軸として、また、パケット到着時間の差分を足し合わせた値の中央値を縦軸としたグラフである。パケット到着時間の差分は、一定の送信時間間隔 (1 秒) を基準として、到着時間間隔の差の絶対値を t_{abs} とすると、

$$t_{abs} = \sum |t_{sd} - t_{rd}| \quad (17)$$

として求めることができる。図 12 の縦軸の値は、通常、複数の t_{abs} が計算結果として出力されるために、ここでは、その中央値を求めることによって中心点を決めている。図 12 をみると、パケットの損失数 (横軸) が、多くなっても差分の総和の中央値 (縦軸) は増加せず、どちらかというと同程度の値を保っていることが分かる。このグラフからの結果、途中のバッファの動作が変動してもパケット損失数は変化しないことになる。パケット損失が、バッファの変動とは無関係に一定になるということは、パスのうちのリンクが、つねに輻輳状態になっていて、他のリンクでバッファの変動が起こったとしても、パケット損失数は、輻輳しているリンクで起こっているの、ほぼ一定の値をとると考えられる。

4. おわりに

この研究では、パケット到着時間間隔とパケット損失率の特徴について、インターネットでのパスに関する測定解析を行った結果を述べてきた。

この実験から、パケット到着時間間隔は、End-to-End の途中のパスに関するバッファの動的な変化の特徴をよく表していて、Self-similar で Long-range dependence の特徴を持っていることが分かった。また、

パケット損失率についても Self-similar で Long-range dependence の特徴を持っていることが分かった。しかし、この解析から End-to-End の特徴のうちパケット到着時間間隔とパケット損失の間には、パケット損失の増大に対して、パケット到着時間間隔は、一定の間隔を示すことが分かった。この理由は、End-to-End のパスにおいて、途中のリンクで輻輳が起こったとしても、その他のリンクでの動的な特徴は、End-to-End に現れてこないためであると考えられることができる。

謝辞 この研究の測定解析を行うにあたって、岩手県立大学の橋本浩二先生にはお世話になった。ここに感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) Downey, A.B.: Using pathchar to estimate Internet link characteristics, *Proc. ACM SIGCOMM 1999*, Cambridge, MA, USA (1999).
- 2) Lai, K. and Baker, M.: Measuring Link Bandwidths Using a Deterministic Model of Packet Delay, *Proc. ACM SIGCOMM 2000*, Stockholm, Sweden (2000).
- 3) Fei, A., Pei, G., Liu, R. and Zhang, L.: Measurements on delay and hop-count of the Internet, *Proc. IEEE GLOBECOM 1998*, Sydney, Australia (1998).
- 4) Stoica, I. and Zhang, H.: Providing guaranteed services without per flow management, *Proc. ACM SIGCOMM 1999*, Cambridge, MA, USA (1999).
- 5) Bolot, J.C.: End-to-end Packet Delay and Loss Behavior in the Internet, *Proc. ACM SIGCOMM 1993*, NY, USA (1993).
- 6) Park, K.: *Self-similar Network Traffic and Performance Evaluation*, W.W.(Ed.), John-Wiley and Sons, Inc. (2000).
- 7) 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).
- 8) Leland, W.E., Taqqu, M.S., Willinger, W. and Wilson, D.V.: On the Self-similar nature of ethernet traffic, *Proc. ACM SIGCOMM 1993*, NY, USA (1993).
- 9) Norros, I.: On the Use of Fractional Brownian Motion in the Theory of Connectionless Networks, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol.13, No.6, pp.953-962 (1995).
- 10) Borella, M.S. and Brewster, G.B.: Measurement and Analysis of Long-Range Dependent Behavior of Internet Packet Delay, *Proc. IEEE INFOCOM 1998*, San Francisco, CA, USA (1998).
- 11) Floyd, S. and Paxson, V.: Difficulties in Simulating the Internet, *IEEE/ACM Trans. Networking*, Vol.9, No.4, pp.392-403 (2001).

(平成 14 年 6 月 27 日受付)

(平成 14 年 11 月 5 日採録)



串田 高幸 (正会員)

1985 年日本アイ・ピー・エム株式会社入社。同年サイエンス・インスティテュート (現東京基礎研究所) 配属。入社以来、ネットワークゲートウェイ、超高速ネットワークプロトコル、信頼性マルチキャストプロトコル、インターネット・トラフィック測定評価、エンドエンド・パフォーマンス解析の研究に従事。2000 年よりワイヤレスマルチメディア QoS の研究に従事。現在、日本アイ・ピー・エム株式会社東京基礎研究所に研究員として勤務。2000 年より情報処理学会マルチメディア通信と分散処理研究会幹事、情報処理学会論文誌編集委員。IEEE, ACM の各会員。



柴田 義孝 (正会員)

1950 年生。1985 年 UCLA コンピュータサイエンス学科修了。Ph.D. in Computer Science。1985 年から 1988 年まで Bellcore (旧 AT&T ベル研究所) にて専任研究員としてマルチメディア情報ネットワークの研究に従事。1989 年より東洋大学工学部情報工学科助教授。1997 年同大学教授。1998 年より岩手県立大学ソフトウェア情報学部教授。高速パケットビデオ、マルチメディアプロトコル、ハイパーメディアシステム、感性情報処理等の研究に従事。IEEE, ACM, 電子情報通信学会各会員。