

## 論文

## 双方向帯状サービスエリアにおける移動通信トラヒック特性

樺澤 辰也<sup>†</sup> 仙石 正和<sup>††</sup>

## Characteristics of Mobile Communication Traffic in a Both Way Band-Shaped Service Area

Tatsuya KABASAWA<sup>†</sup> and Masakazu SENGOKU<sup>††</sup>,

あらまし セルラシステムが用いられている移動体通信系において、その通信トラヒック特性の解析を行うためには、セル間の移動体の移動を考慮する必要がある。これまでは、高速道路のような道路をモデル化した帯状サービスエリアにおいて、移動体のセルの変更を確率的に表した通信トラヒックの解析が行われてきた。従来の研究では、帯状サービスエリアにおいて、移動体の移動方向が、1方向の場合の解析が行われてきた。本論文では、これまでの1方向の解析を基礎として、解析モデルをより現実的なものとするため、対面通行の道路を想定し、移動体の移動方向が双方向の帯状サービスエリアにおいて通信トラヒック特性の解析を理論的に行った。まず、セルに加わる呼量が一定である場合の定常状態の解析を行った。つぎに、呼量が時間的に変動する場合の過渡特性の解析を行った。また、計算機シミュレーションを行い、理論値とシミュレーション値を比較することにより、解析結果の妥当性を示した。

キーワード セルラシステム、ハンドオフ、状態方程式、呼損率

## 1. まえがき

現在、移動体通信系においては、周波数の有効利用や送信出力の低減という点から、サービスエリアを複数のセルに分割したセルラシステムが用いられている[1],[2]。セルラ移動通信系において、移動体が通話したままセルの移動を行うと、移動体がそれまで存在したセルと、移動した先のセルでは通信トラヒック特性が変化する。移動体の移動を考慮した通信トラヒック特性を行うためには、移動体がセルを変更する確率を解析的に求めることが必要である。移動体通信系においては、実際の道路のようなサービスエリアは、通常2次元状に分布している。そのような2次元サービスエリアでは、交差点等があり、移動体の移動方向を解析的に求めることは困難である。そこで、これまでの通信トラヒック特性の理論的な解析は、移動体の移動方向が1次元である高速道路をモデル化したような、帯状サービスエリアにおいて行われてきた。

これまでの解析では、帯状サービスエリアにおいて、移動体の密度や速度が一定である場合の定常状態での通信トラヒック特性の解析や[3]、セルに加わる呼量が時間的に変動する場合の通信トラヒックの過渡特性の理論的な解析が行われてきた[4]。また、計算機シミュレーションだけでの解析であるが、帯状サービスエリアにおいて、移動体の密度や速度が時間的に変動する場合の通信トラヒック特性の解析も行われている[5]。

帯状サービスエリアにおいて、従来の解析は移動体の移動方向が1方向だけの場合について行われてきた。しかし、実際の高速道路のような帯状サービスエリアでは、移動体の移動方向が1方向である場合は少なく、2車線の対面通行のサービスエリアが一般的である。これまでは、そのような双方向に移動体が移動する場合の通信トラヒックの理論的な解析は行われていない。そこで本論文では、解析モデルをより現実に近い付けるために、移動体の対面通行を想定した双方向の帯状サービスエリアにおける通信トラヒック特性の解析を行うことを目的とした。1方向の解析では、呼のハンドオフ確率を定量的に表し、ハンドオフ確率を状態方程式に取り入れて通信トラヒック特性の解析が行われてきた[3],[4]。ここで、呼のハンドオフとは、

<sup>†</sup> 長岡工業高等専門学校, 長岡市  
Nagaoka College of Technology, Nagaoka-shi, 940 Japan

<sup>††</sup> 新潟大学工学部, 新潟市  
Faculty of Engineering, Niigata University, Niigata-shi, 950-21 Japan

移動体が通話したままセルの変更を行うことであり、ハンドオフで移動体が出たセルではチャンネルが一つ解放され、ハンドオフしたセルではその呼は、新たに生起呼とみなされる。

本論文では、1方向の解析で用いられてきたハンドオフ確率や状態方程式を応用して、新たに双方向帯状サービスエリアにおけるハンドオフ確率を求めた。更に、ハンドオフ確率を使って状態方程式を立てて通信トラヒック特性の解析を行った。まず、各セルに加わる呼量が、一定である場合の定常状態での通信トラヒック特性の解析を行った。つぎに、セルに加わる呼量が、事故や渋滞等の理由で、時間的に変動する場合の通信トラヒックの過渡特性の解析を行った。また、計算機シミュレーションを行い、理論値とシミュレーション値を比較することによって、解析結果の妥当性の確認を行った。本論文の解析結果は、実際の双方向の帯状サービスエリアにおける回線設計に役立つものと考えられる。

本論文の構成は、2. が解析モデルおよび仮定の説明、3. が定常状態の解析、4. が過渡特性の解析、5. がまとめおよび今後の課題である。

## 2. 解析モデルおよび仮定

### 2.1 解析モデル

図1に解析モデルとした帯状サービスエリアを示す。このサービスエリアの長さは無限長とし、一つのセルの長さを  $L$  とする。各セルにはそれぞれ  $\dots \#j-1$ ,  $\#j$ ,  $\#j+1$ ,  $\dots$  のように番号を付ける。また、サービスエリアの中央に、実際の道路の中央分離帯のような仕切を設け、移動体はこの仕切を境として、左車線、右車線を左右の方向に移動するものとする。

