

# レイトレースを用いたストリートマイクロセル伝搬推定システム

## Street Microcell Area Prediction System using Ray-Tracing Method

ストリートマイクロセル内の伝搬損失を精度良く推定する方法にレイトレース法がある。しかし、エリア推定システムとして実用化するには処理の高速化が不可欠であった。本稿ではレイトレース法を用いて高速処理を可能とする伝搬路モデルを提案し、そのモデルに基づいて開発したエリア推定システムSMAP (Street Microcell Area Prediction system) の概要について述べる。

In the propagation loss prediction for street microcell environment, ray-tracing method has been introduced with a relatively high level of accuracy. However it takes a lot of times for obtaining high prediction accuracy, so the problem has to be solved when this method is applied to area prediction systems. In this paper a ray-tracing method with higher speed and higher accuracy is proposed. Furthermore, area prediction system SMAP (Street Microcell Area Prediction system) and its system configuration and major performance are described.

今井 哲朗 犬飼 裕一郎 藤井 輝也  
Tetsuro Imai Yuichiro Inukai Teruya Fujii

### まえがき

近年、携帯・自動車電話の発展は目覚ましく、システム容量を増大させることが大きな課題となっている。その解決策の一つに、基地局アンテナを周辺建物より低い道路際に設置し、道路に沿った比較的小きなセル（数百メートル程度）でサービスエリアを構成するストリートマイクロセル構成がある[1], [2]。このようなストリートマイクロセルを効率良く設計するには、設置した基地局に対してサービスエリアを精度良く推定できるエリア推定システムが不可欠である。

ところで、周辺建物より比較的高い位置に基地局アンテナを設置し、大きなサービスエリアを確保するマクロセル構成では、移動測定車により収集した実測データを統計的に分析して、最

も測定値にフィットするように作成された伝搬損失推定式（実験式）[3], [4]を用いたエリア推定システムが実用化されている[5], [6]。しかし、基地局アンテナ高を周辺建物より低く設置した場合は、電波が道路沿いの建物間で反射、回折を繰り返しながら道路に沿って伝搬するため、それらの建物が渾然と並んでいる場合には高精度な伝搬推定式（実験式）を作成することは困難であった。

そこでストリートマイクロセル内の電界強度を比較的精度良く推定する方法として幾何光学近似に基づいたレイトレース (Ray Trace) 法がある[7], [9]。しかし、レイトレース法では送受信間の幾何学的なレイのトレースを求めただけで比較的単純に電界強度を推定できる反面、建物形状、道路幅などのデータベースを必要とし、特に建物数が増大すると演算処理量が激増す

る。そのためレイトレース法によるエリア推定システムを実用化するには処理の高速化が強く求められていた。

本稿では、電波が主に道路に沿って伝搬することに着目し、送受信間の伝搬路を道路面とその両端に連続した壁面があると仮定した溝型伝搬路において、道路沿いの建物の属性（位置、形状、電気的特性など）をその両端の壁面に仮想的にマッピングし、レイトレースが簡易に行える溝型伝搬路モデルを提案している。本モデルは道路沿いのすべての建物を高々2面の壁面で代表させることができるため、レイトレース処理の高速化が期待できる。そして提案したモデルに基づいて開発したストリートマイクロセル対応のエリア推定システムSMAP (Street Microcell Area Prediction system) の概要について述べる[10], [11]。

## レイトレースとは

図1にレイトレースの概要を示す。送信点（基地局BS）から全方位に満遍なく放射された電波の素波（Ray）は、途中の構造物（建物）で幾何学的に反射、透過、回折を繰り返して受信点（移動局PS）に到達する。電界強度は受信点に到達したすべてのレイを加算することにより算出される。電界強度を精度良く推定するには送信点から受信点までのレイの軌跡を厳密にトレースする必要がある。その方法としてはイメージング法が一般に用いられる。イメージング法は、図1に示すように送信点と受信点間の反射点、回折点を幾何学的に求める方法であり、受信点に到達するレイの計算を厳密に行うことができる。しかし、その反射点、回折点を決定するには、すべての反射面（建物の壁面、大地面）、回折エッジ（建物の縁）の組み合わせの中から受信点に到達するレイを探索する必要がある。それらの数が増すに従いその演算処理量は指数関数的に増大する[12]。したがって、イメージング法を用いてレイトレース計算を行うには処理の高速化が図れる何らかの工夫が必要である。

## SMAPでのレイトレース

SMAPでは、レイトレース計算で考慮する反射面、回折エッジの数を削減し、高速処理を可能とする幾つかのアルゴリズムを適用している。以下ではそれらについて述べる。

### ■溝型伝搬路モデル

ストリートマイクロセル内では送信された電波は図1に示すように道路の両脇の建物で反射、回折され、またそれを繰り返しながら道路に沿って伝搬する[8]。そのことに着目すれば、送受信間の伝搬路をすべて図2に示すように道路に沿った溝型の伝搬路（溝型

