

# 一次元セルラーネットワークの通信性能に関する 移動体の速度分布の影響について

井上 通宏<sup>†</sup> 吉浦 紀晃<sup>†</sup> 小野里 好邦<sup>††</sup>

本論文では、幹線道路や高速道路のような一次元セルラーネットワークにおいて移動体の速度分布の型や最低速度と最高速度の速度差の違いが通信性能に与える影響について調べるために、計算機シミュレーションにより実験を行った。この実験より、低速度の移動体が高速度の移動体に比べて多く存在する速度分布では、低速度の移動体が高速度の移動体に比べて少ない速度分布と比較して、呼損率が最大で約 20% 高くなり、完了呼の平均保留時間は約 16% 長くなった。また、ネットワークへの負荷が高く速度差が大きい場合、速度分布の型の違いは、呼損率と完了呼の平均保留時間に影響を与えること、そして、速度差や速度分布の違いは、完了呼数に対しては影響をほとんど与えないことという結果が得られた。これらのシミュレーション結果の考察から、高速度の移動体よりも低速度の移動体が、呼損率や完了呼の平均保留時間などの通信性能に影響を及ぼすことが考えられる。

## Performance Evaluation on One-dimensional Cellular Networks under Several Kinds of Speed Distributions

MICHIHIRO INOUE,<sup>†</sup> NORIAKI YOSHIURA<sup>†</sup> and YOSHIKUNI ONOZATO<sup>††</sup>

In this paper, we use simulation method to evaluate how the mobile node's speed distribution difference or difference between maximum and minimum speeds influences the communication performance of one-dimensional mobile cellular networks such as arterial roads or speedways. Our simulation results show that the speed distribution which has the much more low speed mobile users than the high speed mobile users has maximally 20% higher blocking probability and 16% longer mean holding time of completed calls compared to the other speed distribution which has the much more high speed mobile users than the low speed mobile users. In the heavy traffic situation, distribution difference has influences on blocking probability and mean holding time of completed calls. The number of completed call does not vary whatever speed distribution or the difference between maximum and minimum speeds is. By considering our simulation results, we can mention that the number of low speed mobile users has much influences on the the blocking probability and the mean holding time of completed calls.

### 1. はじめに

移動体通信ネットワーク上を移動する移動体（ユーザ）の動きは、位置登録や検索、ページングの実施に際して重要な要素となる。また、移動しながら通信を行うセルラーネットワークにおいては、移動体の動きを正確に把握することは無線資源の利用やネットワーク設計をするうえで不可欠であり、移動体の動きが通信性能に与える影響を調べることは重要と考えられる。

これまでに、一次元セルラーネットワークにおける移動体の動きを考慮した通信性能に関する研究が行わ

れている<sup>1)</sup>。参考文献 1) では、移動体の移動速度を一定速度と仮定して、セルラーネットワーク内の移動通信トラフィック特性について、特に、セル間ハンドオーバー確率、およびセル内での呼の平均保留時間に着目し、近似解析手法を提案し、近似手法とシミュレーションを比較している。両手法により呼損率を求め、両者は加わる呼が 1 セルあたり 5 ~ 15 アーランのとき、ほぼ一致していることを示した。参考文献 2) では、リング状のサービスエリアを持つセルラーネットワークにおける通信トラフィックの時間依存特性を移動体の密度変化を用いて表現し、シミュレーションにより呼損率と通信負荷を求めている。さらに、移動体の移動速度分布として一様分布を仮定した研究が行われている<sup>3),4)</sup>。たとえば、アドホック無線ネットワークのシミュレーションなどで、よく使われるランダムウェイポイント

<sup>†</sup> 群馬大学総合情報処理センター  
Computer Center, Gunma University

<sup>††</sup> 群馬大学工学部情報工学科  
Department of Computer Science, Gunma University

(Random Waypoint) モデル<sup>4),5)</sup>では、移動体の移動速度を一様分布で与える。そのとき、移動体の速度分布を 0 からある速度  $V$  までの一様分布として、ランダムウェイポイントモデルによるシミュレーションを行った場合、移動体の実際の平均速度が  $\frac{V}{2}$  より小さくなり、シミュレーションを行う時間の経過とともに、平均速度が 0 に近づくという問題が指摘された。また、ランダムウェイポイントモデルでは、移動体の速度分布をあらかじめ与え、移動体がセル間をまたいで同一の速度で移動するようなシミュレーションには向いていない。

従来、無線セルラーネットワークにおいては、呼の完了時間分布を仮定し、その分布が満たす特性については解析的に求められた<sup>6)</sup>。しかし、無線セルラーネットワークのモデルと移動体の速度分布が与えられたときに、その完了呼数やその平均保留時間などを解析的に求めることは、セルをまたいでその呼が完了しているかどうかに着目する必要があり、難しいと考えられる。

そこで、本論文では、移動体の速度分布の違いや最高速度と最低速度の速度差の違いによる通信性能への影響を、ランダムウェイポイントモデルとは別の方法によるシミュレーション手法により求める。具体的には、一次元セルラーネットワーク上で、移動体は一方のみへ移動するモデルを構築し、移動体の速度分布の型の違いが呼の完了呼数、完了呼の平均保留時間、呼損率の通信性能へ与える影響について考察する。

一次元セルラーネットワークは、高速道路や幹線道路などに沿って構築することが可能である。ゆえに、1次元における基本的な移動体の移動特性が通信性能に与える影響を調べることは重要であり、また、高速道路などでの移動体の速度分布が一様分布であるとは考えにくく、時間や場所などによって様々な速度分布が生じると考えられる。ゆえに、様々な状況でも通信性能を検討するためにも多くの速度分布における一次元セルラーネットワークの特性を調べることは重要であると考えられる。このように、多くの速度分布を利用してシミュレーションを行うことが望ましいと考えられるが、すべての速度分布によるシミュレーションは不可能である。そこで本論文では、移動体の速度分布としてシミュレーションによく用いられる一様分布、平均速度から低速と高速の移動体が同数存在するような速度分布である正規分布、高速な移動体が多い速度分布である Truncated 指数分布、低速な移動体が多い速度分布である Reverse Truncated 指数分布の特徴的な 4 つの分布を利用してシミュレーションを行う。

また、速度分布の違いに加えて、最高速度と最低速度の速度差が通信性能に与える影響についてシミュレーションを行って評価する。

これまでのセルラーネットワークにおけるシミュレーションの研究では、移動体の速度分布は一様分布を用いたものがほとんどであった。本論文では、速度分布の違いや最高速度と最低速度の速度差の違いが通信性能にどのような影響を与えるかを調べることを目的としており、一様分布以外に、3 つの速度分布を利用してシミュレーションによる評価を行う点が、新しい点であるといえる。また、セル滞在時間を様々な確率分布で与え、セルラーネットワークのシミュレーションを行った研究もあるが<sup>8)</sup>、ハンドオーバーやチャネルの利用時間に関する評価を行っているが、完了呼についての評価は行っていない。

