

改訂

デジタル移動通信の 電波伝搬基礎

博士(工学) 唐沢 好男 著

コロナ社

改訂版のまえがき

著者は、1990年代はじめ、それまで行っていた衛星通信の研究から、地上系移動通信の研究にテーマを変えた。移動通信の研究開発そのものは、先達の研究によってすでに高度なレベルに進んでいたもので、後入りには後入りのやり方でこの分野に入り込みたいと思った。そこで、当時の学術論文を移動伝搬の理論的な部分に焦点を絞って読み込んだ。そのことによって研究分野のイメージや研究の方向もみえてきたので、その知識を整理したいと思った。そのようにしてまとめたのが2003年に世に出た本書の初版本である。

初版本執筆の目的は、個人的にはつぎの二つであった。一つは、初版本のまえがきにも書いた「先輩がもつこの分野の知識やノウハウを惜しみなく開示して、つぎに続く世代にその技術を継承・発展させてもらいたい」という願いである。もう一つの目的は、「著者が十年間で学んだ知識を整理して、自分自身のこれからの研究のベース（備忘録）にしたい」という思いであった。そしてその後、十年余が経った。

初版本は、移動通信の電波伝搬の基礎部分（＝商用システムの進展や標準化に左右されない部分）をまとめているが、記述が説明不足で、入門者が理解するには不親切な書き方である部分が気になっていた。また、電波伝搬と関連して、現在の移動通信の主要な要素技術である OFDM や MIMO の技術が抜けていて、その部分を電波伝搬の視点からまとめてみたいと思っていた。初版本の思想や基本構成を維持しつつ、内容を増やし「移動通信の電波伝搬の基礎的なことは、この本を読めばすべてわかる」という決定版（＝時代を超えて長続きする本）を作りたいという気持が強くなった。

そこで、改訂版ではつぎのことに新たな希望を込めている。時代は IT 技術（情報技術、インターネット技術）の高度化に進んでいて、研究開発分野も本書が対象とする物理層から、アプリケーション志向の上位層技術に移りつつあ

る。そのような場合であっても、機能的なシステムを生み出すには、物理層から上位層までの幅広い理解が求められる。その際の物理層の知識習得に是非この本を尋ねてきてほしい。生身の人間はやがて消えるが、この本の中には著者が生きていて、饒舌に語ってくれるはずである。

初版本発刊からの十年余の間に、著者自身の研究室での研究も進んでいる。改訂版では、この間の研究成果も積極的に取り入れて解説している。著者論文の引用過多によるマニアックの度合い（＝著者色）が初版本よりは強まっていると思うが、読者にあっては取捨選択しながら利用していただきたい。

2015年12月

唐沢好男

初版のまえがき

本書は移動通信における電波伝搬の理屈を述べている。これまで、移動通信の電波伝搬はシステムの教科書や専門書のなかで一つの章として取り扱われることが多かった。そこでは、システム設計や評価に利用する立場から、さまざまな移動伝搬の計算式が提示されている。しかし、それらの式がどのような根拠や仮定に基づいて導出されたかは割愛されていることが多い。そこで、本書は“電波伝搬”によく出てくる式を可能なかぎり導出を省略せずに示した。その結果として回りくどい書き方になっている部分も多いが、これが本書の特徴だと思ってほしい。

移動通信という広範な技術、それを電波伝搬という技術項目に絞り込んでみても依然1冊の本に収めきれない内容ではない。その場合、大別して二つの書き方ができるであろう。一つは、発展しつつあるシステムを想定しその設計に必要な実測データや伝搬特性計算法を示し、その精度評価も含めて実用性を重視した本である。もう一つは、考え方を中心に述べ、移動通信伝搬の理解に対する基礎力をつけるための本である。本書は後者の立場で書いている。伝搬の

理屈に関する疑問の答がすべてこの本に書いてあって、引用文献を探しにいかなくてもよいことを目指した。すなわちワンストップである。2章と8章が扱っている確率分布や変復調方式は、その基礎が本書の守備範囲を超えるので引用に頼らざるをえないが、3章から7章までの部分はできるだけそのように努めた。

