

広帯域移動伝搬

その4 レイトレース法に基づいた伝搬推定

移動通信における伝搬損失推定法として幾何光学理論に基づいたレイトレース (Ray-Trace) 法があります。レイトレース法は送受信間の幾何学的なトレースを求めるだけで、伝搬遅延プロファイルや電界強度を推定できることから、今後の移動伝搬研究を支える基盤技術の一つとして非常に注目されている技術です。本稿では、移動通信におけるレイトレース法について解説します。

1. まえがき

移動通信における伝搬損失推定法として、幾何光学理論に基づいたレイトレース法があります。レイトレース法は複雑な地形・構造物に対し、送受信間の幾何学的なトレースを求めるだけで伝搬特性を推定できることから非常に魅力的な技術です。しかし、レイトレースの対象となる構造物が多くなり、またそれらが複雑になれば計算処理量が急激に増大するため、送信アンテナ高が周辺建物よりも低く、都市構造を比較的簡単にモデル化できる道路上の伝搬推定[1]、[2]や、レイアウト構造が比較的単純な屋内の伝搬推定[3]、[4]に用いられています。

しかし、近年、計算機の演算処理能力が飛躍的に向上したこと、レイトレース処理の高速化の研究が進んだこと、また広帯域通信の開発が進められ、電波の強さだけでなく、伝搬遅延プロファイルの推定や電波の到来方向の推定がシステム設計に不可欠になったことなどから、送信アンテナ高が周辺建物よりも高く、都市構造が非常に複雑な市街地においてもレイトレース法を用いた伝搬推定の検討が進められています[5]、[6]。