### 2.2 仮定

図1の双方向の帯状サービスエリアにおける通信トラヒック特性を解析するために、以下のような仮定を行う。

(i) セル内の移動体の密度は左車線、右車線とも

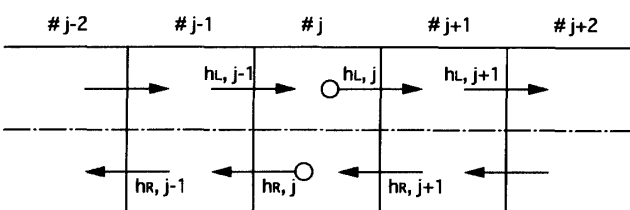


図1 帯状サービスエリア  
Fig.1 Band-shaped service area.

等しく、一様分布に従う。

(ii) 移動体は一定速度  $V$  で移動する。

(iii) 呼の生起間隔はポアソン分布に従い、呼の生起率はセル内の呼数に関係なく  $\lambda$  とする。

(iv) 呼の保留時間は指数分布に従う。

(v) 呼のハンドオフ間隔はポアソン分布に従う。

(vi) チャンネルの割当て方式は固定チャンネル割当て方式を用い、チャンネルの割当てシステムは即時式とする。

仮定(v)については、本論文の解析は、移動体の速度に比べて、セル長が十分に長い場合について行い、呼のハンドオフは、希少性があると考えられるので、このような仮定を行った。

仮定(vi)の即時式とは、セル内のチャンネル数とそのセルに割り当てられているチャンネル数に等しいとき、そのセルで生起した呼やハンドオフしてきた呼に対しては、チャンネルは割り当てられずに、呼損となる方式である。

## 3. 定常状態の通信トラヒック特性

### 3.1 状態遷移図と状態方程式

図1の帯状サービスエリアにおいて、前章の仮定の下で、各セルに加わる呼量が一定値である場合の、定常状態での通信トラヒック特性の解析を行った。図1において、解析の対象とするセルを  $\#j$  のセルとする。セル  $\#j$  の定常状態での通信トラヒック特性を求めるためには、セル  $\#j$  の同時接続数が  $r$  ( $0 \leq r \leq S$ ) である確率  $P_{j,r}$  を求める必要がある。ここで、 $S$  は各セルに割り当てられているチャンネル数である。  $P_{j,r}$  を求めるためには、セル  $\#j$  の同時接続数に関する状態遷移図を求める必要がある。

従来の移動体の移動方向が1方向の場合の解析では、セル  $\#j$  に入入りする呼のハンドオフ確率を例にとると、セル  $\#j-1$  からハンドオフする確率と、セル  $\#j$  からハンドオフする確率の1方向の確率だけを考えればよかった。しかし、移動方向が双方向の場合には、対象とするセルの両脇のセルに呼が入入りする確率を考慮しなければならない。

そのために、セル  $\#j$  を中心とした呼の流れを図1に示す。図1において、 $h_{L,j-1}$ ,  $h_{L,j}$  は、それぞれ左方向からセル  $\#j$  およびセル  $\#j+1$  に、単位時間当りに呼がハンドオフする確率であり、同様に、 $h_{R,j}$ ,  $h_{R,j+1}$  は、それぞれ右方向からセル  $\#j-1$  およびセル  $\#j$  に、単位時間当りに呼がハンドオフする確率である。

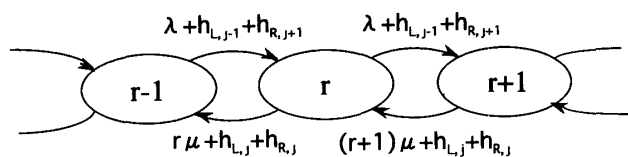


図 2 状態遷移図  
Fig. 2 State transition diagram.

いま、セル # $j$  において、時刻  $t$  から微小時間  $\Delta t$  だけ経過した時刻  $t + \Delta t$  において、同時接続数が  $r$  であるという状態は、以下の 3 種類の互いに背反な事象によって現われると考えられる [6].

(1) 時刻  $t$  において同時接続数が  $r$  であり、 $\Delta t$  の間に変化が起こらない。

(2) 時刻  $t$  において同時接続数が  $r-1$  であり、 $\Delta t$  の間に呼が一つ生起するか、またはセル # $j-1$  およびセル # $j+1$  より呼が一つハンドオフする。

(3) 時刻  $t$  において同時接続数が  $r+1$  であり、 $\Delta t$  の間に呼が一つ終了するか、またはセル # $j-1$  およびセル # $j+1$  に呼が一つハンドオフする。

ここで、前節の仮定(v)のように、呼のハンドオフ間隔がポアソン分布に従うという仮定から、呼の生起と同様に、呼のハンドオフのマルコフ性を仮定している。

図 1 に示すハンドオフ確率を使って、セル # $j$  に関する状態遷移図を描くと、図 2 のようになる [6]. 図 2 において  $\lambda$  は呼の生起率であり、 $\mu$  は呼の終了率である。ここで、セル内の呼数が  $r$  であるとき、1 個の呼が終了する確率は  $r\mu$  で表される。