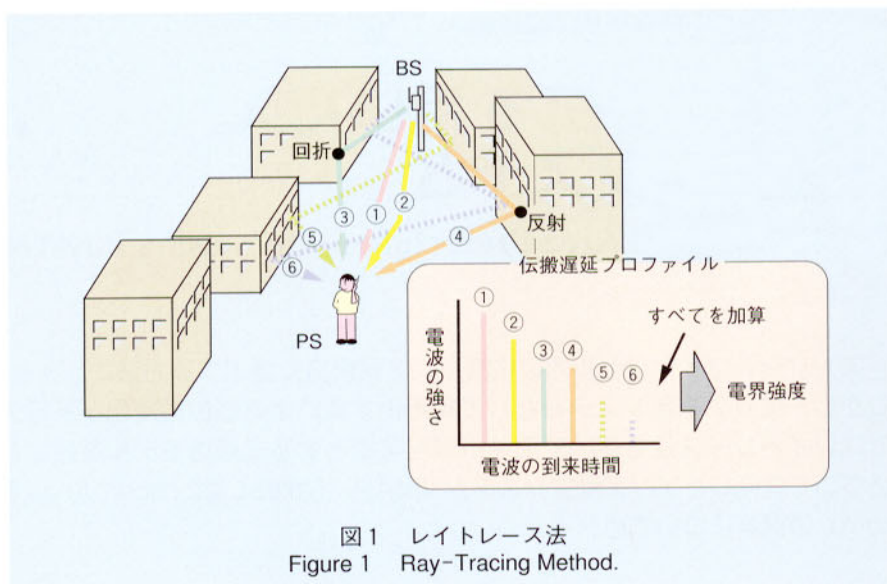


図1 レイトレース法  
Figure 1 Ray-Tracing Method.

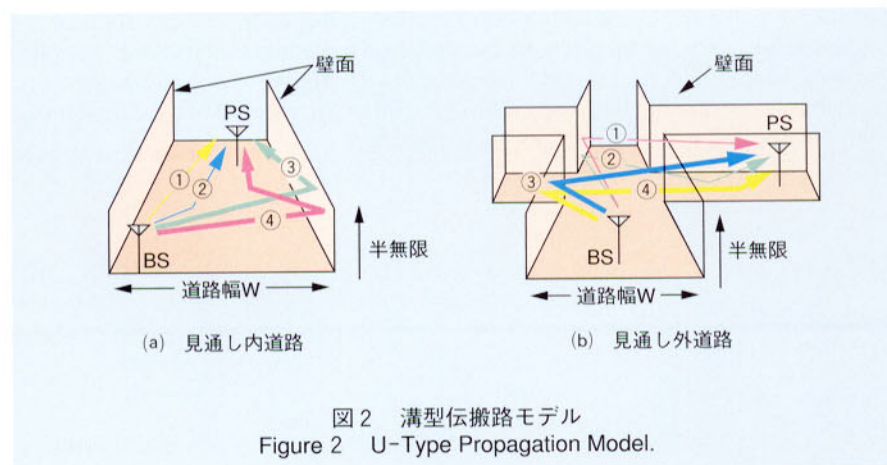


図2 溝型伝搬路モデル  
Figure 2 U-Type Propagation Model.

伝搬路)でモデル化することができる。すなわち、溝型伝搬路モデルは道路（道路幅 $W$ ）の両側に高さ半無限大の壁面がある非常に簡易な伝搬路モデルであり、基本的には道路面とその両側の壁面の高々3面で構成される。SMAPではこの溝型伝搬路を基本モデルとしている。

次に、SMAPでの送受信間の伝搬経路のモデル化について説明する。伝搬経路は図3に示すように(a)見通し内道路の場合（送受信間が見通し内にある場合）と(b)見通し外道路の場合（送受信間が交差点などにより見通し外となる場合）に分けてモデル化している。また、見通し外道路では図3(b)に示すように交差点近傍の建物に対して、その縁が回折エッジとなる場合とその壁面が反射面（辻きり反射面）となる場合

に分けてモデル化している。ところで、実際の道路では途中で道路幅が異なったり、交差点が三叉路や五叉路となっている場合など、上記以外の多種多様な形態が存在するが、その場合も前述した溝型の伝搬経路モデルを拡張して対処している。

このようにSMAPでは、実際には道路沿いの複雑な伝搬路を極めて簡易な溝型伝搬路にモデル化することでレイトレースで考慮する反射面、回折エッジの数を削減し、処理時間の大幅な短縮を図っている。

### ■レイトレース

SMAPでは図2に示す溝型伝搬路内において道路面とその両側の壁面を考慮した3次元のレイトレースを厳密に行っている。例えば図2(a)に示す見通

し内道路の場合は、①直接波、②大地反射波、③壁面反射波、④壁面反射に大地反射を含む波をトレースの対象とする[7]、[8]。また、図2(b)に示す見通し外道路の場合は①交差点で回折する波、②交差点で回折し大地反射を含む波、③壁面反射波、④壁面反射に大地反射を含む波、および①と③を組合せた交差点で回折し壁面反射を含む波と、①と④を組合せた交差点で回折し壁面反射と大地反射を含む波をトレースの対象としている[9]。