以下、2章でシミュレーションモデルについて説明し、3章にシミュレーション結果を示す。4章でシミュレーション結果のグラフについて考察する。5章で本論文の結論を述べる。

## 2. シミュレーションモデル

一次元セルラーネットワークのシミュレーションモデルとして、リング状のセルラーシステムを利用する。 $N$  個のセルをリング状に接続することによって、セルが直線上に無限に続く一次元セルラーネットワークを想定する。また、リング状のセルラーネットワークを構成する 1 つのセルの長さを  $L$  とし、各セルには  $M$  個のチャネルが用意されている。

通信を要求する移動体は、新規呼としてポアソン分布に従って到着すると仮定する。また新規呼は、リング状セルを構成する  $N$  個のセルの中からランダムにセルを 1 つ選び、そのセルの左端のセル境界線から距離  $X$  ( $0 \leq X < L$ ) の点をランダムに選んで初期位置とする。同時に、ある速度分布に従う移動速度  $V$  と指数分布に従う保留時間  $H$  をランダムに選ぶ。

到着した新規呼は、空きチャネルがない場合は通信ができない。もし空きチャネルがある場合はチャネルが 1 つ割り当てられて通信を開始する。このとき同時に移動速度  $V$  で、初期位置から右へ向かって一方に移動する。

移動体が隣接する右隣のセルとのセル境界線へ到着すると、移動体は隣接セルの基地局に通信中の呼の受け渡し(ハンドオーバー)要求を出す。このとき、隣接する右隣のセルに空きチャネルがない場合、通信中の移動体の呼は呼損となって強制的に通信を終える。隣接する右隣のセルに空きチャネルがある場合は、

表 1 シミュレーション条件  
Table 1 Simulation conditions.

セル構成数: $N$	30 セル
チャネル数: $M$	32 チャネル
セル長: $L$	600 m
セル内の位置: $X$	$0 \text{ m} \leq X < 600 \text{ m}$ の一様分布
新規呼の到着分布	ポアソン分布で生起
保留時間分布: $H$	平均 120 秒の指数分布
速度分布: $V$	平均 40 km/h の一様分布 正規分布, Truncated 指数分布 Reverse Truncated 指数分布
シミュレーション時間	10,000 秒

ハンドオーバーが行われて右隣りの新しいセルで移動体は通信を継続する．新しいセルで通信中の移動体の呼は残りの保留時間分の通信を行い終了するか、または次のハンドオーバーが発生するまでそのセルで通信を継続する．

実際のシミュレーションは、表 1 に示すシミュレーション条件で行った<sup>1),3)</sup>．

通信性能の評価パラメータとして、呼損率、完了呼数、完了呼の平均保留時間の 3 つを取り上げる．呼損率は、到着した呼の総数に対する呼損となった呼数の割合を示す．完了呼とは、通信を開始してからあらかじめ与えられた保留時間まで通話を継続した呼であり、その総数を完了呼数とする．完了呼の保留時間の平均を完了呼の平均保留時間とする．

呼損率は、通信性能の評価パラメータとして広く利用されている．本論文では、システムの性能を評価するパラメータとして、移動体の移動がシステムに与える影響を調べることを目的として完了呼数と完了呼の平均保留時間を用いる．完了呼数を用いることにより、速度分布に従って移動する利用者の通信要求をシステムがどの程度処理できるのかを調べる．また、そのときシステムが処理できる利用者の希望する通信時間がどのくらいの時間であるかを、完了呼の平均保留時間を用いて評価する．

セルラーネットワークとしては、呼損率は低い方が、完了呼の平均保留時間は長い方が、完了呼数は多い方が望ましい．しかしながら、これらをすべて満たすということは難しいと思われる．本論文では、システムが移動体の動きにどの程度影響を受けるのかを、呼損率、完了呼数、完了呼の平均保留時間を用いて評価する．

本論文では、従来の研究で用いられてきた移動体の速度分布の一様分布と、一様分布と比較するための正規分布、低速度で移動する移動体の数が高速度で移動する移動体の数より多くなる Truncated 指数分布、平

均速度に対して Truncated 指数分布を左右対称とした分布（ここでは Reverse Truncated 指数分布と呼ぶ）の 4 つの速度分布を取り上げる．Reverse Truncated 指数分布では、高速度で移動する移動体の数が低速度で移動する移動体の数より多くなる．各速度分布の最低速度、最高速度をそれぞれ、 $V_{\min}$ 、 $V_{\max}$  とし、確率密度関数を以下に示す．

(1) 一様分布

$$f_u(v) = \begin{cases} \frac{1}{V_{\max} - V_{\min}} & (V_{\min} \leq v \leq V_{\max}) \\ 0 & (v < V_{\min}, v > V_{\max}) \end{cases}$$

平均速度は、 $(V_{\min} + V_{\max})/2$  となる．

(2) 正規分布

平均速度  $\mu$  を  $(V_{\min} + V_{\max})/2$  とし、 $V_{\min}$  と  $V_{\max}$  の範囲が分布全体の約 99.9999% になるように、標準偏差  $\sigma$  を定める．標準正規分布表から  $\sigma = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{2 \times 5.9}$  となる．

$$f_n(v) = \begin{cases} C_1 \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(v-\mu)^2}{2\sigma^2}} & (V_{\min} \leq v \leq V_{\max}) \\ 0 & (v < V_{\min}, v > V_{\max}) \end{cases}$$

ここで、正規化定数  $C_1 = \frac{100}{99.9999} \approx 1.0$  とする．

(3) Truncated 指数分布

パラメータ  $\lambda$  の指数分布を用いて、Truncated 指数分布を与える．この指数分布の期待値は  $\frac{1}{\lambda}$  であり、これが、 $V_{\max}$  と  $V_{\min}$  の中間になるようにパラメータ  $\lambda$  を定め、 $\frac{2}{V_{\max} + V_{\min}}$  とする．また、 $V_{\min}$  と  $V_{\max}$  の間に確率変数  $v$  が入るように、正規化定数  $C_2$  を定める．

$$f_t(v) = \begin{cases} C_2 \lambda e^{-\lambda v} & (V_{\min} \leq v \leq V_{\max}) \\ 0 & (v < V_{\min}, v > V_{\max}) \end{cases}$$

ここで、 $C_2 = (e^{-\lambda V_{\min}} - e^{-\lambda V_{\max}})^{-1}$  とする．

(4) Reverse Truncated 指数分布

パラメータ  $\lambda$  の指数分布を用いて、Reverse Truncated 指数分布を与える．この指数分布の期待値は  $\frac{1}{\lambda}$  であり、これが、 $V_{\max}$  と  $V_{\min}$  の中間になるようにパラメータ  $\lambda$  を定め、 $\frac{2}{V_{\max} + V_{\min}}$  とする．また、 $V_{\min}$  と  $V_{\max}$  の範囲に確率変数  $v$  が入るように正規化定数  $C_3$  を

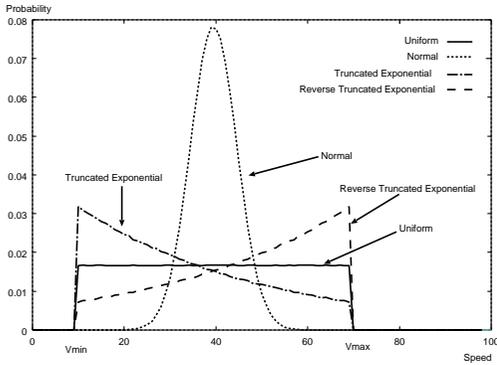


図 1 確率分布  
Fig. 1 Probability distribution.

