

電波伝搬解析のための レイトレーシング法

—— 基礎から応用まで ——

博士(工学) 今井 哲朗 著

コロナ社

ま え が き

移動通信環境における電波伝搬はきわめて複雑であることから、奥村善久氏が伝搬研究のコンセプトを提案して以来、その特性は実験的アプローチにより解析されてきた。しかし、携帯電話システムの進化とともにシステム設計に必要となる伝搬特性が多岐にわたるようになったことから、近年、そのすべてを測定より解析するにはきわめて多くの時間と労力、コストが必要となっている。そこで、一般的に利用されるようになったのが、レイトレーシング法である。

レイトレーシング法は電磁界理論の一つである幾何光学理論（幾何光学近似および幾何光学的回折理論）に基づくものである。言い換えれば、幾何光学理論のアプリケーションがレイトレーシング法であり、両者はイコールではない。幾何光学理論に関する良書は多く存在する。それらには電波をレイとみなす理論的背景と電界計算法の記載はあるが、その応用方法（例えば、解析範囲内で実際にレイをトレースする方法など）については述べられていない。なお、レイの電界計算法についても、複数ある規範問題の中から電波伝搬解析に有用なものを見つけ出すのは結構な手間がかかる。一方、電波伝搬の専門書にも近年はレイトレーシング法に関する記述はある。しかし、その内容は実測結果との比較が主であり、具体的な計算法についての説明はほとんどない。

本書では、電波伝搬解析に必要なレイトレーシング法のすべての項目を網羅した。内容を理解いただければ、実際にプログラムを組むことができると思う。また、現在は多くのソフトが市販されているが、ここで得られた知見はソフトのパフォーマンスを評価するためにも活かせるだろう。

レイトレーシング法による電波伝搬解析は、3章“レイトレーシング法の基礎”と4章“レイのトレース法”がわかれば実行できる。しかし、実際にプログラミングをしてみると、特に伝搬環境を現実に近づけるほど解析に要する計算

時間の問題に直面する。そこで重要となるのが、5章“レイトレースの高速化手法”である。これまでの電波伝搬分野におけるレイトレーシング法の研究はこの高速化手法の開発が主であったといっても過言ではない。特に市街地を対象とする解析では、計算機の能力が飛躍的に向上した現在においても、ここで述べる高速化手法は重要な技術となっている。また、高速化手法の開発においては、実測値との比較検討から提案されたものも多く、それらは電波伝搬特性の本質を表しているといえる。この意味において、6章“レイトレーシング法の実環境への適用”は、さまざまな環境の電波伝搬特性を理解する助けにもなるだろう。また、7章“レイトレーシング法の拡張”で述べる内容は、レイトレーシング法を用いて、特に準ミリ波・ミリ波のような高周波数帯を対象とする解析の精度向上を図るために、現在も精力的に研究されているものである。本分野を今後の研究対象にと考えている技術者・研究者の方には参考になると思う。

なお、2章“移動通信における電波伝搬概要”では、レイトレーシング法で得られた解析結果を解釈・評価する助けとして、これまで得られている代表的な伝搬モデルや測定結果を概説している。また、付録では伝搬解析に関連するトピック（例えば、本文でしばしば登場する物理光学近似）についても概説している。レイトレーシング法の理解のためのみならず、本書を伝搬解析のハンドブックとしても利用していただければ幸いである。

本書は、電子情報通信学会アンテナ・伝播研究専門委員会主催の「アンテナ・伝搬における設計・解析手法ワークショップ（第50回）」のテキストに加筆・修正したものである。テキストの作成にあたり励ましや貴重なご意見をいただきました、岩井誠人実行委員長（同志社大学）をはじめとする実行委員の皆様には深く感謝いたします。また、執筆にあたり、ご配慮やご議論いただきました北尾光司郎氏をはじめ株式会社NTTドコモの関係各位に感謝申し上げます。最後に、レイトレーシング法の研究開発にあたり多大なご指導をいただきました元上司の藤井輝也氏に、この場をかりまして感謝の意を表します。

