

# シミュレーションによる移動体通信の基地局配置の検討

山田 孝子<sup>†</sup>, 高橋 幸雄<sup>‡</sup>, バロリ レオナルド<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 山形大学人文学部総合政策科学科

<sup>‡</sup> 東京工業大学大学院情報理工学研究科

<sup>†</sup> {takako,barolli}@human.kj.yamagata-u.ac.jp

<sup>‡</sup> yukio@is.titech.ac.jp

これらの移動無線通信システムで呼源となるユーザの分布は実際の都市において偏在し、ときには集中して存在している。ここでは移動体無線通信システムで基地局をどのようなポリシーに基づき配置するのがよいか、というべきか、ということを考えるため、多数の基地局をサーバとしてもち、サービス領域内の位置に識別されるユーザから構成される待ち行列モデルをベースとしたシミュレーションモデルを作成し、様々な配置パターンについてユーザの呼損率などの尺度を用いて比較を行った。

## Evaluation by Simulations of a Base Station Location Policy for Mobile Telephone Networks

Takako Yamada<sup>†</sup>, Yukio Takahashi<sup>‡</sup>, Leonard Barolli<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Department of Public Policy and Social Studies

Yamagata University

<sup>‡</sup> Department of Mathematical and Computing Sciences

Graduate School of Information Science and Engineering

Tokyo Institute of Technology

In this paper, we propose a new model for base station allocation in mobile telephone networks based on queuing theory. In our simulations, we consider many service stations and customers identified by their locations. Our purpose is to examine the relation between some important parameters such as cell size, the number of base stations, the number of channels and the Quality of Service (QoS) for mobile telephone users. The mobile users are not distributed uniformly and their distribution effects the cell traffic. The performance evaluation by simulations shows that our policy can make a good base station allocation, which results in an increase of users QoS.

### 1 はじめに

日本の移動無線通信システムでは、世界に先駆けて小ゾーン（セル）と呼ばれる多数の小規模の基地局を設け、それらの連携により広いサービス領域をカバーする方式が採用された。これらの移動無線通信システムで呼源となるユーザの分布を実際の都市において観察すると、サービス領域内に均一に存在することは実際には希であり、道路沿いや、都心部、あるいはイベント会場や駅など、領域の中に偏

在し、ときには集中して存在している。またユーザの分布、利用時間などは一日の時間帯によってかなり変動することが知られている。

移動通信システムを対象とする研究は多数存在するが、実際にユーザがサービス領域内に偏在するような場合、どのようなポリシーのもとに領域を効率良くカバーできるように基地局を配置するべきか、といったような観点でなされた研究例は筆者の知る限りあまり多くない [1, 2, 3].

筆者らはこれまでもコンピュータシミュレーションを用いて、PHSのような通信システムのシミュレーションモデルについて検討をおこなってきた。時間帯によりユーザの地理的な分布や利用形態が異なることに着目し、ユーザが発信場所を恣意的に選択するモデルを提案してきた [4]。そしてこれらの結果から、ユーザ人口の分布がモデルにとって本質的に重要な要素であり、できるだけ実態に即した形で導入する必要があると考えるにいたった。そこで今回のモデルでは、移動通信のユーザ人口の平面的な分布として、実際に存在する都市を想定し、できるだけ具体的にユーザの分布を取り込んだシミュレーションを作成した。しかし、本シミュレーションは移動通信システムの精緻な性能評価を目的とするものではなく、むしろ地域の情報基盤である公共財としての移動通信システムをマクロな視点からモデル化し、システムをどのように構築するのがよいか、という問題を考えることにある。従ってユーザ人口の分布以外の要素については基本的に [4] を踏まえ、さまざまな配置パターンで設置した基地局に対して、ユーザの呼損率などの尺度を用いて比較を行った。