本稿では、まずレイトレース法について概説します。続いて、レイトレース法を用いた市街地の伝搬推定法について説明します。

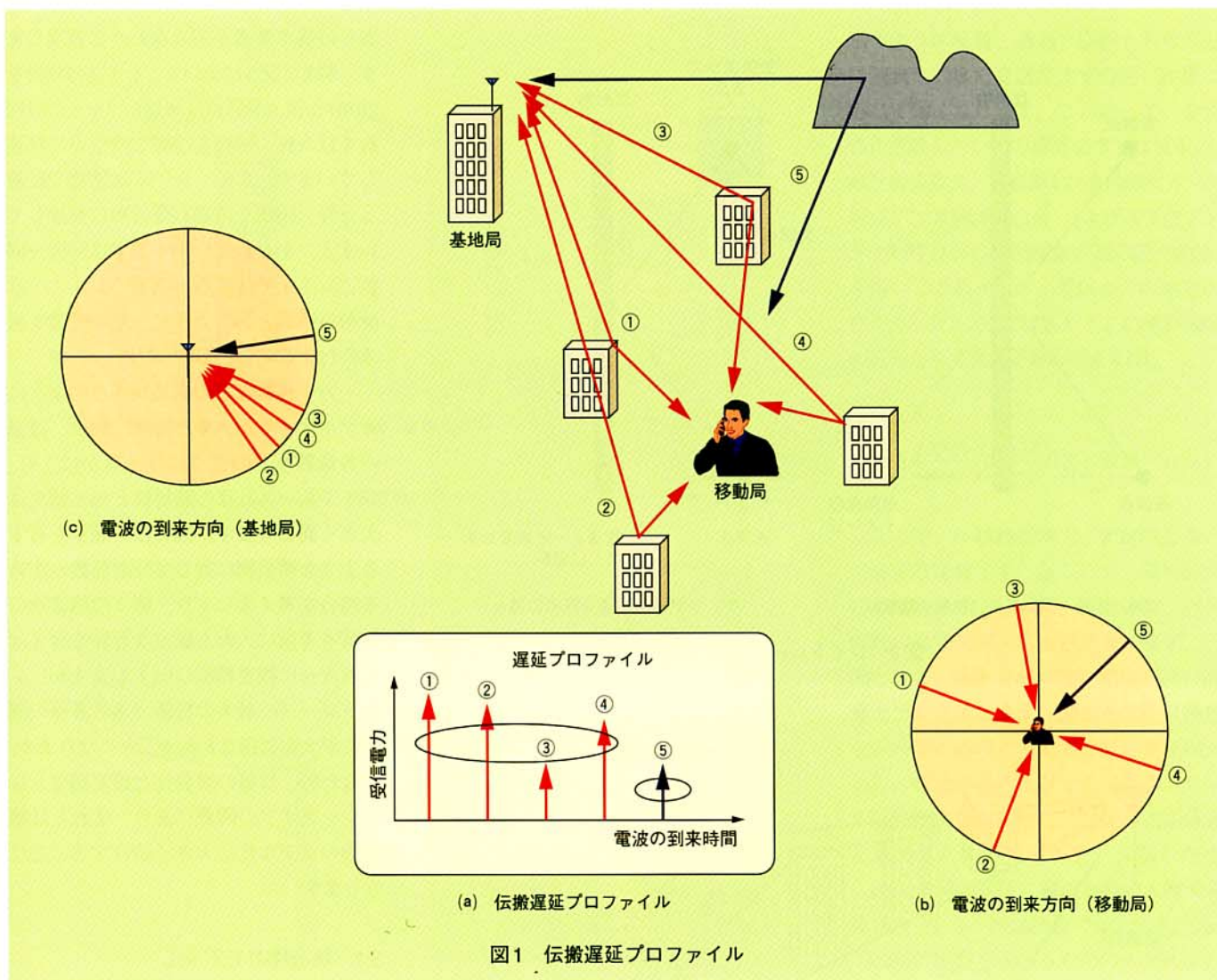
2. レイトレースの概要

送信点から全方位に万遍なく放射された電波は、途中の構造物で幾何学的に反射、透過、回折を繰り返して受信点に到達します。図1はレイトレースの概念図であり、基地局アンテナから電波を送信し、ビルなどで反射や回折を経て到達した電波を移動局で受信した場合を示しています[7][8]。図1(a)で横軸は移動局に到来する電波（以下レイと呼ぶことにします）の伝搬遅延時間を示し、縦軸は受信電力を示したもので、伝搬遅延プロファイルと呼ばれるものです。また、図1(b)、(c)は到来する電波の到来方向を示したものです。このようにレイトレース法を用いれば電波の強さだけでなく、各レイの伝搬遅延時間や到来角度方向も併せて推定できることから、広帯域伝送方式や、電波の到来角度方向特性が不可欠な基地局アンテナダイバーシチ受信方式やアダプティブアレーアンテナ方式を設計するための伝搬路モデル化技術として非常に期待されています。また、W-CDMA方式で代表される第3世代方式の次の第4世代方式の伝搬モデルとして必須である時間空間伝搬路モデルの作成・評価に不可欠な技術としても注目されています（ここで時間とは伝搬遅延時間、空間とは電波の到来方向を指しています）[9]。

ところで、各レイの受信電力は送信点から受信点までに経た反射、透過、回折での履歴であるレイの軌跡 (Trace) で決

ふじい てるや
藤井 輝也

いまい てつろう
今井 哲朗

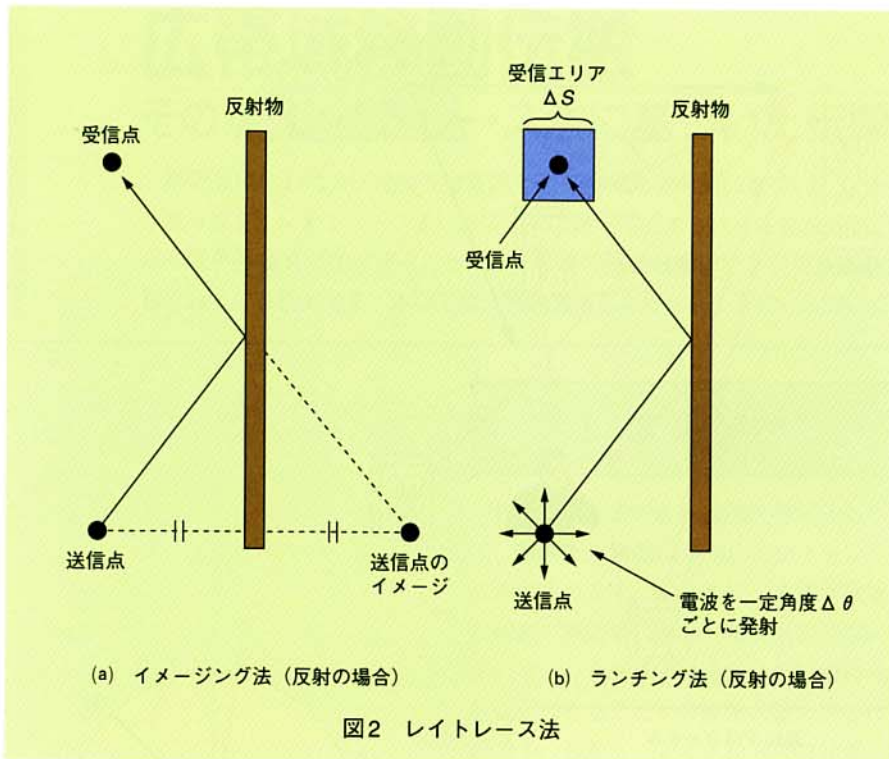


まることから、レイトレースでは送信点から受信点までのレイの軌跡を正確に求める必要があります。送信点から受信点までのレイの軌跡を求める方法として、2通りの方法があります。一つは、イメージング法 (Imaging Method) と呼ばれる方法であり、他方はランチング法 (Launching Method) と呼ばれる方法です。

イメージング法は図2(a)に示すように、送信点、受信点および考慮するすべての反射面の組合せから幾何学的に反射点や透過点を求めて、送受信間の3次元的な軌跡を求めます。この方法は受信点に到達するレイを厳密に求めることができますが、送信点と受信点間の反射点や回折

点を決定するために、すべての反射面、回折点の組合せに対してレイを探索する必要があります。

一方、ランチング法は図2(b)に示すように、送信点から一定角度 $\Delta\theta$ ごとに離散的にレイを発射 (Launching) し、その軌跡を逐次追跡して、受信点に到達するレイを求めます。この方法では離散的な角度でレイを発射させることから、受信点に正確に到達するレイが求まる確率が極めて小さくなります。そのため、受信点の回りに一定の受信エリア ΔS を定義し、その受信エリア ΔS 内に到達したレイを受信点に到達したレイと見なして受信電力を計算します。

