

## インターネットにおけるパケット到着間隔時間及び 損失率の特性

串田高幸 (kushida@trl.ibm.co.jp)\* 勝本道哲 (katumoto@crl.go.jp)\*\*

柴田義孝 (shibata@iwate-pu.ac.jp)\*\*\*

\* 日本アイ・ビー・エム株式会社東京基礎研究所

\*\* 独立行政法人通信総合研究所

\*\*\* 岩手県立大学ソフトウェア情報学部

### 概要

インターネットのようなパケット交換ネットワークにおいて、パケットの到着確率は、Poisson 分布ではなく、Self-similar で Long-range dependence の特徴をもつことが知られている。この研究では、インターネットにおける End-to-End の特徴を調べるために、測定用のパケットによって、実際のインターネット上で実験を行ない、その結果を解析した。本稿では、パケットの到着時間間隔とパケット損失率の特徴について調べて、また相互の関係についても調べた。その結果、パケットの到着時間間隔とパケット損失率について関係があることがわかった。

## Characteristics of inter-arrival packets and packet losses on the end-to-end path of the Internet

Takayuki Kushida\* Michitetsu Katumoto\*\*

Yoshitaka Shibata\*\*\*

\*IBM Research, Tokyo Research Laboratory

\*\*Communication Research Laboratory,

\*\*\*Faculty of Software and Information Science,

Iwate Prefectural University

### Abstract

A packet switching network such as the Internet doesn't obey the Poisson distribution that was used for a circuit switched network like a telephone system but has the characteristics of self-similarity with long-range dependence. This study investigates the characteristics of the end-to-end path on the Internet using probing packets. This paper describes the meaningful relation between inter-arrival packets and packet losses for the end-to-end path.

### はじめに

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わかっていて [1][3]. このような特徴に加えて、それに加えて Heavy-tailed 分布になることもわかっている。Heavy-tailed 分布の特徴は、指数減少分布と異なって、値が大きくなっても分布は、ゆっくりと減少していることを示している。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 [2]. 一般にインターネットは、ベストエフォート型のパケット転送を行なっているネットワークであって、途中のルータは、パケットの転送を経路テーブルによって行なう機能しか持っていない。それ以外の QoS(Quality of Services) 制御を行なう機構を持っていない。そのため、End-to-End パスの特性に関して測定解析を行ない、その特徴を知ることは、インターネットをアプリケーションにおいて利用する場合に重要となってくる。

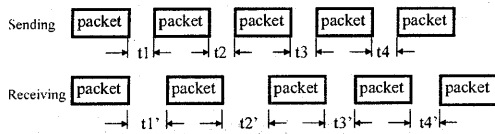


図 1: 測定の構成図

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 [4]。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、色々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 の特徴をもっているが、一方で人間がイベントを起している 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わかっている [4]。

今までの研究において、我々は、End-to-End パスでのパケット到着間隔は、Self-similar で Long-Range Dependence の特徴をもっていることを報告した [5]。本稿では、それに加えて、インターネットにおける End-to-End パスの特性のうち、パケット到着時間の間隔とパケット損失の関係に関して、インターネット上で End-to-End において測定解析を行なったので、その結果について報告する。

## 測定方法及び結果

図 1 は、パケットの転送される前と後の状態をモデル化して表している。この図において Sending は、送信側ホストであり、一定の間隔  $t_d$  ( $t_1 = t_2 = t_3 = t_4$ ) でパケットをネットワークに送出する。また、受信側ホストは、Receiving であり、送信側からのパケットを受信していて、その間隔が  $t_1'$ ,  $t_2'$ ,  $t_3'$ ,  $t_4'$  となり、これらの値は、状況に応じて異なるだけでなく、すべて異なった値をとる。例えば、パケットの送出間隔が、 $t_d$  であるとき、受信側ホストでの受信間隔は、 $t_1'$  となるとすると、送信間隔  $t_d$  に比べて大きいかわさくなる。この受信側ホストで受信したパケットの間隔を、多く集めて、