2016年6月

今井 哲朗

目 次

1. レイトレーシング法の位置づけ—その概要と本書の構成—

1.1 技術背景	1
1.2 電波伝搬研究のアプローチ	3
1.3 レイトレーシング法	5
1.4 本書の構成	7

2. 移動通信における電波伝搬概要

2.1 自由空間伝搬	10
2.2 電波伝搬特性と評価指標	14
2.2.1 受信電力の変動特性	14
2.2.2 マルチパス特性	26
2.3 レイトレーシング法と伝搬測定	39

3. レイトレーシング法の基礎

3.1 幾何光学近似における基本的な解	42
3.2 自由空間伝搬	45
3.3 反射を伴う伝搬	49
3.4 透過を伴う伝搬	54
3.5 回折を伴う伝搬	59

3.6 複数回の反射・透過・回折を伴う伝搬	70
3.6.1 反射と透過を複数伴う伝搬	71
3.6.2 回折を複数伴う伝搬	72
3.7 マルチパス伝搬への拡張	77
3.8 レイトレーシング法の適用範囲	78
3.8.1 構造物の大きさ（開口や面のサイズ）からみた適用範囲	78
3.8.2 表面の粗さからみた適用範囲	84

4. レイのトレース法

4.1 イメージング法	89
4.1.1 基本原理	89
4.1.2 計算量	90
4.1.3 アルゴリズム	91
4.2 レイ・ローンチング法	93
4.2.1 基本原理	93
4.2.2 計算量	98
4.2.3 アルゴリズム	99
4.3 イメージング法とレイ・ローンチング法の比較	100
4.3.1 計算量の簡易な比較法	100
4.3.2 アルゴリズムとしての一般的な位置づけ	102

5. レイトレースの高速化手法

5.1 高速化の考え方	105
5.2 探索範囲の効率化	106
5.2.1 探索範囲の効率化とレイトレース条件	107

5.2.2	さらなる高速化のための手法	109
5.3	探索処理の効率化	112
5.4	探索処理の分散化	124

6. レイトレーシング法の実環境への適用

6.1	レイトレーシング結果と評価指標	128
6.1.1	平均受信電力	129
6.1.2	遅延スプレッドと角度スプレッド	133
6.1.3	交差偏波識別度	136
6.1.4	レイトレーシング法を用いる場合の留意点	137
6.2	平面大地伝搬の解析	138
6.2.1	伝搬路のモデルとレイトレース	139
6.2.2	理論解析	140
6.2.3	レイトレーシング法による解析	145
6.3	トンネル内伝搬の解析	146
6.3.1	トンネル内伝搬の特徴	147
6.3.2	伝搬路のモデルとレイトレース	148
6.3.3	レイトレーシング法による解析	149
6.3.4	実測結果との比較	154
6.4	屋内伝搬の解析	160
6.4.1	屋内伝搬の特徴	161
6.4.2	レイトレースの高速化	165
6.4.3	高速化手法の効果	167
6.4.4	解析結果例	172
6.5	低基地局アンテナ屋外伝搬の解析	173
6.5.1	伝搬路のモデル化とレイトレース	173

6.5.2	レイトレーシング法による解析	176
6.5.3	実測結果との比較	180
6.5.4	サービスエリアの解析例	183
6.6	高基地局アンテナ屋外伝搬の解析	183
6.6.1	3D-PRISM の概要	185
6.6.2	伝搬解析と計算速度	188
6.6.3	実測結果との比較	191
6.7	考慮すべき相互作用回数	196

