

Technology Reports

Technology Reports

電波伝搬推定のための遺伝的アルゴリズムを用いた レイトレーシング法

レイトレーシング法による伝搬推定において大規模演算を現実的な時間内で処理可能とするため、レイトレーシング処理に遺伝的アルゴリズムを適用したGAレイトレーシング法を提案した。GAレイトレーシング法の概要と計算機シミュレーションにより検証した適用効果について解説する。

いまいつろう
今井 哲朗

1. まえがき

移动通信システムにおいて、電波伝搬推定、特に受信電力を求めるための伝搬損失の推定はシステム設計や基地局の配置設計（置局設計）／セル設計^{*1}を行ううえで極めて重要である。従来、基地局アンテナが周辺建物より高い場合の推定には奥村-秦式が用いられてきた [1]。奥村-秦式は使用するパラメータが送受信間距離、周波数、基地局アンテナ高、移動局アンテナ高と4つしかないことから、ユーザにとっては使いやすい推定法である。しかし、奥村-秦式は測定データより統計的に作成された実験式であることから、その適用には、送受信間距離：1～20km、周波数：150～1500MHz、基地局アンテナ高：30～200m、移動局アンテナ高：1～10mと制限がある。近年は移動端末（携帯電話）の普及に伴い、エリア拡大、品質向上のために基地局アンテナは必ずしも周辺建物よりも高い場所に設置され

なくなってきた。一方で、都市部においてはビルの高層化に伴って、既存基地局が周辺ビルに遮蔽されて受信レベルの低いエリアが生じたり、逆に高層階をエリア化するための吹上げ局（対象建物の高層階を屋外から直接照射する基地局）を設置したりするケースも増えてきた（図1）。このような場合には奥村-秦式は適用ができず、実際の地形・地物の影響を反映した推定法が必要とされる [2][3]。

レイトレーシング法は、3次元コンピュータ・グラフィックス分野のレンダリング（画像や映像を生成すること）手法として有効とされている [4]。一方、電波伝搬の分野においても、実伝搬環境を反映させることのできる推定法として長年実用化が検討されてきた [1]。レイトレーシング法による伝搬推定の概要を図2に示す。レイトレーシング法では、送信点から放射される電波をレイ（Ray）と見なし、周辺構造物との相

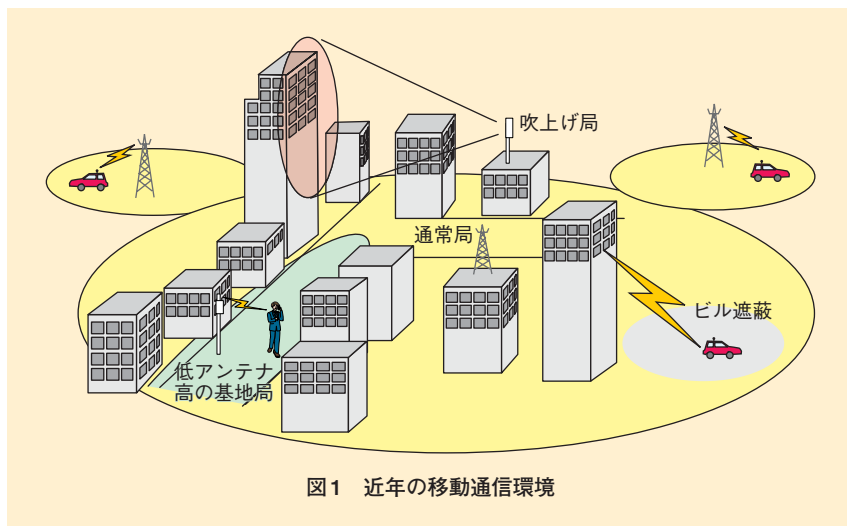


図1 近年の移动通信環境

*1 セル設計：1つの基地局が担当するエリアをセルと呼び、複数のセルを用いて所望のサービスエリアをいかにしてカバーするかを設計すること。

相互作用（反射，透過，回折）を経て受信点に到達するレイを幾何学的にトレース（Trace）する。受信点における伝搬の諸特性（損失，遅延，到来角度）は，トレースした各レイの伝搬距離，到来角度および電界を用いて求められる。例として，都内の新宿エリアにおいて受信電力を推定した結果（周波数：2GHz）を奥村-秦式による結果とともに図3に示す。ただし，奥村-秦式において建物占有面積による補正は加えていない。図3(b)において図3(a)に比べて道路沿いや交差点で受信電力が大きくなっている様子より，レイ