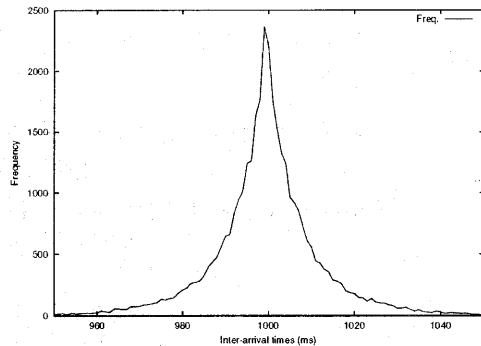


図 2: パケットの受信時間間隔の分布

その特徴を調べることによって、途中のネットワークの状況と、その状況におけるパケットの振舞いを知ることができる。

さらに、この測定方式の利点は、インターネット上で送信側ホストと受信側ホストが異なっても、送出間隔が、受信側ホストにおいて測定解析を行なうときにわかっているならば、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なう必要があれば、送受信ホストの時刻合わせが重要になってくるが、この測定方式であれば、送受信ホストにおいて時刻合わせを必要としない。

## パケット到着時間間隔の測定解析

測定は、1KB の 36000 個のパケットを 1 秒の一定間隔でインターネット上のホストに対して連続して送り出して、それらのパケットを受信して受信間隔を測定することによって行なわれた。

図 2 は、横軸をパケットの到着時間として縦軸を頻度としたときの頻度の分布を表している。送出速度である 1 秒 (1000ms) が中心となって、その周囲にパケット受信間隔の頻度が分布していることがわかる。

この頻度分布の幅が、大きくなるということは、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、他のパケットが転送されているために、キューに入って待ち時間があるため、キューに入っているパケットの数が多くなると、それに伴ってパケットの到着間隔が大き

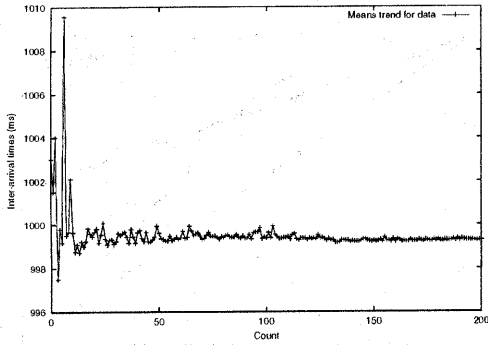


図 3: サンプルデータ数と平均値の変化

くなることを表している。一方、パケットが、ルータにおけるキューの待ち時間がなければ、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届くことになる。

一般に測定をしたとき、どの程度の数を集めて、それをもとにして、解析したらよいかということが問題となってくる。そこで、ここでは、パケット到着間隔時間の測定行なう場合の適切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特徴を調べた。図 3 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している。図 3 のパケット到着時間間隔の平均値をみた場合、パケットの数が 150 から 200 程度のサンプル数になれば平均値が、ほぼ収束してくることがわかる。パケットの測定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、測定の精度が悪くなることがわかる。

Heavy-tailed 分布は、通常の指数分布関数と異なり、その確率分布がゆっくりと減少していることからその名前がついている。また、一般に Heavy-tailed 分布は、多くの小さい測定値の間に、少しだけ大きい測定値があるような特徴が複合されてできている。

ここで Heavy-tailed 分布を定式化しておく。ランダム変数  $X$  として、積算確率密度関数  $F(x) = P[X \leq x]$  とする。また、 $F(x)$  を補完する密度関数を  $\bar{F}(x) = P[X > x] = 1 - F(x)$  と定義する。ここで、 $\bar{F}(x)$  が Heavy-tailed 分布である

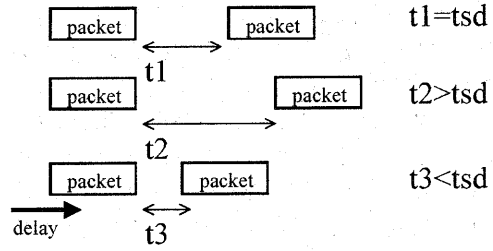


図 4: パケット到着間隔の 3 つの状態

とすると、

$$\bar{F}(x) \sim cx^{-\alpha}, \quad 0 < \alpha < 2 \quad (1)$$

という特徴をもっている。この式 (1) において、 $c$  は正の定数であり、 $\alpha$  が範囲に入れば、この分散は無限になり、さらに  $\alpha \leq 1$  という条件に合致すれば、 $X$  の平均も無限になるという特徴が加わる。