移動無線通信システムと一口にいても、一つの基地局がカバーする領域の広さ(セル)、同時に利用可能なユーザ数、移動通信中のユーザの移動可能な速度は様々である。たとえばセルの大きさひとつとっても、半径数km~10数km程度の領域をカバーする携帯電話から、せいぜい半径100m~500m程度しかカバーしないセルを用いるPHS(Personal Handy Phone)まで大小様々である。ここではシミュレーションの結果が理解しやすいPHSを念頭にセルのサイズやチャンネル数などのパラメータの設定を行っているが、パラメータ値を変えることにより、携帯電話などのシステムへも応用可能であると考えている。

## 2 シミュレーションモデル

### 2.1 モデルの概要

本シミュレーションは複数のサーバ(基地局)と発生場所により識別される客(ユーザ)からなる待ち行列モデルをベースにしている。客はそれぞれの発生位置に従ってサーバ(基地局)に到着し、サービス(通信)を受け、システムから退去する。シミュレーションではサービス領域として図1に示す14.4km×17.4kmの広さで、人口およそ20万人をもつ実際の地方都市(山形市)を想定する。そして



図1: サービス領域地図

左上を原点とする600×800の矩形のサービス領域に呼源となるユーザ人口分布を与え、様々な配置パターンと性能を持つ基地局を配置し、ランダムな時間間隔で移動通信を行うユーザを発生させて、基地局に接続したユーザが移動しながら通信を行う様子をシミュレートする。

図2にモデルとなった山形市のサービス領域内の人口分布を表示する。実際の山形市の人口は都心部と図に示した高速道路、国道、県道に沿った道路に沿うようにほとんどが分布している。シミュレーションではユーザの人口分布を10×10の矩形領域ごとに与えている。

今回用いたモデルでは、ユーザーが道路に沿って移動することや基地局を道路沿いに設置することなどを考慮していないが、人口分布は道路に沿って集中しているため、実質上ユーザはほぼ道路に沿いの領域を中心に発生している。

ユーザーによる発呼および着呼は、与えられた確率分布に従って発生場所、利用時間、移動速度、移動方向がランダムに与えられる。実際の移動通信を利用しているユーザを見ていると、発呼のときは通信可能な領域にいるかどうか確認して発信していることが多いようである。しかし、今回はそのようなユーザの行動の恣意性やそれに伴う発呼、着呼の区別は考慮していない。

それぞれのユーザは通話の開始から終了まで、帰属する基地局を決め、通信を行う。ユーザが存在する位置をカバーする基地局に空きチャンネルがあれば、その局を帰属局として1チャンネルを占有して通話を行う。ユーザが通話中に移動した場合、帰属局の変更(ハンドオーバー)を繰り返しながら、通話を継続する。ユーザは通話を終了するとただちに帰属

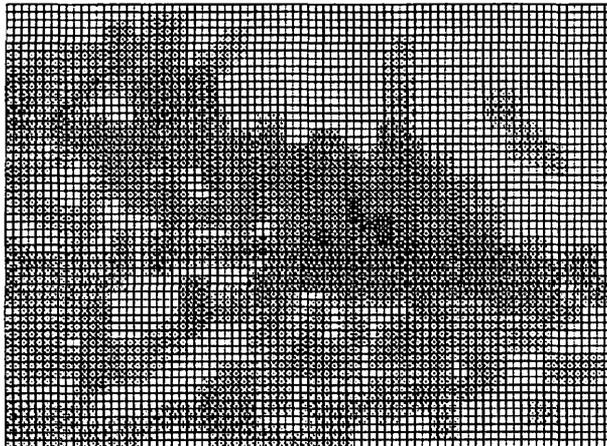


図 2: サービス領域内の人口分布

局のチャネルを開放しシステムから退去する。帰属局のチャネルに空きがない場合や、基地局がカバーする領域外に出た場合は、通話は切断され、その時点で呼損としてシステムから退去する。

## 2.2 ハンドオーバー

移動通信モデルにおいて一つのポイントとなるのが、ハンドオーバーの扱いである。ハンドオーバーとは通信を行いながら移動するユーザの場所の変更に伴い帰属する基地局を変更することである。