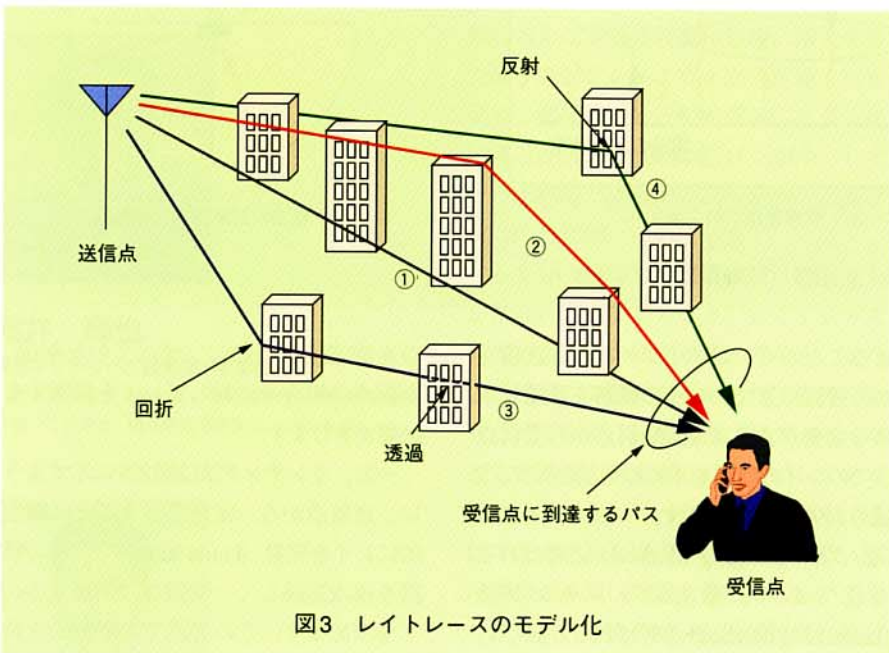


これらの基本要素を組み合わせて表現します。例えば図3において、レイ②は回折を2回経た後、受信点に到達し、レイ③は回折を経た後、建物を透過し受信点に到達しています。また、レイ④は建物で反射した後、建物を透過し受信点に到達しています。すなわち、レイ②では回折→回折、レイ③では回折→透過、レイ④では反射→透過というように、基本要素を組み合わせてレイを表現します。

一方、建物などの構造物をどのようにモデル化するか、また反射、回折、透過の各係数をどのように与えるかにより、レイトレース計算の簡易性と推定精度は大きく異なります。例えば、曲率を有するような構造物に対して反射係数を求める場合を考えましょう。個々の構造物の形状を考慮に入れた厳密な計算を行えばそれなりに推定精度は向上しますが、レイトレースの最大の特徴である計算の簡易性が大幅に損なわれることとなります。すなわち、計算の簡易性と推定精度とはトレードオフの関係にあり、それらは構造物のモデル化に大きく依存することになります。

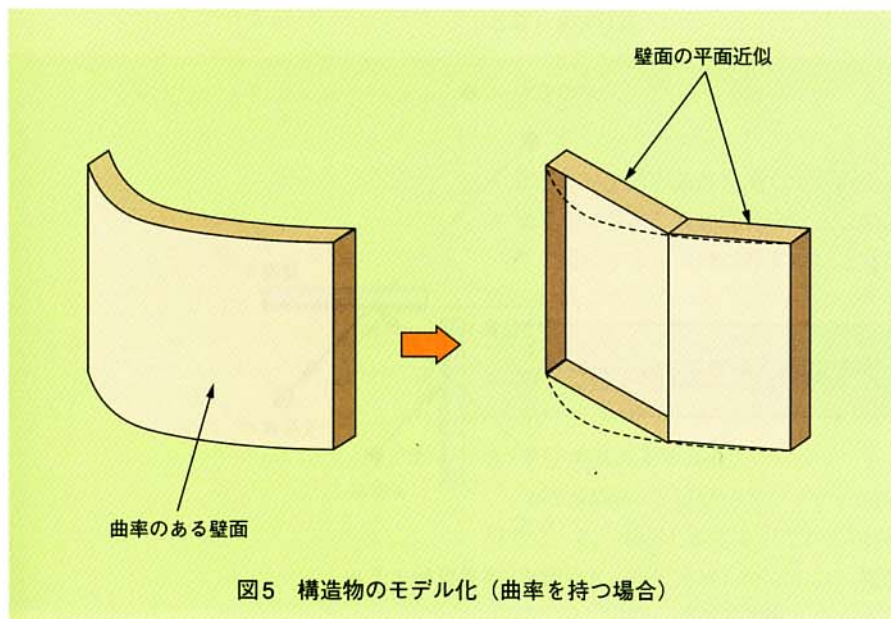
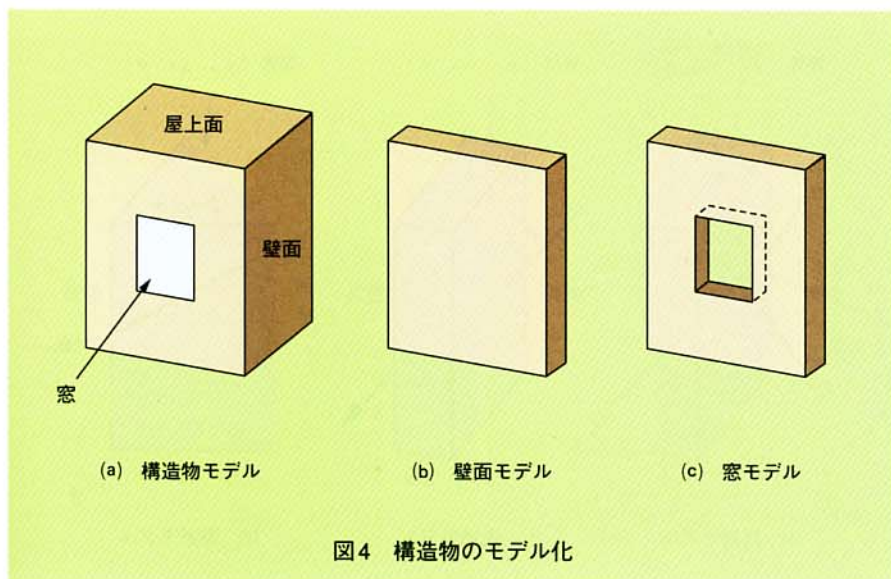
3.1 構造物のモデル化