近年、伝搬研究の比重が高まっている移动通信、特に広帯域のデジタル移动通信においては、信号強度の低下、伝送波形の歪み、マルチユーザ干渉など、伝送特性の劣化がシステムに依存して多様になり、ここまでが電波伝搬の技術領域という境界がはっきりしなくなっている。アダプティブアレーや適応伝送のように、伝搬特性がアンテナやシステムの動作と一体になっている場合も同様である。このような複雑なかかわりのなかで、伝搬研究が従来の守備範囲にとどまっていると、情報の受渡しが不十分となり、せっかくの研究がシステムやアンテナの設計・評価に活かされない事態が起きやすい。膨大な伝搬データが蓄積される一方で、アンテナやシステム評価にはそれと遊離した都合のよい伝搬モデルが用いられているようでは困るのである。そういう意味で、本書は電波伝搬 (P) の本というよりは、アンテナ (A) やシステム (S) を含めた A・P・S の境界領域を横断するような技術に焦点を当てている。

本書は、電子情報通信学会のアンテナ伝播研究専門委員会がシリーズとして実施している“アンテナ・伝搬解析手法ワークショップ”で著者が行った講義“広帯域移动通信の多重波伝搬理論とモデリング”のテキストに加筆・修正を行ったものである。このワークショップは、先輩がもつ技術分野の知識やノウハウを惜しみなく開示して、つぎに続く世代にその技術を継承・発展させてもらいたいとの願いが趣旨になっている。本書もその精神を引き継いでいる。移动通信分野の研究・開発・実用化に携わる技術者・研究者、特に大学院学生や研究機関・企業において第一線を目指す若手技術者・研究者の電波伝搬の基礎理解に役立てば本望である。さらに、電波伝搬の理解が新しいシステムの創成に力を与えることができれば、それはもう望外の喜びである。

目 次

1. 移動通信と電波伝搬—その概要と本書の構成—

1.1 デジタル移動通信の仕組み	1
1.2 移動通信の電波伝搬の特徴	6
1.3 本書の構成	9

2. 無線伝送の基本式

2.1 自由空間の電波伝搬基本式：フリスの伝達公式	15
2.2 EIRP と G/T	18
2.3 直接波と平面大地反射波による2波モデル	19

3. 多重波伝搬モデルに現れる確率分布

3.1 測定と理論とモデリング	22
3.2 確率分布の一般的な性質	23
3.2.1 確率密度関数と累積分布関数	23
3.2.2 結合確率密度関数	25
3.2.3 確率変数の変換	26
3.2.4 確率変数の和・差・積・商の分布	28
3.2.5 異なる分布の近似度評価指標	30
3.3 加算的確率過程と積算的確率過程	31

3.3.1	加算的確率過程と正規分布	31
3.3.2	積算的確率過程と対数正規分布	33
3.4	各種確率分布の特徴と物理的意味	35
3.4.1	レイリー分布と仲上-ライス分布	35
3.4.2	仲上 m 分布	39
3.4.3	指数分布とポアソン分布	43
3.4.4	χ^2 分布とガンマ分布	45
3.4.5	ワイブル分布	46
3.4.6	ラプラス分布	47
3.4.7	多次元正規分布	47
3.5	重畳分布・複合分布	49
3.5.1	重畳分布の基本式	49
3.5.2	レイリー・対数正規分布重畳分布：Suzuki 分布	49
3.5.3	レイリー・ガンマ分布重畳分布：K 分布	51
3.5.4	その他の重畳分布	51
3.5.5	複 合 分 布	52
3.6	分布の一般形と相互の関係	53
3.6.1	多重波伝搬モデル基本分布とその関係	53
3.6.2	伝搬モデルに共通する汎用分布形	54

4. 伝送路表現の基礎

4.1	インパルス応答と伝達関数	57
4.2	ベースバンド信号と帯域通過信号	61
4.3	遅延時間領域での表現	68
4.3.1	インパルス応答	68
4.3.2	遅延プロファイル	69
4.3.3	帯域制限がインパルス応答に与える影響	71
4.4	周波数領域での表現	73
4.4.1	瞬時環境表現としての伝達関数	73

