

## 実測 IP トラヒックの局所ポアソン性に関する一考察

古屋 裕規<sup>†</sup> 中村 元<sup>†</sup> 野本 真一<sup>†</sup> 滝根 哲哉<sup>†</sup> 福嶋 正機<sup>†</sup>

<sup>†</sup>(株)KDDI 研究所 〒356-8502 埼玉県上福岡市大原 2-1-15

<sup>‡</sup> 京都大学 〒606-8501 京都市左京区吉田本町

E-mail: <sup>†</sup>{hiro-f, nakamura, shin, fukushima}@kddilabs.jp, <sup>‡</sup>takine@amp.i.kyoto-u.ac.jp

あらまし 筆者らはこれまでの検討で、多重化 IP トラヒックが時間スケールの小さい領域でポアソンの性質を示すことを原理的に示し、これを局所ポアソン性と定義した。更に、有限バッファ待ち行列システムの性能評価において、入力トラヒックが局所ポアソン性を持つと、特定範囲のバッファサイズに対し、入力をポアソン過程として近似評価（ポアソン近似）できることを示唆した。本稿では、まず、ポアソン近似可能なバッファサイズ範囲を解析的に導出する。更に、実測 IP トラヒックを入力として、有限バッファ待ち行列システムの packet 損失率を評価することにより、実ネットワーク上でのポアソン近似の適用性と、導出したバッファサイズ範囲の妥当性を検証する。その結果、エンドユーザからコアネットワーク方向へ流れる多重化 IP トラヒックと、ピアツーピアアプリケーションの多重化 IP トラヒックに対するポアソン近似の適用性を確認した。また、導出したバッファサイズ範囲を目安として、ポアソン近似の適用可否を判断できることを確認した。

キーワード 局所ポアソン性、有限バッファ待ち行列モデル、packet 損失率、実測 IP トラヒック、時間スケール

## On the Local Poisson Property of Measured IP Traffic

Hiroki FURUYA<sup>†</sup> Hajime NAKAMURA<sup>†</sup> Shinichi NOMOTO<sup>†</sup> Tetsuya TAKINE<sup>†</sup> and Masaki FUKUSHIMA<sup>†</sup>

<sup>†</sup> KDDI R&D Laboratories, Inc. 2-1-15 Ohara, Kamifukuoka, Saitama, 356-8502 Japan

<sup>‡</sup> Kyoto University Yoshida-honmachi, Kyoto, 606-8501 Japan

E-mail: <sup>†</sup>{hiro-f, nakamura, shin, fukushima}@kddilabs.jp, <sup>‡</sup>takine@amp.i.kyoto-u.ac.jp

**Abstract** Our previous works have presented the scenario that aggregated IP traffic exhibits the Poisson-like characteristic within small time scales. We call the characteristic as the local Poisson property. We have also indicated that the packet loss probability of a finite-buffer queue with the local Poisson input can be estimated by evaluating the finite-buffer queue with the corresponding Poisson input when the buffer size is within a certain range. We refer to the evaluation technique as Poisson approximation. In this paper, we analytically derive the approximate range of the buffer size within which a finite-buffer queue with a local Poisson input can be evaluated by the Poisson approximation. Next, we confirm the applicability of the Poisson approximation to actual IP traffic and the feasibility of the buffer range, by examining the packet loss probability of a finite-buffer queue with the input of measured IP traffic. The results indicate that the Poisson approximation works with certain types of actual IP traffic such as aggregated traffic from many end-users to a core network and aggregated peer-to-peer traffic. They also suggest that the approximate range of buffer size gives us a good indication to judge the applicability of the Poisson approximation.

**Keyword** Local Poisson property, Finite-buffer Queue, Packet Loss Probability, Measured IP Traffic, Time Scale

### 1. はじめに

Leland ら[1]により IP トラヒックの長期依存性・自己相似性が提唱されて以来、IP トラヒックの特性はこれをキーワードとして議論されてきた。しかしながら、近年、数百ミリ秒以下の比較的短い時間スケールでは、IP トラヒックはそれとは異なる性質を示すことが議論の対象となってきた[2]-[9]。

Cao らは[6]において、大量の実測 IP トラヒックデータの解析を通じて、TCP に代表されるトランスポート層コネクション（以下、コネクション）の多重数が増加するにつれ、IP トラヒックの到着過程がポアソン過

