

移動通信におけるユーザ密度依存移動モデル

高野 知 佐^{†1} 会 田 雅 樹^{†2} 日 高 裕 敏^{†3}
品 川 準 輝^{†3} 小 林 岳 彦^{†4}

本論文では、セル内の通信中ユーザ数を記述する Population Process を分析し、モバイルマルチメディアネットワークにおける新しいトラフィックモデルを提案する。この Population Process は、ネットワークにおける2つの重要な特徴を反映するものである。第一はデータ通信によって保留時間が長くなるという特徴、第二はユーザの移動速度がセル内のユーザ密度に依存するという特徴である。最初の特徴により、Population Process は自己相似性を持ち、そして、第二の特徴によりユーザの移動速度と Population Process の分散を関連づける。更に、これらの結果を組み合わせることで、モバイルマルチメディアネットワークのトラフィックモデルを提案し、これを用いてネットワーク・パフォーマンスをシミュレーションにより評価する。

Density-Dependent Population Process for Mobile-Multimedia Traffic Modeling

CHISA TAKANO,^{†1} MASAKI AIDA,^{†2} HIROTOSHI HIDAKA,^{†3}
NORITERU SHINAGAWA^{†3} and TAKEHIKO KOBAYASHI^{†4}

This paper investigates the population process of active users in a cell and applies it to a traffic model for mobile multimedia networks. This population process describes two significant characteristics of these networks: the long holding time for data communications, and the density dependence of the users' migration speed. The first characteristic causes a self-similarity in the population process, and the second one shows the relationship between the users' migration speed and the variance of the population process. We propose a traffic model using this population process and evaluate network performance in simulations using the proposed traffic model.

1. はじめに

近年、モバイルとインターネットを融合させた全く新しい市場が生まれ、流通、金融、コンテンツなどあらゆる業種のサービスが提供され始めている。今後のネットワーク技術の発展により高速、高品質にデータを転送できるようになり、音声だけでなく動画などの大容量データをリアルタイムに配信することができ

る。このような新しいマルチメディアサービスの導入は、ネットワークアプリケーションを大きく進化させ、通信トラフィック特性に変化を与えると考えられる。また移動体通信において、電車やタクシーで移動中にインターネットにアクセスしたり、歩きながらメールが受信できる“いつでも、どこでも”といったモバイル環境が望まれており、ユーザの移動特性も通信トラフィックの変化に大きな影響を及ぼすと考えられる。このようなトラフィック特性の変化に対し、ユーザに安定した通信環境を提供するためには、扱うべきトラフィックの特徴、トラフィックパターンを把握しておく必要がある。すでにモバイルやパーソナル音声通信のモデル化は行われているが^{(1)~(3)}、マルチメディア通信とユーザ移動の両方の特性を考慮したモデル化はなされていない。

近年の研究により、LAN や WAN で観測されたトラフィックの到着過程において、自己相似性 (Self-Similarity) や長時間依存性 (Long Range Dependence) と呼ばれる性質をもつことが明らかとな

A part of this paper was presented at IEEE MMT 2000¹²⁾

^{†1} NTT アドバンステクノロジー

NTT Advanced Technology Corporation

^{†2} NTT 情報流通プラットフォーム研究所

NTT Information Platform Labs

^{†3} YRP 移動通信基盤技術研究所

YRP Key Technology Research Laboratories Co., Ltd.

^{†4} 東京電機大学 工学部情報通信工学科 ワイヤレスシステム研究室
Tokyo Denki University Department of Information
and Communication Engineering Wireless Systems
Labs

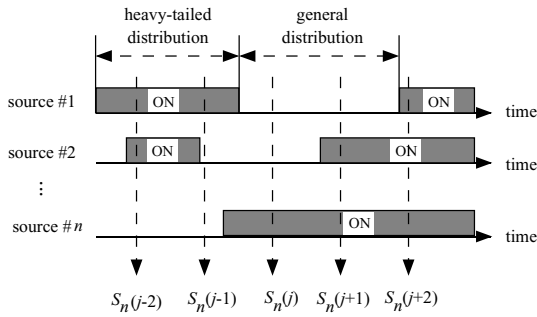


図 1 ON 状態にあるソース数の測定.
Fig. 1 Measurement of the number of sources in the ON state.