7. レイトレーシング法の拡張

7.1	物理光学近似とのハイブリッド	199
7.2	ER モデルとのハイブリッド	203
7.3	FDTD 法とのハイブリッド	205

付 録

A.1	ウィーナー・ヒンチンの定理	208
A.2	特 性 関 数	210
A.3	ダイアドの演算	211
A.4	フレネル積分の近似	213
A.4.1	近似式 1 (UTD で定義されるフレネル積分の近似)	213
A.4.2	近似式 2 (一般的なフレネル積分の近似)	214
A.4.3	近似式 3 (A.6.2 項で定義されるフレネル積分の近似)	215
A.5	スロープ回折を伴う伝搬	215
A.6	物理光学近似 (スカラ形式の理論)	218
A.6.1	フレネル-キルヒホッフの回折公式	218

A.6.2	矩形開口からの回折	220
A.6.3	偏波の考慮	225
A.7	物理光学近似（ベクトル形式の理論）	226
A.7.1	構造物から空間への散乱（反射）	228
A.7.2	構造物内への散乱（透過）	232
A.8	ER モデル	236
A.8.1	鏡面反射成分	236
A.8.2	拡散反射成分	237
A.8.3	偏波の考慮	239
A.9	材料の媒質定数	240
A.10	不均一媒質中のレイの伝搬	241
A.10.1	幾何光学近似における基本的な解	241
A.10.2	屈折率が不均一である大気中のレイトレーシング	244
引用・参考文献		247
索 引		258

本書に関連するプログラムコードを Web ページからダウンロードすることができる (p.9 参照)。これらは反射・透過・回折係数の計算およびレイのトレース計算に関するものであり、本書で示した解析結果のうちで基本的なものを確認することができる。また、これらを組み合わせて、かつ多少の改良をすれば、任意の問題にも対応可能である。

おもな記号と表記

記号	意味
a, b, c, \dots A, B, C, \dots	スカラ
$\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}, \dots$ $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \dots$	ベクトル
$\hat{a}, \hat{b}, \hat{c}, \dots$	単位ベクトル
$\overline{\mathbf{A}}, \overline{\mathbf{B}}, \overline{\mathbf{C}}, \dots$	ダイアド
ϵ_0	自由空間（真空）の誘電率 ($8.854 \times 10^{-12} \approx 1/36\pi \times 10^{-9} \text{ F/m}$)
μ_0	自由空間（真空）の透磁率 ($4\pi \times 10^{-7} = 1.257 \times 10^{-5} \text{ H/m}$)
ϵ_r	比誘電率
μ_r	比透磁率
σ	導電率（ただし、特にことわりのない場合に限る）
c	光速 ($1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0} \approx \text{約 } 3 \times 10^8 \text{ m/s}$)
Z_0	自由空間の固有インピーダンス ($\sqrt{\mu_0/\epsilon_0} = 120\pi$)
f	周波数
ω	角周波数 ($2\pi f$)
λ	波長（特に、自由空間の場合は $\lambda = c/f$ ）
k	波数 ($2\pi/\lambda$)
P_T	送信電力
P_R	受信電力
G_T	送信アンテナ利得
G_R	受信アンテナ利得
D_T	送信アンテナの指向性関数
D_R	受信アンテナの指向性関数
$\overline{\mathbf{R}}$	ダイアド反射係数
$\overline{\mathbf{T}}$	ダイアド透過係数
$\overline{\mathbf{D}}$	ダイアド回折係数
BS	基地局 (base station)
MS	移動局 (mobile station)
Tx	送信局, 送信機, 送信点
Rx	受信局, 受信機, 受信点

1

レイトレーシング法の位置づけ —その概要と本書の構成—

1.1 技術背景

1990年代後半以降の情報通信技術の発展は目覚ましく、いわゆる「高度情報通信ネットワーク社会」は現実のものとなり、現在はその新たな展開に向けてさらに加速している。それを象徴するものとしてインターネットとともに挙げられるのが携帯電話（およびそのシステム）の進化である。わが国において、1970年代後半に自動車電話としてサービスが開始されたアナログ方式による第1世代の移動通信システム[†]（1979年～）は、初めてデジタル化された第2世代システム（1993年～）、ブロードバンドサービスを可能とする世界で標準化された第3世代システム（2001年～）を経て、2010年からは下り最大75 Mbpsのデータ通信を実現する第4世代システム（LTE）のサービスが開始されている。なお、2015年からは次期システムとして検討されてきたLTEの発展形であるLTE-Advancedの導入により下り最大225 Mbpsのサービスが開始されている。