ユーザが隣接するセルから移動してくるとき、移動先の基地局で即座に空きチャネルを割り当てることができなくても、ユーザがセル間のハンドオーバーエリアと呼ばれる領域にいる間は、もとの基地局のチャネルを使用しながら、移動先の基地局のチャネルの空きを待つことができる。もしユーザがハンドオーバーエリアにいる間に移動先の基地局のチャネルがあれば、ユーザが帰属する基地局の変更、すなわちハンドオーバーを行い、通話を続行する。もし複数の接続可能な移動先の基地局が存在すれば、ユーザの位置に最も近い基地局で空きチャネルのある局に優先して接続する。もし、どの基地局にも空きチャネルがなければ、そのユーザはハンドオーバーエリアから退去する時点で強制的に通話を切断される。

## 3 シミュレーションのパラメータ

### 3.1 初期状態

シミュレーションは時刻 0 分から時刻 600 分までを一回として実行する。初期状態として、180 分のシミュレーションで生成された通話中のユーザ分布と残り通話時間を、シミュレーション開始時の初期

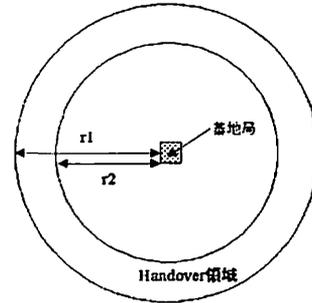


図 3: セルとハンドオーバー領域

状態として与える。ユーザは  $360/200000$  の確率で通信を開始する。モデルにより多少の変動はあるが、この発生間隔で 600 分間におよそ 215000 のユーザが発生する。発生したユーザに対して、人口分布に比例した確率でサービス領域内の一点が選ばれる。ユーザの発生地点を含むセルの基地局で最もユーザに近く、かつ空きチャネルを持つ基地局がそのユーザの最初の帰属局となる。

### 3.2 ユーザのパラメータ

ユーザの通話時間分布として 2 種類を設定した。発生したユーザごとに、長時間通話するタイプと短時間通話するタイプのどちらかがそれぞれ確率 0.1 と 0.9 で選択される。長時間通話タイプは平均通話時間 20 分の指数分布、短時間通話タイプは平均通話時間 4 分の指数分布で通話時間を設定している。

ユーザの移動速度は分速およそ 80m を平均とする指数分布で与える。また移動方向は  $0 \sim 360$  度から一様に選択される。今回はユーザの移動中の方向の変化や道路に依存する移動などは考慮していない。もし通話開始時点で接続可能な基地局のすべてのチャネルが使用中であれば、そのユーザの呼は呼損となる。

### 3.3 ユーザ人口の分布

本シミュレーションの呼源の発生場所は、山形市をモデルとしたサービス領域内の人口分布に比例した確率でランダムに選ばれる。

ここでは人口分布を作成するために、実際の市内の加入電話契約数と実際の人口分布を参考に、 $10 \times 10 = 100$  個の格子をひとまとめにした  $60 \times 80$  の各矩形領域ごとに 0, 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 の 11 段階のウェイトを与え、このウェイトに応じて全矩形領域の総人口が 20 万になるよう、各矩形領域に人口を割り当てた。この人口分布を人口の多い順に矩形領域を濃い色で表示したのが図 2 である。ただしデータの不連続性を緩和するため、各

格子の人口は周辺の矩形領域の人口を加味した移動平均を用いて平滑化してある。

### 3.4 基地局の設置方法

サービス領域内に設置される基地局の総数と設置場所、基地局ごとのチャネル数はあらかじめ与えられ、各基地局は図3に示すように局を中心とするある半径を持つ円形の領域(セル)をカバーするものとする。基地局が隣接する場合には、複数の基地局でカバーされる地域が存在する。また、各セルで同時に接続できる最大可能ユーザ数はチャネル数として与えられる。今回のシミュレーションでは一つの基地局のチャネル数として3と10の二つのタイプを用いている。