り^{4)~6)}、自己相似性をもつトラフィックがネットワークに及ぼす影響についても報告されている^{7),8)}。また宮下, 原により, 階層構造のセルラシステムに関して, トラフィック特性が自己相似性を持つことも明らかとなっている⁹⁾。

本稿では, 通信トラックの特性について, マルチメディア特性とモバイル特性という 2 つの特性を踏まえた考察を行い, 新しいトラフィックモデルを提案する。提案するモデルは, セル内の通信中ユーザ数を記述するものである。

本稿の流れは以下の通りである。2 章では, セル内通信中ユーザ数を記述する確率過程が自己相似性を持つことを確認する。3 章では, ユーザ移動速度とセル内通信中ユーザ数の分散を関係付けるモデルを提案し, その特徴について検討する。4 章では, セル内通信中ユーザ数のモデル化と性能評価を行う。最後に 5 章で全体のまとめを行う。

2. セル内通信中ユーザ数を記述する Population Process

本節では, セル内通信中ユーザ数に着目し, その確率過程が自己相似性を持つことを示す。

2.1 マルチメディア通信における保留時間分布 最初に, 使用する用語の意味を定義する。

- 通信時間: 発呼から通信終了までの時間。
- 保留時間: 一つのセル内で通信中である時間。

近い将来, モバイル通信においてデータトラフィックが支配的になると考えられている。音声通信とは異なり, ファイルの転送やインターネットへのアクセスなどのデータ通信では, 長時間接続が必要となる。ユーザが移動している場合, 発呼してすぐにセルを出るということも考えられ, 全ての呼における保留時間が長いと

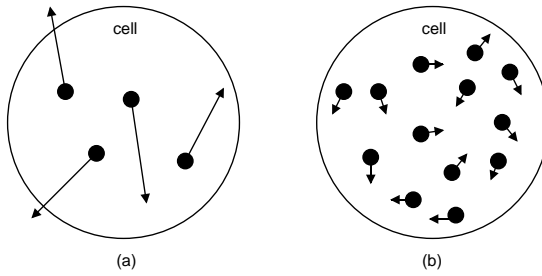


図 2 ユーザ密度と移動速度. (a) ユーザ密度が小さい場合 (b) ユーザ密度が大きい場合.
Fig. 2 User density and migration speed. (a) lower user density (b) higher user density.

は言えない。しかし一つのセル内に留まってデータ通信を行う場合もあり, 保留時間が極端に長くなるという状況も考えられる。この場合, 通信時間が長い呼の保留時間分布は, セル内の滞在時間分布によって特徴付けられる。簡単に, 長さ c の 1 次元セルを考え, ユーザの移動速度を V とおく。ユーザの滞在時間を T とすると, 移動速度の確率密度分布 $p(\nu)$ は以下のようになる。

$$p(\nu) d\nu := \Pr\{\nu < V \leq \nu + d\nu\} \quad (1)$$

また $T = c/V$ という関係から, 滞在時間の補分布は以下のように表される。

$$\begin{aligned} \Pr\{T > t\} &= \Pr\{V < c/t\} \\ &= \int_0^{c/t} p(\nu) d\nu \\ &\simeq p(0) \cdot \frac{c}{t} \quad (t \gg 1) \end{aligned} \quad (2)$$

このような考察から, $p(\nu)$ が ν に関して連続でかつ $p(0) > 0$ であるならば, 保留時間分布は heavy-tailed 分布に従うと仮定できる¹⁰⁾。

2.2 Population Process の自己相似性

セル内の通信中ユーザ数の時間変化を調べるのに以下の概念を適用する⁴⁾。

ON 区間, OFF 区間の持続時間がそれぞれ heavy-tailed 分布に従う ON/OFF ソース $\{R(j); j = 1, 2, \dots\}$ を考える。独立な $R(j)$ を n 個重畳したときに, 時刻 j で ON 状態にあるソースの数を $S_n(j)$ とすると, 確率過程 S_n は 2 次の自己相似性を持つ。

ユーザが通信中か否かの状態を, 上記過程の ON 状態と OFF 状態に置き換えれば, 通信中ユーザの Population Process は自己相似性を示すと考えることができる (図 1)。

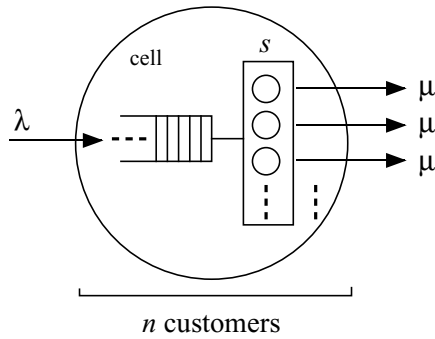


図3 ユーザ密度依存モデル.