また、Heavy-tailed 分布のうち単純な分布は、Pareto 分布と呼ばれ、 $F(x) = 1 - (k/x)^\alpha$ , ( $x > k; \alpha > 0$ ) という式で表される。広域ネットワークのトラフィックが、この分布に従うことが以前の研究で報告されている [3]。また、Heavy-tailed 分布は、コンピュータシステムのファイルサイズや Web のコンテンツに対してもよく一致することがわかっている [6]。

Heavy-tailed 分布になるかどうかについての判定は、式 (1) の特徴をもとにして、

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{d \log \bar{F}(x)}{d \log x} = -\alpha \quad (2)$$

という式において、 $\alpha$  に近似することによって調べることができる。式 (2) において、大きい  $x$  の値に対して、この分布関数が、log-log スケールで直線近似させて、その結果の  $-\alpha$  を求めることによって Heavy-tailed 分布になることを調べている。

一方、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  $t_{rd}$  と定義した場合、図 4 のように 1.  $t_{sd} = t_{rd}$ , 2.  $t_{sd} < t_{rd}$ , 3.  $t_{sd} > t_{rd}$  の 3 つ状態に分けて考えることができる。ここでは、3 つの状態がどのように起こるかについて述べる。

1. の場合、図4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( $t_{sd} = t_{rd} = t_1 = t_2$ )。これは、パスの途中において、パケット転送に対して、必要な絶対時間だけの遅れだけであり、それ以外に2つの連続したパケットの到着した時間間隔に対して、特に変化がないことを示している。2. の場合、図4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、 $t_{sd} < t_2$ 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でのキューの待ち時間があるため、そのために大きくなる。3. の場合、図4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、 $t_3 < t_{sd}$ であり、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ため、次のパケットの処理がキューの遅れなく届くことによって起こると考えられる。つまり、キューでの待ち時間遅れの復旧が、比較的早く起こる場合、この結果になると考えられる。この3つの状態が、パケットごとに異なるため、図1のように送信間隔を中心にした分布となっている。

パケットの受信間隔は、送信間隔時間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する。図5は、パケット到着時間間隔の差分の確率分布と、 $\alpha = 1$ 及び $\alpha = 2$ をlog-logグラフとして表わしている。図5で到着時間間隔の差が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。さらに到着時間間隔の差が1.5以上になると、 $\alpha$ の値が増えていくことがわかる。これは、 $\alpha$ が1.5以上であれば、確率分布が急激に減少していく。

パケット到着間隔のSelf-similarityとLong-range Dependencyがどのようになっているかを調べる。 $m$ の数に集約された $k$ 個のパケットの平均値 $x_k^{(m)}$ を