基地局は以下に述べる手順を設置する基地局の個数回繰り返して、サービス領域内に設置する。最初に配置場所を選択するために各矩形領域に人口ウェイト  $w$  を導入する。各矩形領域の人口ウェイト  $w$  の初期状態としてユーザ人口分布を与える。

1. 基地局の設置場所とする矩形領域を人口ウェイトに比例する確率で1つ選ぶ。たとえば、 $i$  番目の基地局を設置するときの矩形領域  $j$  の人口ウェイトを  $w_j^i$ 、全矩形領域の人口ウェイト和を  $W^i = \sum_{j=1}^{4800} w_j^i$  とする。このとき矩形領域  $j$  が基地局を設置する領域として選ばれる確率は  $w_j^i/W^i$  である。
2. その矩形領域内の一点をランダムに選択し、基地局を設置する。
3. その基地局によってカバーされた領域の人口ウェイト  $w_j^i$  から、基地局を利用する基本ユーザ数  $s$  を引き  $w_j^{i+1} = w_j^i - s$  によって新しい人口ウェイト和を求める。
4. 更新された人口ウェイトを用いて同じ手順を繰り返す。

今回のシミュレーションでは一つの基地局の基本ユーザ数として100人、500人、1000人、2000人、4000人の6種類(表1)を用いた。それぞれのケースを aタイプ ~ eタイプ と呼び、基地局を設置する矩形領域の選択に用いる。基本ユーザ数  $s$  が小さければ、ユーザ人口密度の高いところに基地局が集中して設置され、逆に基本ユーザ数  $s$  が大きいほど、基地局がサービス領域内に分散して設置される傾向をもつ。

表 1: 基本ユーザ数とタイプ名

タイプ名	基本ユーザ数
aタイプ	100人
bタイプ	500人
cタイプ	1000人
dタイプ	2000人
eタイプ	4000人

表 2: 基地局のセルサイズ

セルサイズ	r1	r2
Lタイプ	360m	300m
Mタイプ	200m	160m
Sタイプ	80m	60m

### 3.5 基地局のパラメータ

1つの基地局がカバーするセルは局を中心とする円形の領域とし、その半径サイズとして S, M, L の三種類を用意する。各サイズにおける基地局のセル半径とハンドオーバー領域の半径を表2に示す。基地局はセルの中心にあり、基地局からハンドオーバー領域までの半径を  $r1$ 、セル領域の端までの半径を  $r2$  であらわす。この表2の長さ1単位は実際の距離の約20mに相当する。それぞれのサイズに対しチャネル数は3と10の2種類を用意した。カバーする広さとチャネル数以外はすべての基地局は同一の機能をもつものと仮定する。基地局配置タイプ名の表記は { 基地局セルサイズ名・基本ユーザ数タイプ名・設置基地局数 } の順番で記述する。例えば図4に示す基地局のケースは、セルサイズがLタイプで、基地局を設置するときの使用した基本ユーザ数が2000、設置基地局数100なので“Ld100”となる。

## 4 シミュレーション結果と検討

シミュレーションの実行途中の例を図4に示す。ここで用いたモデルはLd100で、図中の小さな点は発生したユーザを表す。

### 4.1 評価尺度

今回のシミュレーションでは、ユーザの通話ができない状況を3種類に分けて扱う。最初にシミュレーションの中のユーザの状態を表す記号を以下のようにし、これらを用いて5つの評価尺度を定義する。

