

特集

5.2

5. アンテナ伝搬・移動通信におけるシミュレーション

統計モデルをベースとした
リアルタイム移動伝搬環境生成

唐沢 好男 井上 隆

唐沢好男：正員 電気通信大学電気通信学部
電子工学科
E-mail karasawa@ee.uec.ac.jp
井上 隆：正員 KDD 研究所移動通信グループ

Real-time Simulation Scheme of Mobile Radio Propagation Channel Based on a Statistical Model. By Yoshio KARASAWA, Member (Faculty of Electro-Communications, The University of Electro-Communications, Chofu-shi, 182-8585 Japan) and Takashi INOUE, Member (Mobile Communication Group, KDD Research and Development Laboratories Inc., Kamifukuoka-shi, 356-8502 Japan).

ABSTRACT

移動通信を対象に「広帯域デジタル伝送特性シミュレーション評価」や「アダプティブアンテナの動作特性評価」に役立つ伝搬シミュレーションモデルに焦点を当てる。伝搬モデルの役割、具備すべき機能を述べた後、モデルの前提となる移動伝搬環境の統計的性質をまとめる。次にこの統計的性質を具体的に実現するシミュレーションアルゴリズム（動的マルチパス環境の生成）とその動作例を示す。

キーワード：移動通信、伝搬モデル、シミュレーションアルゴリズム、ポアソン過程

1. 伝搬シミュレーションモデルの役割

移動体での利用を想定した通信や放送サービスでは、伝送情報の広帯域化が指向され、CDMA（符号分割多元接続）やOFDM（直交周波数分割多重）といった干渉やマルチパス伝搬に強い伝送方式が主役になりつつある。また、基地局などのアクセスポイントに環境適応性に優れたアレーアンテナ（アダプティブアレー）を用いることによって、周波数の効率的利用を目指した研究・開発も盛んである。このような通信方式やアダプティブアレーの性能評価には、電波伝搬の性質をシステム設計に橋渡しする伝搬モデル（特に伝搬シミュレーションモデル）が非常に重要な役割を持つ^{(1)~(3)}。本稿では、この目的に対してリアルタイム性・汎用性に優れた手段を与える文献（4）の伝搬シミュレーションモデルを紹介する。

2. 移動通信伝搬環境の特徴

移動通信の伝搬路は、到来角度・ドップラー・遅延という空間・周波数・時間領域に対応する三つの量に広がり（スプレッド）があることに特徴があり、それに伴って、場所・時間・周波数の領域で特性の不均一性が現れる。この不均一性は領域内で伝送の良否を選択するという意味で「選択性」と呼ばれる。図1はこの様子を表している。電波の到来角度の広がりが空間に電界強度の強弱をもたらし、そこを移動する端末の受信強度には（ドップラーシフトの異なる波の合成として）時間変動が現れる。各伝搬通路（パス）の長さの違いは、到来波の遅延

の広がりとなって周波数領域での電界強度の強弱を生み出し、符号間干渉誤りと呼ばれる広帯域信号に特有の誤り発生の原因になる。

伝送路の瞬時瞬時の特性は各パスの遅延時間を見るインパルス応答： h 、あるいは伝送路の周波数特性を見る伝達関数： T で表される。広帯域伝送では情報伝送速度に比べて伝搬環境の変化が相対的に緩やかであるため、 h や T は時間とともに特性が変化すると考えて、 $h(\tau, t)$ 、 $T(f, t)$ と表記できる。ここで、 τ は遅延時間、