ここでは計算の簡易性（実用性）を重視した構造物のモデル化を行う方法を紹介いたします。一般に構造物は図4(a)に示すように壁面、屋上面および床面で構成されています。壁面、屋上面、床面をここではすべて図4(b)に示すように厚さがある平板とみなします。また、反射面は鏡面のように滑らかであり、反射はすべて入射角と反射角が等しくなる正規反射するものと仮定します。また、窓などは図4(c)に示すように壁面である平板内に異なる材質（例えばガラス）の壁（平板）があるものとみなします。一方、構成面が曲面であるような場合には、図5に示すように曲面を複数の平板に分割して近似します[8]。ただし、推定精度を上げるため、



3. レイトレースのモデル化

レイトレースでは反射、回折、透過が基本要素であり、レイの軌跡はすべてこ



分割する平板の大きさを小さくすれば、反射係数を求める際に“平板が（波長に対して）十分に大きい”という仮定が成り立たなくなることから、曲面の平面分割には十分な注意が必要となります[10].

3.2 電波伝搬モデル

送受信間のレイトレースに基づいて得られた各レイに対する電界強度計算モデルを示します。各レイの電界強度は図3に

示すように反射、透過、回折されるごとに減衰し、また受信点までの延べ距離に応じて弱くなります。したがって、受信点に到達したレイの電界強度 E は反射面 j の反射係数 R_j 、透過面 k の透過係数 T_k 、回折点 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 を用いて表わせます。受信点での電界強度を E とおくと、 E は各レイ E_i の電界強度の総和として次式で表わせます[1].

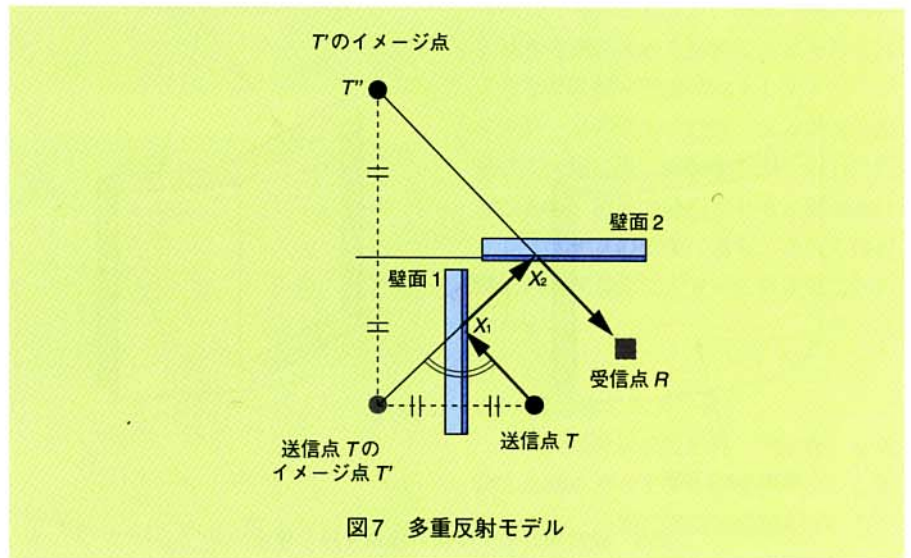
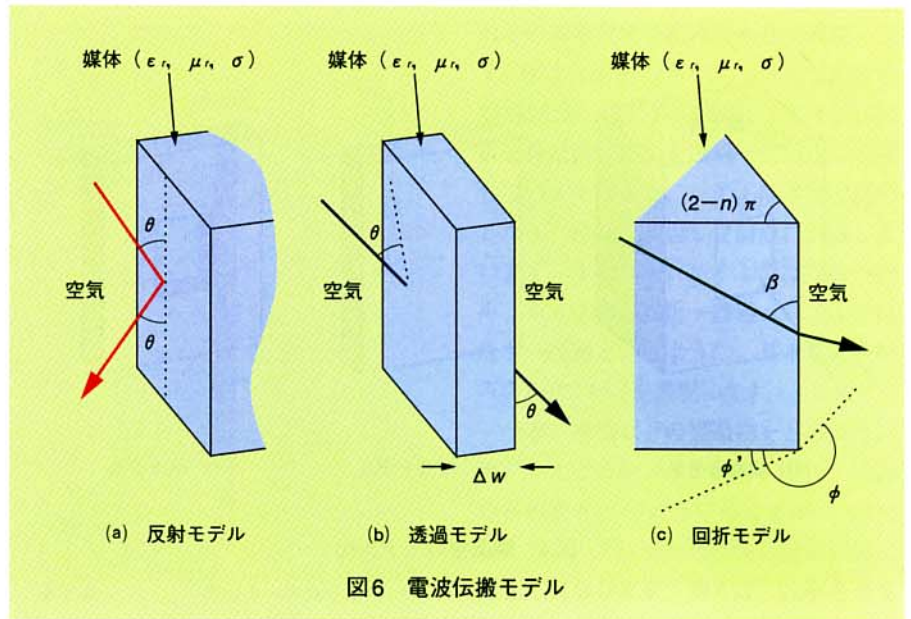
$$E = \sum_i E_i = \sum_i \left(\frac{K \cdot P_T \cdot G_T \cdot G_R}{r^2} \prod_j R_j \cdot \prod_k T_k \cdot \prod_l D_l \right)$$