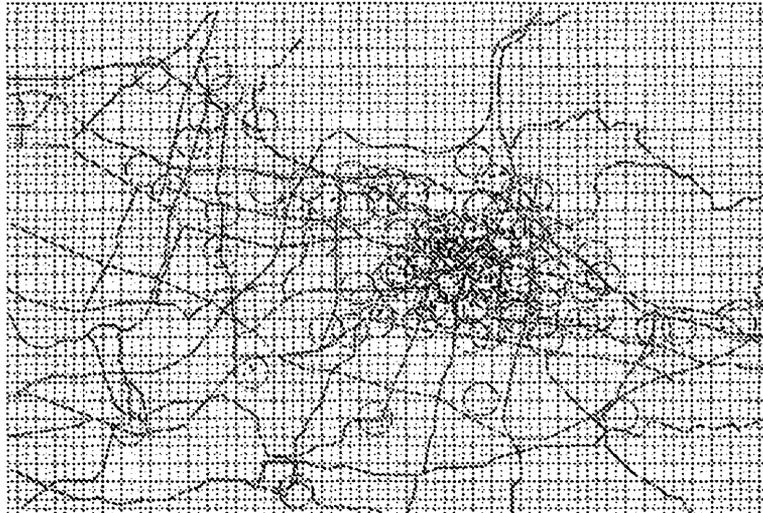


図 4: シミュレーション実行例:Ld100

$U_{total}$  シミュレーションの総ユーザ数  
 $U_{complete}$  シミュレーション中、  
 通話を終了できたユーザ数  
 $U_{out}$  基地局カバー領域外で発生し、  
 呼損となったユーザ数  
 $U_{channel}$  空きチャンネル数がなく、  
 通話開始に失敗したユーザ数  
 $U_{stop}$  通話中にセル外に移動、または移動先  
 空チャンネルがなかったユーザ数

通話開始率

$$R_{connect} = (U_{total} - U_{out} - U_{channel}) / U_{total}$$

通話終了率

$$R_{complete} = U_{complete} / U_{total}$$

領域外呼損率

$$R_{out} = U_{out} / U_{total}$$

チャンネル呼損率

$$R_{channel} = U_{channel} / U_{total}$$

強制切断呼損率

$$R_{stop} = U_{stop} / U_{connect}$$

上のユーザが基地局に接続できず通話をあきらめなくてはならないのに対し、サイズがLであれば、300~400の設置で9割以上のユーザが基地局と接続できる。この図からセルサイズがPHSのように小さいシステムでは基地局数が100や200では事業としてほとんど成り立たないが、セルサイズを変えるだけで最初から通話開始できないユーザを大幅に減らせることがわかる。

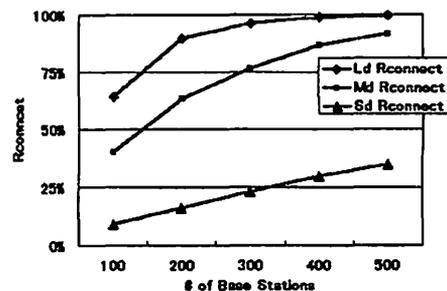


図 5: セルのサイズ L, M, S と  $R_{connect}$

#### 4.2 セルのサイズと $R_{connect}$

基本ユーザ数を 2000 人としてサイズが L, M, S の基地局を 100~500 配置する。それぞれの配置パターンについてシミュレーションを行い、通話接続率  $R_{connect}$  を図 5 に示す。この通話開始率  $R_{connect}$  は通話を行おうとしたユーザが基地局に接続できたかどうかを示す指標であり、ユーザにとって基本的なサービスの指標である。基地局の領域サイズが S の場合、配置した基地局数が 500 であっても 6 割以

#### 4.3 基地局配置、チャンネル数と $R_{stop}$

$R_{stop}$  はユーザが通話中に移動してセル外に出た場合や移動先隣接セルへのハンドオーバーに失敗して通話途絶となった呼の割合である。図 6 にセルサイズが L で配置の方法が a と d のタイプでチャンネル数が 3 と 10 のケースについて示す。チャンネル数 10 ではセルができるだけ広範囲を覆うように配置したほうが、移動中にセル外に出てしまうことを防げるので、基地局数が増えたとき  $R_{stop}$  を低くできる効果が大きい。