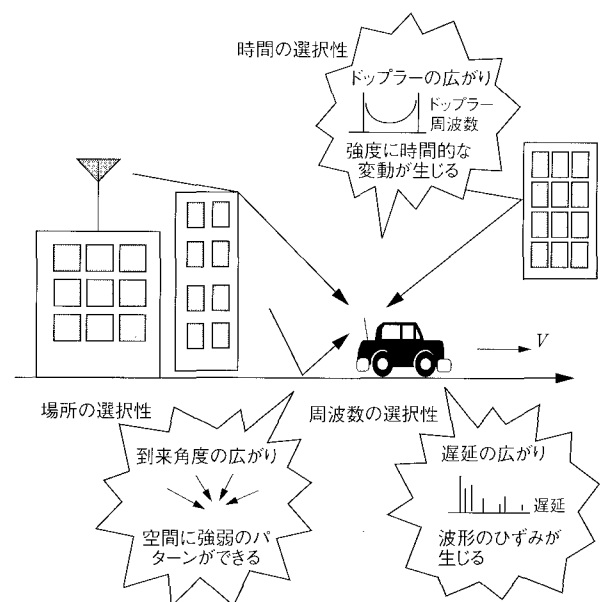


図1 移動通信の電波伝搬の特徴 三つの量に広がり（スプレッド）が発生し、結果として三つの領域に選択性が生じる。

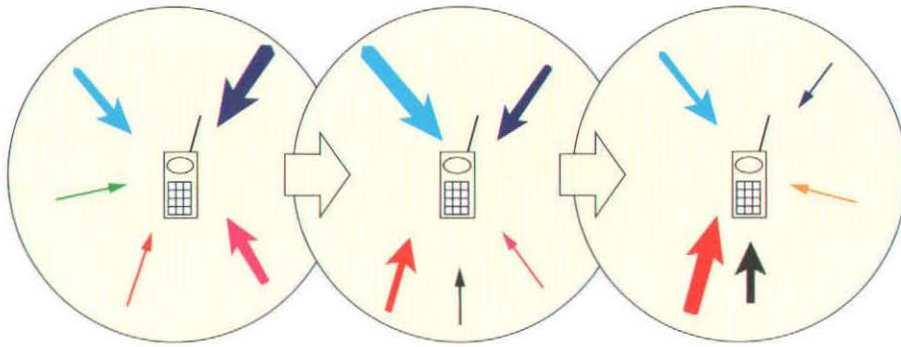


図2 端末の移動に伴う電波環境の推移 同じ色が同じ素波を表し、線の太さが強度を表す。各々の素波は「発生→強度の増加→減少→消滅」を繰り返す。

f はベースバンド周波数（電波の周波数から搬送波周波数 f_c を引いたもの）である。このとき、伝達関数 T とインパルス応答 h はお互いのフーリエ変換／逆変換の関係になり次式で表される。

$$h(\tau, t) = \sum_{i=1}^{\infty} a_i(t) \delta\{\tau - \tau_i(t)\} \quad (1)$$

$$T(f, t) = \sum_{i=1}^{\infty} a_i(t) \exp\{-j2\pi f \tau_i(t)\} \quad (2)$$

ここで、 δ はデルタ関数である。パスの数を無限大（ ∞ ）としているが、実際は時間とともに発生・削減するものすべて含めるという意味である。 a_i は搬送波周波数 f_c に対するパス i （以下、伝送路に着目するときはパス、その波に着目するときは素波と呼ぶ）の伝達関数の複素振幅で、ある時刻 t から $t + \Delta t$ への微小変化に対しては、まずその位相変化に現れ、

$$a_i(t + \Delta t) \approx a_i(t) \exp\left\{-j2\pi f_c \frac{(\mathbf{s}_i \cdot \mathbf{v} \Delta t)}{c}\right\} \quad (3)$$

となる。ここで、 $\mathbf{s}_i$ は素波 i の到来方向を表す単位ベクトル、 $\mathbf{v}$ は端末の速度ベクトル、 $(\cdot)$ は内積、 c は光の速度である。上式によってドップラーシフトが、また式（2）によって位相の周波数特性が与えられるので、広帯域信号に対するマルチパスフェージングのシミュレーションが可能になる。

