

# 準最適な試験パケット間隔の適用による 測度変換型品質計測技術の精度向上効果の検証

渡部 康平<sup>†</sup> 本間 裕大<sup>††</sup> 会田 雅樹<sup>††</sup>

<sup>†</sup> 首都大学東京大学 システムデザイン学部

〒 191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6

E-mail: watabe-kouhei@sd.tmu.ac.jp

<sup>††</sup> 首都大学東京大学院 システムデザイン研究科

〒 191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6

**あらまし** 著者らは、フロー毎の詳細な QoS 情報のスケーラブルな計測を実現する測度変換型品質計測技術 (CoMPACT monitor) を提案し、それらが実際にスケーラブルに動作することを示してきた。CoMPACT monitor は、active 計測の試験パケットで観測したネットワークの片道遅延品質の観測値を、passive 計測によって取得した特定フローのトラフィック量のデータによって変換するものである。近年、試験パケット送出間隔をガンマ分布によって決定することにより、単純な active 計測の推定精度が向上するとの研究が報告された。これを受け、本報告ではガンマ分布の試験パケット送出が CoMPACT monitor についても適用可能であることを確認し、その効果が特に UDP によって転送されるフローで顕著であることを示す。

**キーワード** CoMPACT monitor, 測度変換, ガンマ分布, QoS 計測

## Verification of Accuracy Improvement for CoMPACT Monitor Due to Suboptimal Inter-probe Time

Kohei WATABE<sup>†</sup>, Yudai HONMA<sup>††</sup>, and Masaki AIDA<sup>††</sup>

<sup>†</sup> Faculty of System Design, Tokyo Metropolitan University

6-6, Asahigaoka, Hino-shi 191-0065, Japan

E-mail: watabe-kouhei@sd.tmu.ac.jp

<sup>††</sup> Graduate School of System Design, Tokyo Metropolitan University

6-6, Asahigaoka, Hino-shi 191-0065, Japan

**Abstract** We have proposed Change-of-Measure based Passive/Active monitoring (CoMPACT monitor) that achieves scalable measurement of one-way delay for each flow, and have shown it operate actually scalable. CoMPACT monitor transforms actively obtained information of one-way delay by using passively monitored traffic data for the target flow. Recently, it was reported that accuracy of simple active measurement improved by using inter-probe time according to gamma distribution. In this report, we show that the "gamma distribution based probing method" can apply to CoMPACT monitor, and the combination improves the measurement accuracy in UDP flows.

**Key words** CoMPACT monitor, change-of-measure, Gamma distribution, QoS measurement

### 1. はじめに

#### 1.1 インターネットにおける QoS 計測の必要性

近年、インターネットは個人ユーザ向けだけでなくビジネスツールとしても広く利用され、社会インフラとして大きな役割を担うに至っている。様々なアプリケーションが出現し、電子

メールや web 閲覧等のデータ通信の他に、IP 電話や動画配信などネットワーク上で音声や動画像も転送できるようになり、アプリケーションから発生するトラフィックも多様化している。それに伴い、アプリケーションが要求するサービス品質 (QoS) の基準も多様化していると言える。また、新規アプリケーションの出現によって、要求される QoS の基準は今後も変化を続

けると考えられ、これらの多様な要求に対してネットワークの適切な制御・管理・設備設計を行うにはネットワークの性能や QoS を適切に評価する必要がある。

特に、ユーザとプロバイダ間の QoS に関する取り決めである Service Level Agreement (SLA) を高度化するためには、ユーザ毎、契約組織毎といった特定のフロー毎の詳細な QoS 情報の取得が必要である。

### 1.2 既存の QoS 計測技術

ネットワークの性能や QoS を評価する手法は、ネットワークの実トラフィックを計測する passive 計測と試験パケットを挿入して計測する active 計測に大別される。

passive 計測はトラフィック量、フローの片道遅延、往復遅延 (round-trip time; RTT)、呼損率、呼損のパターンなどの測定に使われるが、実トラフィックをモニタリングしているため、原理的にはトラフィックに関するいかなる情報も取得可能である。トラフィック量など 1 点での観測で計測可能なものと、片道遅延など 2 点での観測結果をマッチングする必要があるものがある。

フロー毎の詳細な QoS を正確に計測することができるが、大規模なネットワークに適用しようとした場合、流れるトラフィックは膨大な量となり、送信側と受信側のデータを一カ所に集積するのにもネットワークを利用するためネットワーク資源を浪費してしまう。同時にマッチングにかかる時間も増加するため、スケーラビリティがないという欠点がある。