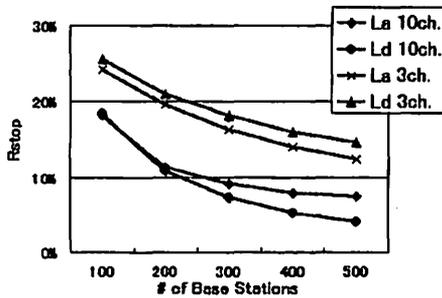


図 6: 基地局配置, チャンネル数と  $R_{stop}$

#### 4.4 基地局の配置と $R_{channel}$

基地局を設置するとき用いる基本ユーザ数を変化させると, サービス領域内の基地局の散らばりの度合い, 即ち基地局が他の基地局と重複せず領域をカバーする度合いを変えることができる. 図 7 に, セルのサイズを  $L$  として, チャンネル数 0 の場合に基本ユーザ数を a タイプ ~ e タイプまで変更したときの  $R_{channel}$  を示す. a タイプでは基地局はユーザ人口が集中する都心部に重複するように配置され, e タイプでは基地局はサービス領域を広くカバーするように分散して配置される. この通話開始時に帰属局に空チャンネルがないために呼損となるユーザの割合  $R_{channel}$  は設置する基地局数にかかわらず a タイプのほうが e タイプよりも少ない. チャンネル数 3 でも同様の傾向がみられる.

これはユーザにとってのサービス品質としては a タイプの集中配置が好ましいことを示唆するものである. しかし, 一方で, 移動体通信の事業者にとってサービスエリアの広さは重要なセールスポイントであり, どのように両者のバランスをとるかが問題であることを示している.

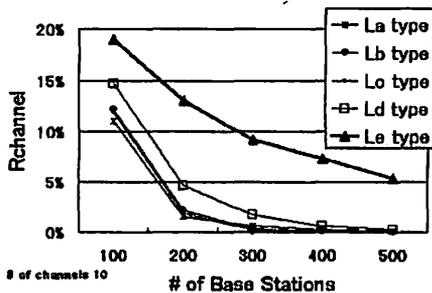


図 7: 基地局の配置と  $R_{channel}$

## 5 今後の課題

本シミュレーションでは移動通信システムの基地局設置をどのような規範のもとで設置するべき

か, という問題について, 配置方法, セルサイズ, チャンネル数, 設置基地局数などのシステムの基本的な要素とユーザの Qos の関係から検討した.

そして実際の都市を想定して基地局を配置し, 人口に依存したユーザをランダムに発生させてシミュレーションを行い, 基地局への接続率, 強制切断率などの尺度を用いて評価を行った.

しかし基地局をどのように配置すればユーザにとって利便性が高く, 品質の高いサービスか, という問題には発信と着呼を分けた評価やユーザの恣意性の表現が重要な要素として考えられる. 具体的には時間帯によりユーザの分布や利用時間はダイナミックに変化することや実際の移動通信を利用しているユーザを観察していると, 特に発呼のときは通信可能な領域にいるかどうか確認しながら発信する, といった恣意性をもった行動をとっていることがあげられる. 今後はこのような要素をモデルに取り込んでより経済的, 経営的な視点から, 一般性をもつ関係を求めたい.

## 参考文献

- [1] P. Tran-Gia, K. Leibnitz, K. Tutschku, Teletraffic Issues in Mobile Communication Network Planning, *Proceedings of 11th ITC Specialist Seminar (Yokohama)*, pp.48-57, 1998.
- [2] A. Hác, X. Zhou, Locating Strategies for Personal Communication Networks: A Novel Tracking Strategy, *IEEE J.Select. Areas in Commun.*, Vol.15, pp.1425-1436, 1997.
- [3] K. Tutschku, P. Tran-Gia, Spatial Traffic Estimation and Characterization for Mobile Communication Network Design, *IEEE J.Select. Areas in Commun.*, Vol.16, pp.804-811, 1998.
- [4] 山田孝子 高橋幸雄, The location of base stations in the personal handy phone systems, 情報通信ネットワークの新しい性能評価法に関する総合的研究 (科研費基盤研究 (A)(1) 課題番号 08308025 研究代表者高橋幸雄) シンポジウム報文集, 1998.