

ネットワークトラフィック時系列の二重確率平滑化点過程モデル

栗田 耕司[†] 鈴木 崇文[†] 植田 武^{††} 八名 和夫^{†††}

[†] 法政大学工学部 〒105-0123 東京都小金井市梶野町 3-7-2

^{††} 三菱電機株式会社情報技術総合研究所 〒247-8501 神奈川県鎌倉市大船 5-1-1

^{†††} 法政大学アメリカ研究所 米国カリフォルニア州パリングゲーム市

E-mail: [†] {kurita,suzuki}@bme.ei.hosei.ac.jp, ^{††} ueda@bme.ei.hosei.ac.jp, ^{†††} yana@huric.org

あらまし ネットワークトラフィックの統計的性質に関する研究はこれまでに数多くなされ、LAN トラフィックにおいて自己相似性を有する長期依存性という性質が確認されており、その低周波数領域の変動スペクトルが $1/f$ スペクトルに適合すること等が明らかにされている。しかし、このような統計的性質の議論は多数なされているがトラフィックを構成する要素及び発生過程との関連性は必ずしも明確にされていない。そこで本論文では、観測トラフィック全体は個々の通信トラフィックが重畳して形成していると仮定し、事象生起密度が確率過程であるような二重確率平滑化点過程によるトラフィックモデルを提案するとともに、トラフィックの構成要素と統計的性質の関連付けを行う。さらに、観測トラフィックのスペクトルパターンに注目することによりトラフィック構成要素の性質を推定する手法について述べる。本論文で得られた結果はネットワークトラフィックのスペクトルパターンの微細構造を明らかにする手がかりを与えるとともに逆問題とも呼ぶべき新しい分野を提起するものである。

キーワード ネットワークトラフィック、二重確率平滑化点過程、 $1/f$ スペクトル

A Constructive Network Traffic Model as a Doubly Stochastic Filtered Point Process

Koji KURITA[†], Takafumi SUZUKI[†], Takeshi UEDA^{††}, and Kazuo YANA^{†††}

[†] Faculty of Engineering, Hosei University Kajino 3-7-2, Koganei, Tokyo, 105-0123 Japan

^{††} Information Technology Reserch & Development Center, Mitsubishi Electric Corporation
Ofune 5-1-1, Kamakura, Kanagawa, 247-8501 Japan

^{†††} Hosei University Reserch Institute California 800 Airport Blvd. Suite 504 Burlingame, CA 94010

E-mail: [†] {kurita,suzuki}@bme.ei.hosei.ac.jp, ^{††} ueda@bme.ei.hosei.ac.jp, ^{†††} yana@huric.org

Abstract This paper proposes a constructive model of the observed LAN network traffic. Network traffic is assumed to be random super position of randomly occurred elementary traffics with variable length. It is concluded that the power spectrum pattern shows $1/f$ assuming that the request occurrences follow a double stochastic Poisson processes with $1/f$ power spectral pattern. The results gives us a possible interpretation of spectral structure based on clearly defined traffic parameters.

Key words network traffic, filtered point process, $1/f$ spectrum

1. まえがき

ネットワークを構築する際、その通信品質を高いものにするためにはネットワークトラヒックから得られる情報や特性をもとに、利用形態等を考慮に入れたネットワーク設計が必要である。そのため、ネットワークトラヒックの統計的性質を明らかにすることやその変動特性から有益な情報を抽出することの重要性は増してきており、それらを考慮したネットワークトラヒックの統計的なモデリングが不可欠である。

これまで、様々な方面からネットワークトラヒックの統計的性質についての研究が行われてきた。LAN(Local Area Network)トラヒックにおいて自己相似性(Self-Similarity)を有する長期依存性(Long Range Dependent)を持つことが報告され[1]、従来のポアソン過程に基づくトラヒックモデルと現実のトラヒックの統計的性質の違いが指摘されている[2]。これにより、様々な手法を用いてLANトラヒックやATMトラヒックに対して自己相似性を有するかを検証する研究が行われている[3]~[8]。