ただし、実際には図1に示すように建物は連続的に存在しないことから、壁面を連続的とした溝型伝搬路モデルは現実的でなく、推定精度の劣化が予想される。そこでSMAPでは、トレースされたすべてのレイに対して反射点在实际の壁面上に存在するか否かの判定(レイの存在判定)を行い、実際に存在しないと判定されたレイに関しては電界強度の算出から除外することにより推定精度の向上を図っている。

### ■伝搬経路探索

溝型伝搬路モデルを仮定した場合、図4に示すように送受信間の伝搬経路は経路1、経路2、……、と数多く存在する。これらすべての伝搬経路を対象としてレイトレースを行えば推定精度はそれなりに向上するが、処理時間もそれに伴って増大する。従って、推定精度を大きく損なわずに処理時間を短縮するには電界強度計算において支配的な伝搬経路を選定し、レイトレースを行う伝搬経路を制限する必要がある。そのため、伝搬経路の探索は重要である。

ところで、電波は交差点の角を曲がる度に大きく減衰(数10dB程度)する[13]。すなわち、送受信間で曲がる回数が一定回数を越える伝搬経路は電界強度計算に大きく寄与しない。また、電波は送信点からの距離が長くなるに従って弱くなり、経路長が長くなればその電波が及ぼす影響も小さくなる。これらに着目して、SMAPではあ

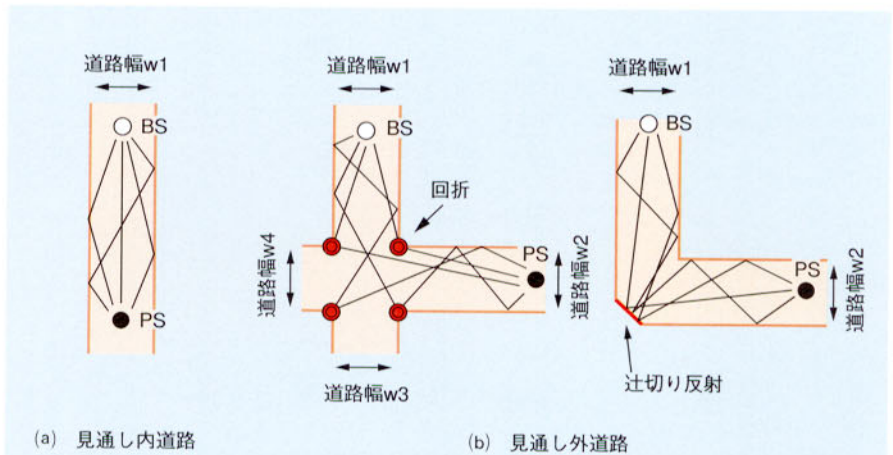


図3 伝搬経路の基本モデル  
Figure 3 Basic Models of Propagation Paths.

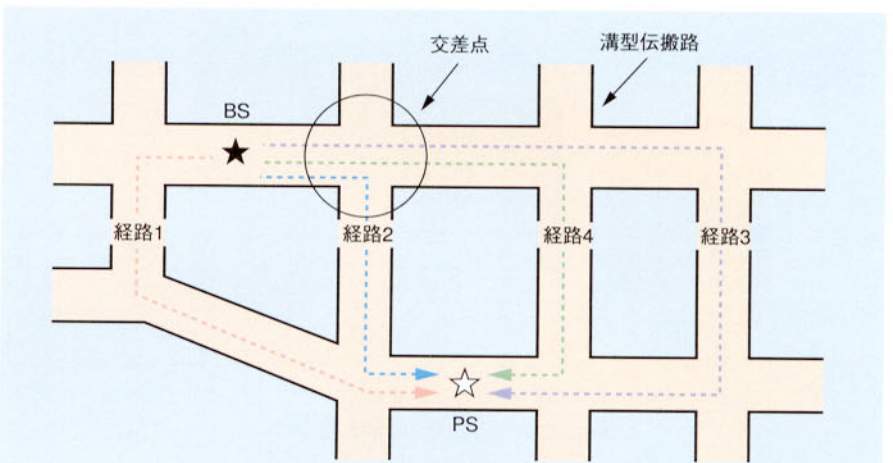


図4 経路探索  
Figure 4 Search for Propagation Paths.

らかじめ最大曲がり回数を決めておき、それを越えた伝搬経路探索は実行しない。また、経路長が最短となる伝搬経路(最短経路)との経路差があらかじめ設定したしきい値以上となった場合には経路探索は実行しない。

SMAPでは、これらの伝搬経路探索アルゴリズムを用いて、有効な伝搬経路だけを厳選することで処理時間の短縮を図っている。

### ■電波伝搬モデル

送受信間のレイトレースに基づいて受信点の電界強度計算について以下に示す。各レイの電界強度は、反射、透過、回折されるごとに減衰し、また受信点に到達するまでの延べ距離に応じ

て弱くなる。従って、受信点に到達したレイの電界強度 $E_i$ は、反射面 $j$ の反射係数 $R_j$ 、透過面 $k$ の透過係数 $T_k$ 、回折エッジ $l$ での回折係数 $D_l$ 、および送受信アンテナ特性 $G_T$ 、 $G_R$ 、送受信点間の延べ距離 $r$ を用いて表される。受信点での電界強度を $E$ とすると、 $E$ は各レイの電界強度 $E_i$ を加算して次のように計算することができる。

$$E = \sum_i E_i = \sum_i \left( \frac{K \cdot P_T \cdot G_T \cdot G_R}{r^2} \prod_j R_j \cdot \prod_k T_k \cdot \prod_l D_l \right) \quad (1)$$