トレーシング法では推定エリア内の建物による影響が推定結果に大きく反映されることが分かる。

このようにレイトレーシング法はさまざまな環境における各種伝搬特性を一元的に推定できる極めて魅力的な方法である。しかし，レイトレーシング演算の精度と処理量にはトレードオフの関係があり，広範囲にわたる多くの構造物を対象に相互作用回数の上限值を高く設定してレイをトレースすると演算精度が向上する反面，必要となる演算処理量が激増する。したがって，以前よりレイトレーシング処理の高速化は大き

な課題の1つとされている。

本稿では，遺伝的アルゴリズム（GA：Genetic Algorithm）^{*2}[5]をレイトレーシング処理に適用することにより，演算処理の大幅な高速化を実現可能とするGAレイトレーシング法[6]（以下，GA_RT法）について解説する。また，その効果を計算機シミュレーションにより明らかにする。

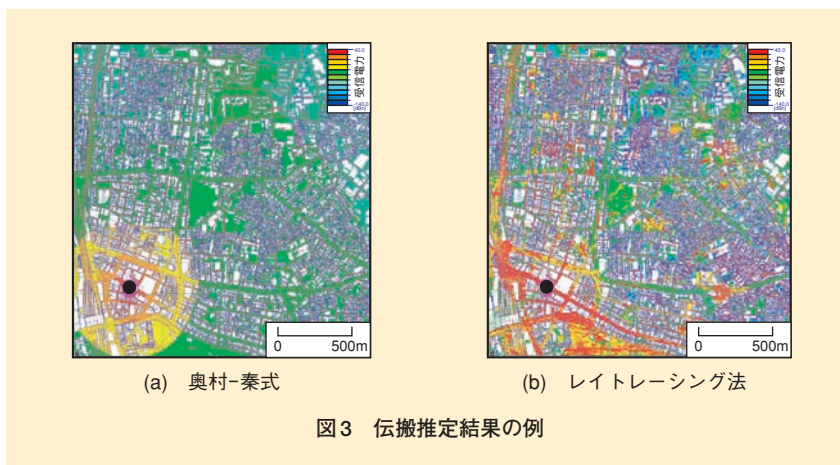
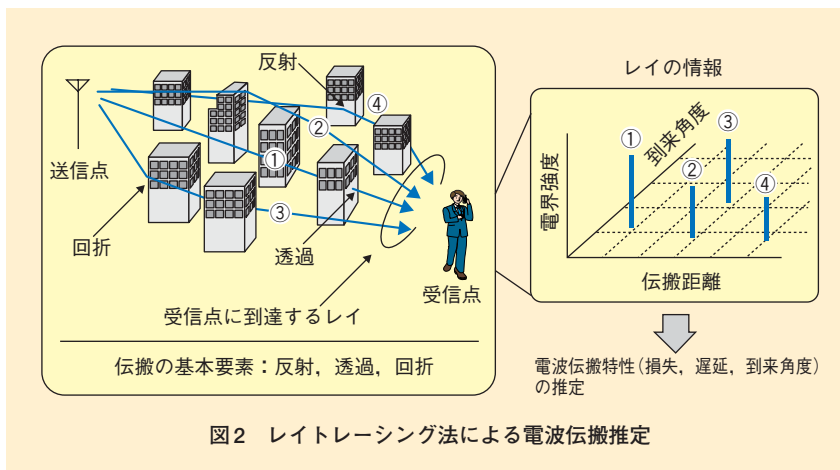
2. レイトレース処理の高速化

本章ではレイトレーシング処理を高速化するためのアプローチについて概説する。

レイトレーシング処理を高速化するアプローチは大きく，①演算処理の効率化，②アルゴリズムの高速化，③演算処理の分散化の3つに分類できる。これらのアプローチについて，開発した市街地マクロセル伝搬推定システムのUMAP（Urban Macrocell Area Prediction system）[7]にて適用した高速化法を例に説明する。

①演算処理の効率化

このアプローチは，これまでに得られている経験や知識により伝搬路のモデルを構築して「考慮する構造物の範囲」と「設定する相互作用回数の上限值」に制限を加える方法である。仮定する伝搬路モデルが適切であれば伝搬特性にほとんど寄与しないレイをトレースせずに済むことから，演算精度の劣化を最小限に抑えつつ，大幅な演算量の削減が可能となる。UMAPにおいては図4に示すSORT（Sighted Objects-based