4.4.2	統計的な環境表現としての周波数相関特性	75
4.5	瞬時環境表現と統計的表現の相互の関係	77
4.6	双方向チャンネル特性の可逆性について	80

5. レイリーフェージングの理論

5.1	狭帯域信号の振幅・位相の確率分布	83
5.2	フェージングの相関特性の定義と基本的な性質	86
5.2.1	定義	86
5.2.2	複素振幅・振幅・電力変動の相関特性の相互の関係	87
5.3	遅延プロファイルと周波数相関特性	89
5.4	角度プロファイルと空間相関特性	93
5.4.1	角度プロファイルおよびアンテナ指向性と空間相関の関係	93
5.4.2	典型的な角度プロファイルに対する空間相関特性	95
5.4.3	3次元的な角度広がりをもつプロファイルに対する空間相関特性	100
5.5	ドップラースペクトルと自己相関特性	103
5.5.1	自己相関特性	103
5.5.2	ドップラースペクトル	104
5.5.3	減衰発生間隔と減衰持続時間	107
5.6	広帯域信号の電力変動	110

6. 仲上-ライスフェージングの理論

6.1	狭帯域信号の振幅・位相の確率分布	117
6.2	遅延時間領域での表現	119
6.3	複素振幅・振幅・電力変動の相関特性の相互の関係	120
6.4	周波数相関特性	123
6.5	空間相関特性	125

6.5.1 角度プロファイルと複素空間相関	125
6.5.2 空間相関特性の計算結果	126
6.6 レイリーフェージングと仲上-ライスフェージングの特徴比較	128

7. 移動伝搬チャネルモデルと環境生成・推定手法

7.1 電波伝搬モデル：それは伝搬研究の結晶	130
7.2 回線設計用伝搬モデルの概要	131
7.3 狭帯域レイリーフェージング環境生成	135
7.3.1 レイリーフェージングの生成	135
7.3.2 任意の相関行列を有するアレー出力の生成	137
7.3.3 入出力双方で任意の相関行列を有する MIMO チャネルの生成	139
7.4 広帯域レイリーフェージング環境生成	142
7.5 広帯域伝搬チャネルの等価伝送路表現	145
7.5.1 遅延の広がりがあるシンボル周期より大きい場合	145
7.5.2 遅延の広がりがあるシンボル周期より小さい場合	148
7.6 伝搬チャネル特性の推定	156

8. ダイバーシチの理論

8.1 各種ダイバーシチと合成法	160
8.1.1 ダイバーシチの分類	160
8.1.2 合成後の信号対雑音電力比 (SN 比) の確率分布：その概要	162
8.2 最大比合成法の基本	164
8.2.1 理想的な合成	164
8.2.2 SN 比が独立に変動するブランチ信号の最大比合成	169
8.2.3 仲上-ライスフェージングの最大比合成	171
8.3 相関のあるブランチ信号の最大比合成	173
8.3.1 相関行列と固有値解析	173

8.3.2	変動に相関を有する信号の最大比合成	176
8.3.3	角度的に広がりをもって到来する信号のダイバーシチ効果	177
8.4	最大比合成を実現する方法	180
8.4.1	方式概要	181
8.4.2	短周期相関行列の最大固有値に対応する固有ベクトルから ウェイトを求める方法	181
8.5	送信ダイバーシチ	183
8.5.1	送信側でチャネル情報を有する場合	184
8.5.2	送信側でチャネル情報を有しない場合	188
8.6	不完全なウェイトによる最大比合成	195
8.6.1	簡易推定式	195
8.6.2	厳密理論分布	199

9. MIMO と電波伝搬

9.1	MIMO とは	203
9.2	MIMO チャネルの表現	205
9.2.1	狭帯域信号に対する伝送路表現	206
9.2.2	広帯域信号に対する伝送路表現	207
9.2.3	MIMO チャネルの統計的環境表現	208
9.3	通信路容量	212
9.4	レイリーフェージングチャネルでの固有値分布	218
9.4.1	ウィシャート分布	218
9.4.2	近似的考え方	226
9.4.3	漸近固有値分布：マルチェンコ・パスツール則	227
9.5	MIMO 情報伝送	233
9.5.1	送受信最大比合成伝送	233
9.5.2	固有モード伝送	237
9.5.3	時空間ブロック符号化伝送	241
9.6	MIMO チャネル生成手法と性能評価手法	242

9.6.1	クロネッカーモデル	243
9.6.2	実環境生成モデル（フェージングエミュレータ型 OTA 評価系構築のための）	245
9.6.3	電波反射箱	256