一方、active 計測は経路の片道遅延や、RTT、呼損率などが測定可能である。エンドユーザでも簡単に計測可能であるという利点があるが、フロー毎の QoS 情報の取得はできない。

### 1.3 測度変換型 QoS 計測技術

著者らは active 計測と passive 計測、両者の欠点を補い各フロー毎の QoS をスケーラブルに計測する方法として測度変換型品質計測技術 (Change-of-Measure based Passive/Active monitoring; CoMPACT monitor) を提案してきた [1]。

CoMPACT monitor とは、計測した単一フローの QoS 情報を、そのフローと同一経路を流れる各フローのトラフィック量のデータを用いて変換することで、複数のフローの個別の QoS 情報を取得する技術である。変換元となるフローは active 計測の試験パケットフローを使用し、変換の際に使用するトラフィック量のデータは passive 計測によって取得する。トラフィック量の passive 計測は 1 点での観測で計測が可能で、マッチング作業を必要としないためスケーラビリティの問題は生じない。

同一経路を流れる全てのフローについてのフロー毎 QoS 情報を 1 系列の試験パケットによる active 計測と簡単な passive 計測から個別かつ同時に計測できるため、active 計測と passive 計測双方の欠点を補完している。

### 1.4 本研究の目的

active 試験パケットの送出間隔としては、PASTA(Poisson Arrivals See Time Averages) の特性に従いポアソン到着 (指数分布間隔) で送出することが適切であると信じられてきた。また、CoMPACT monitor に関する過去の検証でもポアソン到着による試験パケット送出でシミュレーションがなされてきた。

しかし近年の研究 [2] では、試験パケットがネットワークに与える影響が無視できる non-intrusive な状況を仮定すると、推

定精度の点で指数分布よりも優れた分布が複数存在するとの報告をしている。さらに [2] では、試験パケットの送出間隔としてガンマ分布を採用すると、パラメータを調節して推定精度の点で最適に近い分布を選定できることを示している。

本研究ではこの示唆を受け、CoMPACT monitor の active 計測部分に対してガンマ分布間隔による試験パケット送出を適用し、CoMPACT monitor 全体としての精度向上を実現することを目的とする。試験パケット送出間隔としてのガンマ分布の有効性は、[2] の中で遅延過程と呼損過程を単純な active 計測で計測する 2 つの場合については確認がなされている。しかし、CoMPACT monitor は passive 計測による特定フローのトラフィック量の過程に強く依存した過程を観測するため、ネットワークを流れる全てのフローの影響を受ける遅延過程や呼損過程とは明らかに特性が異なる。よって、試験パケット送出間隔としてガンマ分布を採用することが CoMPACT monitor についても有効であるかは確認が必要である。

本研究では、CoMPACT monitor で個別フローの片道遅延の補分布を計測する場合に関してもガンマ分布間隔による試験パケット送出が適切であることをシミュレーションによって確認し、特にトランスポート層プロトコルに User Datagram Protocol (UDP) を用いて転送されるフローにおいて精度の向上が顕著であることを示す。

## 2. CoMPACT monitor の概要

### 2.1 コンセプト

CoMPACT monitor は試験パケットのタイミングで観測したネットワークの品質の観測値を、計測対象フローのタイミングでの測度に変換することによって計測対象フローが受ける品質を推定する技術である。

今、注目するネットワークの状態を表す過程 (例えば、時刻  $t$  に送出されたパケットが受ける遅延) を  $V(t)$  とし、 $V(t)$  をあるタイミング (例えば、ユーザ  $k$  のパケット送出のタイミング) で観測した際の値を確率変数  $X_k$  とする。このとき、 $X_k$  が一定値  $c$  を超える確率は

$$\begin{aligned} P(X_k > c) &= \int 1_{\{x>c\}} dF_k(x) \\ &= E_{F_k} [1_{\{x>c\}}] \end{aligned}$$

ここで  $F_k(x)$  は  $X_k$  の分布関数である。

$X_k$  が直接計測可能であれば、 $X_k$  の  $n$  番目の計測値を  $X_k(n)$  ( $n = 1, 2, \dots, m$ ) とし、 $P(X_k > c)$  は計測回数  $m$  を十分大きくすることで  $\sum_{n=1}^m 1_{\{X_k(n)>c\}}/m$  のように推定することができる。