*2 遺伝的アルゴリズム：ミシガン大学のジョン・ホランド（John H. Holland）が生物の適応・進化をモデル化したアルゴリズム。

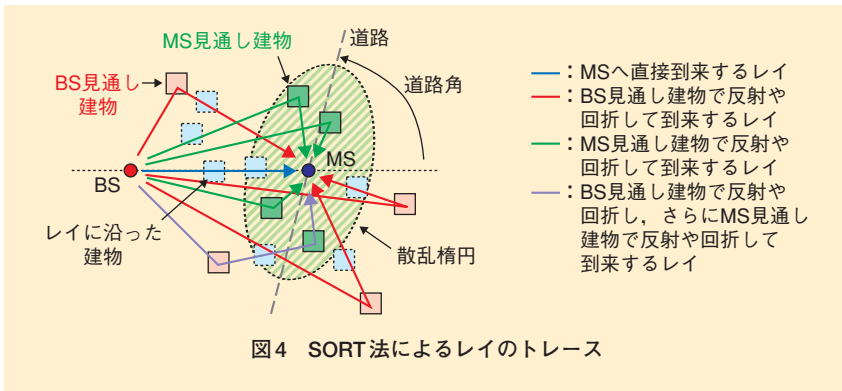


図4 SORT法によるレイのトレース

Ray-Tracing) 法が本アプローチに相当する。本方法では、イメージング法 (Imaging method)^{*3}により、レイをトレースする際に対象とする構造物や建物を基地局 (BS: Base Station) もしくは移動局 (MS: Mobile Station) から見通しとなるものに限定し、レイの伝搬路をBS → BS見通し建物 → MS見通し建物 → MSと仮定する。伝搬路が大幅に制限されることから演算処理量も劇的に減少する。

②アルゴリズムの高速化

このアプローチは、イメージング法やレイランシング法 (Ray-

launching method)^{*4}で代表されるレイのトレースアルゴリズムの高速化を図る。基本的に高速化に際して演算の近似を行わないことから、本アプローチの適用により演算精度の劣化は生じない。ただし、レイトレーシングに際して前処理が必要となることが多い。UMAPにおいては図5に示す見通し建物探索法がこのアプローチに相当する。この見通し建物探索法は物体との見通し判定を高速化する方法であり、図5に示すように前処理として推定対象エリアを $\Delta L \times \Delta L \times \Delta H$ の探索ブロックで分割しておき、見通し建物を探

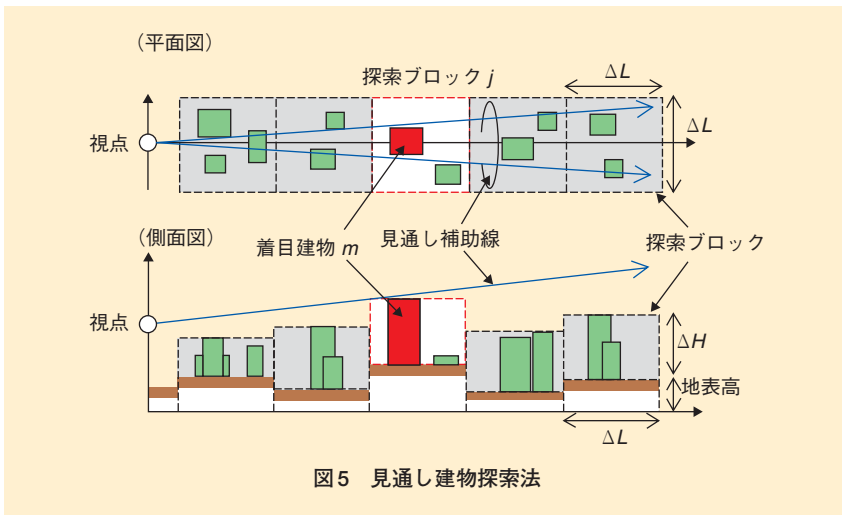


図5 見通し建物探索法

る際には、まず見通しとなる探索ブロックを探すという方法である。本方法を用いると、一度に複数の建物を探

③演算処理の分散化

最後のアプローチは、図6に示すようにレイトレーシング演算をネットワークで接続した複数の計算機に分散させて処理する方法である。このアプローチの場合、演算精度は劣化しない。また、ネットワークの伝送速度がボトルネックにならない範囲であれば、トータルとしての演算速度は基本的に接続された計算機やCPUの数に比例する。環境を整えるためにコストはかかるが、もっとも堅実な高速化法といえる。分散サーバの計算機としてブレードマシン^{*5}を採用すれば省スペース化も図られる。筆者らはクアッドコアCPU^{*6}搭載のブレードが25枚からなるマシンをUMAPの分散サーバとして使用している。なお、最近のグリッド・コンピューティング技術^{*7}の進歩を考えると、今後、高速化につい