ただし、 $P_T$ は送信電力、 $K$ は波長などで決まる定数である。SMAPでは、反射係数 $R_j$ は図5(a)で示すように反射面

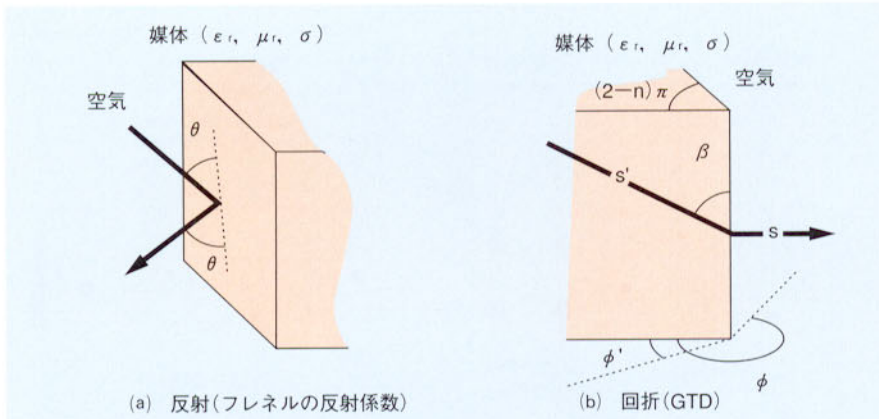


図5 SMAPでの反射、回折モデル  
Figure 5 Reflection and Diffraction Models used in SMAP.

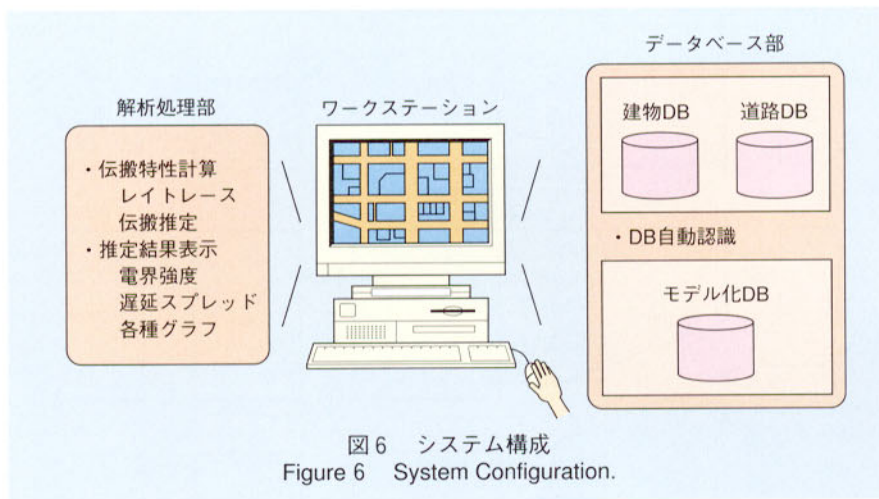


図6 システム構成  
Figure 6 System Configuration.

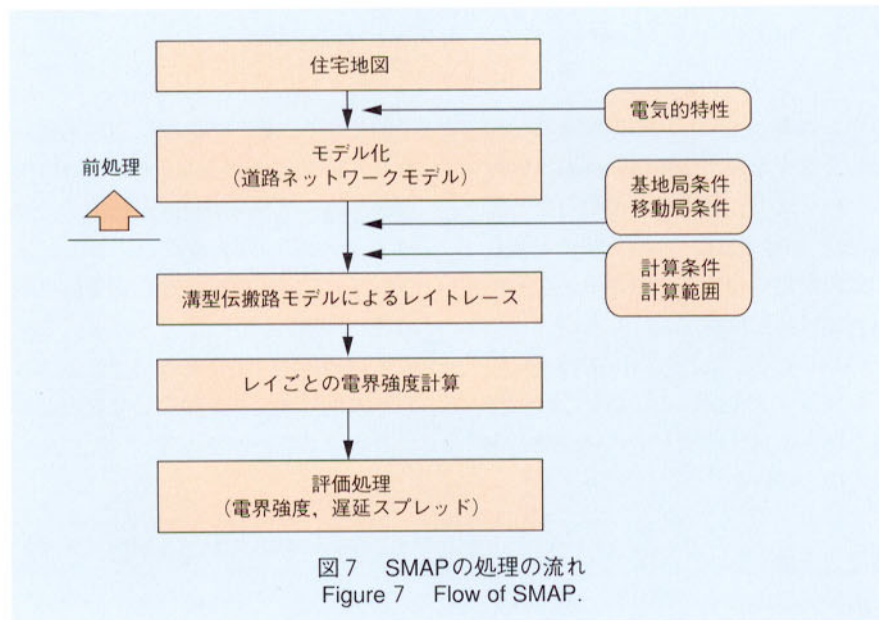


図7 SMAPの処理の流れ  
Figure 7 Flow of SMAP.