程に漸近することを提唱した。更に、続く[7]において、packet 到着間隔が様々な分布に従って独立に定まる点過程で個々のコネクションを表現し、それらの多重化過程を入力とする無限バッファ単一サーバ待ち行列システムのシミュレーションを行った結果、キュー長がある閾値を超える確率は、多重度が増加するに従ってポアソン入力に漸近することを示した。しかし、これらの議論では、独立な点過程の多重度を十分大きくするとポアソン過程に漸近することを論拠としており、ポアソン性の発現には十分な多重数が前提となる。また、無限バッファでの評価に終始し、有限バッファの場合の検討も十分でない。すなわち、これら

の議論は漸近的性質に留まるものであり、各コネクションの性質(パケット到着間隔)、コネクション多重度、有限バッファサイズ等の諸条件がどのような状況にある場合に、入力をポアソン過程として評価できるのかについての検討は十分ではない。

一方、筆者らは[8][9]において、複数の互いに独立なコネクションのパケットが多重化される場合、パケットの到着過程は、コネクション内のパケット間隔の最小値より小さい時間スケールでポアソン性を示すことをその原理と共に示し、これを局所ポアソン性と定義した。局所ポアソン性は多重度数に関する漸近的性質ではなく、多重化されているコネクション内のパケット間隔の最小値よりも小さい時間スケールにおいて、任意の多重度で成立するものである。更に筆者らは、局所ポアソン性を持つ到着過程を Branching Poisson 過程でモデル化し、有限バッファ単一サーバ待ち行列システムの性能評価をシミュレーションにより行うことで、入力トラヒックが局所ポアソン性を持つと、特定範囲のバッファサイズにおいて、入力をポアソン過程と近似して評価(以下、ポアソン近似)可能であることを示唆した。

これまでの成果を踏まえ、本稿ではまず、ポアソン近似可能なバッファサイズ範囲の上限近似値を解析的に導出し、それが検討対象とするシステム(ルータ・サーバ等)の使用率、局所ポアソン性が成立する時間スケール、トラヒック量(多重度)等で定まることを明らかにする。更に、実測 IP トラヒックを入力とした有限バッファ単一サーバ待ち行列システムのパケット損失率を求め、実ネットワークでのポアソン近似の適用性を検証すると共に、先に算出したポアソン近似可能なバッファサイズ上限近似値の妥当性の評価を行う。最後に、実トラヒックに対するポアソン近似の適用性を、ネットワーク構成、アプリケーションの特性等を踏まえて整理し、ポアソン近似による IP ネットワーク設計の可能性を展望する。

## 2. 多重化 IP トラヒックの局所ポアソン性

多数のコネクションの IP パケットが FCFS (First-Come, First-Serve) で多重化されている状況を考える。コネクションは相互に独立と仮定する。また、コネクションは無限のトラヒック源からランダムに生起され、同時コネクション数はポアソン分布とみなせるものとする。

コネクション  $i$  ( $i=1,2,\dots,l$ ) からの IP パケットの間隔を  $T_{(i,j)}$  ( $j=1,2,\dots$ :  $j$  はコネクション内のパケット間隔の ID) とする。多重化された IP トラヒックを  $T_{LP} \triangleq \min\{T_{(i,j)}\}$  より短い時間スケールで観察した場合、互いに独立で異なる下位リンクの IP パケットを観察することになる。すなわち、 $T_{LP}$  より小さい任意の時間間隔の到着数は独立増分である。同時コネクション数がポアソン分布に従うことを勘案すると、 $T_{LP}$  より小さい時間スケールにおいて、到着過程はポアソン過程の性質を保持すると帰着できる。筆者らは[8][9]におい

て、この特性を局所ポアソン性と定義した。

パケット伝送遅延時間はリンク速度により制限を受けるため、 $T_{(i,j)}^{LL}$  には IP パケットサイズとリンク速度で定まる最小値  $T_i^{OPT}$  が存在する(添字 OPT: 1 パケット時間(One Packet Time))。すなわち、 $T_{(i,j)}^{LL} \geq T_i^{OPT}$  for  $\forall j$  なる  $T_i^{OPT}$  が定まる。これより、 $T_{LP} \triangleq \min\{T_{(i,j)}^{LL}\} \geq \min\{T_i^{OPT}\}$  となり、局所ポアソン性の時間スケールの下限はネットワーク構成により定められることが分かる。