Fig.3 User density dependent model.

3. ユーザ移動モデルとセル内のユーザ数

本節では、モバイル通信ネットワークにおいて、ユーザ移動速度の密度依存特性を考慮した移動モデルを示し、ユーザ移動速度とセル内ユーザ数の分散の関係について考察する。

3.1 ユーザ移動モデル

図2は、ユーザがセル内を、密度に依存した移動速度で移動している様子を表している。セル内のユーザ密度が低い場合、ユーザ間での相互作用はなく、固有の移動速度で移動する。しかし一般にユーザ密度が高くなると、各ユーザの移動速度は密度に依存して低下すると考えられる。このような密度依存性をもつ移動モデルを、待ち行列モデルを適用することで実現する。

3.1.1 待ち行列モデルの適用

各々のユーザはユーザ固有の移動速度を持ち、その方向、初期位置がランダムであると仮定する。状態依存待ち行列モデル $M/M/s/\infty$ を、以下のように移動モデルに適用させる(図3)。

- $M/M/s/\infty$ モデルの系内客数, n .
→ セル内のユーザ数 n .
- 生起過程, M .
→ セル内に確率 λ で入ってくる過程.
- 退去過程, M (サービス率は系内客数に依存.)
→ セルから出て行く過程 (退去率はセル内ユーザ数に依存.)
- サーバ数, s .
→ ユーザの閾値, s . (セル内のユーザ数が s よりも小さい場合は、各ユーザの移動速度は一定であるが、 s を超えるとユーザ密度に依存した移動速度となる.)

$M/M/s/\infty$ モデルの系内客数 n がサーバの数 s より

も小さい場合、各サーバのサービスレートは μ 、全サービスレートは $n\mu$ となる。 n が s 以上の場合、 $\varsigma := s-1$ と定義し、ある関数 g を使って、全サービスレートは $g(s, n-\varsigma)\mu$ と表される。

ここでサービスレートの物理的意味について考察する。 $n < s$ の場合、全サービスレートは $n\mu$ であり、各サーバの平均サービスレートは μ となる。これは移動モデルで言えばユーザ間に依存性はなく、ユーザが固有の速度で移動していることを意味する。一方 $n \geq s$ の場合、全サービスレートは $g(s, n-\varsigma)\mu$ であり、移動モデルで言い換えれば、ユーザの移動速度がユーザ数に依存して変化するということを意味している。本モデルの例を以下に挙げる。

- $g(s, n-\varsigma) = s$ である時、提案するモデルは通常の $M/M/s/\infty$ モデルとなり、平均サービスレート (平均ユーザ移動速度) は $(s/n)\mu$ に比例して減少する¹⁰⁾。
- $s = 1$ かつ $g(1, n) = 1$ である時、 $M/M/1/\infty$ モデルとなり、この場合の平均サービスレートは $(1/n)\mu$ に比例して減少する。
- $s = \infty$ である時、 $M/M/\infty$ モデルとなり、平均サービスレートは n に依らず一定値 μ となる (密度に依存しないモデル.)

こうして関数 $g(\cdot, \cdot)$ により、様々な移動モデルを表現できる。

3.1.2 ユーザ数の定常確率

待ち行列モデル内のユーザ数を n として、 $r := n-\varsigma$ と定義すれば、全サービスレートは以下で与えられる。

$$(\text{total service rate}) = \begin{cases} n\mu & (n < s) \\ g(s, r)\mu & (s \leq n) \end{cases} \quad (3)$$

ただし、 $g(s, 1) = s$ 。

この式から、モデルの状態遷移図は図4で表される。モデル内のユーザ数が n である場合、定常確率を $P(n)$ とおくと、 $P(n)$ は次のように表される。

$$P(n) = \begin{cases} \frac{a^n}{n!} P(0) & (0 \leq n \leq \varsigma) \\ \frac{a^r}{\prod_{h=0}^r g(s, h)} \frac{a^\varsigma}{\varsigma!} P(0) & (n > \varsigma) \end{cases} \quad (4)$$

ただし $a := \lambda/\mu$ かつ $g(s, 0) \equiv 1$ 。

これに規格化条件を加えると、 $P(0)$ は次のように求まる。

$$P(0)^{-1} = \sum_{n=0}^{\varsigma-1} \frac{a^n}{n!} + \frac{a^\varsigma}{\varsigma!} \sum_{r=0}^{\infty} \frac{a^r}{\prod_{h=0}^r g(s, h)} \quad (5)$$