定める。

$$f_r(v) = \begin{cases} C_3(1 - \lambda e^{-\lambda v}) & (V_{\min} \leq v \leq V_{\max}) \\ 0 & (v < V_{\min}, v > V_{\max}) \end{cases}$$

ここで、 $C_3 = (V_{\max} - V_{\min} + e^{-\lambda V_{\max}} - e^{-\lambda V_{\min}})^{-1}$  とする。

各確率分布のグラフを図 1 に示す。

3. シミュレーション結果

表 1 に示す条件の下で、最高速度と最低速度が、70 km/h と 10 km/h、60 km/h と 20 km/h、50 km/h と 30 km/h、45 km/h と 35 km/h の 4 つの場合、そして、速度分布が一樣分布、正規分布、Truncated 指数分布、Reverse Truncated 指数分布それぞれの場合のシミュレーションを行った。これにより得られた呼損率、完了呼数、完了呼の平均保留時間のグラフを示しつつ、その傾向を説明する。

3.1 各速度分布における速度差の影響について

ここでは、各速度分布における最高速度と最低速度の差の違いが与える影響を考察するため、呼損率、完了呼の平均保留時間、完了呼数のグラフと、最高速度と最低速度が 45 km/h と 35 km/h の場合を基準として、各速度差の違いを割合で示したグラフを示す。

図 2、図 3、図 4、図 5 のグラフは、各速度分布における、最高速度と最低速度の違う場合の呼損率のグラフと、速度差が 10 km/h の場合を 1 とした場合の各速度差における違いを示すグラフである。呼損率は、新規呼のものとハンドオーバー呼のものに分けてグラフ

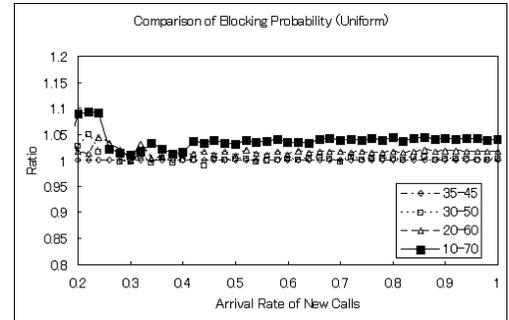
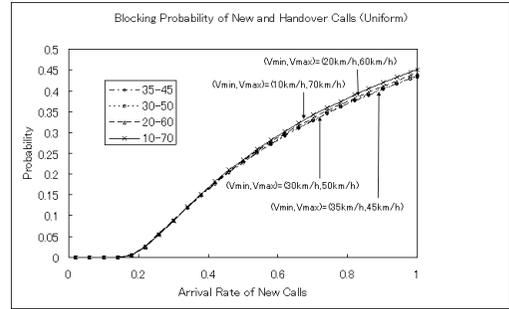


図 2 呼損率（一樣分布）  
Fig. 2 Blocking rate of new and handover calls (Uniform distribution).

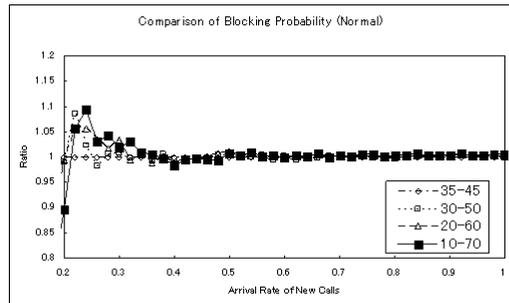
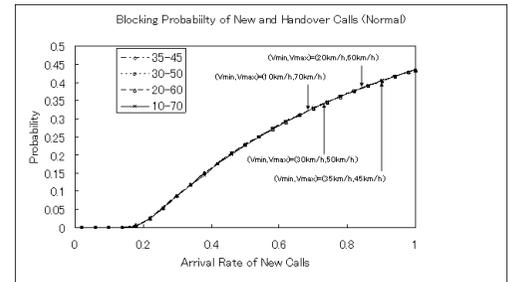


図 3 呼損率（正規分布）  
Fig. 3 Blocking rate of new and handover calls (Normal distribution).

本論文では、単に呼損率といった場合には、新規呼とハンドオーバー呼をあわせた呼に対する呼損率のことを指す。

を示す場合もあるが、本論文では、チャンネル割当てにおいて新規呼とハンドオーバー呼を区別して行っていないこと、また、シミュレーション結果の新規呼の呼損率とハンドオーバー呼の呼損率がほとんど変わらなかった

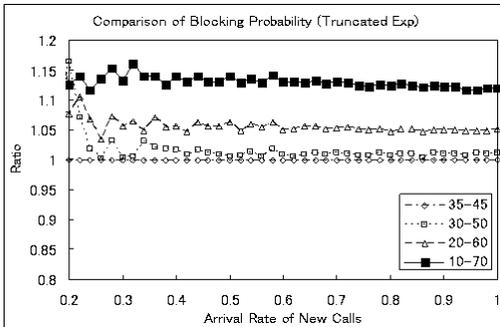
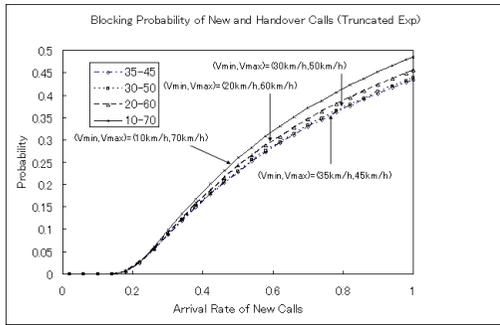


図 4 呼損率 (Truncated 指数分布)  
Fig. 4 Blocking rate of new and handover calls (Truncated exponential distribution).