これらのような現象的な立場からネットワークトラヒックにアプローチする研究が行われている一方、通信リクエストの間隔や通信対象となるドキュメントサイズの分布等のトラヒックの構成要素や発生過程に注目する、いわば構成的な立場からアプローチする研究も行われている。FTPやTelnet等のトラヒックに関しては、その詳細な性質が明らかになっており[2][12]、最近、WWW(World Wide Web)トラヒックについても通信リクエストの分布やドキュメント分布の解析及びモデリングの研究が行われている[13]~[15]。しかし、以上のような統計的性質についての議論は多数なされているが、ネットワークトラヒックの要素過程との関連は必ずしも明確にされていない。

そこで本稿では、構成的な立場によりネットワークトラヒックのモデリングを行い、その統計的性質を明らかにするとともに、トラヒック構成要素及び発生過程と統計的性質の関連付けを行う。ネットワークトラヒックは、その大部分がHTTP(Hyper Text Transfer Protocol)によるものであることに注目し[16]、現象的には個々のユーザリクエストにより生ずるユーザトラヒックが時間的にランダムに重畳して得られる平滑化点過程としてモデル化される。本稿では、事象生起密度過程が $1/f$ スペクトルを有する確率過程であるような二重確率平滑化点過程(Doubly Stochastic Filtered Point Process :DSFPP)によるトラヒックモデルを提案し、特に、観測されるネットワークトラヒックのパワースペクトルから構成要素パラメタを推定する方法について検討し、実際のネットワークトラヒックに対して応用した例を示す。

以下、2章では二重確率平滑化点過程モデルとその統計的性質、及び統計的性質から構成要素パラメタを推定する、いわば逆問題について説明する。次に3章において、計算機シミュレーションにより提案手法の妥当性を検定し、4章では実際に計測されたネットワークトラヒックに対して解析を行った結果を示す。5章において、本稿のまとめを行う。

2. 二重確率平滑化点過程モデル

ネットワークトラヒックとは観測時間内に通過したデータサイズの総和を時間平均したものであり、現象的には、観測箇所において個々の通信トラヒックが重畳した過程であると捉えることができる。そこで、観測トラヒック全体 $y(t)$ は、ユーザリクエストにより生じた要素トラヒックの和として

$$y(t) = \sum_i h_i(t - t_i) \quad (1)$$

と表現できる。但し、 h_i 及び t_i はそれぞれ i 番目の通信リクエストにより生じた要素トラヒック波形及びその生起時刻を表す。また、 $h_i(t)$ は振幅変動を持ち、

$$h_i(t) = \alpha_i u(t) \quad (2)$$

と書けるものとする。但し $u(t)$ は0又は1をとる矩形波であり、 α_i は i 番目の生起に伴う転送トラヒックを表し、互いに独立で同一の分布に従う確率変数であるとする。

また、事象生起時刻列 $\{t_i\}$ は二重確率ポアソン過程に従うものとし、事象生起密度過程 $\lambda(t)$

$$\lambda(t) \triangleq \lim_{\Delta t \rightarrow 0} Pr \left[\frac{N_{t, \Delta t} - 1}{\Delta t} \right] \quad (3)$$

は確率過程であるとする。ここで、 $N_{t, \Delta t}$ は $\{t, t + \Delta t\}$ に生起する通信リクエスト数を表す。

2.1 一般的な二重確率平滑化点過程の統計的性質

ネットワークトラヒックの変動特性を特徴付けるため、二重確率平滑化点過程モデルの各統計的性質の理論式を導く。

● 平均

先に設定したように時刻 σ の事象生起密度過程 λ_σ が確率的な変動をもち通信リクエスト生起が二重確率的であるとする。このとき、 λ_σ を条件とする観測トラヒック $y(t)$ の条件付き特性関数 $M(j\omega|\lambda_\sigma)$ は

$$\begin{aligned} M(j\omega|\lambda_\sigma) &= E [e^{j\omega y(t)}] \\ &= exp \left[\int \lambda_\sigma E [e^{j\omega h(t-\sigma)} - 1] d\sigma \right] \end{aligned} \quad (4)$$