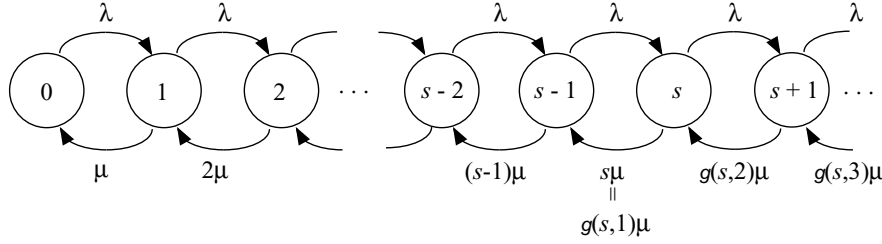


図 4 密度依存型 $M/M/s/\infty$ モデルの状態遷移図.

Fig. 4 State transition diagram for density-dependent $M/M/s/\infty$ model.

上記のモデルを解析するにあたり, $P(0)$, 特に式 (5) の右辺第 2 項について評価する必要がある.

3.1.3 超幾何関数と移動モデル

式 (5) の右辺第 2 項の一部を以下のように定義する.

$$u := \sum_{r=0}^{\infty} \frac{a^r}{\prod_{h=0}^r g(s, h)} \quad (6)$$

関数 g の形を適当に限定することで, 関数 u は超幾何関数として表現できる. たとえば $h = 1, 2, \dots, r$ に対し, 関数 g を

$$g(s, h) = \kappa \frac{(\gamma + h - 1) h}{(\alpha + h - 1) (\beta + h - 1)} s \quad (7)$$

(ただし $\alpha, \beta, \gamma \geq 0$, κ は $g(s, 1) = s$ とする規格化定数) とおけば関数 u は以下ようになる.

$$u = \frac{\Gamma(\gamma)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \sum_{r=0}^{\infty} \frac{\Gamma(\alpha+r)\Gamma(\beta+r)}{\Gamma(\gamma+r)} \frac{(\rho/\kappa)^r}{r!} \quad (8)$$

ただし $\rho = a/s$.

これは Gauss 型超幾何関数と呼ばれ, 以下の超幾何微分方程式を満たすことが分かっている.

$$z(1-z) \frac{d^2 u}{dz^2} + [\gamma - (\alpha + \beta + 1)z] \frac{du}{dz} - \alpha \beta u = 0 \quad (9)$$

ただし, $z := \rho/\kappa$.

一方,

$$g(s, h) = \kappa \frac{(\gamma + h - 1) h}{\alpha + h - 1} s \quad (10)$$

(ただし $\alpha, \gamma \geq 0$, κ は $g(s, 1) = s$ とする規格化定数) とおくと, 関数 u は,

$$u = \frac{\Gamma(\gamma)}{\Gamma(\alpha)} \sum_{r=0}^{\infty} \frac{\Gamma(\alpha+r)}{\Gamma(\gamma+r)} \frac{(\rho/\kappa)^r}{r!} \quad (11)$$

で与えられる. これは Kummer 型超幾何関数であり, 以下の超幾何微分方程式を満たす.

$$z \frac{d^2 u}{dz^2} + (\gamma - z) \frac{du}{dz} - \alpha u = 0 \quad (12)$$

ただし, $z := \rho/\kappa$.

図 5(a),(b) はユーザ数 n とサービスレートの関係を示したものである. $M/M/s/\infty$ モデルを含む Gauss 型モデルにおける全サービスレートは, $n \gg 1$ に対して $(\kappa s \mu)$ という一定値に近づく. 一方, $M/M/\infty$ を含む Kummer 型モデルは, 全サービスレートが $(\kappa n \mu)$ に近づくモデルとなる. つまり Gauss 型モデルは有限サーバモデル, Kummer 型モデルは無限サーバモデルに位置付けられる.

3.1.4 セル内ユーザ数の 2 次モーメント

単純に $s = 1$ とした場合, モデル内のユーザ数の 1 次モーメント M_1 は以下ようになる.

$$\begin{aligned} M_1 &= \sum_{n=0}^{\infty} n P(n) \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} n \frac{a^n}{\prod_{h=0}^n g(1, h)} P(0) \\ &= P(0) a \frac{d}{da} \sum_{r=0}^{\infty} \frac{a^r}{\prod_{h=0}^r g(1, h)} \\ &= P(0) z \frac{d}{dz} \sum_{r=0}^{\infty} \frac{z^r}{\prod_{h=0}^r g^*(1, h)} \quad (13) \end{aligned}$$

ただし, $h \neq 0$ に対して $g^*(1, h) = g(1, h)/\kappa$, $g^*(1, 0) = 1$, $z = a/\kappa$.