状態遷移図より、セル # $j$  の同時接続数に関する状態方程式が以下のように表される。

$$\begin{aligned} & [\lambda + h_{L,j-1} + h_{R,j+1}]P_{j,r-1} \\ & + [(r+1)\mu + h_{L,j} + h_{R,j}]P_{j,r+1} \\ & - [\lambda + r\mu + h_{L,j-1} + h_{L,j} \\ & + h_{R,j} + h_{R,j+1}]P_{j,r} = 0 \end{aligned} \quad (0 \leq r < S) \quad (1a)$$

$$\begin{aligned} & [\lambda + h_{L,j-1} + h_{R,j+1}]P_{j,S-1} \\ & - [S\mu + h_{L,j} + h_{R,j}]P_{j,S} = 0 \end{aligned} \quad (1b)$$

但し、

$$P_{j,-1} = 0 \quad (2a)$$

$$\sum_{r=0}^S P_{j,r} = 1 \quad (2b)$$

である。

### 3.2 呼のハンドオフ確率

式(1a), (1b)で表される状態方程式を解くために

は、呼のハンドオフ確率を求める必要がある。ハンドオフ確率は、微小時間  $\Delta t$  の間に呼がハンドオフする確率で表される。

移動体の移動方向が 1 方向の場合に、呼が時刻  $t$  から微小時間  $\Delta t$  の間にハンドオフする確率  $h\Delta t$  は、時刻  $t$  において呼がセル端に存在する確率と保留時間が  $\Delta t$  以上である確率の積で表され、速度  $V$ , セル長  $L$  により次式のように表される [4].

$$h\Delta t = V/L \cdot \Delta t \quad (3)$$

図 1 のように、移動体の移動方向が双方向の場合においては、セル内の移動体の密度が左車線、右車線とも等しいと仮定していることから、セル内に存在する呼が左右に移動する確率は等しく  $1/2$  となる。従って、セル端に存在する呼がセル # $j+1$  にハンドオフする確率は 1 方向の場合の  $1/2$  となる。従って、3.1 の状態方程式(1a), (1b)の中にある  $h_{L,j}$ ,  $h_{R,j}$  等のハンドオフ確率は、1 方向のときの  $1/2$  となり、つぎのように表される。

$$h_{L,j} = h_{L,j-1} = h_{L,j+1} = h/2 \quad (4a)$$

$$h_{R,j} = h_{R,j-1} = h_{R,j+1} = h/2 \quad (4b)$$

これらのハンドオフ確率を状態方程式(1a), (1b)に用いれば、定常状態での通信トラヒック特性の解析を行うことができる。

### 3.3 解析結果

対象とするセル # $j$  の定常状態の解析を行う場合、同時接続数が  $r$  である場合のセル # $j$  からのハンドオフ確率は  $r$  に依存し、それらを  $h_{L,j}(r)$ ,  $h_{R,j}(r)$  と表す。セル # $j$  において、 $r$  個の呼が存在するときのハンドオフ確率  $h_{L,j}(r)$ ,  $h_{R,j}(r)$  は式(4a), (4b)の  $r$  倍となり、次式のように表される。

$$h_{L,j}(r) = rh/2 \quad (5a)$$

$$h_{R,j}(r) = rh/2 \quad (5b)$$

これらに対し、両脇のセル # $j-1$  および # $j+1$  の同時接続数を用いてハンドオフ確率を表すと、両脇のセルの状態を同時に扱わなければならない。その場合、扱うセル数は 3 となり、チャンネル数  $S$  を用いると、状態数が  $(S+1)^3$  となり、状態数が増加し解析が困難となる。そこで、各々のセルが定常状態であることに注目し、定常状態のセルからハンドオフする単位時間当りに呼がハンドオフする確率を、呼の定常的な流れとして、セル内の同時接続数の平均値を使って表す。各セルの同時接続数に関する確率が等しいので、セル # $j$  の同時接続数の平均値  $r_m$  を用いると、セル # $j-1$  および # $j+1$  からのハンドオフ確率は次式のように表さ

れる [4].

$$h_{L,j-1} = r_m h / 2 \quad (6a)$$

$$h_{R,j+1} = r_m h / 2 \quad (6b)$$

ここで,

$$r_m = \sum_{r=0}^S r P_{j,r} \quad (7)$$

である.

これらのハンドオフ確率を使って式(1a), (1b)の状態方程式を書き直すと次式ようになる.

$$\begin{aligned} & [\lambda + h_{L,j-1} + h_{R,j+1}] P_{j,r-1} \\ & + [(r+1)\mu + h_{L,j}(r+1) \\ & + h_{R,j}(r+1)] P_{j,r} \\ & - [\lambda + r\mu + h_{L,j-1} + h_{L,j}(r) \\ & + h_{R,j}(r) + h_{R,j+1}] P_{j,r+1} = 0 \end{aligned} \quad (0 \leq r < S) \quad (8a)$$

$$\begin{aligned} & [\lambda + h_{L,j-1} + h_{R,j+1}] P_{j,S-1} \\ & - [S\mu + h_{L,j}(S) + h_{R,j}(S)] P_{j,S} = 0 \end{aligned} \quad (8b)$$