で与えられる。式(4)より λ_σ を条件とした $y(t)$ の平均は以下のように計算できる。

$$\begin{aligned} E[y(t)|\lambda_\sigma] &= \frac{1}{j} \frac{\partial}{\partial \omega} M(j\omega|\lambda_\sigma) \Big|_{\omega=0} \\ &= \int \lambda_\sigma E [h(t-\sigma)] d\sigma \\ &= \bar{\alpha} \int \lambda_\sigma E [u(t-\sigma)] d\sigma \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 λ_σ に関する期待値 $\bar{\lambda}$ をとって観測トラヒック $y(t)$ の平均 $\bar{y}(t)$ の理論式は以下ようになる。

$$\bar{y}(t) = \bar{\alpha} \bar{\lambda} \int E [u(t-\sigma)] d\sigma \quad (6)$$

• パワースペクトル

事象生起密度過程 λ_σ を条件とする観測トラヒック $y(t)$ の条件付き結合特性関数 $M_{t_1, t_2}(j\omega_1, j\omega_2)$ は

$$\begin{aligned} M_{t_1, t_2}(j\omega_1, j\omega_2 | \lambda_\sigma) &= E[e^{j\omega_1 y(t_1) + j\omega_2 y(t_2)}] \\ &= exp \left\{ \int \lambda_\sigma E[e^{j\omega_1 h(t_1 - \sigma) + j\omega_2 h(t_2 - \sigma)} - 1] d\sigma \right\} \quad (7) \end{aligned}$$

となる。式(7)から λ_σ を条件とした $y(t)$ の自己相関関数は

$$\begin{aligned} R_y(t_1, t_2 | \lambda_\sigma) &= E[y(t_1)y(t_2) | \lambda_\sigma] \\ &= \frac{1}{j^2} \frac{\partial^2}{\partial \omega_1 \partial \omega_2} M_{t_1, t_2}(j\omega_1, j\omega_2 | \lambda_\sigma) \Big|_{\omega_1 = \omega_2 = 0} \\ &= \bar{\alpha}^2 \int \lambda_\sigma E[u(t_1 - \sigma)u(t_2 - \sigma)] d\sigma \\ &\quad + \bar{\alpha}^2 \iint \lambda_{\sigma_1} \lambda_{\sigma_2} E[u(t_1 - \sigma_1)u(t_2 - \sigma_2)] d\sigma_1 d\sigma_2 \quad (8) \end{aligned}$$

のように計算できる。ここで、 λ_σ に関する期待値 $\bar{\lambda}$ をとり、さらに時間差 $\tau = t_1 - t_2$ のみの関数とすると、観測トラヒック $y(t)$ の自己相関関数 $R_y(\tau)$ の理論式は以下ようになる。

$$R_y(\tau) = \bar{\alpha}^2 \bar{\lambda} \int R_u(\tau) d\sigma + \bar{\alpha}^2 \int R_\lambda(\tau) * R_u(\tau) d\sigma \quad (9)$$

但し、 $R_\lambda(\tau), R_u(\tau)$ はそれぞれ λ_σ 及び要素トラヒック $u(t)$ の自己相関関数を表し、* は畳み込み積分を表す。

よって式(9)のフーリエ変換により、観測トラヒック $y(t)$ のパワースペクトル $\phi_y(f)$ の理論式

$$\phi_y(f) = \bar{\alpha}^2 \bar{\lambda} \phi_u(f) + \bar{\alpha}^2 \phi_\lambda(f) \phi_u(f) \quad (10)$$

を得る。ここで、 $\phi_u(f), \phi_\lambda(f)$ は要素トラヒック $u(t)$ のパワースペクトル及び事象生起密度過程 λ_σ のパワースペクトルを表す。

式(10)より観測トラヒック $y(t)$ のパワースペクトル $\phi_y(f)$ は要素トラヒックのパワースペクトルに事象生起密度過程のパワースペクトルが上乘せられた形状になることが分かる。

2.2 具体的な二重確率平滑化点過程の統計的性質

2.1 では転送トラヒック α_i や事象生起密度過程 $\lambda(t)$ 等が一般的な場合について二重確率平滑化点過程モデルの各統計量を導出した。ここで、通信リクエスト生起時刻列及びそれに伴う要素トラヒック波形の変動特性をそれぞれ具体化すれば、トラヒックの統計的性質についてさらに詳細に記述する事が可能である。