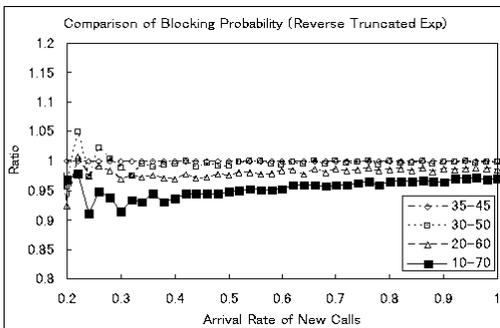
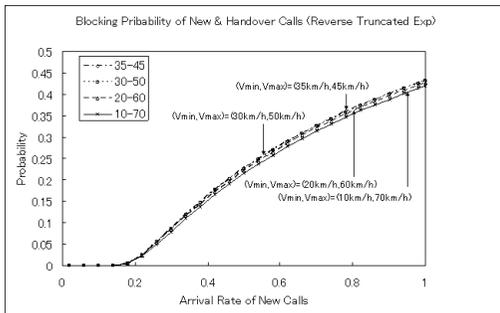


図 5 呼損率 (Reverse Truncated 指数分布)  
Fig. 5 Blocking rate of new and handover calls (Reverse Truncated exponential distribution).

たことから、新規呼とハンドオーバー呼を合わせた呼に対する呼損率を利用する。

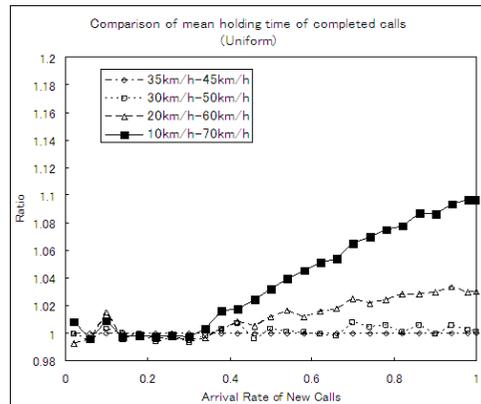
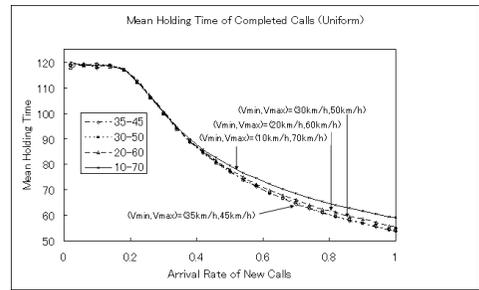


図 6 完了呼の平均保留時間 (一様分布)  
Fig. 6 Mean holding time of completed call (Uniform distribution).

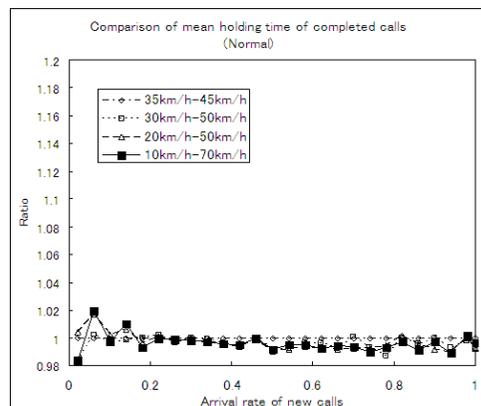
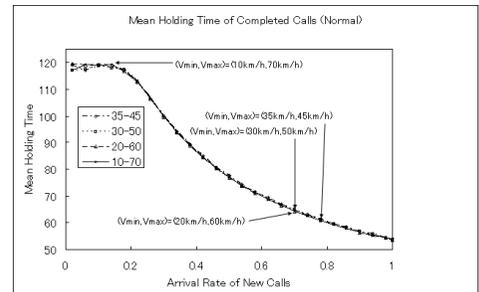


図 7 完了呼の平均保留時間 (正規分布)  
Fig. 7 Mean holding time of completed call (Normal distribution).

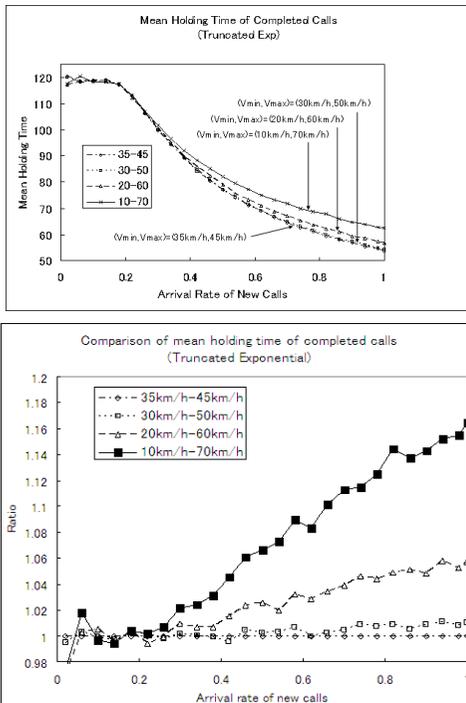


図 8 完了呼の平均保留時間 (Truncated 指数分布)

Fig. 8 Mean holding time of completed call (Truncated exponential distribution).

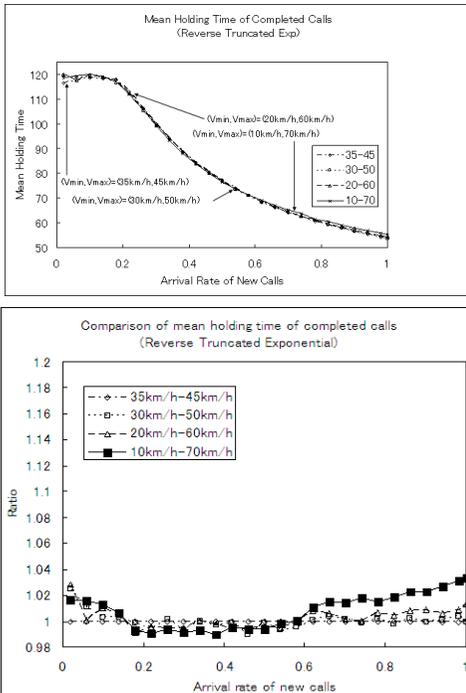


図 9 完了呼の平均保留時間 (Reverse Truncated 指数分布)

Fig. 9 Mean holding time of completed call (Reverse Truncated exponential distribution).

図 6, 図 7, 図 8, 図 9 のグラフは, 各速度分布における, 最高速度と最低速度が違う場合の完了呼の平均保留時間のグラフと, 速度差が 10 km/h の場合を 1 とした場合の各速度差の違いを割合で示したグラフである.

これらと同様に各速度分布における最高速度と最低速度の違う場合の完了呼数のグラフが必要になるが, 速度分布や最高速度と最低速度の差がどのような場合であっても, シミュレーションの結果は, ほぼ同一のグラフになった. そのため, 完了呼数については, 後述する図 13 から図 15 を利用してすることとして, ここでは省略する.