ここで、 P_T は送信電力、 K は波長などで決まる定数です。ところで、電界強度の推定値 E は反射係数、透過係数、回折係数の計算モデルにより異なります。一例として、簡単でかつ推定精度が高い計算モデルを示します。図6(a)は反射係数を求めるためのモデルで、厚さを無限大とし、電波が斜め入射する場合のフレネル反射係数で与えます。図6(b)は透過係数を求めるためのモデルで、有限の厚さ(Δw)を持つ媒体に電波が斜め入射する場合のフレネル透過係数で与えます。図6(c)は回折係数を求めるためのモデルであり、形状が楔(ウェッジ)である媒体に電波が斜め入射する場合にGTD (Geometrical Theory of Diffraction) で求めた回折係数で与えます。ただし、図中の $\epsilon_r, \mu_r, \sigma$ は媒質の電気定数であり、それぞれ誘電率、透磁率、導電率を表わしています。なお、反射係数、透過係数、回折係数の具体的な計算式は紙面の都合上省略します。文献[11], [12]などを参照して下さい。

4. 具体的なトレースの求め方

4.1 反射点、透過点の求め方

反射位置は、送信点を対象となる壁面



の鏡像位置（イメージ点）に順次移動し、最後の壁面の一つ前の送信点のイメージ点と受信点とを結ぶことで求めることができます。具体的には、まず図7に示すように壁面1に対する送信点Tのイメージ点T'を求めます。次に、イメージ点T'の壁面2に対するイメージ点T''を求めます。そして、イメージ点T''と受信点Rを直線で結び壁面2との交点を求めます。この点が壁面2の反射位置X2になります。壁面2の反射位置が決まれば、反射位置X2の一つ前のイメージ点であるT'とを結ぶことで壁

面1の反射位置X1が求まります。このような操作を繰り返すことで、壁面上の反射位置がすべて求まり、送受信間のトレースが決定できます。ただし、反射点が壁面上にない場合にはこれらの壁面で反射するレイが存在しないことになります。

4.2 回折位置の求め方

図8に示すように入射波とエッジのなす角を q_{in} 、回折波とエッジのなす角を q_{out} とします。入射角 q_{in} と回折角 q_{out} に対し、次

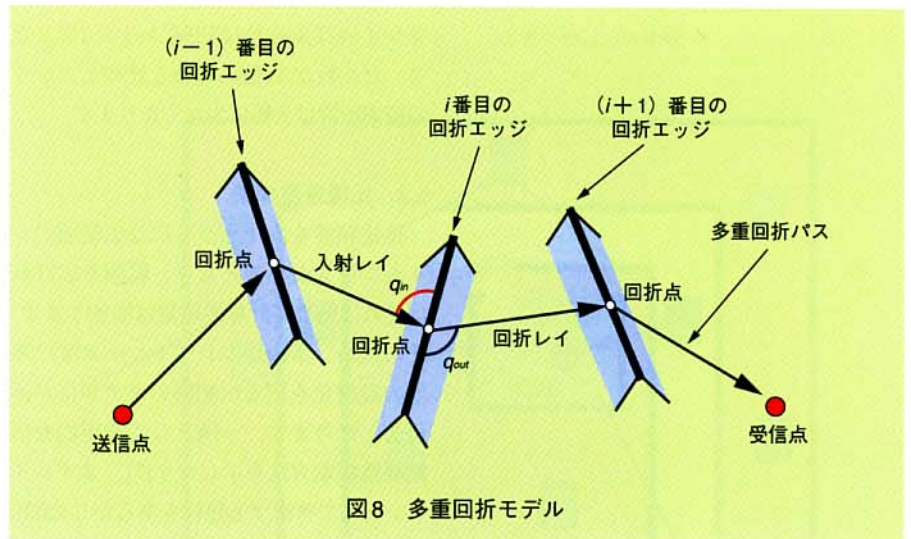


図8 多重回折モデル

式の関係を満たすエッジ上の点が回折点となります[13].

$$q_{in} = q_{out}$$

ただし、上式の条件を満たす回折点がエッジ上に存在しない場合には、このエッジで回折するレイは存在しないこととなります。

5. 市街地での伝搬特性

5.1 伝搬路のモデル化

市街地において基地局アンテナが周辺建物より高い場所に設置されている場合、送受信間は一般に見通し外であり、複数回の反射、回折、透過を考慮したレイトレースが必須となります。特に市街地のように回折波が主体となるような伝搬環境下において、一定の推定精度を保証するためには、イメージング法を用いたレイトレースが一般です。イメージング法では送受信間のトレースを決定するためにすべての壁面、回折エッジの組合せの中から受信点に到達するレイを探索しなければなりません。しかし、市街地では建物数が非常に多いことから、計算処理量は膨大となります。そのため、適正な時間内で計算が終了するか否かの判断を

行うために、計算処理量の大きな把握が重要となります。そこで、レイの探索総数の概算法を示します。

今、壁面数を N_1 、エッジ数を N_2 とします。最大 k 回の反射と回折を経て受信点に到達するレイについて考えることにします。レイの探索では、反射（または回折）してきたレイに対し、次の反射点（または回折点）の候補となる壁面またはエッジ数は直前の壁面（またはエッジ）を除いたすべてであり、その数は $N_1 + N_2 - 1$ となります。したがって、最大 k 回の反射（または回折）を経るレイを探索するために必要な壁面（またはエッジ）の組合せ総数 S は次式で与えられます[8].