ここでは、事象生起密度過程 $\lambda(t)$ が確率過程(平均 $\bar{\lambda}$) でありそのパワースペクトルが β/f で近似できるとし、各転送トラヒック α_i が生起時刻に依らず一定値 α で、その持続時間が平均 τ_u の指数分布に従うような場合について考える。条件を式で

表すと次のようになる。

$$\begin{cases} E[\lambda(t)] = \bar{\lambda} \\ \phi_\lambda(f) \sim \frac{\beta}{f} \\ \alpha_i = \alpha \\ E[u(t)] = Pr[\tau > t] = e^{-\frac{t}{\tau_u}} \end{cases} \quad (11)$$

このとき、式(6)(11)から平均 $\overline{y(t)}$ は

$$\overline{y(t)} = \alpha \bar{\lambda} \tau_u \quad (12)$$

と表現できる。また、要素トラヒック $u(t)$ のパワースペクトルが

$$\phi_u(f) = \frac{2}{\left(\frac{1}{\tau_u}\right)^2 + (2\pi f)^2} \quad (13)$$

となることから、 $u(t)$ のパワースペクトルはローレンツ型を示すことが分かる。よって、観測トラヒック $y(t)$ のパワースペクトル $\phi_y(f)$ は式(10)(11)(13)より次のようになる。

$$\phi_y(f) = \frac{2\alpha^2}{\left(\frac{1}{\tau_u}\right)^2 + (2\pi f)^2} \left\{ \bar{\lambda} + \frac{\beta}{f} \right\} \quad (14)$$

以上のことから、二重確率平滑化点過程モデルにおいて観測トラヒック全体 $y(t)$ の平均 $\overline{y(t)}$ は各要素パラメタの平均の積になることが分かる。また、パワースペクトル $\phi_y(f)$ はローレンツ型パワースペクトルのカットオフ周波数以下の低周波数領域において $1/f$ スペクトルが上乘せられた形状になり、 β が大きくなると $1/f$ スペクトルが増大し低周波数領域のスペクトルが持ち上げられることになる(図1参照)。このパワースペクトルの構造は実測トラヒックから得られるパワースペクトルに非常に似ていると言える。

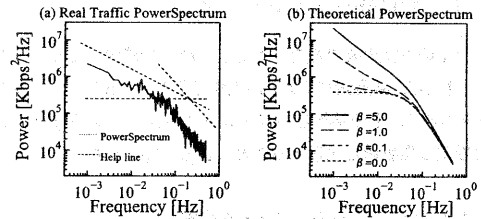


図1 (a) 実測トラヒックのパワースペクトル及び (b) 二重確率平滑化点過程モデルのパワースペクトルと β を変動させた場合の関係 Fig.1 (a) Power spectrum of real traffic and (b) Power spectrum of DSFPFP when β is varied.

2.3 逆問題

前節までは二重確率平滑化点過程モデルによって、観測トラヒック全体 $y(t)$ の統計的性質をトラヒックの発生過程に注目し、それら要素過程パラメタを仮定することで導出した。本節では逆に、観測トラヒック全体の統計的性質から要素過程パラメタ、つまり、事象生起密度 λ や転送トラヒック α 等を推定することを逆問題と名付け、その手法について説明する。

二重確率平滑化点過程モデルにおいては推定すべき要素パラメタが4つなのに対し、本稿では平均 $\overline{y(t)}$ 及びパワースペクトル

ル $\phi_{y(t)}(f)$ の式 (12)(14) しか導出されていない。そこでまず、パワースペクトルの式 (14) を式 (15) のように変形する。

$$P(f) = \frac{2\alpha^2}{\left(\frac{1}{\tau_u}\right)^2 + (2\pi f)^2} \left\{ \bar{\lambda} + \frac{\beta}{f} \right\} \\ = \frac{2(A+B/f)}{C^2 + (2\pi f)^2} \quad (15)$$