### 3.1.1 呼 損 率

図 2 から図 5 より, 新規呼の到着率が約 0.2 まででは, 到着した新規呼に十分なチャネルが割り当てられているので, 呼損率がほぼ 0 に近い. これに対して新規呼の到着率が約 0.2 を超えると, 到着した新規呼に十分なチャネルが割り当てられていないために呼損が生じる.

図 2 より, 速度分布が一様分布に従う場合, 新規呼の到着率が約 0.4 を超えると, 呼損率は, 速度差が 10 km/h の場合と比べて 60 km/h の場合では約 4% 高くなる.

図 3 より, 速度分布が正規分布に従う場合, 呼損率は速度差の影響を受けずほぼ同じとなる.

図 4 より, 速度分布が Truncated 指数分布に従う場合, 新規呼の到着率が約 0.3 を超えると, 呼損率は速度差が 10 km/h の場合と比べて 60 km/h の場合では約 14% 高くなる.

図 5 より, 速度分布が Reverse Truncated 指数分布に従う場合, 新規呼の到着率が約 0.3 を超えると, 呼損率は速度差が 10 km/h の場合と比べて 60 km/h の場合では, 約 7% の減少から, 約 5% の減少と線形に変化している.

このように, Reverse Truncated 指数分布以外では, 各速度差の呼損率の違いが新規呼の到着率によらずほぼ同じ割合であるが, Reverse Truncated 指数分布では, 各速度差の呼損率の違い自体も新規呼の到着率により変化している.

### 3.1.2 完了呼の平均保留時間

図 6 から図 9 より, 完了呼の平均保留時間は, 新規呼の到着率が約 0.2 以下では速度分布や速度差によらず, 完了呼の平均保留時間が同じ傾向を示し, 速度分布や速度差に無関係に完了呼の平均保留時間が決まる. 参考文献 8) によるとこのような性質は, ロバストネス (robustness) と呼ばれているので, 完了呼の

平均保留時間は、速度分布や速度差についてはロバストネスが成り立つといえる。これは、図2から図5のグラフから呼損率についてもいえる。

図6より、速度分布が一様分布に従う場合、新規呼の到着率が約0.38を超えると、完了呼の平均保留時間は、速度差が10 km/hの場合と比べて60 km/hの場合では、約2%の増加から約10%の増加へとほぼ線形に変化する。

図7から、速度分布が正規分布に従う場合、完了呼の平均保留時間は、速度差の影響を受けず、ほぼ同じとなる。

図8より、速度分布が Truncated 指数分布に従う場合、新規呼の到着率が約0.3を超えると、完了呼の平均保留時間は、速度差が10 km/hの場合と比べて60 km/hの場合では、約3%の増加から約16%の増加へとほぼ線形に変化する。

図9から、速度分布が Reverse Truncated 指数分布に従う場合、新規呼の到着率が約0.18から約0.6までは、速度差が10 km/hの場合と比べて60 km/hの場合では、約1%の減少がみられるが、約0.6を超えると、完了呼の平均保留時間は、速度差が10 km/hの場合と比べて60 km/hの場合では、約1%の増加から約3%の増加へとほぼ線形に変化する。

3.2 各速度分布間の通信性能の違いについて

ここでは、最低速度と最高速度の速度差が同じ場合の4種類の速度分布が通信性能に及ぼす影響を考察するため、呼損率、完了呼数、完了呼の平均保留時間を比較したシミュレーション結果のグラフと、一様分布を基準として各速度分布における呼損率や完了呼の平均保留時間を割合で表したグラフを示す。

3.2.1 呼損率

図10より、速度差が10 km/hの場合、各速度分布の呼損率はほぼ同じになる。

図11より、速度差が40 km/hの場合、呼損率は新規呼の到着率が約0.2を超えると Truncated 指数分布、一様分布、正規分布、Reverse Truncated 指数分布の順に高い。指数分布と比べて Truncated 指数分布では、定常的に約4%高い呼損率となっている。また、新規呼の到着率が増加しても、各速度分布間の違いを示す割合は一定になっているように見える。しかし、新規呼の到着率が1より大きい場合のシミュレーションを行わないと分からない。

図12では、速度差が60 km/hの場合、4つの分布間の呼損率の差はより顕著になる。Reverse Truncated 指数分布に比べて Truncated 指数分布では、約20%高い呼損率から約15%高い呼損率に線形に変化し

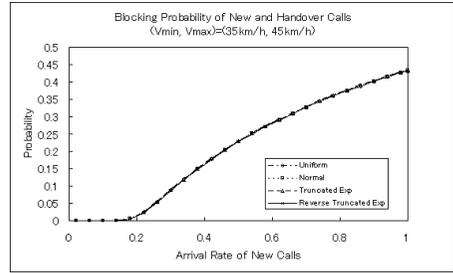


図10 呼損率 (速度差:  $V_{max} - V_{min} = 10 \text{ km/h}$ )  
Fig. 10 Blocking rate of new and handover calls (Speed difference:  $V_{max} - V_{min} = 10 \text{ km/h}$ ).

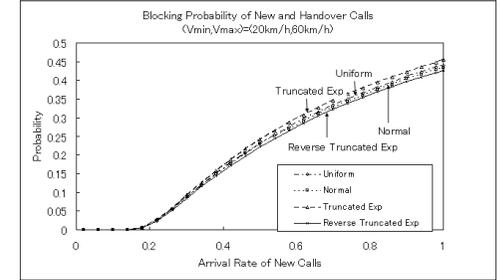
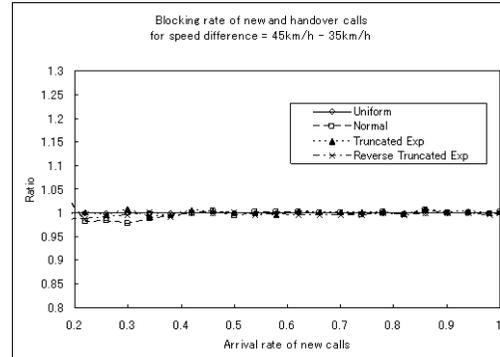
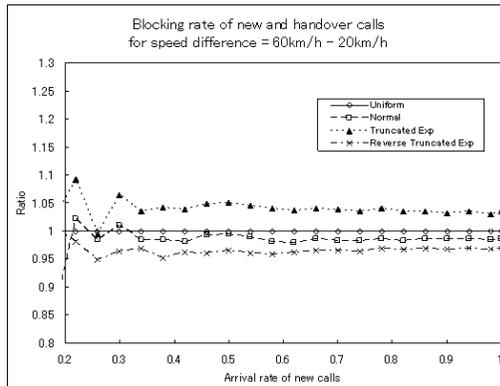


図11 呼損率 (速度差:  $V_{max} - V_{min} = 40 \text{ km/h}$ )  
Fig. 11 Blocking rate of new and handover calls (Speed difference:  $V_{max} - V_{min} = 40 \text{ km/h}$ ).