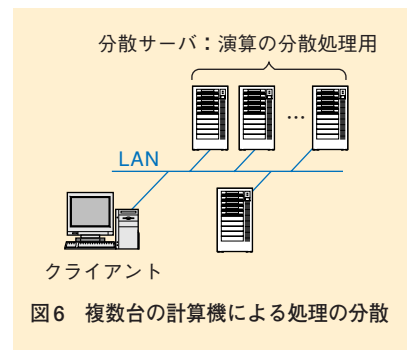


図6 複数台の計算機による処理の分散

*3 イメージング法: 面やエッジに対する送信点/受信点の鏡像 (イメージ) を用いてレイの伝搬路をトレースする方法。

*4 レイランシング法: 送信点からレイを角度的に一定間隔で出射させ、各レイに対して伝搬路をトレースする方法。

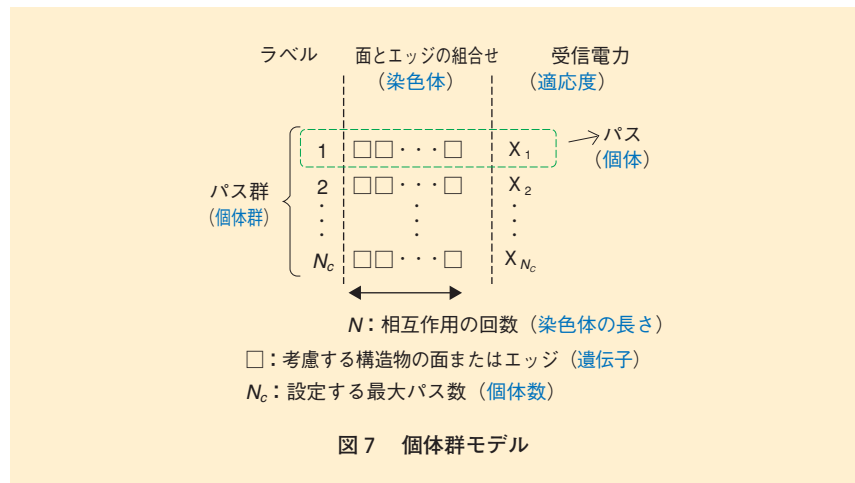
*5 ブレードマシン: ブレードと呼ばれる抜き差し可能なコンピュータを、ベースシャーシと呼ばれるブレードを複数搭載可能な筐体 (ケース) 内に搭載したサーバコンピュータ。

て大きく期待できるアプローチである。

以上のアプローチにおいて、もっとも劇的な効果が期待できるのは、①演算処理の効率化によるアプローチである。ただし、すでに述べたように、このアプローチには基となる伝搬路モデルが必要であり、これまでは主に実測によりモデルの構築と検証が行われてきた。また、基本的にユニバーサルな伝搬路モデルは存在せず、電波の伝搬環境に応じて用意しなければならない。例えば伝搬環境が屋外であるか屋内であるかによって、最適な伝搬路モデルは異なる。基地局の設置形態やセル構成の形態が多様化している昨今、想定するすべての伝搬路モデルを構築することは困難である。しかし、視点を変え、伝搬環境に応じて適切な伝搬路モデルを自己組織化^{*8}するようなアルゴリズムをレイトレーシング処理と組み合わせることができれば、極めて効果的な処理の高速化が実現できるといえる。3章で述べるGA_RT法は伝搬路モデルの自己組織化アルゴリズムとして、生物が環境に合わせて進化する過程をモデル化したGAに着目した方法である。

3. 遺伝的アルゴリズムによる高速化

GA_RT法はイメージング法によるレイトレーシング処理に適用することを前提にしている。イメージング法とは、まず、レイが送信点から受信点まで伝搬する経路（パス）を



構造物の面とエッジの組合せとして設定し、次にそれぞれのパスについて送信点（もしくは受信点）のイメージを生成しながら相互作用点を探索し、最後に得られた相互作用点を送信点から受信点まで結ぶことによりレイをトレースする方法である（詳細は文献[1]を参照のこと）。