このとき何らかの手段で実測トラヒックのパワースペクトルから係数 A, B, C (式 (16)) を求めることができるならば、平均 (式 (12)) を組み合わせることによって各要素パラメタを推定することが可能である。

ここで A, B, C は各々次のように書ける。

$$\begin{cases} A = \alpha^2 \bar{\lambda} \\ B = \alpha^2 \beta \\ C = \frac{1}{\tau_u} \end{cases} \quad (16)$$

本論文では、Marquardt 法を用いた非線形最小二乗法によりパワースペクトルの各係数 A, B, C を求めた。

以上より、パワースペクトル $\phi_{y(t)}(f)$ の各係数の式 (16) と平均 $\bar{y}(t)$ の式 (12) から各要素パラメタ、つまり、平均転送トラヒック α 、平均持続時間 τ_u 、事象生起密度過程 $\lambda(t)$ の平均 $\bar{\lambda}$ 、及び $\lambda(t)$ の変動パラメタ β は以下のように推定できる。

$$\begin{cases} \alpha = \frac{A}{\bar{y}(t)C} \\ \tau_u = \frac{1}{C} \\ \bar{\lambda} = \frac{(\bar{y}(t)C)^2}{A} \\ \beta = \frac{B}{(\bar{y}(t)C)^2} \end{cases} \quad (17)$$

3. 計算機シミュレーション

以上の方法の妥当性を確かめるために計算機シミュレーションを行った。各要素パラメタが既知であるシミュレーションデータを作成し、その平均とパワースペクトルから各要素パラメタを推定し理論値と比較することによって評価した。

3.1 シミュレーションデータ作成方法

シミュレーションデータは、定常ポアソン生起時刻列に時間尺度変換を施し、仮定した特性を示す事象生起密度過程 $\lambda(t)$ をもつ非定常ポアソン生起時刻列を作成し、それから生じた要素トラヒック波形を重ね合わせた不等間隔データを等間隔にリサンプルすることで生成できる。以下に本稿で使用した具体的なシミュレーションデータ作成アルゴリズムを記す。

1. ポアソン過程に従う通信リクエスト生起時刻列 $\{t_i : i = 1, \dots, N\}$ を作成する。ポアソン過程に従う時刻列のインターバルは事象生起密度を λ とすると平均が $1/\lambda$ であるような指数分布に従うので、指数分布の逆関数 (対数) と $[0, 1]$ の一様乱数 u_i を用いて次のように作成できる。

$$\begin{cases} t_i = t_{i-1} - \frac{1}{\lambda} \log[u_i] \\ t_1 = 0 \end{cases} \quad (18)$$

なお本稿では、事象生起密度が確率過程であるので、 $\lambda = 1$ であるような生起時刻列を作成した後、時間尺度変換を施す必要がある。

(a) 仮定した特性を示す事象生起密度過程 $\lambda(t) (> 0)$ を作成。本稿では $1/f$ スペクトルを有し、その平均が $\bar{\lambda}$ 、分散が σ_λ^2 であるものを作成した。

(b) 作成した事象生起密度過程 $\lambda(t)$ を積分し、強度関数 $\Lambda(t) = \int \lambda(\sigma) d\sigma$ を作成。

(c) 上記で求めた強度関数 $\Lambda(t)$ を用いて定常ポアソン時刻列から時間尺度変換を施し、非定常な通信リクエスト生起時刻列 $\{t_i\}$ を生成する。

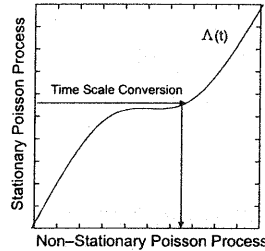


図2 定常時刻列から非定常時刻列への時間尺度変換

Fig. 2 Time Scale Conversion

2. 通信リクエスト生起時刻列 $\{t_i\}$ に対応する転送トラヒックを仮定した条件の α_i をそれぞれ与える。本稿では生起に依らず一定値 α とした。
3. 通信リクエスト生起時刻列 $\{t_i\}$ に対応する要素トラヒックの持続時間 τ_u を算出する。なお本稿では生起に依らず平均 τ_u である指数分布に従うとする。