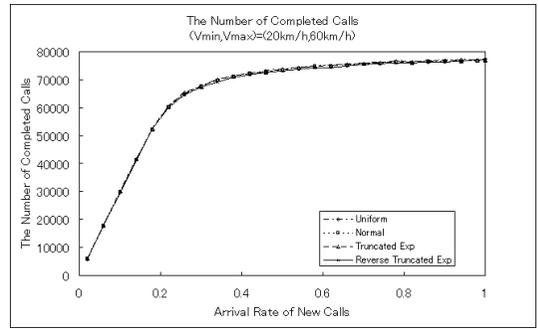
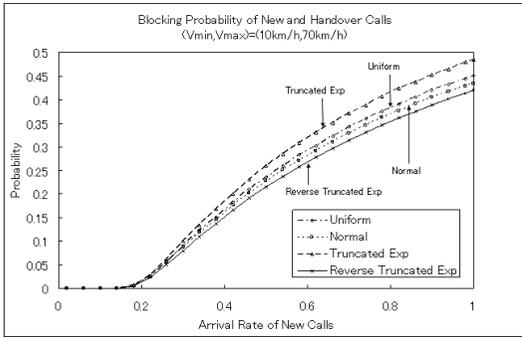


図 14 完了呼数 (速度差:  $V_{max} - V_{min} = 40$  km/h)  
 Fig. 14 The number of completed call for new call (Speed difference:  $V_{max} - V_{min} = 40$  km/h).

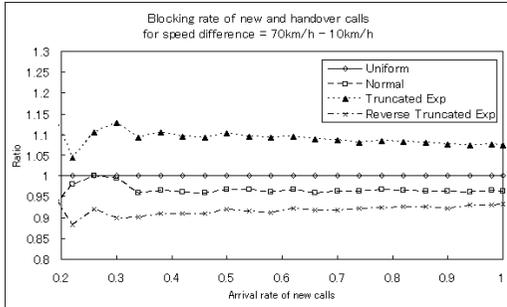


図 12 呼損率 (速度差:  $V_{max} - V_{min} = 60$  km/h)  
 Fig. 12 Blocking rate of new and handover calls (Speed difference:  $V_{max} - V_{min} = 60$  km/h).

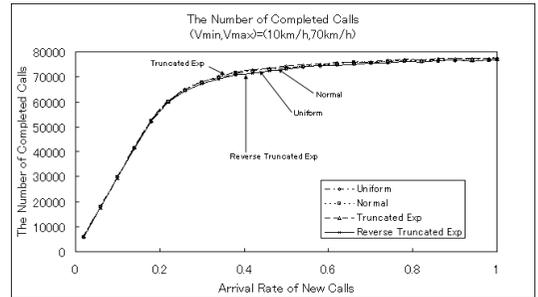


図 15 完了呼数 (速度差:  $V_{max} - V_{min} = 60$  km/h)  
 Fig. 15 The number of completed call for new call (Speed difference:  $V_{max} - V_{min} = 60$  km/h).

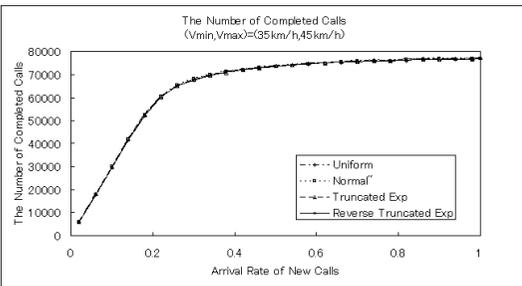


図 13 完了呼数 (速度差:  $V_{max} - V_{min} = 10$  km/h)  
 Fig. 13 The number of completed call for new call (Speed difference:  $V_{max} - V_{min} = 10$  km/h).

ている。

### 3.2.2 完了呼数

図 13, 図 14, 図 15 より, 完了呼数は速度差が 10 km/h, 40 km/h, 60 km/h の場合, 新規呼の到着率に対して各速度分布にかかわらずほぼ同じになる。また, 速度分布が異なっても変わらないことが, これらのグラフからいえる。

図 13 から, 新規呼の到着率が約 0.2 を超えると完了呼数は 80,000 呼に向けて漸近する傾向にある。本シミュレーションモデルでは, リング状のセルラーネットワークは 30 個のセルから構成される。各セルには 32 本チャンネルが割り当てられているので, ネットワーク全体では合計 960 本のチャンネルを使用して, 各移動

体へ平均 120 秒の指数分布に従う保留時間の通信サービスを提供する。シミュレーション実行時間が 10,000 秒なので, 平均値の議論で, 32 チャンネル  $\times$  30 セル  $\times$  10,000 秒 / 120 秒 = 80,000 呼となり, 最大 80,000 呼の通信サービスが提供できる。

### 3.2.3 完了呼の平均保留時間

図 16 より, 完了呼の平均保留時間は, 速度差が 10 km/h の場合, 各速度分布で違いはほとんどない。

図 17 より, 完了呼の平均保留時間は, 速度差が 40 km/h の場合, 新規呼の到着率が約 0.2 以上になると Truncated 指数分布, 一様分布, Reverse Truncated 指数分布, 正規分布の順に長くなる。正規分布と比べて Truncated 指数分布では, 約 1% の増加から約 6% の増加に線形に変化している。

図 18 より, 速度差が 60 km/h の場合, 各分布の完了呼の平均保留時間の差は, より顕著になる。正規分布と比べて Truncated 指数分布では, 約 1% の増加から約 15% の増加へと線形に変化している。また, 他の速度分布においても, 正規分布からの差が線形に変化している。

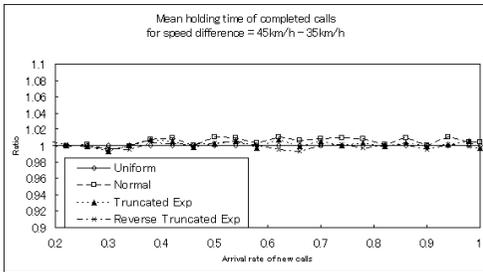
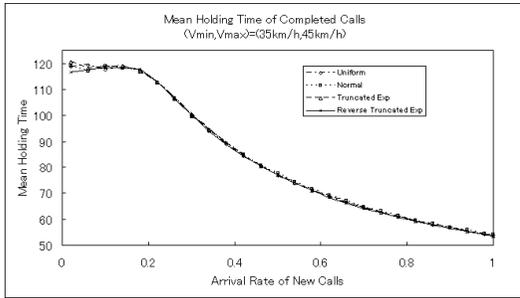


図 16 完了呼の平均保留時間 (速度差：  
 $V_{max} - V_{min} = 10 \text{ km/h}$ )

Fig. 16 Mean holding time of completed call (Speed difference:  $V_{max} - V_{min} = 10 \text{ km/h}$ ).

