

## 移動体通信波の多様な地形での伝搬 に関する考察

河東晴子<sup>†</sup>

移動体無線通信では、自動車、列車、船舶、航空機、人間等の移動体(移動局)相互間、あるいは地上に設置された固定局との間で電波伝搬が行なわれ、伝搬路内の建物や樹木等の地上妨害物、丘陵や山岳等の地形、海面波等の影響を絶えず受ける。本稿では、これらの多様な地形での電波伝搬の特性の推定法を提案する。

### A Study on Mobile Communication Radio Wave Propagation over Heterogeneous Composite Terrain

Haruko Kawahigashi<sup>†</sup>

In mobile radio communication, the radio wave propagates between terminals on mobile objects such as cars, trains, ships, humans, or fixed terminals built on the field. The propagating radio wave is always influenced by the environment, which includes obstacles such as buildings or trees, terrain shapes such as hills or mountains, or surface wave condition. In this paper, we study the radio wave propagation characteristics over heterogeneous composite terrain, i.e., estimation of propagation characteristics.

### 1. はじめに

移動体無線通信では、自動車、列車、船舶、航空機、人間等の移動体(移動局)相互間、あるいは地上に設置された固定局との間で電波伝搬が行なわれ、伝搬路内の建物や樹木等の地上妨害物、丘陵や山岳等の地形、海面波等の影響を絶えず受ける。移動体無線通信を効率よく行なうためには、様々な環境における伝搬特性の推定が不可欠である。

これまで、携帯電話の急速な発展にともない、陸上移動通信を中心に様々な電波伝搬モデルの研究開発されてきた[1][2][3]。図 1 に移動体通信システムとその開発に必要とされた電波伝搬モデルの関係を示す[1][2]。第 1 世代移動通信システムはアナログ伝送方式であり、システム設計等において電波伝搬損の推定が必須であった[1][6]。第 2 世代移動通信システムでは狭帯域デジタル伝送方式が採用され、伝搬遅延による符号間干渉評価のための電波伝搬遅延スペクトルの推定が必要となった[1][4]。第 3 世代移動通信システムでは広帯域デジタル伝送方式として電波伝搬遅延を克服できる CDMA (Code Division Multiple Access) が用いられた。伝搬遅延波を分離して最大比合成するために分離可能なパス特性評価のための電波伝搬遅延プロファイルの推定が必要となった[1][5]。第 4 世代移動通信方式では MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 等の空間信号処理技術の導入が検討されており、その開発には電波到来角度特性を評価できるモデルが必要となる[1][3]。

このように、移動体通信システムの世代が進むに従って、電波伝搬モデルに対する要求も多様化し、伝搬推定法も高度化している。基本となる伝搬損失推定は、携帯電話の行動範囲に従い陸上、特に市街地、住宅地などを対象とした詳細なモデル化が行なわれている。

本稿では、より多様な地形での広範囲の移動を対象とした巨視的な電波伝搬モデルを考える。すなわち、丘陵や山岳での移動に対応する多重山岳地形、港湾や湖水上での船舶での移動に対応する陸海混合地形等を含む多様な地形での電波伝搬における伝搬推定法を提案する。本稿では、まず 2 で、移動体通信波の多様な地形での電波伝搬特性推定法の必要性について述べる。次に 3 で提案方式について説明する。

<sup>†</sup> 三菱電機(株) 情報技術総合研究所  
Mitsubishi Electric Corp., Information Technology R & D Center

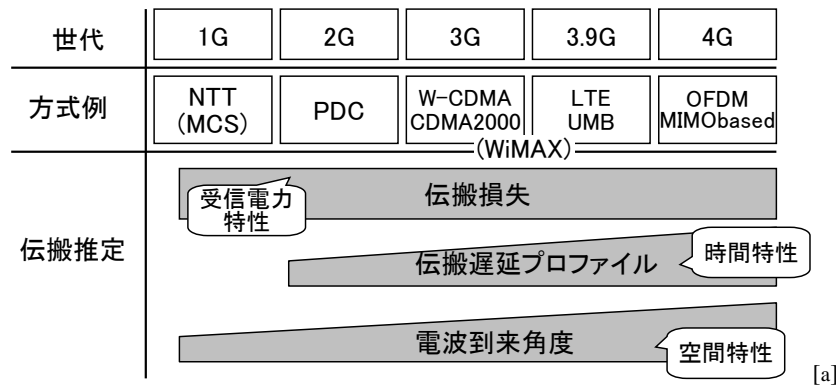


図 1 我国で実用化された移動体通信方式例と電波伝搬モデルの関係[1][2]