ここで、市街地を走行する自動車、あるいは携帯端末を持った歩行者を想定し、その伝搬環境を考えてみよう。

用語解説

遅延プロファイルと遅延スプレッド 統計的に定常と見なされる環境において、多数のインパルス応答の電力平均をとったものが遅延プロファイルである。インパルス応答も遅延プロファイルも到来波の強さを遅延時間の関数として表しているが、インパルス応答が瞬時瞬時の伝搬環境の表現であるのに対して、遅延プロファイルはそのような環境を統計的に表現するものである。そのプロファイルの広がり幅を標準偏差値で表したものが遅延スプレッドであり、符号間干渉誤りとの強い関連が知られている。

図1の自動車にはビルの壁面からの反射波や様々な建物エッジからの回折波が端末の移動に伴って次々と現れ、かつ消えてゆくであろう。その受信信号に現れる統計的性質は、これまでの多くの測定などによって、次のような性質が代表的なものとなっている^{(1)~(8)}。

- ① 生成／消滅を繰り返すマルチパス波で構成される。
- ② 遅延プロファイル^(用語)は指数関数型になる。
- ③ 移動局側到来角度分布は全方位に対して一様分布する。
- ④ 基地局側到来角度分布は移動局方向を中心として正規分布する。
- ⑤ 移動局・基地局間の平均伝搬損は距離の三～四乗に比例、短区間（10～30m程度）での中央値の変動は標準偏差約6dBの対数正規分布になる。

ここでは、このうち①～④の性質を具備するマルチパス環境を式（1）（または式（2））によって実際に発生させるアルゴリズムを示す。空間相関特性、周波数相関特性、ドップラー変動のパワースペクトル等、よく知られている性質は上記②～④の仮定によって自ずと備わったものになる。

3. 伝搬環境を生成するアルゴリズム

基地局と移動端末で一つの伝搬リンクを形成するので、図1で示した三つの特徴のうち、信号の性質に現れるドップラーの広がりや遅延の広がりや移動局受信と基地局受信で共通である。一方、到来角度の広がりや両環境で異なり、スペースダイバーシチやアダプティブアンテナの評価を行うような場合には、個別の取扱いが必要になる。

3.1 移動端末で受信する場合

2. で電波伝搬の統計的な性質が押さえられたが、瞬時瞬時の環境を作るにはどうすればよいのだろうか？ 図2はユーザ端末が空間を（左から右へ）移動することにより、次々に素波（あるいはパス）が現われ消えていくイメージである。その発生や消滅はどのようなルール