本論文では, 2.2の仮定(v)のように, 呼のハンドオフ間隔はポアソン分布に従うと仮定しており, 生起呼とハンドオフ呼を同等に扱っている. 従って, 生起呼数を  $N_b$ , ハンドオフ呼数を  $N_h$ , 呼損となった生起呼数を  $N_{bb}$ , 呼損となったハンドオフ呼数を  $N_{bh}$  とし, 本論文での呼損率  $B$  を次の式のように定義する.

$$B = (N_{bb} + N_{bh}) / (N_b + N_h) \quad (9)$$

上式で定義した呼損率  $B$  は, セル #  $j$  における同時接続数が  $S$  である確率  $P_{j,S}$  に等しいので, 式(8a), (8b)の状態方程式を, 同時接続数の平均値  $r_m$  を含んだまま解き, セル #  $j$  での呼損率  $B$  を求めると, アーラン B 式と類似した次式のようになる.

$$B = \frac{1}{S!} \left( \frac{\lambda + r_m V/L}{\mu + V/L} \right)^S / \sum_{r=0}^S \frac{1}{r!} \left( \frac{\lambda + r_m V/L}{\mu + V/L} \right)^r \quad (10)$$

式(10)の方程式を解けば, セル #  $j$  の通信トラヒック特性を求めることができる.

セル #  $j$  の定常状態における通信トラヒック特性を図3に示す. なお, 図の横軸はセル #  $j$  に加わる呼量  $a$ , 縦軸は呼損率  $B$ , パラメータは速度  $V$  である. また, セル長  $L=1$  km, 平均保留時間  $h_0=90$  s, チャンネル数  $S=4$  である.

また, 同図に計算機シミュレーション結果を示す. シミュレーションはセル数 11 で行った. セル数を 11 とした理由は, これ以上セル数を増加させても, シミュレーション値はほとんど変化せず, 理論解析で仮定した無限長のサービスエリアの条件を満たしていると

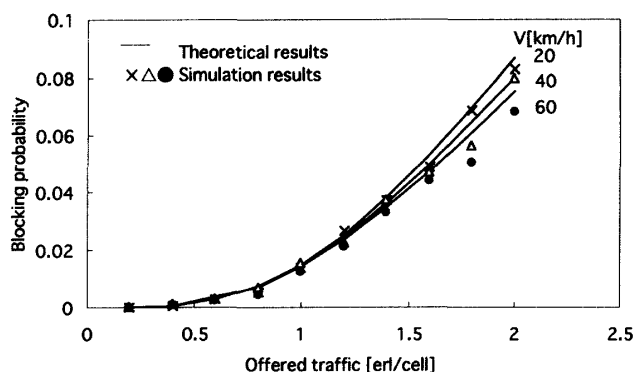


図3 通信トラヒック特性  
Fig. 3 Blocking probability vs. offered traffic.

考えられるので, この値とした. 呼の生起はポアソン分布に従う乱数を発生させ, また呼の保留時間は指数分布に従う乱数を発生させて決定した. そして, 移動体を速度に応じて移動させ, 実行時間を 5,000 分間としたときの呼損率をシミュレーション値とした.

理論値とシミュレーション値を比較すると, 両者は比較的良好に一致している. 従って, 解析結果は妥当であり, セル内の呼の密度は一様分布に従い, 呼のハンドオフ間隔がポアソン分布に従うという仮定は妥当であると考えられる. なお, 速度が上がると呼損率が下がっているが, その理由としては以下のことが考えられる. 式(10)はアーラン B 式に類似しているが, 式の中の  $(\lambda + r_m V/L) / (\mu + V/L)$  という項がアーラン B 式における呼量の形をしており, この項が一つのセルに加わる呼量であると考えられる. 速度が上がるとこの項の値が小さくなり, 呼損率が下がると考えられる. これを定性的に説明すると, つぎのように考えられる. 呼がセルを出ていく場合には, そのまま出ていくが, 新たにハンドオフしようとするセルでは, チャンネルがすべて使用されている場合がある. その場合, ハンドオフしようとした呼は呼損となる. 従って, セルから出た呼がすべて隣りのセルにハンドオフするわけではないので, 速度が上がると, ハンドオフ呼は増えるが, 各呼がセルにとどまる時間が減少し, 一つのセルで見ると, セルに加わる呼量が減少し, 呼損率が下がると考えられる.

なお, 本論文では, 左右の車線での移動体の密度が等しい場合の解析を行った. 実際の道路では, 左右の車線の移動体の密度が異なる場合があると考えられる. そのような場合の解析は, 左右の車線でのハンドオフ確率を各々求める必要がある. そのためには, 解析の対象となるセルの両脇のセルの解析も同時に行わ

なければならない。解析するセル数が増加すると、扱う状態数が増加するため、解析が困難となる。従って、今後の課題として、状態数を減らす近似を行うことがあげられる。

#### 4. 通信トラヒックの過渡特性

##### 4.1 仮定

前章では各セルに加わる呼量が一定の場合の通信トラヒック特性を解析した。実際のサービスエリアにおいては、事故や渋滞等の理由により、特定のセルに加わる呼量が時間的に変動する場合がある。本章では、双方向の帯状サービスエリアにおいて、特定のセルの片車線に加わる呼量が時間的に変動する場合を想定したときの回線設計に有効な手段となるように、通信トラヒックの過渡特性の解析を行った。ここでは、過渡特性の解析を行うための仮定を説明する。