$$\tau_i = -\tau_u \log[u_i] \quad (19)$$

4. 通信リクエスト生起時刻列 $\{t_i\}$ とそれに対応する持続時間 τ_i 及び生起による転送トラヒック α_i を各々組み合わせて事象時刻列 $\{t'_i\}$ を作成。
5. 4. で作成した事象時刻列 $\{t'_i\}$ から不等間隔トラヒック時系列 $\{x(t)\}$ を作成。なお、データの最初及び最後の部分はトラヒックが平衡状態になっていないのでカットする。
6. 不等間隔トラヒック時系列 $\{x(t)\}$ を所望の時間間隔によりリサンプルし、トラヒック時刻列 $\{y(t)\}$ を得る。

3.2 シミュレーションデータ解析

作成したシミュレーションデータを図 3(a) に、そのパワースペクトル及び提案手法により求めた理論パワースペクトルを図 3(b) に示す。また、表 1 にシミュレーションデータの各要素パラメタ、平均の理論値及び提案手法によって推定された各要素パラメタ、平均を示す。

なお、パワースペクトル推定には高速フーリエ変換を用いた。その際、データの平均を 0 にした後、区分に分割しハミング窓を掛けハーフオーバーラップで加算平均することにより推定した。高速フーリエ変換によるパワースペクトル推定は、区分分割や

エイリアシングを防ぐ為に適切な窓を掛けること等の人為的作業が入ること及びデータの非定常性が強いとそれら人為的作業により安定性が落ちる。本稿ではこれらのことを考慮して、非線形最小二乗法パラメタ推定に用いるパワースペクトルはその窓幅を 256, 512, 1024, 2048, 4096 の点の 7 パターンとしたパワースペクトルに対して行い、その得られた係数から導かれる理論パワースペクトルとを比較し、適合していると思われる推定係数を平均することで最終的に用いる推定係数とした。

図 3 より、シミュレーションデータのパワースペクトルと提案手法により求めた理論パワースペクトルは一致していることが分かる。また、表 1 から、各要素パラメタはほぼ理論値に近い値を示しており、平均トラフィックの値も一致しているといえる。これらの結果から、本提案手法により観測トラフィック全体の要素パラメタの推定が有効であることが示された。

4. 実測データ解析

前章において二重確率平滑化点過程に従うようなシミュレーションデータに対し、本稿で提案した手法について検討を行いその有効性を示した、このようなトラフィックの統計的性質から要素パラメタを推定することは現状ではあまり類をみなく工学的に非常に興味深い。また、推定された要素過程パラメタの統計的性質を用いて様々な応用が考えられ非常に有意義である。

そこで次に、著者らが所属する大学ネットワークで計測された実測トラフィックデータに対して解析を行った例を示す。

4.1 実測データの要素パラメタ推定

解析の対象としたデータは 0.2 秒間隔、約 30 分間の LAN トラフィックであり図 4(a) に示す。このデータに対して前章での解析と同様に、平均及びパワースペクトルを算出し、二重確率平滑化点過程モデルの逆問題によって要素過程パラメタを推定する。実測データのパワースペクトルと理論パワースペクトルを比較したものを図 4(b) に、推定された各要素パラメタを表 2 に示す。

図 4(b) から実測データのパワースペクトルと理論パワースペクトルは良く適合しており、また表 2 より、各ユーザの平均転送トラフィックがほぼ 200[kbps] で平均転送時間が 0.6[sec] であることが分かり、現在のネットワーク利用が WWW コンテンツ閲覧が大部分であることを考えると妥当である。また、全体の通信リクエストは事象発生率から 1 秒間に 62 回程発生することが分かる。

4.2 シミュレーションデータとの統計的性質の比較

前節で推定した要素パラメタを用いて作成したシミュレーションデータを図 5(a) に、そのパワースペクトルと実測データのパワースペクトルを比較したものを図 5(b) に示す。また、平均トラフィックを比較したものを表 3 に示す。

図 5 から、本提案モデルのパワースペクトルと観測トラフィックから直接得られたパワースペクトルとが非常に適合していることから良く推定できていると考えられる。また、表 3 より平均トラフィックもほぼ同じ値を示した。