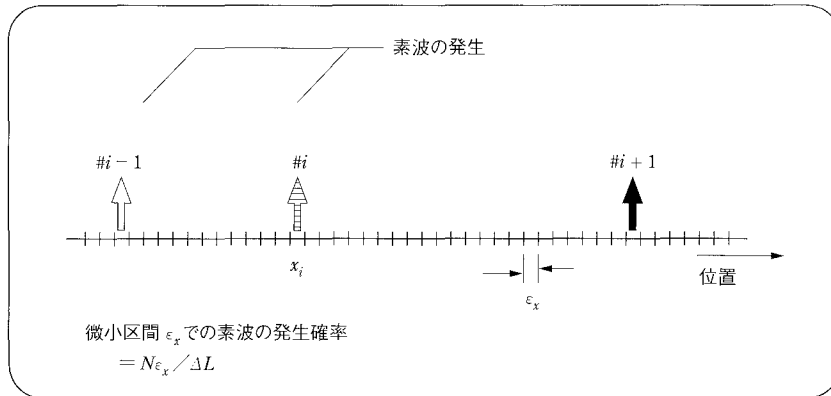


図3 素波発生のタイミング 前後の素波の発生に無関係に発生する（ポアソン過程）

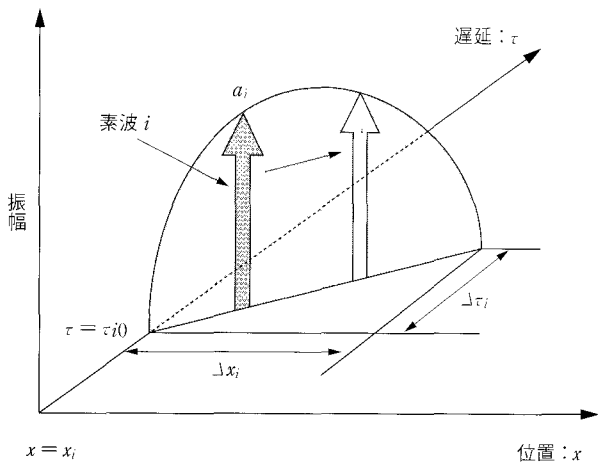


図4 素波の発生から消滅に至る一生 時間とともに強度と遅延が変化する。その結果、周波数特性を持った位相変化が表現できる。

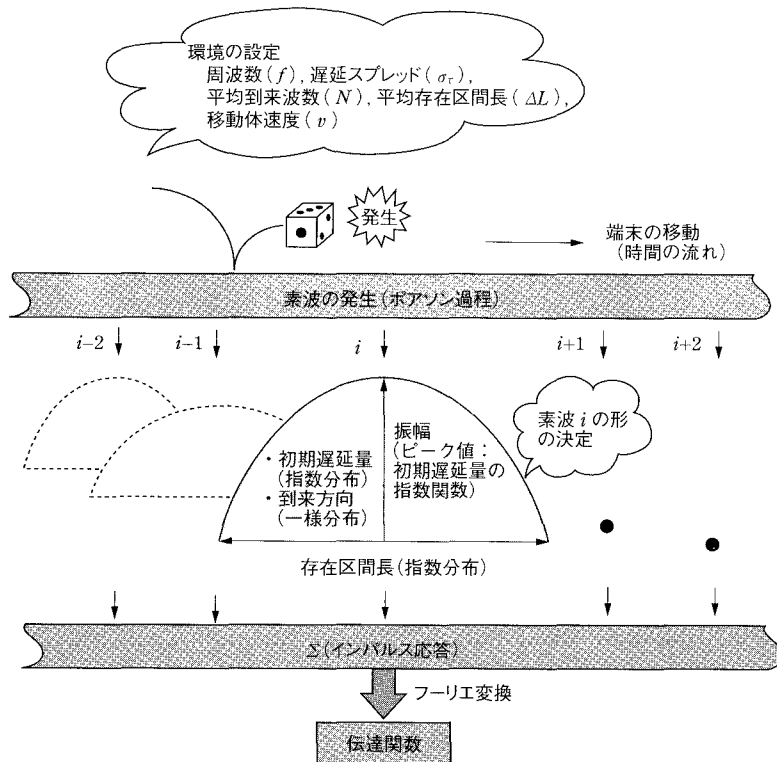


図5 伝搬環境の生成フロー 一波一波が発生・消滅を繰り返す。同一時間では、平均 N 波のポアソン分布に従う素波が存在する。このフローはその一生を定めている。

に従うであろうか？一つの素波の発生がその前後の発生と無関係としてもよさそうである。この性質に基づく確率過程はポアソン過程と呼ばれる。一定の距離（あるいは時間内）に発生する素波の数はポアソン分布をすること、発生と発生の間隔は指数分布すること、などがその性質として与えられる。図3は素波がポアソン過程に基づいて確率的に発生する様子を示している。平均発生間隔や波長に比べて十分小さい距離 ϵ_x ごとに、確率 $N\epsilon_x/\Delta L$ (N