図1のサービスエリアにおいて、解析の対象とするセル# $j$ の片車線に加わる呼量が時間的に変動する場合の、通信トラヒックの過渡特性の解析を行う。解析のために2.2の仮定(i)~(vi)に加えて、以下のような仮定を行う。

(vii) セル# $j$ において、初め左右の両車線での生起呼量は等しく、ある時刻でセル# $j$ の片車線での生起呼量が時間的に変動する。セル# $j$ 以外の他のセルに加わる呼量は一定である。

(viii) セル# $j$ で呼量変動した直後では、セル# $j$ の通信トラヒック特性だけが過渡的に変動し、他のセルは定常状態のままである。

セルに加わる呼量が時間的に変動する場合の原因として、前述のように事故や渋滞等の理由により、セル内の移動体数が変動することが考えられる。そのような場合、移動体の密度や速度が時間的に変動すると考えられる。移動体の密度や速度の時間的な変化を考慮した通信トラヒック特性を解析的に求めるためには、呼量の変化したセルのみならず、密度の変化の影響が及ぶ周りのセルの解析も行わなければならない。しかし、解析しようとするセル数を $N$ とし、セルのチャンネル数 $S$ を用いると、状態数が $(S+1)^N$ のオーダーで増加し、解析が困難となる。従って、本論文では、解析の簡単化のために、セルに加わる呼量のみが時間的に変動し、移動体の密度および速度は一定であるとした。

また仮定(viii)については、セル# $j$ に加わる呼量変動すると、他のセルの通信トラヒック特性も時間が経過すると変動するものと考えられる。しかし、呼量が

変動した直後では、他のセルへの影響は小さいと考えられるので、このような仮定を行った。

##### 4.2 状態遷移図と状態方程式

セル# $j$ の片車線での呼量が時間的に変動する場合の、通信トラヒックの過渡特性の解析を行うためには、セル# $j$ に関する状態方程式を立てる必要がある。3.の定常状態の解析と異なる点は、セル# $j$ において、片車線の呼量が時間的に変動するため、左車線と右車線での呼の生起率が異なるので、左右の車線で同じ時刻で、呼の存在する確率が異なることである。また、呼量が一定の側の道路では、呼の生起率やハンドオフ確率が一定であるが、解析しようとするセルの微小時間の間の同時接続数の変化を求めるためには、呼量一定の道路も考慮する必要がある。そこで、図4のようにセル# $j$ 内で、左右の車線での同時接続数を $r_L$ と $r_R$ の二つに分けて解析を行った。また同図にセル# $j$ に入ってくる呼と出ていく呼に関するハンドオフ確率を示す。

セル# $j$ 内の同時接続数 $r_L, r_R$ に関する状態遷移図を図5に示す。ここで、呼量の変化はセル# $j$ の左車線で起こるものとする、 $(r_L, r_R)$ という状態と $(r_L-1, r_R)$ という状態の間を遷移する確率 $A, B$ は次式のように表される。

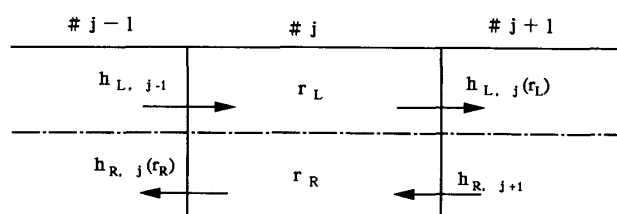


図4 セル# $j$ における同時接続数  
Fig. 4 Number of calls in the cell # $j$ .

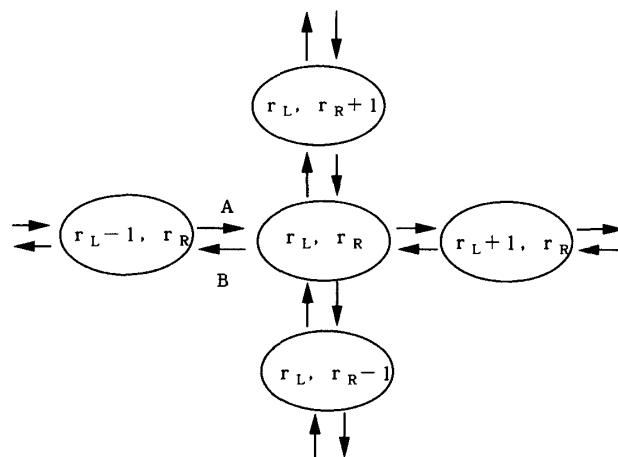


図5 状態遷移図  
Fig. 5 State transition diagram.

$$A = \lambda_L(t) + h_{L,j-1} \quad (11 a)$$

$$B = \mu(r_L + r_R) + h_{L,j}(r_L) + h_{R,j}(r_R) \quad (11 b)$$

ここで、 $\lambda_L(t)$  は時刻  $t$  における、セル  $\#j$  の左車線での呼の生起率である。また、 $h_{L,j}(r_L)$ 、 $h_{R,j}(r_R)$  は、セル  $\#j$  で、左右の車線の同時接続数がそれぞれの  $r_L$ 、 $r_R$  ときのハンドオフ確率である。