$$S = \sum_{m=1}^k (N_1 + N_2) (N_1 + N_2 - 1)^{m-1} \\ \approx \sum_{m=1}^k (N_1 + N_2)^m \approx (N_1 + N_2)^k$$

例えば、ビルが30個あり、それらがすべて立方体で構成されていると仮定しましょう。この場合、1ビル辺りの壁面数は屋上面、床面を含めて6であり、エッジ数は12であることから、 $N_1 + N_2 = 30 \times (6 + 12) = 540$ となります。反射と回折を併せて最大2回まで考慮する場合のレイの探索総数は約 $540^2 \approx 3 \times 10^5$ となり、10万回のオーダーとなります。

一方、ビル数を5個とすれば、同じ条件

でレイの探索総数は約 $90^2 \approx 1 \times 10^4$ となり、ビル数が30個の場合と比較してレイの探索総数は大幅に少なくなります。

5.2 伝搬経路探索

推定精度を向上させるには広範囲のレイトレースが必要となり、範囲を広げればそれに伴って計算処理量は増加します。そのため、市街地のレイトレースでは処理の高速化を図る伝搬路のモデル化が不可欠となります。一例として実用的な伝搬経路探索方法を示します[7]。まずレイトレースで考慮する建物をあらかじめ図9に示すように、受信点を中心とする複数ゾーン（ゾーン(0)～ゾーン(i)）に分割し、各ゾーンごとに最大反射回数、最大回折回数を与えておきます。レイ探索では、分割されたゾーンごとに建物の反射面、回折エッジに対して最大反射回数および最大回折回数までの組合せを求め、次にその組合せを複数ゾーン（最大は全ゾーン）に対して行います。ただし、同一ゾーンを複数回組み合わせさせたパス探索（例えば、ゾーン(2)→ゾーン(1)→ゾーン(2)→ゾーン(0)（受信点））は行いません。すな

わちゾーン(i)で反射、回折したレイは次に必ず内側のゾーン（ゾーン(i-1)～ゾーン(0)）で反射、回折を行うものとし、レイが必ず受信点（中心）に向かってトレースされるように制約を加えます。この制約によって受信点から遠ざかり、最終的に棄却されてしまうレイの探索が削減できるため、処理の大幅な高速化を図ることができます。

一方、市街地の全建物が受信電力に大きく寄与しているわけではありません。そこで受信電力に大きく影響する建物だけを対象としてレイトレースを実行できれば、処理量の削減が可能となります。例えば、 $i \neq 0$ である外側のゾーンでは高層建築物が受信電力に大きく寄与していることは経験的に知られています。このことに着目して、例えば図10に示すように高さにしきい値を設け、しきい値以上の建物だけを選択して、レイトレース計算に用いれば推定精度をさほど落とさずに計算処理量の削減が図れます[14]。

5.3 推定精度

図11は基地局がビルの屋上（65m）に

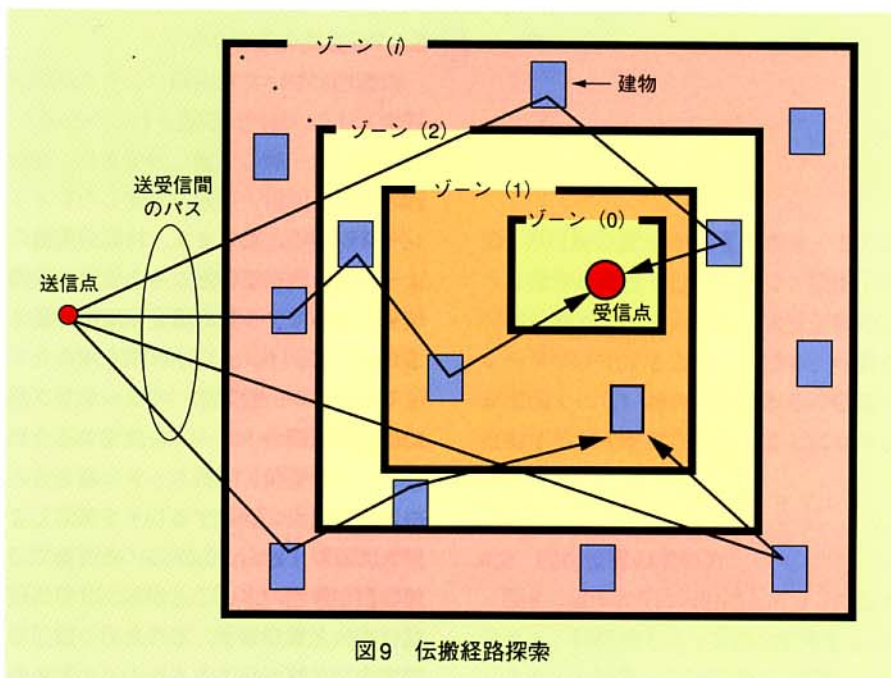
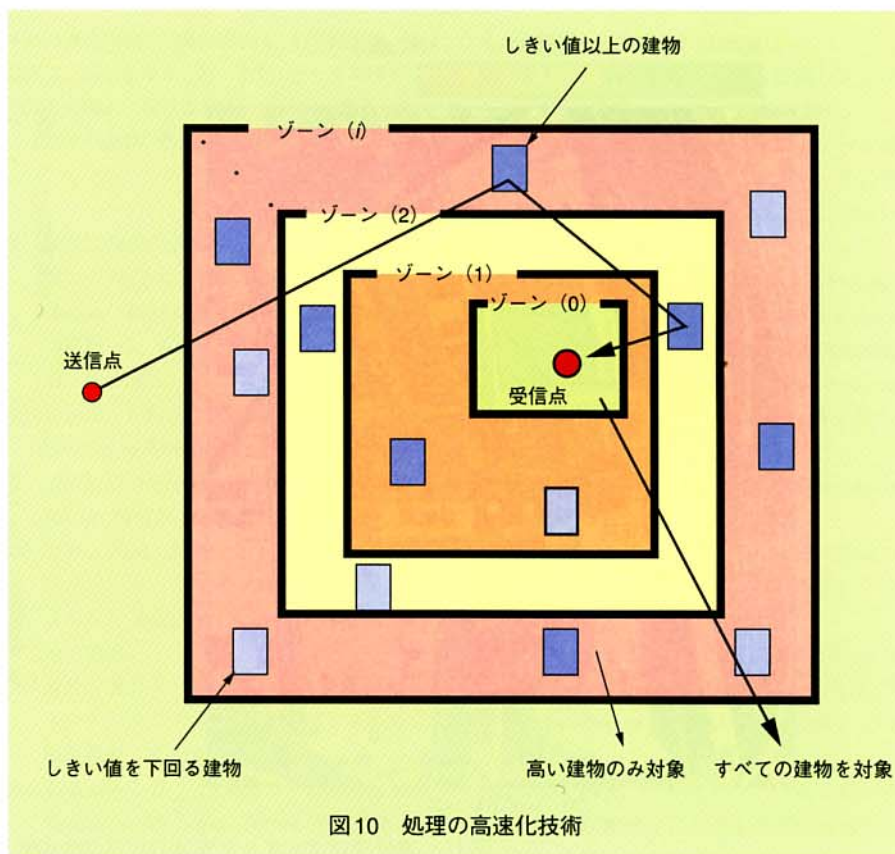