：平均波数、 ΔL ：素波の平均存在区間長)で発生を調べる。試行の結果「発生」と出れば i 番目の波の誕生である。

このようにして発生した波（素波 i ）の発生から消滅の一生を見てみよう。図4はこの空間的推移を表している。生まれた波に対して、存在区間長 (Δx_i)、初期遅延量 (τ_{i0})、到来方向、振幅 (a_i) を与えることによって、その波の全体の姿が定められる。発生と消滅の間（図の距離差： Δx_i ）では、遅延量の変化分 $\Delta \tau_i$ は $\Delta x_i \cos \theta / c$ (θ ：素波 i の到来方向と端末の移動方向の角度差、 c ：光束)であり、この間は、 x とともに連続的に推移する。広帯域の信号を扱うときには、場所の変化（あるいは時間の変化）に伴って変化する信号を「位相が変化する」と捕らえるのではなく、「遅延が変化する」として表現するのが適している。これによって、式(2)で表現されるように周波数特性を持った位相の変化が自動的に与えられる。図5は伝搬環境生成の一連のプロセスをまとめている。図5には見えていない細かな設定を含めて詳細は割愛せざるを得ないが、興味ある読者は文献(4)、(9)、(10)を見て頂きたい。結果として、2.で挙げた統計的性質(①～④)がすべて満たされるようになっている。伝搬特性は端末の場所の移動によって変化するインパルス応答または伝達関数で表現される。端末の移動速度を用いて時間の変化に読み替えることもできる。

3.2 基地局で受信する場合

基地局側からは伝搬環境はどう見えるのだろうか？図6は移動局と基地局の伝搬環境の対応を示している。移動局で四方八方に放射された電波は、それぞれのパスを形成して基地局に到達する。各素波のドップラー周波数偏移は移動局側での端末の動きによって決定する。図5と共通のプロセスで素波の生成

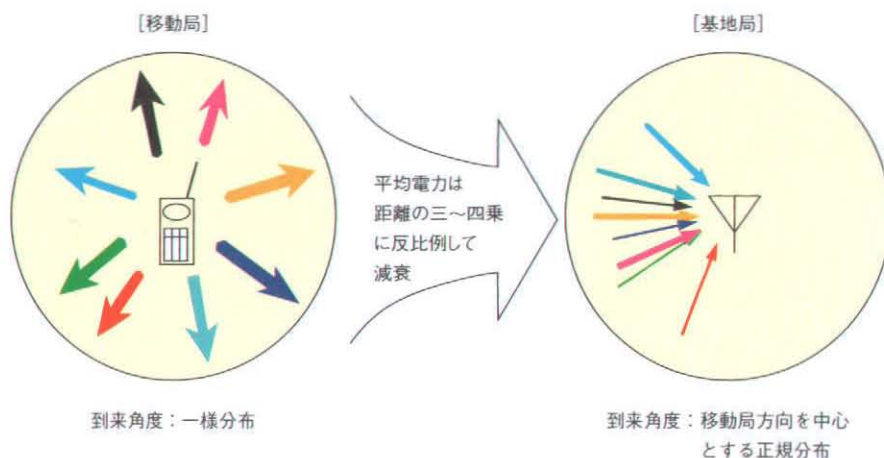


図6 基地局の電波環境 到来波は移動局方向を中心とする正規分布としてモデル化できる。

から消滅に至る一生が決まり、それらの波が、移動局方向を中心とする正規分布に従って基地局に到来する (2. の④の性質)。その場合、移動局と基地局の素波のパス

の方向の対応関係は無相関として取り扱っている。

4. シミュレーションの実行

筆者らはこのソフトを FORTRAN で開発し、現在は MATLAB 用につくり変えて用いている。では早速、シミュレーションを実行してみよう。図7は上記アルゴリズムによって生成した伝搬環境の空間変化で、(a) はインパルス応答、(b) はその伝達関数である。周波数 f : 2GHz 帯、遅延スプレッド^(用語) σ_τ : 1 μ s、平均波数 N : 10 波、素波の平均存在区間長 Δx : 20m に設定している。(a) から 100m 程度の区間において、多数の素波が発生して消滅していく様子がよくわかる。同様に、(b) から伝達関数が時間・空間の両領域において複雑に変化する様子が分かる。(a) と (b) で奥行き軸の空間スケールが大きく異なるのは、(b) では合成されたマルチパス波の振幅変化が波長のオーダーで現れるためである。十分な量のシミュレーションデータの統計処理によって、図7の環境が、所定の遅延プロファイル (= 指数関数) になっていること、波数がポアソン分布になっていること、狭帯域の信号に対する振幅の分布がレイリー分布に従っていること、空間相関、周波数相関、ドップラースペクトル特性がすべて所定のものになっていること、が確かめられている⁽⁴⁾。