同様に 2 次モーメント M_2 を求めると以下で与えられる.

$$M_2 = P(0) z \frac{d}{dz} z \frac{d}{dz} \sum_{r=0}^{\infty} \frac{z^r}{\prod_{h=0}^r g^*(1, h)} \quad (14)$$

もし式 (6) の u が初等関数で記述できるならば, セル内ユーザ数の平均および分散は簡単に求まる. 一般に記述できない場合でも, 超幾何微分方程式 (9),(12) により平均と分散の関係を導くことができる.

$$M_1 = \frac{1}{u} z \frac{d}{dz} u, \quad M_2 = \frac{1}{u} z \frac{d}{dz} z \frac{d}{dz} u \quad (15)$$

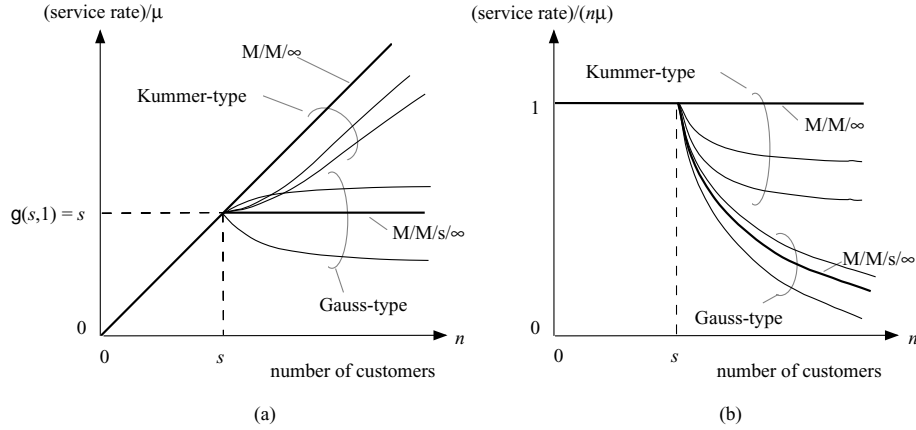


図5 ユーザ数 n に対するサービスレートの振舞い. (a) 全サービスレート (b) ユーザー一人当たりのサービスレート.

Fig. 5 Behaviors of service rate with respect to the number of customers n . (a) total service rate and (b) service rate for a customer.

が成り立つので, 式 (9) および (12) により Gauss 型, Kummer 型モデルの 2 次モーメントはそれぞれ,

$$M_2 = \frac{(1-\gamma) + (\alpha+\beta)z}{1-z} M_1 + \frac{z}{1-z} \alpha\beta \quad (16)$$

$$M_2 = \{(1-\gamma) + z\} M_1 + \alpha z \quad (17)$$

となる. ここで分散は $v = M_2 - M_1^2$ で与えられる.

3.2 ユーザ移動モデル

本章では, セル内における閾値 s の物理的意味を調べ, ユーザの移動速度 V とセル内ユーザ数の分散 v を関係付ける. 前章でも述べたように Gauss 型および Kummer 型モデルの s と v の関係は, Gauss 型/Kummer 型超幾何微分方程式から求まる. \bar{V} をユーザ密度が小さい時の平均移動速度であるとす. 分散 v とユーザ移動速度 \bar{V} の関係を調べるためには, s と \bar{V} の関係を規定する必要がある. そこで長さ c の 1 次元セルを考え, s は \bar{V} , m に反比例するものとする.

$$s = \frac{c}{m\bar{V}} \quad (18)$$

ここで m/c はセルのユーザ密度を表し, 本例は高速道路を走る車をイメージしたものとなる. 通常の $M/M/s/\infty$ モデルにおけるサービスレートは以下で与えられる.

$$(\text{total service rate}) = \begin{cases} n\mu & (n < s) \\ s\mu & (n \geq s) \end{cases} \quad (19)$$

同様に Gauss 型モデルにおいては,

$$(\text{total service rate}) = \begin{cases} n\mu & (n < s) \\ \frac{r}{2r-1} s\mu & (n \geq s) \end{cases} \quad (20)$$