3.1 基本モデル

GAでは対応形質^{*9}が異なる遺伝子の列で染色体を定義し、それら遺伝子に解こうとしている問題の具体的な値を設定範囲内で付与することにより各個体^{*10}に多様性を持たせる。すなわち、個体は複数遺伝子の1つの組合せで表現され、その組合せ総数が表現可能な個体の種類となる。一方、イメージング法ではレイのパスを面とエッジの組合せにより表現し、その組合せ総数がレイトレーシング処理対象の総パス数 N_{all} となる。このように、GAの個体表現とイメージング法のパス表現は極めて類似している。ここに着目したのが図7に示すGA_RT法の個体群モ

デルである。

提案の個体群モデルでは、遺伝子を面とエッジに、染色体を設定パスの面とエッジの組合せに対応させて1個体を1パスと見なす。また、個体群はパス群となり、そのサイズ（1世代当りの個体数）が N_c である。GA_RT法の基本処理フローは次のようになる。まず、「考え得る面とエッジのすべての組合せ」の中からランダムに N_c 組を選択し、それらを初期パス群（第1世代）として設定する。次に、各パスに対してレイのトレースおよび受信電力を計算する。ここで、各個体（パス）の適応度^{*11}はトレースされたレイの受信電力で定義する。パスの適応度評価では、適応度によりソートした順序でパスのラベルを振り直す。続いて、得られた結果があらかじめ設定した終了条件を満たすか否かを判定し、条件を満たしていない場合には、図8に示すGA特有の「選択^{*12}」、「交叉^{*13}」、「突然変異^{*14}」の操作に基づいてパス群の再設定（世代の更新）を行い、再設定したパス群に対

*6 クアッドコアCPU：4つのCPUコアを実装したCPU。

*7 グリッド・コンピューティング技術：ネットワーク上にある複数のコンピュータを統合し、仮想的に1つの高性能なコンピュータと見なして演算を実行させる技術。

*8 自己組織化：本稿では自立的に伝搬路モデルを形成すること。

*9 対応形質：各遺伝子が対応している形質。形質は物の形や実質のことであり、特に生物の分野においては形態的な特徴のこと。

*10 個体：1つの独立した生物体。

*11 適応度：遺伝的アルゴリズムにおいて、生物が環境にどれほど適応しているかを示すもの。

*12 選択：遺伝的アルゴリズムにおいて、生物の自然淘汰をモデル化したもの。

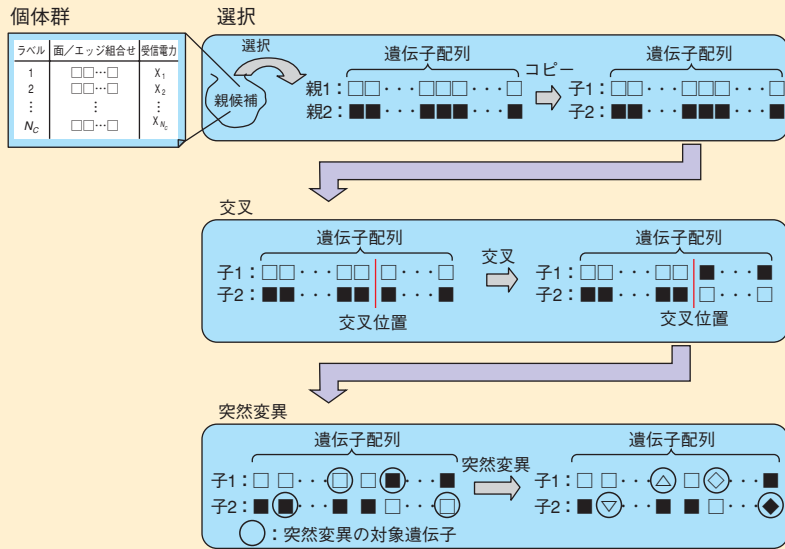


図8 GAの世代更新（パスの再設定）

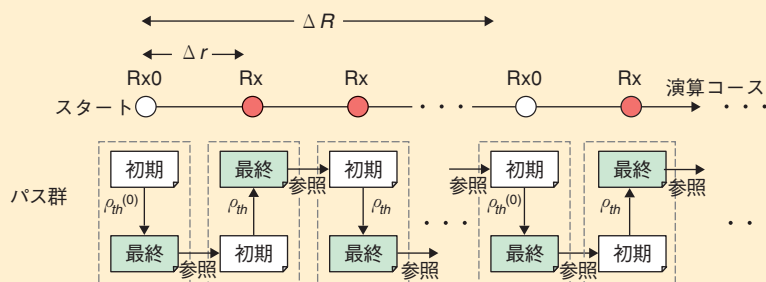


図9 連鎖モデル

してレイのトレースを行う。これらを終了条件が満たされるまで繰り返し、条件を満たした場合には、所望の伝搬特性（トータルの受信電力、遅延スプレッドなど）を算出して処理を終了する。ここで、終了条件は演算率（＝演算したパスの総数／総パス数 N_{tot} ）が設定しきい値を超えたか否かを条件としている。