5. システム評価への適用

このモデルは、図1に示した移動伝搬における三つの特徴を具備しているので、マルチパスフェージング環境に耐性を有する CDMA や OFDM といった通信方式のデジタル伝送特性の評価等に広く適用が可能である^{(4),(9)}。フェージ

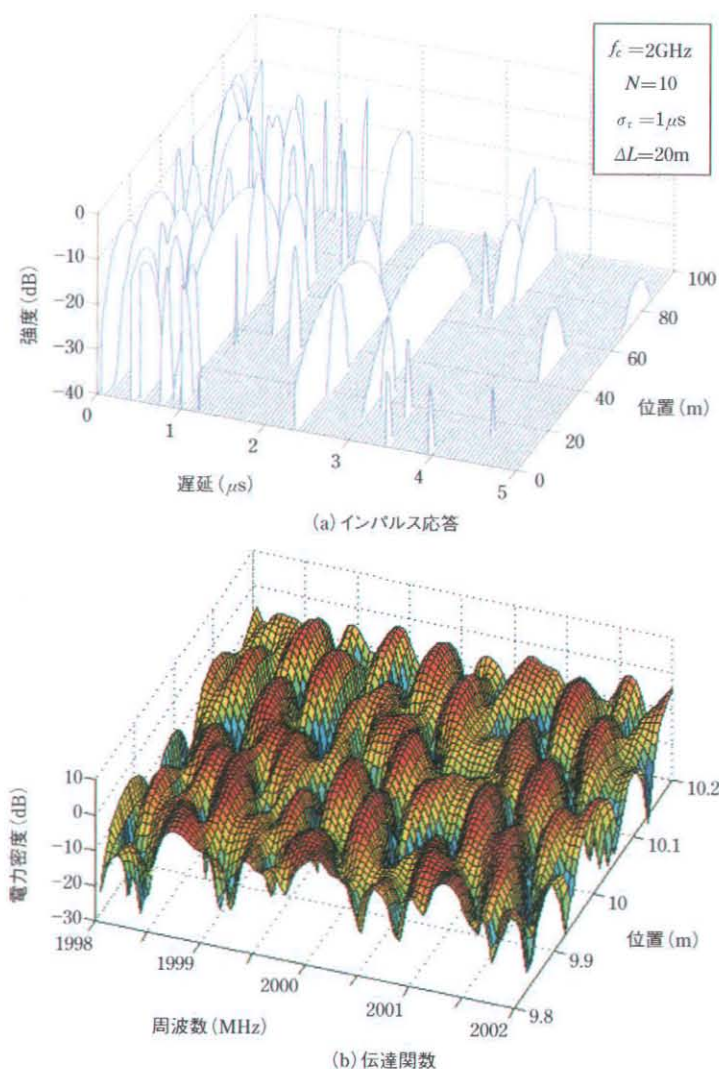


図7 生成した電波環境 伝達関数を見ると、周波数と空間の両領域で複雑に変化する様子が分かる。等化器やアダプティブアレー等の耐マルチパス方式では、この特性の平坦化が目的になる。

ング環境での動的なシミュレーション, 特に, 広帯域性とドップラー広がりと共にその結果に支配的である再生クロックのサイクルスリップ現象の評価⁽¹¹⁾や, 電波の到来方向の角度的広がりや遅延の広がりに着目した空間・時間領域信号処理アレーの解析⁽¹²⁾には, 本モデルが実際に役立っている。

なお, 誤り率やチャネル容量評価等, 応用によっては動的な環境変化よりも多数の独立な静的伝搬環境を生成したい場合がある。本モデルでも動作を止めて(すなわち場所や時間を止めて)場面場面を切り出せば, スナップショットの伝搬環境が得られる。しかし, その目的であれば, 計算効率を重視した簡易アルゴリズムを文献(9), (10)に示しているの, それが利用できる(文献(9), (12)で用いている伝搬モデルはこの簡易アルゴリズムである)。