10. フェージング環境におけるデジタル伝送特性

10.1	デジタル変復調方式	266
10.1.1	変調方式	266
10.1.2	復調方式	268
10.2	伝送誤りの発生メカニズムと統計的推定	269
10.3	熱雑音による誤りの発生	271
10.3.1	熱雑音によるビット誤り率	271
10.3.2	フェージング環境下でのビット誤り率特性	274
10.4	符号間干渉による誤りの発生	276
10.4.1	誤り発生のメカニズム	276
10.4.2	符号間干渉誤りとキーパラメータ	278
10.4.3	符号間干渉誤り計算法とビット誤り率特性	280
10.5	位相変動による誤りの発生	286
10.6	再生クロックのサイクルスリップによるバースト誤りの発生	288
10.6.1	サイクルスリップとは	288
10.6.2	サイクルスリップ発生頻度	292
10.7	OFDM と電波伝搬	296
10.7.1	OFDM の仕組み	296
10.7.2	電波伝搬問題	301
10.7.3	不十分なガードインターバルでの OFDM 伝送特性	303
10.8	電波伝搬とシステム	308
10.8.1	電波伝搬とシステムを結ぶもの	308
10.8.2	情報伝送の物理限界	310

付 録	313
1. 仲上 m 分布 [式 (3.38)] の導出	313
2. 式 (5.18) の導出	314
3. 正規分布形角度プロファイルの空間相関：式 (5.35) の導出	315
4. 仲上-ライスフェージングの MRC の式 (8.38) の導出	316
5. 不完全 MRC のパラメータ値の式の導出	317
6. CNR, SNR および E_b/N_0 の関係	319
7. サイクルスリップの式 (10.48) の導出	323
参 考 文 献	325
索 引	337

1

移動通信と電波伝搬

—その概要と本書の構成—

本書では、移動通信の電波伝搬、特に、広帯域・高機能デジタル移動通信のシステム開発において特性劣化の原因となる多重波伝搬（マルチパス伝搬）を取り上げ、その理論的基礎を述べる。また、電波伝搬の知識をシステムの設計に具体的に活かす手段であるスペースダイバーシチ・MIMO（送受信の双方にアレーアンテナを用いるシステム）・OFDM（直交周波数分割多重）などを対象に、フェージング下でのデジタル伝送特性評価の方法を述べる。本章では、2章以降の専門的な内容に入る準備として、移動通信の仕組みと電波伝搬の概要を述べ、全体イメージの把握ができるようにする。

1.1 デジタル移動通信の仕組み

1895年、イタリアのマルコーニは火花放電に基づく送信機の出力をアンテナにつなぎ、2.4 kmを隔てた相手受信機に向けてバースト状電波を発射した。その受信機が反応して知らせたモールス信号が無線通信の誕生を告げるものであった。さらに1901年、マルコーニは大西洋横断の通信にも成功している^{1),2)†}。およそ100年前の話である。その無線通信の技術が発展して今日の移動通信の隆盛につながっている。

ところで、その最初の歴史的な試みの中に、100年間も続き、かつ今後も維持されるであろう無線通信の基本的コンセプト（パラダイム）が提示されたところに驚くべき先見性をみてとることができる。そのパラダイムとは、送りたい情報をそれを運ぶことができる乗り物（キャリア：電波や光、マルコーニの

† 肩付き数字は、巻末の参考文献の番号を表す。

場合は電波の一種である雑音)に乗せ、それをアンテナという玄関から目的方向に向けて空間に送りだし、受信側では、逆の手順によって情報を受け取るという方式である。その後の無線伝送技術は、このパラダイムのもとで、伝送効率の向上と通信容量の増大という観点から、さまざまなブレイクスルーが重ねられ、目覚ましい進展を遂げてきたわけである。

図 1.1 は、無線通信による情報伝達の仕組みを物流システムとのアナロジーでまとめたものである。実際の移動通信では受信側(図の右側)が基地局になり、ユーザまでは地上系通信ネットワークを介してさらに複雑であるが、その部分を省いている。この無線区間の伝送技術として、以下のものがあげられる。