状態遷移図より、セル  $\#j$  に関する状態方程式を立てると次式のようになる。

$$\begin{aligned} P'_j(r_L, r_R, t) &= [\lambda_L(t) + h_{L,j-1}]P_j(r_L-1, r_R, t) \\ &\quad + [\lambda_R + h_{R,j+1}]P_j(r_L, r_R-1, t) \\ &\quad + [(r_L+1)\mu \\ &\quad + h_{L,j}(r_L+1)]P_j(r_L+1, r_R, t) \\ &\quad + [(r_R+1)\mu \\ &\quad + h_{R,j}(r_R+1)]P_j(r_L, r_R+1, t) \\ &\quad - [\lambda_L(t) + \lambda_R + (r_L + r_R)\mu \\ &\quad + h_{L,j}(r_L) + h_{R,j}(r_R) \\ &\quad + h_{L,j-1} + h_{R,j-1}]P_j(r_L, r_R, t) \end{aligned} \quad (0 \leq r_L + r_R < S) \quad (12 a)$$

$$\begin{aligned} P'_j(r_L, r_R, t) &= [\lambda_L(t) + h_{L,j-1}]P_j(r_L-1, r_R, t) \\ &\quad + [\lambda_R + h_{R,j-1}]P_j(r_L, r_R-1, t) \\ &\quad - [(r_L + r_R)\mu \\ &\quad + h_{L,j}(r_L) \\ &\quad + h_{R,j}(r_R)]P_j(r_L, r_R, t) \end{aligned} \quad (r_L + r_R = S) \quad (12 b)$$

ここで、

$$P_j(r_L, -1, t) = P_j(-1, r_R, t) = 0 \quad (13 a)$$

$$\sum_{r_L=0}^S \sum_{r_R=0}^{S-r_L} P(r_L, r_R, t) = 1 \quad (13 b)$$

である。

また、 $\lambda_L(t)$ 、 $\lambda_R$  はそれぞれセル  $\#j$  の左右の車線での呼の生起率である。また、“'” は  $t$  による微分を示している。

2.2 の仮定 (i) と 4.1 の仮定 (vii) より、セル  $\#j$  において、左右の両車線での移動体の密度と生起呼量は等しい。従って、セル  $\#j$  で呼が時刻  $t$  において、左右の両車線において、1 個の呼がセル端に存在する確率は等しく  $1/L$  であり、時刻  $t$  において左右の車線に、それぞれ  $r_L$  個、 $r_R$  個の呼が存在するときのハンドオフ確率  $h_{L,j}(r_L)$ 、 $h_{R,j}(r_R)$  は次式のように表される。

$$h_{L,j}(r_L) = r_L h \quad (14 a)$$

$$h_{R,j}(r_R) = r_R h \quad (14 b)$$

ここで、 $h = V/L$  である。

また、隣接する  $\#j-1$  と  $\#j+1$  のセルから状態のハンドオフ確率は、仮定 (viii) より定常状態の場合と同様に式 (6 a)、(6 b) のように表される。

これらの状態方程式の解析解を求めることは困難であるため、ルンゲクッタ・ギル法を用いた数値計算で解くことにより、セル  $\#j$  の通信トラヒックの過渡特性の解析を行った。一般に微分方程式を解く方法として、ルンゲクッタ法が用いられているが、ルンゲクッタ・ギル法はルンゲクッタ法よりも記憶容量が少なくすむという理由から、本論文ではこの方法を用いた [7]、[8]。なお、呼損率は  $r_L + r_R = S$  となる状態をとる確率の和で表される。

解析はまず、セル  $\#j$  に加わる呼量  $a_j(t)$  が、図 6 のように 1 erl から左車線で 1 erl 増加し、2 erl という値にステップ的に変化し、他のセルに加わる呼量は 1 erl の場合について行った。なお、一般にトラヒックの過渡特性は、トラヒックが 0 erl の状態からの特性の時間的

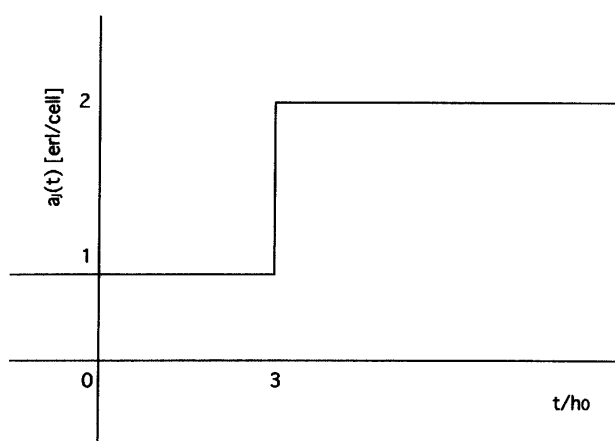


図 6 呼量の時間的变化 (ステップ的变化)  
Fig. 6 Change of offered traffic (step function).

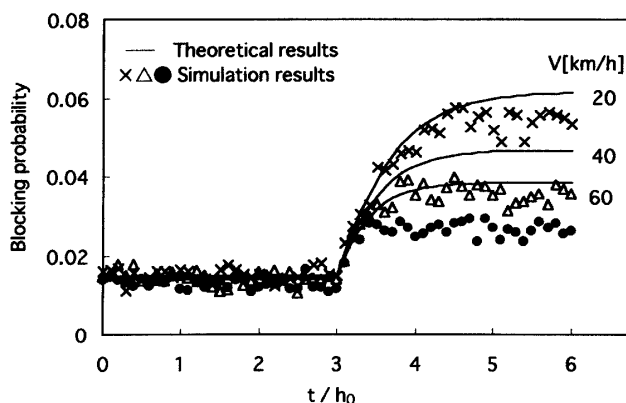


図 7 通信トラヒック特性  
Fig. 7 Blocking probability vs. time.