図9 伝搬経路探索



あり、路上に位置する移動局に対してレイトレースを行った結果例を示します[7]. 場所は東京都内品川駅周辺であり、周波数は2.6GHz帯を用いた結果です. 図11(a)は送受信間のレイトレースの2次元表示を示しています. また、図11(b)は受信点における伝搬遅延プロファイルであり、図11(c)は電波の水平面内の到来方向を示しています. ただし、最大反射回数・最大回折回数は各2回とし、最大透過回数は0回としています. 図11(b), (c)より、伝搬遅延プロファイルの形状および電波の到来方向ともに、推定値と実測値はよく一致していることが確認できます.

図12はレイの到来方向を視覚化するための3次元表示の一例を示しています.

6. まとめ

本稿では、レイトレース法の概要について説明しました. また、市街地の伝搬

推定に適用した場合の推定特性について説明しました.

レイトレース法は電波の強さだけでなく、各到来波の伝搬遅延時間(時間)や到来角度方向(空間)も併せて推定できることから、次世代の伝搬モデルとして注目されている時空間伝搬路モデルを構築するための必須技術と考えられ、精力的な研究開発が進められています. しかし、レイトレース法を移動伝搬の汎用の推定システムとして実用化するためには、まだ数多くの課題が残されています. なかでも計算処理の削減および高速化は最重要課題であり、今後の研究に大きな期待が寄せられています.

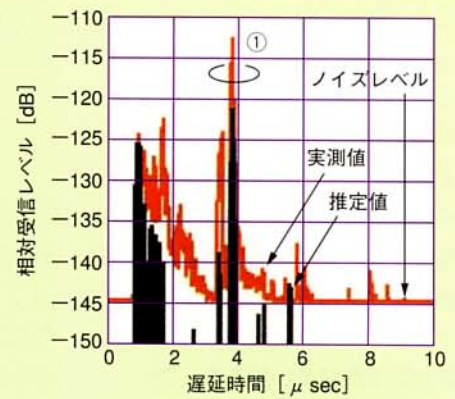
謝 辞

本連載[15]~[17]ではドコモにおける広帯域電波伝搬の最新の測定結果や研究成果を用いて解説を行いました. ただし、それらを得るために伝搬測定やデータ処理において多くの方々のご協力を得ました. 伝搬測定ではNTTアドバンステクノロ

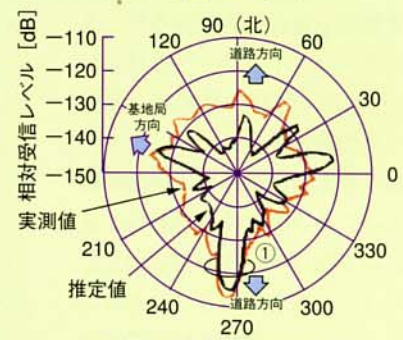
- 50 0 レベルバー 100[dBu]