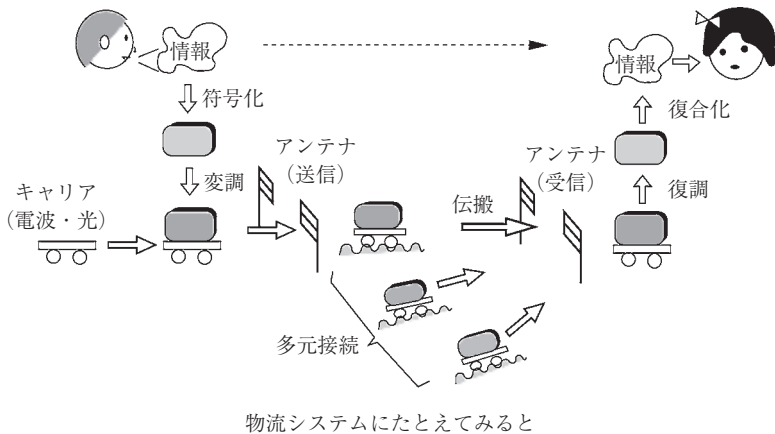


図 1.1 無線通信における情報伝達の仕組み

(1) 高能率符号化技術 (パッケージングの技術)

音声や映像のようなアナログ信号をサンプリング(標本化)して“1”と“0”で構成されるデジタル信号に変換することを、**符号化**(encoding, または coding), その逆の操作を**復号化**(decoding)という。その際、情報が有する特徴(発生頻度やスペクトルなど)を利用して冗長な部分を削ぎ落として行う符号化を**情報源符号化**(source coding), 伝送路での伝搬劣化に耐性を有するように誤り訂正機能を盛り込む符号化を**伝送路符号化**(channel coding)とい

う。これらを総称して、高能率符号化技術と呼ぶ。

物流にたとえると、送りたい品物の無駄を省いて小形軽量にまとめ（＝情報源符号化し）、そのなかに荷崩れ（＝伝搬劣化）に強い緩衝材や、壊れたときに復元できる修理部品を入れ（＝伝送路符号化/誤り訂正符号化し）、できるだけコンパクトにまとめて運搬しやすい形にすること、すなわちパッケージングに対応する。

（2）変復調技術（パッケージングされた荷物を車に積み込む技術、またその車から降ろす技術）

符号化されたベースバンド情報を電波に乗せる技術を変調（modulation）という。電波は周波数と位相と振幅で表されるので、そのうちのどれか一つまたは二つの値をわずかにずらすことで情報を送ることができる。周波数・位相・振幅に変化を与えて情報に乗せるのが、おのおの周波数変調（FM）、位相変調（PM）、振幅変調（AM）である。デジタル信号に対してはデジタル周波数変調（FSK）、デジタル位相変調（PSK）、直交振幅変調（QAM）などがある。

たとえば、パッケージングされた小包を車に積み込む技術である。車の荷台の面積は情報の帯域幅に相当し、積み荷の高さが1 Hz 当りの伝送ビット数（あるいは変調多値数）である。積み荷を高くすると（＝変調多値数の多い16 QAM, 64 QAM などでは）一度に運ぶ量を多くできるが、道路状態が悪い（＝伝搬劣化が大きい）と荷崩れを起こしやすい（＝誤りが発生しやすい）。

（3）アンテナ技術（門の働き。荷物を積んだ車を目的地に向けて送り出す技術、到着した車を迎え入れる技術）

アンテナは電波を空間に効率よく放射する（あるいは到来してきた電波を受信する）働きをもち、無線装置と空間とのインタフェースである。指向性のあるアンテナは電波の通り道を限定し、かつ、伝送効率を上げて雑音に強いシステムを実現する。アンテナの指向性を適応的に制御できるアダプティブアンテナでは、所望信号を取り入れ、かつ、不要信号を取り込まない機能をもたせることができる。

物流では門である。目的方向に向けて車を送り出す、あるいは到来方向の範

囲を限定して車を受け入れる。通過する車の荷物を調べ、ほしいものだけ通し不要なものは通さない、すなわち関所の働きをする高度な機能を有するもの（＝アダプティブアンテナ）もある。さらに、いろいろの道につながるたくさんさんの門を用意し、交通事情に合わせて、送りだす品物を適応的に仕分けして配送できるような、出入り口の多い門構え（＝MIMO）の家も多くなってきている。