報告[9]において、筆者らは局所ポアソン性を以下のように定義した。 $N(s,t)$ ,  $0 \leq s < t$  を期間  $[s,t]$  内のパケット到着数とすると、パケット到着過程  $N(s,t)$  は、以下の条件が満たされた時、時間スケール  $T_{LP}$  以下で局所ポアソン性を持つ。

- 局所的定常増分性  
 $\forall x, 0 \leq x \leq s < t \leq x + T_{LP}$  に対し、 $N(s,t)$  と  $N(x, x+t-s)$  が同一分布に従う。
- 局所的独立増分性  
 $\forall x, 0 \leq x \leq s_1 < t_1 < s_2 < t_2 \leq x + T_{LP}$  に対し、 $N(s_1, t_1)$  と  $N(s_2, t_2)$  が互いに独立である。
- 順序性  
 $\Pr(N(s, s+t) > 1) = o(t)$

## 3. ポアソン近似可能なバッファサイズ範囲

### 3.1. 待ち行列モデル

バッファサイズ  $B$  の FCFS 単一サーバ有限バッファ待ち行列モデルを考える。2節を踏まえ、以下で特徴付けられる Branching Poisson 過程によりパケットの入力過程をモデル化する。

- 入力過程は  $K$  個のクラスからなり、各クラスのパケットは親パケットとそれに続く子パケットで構成される。
- クラス  $k$  ( $k=1,\dots,K$ ) の親パケットは到着率  $\lambda^{(k)}$  のポアソン過程に従う。クラス  $k$  の  $n$  番目の親パケットが時刻  $t_n^{(k)}$  に到着すると、続いて子パケットが一定間隔  $\delta^{(k)}$  で到着する。子パケットの到着時刻は  $t_n^{(k)} + i\delta^{(k)}$  ( $i=1,\dots,M_n^{(k)}$ ) である。 $M_n^{(k)}$  はクラス  $k$  の  $n$  番目の親パケットに伴う子パケット数であり、独立同分布(i.i.d.)に従う確率変数である。

以下、 $M_n^{(k)}$ ,  $n=1,2,\dots$  を  $M^{(k)}$  で総称し、クラス  $k$  の家族(親+子)のパケット数を  $N^{(k)} = M^{(k)} + 1$  で表す。全パケットサイズを一定値  $h$  とし、サービス率を  $C$  とする。入力過程の到着率は  $\Lambda = \sum_{k=1}^K \lambda^{(k)} E[N^{(k)}]$ 、系の使用率  $\rho = \Lambda h / C$  は  $\rho < 1$  を満たすと仮定する。

### 3.2. 性能評価に影響する時間スケール

近年、有限バッファ待ち行列モデルの解析において、ある特定の時間スケールにおける入力トラヒックの性質が系の性能を支配することが明らかにされている。[10]では、バッファ内のキュー長分布に最も関連する時間スケールが、Most relevant time scale として定義されている。これらの知見は、もしモデルの Most relevant

time scale が入力トラヒックの  $T_{LP}$  未満であれば、ポアソン近似が可能となることを示唆している。そこで、以下では本待ち行列モデルの Most relevant time scale を導出する。

まず、時間間隔  $t$  に到着するパケット数を  $A(t)$  とし、その特性を考察する。定義より、

$$E[A(t)] = \Lambda t, \quad t > 0, \quad (1)$$

$$\text{Var}[A(t)] = \sum_{k=1}^K \text{Var}[A_k(t)] \quad (2)$$

$A_k(t)$  は  $(0, t]$  でのクラス  $k$  のパケット到着数である。Lewis[13]の逆ラプラス変換の結果(4.8.6)を利用し、次の結果を得る。

$$\text{Var}[A_k(t)] = \lambda^{(k)} E[N^{(k)}] t + \lambda^{(k)} [g_2^{(k)} + 2m^{(k)}(E[N^{(k)}] - g_1^{(k)})] t - \lambda^{(k)} \delta^{(k)} \left[ \frac{g_3^{(k)}}{3} + g_2^{(k)} + m^{(k)}(m^{(k)} + 1)(E[N^{(k)}] - g_1^{(k)}) \right] \quad (3)$$