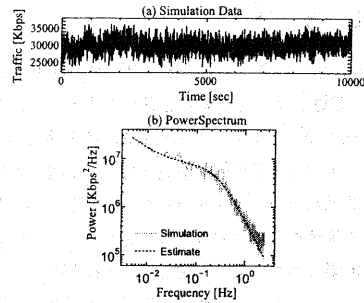


図 3 (a)シミュレーションデータ及び(b)パワースペクトル
Fig. 3 (a)Simulation data and (b)power Spectrum of simulation data

表 1 パラメタの理論値及び推定値

Table 1 Comparison of theoretical value and estimated value

	α	τ_u	λ	β	$y(t)$
Theory	100.00	3.00	100.00	-	30000.00
Simulation	102.33	2.87	101.71	0.28	29934.90

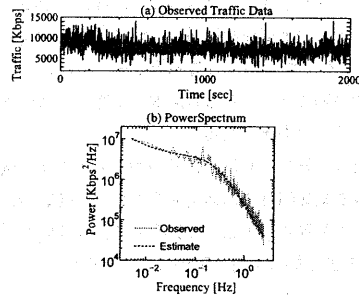


図 4 実測トラフィックデータ及びパワースペクトル
Fig. 4 (a)Observed traffic data and (b) power spectrum of observed data and theory

表 2 実測トラフィックデータから推定された要素パラメタ

Table 2 Estimated parameter of observed traffic data

α	τ_u	λ	β
196.85	0.61	62.72	0.55

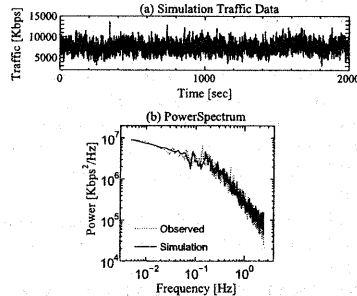


図 5 (a)シミュレーションデータ及び(b)パワースペクトルの比較
Fig. 5 (a)Simulation data and (b)comparison of power spectrum

表 3 平均トラフィックの比較

Table 3 Comparison of average traffic

	$y(t)$ (kbps)
Observed	7529.44
Simulation	7587.24

5. むすび

本稿では、ネットワークトラフィックの発生過程及び構成要素に注目し、観測トラフィック全体を個々の通信リクエストとそれに伴う要素トラフィック波形が重なりあった過程であるとし、通信リクエストが二重確率的な構造をもつ二重確率平滑化点過程による構成的なモデリングを行った。その際、 $1/f$ 特性を有する事象生起密度過程の変動度合はスペクトルにおいて低周波数領域に対し影響を与えるような構造になると言及した。さらに、計算機シミュレーションにより提案モデルが実測トラフィックに近い統計的性質を示すことを確かめ、要素過程との関連付けを具体的にを行うとともに、ネットワークトラフィックの統計的性質から要素過程のパラメータを抽出するというネットワークトラフィックの逆問題というべき新たな有益な手法であることを示した。

本稿での結果は従来のネットワークトラフィックに対する自己相似性の検討など現象的な立場によりその確率構造や相関構造などを記述するのみの手法とは異なり、現象の詳細な原因や構造について明らかにすることに繋がる。本稿で提案したモデルからスペクトルの低周波数領域において $1/f$ 特性を示す要因として、通信リクエストが二重確率的に発生する構造であるような非定常な過程であり、その非定常さが増すにつれその特性が強くなるためだと考えられる。

本稿で言及したモデルは自己相似性を有する長期依存性などのトラフィック変動特性の原因究明やこれらの変動特性が実際のネットワーク品質にどのように影響するかを検討することにより、さらなる進歩的な応用に繋がると考えられる。