（４）電波伝搬と伝搬劣化対策（道路状況が悪い状態での車の走行、また、道路上の障害物を避けて通る技術）

電波伝搬は本書が対象とする主要技術項目である。移動通信では、伝搬路の遮へい、遮へいに伴う電波の回折、さらには、反射・散乱が多数回繰り返されて多重経路（マルチパス）によるフェージングが伝搬劣化要因になる。その結果として信号強度の低下・伝送波形の歪みなど誤り発生の原因をつくり出す。これに対して、CDMA（符号分割多元接続方式）やOFDM（直交周波数分割多重方式）など伝搬劣化に強い伝送方式や、等化器、ダイバーシチ、アダプティブアレーアンテナなど受信側で信号処理により伝搬劣化を軽減する技術が導入されている。

これは、車がでこぼこ道を障害物に遭遇しながら走っているイメージである。道が複数ある場合には、よりよい道路を選択して走る（＝ダイバーシチ）、変形した荷物の修正（＝波形等化）、運送中に壊れたり失ったりした荷物の一部の復元（＝誤り訂正）などの対策技術が求められる。

（５）多元接続技術（信号機などによる交通整理）

複数のユーザが同時に通信をしようとしたとき、たがいの干渉によって混信することを防ぎ、かつ限られた周波数のなかで、可能なかぎりユーザ数を多くしようとする技術である。周波数領域で重複を避ける**周波数分割多元接続方式**（frequency-division multiple access：FDMA）、時間的にぶつからないように各データを時間圧縮して、送信タイミングを制御する**時間分割多元接続方式**（time-division multiple access：TDMA）、周波数も時間も重複するが、それをユーザごとに異なる直交符号で拡散しておのおのの符号で区別する**符号分割多**

元接続方式（code-division multiple access：CDMA）がある。

物流では、荷物を乗せた自動車が道路上でぶつからず、スムーズな走行が実現できるよう交通整理を行う技術、すなわち信号機の役割をもつ。空いているレーンを指定してそこを走らせる（FDMA）、あるいは信号機で整理し順番を決めて通過させる（TDMA）などの方法がある。

また、図 1.1 では直接みえないが

- (6) ミリ波帯など、より高い周波数帯の開拓（運搬能力アップを目指した大形車の開発）
- (7) 周波数の繰返し利用による周波数利用効率の増大：マイクロセル化とネットワーク技術（集中制御から分散制御へ）
- (8) 衛星通信技術、無線中継技術（ガソリンスタンドでのエネルギー供給、マラソンスタイルから駅伝スタイルへ）

などがある。

これらの技術は、無線通信インフラのための技術として、よりインテリジェントな機能の実現へと進んでいる。“インテリジェントな機能”とは、“電波の伝搬状態や利用状況などの環境に応じて、無線局が使用する周波数、電力、周波数帯域幅、通信方式、ルーティングなどを時間的に動的（ダイナミック）な変化をさせることによりネットワークとしての柔軟性をもたせ、電波利用の効率的・質的向上を目指すもの”である。このような柔軟性に富んだ通信のイメージは“環境適応通信”と呼ぶのがふさわしいであろう。また、それは同時に“ソフトウェア無線（software radio）・コグニティブ無線（cognitive radio）”の理想の姿でもであろう。

本書が取り上げる技術は、(4)の電波伝搬である。しかし、それは他の技術と切り離して単独に語れるものではなく、おのおのの技術と密接に関連している。“電波伝搬”を知ることは、性能の劣化要因を知ることであり、移動通信の無線伝送技術は伝搬劣化を克服する技術であると位置づけても間違いではない。