な変化を示す。しかし、本論文では、セル内に初期の段階で、移動体が存在しているとしており、そのために、トラヒックが  $0 \text{ erl}$  以上の値から特性が変化することをトラヒックの過渡特性とした。

解析結果を図7に示す。横軸は時刻  $t$  を平均保留時間  $h_0$  で規格化したもので、縦軸は呼損率であり、速度  $V$  をパラメータとしている。また、セル長  $L=1 \text{ km}$ 、平均保留時間  $h_0=90 \text{ s}$ 、チャンネル数  $S=4$  とした。また、同図にシミュレーション結果を示す。シミュレーションは、時刻  $-10h_0$  から開始し、時刻  $0$  から  $6h_0$  までの間で行っている。解析の対象とするセルの呼量を図6のように時間的にステップ的に変動させて行った。図7のデータは繰返し数を20万回としたときの値である。繰返し数は、それ以上回数を増加させても、呼損率の値にばらつきが生じない回数とした。ある時刻  $t$  における呼損率は、 $t$  から微小時間  $\Delta t$  だけ経過した  $t+\Delta t$  の間に生じまたはハンドオフした呼数と、それらの呼の中で呼損となった呼数の比をとったものである。なお、 $\Delta t$  はそれ以上小さくしても呼損率が変化しない値として、 $\Delta t=2 \text{ s}$  とした。

呼損率は、呼量の変化する  $t=3h_0$  で急激に増加し、徐々に定常状態に近付いて行くことがわかる。理論値とシミュレーション値を比較すると、呼量の変化した直後では、よく一致していることがわかる。また、定常状態の部分で若干の誤差が生じている。これは、仮定でセル内の移動体の分布を一様分布とし、呼の分布も一様として解析を行ったが、時間が経過すると呼の分布が一様分布からずれてくるためであると考えられる。その理由として、つぎのようなことが考えられる。各セルの呼量が一定である場合、あるセルから両脇のセルにハンドオフする呼数と、両脇のセルからハンドオフして来る呼数の差は小さくなく、呼の分布は一様分布に近いと考えられる。しかし、特定のセルの呼量が他のセルより大きい場合、他のセルからのハンドオフ呼数よりも、そのセルから両脇のセルへのハンドオフ呼数が多くなる。その場合、呼の生起位置は一様分布に従うが、時間が経過するに従って、呼は左右に移動することになる。従って、シミュレーションでは呼の分布は、セルの中心部よりもセルの両端に近づくほど大きくなると考えられる。そこで、呼の分布を一様分布と仮定したときよりも、ハンドオフ確率が大きくなり、呼損率は、解析値よりもシミュレーション値のほうが小さくなると考えられる。

しかし、呼損率の時間的な変化の傾向等を全体的に

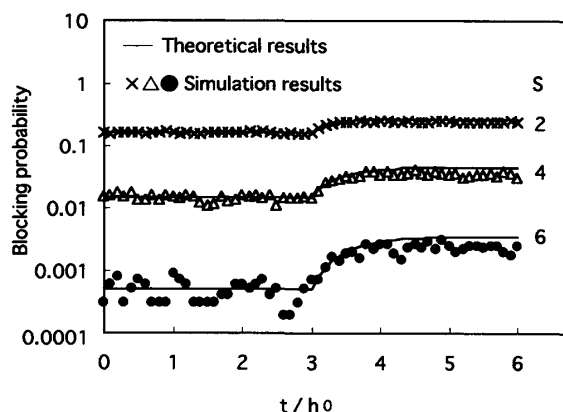


図8 通信トラヒック特性  
Fig. 8 Blocking probability vs. time.

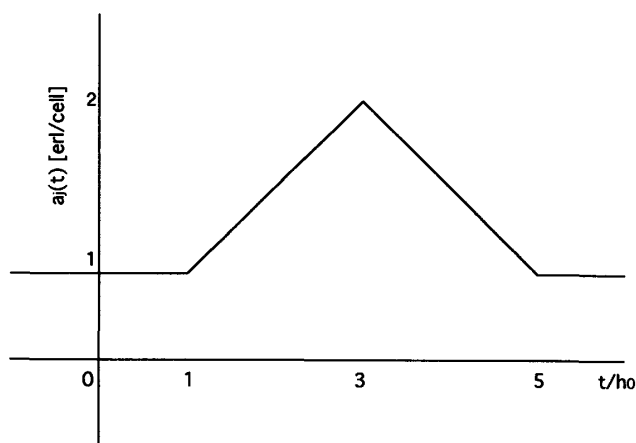


図9 呼量の時間的变化 (三角波的变化)  
Fig. 9 Change of offered traffic (triangle function).