ここで、 $X_k$  を直接観測することが困難であると仮定する。 $V(t)$  を  $X_k$  と独立な別のタイミング (例えば、試験パケット送出のタイミング) で観測した値を確率変数  $Y$  とし、 $X_k$  と  $Y$  の関係を考える。

同じ過程  $V(t)$  を観測していても、観測するタイミングによって観測値は異なる。双方の観測値  $X_k, Y$  はそれぞれの分布関数  $F_k(x), G(y)$  によって関係づけられ、 $P(X_k > c)$  は以下のように  $Y$  の測度に変換することができる。

$$\begin{aligned}
P(X_k > c) &= \int 1_{\{x>c\}} dF_k(x) \\
&= \int 1_{\{y>c\}} \frac{dF_k(y)}{dG(y)} dG(y) \\
&= E_G \left[ 1_{\{Y>c\}} \frac{dF_k(Y)}{dG(Y)} \right]
\end{aligned}$$

よって、 $P(X_k > c)$  は、 $Y$  の  $n$  番目の計測値を  $Y(n)$  ( $n = 1, 2, \dots, m$ ) として、計測回数  $m$  を十分大きくすることで次のように推定できる。

$$\frac{1}{m} \sum_{n=1}^m 1_{\{Y(n)>c\}} \frac{dF_k(Y(n))}{dG(Y(n))} \quad (1)$$

この推定は  $dF_k(Y(n))/dG(Y(n))$  さえ計測できれば、 $X_k$  のタイミングでの計測を必要としないことに注意する。これは、 $k$  で定まる特定のフローが受けるネットワーク品質を、 $Y$  のタイミングで投入される単一の試験パケット列から同時に推定可能であることを示している。

## 2.2 CoMPACT monitor の定式化

CoMPACT monitor は計測対象フローのパケットを流体近似することによって遅延について定式化される [1]。つまり、active 試験パケットに比べネットワークを流れる計測対象フローのトラヒックが非常に多いとして話を進める。

時刻  $t (\geq 0)$  における計測対象フローのトラヒック量の過程を  $a(t)$  とし、計測対象の経路における仮想遅延を  $V(t)$  とする。 $a(t), V(t)$  とともに非負の deterministic process であるとし、 $t \geq 0$  で右連続で左極限を持つとする。

今、片道遅延の経験分布  $\pi(c)$  を計測することを考えると、計測対象となる量は計測対象フローの全トラヒック中、遅延が  $c$  を超えるトラヒックの割合であるから以下のように表せる。

$$\pi(c) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\int_0^t 1_{\{V(s)>c\}} a(s) ds}{\int_0^t a(s) ds} \quad (2)$$

これは計数過程  $N(t)$  のサンプリングによって以下の式で推定することができ、強一致性を持つ (詳細については [1] を参照)。

$$\begin{aligned}
Z_m(c|N) &= \frac{1}{m} \sum_{n=1}^m 1_{\{V(T_n)>c\}} \frac{a(T_n)}{\sum_{l=1}^m a(T_l)/m} \\
&= \sum_{n=1}^m 1_{\{V(T_n)>c\}} \frac{a(T_n)}{\sum_{l=1}^m a(T_l)}
\end{aligned} \quad (3)$$

$T_n$  ( $n = 1, 2, \dots, m$ ) は  $n$  回目のサンプリング時刻である。サンプリングのタイミングは試験パケットの送出に対応し、 $V(T_n)$  の観測に active 計測が、 $a(T_n)$  の観測に passive 計測が使われる。この passive 計測は、送受信双方に計測器を設置してパケットのマッチングを行う遅延計測のための 2 点間 passive 計測に比べ非常に簡易に実施することが可能である。

式 (3) は  $\sum_{n=1}^m 1_{\{V(T_n)>c\}}/m$  の部分のみであれば、送出した試験パケット中の遅延が  $c$  を超えるパケットを数える単純な active 計測になるが、試験パケット送出時のトラヒック量によって決定する  $a(T_n)/(\sum_{l=1}^m a(T_l)/m)$  によって重み付けされている。これは active 計測が偏りなく計測する遅延の分布を、passive 計測によって計測する計測対象フローのトラヒックの集中具

合によって計測対象フローが受ける遅延の分布に補正しているということを意味する。式 (3) における  $a(T_n)/(\sum_{l=1}^m a(T_l)/m)$  は、式 (1) での  $dF_k(Y(n))/dG(Y(n))$  に対応している。

実際には、計測対象フローのトラヒックは流体ではないため、適当に小さい正数  $\delta$  を設定して、試験パケット送出時刻近傍の時間区間  $[\max\{T_n - \delta/2, T_{n-1}\}, \min\{T_{n+1}, T_n + \delta/2\})$  に送出されるパケット数をカウントし、 $a(T_n)$  に代えて実装する。