が無限の広さを持ち、厚さが無限長と仮定した媒体に電波が斜め入射したときのフレネルの反射係数で与えている

[14]. 一方、回折係数 $D$ はGTD (Geometrical Theory of Diffraction) を用いて、図5(b)に示すようにその形状が楔

である媒体に電波が斜め入射したときの回折係数で与えている[9]. なお、溝型伝搬路モデルを仮定した場合、透過を含むレイは存在しないことからSMAPでは透過係数 $T$ は考慮しない。また、 $R$ 、 $D$ の具体的な計算式は参考文献[9]、[14]に譲る。

## SMAPの構成

### ■システム構成

図6にSMAPのシステム構成を示す。SMAPは処理の高速化を図るため主装置にワークステーション (EWS) を、OSにUNIXを、GUIにオープンウィンドウを用いている。なお、SMAPのシステム構成は著者らが以前に発表した“レイトレースを用いた屋内エリア推定システムIMAP (Indoor Micro cell Area Prediction system)”と同一構成としている[15]。

図7にSMAPの処理の流れを示す。まず、溝型伝搬路モデルを構築する際に必要となる情報を市販の住宅地図から取得しモデル化する (道路ネットワークモデル)。続いて、基地局条件、移動局条件、計算条件に従って溝型伝搬路モデルを構築しレイトレースを行い、各レイごとの電界強度を計算する。評価処理ではその結果から、受信点での電界強度、遅延スプレッドなどの計算処理を行う。

### ■機能構成

図8はSMAPの機能構成である。以下に主要機能を説明する。

(1) 道路ネットワークモデル作成部  
道路ネットワークモデル作成部では、住宅地図から溝型伝搬路の構築に不可欠な道路ネットワークモデルを作成する。具体的には、まず、図9(a)に示すように道路情報 (位置、方向、幅など)、建物情報 (位置、形状など) などがデータベース化されている住宅地図から交差点と道路の関係を図9(b)に示すように分岐点 (ノード) と枝 (エレメント) で表わす道路ネットワ

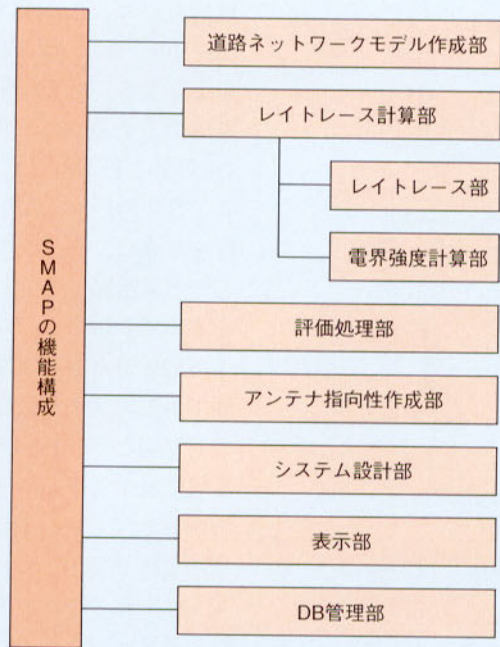


図8 SMAPの機能構成  
Figure 8 Functional Structure of SMAP.

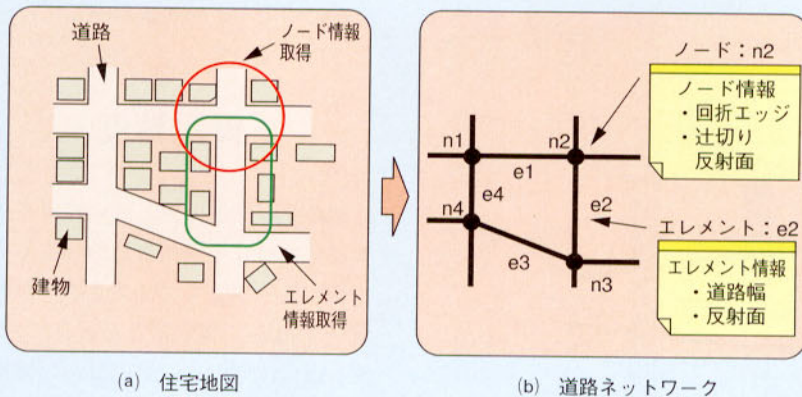


図9 道路ネットワークモデル  
Figure 9 Road-Network Model.