移動通信システムにおける通信環境は、おもに見通し外・マルチパス環境であることを特徴とする。したがって、自由空間伝搬と異なり信号の受信レベルは移動局（mobile station, MS）の移動に伴い複雑に変動（フェージング）する。

[†] 奥村善久氏（金沢工業大学名誉教授、元日本電信電話公社移動無線研究室長）は『世界初の自動車携帯（セルラー）電話ネットワーク、システムおよび標準規格に対する先駆的貢献』により、2013年2月19日に日本人研究者として初めて工学のノーベル賞とも呼ばれる「チャールズ・スターク・ドレイパー賞」を受賞された。

2 1. レイトレーシング法の位置づけ

そこで、従来、受信レベル変動の把握とモデル化はシステム設計の基本となっている。また、近年は通信品質の向上や高速・大容量データ伝送を実現するためにさまざまな要素技術が提案されるようになり、システム設計において必要となる電波伝搬特性も多岐にわたるようになった。例えば、システムの広帯域化に伴い伝搬遅延特性が必要となり、伝送のMIMO (multiple input multiple output) 化に伴い送受信間における電波の出射・到来角度特性が必要となる。一方、現在、移動通信として割り当てられている周波数は700 MHz帯、800 MHz帯、1.5 GHz帯、1.7 GHz帯、2 GHz帯とさまざまであり、LTE-Advancedでは3.5 GHz帯の使用が予定されている。さらには、将来の第5世代システムでは6 GHz帯以上の周波数帯の利用についても検討が始まっている^{1)~5)†1}。

ところで、現在の移動通信システムは限られた周波数を有効に利用するために複数の基地局でサービスエリアをカバーする、いわゆるセルラ方式を採用している。なお、一つの基地局がカバーするエリアを“セル”と呼ぶ。当初、サービスエリアは同サイズのセルでカバーすることが基本とされてきた。しかし、現在は図1.1に示すように、集中するトラフィックを収容するためにマイクロセル^{†2}や屋内セルが、通常局であるマクロセルにオーバレイされるようになってきた^{1), 2)}。な

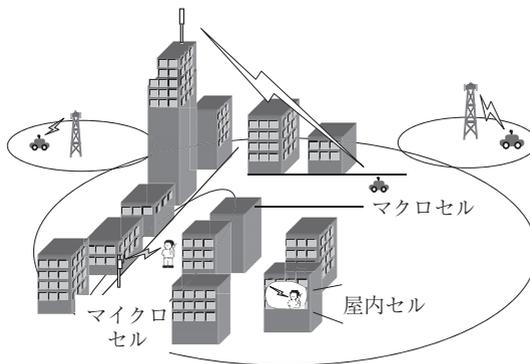


図 1.1 基地局の設置形態

^{†1} 肩付き番号は巻末の引用・参考文献を示す。

^{†2} 低基地局アンテナを道路脇に設置して形成されるマイクロセルは特にストリートセル (またはストリートマイクロセル) と呼ばれる。

お、同サイズのセルでサービスエリアを構成する形態が Homogeneous Network と呼ばれるのに対し、現在のように多様なセルでサービスエリアを構成する形態は HetNet (heterogeneous network) と呼ばれる。