(a) レイトレース



(b) 遅延プロファイル



(c) 電波の水平面内の到来方向

図11 遅延プロファイルと電波の水平面内の到来方向

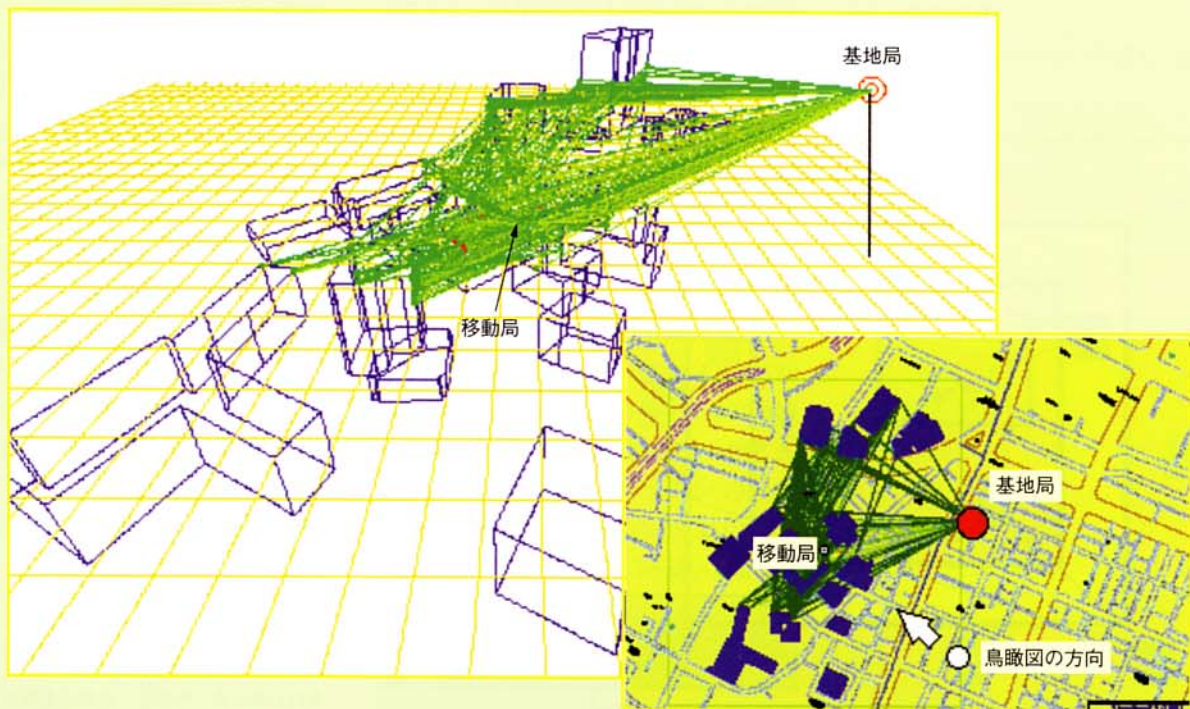


図12 3次元表示例

シ株の奈良武治氏, 阿久津剛氏, 石坂高啓氏, 俵
覚氏にご協力を得ました。また, データ処理では
同阿久津剛氏, 関谷美幸氏にご協力を得ました。
ここに深く感謝の意を表します。

文 献

- [1] 藤井, 今井, 犬飼: “レイトレース法を用いた屋内エリア推定システム—IMAP (Indoor Micro Cell Area Prediction System) の開発—”, 本誌, Vol. 3, No. 3, pp. 22-28, Oct. 1995.
- [2] T. Imai, T. Fujii: “Indoor Micro Cell Area Prediction System using Ray-Tracing for Mobile Communication Systems”, PIMRC'96, pp. 24-28 (1996-10).
- [3] 今井, 犬飼, 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”, 本誌, Vol. 6, No. 1, pp. 15-22, Apr. 1998.
- [4] 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, RCS 96-168 (1997).
- [5] T. Kurner, D. J. Cichon: “Concepts and Results for 3D Digital Terrain-Based Wave Propagation Models: An Overview,” IEEE Journal. COM-11, 7, pp. 1002-1012 (1993).
- [6] V. Erceg, A. J. Rustako and R. S. Roman: “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. 762-1994 (1994).
- [7] 今井, 藤井: “レイトレースを用いた市街地対応移動通信伝搬推定システム”, 信学技報, RCS97-37 (1997).
- [8] 例えば, 細矢監修: “電波伝搬ハンドブック”, 15章, リアライズ社 (1999).
- [9] 朱, 高田, 荒木ほか: “レイトレース法に基づく時空間チャンネルモデルとその実験による検証”, 2000信学総全大, SB-1-6.
- [10] K. Uchida, H. Maeda, T. Imai, T. Fujii and M. Hata: “Analysis of electromagnetic wave scattering by a conducting thin plate and image coefficient for ray tracing method”, IEICE Trans. Electron., Vol. E81-C, No. 6, pp. 993-999 (1998).
- [11] 例えば, M. Born, E. Wolf: “Principles of Optics” Pergamon Press (1974).
- [12] 例えば, 山下 (監修): “電磁波問題の基礎解析法”, 第7章, 電子情報通信学会 (1989).
- [13] T. Imai, T. Fujii: “Propagation Loss in Multiple Diffraction Using Ray-tracing”, Proceeding of IEEE AP-S, pp.2572-2575 (1997-7).
- [14] 今井, 藤井: “レイトレース法を用いた市街地伝搬推定における処理の高速化と推定精度”, 1998信学ソサエティ大会, B-1-33.
- [15] 藤井: “広帯域移動伝搬—その1 狭帯域伝搬から広帯域伝搬—”, 本誌, Vol. 7, No. 3, pp.38-46, Oct. 1999.
- [16] 藤井: “広帯域移動伝搬—その2 伝搬遅延プロファイラー”, 本誌, Vol. 7, No. 4, pp.60-70, Jan. 2000.
- [17] 藤井: “広帯域移動伝搬—その3 W-CDMA対応ダイナミックパスモデル—”, 本誌, Vol. 8, No. 1, pp.67-77, Apr. 2000.