ークに展開する。そして、各ノードには交差点近傍の建物から回折エッジ、辻切り反射面を自動認識し電気的特性（比誘電率 $\epsilon_r$ 、比透磁率 $\mu_r$ 、導電率 $\sigma$ ）を付与してその情報をマッピングし、各エレメントには道路両側の建物から道路幅と反射面を自動認識し電気的特性（比誘電率 $\epsilon_r$ 、比透磁率 $\mu_r$ 、導電率 $\sigma$ ）を付与してその情報をマッピングする。得られた情報はすべて道路ネットワークモデルとしてデータベース化する。

## (2) レイトレース部

レイトレース部では、溝型伝搬路モデルに基づいて高速なレイトレースを行う。まず、送信点（BS）、受信点（PS）の位置情報から道路ネットワークモデルを用いて図4に示す伝搬経路の探索を行う。次に、選択された伝搬経路ごとに図2に示す溝型伝搬路を構築し、レイトレースを実行する。続いて、トレースされたすべてのレイに対してレイの存在判定を行い、電界強度を計算する。

図10はBSとPSが並行する道路上に設置された場合のレイトレース結果例である。ただし、伝搬経路の探索条件として最大曲がり回数を2回、経路長差のしきい値を500m、またレイトレース条件として最大反射回数を6回、最大回折回数を2回と設定している。なお、この探索条件では5つの経路が選択された。

## (3) 評価処理部

SMAPにおける評価処理の基本は電界強度計算と伝搬遅延を示す遅延スプレッド（Delay Spread）計算である。ここで遅延スプレッドとは図1に示す遅延プロファイルを基にして、伝搬遅延時間の分散（標準偏差）を計算したもので、その大小は多重伝搬路においてデジタル信号伝送を行う場合の符号間干渉の評価を与える[16]。

評価処理では、まず推定を行う範囲内の道路上に一定距離間隔ごとに受信点を決定する。そして、各受信点ごとにレイトレースを行い電界強度と遅延スプレッドを計算する。ただし、場所的な変動誤差を取り除くために受信点ごとの計算結果をさらに一定距離内で平均化して、各受信点の電界強度値または遅延スプレッド値を算出している。計算に必要な項目は表1に示す基地局条件と移動局条件、および計算範囲、計算条件（最大曲がり回数、経路長差のしきい値、最大反射回数、最大回折回数、平均化距離）である。

## (4) 表示部

推定結果の表示は、図11に示すように電界強度、遅延スプレッドの各値を色別に表示することを基本としている。図12に表示結果例を示す。また、同図に示すように移動局（PS）の走行経路を指定し、その経路長に対する電界強度値、遅延スプレッド値を表示することもできる。なお、SMAPでは表示を一層効果的にするため、1/2,500の住宅地図を表示項目ごと（64レイヤ）にDB化しておいて、必要に応じて選択表示できる構成としている。

なお、これらの推定結果を得るため

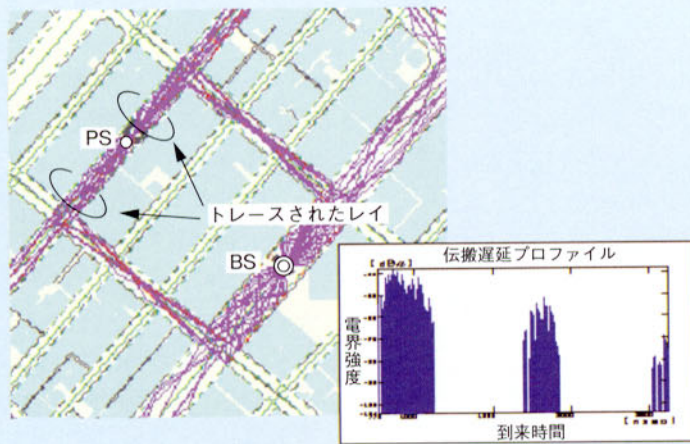


図10 レイトレース例  
Figure 10 Ray-Tracing Example.

表1 基地局、移動局設定項目  
Table 1 Input Parameters for BS and PS.

基地局 (BS) 項目	移動局 (PS) 項目
位置	位置
高さ	高さ
周波数	受信アンテナ利得・指向性
送信電力	給電線損失
送信アンテナ利得・指向性	
給電線損失	

で所定の通信品質が得られるように基地局を効率良く設置することにある [5], [6]. システム設計部はこの作業を支援する. すなわち, 複数の基地局を設置した場合に, 所定の通信品質 (電界強度) が得られるエリアを求める. 具体的には, 各基地局での電界強度を計算し, そのうち電界強度が最大となる基地局やそのときの電界強度値を求めて表示する. 電界強度が最大となる基地局の表示は各基地局が守備範囲であるエリアを示しているので勢力エリア図と呼ばれ, そのときの電界強度値の表示は一般にサービスエリア図と呼ばれている. 図11にこれらの概念図を併せて示している. 評価した結果, サービスエリア内において十分な通信品質が得られていないことがわかれば, 基地局 (BS) の位置を変更するか, あるいは基地局を追加するなどの判断を行う必要がある. SMAPではこの判断を容易にし, 基地局の追加, 位置の変更などの対応が簡易に行えるようにしている.

## 推定精度

SMAPの推定結果と測定結果を比較する. 比較する場所は道路際に高さ数十mの建物が立ち並ぶ東京駅八重洲口周辺である. 測定諸元を表2に示す. 図13および図14は測定および測定と同一条件でSMAPにより推定した伝搬損失の距離特性を示しており, 図13は見通し内道路の場合, 図14は見通し外道路の場合である. なお, 見通し外道路は図2(b)に示す見通し内道路から一曲がりの道路であり, 図14(a)は基地局から交差点までの距離が15mと基地局から比較的近い道路の場合であり, 図14(b)は基地局から交差点までの距離が590mと基地局から比較的遠い道路の場合である. 図より見通し内道路, 見通し外道路ともに推定結果と測定結果は比較的良好に一致しており, SMAPの有効性が確認できる.