以上が移動通信システムとその設計に必要な電波伝搬特性との関係である。これらをまとめて図 1.2 に示す。

1.2 電波伝搬研究のアプローチ

移動通信における電波伝搬研究のアプローチは、実験的アプローチと理論的アプローチの二つに分類される。実験的アプローチは経験的アプローチとも呼ばれ、フィールド実験より得られたデータから伝搬特性を統計的に解析・モデル化する方法である。伝搬損失推定式として知られる奥村-秦式⁶⁾や、最近の GSCM (geometry-based stochastic channel model) と総称されるモデル^{7)~10)}はこのアプローチによるものである。実験的アプローチにより得られたモデルはその精度が実データにより保証されていることがメリットであるが、言い換えればモデルの適用範囲がデータの取得条件に制限されるというデメリットがある。一方、理論的アプローチは物理的アプローチとも呼ばれ、モデル化した伝搬環境を基に伝搬特性を電磁界理論的に解析・モデル化する方法である。伝搬損失推定式として知られる Walfisch 式¹¹⁾や池上式¹²⁾などがこのアプローチによるものであるが、最近はレイトレーシング法¹³⁾や FDTD (finite-difference time-domain) 法¹⁴⁾による電波伝搬解析が理論的アプローチの代表として挙げられる。理論的アプローチにより得られた解析結果はその精度が電磁界理論により保証されていることがメリットであるが、それはモデル化した伝搬環境を前提とする場合のみである。すなわち、解析精度は伝搬環境のモデル化に大きく依存する。

電磁界理論に基づく電波伝搬解析において、FDTD 法はマクスウェルの方程式を構造物との境界条件を考慮しながら数値的に解いていく方法である¹⁵⁾。そのためには空間をメッシュ状に分割する必要がある、そのメッシュサイズは一

項目	年	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020		
		▲ 自動車電話 ▲ 大容量方式										
システム名		第1世代 第2世代(PDC) PHS 第3世代(IMT-2000) 第4世代(LTE) (LTE-A)										
周波数		アナログ方式										
周波数帯域		800 MHz 帯										
アクセスマス方式		狭帯域										
変調方式		FDMA										
要素技術		FM										
		アンテナダイバシチ										
セル構成		半径 5 ~ 10 km	セルの縮小化	半径 ~ 3 km	半径 ~ 1 km (高トラヒックエリア: 数百 m) (HetNet 環境)							
				(PHS: 直線 100 m) (屋内: フェムトセル)								
伝搬損失		推定式 (奥村-秦式)	マイクロセル化への対応								1.5 GHz 帯以上への拡張対応	
伝搬遅延			遅延スプレッド								遅延プロファイル (有効パス数) 周波数相関	
空間分布 (伝搬方向)			受信レベルの空間相関 (角度スプレッド)								角度プロファイル	
伝搬特性												

図 1.2 移动通信システムと電波伝搬特性

一般的に $\lambda/10$ 以下としなければならない。すなわち、解析する空間のサイズが波長に比べて大きい場合には演算に多くのメモリ容量と計算量が必要となる。移動通信で現在使用されている電波の波長は 15 ~ 40 cm 程度であり、伝搬解析に必要な空間は屋内であっても一辺が十数 m のサイズとなる。最近の計算機は高速化・大容量化が進んだが、FDTD 法を用いて伝搬解析を 3 次元的に実行するには文献14) で報告されているように伝搬環境を閉空間 (屋内、車両内など) に限定し、かつスーパーコンピュータを使用しなければならないのが現状である。一方、電波をレイ (光線) とみなして解析を行うレイトレーシング法は、高周波近似の電磁界理論を前提とすることから FDTD 法と比べれば厳密とはいえない。しかし、メモリ容量・計算量の面では FDTD 法よりも格段に少ないことから現在は多くの問題に対してパーソナルコンピュータでも実行が可能である。解析精度と計算量 (メモリ容量) のトレードオフの関係から、現時点においてはレイトレーシング法のほうが FDTD 法よりも実用的である。