## 3. 準最適な試験パケット計測間隔

### 3.1 NIMASTA

active 計測の試験パケット送出のポリシーとしては、PASTA の特性に従い、ポアソン到着による試験パケット送出、すなわち指数分布間隔での試験パケット送出が広く使われてきた。しかし [3] では、試験パケットの影響が無視できるとする non-intrusive な状況を仮定でき、試験パケット送出過程が定常で mixing (混合的) であれば、以下の等式が成り立つことを証明し、この性質を NIMASTA (Non-Intrusive mixing Arrivals See Time Averages) と名付けている。

$$\begin{aligned}
\lim_{m \rightarrow \infty} \frac{1}{m} \sum_{n=1}^m f(X(T_n)) &= \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \int_0^t f(X(t)) dt \\
&= E[f(X(0))] \quad \text{a.s.}
\end{aligned}$$

ここで、 $f$  は任意の正の関数である。第 2 の等式が成り立つためには、計測対象の過程  $X(t)$  が定常でエルゴード性を仮定できる必要がある。

これは、 $E[f(X(0))]$  を推定可能な試験パケット送出過程がポアソン到着以外にも多数存在することを示している。実際にポアソン到着やガンマ分布間隔、一様分布間隔などを含む複数の過程での計測で右辺の値に収束することが確認されている [3]。

mixing ではない送出過程の例としては、送出間隔を固定値とする場合などが挙げられる。

### 3.2 試験パケット間隔による推定値の分散の減少

さらに近年の研究 [2] は、一定の仮定の下で active 計測における試験パケットの送出間隔としてガンマ分布を採用することで、推定精度の点で最適に近い試験パケット送出過程を選定することができることを報告している。

$m$  個の試験パケットによって  $X(0)$  の期待値  $p$  を推定すると、推定値  $\hat{p}$  は

$$\hat{p} = \frac{1}{m} \sum_{n=1}^m X(T_n) \quad (4)$$

となる。ここで、計測対象過程  $X(t)$  の自己共分散関数  $R(\tau) = \text{Cov}(X(t), X(t-\tau))$  ( $X(t)$  の定常性より  $\tau$  のみの関数として表示できる) が凸であるという仮定すると、試験パケット送出間隔の平均を  $\mu$  とするポリシーの中で、推定値  $\hat{p}$  の分散を最低にするのは試験パケット送出間隔を確定的に  $\mu$  とした場合であることが証明できる ([2] 参照)。推定値の分散の小ささは推定精度に直結する。よって、推定値の分散についてのみ注目すれば、あらゆる試験パケット送出のポリシーよりも周期的な試験パケットの送信が優れている。

ただし、周期的な試験パケット送信過程は mixing ではない

ため前述の NIMASTA の特性の仮定を満たしておらず、観測対象の過程の周期と試験パケット送出の周期が一致した場合に真の値に収束しないフェーズロック現象が発生する可能性があるため、周期的な計測が最適であるとは言えない。

[2] の論文では、従来の指数分布間隔による計測と、分散の点で優れるが正確性に欠ける周期的計測の間のトレードオフを解決する最適の計測間隔としてガンマ分布間隔による試験パケットの送出を提案している。試験パケットの送出間隔として使用する分布の密度関数  $g(x)$  は以下の式で与えられる。

$$g(x) = \frac{x^{\beta-1}}{\Gamma(\beta)} \left(\frac{\beta}{\mu}\right)^{\beta} e^{-x\beta/\mu} \quad (x > 0) \quad (5)$$

これは、ガンマ分布の形状母数を  $\beta$ 、尺度母数を  $\mu/\beta$  とした形で、 $\beta (> 0)$  はパラメータ、 $\mu (> 0)$  は平均である。ガンマ分布の性質により、 $\beta = 1$  とすると平均  $\mu$  の指数分布に一致し、 $\beta \rightarrow \infty$  とすると  $g(x) \rightarrow \delta(x - \mu)$  に弱収束して周期的な計測と一致する。