ここで、 $m^{(k)}$  は  $m^{(k)} \delta^{(k)} < t \leq (m^{(k)} + 1) \delta^{(k)}$  を満たす非負の整数であり、 $g_i^{(k)}$  ( $i=1,2,3$ ) は確率変数  $\min(N^{(k)}, m^{(k)})$  の  $i$  次の階乗モーメントである。式(3)より、以下の関係を得る。ここで、 $T_{LP} = \min_{k=1, \dots, K} (\delta_k)$  である。

$$\text{Var}[A(t)] = \Lambda t, \quad 0 < t \leq T_{LP} \quad (4)$$

次に、本待ち行列モデルのパケット損失率を、対応する無限バッファキューの tail 分布により近似する。Branching Poisson 過程が時間的に可逆であることより、

$$\Pr(L > B) = \Pr\left(\sup_{t>0} [A(t) - Ct/h] > B\right).$$

$\Pr(L > B)$  が十分小さければ、大偏差理論[14]により、

$$\Pr(L > B) \approx \Pr(A(i^*) - Ct^*/h > B).$$

ここで  $i^*$  は本待ち行列モデルの性能評価に影響する時間スケール(Most relevant time scale)を表し、次式で与えられる。

$$i^* = \arg \max_{i>0} \Pr(A(i) - Ct/h > B)$$

$i^*$  を求めるため、 $A(t) - E[A(t)]$  が正規分布に従うと仮定する。この仮定より次式を得る。

$$i^* = \arg \min_{i>0} \frac{B + (1-\rho)Ct/h}{\sqrt{\text{Var}[A(t)]}} \quad (5)$$

式(2), (3), (5)より、 $i^*$  の値を数値解析により得ることができる。もし、 $i^* < T_{LP}$  であれば、待ち行列モデルをポアソン近似で評価できることになる。

### 3.3. ポアソン近似可能なバッファサイズ範囲

今、 $i^* < T_{LP}$  とする。このとき、 $i^*$  は  $B$  の増加関数であるので、

$$T_{LP} \geq \arg \min_{i>0} \frac{B + (1-\rho)Ct/h}{\sqrt{\text{Var}[A(t)]}} \quad (6)$$

を満たす  $B$  の最大値  $B^*$  を数値解析により得ることができる。

更に、式(4)を用いることにより、 $B^*$  の上限  $B^{**}$  が陽に導出できる。式(4)、式(5)より、

$$i^{**} = \arg \min_{i>0} f(i), \quad f(i) = \frac{B + (1-\rho)Ct/h}{\sqrt{\Lambda t}}$$

$f(i)$  は  $t = hB / \{(1-\rho)C\}$  で最小値をとるので、 $i^*$  の下限を下記の通り得る。

$$i^{**} = \frac{hB}{(1-\rho)C} \leq i^*$$

$i^* < T_{LP}$  を仮定することにより、 $B^{**}$  を下記のように得る。ここで、 $\lceil x \rceil$  は  $x$  を超えない最大の整数を表す。

$$B^{**} = \left\lceil \frac{(1-\rho)CT_{LP}}{h} \right\rceil \geq B^* \quad (7)$$

## 4. 実測トラヒックを入力とした有限バッファ待ち行列システムのパケット損失率評価

### 4.1. トラヒックの測定

実ネットワーク上の多数のユーザトラヒックが多重化されている個所で、定点観測によるIPトラヒック収集を行った(図1)。アクセス回線(ADSL回線)を通じて出入りする多数のユーザのトラヒックが多重化されている集線回線のIPトラヒックを、方向別(上り:ユーザ⇒コア方向, 下り:コア⇒ユーザ方向)にパケット毎に収集した。測定期間は2002/04/02 11:30:00~2002/04/02 12:00:00の30分間である。収集項目は、パケットの到着時刻・サイズを含む、トランスポート層までの全パケットヘッダ情報である。

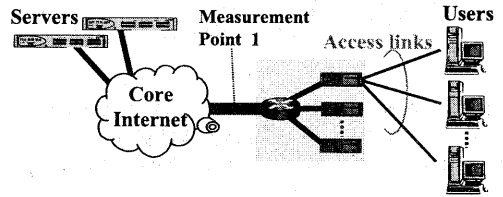


図1 測定ポイント

### 4.2. パケット損失率の評価

実トラヒックを入力とした単一サーバ有限バッファ待ち行列モデルのシミュレーションを行い、バッファサイズに対するパケット損失率の関係を求める。得られた結果と、生起率が等しいポアソン過程を入力とした場合の結果とを比較することで、実トラヒックに対するポアソン近似の有効性を検証する。