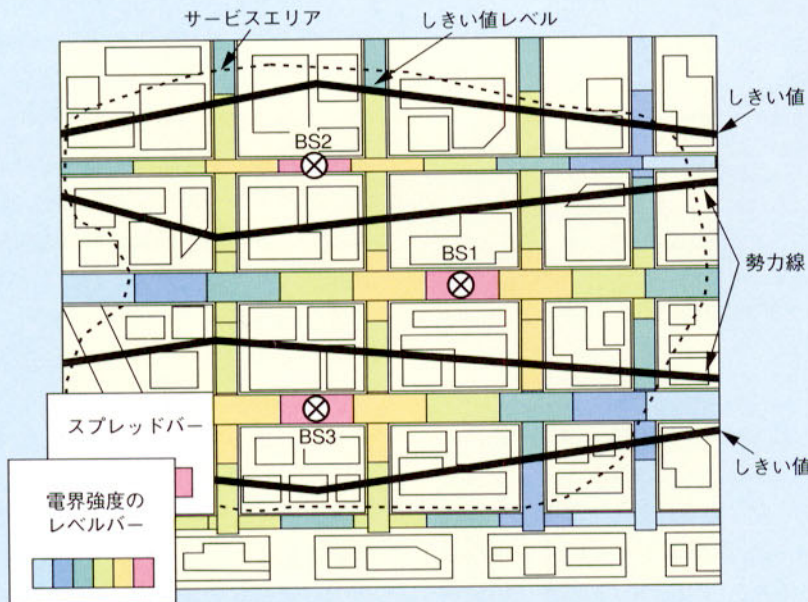


図11 勢力エリアおよびサービスエリア図  
Figure 11 Allocated Area of each BS and Service Area Map.

に要した時間はSUNワークステーション (モデルSS20) を用いて数十秒足らずであった.

(5) システム設計部  
エリア設計で重要なことはサービス範囲が与えられた場合に, その範囲内

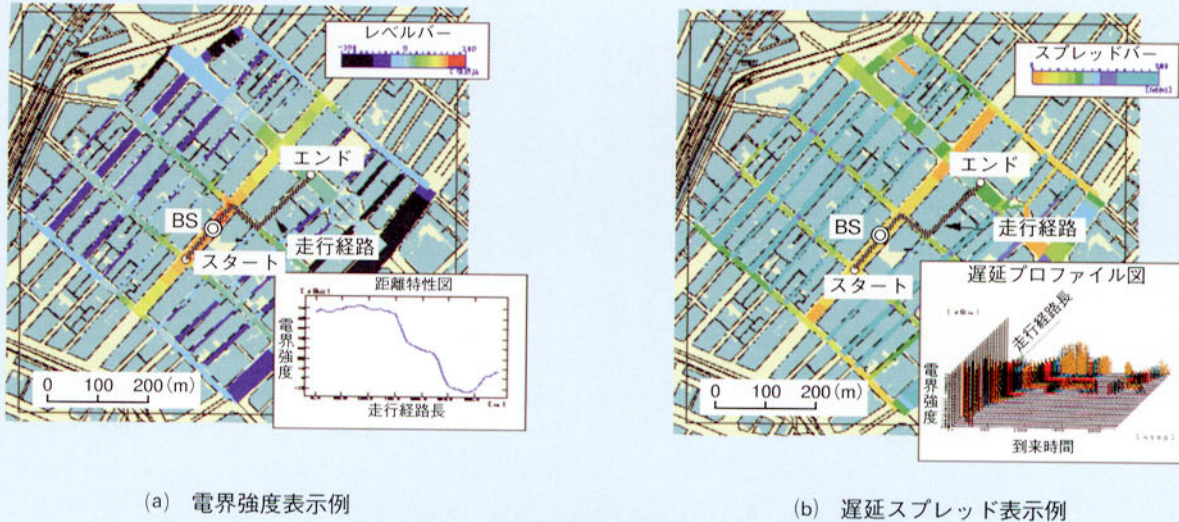


図12 表示結果例  
Figure 12 Example of Display Windows.

表2 基地局、移動局設定条件  
Table 2 Conditions of Parameters for BS and PS.

基地局 (BS) 項目	設定値
高さ	3.0m
周波数	813MHz
送信電力	1W
送信アンテナ利得・指向性	0dBd (半波長ダイポール)
移動局 (PS) 項目	設定値
高さ	1.5m
送信アンテナ利得・指向性	0dBd (半波長ダイポール)

## あとがき

本稿では、基地局アンテナを周辺建物より低い道路際に設置し、道路に沿ったサービスエリアを構成するストリートマイクロセル構成に対応可能なエリア推定システムSMAP (Street Microcell Area Prediction system) の概要について説明した。従来、レイトレーシング法によるエリア推定システムを実用化するには推定精度と処理の高速化がトレードオフの関係にあり、例えば推定精度に重点を置けば処理時間がそれなりに増大するため実用化は困難であった。SMAPでは溝型伝搬路モデル、および効率的な送受信間の伝搬経路探索アルゴリズムを用いることにより、推定精度を大きく損なわない範囲で処理時間を大幅に短縮し、実時間での処理を可能としている。

## 文献

[1] L.J.Greenstein, et al : "Microcells in Personal Communications Systems", IEEE Communication Magazine, Dec., pp.76-88, 1992.