自己共分散関数が凸であるという仮定の下で、式 (5) の分布に従う間隔でサンプリングした式 (4) の推定値  $\hat{p}$  の分散は、 $\beta$  について単調減少となることが証明できる。 $\beta \rightarrow \infty$  とすると周期的計測に一致するため、パラメータ  $\beta$  を大きくするほど最適である周期的に近い分散を獲得できる。周期的計測の欠点であったフェーズロック現象による正確性の欠如は、 $\beta$  の値を適度に小さく取ることによって回避できる (ガンマ分布は mixing の条件をみたしている)。つまり、適当な  $\beta$  を指定することによって、指数分布間隔と周期的計測の間のトレードオフを解決し、最適に近い試験パケット送出過程を得ることができる。

### 3.3 CoMPACT monitor への適用

このガンマ分布間隔の試験パケット送出の有効性については、実際のネットワークにおける大規模な passive 計測によるデータとシミュレーションによって単純な仮想遅延過程と呼損過程については検証されている [2]。式 (4) と式 (3) を対応させると、CoMPACT monitor が観測している過程  $X(t)$  は、トラヒックの時間平均を  $\bar{a}(t)$  として以下の式で表される過程であると考えることができる。

$$X(t) = 1_{\{V(t) > c\}} \frac{a(t)}{\bar{a}(t)} \quad (6)$$

この過程は特定のフローのトラヒック過程  $a(t)$  で重みづけられた過程であり、ネットワーク内の全てのフローの影響を受ける遅延過程や呼損過程とは明らかに特性が異なる。本報告では、CoMPACT monitor についてこのガンマ分布間隔の試験パケット送出を導入し、その有効性を確認することを目的としている。

## 4. 準最適な試験パケット送出の有効性検証

### 4.1 シミュレーションモデル

ガンマ分布間隔による試験パケット送出が CoMPACT monitor についても有効であるか確認するために、ns-2 [4] を用いたシミュレーションを実施した。図 1 は使用したネットワークモデルである。

ユーザフロー送受信用端末として 20 対を用意し、対応する端末に向けて転送を行う。ユーザフローは表 1 に示す各 5 本ずつ

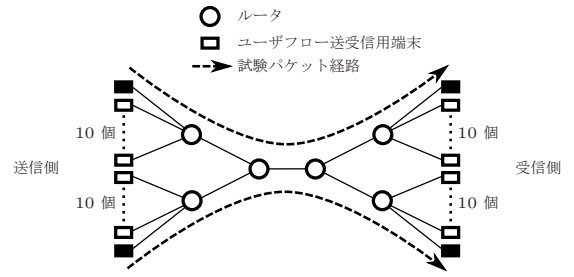


図 1 ネットワークモデル

表 1 ユーザフロータイプ

タイプ	フロー ID	平均 ON/OFF 区間分布	ON/OFF 区間分布	形状母数	ON 区間レート
タイプ 1	#1-5	10s/5s	指数分布	-	6 Mbps
タイプ 2	#6-10	5s/10s	指数分布	-	6 Mbps
タイプ 3	#11-15	5s/10s	パレート分布	1.5	9 Mbps
タイプ 4	#16-20	1s/19s	パレート分布	1.5	9 Mbps

表 2 試験パケットタイプ

送信間隔分布	ガンマ分布パラメータ	分布平均
指数分布	$(\beta = 1)$	0.5 s
ガンマ分布	$\beta = 5$	0.5 s
ガンマ分布	$\beta = 25$	0.5 s
ガンマ分布	$\beta = 125$	0.5 s
周期的	$(\beta \rightarrow \infty)$	0.5 s

4 種類に分けられ、対応する分布とレートにより ON/OFF の区間長と ON 区間内に発生するトラヒックが決定する ON-OFF 過程であるとした。

試験パケット列は表 2 に示す 5 種類とし、送出間隔の平均はいずれも 0.5 s とした。各タイプを図 1 に示す 2 経路にそれぞれ 300 系列ずつ 1500 本流した。推定は 1 系列の試験パケット列で可能だが、推定値の分散の分析のために多数の試験パケット列を用意している。表 2 の指数分布と周期的については、対応するガンマ分布のパラメータが挙げられていることに注意する。

転送は全て UDP によって行われ、ユーザフローのパケットサイズは 1500 バイト、試験パケットのパケットサイズは 64 バイトとした。リンク帯域は全て 64 Mbps としており、中央のコアルータ間のリンクがボトルネックとなっているため、主に送信側のコアルータで遅延が生じる。ただし、バッファは 50,000 パケットで十分に用意されているため呼損は生じない。

passive 計測によるトラヒック量の観測は送信側エッジルータのキュー到着時に行った。 $\delta$  は 40 ms とし、試験パケット到着時点の前後 20 ms に到着するユーザパケットをカウントしてトラヒック量とした。