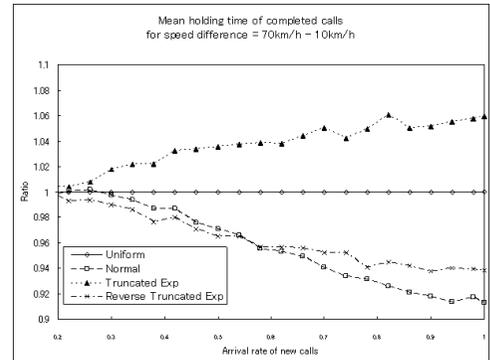
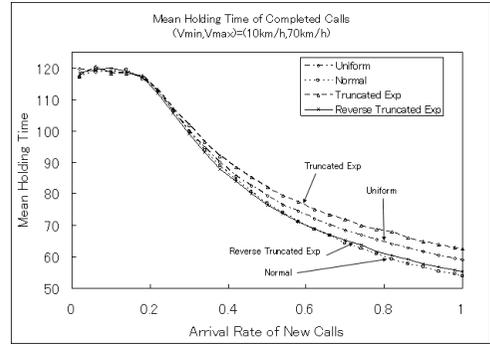


図 18 完了呼の平均保留時間 (速度差：  
 $V_{max} - V_{min} = 60 \text{ km/h}$ )

Fig. 18 Mean holding time of completed call (Speed difference:  $V_{max} - V_{min} = 60 \text{ km/h}$ ).

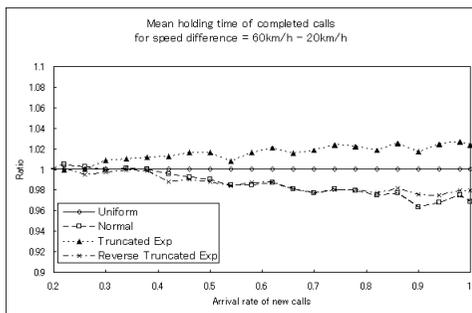
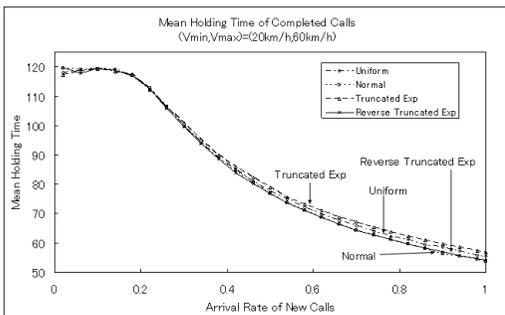


図 17 完了呼の平均保留時間 (速度差：  
 $V_{max} - V_{min} = 40 \text{ km/h}$ )

Fig. 17 Mean holding time of completed call (Speed difference:  $V_{max} - V_{min} = 40 \text{ km/h}$ ).

## 4. 考 察

### 4.1 呼 損 率

図 10 は速度差が小さいので、各速度分布間による呼損率の違いが現れないが、図 11 と図 12 では違いが現れている。

差が顕著である図 12 について考えると、一様分布を基準に Truncated 指数分布, Reverse Truncated 指数分布, 正規分布をそれぞれ比較すると, Truncated 指数分布の呼損率は約 9%高い。一方, Reverse Truncated 指数分布の呼損率は約 8%低い。また, 正規分布の呼損率は約 5%低い。

ここで、図 1 の一様分布を基準にして各速度分布のグラフを比較すると、速度差が大きくなるほど、Truncated 指数分布は低速度の移動体数が増加して高速度の移動対数が減少する。Reverse Truncated 指数分布は、低速度の移動体数が減少して高速度の移動体数が増加する。正規分布は、低速度の移動体数が減少して中速度の移動体数が増加する。

図 12 より、Reverse Truncated 指数分布と正規分布を一様分布と比べると、ともに呼損率が低くなる

という共通点がある。また、図 1 より、高速度の移動体に関して Reverse Truncated 指数分布では増加して、正規分布では減少しているが、低速度の移動体は、Reverse Truncated 指数分布でも正規分布でも減少する共通点がある。一方、呼損率が高くなっている Truncated 指数分布では、低速度の移動体が増加している。このことから、低速度の移動体の個数が呼損率の低下に関係しており、高速度の移動体の個数は呼損率に影響をあまり与えないと考えられる。いい換えると、低速度の移動体が高速度の移動体より呼損率に及ぼす影響が大きいと考えられる。実際に、図 12 から、低速度の移動体が多く存在する場合、高速度の移動体が多い場合に比べて、呼損率が最大で約 20%高くなっている。

ここで、低速度の移動体が高速度の移動体より多い場合を考えると、チャンネルを使用している移動体は低速度のものが多く、チャンネルが空くまでの時間が長くなる。一方、高速度の移動体が低速度の移動体より多い場合、チャンネルを使用している移動体は高速度のものが多く、チャンネルが空くまでの時間が短くなる。このため、低速度の移動体が多い場合、ハンドオーバーは少ないので、チャンネルが空く頻度は少なくなり、ハンドオーバーに成功する呼数や新規呼がつかがる呼数は少なくなると考えられる。一方、高速度の移動体が多い場合、ハンドオーバー呼は多いので、チャンネルが空く頻度は多くなり、ハンドオーバーの成功の数や新規呼がつかがる数は多くなると考えられる。したがって、高速度の移動体が多い場合の呼損率が低いことから、ハンドオーバー呼の増加よりもチャンネルの空く頻度の増加の割合が多いと推論できる。

また、図 11 と図 12 に共通して、呼損率は Truncated 指数分布、一様分布、正規分布、Reverse Truncated 指数分布の順に高い値をとっている。図 1 の Truncated 指数分布のグラフは、速度差が大きくなるほど低速度の移動体の増加は高速度の移動体の増加より多い。一様分布のグラフでは、速度差が大きくなっても低速度の移動体と高速度の移動体の増加は同じである。その増加は、Truncated 指数分布の低速度の移動体の増加より少なく、高速度の移動体の増加より多い。正規分布のグラフでは、速度差が大きくなっても低速度の移動体と高速度の移動体の増加は同じである。その増加は、一様分布の増加よりも少ない。Reverse Truncated 指数分布のグラフでは、低速度の移動体の増加より高速度の移動体の増加の方が多い。この低速度の移動体の増加は、正規分布の低速度の移動体の増加よりも少ない。

以上のことから、各速度分布の呼損率の高い順と低速度の移動体の個数の多い順が同じであるので、呼損率には低速度の移動体に関係していると考えられる。

#### 4.2 完了呼の平均保留時間

図 16 は速度差が小さいので、各速度分布間による完了呼の平均保留時間の違いがほとんど表れないが、図 17 と図 18 では違いが表れる。差が顕著である図 18 より、一様分布を基準にして Truncated 指数分布と Reverse Truncated 指数分布の完了呼の平均保留時間をそれぞれ考えると、Truncated 指数分布では約 6%増加しているのに対して Reverse Truncated 指数分布では約 6%減少している。また、正規分布では 8%減少している。