6. む す び

移動通信を対象とした広帯域デジタル伝送特性評価やアダプティブアレー評価に役立つ伝搬シミュレーションモデルを紹介した。移動通信の伝搬の特徴である「到来角度・ドップラー・遅延の広がり」の三つの性質を取り入れたシミュレーションモデルであり, 実際のマルチパス発生のメカニズムに基づいている。計算機の中でのシミュレーションモデルとして, あるいはフェージングシミュレータ等のリアルタイム伝搬環境生成アルゴリズムとして, 適したものになっている。

伝送特性やアダプティブアレーの評価においては, 各々の目的に特化した伝搬モデルが用いられているため, 異なる方式の性能を同じ土俵で評価することがなかなかできない。このため, 皆が共通に利用できる「標準伝搬モデル」あるいは「モデル伝搬環境」が構築されれば有用であろう。移動通信は電波環境も複雑で, 評価対象や目的も多様であるため, 実際にそれを作り上げるには, 多くの研究やコンセンサスも必要であろう。ここで紹介したモデルが, その実現の一助になれば幸いである。

文 献

- (1) 細矢良雄(監修), 電波伝搬ハンドブック, リアライズ, 1999.

- (2) J.D. Parsons, The mobile radio propagation channel, Pentech Press, 1992.
 (3) F. Ikegami, T. Takeuchi, and S. Yoshida, "Theoretical prediction of mean field strength for urban mobile radio," IEEE Trans. Antennas Propag., vol.39, no.3, pp.299-302, 1991.
 (4) H. Iwai and Y. Karasawa, "Wideband propagation model for the analysis of the effect of the multipath fading on the near-far problem in CDMA mobile radio systems," IEICE Trans. Commun., vol.E76-B, no.2, pp.103-112, Feb.1993.
 (5) W. C. Jakes, Microwave mobile communications, John Wiley and Sons, 1974 (復刻版: IEEE Press, 1993).
 (6) W.C.Y. Lee, Mobile communication engineering, McGraw-Hill, 1982.
 (7) H. Hashemi, "Simulation of the urban radio propagation," IEEE Trans. Veh. Technol., vol.VT-28, no.3, pp.213-225, 1989.
 (8) B. Sklar, "Rayleigh fading channels in mobile digital communication systems, Part I and Part II," IEEE Commun. Mag., vol.35, no.7, pp.90-109, July 1997.
 (9) T. Inoue and Y. Karasawa, "Two-dimensional RAKE reception scheme for DS/CDMA systems in beam space digital beam forming antenna configuration," IEICE Trans. Commun., vol.E-81.B, no.7, pp.1374-1383, July 1998.
 (10) 唐沢好男, "広帯域移動通信の多重波伝搬理論とモデリング," 信学第二種研究会, アンテナ・伝搬における設計・解析ワークショップ(第15/16回), Sept./Oct., 1999.
 (11) 唐沢好男, "広帯域移動通信の「電波伝搬」と「システム」の接点を探る," 信学誌, vol.81, no.8, pp.830-837, Aug. 1998.
 (12) T. Inoue and Y. Karasawa, "Theoretical analysis on the performance of optimal combining for multipath waves distributed in space and time domains," IEICE Trans. Commun., (in press).



唐沢 好男 (正員)

昭48山梨大・工・電気卒。昭52京大大学院修士課程了。同年国際電信電話(株)入社。以来, 同研究所において無線伝送技術の研究に従事。平5(株)国際電気通信基礎技術研究所(ATR)に出向。平11より電通大教授。平12阪大大学院客員教授(併任)。工博。平10電波功績賞受賞。



井上 隆 (正員)

昭61京大・工・電子卒。昭63同大学院修士課程了。同年国際電信電話(株)入社。以来, デジタル衛星通信システム, 陸上移動体通信システムの研究に従事。平7(株)国際電気通信基礎技術研究所(ATR)に出向。現在, (株)KDD 研究所移動通信グループ主任研究員。