$$x_k^{(m)} = \frac{1}{m} \sum_{i=k m - (m-1)}^{k m} x_i \quad (3)$$

とした場合、その分散を計算したときに

$$\text{Var}(x_k^{(m)}) = \frac{\text{Var}(x)}{m^\beta} \quad (4)$$

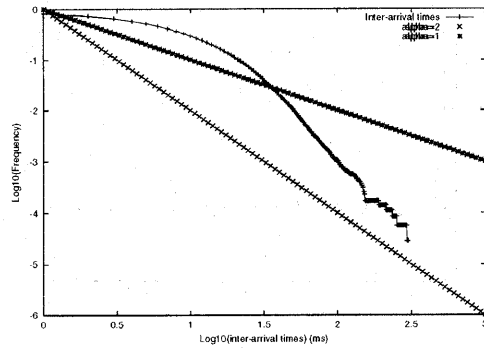


図5: パケット到着時間の分布

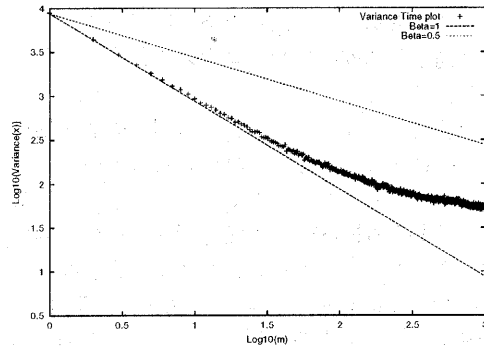


図6: Varianceの分布

が成立すると考える。式(3)において、 $k$ が十分に大きく、式(4)が成立するとき、離散変数 $x^{(m)}$ は、Self-similarityの特性をもつという定義される。また、ここで $H = 1 - (\beta/2)$ として、 $H$ をHurstパラメータとして定義する。もし、Hurstパラメータ $H$ を $1/2 < H < 1$ の範囲に制限することができると、この離散変数は、Long-range dependencyの特性を持っていることになる。さらに $H \rightarrow 1$ であれば、強いSelf-similarityとLong-range dependencyの特性をもっている。

Self-similarityとLong-range Dependencyを調べるために、測定値の数 $m$ とVarianceのグラフを利用する。図6は、測定結果と $\beta = 1$ 及び $\beta = 0.5$ 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、さらに $m$ が1.5よりも大きい場合、 $\beta = 0.5$ に従っている。

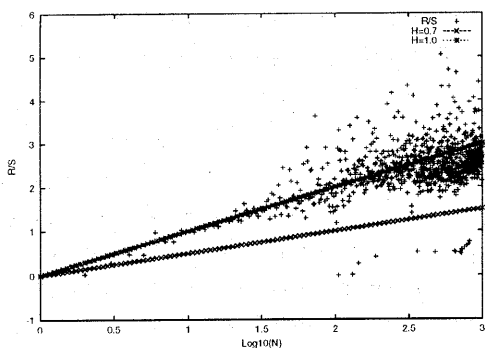


図 7: R/S のグラフ

Self-similarity を検証する方式として  $R/S$  方式がある。これは、測定値  $X_j$  の平均値を  $M(N)$  として、平均との差分の最小及び最大をそれぞれ  $MIN$ ,  $MAX$  とした場合に、

$$M(N) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N X_j \quad (5)$$

$$MIN = \min_{1 \leq j \leq N} \left[ \sum_{k=1}^j (X_k - M(N)) \right] \quad (6)$$

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

という式で表すことができる。さらに、 $R/S$  を式 (5) の  $M(N)$ 、式 (6) の  $MIN$  と式 (7) の  $MAX$  から計算すると、

$$\frac{R}{S} = \frac{MAX - MIN}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (X_k - M(N))^2}} \quad (8)$$

として定義することができる。これを Log スケールとして変換すると

$$\log(R/S) \sim H \log(N) - H \log(2) \quad (9)$$

とすることができる。ここで  $H$  は、Hurst パラメータである。 $R/S$  と  $N$  グラフを直線近似することによって  $H$  を算出できる。この式によって Self-similarity を決定することができる。

図 7 は、 $R/S$  を計算した結果のグラフである。この図において、 $R/S$  は、 $0.7 < H < 1.0$

の間に大半の  $R/S$  の計算結果が入っていることがわかる。このことから、測定したパケット到着時間の特性は、Self-similarity の特性があることがわかる。

## パケット損失の解析

パケット到着間隔と同じホスト測定に対して、平均パケット損失率は約 0.85% であった。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が 1% 以下になっていることが報告されている [4]。このことから損失率の値は、この指標と合致している。

一般にパケット損失が起こる原因は、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ために起こると考えられる。このことからパケット損失の頻度とパケット到着間隔時間になんらかの関係が考えられる。そこで、パケット損失数とパケット到着時間間隔の差をすべて足し合わせた値についての解析を行った。

図 8 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、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、受信時間間隔の差の絶対値を  $t_{abs}$  とすると、

$$t_{abs} = \sum |t_{sd} - t_{rd}| \quad (10)$$

となる。図 8 の縦軸の値は、複数の  $t_{abs}$  があり、その中央値を求めることによって決めた。また、図 8 の破線は、解析結果を一次線形として近似して求めている。図 8 をみると、パケットの損失数が、多くなっていくに従って、差分の総和も増加していく傾向がある。このことから、パケット損失とパケット受信時間間隔には、正の相関関係があり、パケット損失は、パスの途中のルータのキューの溢れによって増えていくことの現象を示している。

図 9 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いる。図 9 は、log-log スケールのグラフであり、傾きが  $1/2$  の直線を入