シミュレーションでは、パケットサイズは考慮せず、到着個数を対象とする。これは、実ネットワーク上でルータやスイッチのパケット転送の性能評価に対応する。また、ポアソン過程を入力とした結果は、M/D/1/K待ち行列モデルより解析的に算出する。

図 2 に結果を示す。上段が上りトラフィック(以下 Up all), 下段が下りトラフィック (以下 Down all) の場合を示しており,  $\rho$  が 0.4 と 0.8 の場合の, バッファサイズに対するパケット損失率の変化を示している。

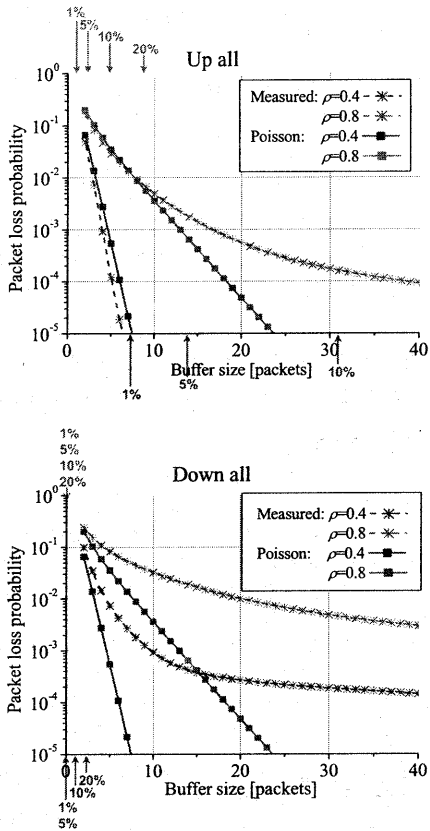


図 2 実測トラフィックを入力とした有限バッファ待ち行列システムのパケット損失率評価(1)  
上段:上り全トラフィック 下段:下り全トラフィック

これより, ポアソン近似によるパケット損失率の評価について以下の知見を得る。

- Up all の場合, バッファサイズの小さい範囲において, ポアソン近似が適用し得る。
- Down all の場合, ポアソン近似の適用は難しい。

次に, Down all について更に検証を進める。下り方向のトラフィック中の主要アプリケーションは,

- WWW(ポート番号 80 : パケット数ベースで約 50%)
- ピアツーピア (P2P) アプリケーション(ポート番号 6699 : パケット数ベースで約 15%)

であった。その他のアプリケーションの割合は, 各々 5%未満であった。そこで, 送出ポート番号でのフィルタリングにより, WWW のトラフィックと P2P のトラヒ

ックを抽出し, 各々に対して同様の検証を行った結果を図 3 に示す。上段が下り WWW トラフィック(Down WWW), 下段が下り P2P トラフィック(Down P2P)に対応している。

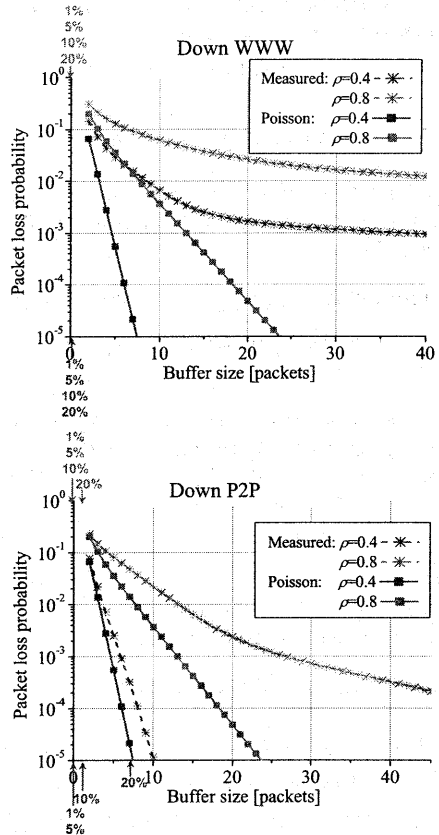


図 3 実測トラフィックを入力とした有限バッファ待ち行列システムのパケット損失率評価(2)  
上段:下り WWW トラフィック 下段:下り P2P トラフィック