ただし n はセル内のユーザ数であり, $r = n - s + 1$ を満たす. 図 6 は通常の $M/M/s/\infty$ モデルと, Gauss 型モデルの場合の s と v の関係を示したものである. ただしセル内の平均ユーザ数 m は 20 とした. 通常の $M/M/s/\infty$ モデルの場合, 分散 v は s の増加に対して単調に減少しているが, Gauss 型モデルでは異なる性質を示す. s が十分に大きい場合, v は通常の $M/M/s/\infty$ モデルと同じ振舞いをする. 図 7 は, 図 6 と同じ通常の $M/M/s/\infty$ モデルと Gauss 型モデルについて平均移動速度 \bar{V} と分散 v の関係を表したものである. これは, 図 6 と同様に Gauss 型モデルにおいてピークをもつ特異な振舞いが見られる.

4. トラヒックモデルとシミュレーション結果

前節では, ユーザ密度依存移動モデルを待ち行列モ

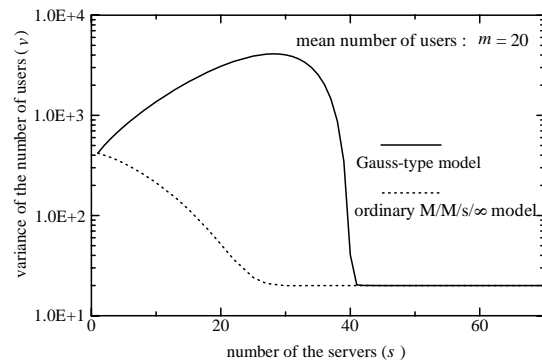


図6 通常の $M/M/s/\infty$ モデルと Gauss 型モデルにおけるサーバ数 s と分散 v の関係.
Fig. 6 Relationship between the number of servers s and the variance v for the ordinary $M/M/s/\infty$ and the Gauss-type models.

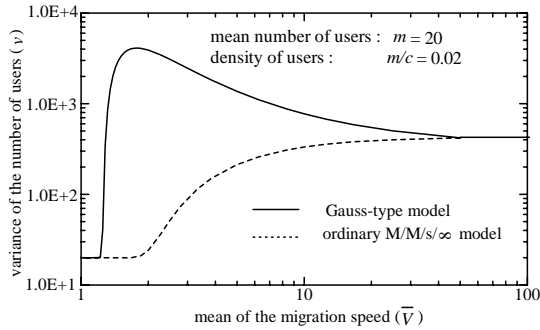


図 7 通常の $M/M/s/\infty$ モデルと Gauss 型モデルにおける平均移動速度 \bar{V} と分散 v の関係。

Fig. 7 Relationship between the mean migration speed \bar{V} and the variance v for the ordinary $M/M/s/\infty$ and the Gauss-type model.

デルに置き換え，その特性について述べた．本節では，モバイルマルチメディアネットワーク特性を調べるため，セル内通信中ユーザ数を記述する Population Process として，拡散モデルを示す．またこのモデルを用いてモバイルマルチメディアネットワークの性能評価をシミュレーションにより行う．トラヒックモデルは，2.2 章で論じた自己相似性と 3.2 章で述べた移動特性を考慮したモデルである．

4.1 セル内通信中ユーザ数の拡散モデル

時刻 t ($t = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$) における通信中ユーザ数を示す拡散モデルを以下のように定義する．

$$N(t) = m + \sqrt{\alpha m} X_H(t) \quad (21)$$

ただし m は平均ユーザ数， α は分散係数， $X_H(t)$ は Fractional Gaussian Noise (FGN) である．式 (21) であらわされる拡散モデルは，Norros により提案されているモデルである⁷⁾．

2.2 章の考察から，Hurst Parameter H が $H > 0.5$ となる $X_H(t)$ を選ぶことにし， α は 3.2 章で述べたように，ユーザの移動速度より決定される分散 v を用いて決める．

4.2 シミュレーション

提案するモデルを呼損状態持続時間分布を指標として評価する．ただし呼損状態とは，セルにおける通信チャネル数を C としたときに， $N(t) > C$ となる状態とする．また Paxson の研究¹¹⁾ で示されているアルゴリズムを利用して，式 (21) における $X_H(t)$ を発生させた．