シミュレーションは 500 s に相当する時間実施し、試験パケット 1 系列が与える影響はバイトベースで約 0.00197% となり、non-intrusive (試験パケットの影響が無視できる) と言える。

### 4.2 収束値の確認

ここでは、CoMPACT monitor にガンマ分布間隔の試験パケット送出を用いて片道遅延の分布を推定した場合でも、真の値が推定できることを示す。

前述のシミュレーションモデルを用いて、ユーザフローの片道遅延の補分布を CoMPACT monitor で推定する。式 (3) と対応させると、 $V(t)$  は時刻  $t$  にパケットが送出された場合に受ける片道遅延となり、式 (2) に相当する計測対象フローの全ト

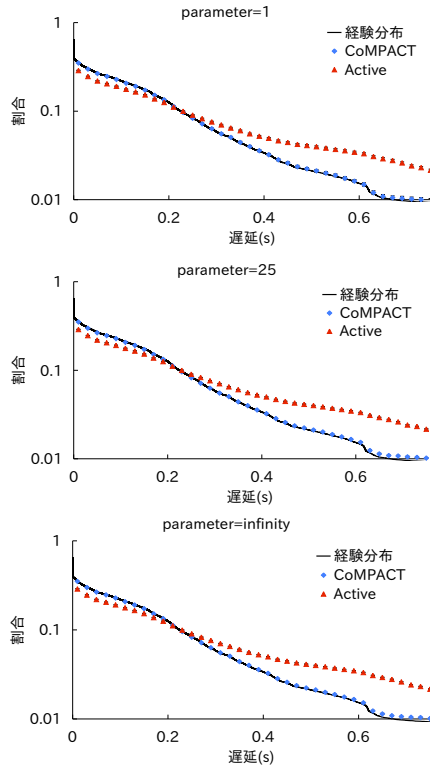


図 2 フロー ID: #1 についての補分布の推定結果

ラヒック中の遅延が  $c$  を超えるトラヒックの割合を推定していることになる。

図 2 に、フロータイプ 1 を代表してフロー ID#1 のパケットが経験した片道遅延の補分布を、 $\beta = 1, 25$  および  $\beta \rightarrow \infty$  の試験パケットでそれぞれ推定した結果を示す。横軸の遅延は式 (2) での  $c$  に相当することに注意する。参考のため、真の経験分布と CoMPACT monitor の推定値に加え、active 計測による推定結果もプロットしてある。また、推定結果については 95%信頼区間もあわせて表示してある。

CoMPACT monitor の推定結果は、いずれのパラメータの試験パケットについても真の経験分布の値を適切に推定できており、試験パケット送出間隔の分布による優劣も付けられない。各フロータイプからフロー ID#6, #11, および #16 について同じ補分布の推定を行ったが、全く同じ結果が得られた。

### 4.3 分散の検証

試験パケット送出間隔に使用するガンマ分布のパラメータに伴う、推定値の分散の挙動を検証する。前述の [2] の内容が CoMPACT monitor についても適用可能であるならば、パラメータ  $\beta$  に伴って分散は減少し、推定精度は向上する。

ただし、その仮定として観測対象の過程の自己共分散関数が凸である必要があったため、自己共分散関数の凸性の確認から議論を始める。CoMPACT monitor が観測する過程は式 (6) で与えられていた。時刻  $t$  にパケットが送出された場合に受ける片道遅延  $V(t)$  は、時刻  $t$  に送信側コアノードのキューに溜まっている総バイト数から算出した。今回のシミュレーションモデルでは、遅延は主にボトルネックであるコアノード間転送時にパケットが溜まり転送まで待たされることによって発生するた