文 献

- [1] W.E. Leland, W. Willinger, M.S. Taqqu, and D.V. Wilson, "On the Self-Similar Nature of Ethernet Traffic (Extended Version)," IEEE/ACM Trans. Networking, vol.2, pp.1-15, 1994.
- [2] V. Paxson and S. Floyd, "Wide Area Traffic: The Failure of Poisson Modeling," IEEE/ACM Trans. Networking, vol.3, no.3, pp.226-244, 1995.
- [3] W. Willinger, M.S. Taqqu, W.E. Leland, and D.V. Wilson, "Self-similarity in high-speed packet traffic-analysis and modeling of Ethernet traffic measurements," Statistical Science, vol.10, no.1, pp.67-85, 1995.
- [4] J. Beran, R. Sherman, M.S. Taqqu, and W. Willinger, "Long-range dependence in variable bit rate video traffic," IEEE Trans. commun., vol.43, no.2/3/4, pp.1566-1579, 1995.
- [5] H. Michiel, and K. Laevens, "Teletraffic engineering in a broad-band era," Proc. IEEE, vol.85, no.12, pp.2077-2033, 1997.
- [6] 工藤誠也, 高木英明, 濱田元, 久保田文人, "ATM 網における圧縮動画トラフィックの自己相似性," 電子情報通信学会論文誌, B-I, vol.J81-BI, no.9, pp.549-556, 1998.
- [7] 小沢利久, "長期依存性 / 自己相似性を持つトラフィックモデル," 会誌「システム / 制御 / 情報」, vol.43, no.3, pp.117-122, 1998.
- [8] 工藤誠也, 小林和朝, 高木英明, 濱田元, 久保田文人, "スペクトル解析による MPEG ビデオトラフィックの自己相似性," 電子情報通信学会誌, B, vol.J83-B, no.1, pp.134-137, 2000.
- [9] M. Takayasu, A.Yu. Tretyakov, K. Fukuda, and H.

Takayasu, "Phase Transition and $1/f$ noise in the Internet Packet Transport," Traffic and Granular Flow'97, 1998.

- [10] 竹島由晃, 福田健介, 高安秀樹, 高安美佐子, "コンピュータシミュレーションによる CSMA/CD アクセス方式ネットワークトラフィックの統計物理学的解析," 電子情報通信学会論文誌 B, vol.J84-B, no.8, pp.1494-1504, 2001.
- [11] W. Willinger, M.S. Taqqu, R. Sherman, and D.V. Wilson, "Self-similarity through high-variability: statistical analysis of Ethernet LAN traffic at the source level," in Proceedings of ACM/SIGCOM, pp.100-113, 1995.
- [12] V. Oaxson, "Empirically Derived Analytic Models of Wide-Area TCP Connections," IEEE/ACM Trans. Networking, vol.2, no.4, pp.316-336, 1994.
- [13] 名部正彦, 馬場健一, 村田正幸, 宮原秀夫, "World-Wide-Web におけるユーザトラフィック分析," 信学技報 IN96-74, pp.91-96, 1996.
- [14] 名部正彦, 馬場健一, 村田正幸, 宮原秀夫, "インターネット・アクセスネットワーク設計のための WWW トラフィックの分析とモデル化," 電子情報通信学会論文誌, B-I, vol.J80-B-I, no.6, pp.428-437, 1997.
- [15] 篠秀明, 北澤慶一, 八名和夫, "インターネットアクセスネットワークにおける HTTP 通信リクエスト発生時の非定常解析法," 信学論 (B), vol.J84-B, no.8, pp.1494-1504, 2001.
- [16] K. Claffy, G. Ployzoz, and H.W. Braun, "Traffic Characteristics of the TLNSFNET Backbone," Proc.INFOCOM'93, pp.885-892, 1993.
- [17] 山口昭彦, 八名和夫, 田中具治, "平滑化点過程スペクトル解析とその応用 (1) 方法," 昭和 60 年度電子情報通信学会総大会講演論文集, 7, pp.133, 1985.
- [18] 中谷隆, 八名和夫, 竹内直子, "平滑化点過程スペクトル解析とその応用 (2) 自発性シナプス電位解析への応用," 昭和 60 年度電子情報通信学会総大会講演論文集, 7, pp.134, 1985.
- [19] 武者利光, "バルス列ゆらぎのスペクトル解析," 鈴木良次, 池田研二, 佐藤俊輔, 吉川昭編 「生体信号: 計測と解析の実験」, 第 10 章, pp.212-221, コロナ社, 1989.