図 3 より, ポアソン近似によるパケット損失率の評価について更に以下の知見を得る。

- Down WWW にはポアソン近似の適用が難しい。
- Down P2P には,  $\rho=0.4$  の場合においてポアソン近似が適用し得る。

### 5. ポアソン近似可能なバッファサイズ範囲の検証

4.2 節の検証により, ポアソン近似が適用できる場合とそうでない場合があることが判明した。そこで, 式(7)により  $B^{**}$  を算出し, ポアソン近似可能なバッファサイズ範囲としての妥当性を検証する。 $B^{**}$  を算出するには, まず  $T_L$  の値を得る必要がある。そこで, 実測トラフィックをコネクション毎に観察することにより,

コネクション内パケット間隔を調査する。コネクションは、送受信 IP アドレス & ポート番号の組み合わせとして定義する。これらの組み合わせでパケットをフィルタリングし、得られた IP パケット間の到着時間間隔からコネクション内パケット間隔を得る。4.2節で調査対象とした各々の実トラヒックのコネクション内パケット間隔累積分布 (Cumulative Distribution Function: CDF) を図 4 に示す。

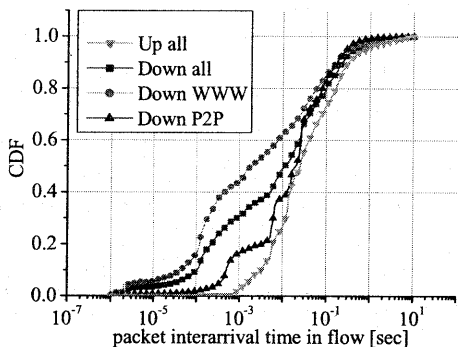


図 4 コネクション内パケット間隔累積分布

2節によれば、 $T_{LP}$  はコネクション内のパケット間隔の最小値として定まる。しかし、現実的な誤差を許容した評価を意図すれば、 $T_{LP}$  を CDF の  $X\%$  値として定義するのが妥当と考える。そこで、 $X=1, 5, 10, 20\%$  として図 4 より  $B^{**}$  を算出し、式(7)により  $B^{**}$  を求めた結果を表 1 にまとめる。ここで  $h=1$ 、 $C=\Lambda/\rho$  とし、 $\Lambda$  は実測トラヒックの到着率とした。

表 1 コネクション内パケット間隔分布より算出した  $T_{LP}$  [msec] およびそれを用いて算出した  $B^{**}$  の値

|          |                    | 1%   | 5%   | 10%  | 20%  |
|----------|--------------------|------|------|------|------|
| Up all   | $T_{LP}$           | 0.75 | 1.49 | 3.11 | 5.80 |
|          | $B^{**}(\rho=0.4)$ | 7    | 14   | 31   | 58   |
|          | $B^{**}(\rho=0.8)$ | 1    | 2    | 5    | 9    |
| Down all | $T_{LP}$           | 0.00 | 0.03 | 0.10 | 0.22 |
|          | $B^{**}(\rho=0.4)$ | 0    | 0    | 1    | 2    |
|          | $B^{**}(\rho=0.8)$ | 0    | 0    | 0    | 0    |
| Down WWW | $T_{LP}$           | 0.00 | 0.00 | 0.04 | 0.12 |
|          | $B^{**}(\rho=0.4)$ | 0    | 0    | 0    | 0    |
|          | $B^{**}(\rho=0.8)$ | 0    | 0    | 0    | 0    |
| Down P2P | $T_{LP}$           | 0.03 | 0.35 | 0.50 | 3.34 |
|          | $B^{**}(\rho=0.4)$ | 0    | 0    | 1    | 7    |
|          | $B^{**}(\rho=0.8)$ | 0    | 0    | 0    | 1    |

算出された各値を、図 2・図 3 中に、上向き矢印 ( $\rho=0.4$ ) および下向き矢印 ( $\rho=0.8$ ) で示した。これより、ポアソン近似が適用できるバッファサイズの目安として、CDF の 20% 値を用いた  $T_{LP}$  が比較的良好に機能していることが確認できる。以上は実測トラヒックに対する検証の一例に過ぎないが、 $B^{**}$  の値により、