- | | | | | | |
|--------------------|----------|--------------------|---------------|-------------------|--------------------|
| 周波数選択性フェー
ジング | 8, 74 | ダイバーシチ | 160 | 【な】 | |
| 周波数相関 | 86 | 多次元正規分布 | 48 | ナイキストフィルタ | 71, 267 |
| 周波数ダイバーシチ | 112, 161 | 多入力・多出力システム | 139 | 伸上 m 分布 | 39 |
| 周波数フラットフェー
ジング | 73 | ダブルレイリー分布 | 52 | 伸上 q 分布 | 43 |
| 周波数分割多元接続方式 | 4 | 短区間中央値 | 132 | 伸上-ホワイト分布 | 43 |
| 順序付固有値 | 219 | 短周期相関行列 | 182 | 伸上-ライスフェージング | 116, 171, 225, 280 |
| 順序無固有値 | 219 | 【ち】 | | 伸上-ライス分布 | 35 |
| 準直交 STBC | 191 | 遅延検波 | 268 | 【に】 | |
| 情報源符号化 | 2 | 遅延スプレッド | 69 | 2 ステージ法 | 254 |
| シングルキャリア変調 | 296 | 遅延プロファイル | 69, 90 | 2 波モデル | 19, 153 |
| 信号対雑音電力比 | 23, 271 | 中央値 | 25 | 【は】 | |
| 信号電力密度対雑音電力
密度比 | 271 | 中心極限定理 | 31 | パス制御型 | 249 |
| 振幅変動の相関係数 | 88 | 注水定理 | 213 | パスダイバーシチ | 161 |
| 【す・せ】 | | 長区間中央値 | 132 | 反響チャンバ | 256 |
| ストリートセル | 133 | 長周期相関行列 | 182 | 搬送波対雑音電力比 | 271 |
| 正規分布 | 31 | 重畳分布 | 49 | 【ひ】 | |
| 積算的確率過程 | 31, 33 | 直交周波数分割多重 | 296 | 非線形変調方式 | 266 |
| 線形時間不変システム | 57 | 【つ・て】 | | 非中心 χ 二乗分布 | 171 |
| 線形システム | 57 | 通信路容量 | 213 | ビット誤り率 | 270 |
| 線形変調方式 | 266 | デジタル位相変調 | 266 | 標準正規分布 | 31 |
| 選択合成法 | 162 | デジタル周波数変調 | 266 | 標準形の分布 | 55 |
| 【そ】 | | デルタ関数 | 58 | 標準偏差 | 25 |
| 相 関 | 86 | 伝送路符号化 | 2 | 【ふ】 | |
| 相関エリア | 128 | 伝達関数 | 59, 73 | フェージングエミュレータ | 246 |
| 相関行列 | 173 | 電波反射箱 | 101, 246, 256 | 復号化 | 2 |
| 相関距離 | 128 | 【と】 | | 複合分布 | 52 |
| 相関係数 | 25 | 等価低域通過系 | 62 | 符号化 | 2 |
| 相関帯域幅 | 77, 90 | 等価低域通過信号 | 61 | 符号間干渉 | 75, 119, 277 |
| 送受信最大比合成伝送 | 233 | 等価伝送路モデル | 149, 303 | 符号間干渉対策 | 284 |
| 送信ダイバーシチ | 183 | 等価レイリーフェー
ジング | 284 | 符号分割多元接続方式 | 4 |
| ソフトウェア無線 | 5 | 同期検波 | 268 | 不十分なガードインター
バル | 303 |
| 【た】 | | 到来角の平均電力プロ
ファイル | 95 | フラットフェージング | 73 |
| 帯域制限フィルタ | 71 | 等利得合成法 | 162 | フリスの伝達公式 | 16 |
| 帯域通過系 | 61 | 特異値分解 | 206 | ブレイクポイント | 21 |
| 帯域通過信号 | 61 | 特性関数 | 29 | 分 散 | 25 |
| 対数正規分布 | 33 | ドップラースプレッド | 106, 287 | | |
| | | ドップラースペクトル | 104 | | |

— 著者略歴 —

1977年 京都大学大学院修士課程修了（電子工学専攻）
1977年 国際電信電話株式会社（KDD）研究所勤務
1992年 博士（工学）（京都大学）
1999年 電気通信大学教授
現在に至る

改訂 デジタル移動通信の電波伝搬基礎

Radiowave Propagation Fundamentals
for Digital Mobile Communications (Second Edition)

© Yoshio Karasawa 2003, 2016

2003年3月17日 初版第1刷発行
2008年7月10日 初版第4刷発行
2016年3月3日 改訂版第1刷発行

★

検印省略

著者 唐 沢 好 男
発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来真也
印刷所 新日本印刷株式会社

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 978-4-339-00883-8 (高橋) (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