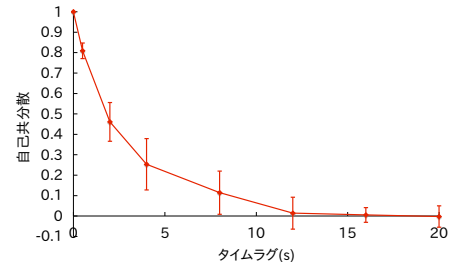


図 3 フロー ID#1 についての自己共分散関数

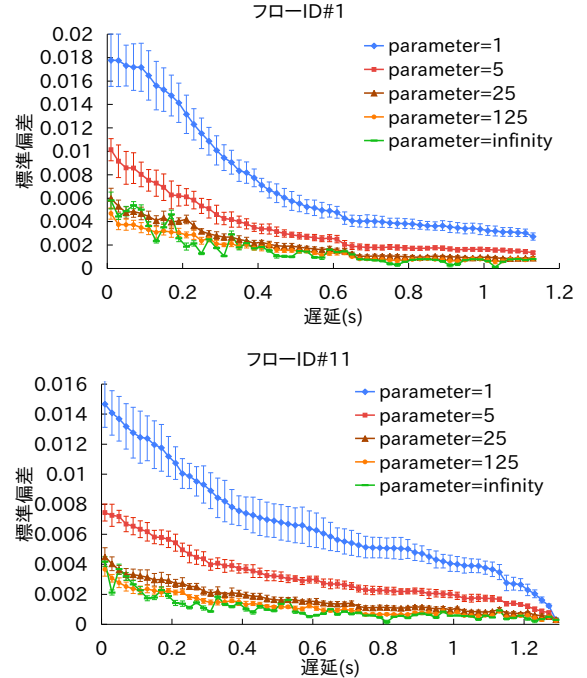


図 4 推定値の標準偏差の挙動

め、コアノード以外で発生する遅延は無視できると考えられる。

フロー ID#1 の  $c = 0.1$  s について自己共分散関数を標準化したグラフを図 3 に示す。実際のプロットには、キュー長およびトラヒック量を 0.01 s 毎に記録したデータを使用し、10 回の実験による 95%信頼区間を表示している。グラフから自己共分散関数は下に凸となる傾向があることが確認できる。他にタイプ 2 からタイプ 4 までのユーザフローを代表して、フロー ID#6, #11, および #16 についても同じように自己共分散関数を確認したが、いずれも自己共分散関数が凸であるという仮定を崩す結果ではなかった。

自己共分散関数の凸性が確認できたため、パラメータ  $\beta$  に伴う分散の挙動を調査する。図 4 は前節で示した補分布の推定の各推定点における標準偏差をプロットしたものである。図 2 などと同様、横軸の遅延は式 (2) での  $c$  に相当することに注意する。また、誤差棒は試験パケット 30 系列から算出した標準偏差を 1 データと見なした場合の 95%信頼区間を表示している。

パラメータが  $\beta = 1$  から  $\beta = 125$  まで上昇するにつれ、誤差棒もほとんど重ならず非常にきれいに標準偏差が減少している。 $\beta \rightarrow \infty$  に相当する周期的計測では時折、 $\beta = 125$  や  $\beta = 25$  の結果を超えることがあるが、これは [2] の中で指摘された (試験パケットの周期と観測過程の周期が重なることによる) フェーズロック現象に起因する推定値の正確性の欠如の表れと見られる。



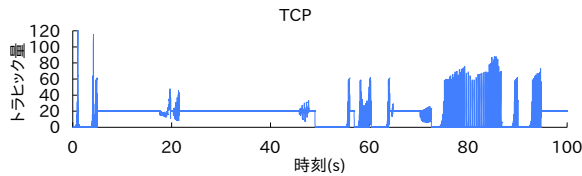


図 5 TCP のトラヒック過程

結果として UDP を用いたシミュレーション条件では、試験パケット送出間隔に使用するガンマ分布のパラメータを適度に大きな値に設定することで、推定精度の点で最適に近い試験パケット送出過程を獲得できることがわかった。

#### 4.4 TCP によるシミュレーション

前述のシミュレーションでは、ユーザフローとして UDP によって転送されるフローを使ったが、TCP を採用した場合の実験も追加で実施し、注目すべき結果を得た。

シミュレーションでは、ユーザフローとして UDP のフローに代え、表 1 と同じ 4 種の TCP のフローを各 5 本流した。また、TCP の最大ウインドウサイズは 300 パケットとしてある。その他のシミュレーション条件は前述の UDP によるシミュレーションと同じにし、シミュレーション時間もやはり 500 s とした。

TCP による転送は常にトラヒック量の調整を行っており、ON 区間においてもトラヒック量が激しく変化する。そのため、UDP のトラヒックに比べ、TCP のトラヒックは観測のタイミングによってトラヒック量の観測値が大きく変化する可能性がある。今回の TCP のシミュレーションの条件は、図 5 に示すようにユーザトラヒックの特性が非常に不安定になるような条件となっている。トラヒック量が安定している UDP の場合と比較することで、不安定なトラヒックに対してもガンマ分布間隔による試験パケット送出が有効であるかを確認する。

推定値の真の値への収束、および自己共分散関数の凸性の検証については、UDP の場合と同様に確認ができた。UDP による実験と大きな差は出なかったため、グラフの掲載は割愛する。