図 1 より、高速度の移動体に関して Reverse Truncated 指数分布は増加し、正規分布は減少するという相違点があるのに対して、低速度の移動体に関してともに減少するという共通点がある。一方、Truncated 指数分布では、低速度の移動体が増加している。このことから、低速度の移動体の数が完了呼の平均保留時間に関係していると考えられる。実際に、図 18 から低速度の移動体が多くなると、高速度の移動体が少ない場合に比べて、完了呼の平均保留時間は最大で約 16%長くなっている。

図 13, 14, 15 から完了呼数自体は、速度分布にほとんど依存しないので、各速度分布における完了呼の保留時間を考えてみると、低速度の移動体が多ければ、ハンドオーバーの頻度が少なく、1つのセルに滞在する時間が長い。ゆえに、保留時間が長い完了呼が多くなる。

一方、高速度の移動体が多ければ、ハンドオーバーの頻度が多くなり、1つのセルに滞在する時間が短いので、保留時間が短い完了呼が多くなる。しかし、正規分布が最も平均保留時間が短いので、高速度の移動体の多さよりも、同一速度の移動体の数が多いことが、完了呼の平均保留時間に影響しており、高速度の移動体の数はそれほど影響していないと考えられる。以上のことから、低速度の移動体の増減が完了呼の平均保留時間の増減に関係しており、高速度の移動体の数は影響をあまり与えない。

また、呼損率と完了呼の平均保留時間のグラフから、各速度分布の完了呼の平均保留時間の差の違いが、各速度分布の呼損率の差の違いよりも大きいことから、速度分布の違いは、呼損率よりも完了呼の平均保留時間に及ぼす影響が大きい。

#### 4.3 完了呼数

図 13, 14, 15 から完了呼数に関しては、速度分布

や最高速度と最低速度の速度差では変化がなかった。このことから、完了呼数は、これらの影響は受けずに、呼の保留時間の分布に影響されるのではないかと考えられる。いい換えると、完了呼数について、システムは移動体の動きの影響を受けないと考えられる。このシミュレーションでは、呼の保留時間を指数分布で与えているが、他の分布における完了呼数を検討する必要があると思われる。

## 5. 結 論

本論文では、一次元セルラーネットワーク上を移動する移動体の動きに注目して、一様分布、正規分布、Truncated 指数分布、Reverse Truncated 指数分布の4つの速度分布の違いが通信性能に与える影響についてシミュレーションにより調べた。

シミュレーション結果から、ネットワークの負荷が低い場合、完了呼数、完了呼の平均保留時間は、これらの速度分布や速度差の影響を受けないことを示した。また、ネットワークの負荷が高い場合、完了呼数は、速度分布や速度差の影響を受けないことを示した。

速度分布の型や各速度分布における最低速度と最高速度の速度差を変化させた本論文におけるシミュレーションから、低速度の移動体が多く存在する場合、少ない場合に比べて呼損率が最大で約20%高くなり、完了呼の平均保留時間は約16%長くなることが分かった。また、高速度の移動体の個数は、呼損率や完了呼の平均保留時間にあまり影響を与えないことが分かった。

一般に、通信性能の評価には呼損率が用いられている。ネットワークへの負荷が高い場合、移動体の速度分布が完了呼の平均保留時間、呼損率のネットワークの通信性能へ影響を及ぼす。特に、Truncated 指数分布では他の3つの分布に比べて、呼損率は高く、完了呼の平均保留時間は長くなる興味深い現象が観測された。したがってこのような通信性能を評価する場合、1つの評価基準だけでなく移動体の速度分布を考慮して多角的に評価し、総合的に通信性能を判断する必要がある。

今後の課題として、本論文で用いたシミュレーションモデルにおいて、利用者の立場からの完了率や通信失敗率などの通信性能の評価パラメータを用いて、さらに多様な速度分布や速度差の影響について調べる必要がある。

謝辞 本論文の投稿に際し、担当委員と査読者の皆様から貴重なご助言をたまわりましたことに心より感謝申し上げます。

## 参 考 文 献

- 1) Ohtsuka, H., Sengoku, M., Yamaguchi, Y. and Abe, T.: Basic study on mobile flows and telephone traffic, *IEICE, Tech. Rep., CAS*, No.249, pp.81-88 (1987).
- 2) Montenegro, G., Sengoku, M., Yamaguchi, Y. and Abe, T.: Time-dependent analysis of mobile communication traffic in a ring-shaped service area with nonuniform vehicle distribution, *IEEE Trans. Vehicular Technology*, Vol.41, pp.243-254 (1992).
- 3) Thipchaksurat, S., Kawanishi, K., Yamamoto, U. and Onozato, Y.: Impact of Mobility on Blocking in One-dimensional Cellular Networks with New Call Channel Limiting Scheme, *Proc. IEEE Global Telecommunications Conference (IEEE, Globecom2002)* (2002-12).
- 4) Bettstetter, C.: Mobility Modeling in Wireless Networks, *ACM Mobile Computing and Communications Review*, Vol.5, No.3, pp.55-67 (2001-7).
- 5) Yoon, J. and Liu, M.: Random Waypoint Considered Harmful, *22nd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (IEEE INFOCOM2003), The Conference on Computer Communications* (Mar. 30-Apr. 3 2003).
- 6) Orlik, P.V. and Rappaport, S.S.: A Model for Teletraffic Performance and Channel Holding Time Characterization in Wireless Cellular Communication with General Session and Dwell Time Distributions, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol.16, No.5, pp.788-803 (1998).
- 7) Khan, F. and Zeghlache, D.: Effect of cell residence time distribution on the performance of cellular mobile networks, *Proc. IEEE VTC*, pp.949-953 (1997).
- 8) 藤木, 雁部: 通信トラヒック理論, 丸善 (1980).

(平成16年5月20日受付)

(平成16年11月1日採録)



井上 通宏

1998年群馬大学工学部情報工学科卒業。2003年群馬大学大学院工学研究科博士後期課程電子情報工学専攻単位取得退学。同年より群馬大学総合情報処理センター技術補佐員。移

動体通信に関する研究に従事。電子情報通信学会会員。



吉浦 紀晃（正会員）

1991年東京工業大学工学部情報工学科卒業．1997年東京工業大学大学院理工学研究科情報工学専攻博士課程単位取得退学．同年日本学術振興会研究員．1998年東京工業大学情報理工学研究科計算工学専攻助手．2001年より群馬大学総合情報処理センター助教授．博士（学術）．現在非標準論理によるソフトウェア検証，推論機構，ネットワークに関する研究に従事．人工知能学会会員．



小野里好邦（正会員）

東北大学卒業．工学博士．現在，群馬大学工学部情報工学科勤務．情報通信ネットワークに関する研究に従事．電子情報通信学会，日本シミュレーション学会，日本OR学会，IEEE，ACM各会員．