図 8，図 9 はそれぞれ， $H = 0.5, 0.7, 0.9$ と変化した場合の，通常の $M/M/s/\infty$ モデルと Gauss 型

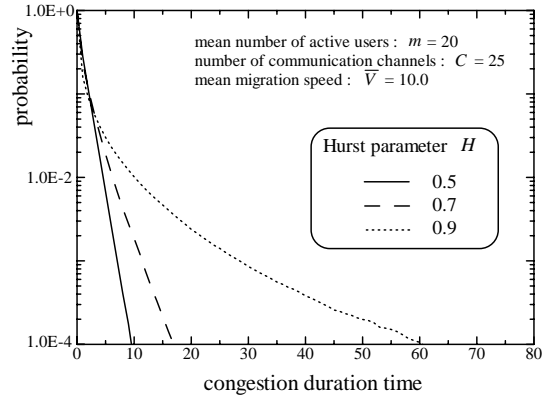


図 8 通常の $M/M/s/\infty$ モデルにおける Hurst Parameter H に対する呼損状態持続時間分布。

Fig. 8 Congestion duration distributions for different Hurst parameters H in the ordinary $M/M/s/\infty$ model.

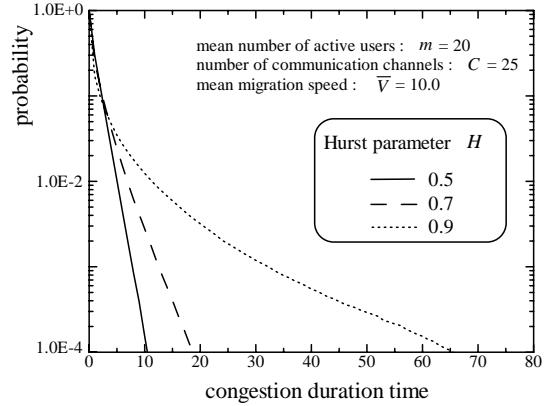


図 9 Gauss 型モデルにおける Hurst Parameter H に対する呼損状態持続時間分布。

Fig. 9 Congestion duration distributions for different Hurst parameters H in the Gauss-type model.

モデルにおける呼損状態持続時間の補分布を示している．ただし平均ユーザ数を $m = 20$ ，通信チャネル数 $C = 25$ ，平均ユーザ移動速度を $\bar{V} = 10.0$ としている．これらの結果から，通常の $M/M/s/\infty$ モデルと Gauss 型モデルのどちらの場合も， H が大きい，つまり自己相似性の強いときに最も分布の裾が重いことが分かる．

また通常の $M/M/s/\infty$ モデルと Gauss 型モデルにおいて，移動速度を $\bar{V} = 1, 1.8, 10, 100$ と変化した場合，図 10，図 11 のような結果となる．ただし平均ユーザ数を $m = 20$ ，通信チャネル数 $C = 25$ ，Hurst Parameter $H = 0.7$ としている．通常の $M/M/s/\infty$ モデルの場合は，移動速度が大きくなるにつれて分布の裾が長くなる．それに対し Gauss 型モデルは， $\bar{V} = 1.8$ と中間値の時に最も裾が重くなっており，こ

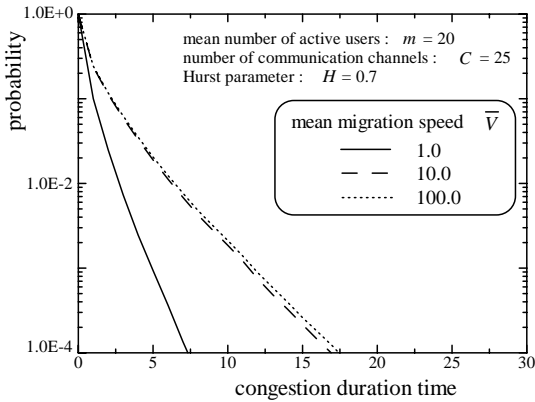


図 10 通常の $M/M/s/\infty$ モデルにおける平均ユーザ移動速度 \bar{V} に対する呼損状態持続時間分布.

Fig. 10 Congestion duration distributions for different mean migration speeds \bar{V} in the ordinary $M/M/s/\infty$ model.

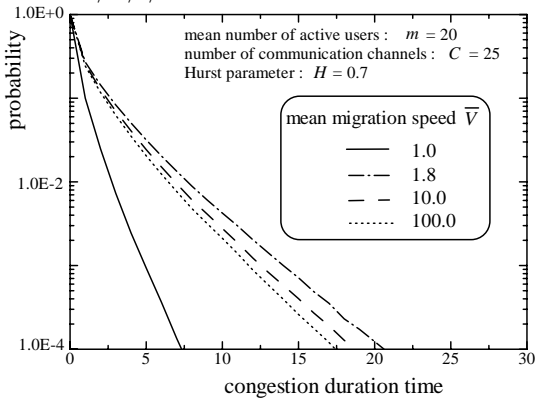


図 11 Gauss 型モデルにおける平均ユーザ移動速度 \bar{V} に対する呼損状態持続時間分布.