ポアソン近似の適用可否の実用的な目安を与えていると考える。精度よい  $T_{LP}$  および  $B^{**}$  の実用的な算出が今後の課題である。

## 6. 考察

### 6.1. 局所ポアソン性が成立する時間スケール

ポアソン近似の可否、すなわち、 $B^{**}$  の値の大小には、 $T_{LP}$  の値が重要な決定要因となっている。 $T_{LP}$  の値と関係するコネクション内パケット間隔の特性は、5節で検証した通り、トラヒックの方向 (上り/下り) やアプリケーション種別によって異なる (図 4)。ここでは、 $T_{LP}$  とネットワーク構成、アプリケーション種別の関係について考察する。

ネットワーク構成として、広帯域のコア網にアクセス回線を介して多数のユーザが接続している構成を考える。このような構成は現在のインターネットの典型的な構成であり、図 1 に示されるネットワーク構成も同様である。この時、上りトラヒックでは、図 5(a) に示す通り、低速であるユーザ側アクセス回線上での 1 パケット時間 ( $T_A^{OPT}$ ) が集線回線上での  $T_{LP}$  の決定要因となる。他方、WWW などのサーバ・クライアント型アプリケーションによる下りトラヒックでは、図 5(b) に示す通り、ユーザ側アクセス回線に比してより高速なサーバ側アクセス回線上での 1 パケット時間 ( $T_B^{OPT}$ ) が集線回線上での  $T_{LP}$  の決定要因となる。また、P2P アプリケーションの場合、図 5(c) に示す通り、上り/下り共、 $T_A^{OPT}$  が集線回線上での  $T_{LP}$  の決定要因となる。以上より、 $T_A^{OPT}$  と  $T_B^{OPT}$  の差異 ( $T_A^{OPT} > T_B^{OPT}$ ) が、 $T_{LP}$  の差異を生む要因となっていると考えられる。

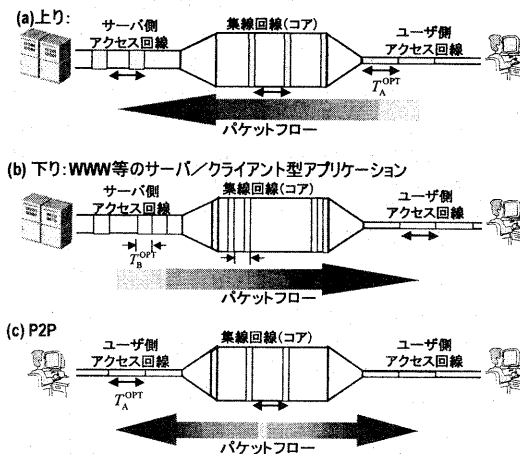


図 5  $T_{LP}$  とネットワーク構成・アプリケーションの関係

さて、UDP アプリケーションの場合を考えた場合は、アプリケーションの特性を考慮した新たな考察が必要となる。UDP アプリケーションでは、コネクション内のパケット送出間隔をアプリケーション側が決定する。例えば、VoIP アプリケーションの一例では、20msec

間隔でパケットを送出する。従って、 $T_{lp}$  はアプリケーションの特性によって決定される。

## 6.2. ポアソン近似の適用範囲

これまでの検討結果、および将来的な IP ネットワークの展望を考慮し、ポアソン近似による IP ネットワーク設計法の適用範囲について考察する。

- 式(7)より、ポアソン近似できるバッファサイズの範囲は  $C$  に比例する。すなわち、ユーザトラヒックの特性（すなわち  $T_{lp}$  の値）を一定とした時、より多数のユーザのトラヒックを、より大容量の回線に集線することにより、ポアソン近似の適用範囲が広がる。（これより、Caoら[6][7]の結果は、多重度を無限に増加させた場合、ポアソン近似の適用範囲が無限に広がっていく現象を捕らえたものとして理解できる。）
- 式(7)より、ポアソン近似できるバッファサイズの範囲は  $\rho$  の減少関数である。従って、使用率が比較的低い状態では、ポアソン近似できるバッファサイズ範囲の拡大が期待できる。一方、突発的な輻輳等により、システムの負荷が増大した場合には、ポアソン近似できる領域が縮小し、システムの性能が飛躍的に悪化することを併せて考慮しておく必要がある。
- ネットワーク利用環境の変化に伴い、今後はピアツーピア型の通信、VoIP や VoD などの UDP アプリケーションの増加が見込まれる。6.1節で考察した通り、これらのトラヒックの  $T_{lp}$  の値は、WWW 等のサーバクライアント型トラヒックの場合に比して大きい。このため、WWW が主体である現在のトラヒックに比べて、ポアソン近似できるバッファサイズ範囲が拡大することが予想される。
- システム性能としての遅延時間の縮小を重視した少量バッファによるネットワーク設計や、将来的な光パケット交換網等、大容量バッファの実現が困難とされるネットワークの設計は、少量バッファを前提とするポアソン近似による設計手法の適用が期待できる領域である。