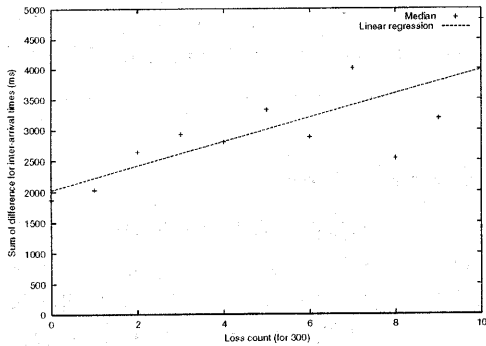


図 8: パケット損失とパケット到着時間間隔の関係

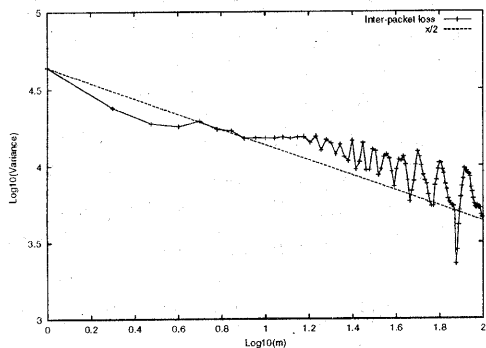


図 9: パケット損失間隔の分散

れている。このグラフにおいて傾きは、式4の  $\beta$  であって、このことから傾き  $1/2$  は  $H = 3/4$  であり、これは、 $1/2 < H < 1$  の範囲である。このことから、パケット損失間隔も、やはり Self-similarity で Long-range dependency の特性をもつがわかった。つまり、図8において、パケット損失の間隔の特性においても、パケット到着時間間隔の特性と同様な特性をもっていることがわかっている。

## おわりに

前の章では、測定による結果をグラフによって解析してきたが、ここでは、まず、パケットの転送をルータで考えてみて定式化する。以前の研究において、「バス固有の特徴」と、そのうちの「動的な特徴の変化」についてわけて、研

究を行なった [5]。パケット到着時間間隔  $t_{arrival}$  は、 $k$  番目のパケットと  $k+1$  番目のパケットの到着時間間隔から求めることができる。

$$t_{arrival}(k, k+1) = t_l^{k+1} - t_l^k = \sum_{i=0}^{l-1} (q_i^{k+1} - q_i^k) \quad (11)$$

式(11)において、 $q_i^{k+1}$  と  $q_i^k$  は、それぞれ  $k+1$  番目のパケットのキュー時間と、 $k$  番目のパケットのキュー時間になる。式(11)は、バ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っている。そのため式は、2つパケットにおける差（パケット到着時間間隔）は、キューの動的な変化のみを表していることがわかる。実験より式(11)は、Self-similarity で Long-range dependency の特性もつことわかる。

この論文では、パケットの到着時間間隔とパケット損失のそれぞれの特性及び相互の関係について調べてきた。この測定は、インターネットの複数のホストについて行なってきているが、今後、この解析結果についての正確性をさらに増やすため、さらに多くのホストについて測定解析を行ないたい。

## 参考文献

- [1] K. Park, and W. Willinger ed., "Self-similar Network Traffic and Performance Evaluation," John-Wiley and Sons, Inc., 2000.
- [2] M. S. Borella, and G. B. Brewster, "Measurement and Analysis of Long-Range Dependent Behavior of Internet Packet Delay," In Proc. of IEEE INFOCOM'98, San Francisco, 1998, pp. 497-504.
- [3] V. Paxson, and S. Floyd, "Wide-Area traffic: the failure of Poisson modeling," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, **3**(3)(June, 1995) pp. 226-244.
- [4] S. Floyd, and V. Paxson, "Difficulties in Simulating the Internet," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, **9**(4)(April, 2001) pp. 392-403.
- [5] 串田, 柴田, "インターネットにおける End-to-End パフォーマンスの特徴", 情報処理学会マルチメディア通信と分散処理ワークショップ, 2001年10月.
- [6] M. E. Crovella, A. Bestavros, "Self-Similarity in World Wide Web Traffic: Evidence and Possible Causes," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, **5**(6)(December, 1997) pp. 835-846.