1.3 レイトレーシング法

移动通信環境における電波伝搬はきわめて複雑であることから、奥村氏が伝搬研究のコンセプト¹⁶⁾ を提案して以来、その特性は実験的アプローチにより明確化・モデル化されてきた。しかし、前述のように現在の移动通信システムでは使用周波数やセル設置形態が多様化しており、これらすべてを測定よりモデル化するには多くの時間と労力、コストが必要である。一方、最近では、① 安価な計算機でもその能力 (メモリやハードディスクのサイズ、演算速度) が飛躍的に進歩し、② 地形・地物の電子データを比較的容易に入手可能となってきたことから、電波伝搬特性の解析に電磁界理論に基づく手法が適用できるようになってきた。その一つが幾何光学近似 (geometrical optics, GO) と幾何光学的回折理論 (geometrical theory of diffraction, GTD) に基づくレイトレーシング法である。レイトレーシング法では電波の伝搬する環境を定義すれば、**図 1.3** のように各種伝搬特性を単純な逐次計算の積み重ねにより求めることがで

索引

<p>【あ】</p> <p>アイコナール 42</p> <p>アイコナール方程式 43, 242</p> <p>アダプティブ射出法 95</p> <p>アルゴリズム 91, 99, 102</p> <p>アンテナの指向性関数 13</p> <p>アンテナの実効面積 10</p> <p>【い】</p> <p>池上式 3</p> <p>移動伝搬 14, 128</p> <p>イメージ法 89</p> <p>イメージング法 89, 106, 149</p> <p>【う】</p> <p>ウィーナー・ヒンチンの定理 16, 208</p> <p>【お】</p> <p>屋内セル 2</p> <p>屋内伝搬 160</p> <p>奥村-秦式 3, 24</p> <p>【か】</p> <p>拡散係数 45</p> <p>拡散散乱 84</p> <p>拡散反射 84, 237</p> <p>角度スプレッド 31, 134</p> <p>角度プロファイル 30, 134</p> <p>確率密度関数 210</p> <p>【き】</p> <p>幾何光学近似 5, 42, 70, 79</p>	<p>幾何光学的回折理論 5, 59, 70</p> <p>鏡像法 89</p> <p>鏡面反射 84, 236</p> <p>キルヒホッフ近似 202</p> <p>キルヒホッフの回折理論 218</p> <p>【く】</p> <p>空間相関 33</p> <p>空間分解能 96</p> <p>矩形メッシュ 120</p> <p>楔 59</p> <p>クリーピング波 63</p> <p>【け】</p> <p>ケラー・コーン 59</p> <p>【こ】</p> <p>高基地局アンテナ屋外伝搬 184</p> <p>広義定常仮定 16</p> <p>交差偏波識別度 35, 136</p> <p>交差偏波電力比 35</p> <p>高速アルゴリズム 105</p> <p>広帯域伝搬 137</p> <p>コースティック 44</p> <p>【さ】</p> <p>三角メッシュ 122</p> <p>【し】</p> <p>自己回帰モデル 20</p> <p>自己相関特性 16</p> <p>実効反射係数 203</p>	<p>シャドウイング 19</p> <p>シャドウフェージング 19</p> <p>自由空間損失 12</p> <p>自由空間伝搬 10</p> <p>周波数相関 28</p> <p>受信球 96</p> <p>受信電力加算 130</p> <p>出射・到来角度 29</p> <p>瞬時変動 15, 16</p> <p>焦線 44</p> <p>【す】</p> <p>スカラ回折係数 63</p> <p>スカラ散乱係数 226</p> <p>スカラ透過係数 57</p> <p>スカラ反射係数 50</p> <p>スネルの法則 49, 55, 59, 89</p> <p>スローブ回折 75, 215</p> <p>【せ】</p> <p>正規反射 84</p> <p>セル 2</p> <p>セルラ方式 2</p> <p>【そ】</p> <p>相関距離 21</p> <p>【た】</p> <p>ダイアディック・グリーン関数 226</p> <p>ダイアド 51, 211</p> <p>ダイアド回折係数 61, 68</p> <p>ダイアド散乱係数 202, 226</p> <p>ダイアド透過係数 55</p> <p>ダイアド反射係数 51</p>
--	--	---