3.2 連鎖モデル

連鎖モデルは、多くの受信点を面的に配置した場合の計算、いわゆるエリア計算を前提とした場合のGA適用モデルである。

GAのパフォーマンスは初期に設定する個体群に大きく依存する。すなわち、適切な個体群を初期に設定することができれば、少ない演算率で高い演算精度を得ることができる。連鎖モデルは、すでに演算が終

了している最近隣の最終パス群を初期値として逐次演算を行うモデルである。図9を用いて具体的に説明する。

連鎖モデルでは、まず、計算エリア内にある受信点に対して、隣り合う受信点間距離 Δr が互いに短くなるように演算順序を設定する（演算コースの設定）。次に、受信点を

- ・初期化受信点 Rx_0 ：初期パス群を基本モデルに従ってランダムに設定する受信点
- ・通常受信点 Rx ：初期パス群を隣接の受信点（演算コースにおいて1つ前の受信点）にて演算した結果を設定する受信点

の2つの種類に分ける。ここで、 $\Delta R (\geq \Delta r)$ は初期化受信点間の距離であり、 $\Delta R = \Delta r$ と設定した場合にはすべてが初期化受信点となり、 $\Delta R = \infty$ と設定した場合にはスタート点を除いてすべてが通常受信点となる。なお、すべてが初期化受信点となることは、連鎖モデルが適用されないことを意味する。また、 $\rho_{th}(0)$ と ρ_{th} はそれぞれ初期化受信点および通常受信点において設定する演算率のしきい値であり、基本的に $\rho_{th}(0) > \rho_{th}$ となるように設定する。最後に、連鎖モデルを適用した際のGA_RT法の処理フローを図10に示す。

4. 遺伝的アルゴリズムの適用効果

本章ではGA_RT法の適用効果を計算機シミュレーションにより評価する。

* 13 交叉：遺伝的アルゴリズムにおいて、生物が交配によって子孫を残すことをモデル化したもの。

* 14 突然変異：遺伝的アルゴリズムにおいて、生物に見られる遺伝子の親と異なる特徴が生じる構造上の変化をモデル化したもの。

4.1 評価モデル

評価には水平面内2次元モデルを用いる。構造物はすべて水平面に垂直な壁面（高さ：無限大，厚み：なし，幅：有限）であるとし，それらを $2\text{km} \times 2\text{km}$ の計算エリア内に複数配置する。ただし，壁面の位置と向きは共にランダムとし，また，本モデルで定義する壁面は1つの面と2つのエッジ（水平面に垂直で長さが高さ方向に無限）で構成されるものとする。

4.2 計算条件

考慮する構造物（壁面）は材質をコンクリート（比誘電率^{*15}：6.76，導電率^{*16}： 0.0023S/m ），幅を30mとし，配置する数 M_0 は50とする（面とエッジの総数 M は150）。トレースの対象は，最大透過回数を ∞ で反射と回折の回数 N が2となるレイとする。ただし，本シミュレーションでは「同一の壁面内で反射と回折を連続して繰り返す組合せ」はトレースの対象外とする。レイの受信電力は，周波数を2GHz，1回当りの透過損失^{*17}を10dBとし，反射係数^{*18}と回折係数^{*19}の計算にそれぞれ2層媒質におけるフレネル反射係数^{*20}およびUTD（Uniform Theory of Diffraction）を用いることにより求める。なお，フレネル反射係数とUTDの詳細は文献[1]を参照されたい。

次にGAに関する条件について述べる。パス群のサイズは $N_c = 2MN$ とする。次世代の生成は連続世代型^{*21}であるエリート保存方式とする[5]。具体的には，前世代の中から適応度