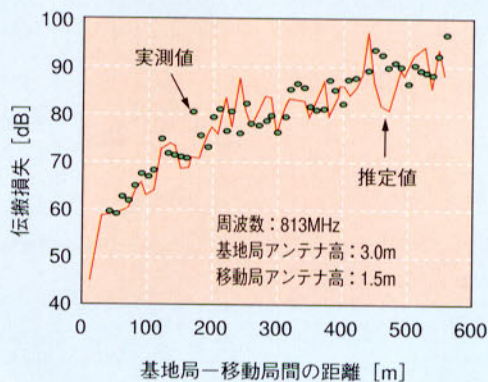


図13 推定結果と実測結果の比較—見通し内道路の場合—  
Figure 13 Comparison of Prediction Versus Measurement Results.  
— In Case of LOS (Line of Sight) —

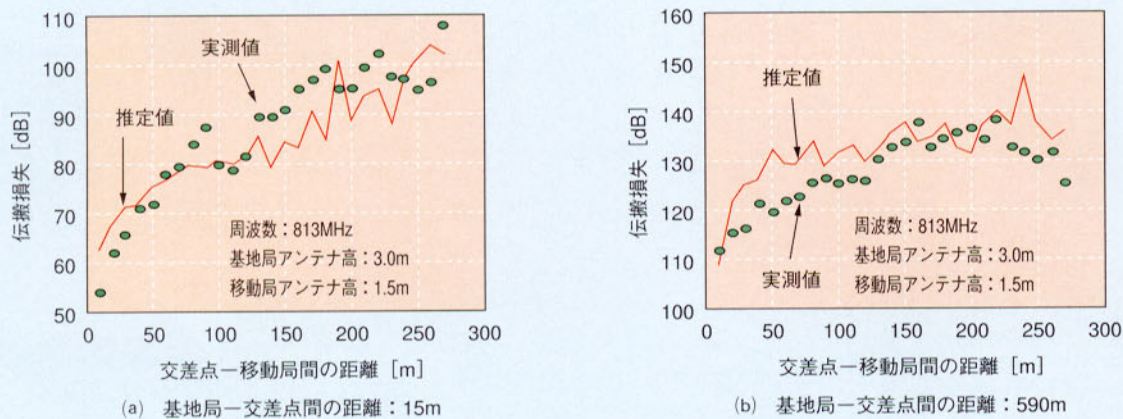


図14 推定結果と実測結果の比較—見通し外道路の場合—  
 Figure 14 Comparison of Prediction Versus Measurement Results.  
 — In case of NLOS (Non-Line of Sight) —

- [2] H.Persson : “Microcellular structures and their performance”, Prec.VTC, pp.413-418, 1992.
- [3] M.Hata : “Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services”, IEEE Trans. VT-29, 3, pp.317-325, 1980.
- [4] 坂上, 久保井 : “市街地構造を考慮した伝搬損失の推定”, 信学論 (B-II), J74-B-II, 1, pp.17-25, 1991.
- [5] 朝倉, 山崎, 藤井 : “移動通信におけるセル設計システム”, 1994 秋季信学総全大, B-338.
- [6] 藤井, 朝倉, 山崎, : “移動通信におけるセル設計システム”, 本誌, Vol.2, No.4, 1995.
- [7] G.Lampard : “The effect of Terrain on Radio Propagation in Urban Microcells”, IEEE Trans.VT-42, 3, pp.314-317, 1993.
- [8] 今井 : “ストリートマイクロセルにおける伝搬損失特性の推定”, 信学技報, RCS93-72, 1993.
- [9] V.Erceg : “Diffraction Around Corners and Its Effects on the Microcell Coverage Area in Urban and Suburban Environments at 900MHz, 2GHz, and 6GHz”, IEEE Trans.VT-43, 3, pp.762-766, 1994.
- [10] 今井, 犬飼, 藤井 : “ストリートマイクロセル伝搬推定システムの提案”, 1995 秋季信学総全大, B-213.
- [11] 今井, 藤井 : “レイトレースを用いたストリートマイクロセル伝搬推定システム”, 信学技報, RCS96-168, 1997.
- [12] 例えば, 高橋, 石田, 吉浦 : “イメージ法を用いた電波伝搬シミュレーション”, 信学技報, RCS 94-125, 1994.
- [13] 永田, 古谷, 他 : “2GHz帯高層ビル街マイクロセル伝搬特性”, 信学技報, AP90-84, 1990.
- [14] 例えば, M.Born, E.Wolf : “Principles of Optics”, Pergamon Press, 1974.
- [15] 今井, 犬飼, 藤井 : “レイトレースを用いた移動通信・屋内エリア推定システム”, 信学技報, RCS95-129, 1996.
- [16] 例えば, 桑原 (監修) : “デジタル移動通信”, 第3章, 科学新聞社, 1992.