短区間変動 15, 19

【ち】

遅延時間 26

遅延スプレッド 28, 133, 164

遅延プロファイル 26, 133, 163

長区間変動 15, 23

【て】

低基地局アンテナ屋外伝搬 173

電波伝搬特性 2, 14

伝搬損失距離特性 23

伝搬損失指数 23

伝搬損失特性 23

伝搬遅延 26

【と】

特性関数 210

トンネル内伝搬 147

【な】

伸上-ライスフェージング 17

伸上-ライス分布 18

【は】

媒質定数 240

発見的手法 105

パワースペクトル 16

【ふ】

フェルマーの原理 49, 55, 59

不規則粗面 87, 204, 236

複素振幅 13

物理光学近似 79, 199

フラウンホーファー基準 85

フラウンホーファー近似 224

フリスの伝送公式 11

ブレイクポイント 143

フレネル-キルヒホッフの
回折公式 220

フレネル近似 220

フレネル数 80

フレネル積分 64, 213

フレネルゾーン 79

フレネルの透過係数 57

フレネルの反射係数 52

フレネル半径 79, 223

【へ】

平均受信電力 129

平面大地伝搬 138

平面波近似 132

並列処理 106

偏波スプレッド 38

偏波整合 11

偏波プロファイル 36

偏波方向 35

【ほ】

放射電力密度 10

【ま】

マイクロセル 2

マクロセル 2

マクロセル環境 10

マルチパス環境 14, 77

マルチパス特性 26

マルチパスフェージング 16

【み】

溝型伝搬路モデル 173

【む】

無相関散乱仮定 27

【ら】

ライスファクタ 18

ランダム位相合成 131

ランバート反射 85, 237

【れ】

レイリー基準 85

レイリーフェージング 17

レイリー分布 17

レイ・ローンチング法 93, 106

【B】

Bounding-Volume 116

Brute-Force

Ray-Tracing 法 89

BSP アルゴリズム 115

BSP tree 115

【E】

ER モデル 204, 236

【F】

FDTD 法 3, 205

【G】

GA レイトレース法 112

GO 5, 42, 70, 79

GSCM 3

GTD 5, 59, 70

【H】

H 偏波 36

HetNet 3

Homogeneous Network 3

HY-RAYT 法 110, 165, 167

【I】

IHE 法 112

ISB	59	RSB	59		
		RT-PO 法	200		【W】
					Walfisch 式 3
					WSS 仮定 16
【J】					【X】
Jakes モデル	16	【S】			
		SBR 法	111		
		SBR-image 法	111		
【K】		SORT 法	110	XPД	35, 136
<i>K</i> ファクタ	18	Spreading Factor	45	XPR	35
		【U】			【数字】
【L】		Uncorrelated Scattering		2DDDA アルゴリズム	121
Luneburg-Kline 展開	42	仮定	27	2.5 次元建物	187
		UTD	63, 213	3DDDA アルゴリズム	121
【M】				3D-PRISM	184, 185
MIMO 伝搬	137	【V】			
		V 偏波	36		
【P】		Visibility graph	113		
PO	79, 199	Visibility tree	113		
		VPL 法	109		
【R】					
Ray-Jumping 法	104				

— 著者略歴 —

- 1991年 東北大学工学部電気工学科卒業
1991年 日本電信電話株式会社入社
1992年 NTT 移動通信網株式会社転籍
2002年 東北大学大学院博士後期課程修了（電気・通信工学専攻）
博士（工学）
2013年 株式会社 NTT ドコモ（名称変更）
現在に至る

電波伝搬解析のためのレイトレーシング法

— 基礎から応用まで —

Ray-tracing Method for Radio Propagation Analysis

— Fundamentals and Practical Applications — © Tetsuro Imai 2016

2016年8月22日 初版第1刷発行

★

検印省略

著者 いま い てつ ろう
今 井 哲 朗
発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来真也
印刷所 三美印刷株式会社

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844・電話(03)3941-3131(代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-00886-9 (鈴木) (製本：愛千製本所)

Printed in Japan



本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられております。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めておりません。

落丁・乱丁本はお取替えいたします