Fig. 11 Congestion duration distributions for different mean migration speeds \bar{V} in the Gauss-type model.

これは前節示したように、ある速度 \bar{V} で分散 v がピークを持つ振舞いが原因であると考えられる。呼損持続時間が長くなると、再呼が再呼を引き起こし輻輳はさらにひどくなる。以上の評価結果は、マルチメディアとモバイルという 2 つの特徴を反映したものであり、提案するモデルは輻輳回避のためのネットワーク構築に重要な役割を果たすと考えられる。

5. おわりに

本稿では、モバイルマルチメディア通信において重要な 2 つの特徴（マルチメディア特性とモバイル特性）を考慮して、セル内の通信中ユーザ数の挙動について分析し、新しいトラフィックモデルを提案した。まず最初にデータ通信のような保留時間の長い通信サービスにより、通信中ユーザ数の時系列が自己相似性を

持つ可能性があることを示した。次に待ち行列モデル、超幾何関数を用いて、ユーザ移動速度とセル内通信中ユーザ数の分散を関連付ける新しい移動モデルを考案し、その特性について分析した。その結果、Gauss 型モデルは通常の $M/M/s/\infty$ モデルとは異なり、ユーザの平均移動速度に対して分散が特異な挙動を示すことが分かった。また FGN を用いてセル内通信中ユーザ数の拡散モデルを作り、呼損状態持続時間分布の Hurst Parameter 依存性、ユーザ速度依存性を評価した。Gauss 型モデルでは、分散の特異な振舞いを反映して、ある有限な速度で呼損状態持続時間分布が最悪となることが分かった。

今後の課題として、Gauss 型モデルが示す分散の特異な振舞いをさらに詳しく調べ、ユーザ移動特性とシステム設計の間の新たな枠組みを構築するつもりである。

参考文献

- 1) K.K. Leung, W.A. Massey, and W. Whitt: Traffic models for wireless communication networks, *IEEE J. Select. Areas Commun.*, Vol.12, pp. 1353–1364, Aug. (1994).
- 2) A. Bar-Noy, and I. Kessler: Mobile users: To update or not to update? in *Proc. IEEE INFOCOM'94*, pp. 570–576, June (1994).
- 3) D. Lam, D.C. Cox, and J. Widom: Teletraffic modeling for personal communications services, *IEEE Commun. Mag.*, pp. 79–87, Feb. (1997).
- 4) W.E. Leland, M.S. Taqqu, W. Willinger, and D.V. Wilson: On the self-similar nature of Ethernet traffic (extended version), *IEEE/ACM Trans. Networking*, Vol. 2, pp. 1–15, (1994).
- 5) 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, pp. 67–85, (1995).
- 6) V. Paxson, and S. Floyd: Wide-area traffic-The failure of Poisson modeling, *IEEE/ACM Trans. Networking*, Vol. 3, pp. 226–244, (1995).
- 7) I. Norros: A storage model with self-similar input, *Queueing Systems*, Vol. 16, pp. 387–396, (1994).
- 8) N.G. Duffield and N. O'Connell: Large deviations and overflow probabilities for the general single-server queue, *Math. Proc. Camb. Phil. Soc.*, Vol. 118, pp. 363–374, (1995).
- 9) M. Miyashita and S. Hara: On the self-similar nature of cellular system traffic, *IEICE Tech. Rep.*, SST99-40, (1999).
- 10) S. Shinomiya, M. Aida, K. Saitoh, N. Shina-

- gawa, and T. Kobayashi: Diffusion model for multimedia and mobile traffic based on population process for active users in a cell, *IEICE Trans. Commun.*, Vol. E83-B, pp. 1827–1833, (2000).
- 11) V. Paxson: Fast approximation of self-similar network traffic, *Tech. Rep. of Lawrence Berkeley Lab.*, LBL-36750, (1995).
 - 12) M. Aida, S. Shinomiya, C. Takano, H. Hidaka, N. Shinagawa, and T. Kobayashi: Diffusion model for mobile multimedia traffic based on population process, *Multiaccess, Mobility and Teletraffic in Wireless Communications*, Vol. 5, pp. 267–278, Kluwer Academic Pub., (2000).