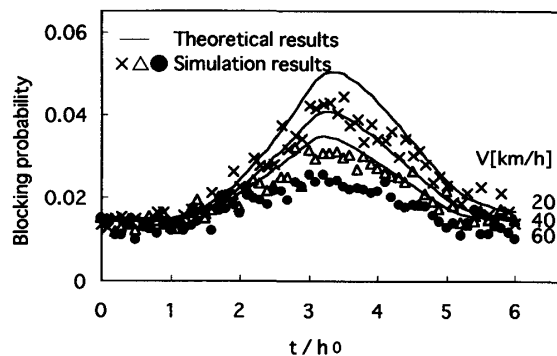


図10 通信トラヒック特性  
Fig. 10 Blocking probability vs. time.

みると、理論値とシミュレーション値は比較的良好に一致しており、解析結果は妥当であると考えられる。また、理論値のほうがシミュレーション値より呼損率が高くなっていることから、理論値が危険側を示しているため、理論値は有効であると考えられる。

つぎに、呼量の変化が図6と同様であり、チャンネル数をパラメータとした場合の解析結果を図8に示す。この場合も理論値とシミュレーション値は比較的良好に一致しており、解析結果は妥当であると考えられる。

また、呼量の変化が図9のように、左車線で3角波状に変化する場合の通信トラヒック特性を求めた。結果を図10に示す。呼損率は呼量の変化よりやや遅れて増加し、また定常状態に戻っていくことがわかる。ここでも理論値とシミュレーション値は比較的良好に一致していることがわかる。また、この結果も理論値が危険側を示しているため、理論値は有効であると考えられる。

## 5. むすび

セルラ移動通信系において、帯状サービスエリアを解析モデルとして、移動体の移動方向が双方向である場合の通信トラヒック特性の解析を行った。解析は、まずセルに加わる呼量が一定の場合の定常状態の場合について行った。解析を行うには、対象とするセルに関する状態方程式を解く必要がある。本論文では、状態方程式を立てるために必要な呼のハンドオフ確率を新たに導出した。そして、状態方程式を解くことにより、定常状態での通信トラヒック特性の解析を行った。つぎに、事故や渋滞等の理由で、特定のセルにおいて呼量が時間的に変動する場合の通信トラヒックの過渡特性の解析を行った。過渡特性の解析は、状態方程式を連立微分方程式で表し、それを数値計算で解くことにより行った。定常状態と過渡状態のいずれの場合にも、解析結果をシミュレーション値と比較したところ、両者は比較的良好に一致したため、解析結果の妥当性が示された。

本論文の解析結果は、双方向の帯状サービスエリアにおいての回線設計に役立つものと考えられる。また、本論文では左右の車線での移動体の密度や速度が同一であると仮定して解析を行ったが、今後の課題としては、左右の車線で密度や速度の異なる場合の解析があげられる。そのような場合の通信トラヒック特性の解析は、定常状態や過渡状態にかかわらず、解析の対象とするセルとそのセルに隣接する複数のセルを同時に扱わなければならない。その場合セル数を $N$ とすると、扱う状態数が $N$ 乗のオーダーで増加するため、解析を行うことは困難である。しかし本論文では、呼のハンドオフ確率を左右の車線で独立に表したため、左右の車線での移動体の密度や速度を解析的に表し、状態

数を減らす近似等を行うことができれば、解析が可能であると考えられる。

**謝辞** 本研究において有益な御助言を頂いた、日本精機(株)嶋田一彦氏に感謝致します。

## 文 献

- [1] 進士昌明, "移動通信", 丸善, 1989.
- [2] M. Sengoku, H. Tamura, S. Shinoda, and T. Abe, "Development in Graph-and/or Network-Theoretic Research of Mobile Communication Channel Assignment Problems," IEICE Trans. Fundamentals, vol. E77-A, no. 7 pp. 1117-1123, July 1994.
- [3] 大塚 晃, 仙石正和, 山口芳雄, 阿部武雄, "移動体の流れと移動通信トラヒックに関する基礎研究," 信学技法, CAS86-249, pp. 81-88, 1987.
- [4] T. Kabasawa, M. Sengoku, S. Shinoda, and T. Abe, "Transient Characteristics of Mobile Communication Traffic in a Band-Shaped Service Area," IEICE Trans. Fundamentals, vol. E76-A, no. 6, June 1993.
- [5] G. Montenegro, M. Sengoku, Y. Yamaguchi, and T. Abe, "Time-Dependent Analysis in a Ring-Shaped Service Area with Non-Uniform Vehicle Distribution," IEEE Trans. Vehicular Technology, vol. 41, no. 3, pp. 243-254, 1992.
- [6] 秋丸春男, 川島幸之助, "情報通信トラヒック, 電気通信協会", 1990.
- [7] S. Kuo, FORTRAN のための数値計算法, 科学技術出版社, 1972.
- [8] B. Carnahan, H. A. Luther, and J. O. Wilkes, 計算機による数値計算法, 科学技術出版社, 1982.

(平成7年4月4日受付, 7年7月4日再受付)



樺澤 辰也 (正員)

昭61新潟大・工・電子工卒。昭63同大大学院修士課程修了。平元長岡高専・電気工・助手。移動体通信系のトラヒック理論に関する研究に従事。



仙石 正和 (正員)

昭42新潟大・工・電気卒。昭47北大大学院博士課程了。工博。同年北大・工・電子助手。新潟大・工・情報助教授を経て、現在、同教授。回路網理論, グラフ・ネットワーク理論, 情報伝送特に移動通信の研究に従事。平3年度論文賞受賞。著書「演習グラフ理論」(共著)。