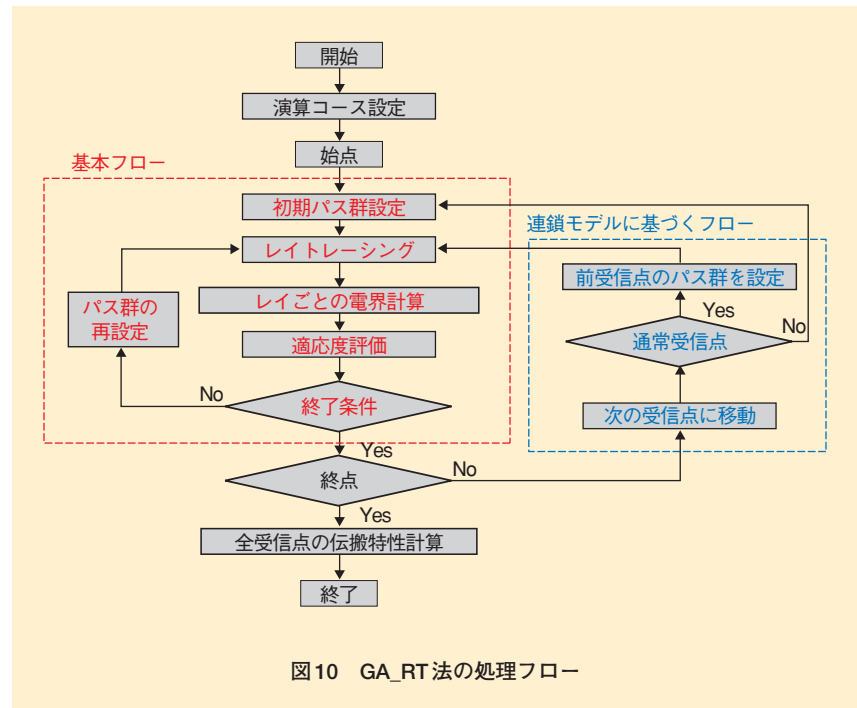


図10 GA_RT法の処理フロー

の高い $N_c/3$ をエリートとして選択し，これらは無条件に次世代に残す。残りの $2/3N_c$ はランダムに選ばれたエリートのペア間で1点交叉（交叉位置はランダム），突然変異（発生確率 $P_m = 0.01$ ）により生成する。なお，終了条件は前述の演算率であり，その値は本シミュレーションにおいてパラメータとする。

4.3 計算結果

受信電力のエリア図として，従来法（イメージング法）による計算結果を図11(a)に，GA_RT法（ $\Delta R = \infty$ ， $\rho_{th}(0) = 0.5$ ， $\rho_{th}(0) = 0.05$ ）の計算結果を図11(b)に示す。なお，送信点 T_x の位置は $(0, -500\text{m})$ とし，演算コースは座標 $(-1000\text{m}, -1000\text{m})$ をスタート点としてY軸に対して蛇行するように設定した。受

信点間距離 Δr は10mとしたことから，受信点の総数は40,401ポイントである。また，両図において赤の線分は設定した壁面を表している。図11(b)の範囲Aで示した部分のように連鎖モデルが環境の変化に十分に追従できていない場所も見受けられるが，図11の結果よりGA_RT法は従来法とよく一致していることが分かる。この結果に対して，従来法による結果を真としてGA_RT法の誤差を評価すると平均で1.23dBである。また，平均の演算率は $\rho_{th}(0) = 0.5$ ， $\rho_{th} = 0.05$ より0.06である（詳細は文献[6]を参照のこと）。すなわち，これは誤差1.23dBを許容すれば，GA_RT法の演算速度が従来法の約17倍（ $\approx 1/0.06$ ）に高速化できることを意味する。