## 7. まとめ

局所ポアソン性を持つトラヒックを入力とする待ち行列モデルを、入力をポアソン過程として近似評価（ポアソン近似）可能なバッファサイズ範囲の導出を行った。また、多数のユーザを收容する集線回線部分で測定した実測 IP トラヒックを入力として、有限バッファ待ち行列システムのパケット損失率を評価することにより、実ネットワーク上でのポアソン近似の適用性と、導出したポアソン近似可能なバッファサイズ範囲の妥当性を検証した。検証の結果、エンドユーザからコアネットワーク方向へ流れる多重化 IP トラヒックと、ピアツーピアアプリケーションの多重化 IP トラヒックに対して、ポアソン近似が適用できることを確

認した。更に、導出したバッファサイズ範囲を目安として、ポアソン近似の適用可否が判断し得ることを確認した。今回の検討でポアソン近似から乖離したトラヒック種別の扱いは今後の課題である。

謝辞 日頃ご指導いただく KDDI 研究所 浅見所長、松島副所長、水池取締役、ならびにトラヒックデータ収集にご協力いただいた KDDI 株式会社 駒屋課長補佐、外山主任に感謝いたします。また、データ解析プログラムの作成補助を頂きました宇田川稔氏に感謝いたします。

## 文 献

- [1] W. E. Leland et al., "On the self-similar nature of Ethernet traffic (extended version)," IEEE/ACM Trans. Networking, vol.2, no.1, 1994.
- [2] A. Feldman et al., "Data networks as cascades: investigating the multifractal nature of Internet WAN traffic," Proc. ACM/SIGCOMM'98, pp.25-38, 1998.
- [3] A. Feldman et al., "Dynamics of IP traffic: a study of the role of variability and the impact of control," Proc. ACM/SIGCOMM'99, pp.301-313, 1999.
- [4] R. H. Riedi et al., "Toward an improved understanding of network traffic dynamics," Self-similar network traffic and performance evaluation, New York: John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- [5] H. Furuya et al., "Influence of transmission delay on self-similar scaling behavior of TCP/IP packet traffic," Proc. 13th ITC Specialist Seminar - IP Traffic Measurement, Modeling and Management, Paper #16, 2000.
- [6] J. Cao et al., "The effect of statistical multiplexing on Internet packet traffic: theory and empirical study," Bell Labs technical report, 2001.
- [7] J. Cao et al., "A Poisson limit for buffer overflow probabilities," IEEE INFOCOM, 2002.
- [8] H. Furuya et al., "Time scales of local Poisson property in backbone IP traffic and its implication to network design," Technical Report of IEICE, IN2001-108, 2001.
- [9] H. Furuya et al., "Implication of Local Poisson Property in IP Packet Traffic for Network Design", IEICE Society Conference, SB-13-5, 2002.
- [10] L. Neidhardt et al., "The concept of relevant time scales and its application to queueing analysis of self-similar traffic," Proc. SIGMETRICS '98/PERFORMANCE '98, pp. 222-232, 1998.
- [11] V. Jacobson, "Congestion avoidance and control". Proc. ACM/SIGCOMM '88, pp. 314-329, 1988.
- [12] M. S. Taquq, et al., "Estimators for long-range dependence: an empirical study," Fractals, vol.3, no.4, pp.785-788, 1995.
- [13] P. A. W. Lewis, "A branching Poisson process model for the analysis of computer failure pattern," Journal of Royal Statistical Society, Series B, vol.26, pp.398-456, 1964.
- [14] J. A. Bucklew, Large Deviation Techniques in Decision, Simulation and Estimation, New York: John Wiley & Sons, 1990.