一方、推定値の標準偏差については UDP の場合と異なる結果となった。図 6 にフロー ID#1 の補分布の各推定点における標準偏差をプロットしたものを表示した。UDP の場合と同じく、誤差棒は試験パケット 30 系列から算出した標準偏差を 1 データと見なした場合の 95%信頼区間を表示している。

周期的な計測に相当する  $\beta \rightarrow \infty$  についてみると、UDP の場合よりもさらに顕著にフェーズロック現象が観測できる。UDP の場合も含めて、標準偏差の明らかな逆転は周期的な計測のみに起こる（ただし、逆転は必ず起こるとは限らない）。この結果は、周期的な計測が最適な計測法ではないことを裏付けている。

また、UDP の場合ほど有意な差は存在しないことが確認できる。グラフを見ると、 $\beta = 1$  から  $\beta = 125$  まで、パラメータ  $\beta$  の上昇に伴って標準偏差が減少する傾向にあることはわかる。しかし、信頼区間は互いに大きく重なり、偶然の要素による逆転が十分に起こりうることを示唆している。

つまり、計測対象フローのトラヒック過程の特性によっては推定値の分散は大きく変動し、必ずしも推定精度が改善しない（ただし、平均的には改善する）。特に今回の TCP の実験条件のようにトラヒック量の時間的変化の激しい条件の下では、UDP

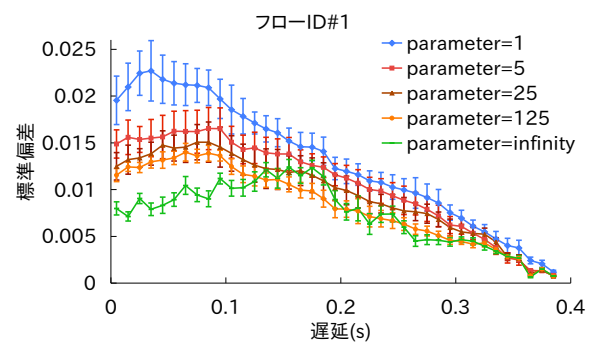


図 6 TCP の場合の推定値の標準偏差の挙動 (フロー ID: #1)

実験のように時間的変化の少ないトラヒックに適用した場合に比べ、ガンマ分布間隔による試験パケット送出による確実な推定精度改善効果は得られないと結論づけることができる。

## 5. ま と め

試験パケットの影響が無視できるほど小さい non-intrusive な状況が仮定できる条件下では、CoMPACT monitor で片道遅延の補分布を推定した場合についてもガンマ分布間隔による試験パケット送出で推定精度が向上することが確認された。

ただし、[2] での仮定に基づき、観測対象の過程の自己共分散関数が凸である必要がある。この仮定は遅延過程や呼損過程については現実的であるということが実データによって示されていた。しかし、ネットワーク内の全てのフローの影響を受ける遅延過程や呼損過程と異なり、特定フローのトラヒック過程は特定の周期性を持ちやすいため、現実に応用する際には観測対象の過程の自己共分散関数の凸性は特に注意を払う必要がある。

また、今回行ったシミュレーションにより、ガンマ分布間隔による試験パケット送出による推定精度の改善は計測対象フローのトラヒック特性によって大きく左右されることがわかった。特に改善効果が顕著に表れるのは、トラヒック量の時間変化に乏しい UDP によるフローを計測したときであり、時間変化の激しいトラヒックについては必ずしも改善しない場合がある。

## 謝 辞

本研究の一部は、情報通信研究機構 (NICT) の委託研究「新世代ネットワークの構成に関する設計・評価手法の研究開発」により実施した。

## 文 献

- [1] M. Aida, N. Miyoshi and K. Ishibashi, "A change-of-measure approach to per-flow delay measurement systems combining passive and active methods: On the mathematical formulation of CoMPACT monitor," IEEE Transactions on Information Theory, vol. 54, no. 11, pp. 4966-4979, Nov. 2008.
- [2] F. Baccelli, S. Machiraju, D. Veitch, and J. Bolot, "On optimal probing for delay and loss measurement," in Proc. Int. Measurement Conf. '07, San Diego, CA, Oct. 2007, pp. 291-302.
- [3] F. Baccelli, S. Machiraju, D. Veitch, and J. Bolot, "The role of PASTA in Network Measurement," in Proc. ACM SIGCOMM 2006, Pisa, Italy, Sep. 2006, pp. 231-242.
- [4] The Network Simulator-ns-2. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.