*15 比誘電率：電束密度と電場との比が誘電率として定義され，物質の誘電率を表す際には，真空の誘電率に対する比誘電率を用いることが一般的である。

*16 導電率：物質の電気抵抗率（単位長さ，単位面積当りの抵抗）の逆数で定義され，

電気伝導のしやすさを表す値。

*17 透過損失：物質を透過する際に付加される損失。

*18 反射係数：反射に伴って電界が変化する割合。

*19 回折係数：回折に伴って電界が変化する割合。

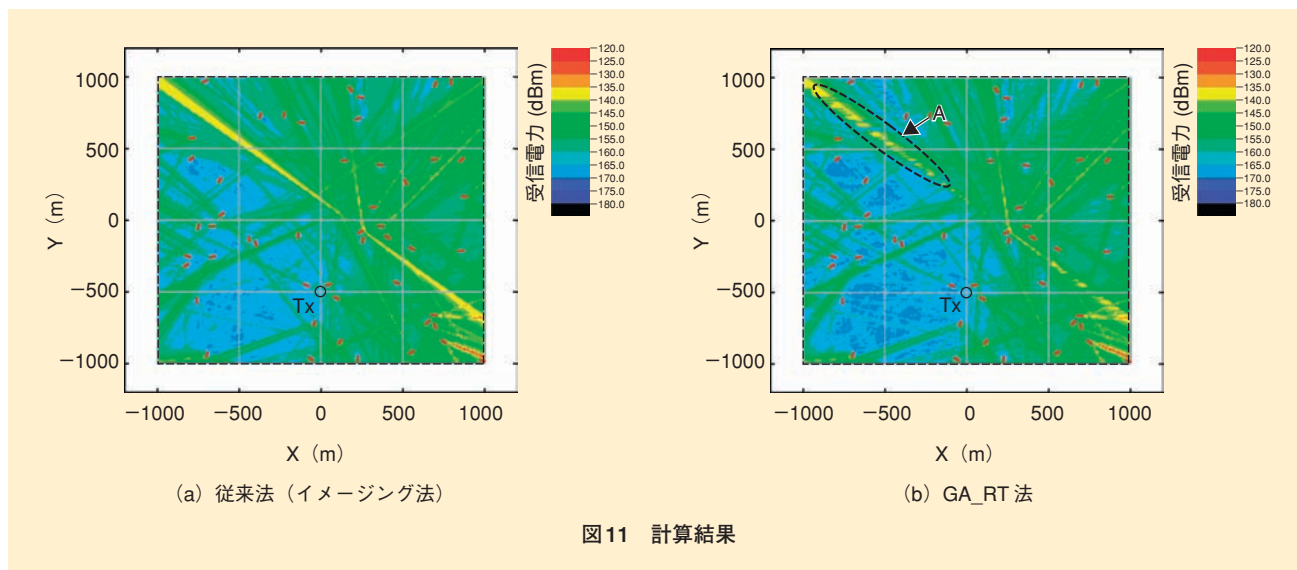


図11 計算結果

5. あとがき

本稿では、レイトレーシング処理に遺伝的アルゴリズムを適用することにより、大幅な演算処理の高速化を実現できるGAレイトレーシング法について説明した。また、その適用効果を計算機シミュレーションによる結果から評価し、推定誤差1.23dBを許容すれば理想的には演算速度を約17倍に高速化できることを明らかにした。

GA_RT法はこれまでの高速化法と組み合わせて適用することが可能である。筆者らはすでに伝搬推定シ

ステムUMAPへの実装を終えている。UMAPにおいてGA_RT法を効果的に機能させるためのパラメータスタディ^{*22}およびその効果の検証が今後の主な課題である。

文献

- [1] 細矢良雄 (監修): “電波伝搬ハンドブック, 第2部, 第15章,” (株)リアライズ社, 1999.
- [2] 福重勝, 今井哲朗: “基地局近傍にある高層ビルの移動通信サービスエリアへの影響に関する一検討,” 2007電子情報通信学会総合大会, B-1-9, 2007.
- [3] 北尾光司郎, 今井哲朗: “幾何光学計算による建物侵入波の簡易受信レベル推定モデルの提案,” 2007電子情報通

信学会総合大会, B-1-8, 2007.

- [4] 千葉則茂, 村岡一信: “レイトレーシングCG入門, 第3章,” (株)サイエンス社, 1991.
- [5] メラニー・ミッチェル: “遺伝的アルゴリズムの方法,” 東京電機大学出版局, 1997.
- [6] 今井 哲朗: “電波伝搬推定のための遺伝的アルゴリズムを用いたレイトレーシング処理の高速化法,” 信学論 (B), Vol. J89-B, No. 4, pp. 560-575, Apr. 2006.
- [7] 今井, ほか: “レイトレーシング法を用いた市街地マクロセル伝搬推定システム,” 本誌, Vol. 12, No. 1, pp. 41-49, Apr. 2004.

* 20 フレネル反射係数: 物理学者フレネルにより定式化された反射係数。この式は、屈折率の異なる媒質どうしの境界面が波長に対して十分に大きくかつ滑らか、入射する電磁波が平面波であることを前提とする。

* 21 連続世代型: 親と子の世代で同一の個体が存在することを許容する形式。

* 22 パラメータスタディ: 解析作業において設定するパラメータの値を変更して、解析結果を比較し、最適な値を調査すること。