## 2. 移動体通信波の多様な地形での電波伝搬特性推定法の必要性

移動通信分野において従来から電波伝搬特性の推定に広く利用されているものに奥村カーブがある[6][7]。地上に設置された基地局と、自動車、列車、または人間等の移動体(移動局)との間で行われる移動体無線通信では、建物や樹木等の地上妨害物(地物)、または丘陵や山岳等の地形の影響を絶えず受けるので、基地局や移動局で受信される電波の電界強度の変動が多様であり、このため、受信点における電界強度または送信端から受信端までの伝搬損によって評価される電波伝搬特性の理論的解析が困難である。したがって、この移動体無線通信における電波伝搬特性は、使用電波の周波数帯および地形や地物の影響を適当に分類した統計的実験試料を用いて推定しなければならない。この統計的実験試料としては、関東平野およびその周辺における詳細な実験データをもとに、上述した電波伝搬特性をあらゆる地形や地物等に応じて推定できるようにしたのが、奥村モデルによるグラフ(奥村カーブ)である。

図 4 は、上述した奥村カーブの一例を示す図である。図 4 の奥村カーブは、1kW の実効放射電力で送信された周波数 900MHz の電波が市街地を介して受信された場合における電界強度距離特性を示しており、この奥村カーブを用いれば、伝搬距離の値をもとに、この電波の受信点における電界強度の値を読み取ることができ、読み取ら

a MCS: Micro Cellular System, PDC: Personal Digital Cellular, W-CDMA: Wideband Code Division Multiple Access, WiMAX: Worldwide Interoperability for Microwave Access, LTE: Long Term Evolution, UMB: Ultra Mobile Broadband, OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing, MIMO: Multiple-Input and Multiple-Output

れた値をもとに、送信端から受信端までの間における伝搬損を推定することができる。なお、図 4 における基地局アンテナの実効高  $h_t$  は、基地局アンテナが設置された地点から移動局方向に 3~15km の範囲において計測される地表高の平均値(平均地表高)と、この基地局アンテナの高さとの差として定義される。

また、上述した奥村カーブにおける準平滑地形に関するグラフをもとに、準平滑地形上の市街地、郊外地、または開放地における各伝搬損を推定する式(秦式)が考案されている[8][9]。

さらに、奥村カーブでは考慮されていない建物の都市構造物を考慮できる電波損モデルとして坂上式が提案されている[10]。また UHF 帯対応の坂上式を SHF 帯まで各地用した拡張坂上式も提案されている[11]。

なお、準平滑地形は、上述した奥村モデルで分類された地形の一つであり、伝搬路の地形プロファイルから判定して、地形の起伏高が約 20m 以下であって、起伏のうねりが緩やかであり、しかも平均地表高が距離によって大きな差(約 20m 以上の差)をもたない程度の平坦な地形と定義される。また、市街地、郊外地、および開放地は、上述した奥村モデルで分類された地物であり、市街地は、ビルディングや 2 階以上の家屋の密集地として定義され、郊外地は、移動局近傍に妨害物はあるが、密集していない地域として定義され、開放地は、電波到来方向に高い樹木や建物等の妨害がなく、開けている地域として定義される。

しかしながら、奥村モデル[6][7]では、準平滑地形、多重山岳、または陸海混合伝搬路等の地形、あるいは市街地等の地物における電波伝搬特性を推定する場合、伝搬路における地形や地物、あるいは使用周波数帯等の各電波伝搬条件に対応する奥村カーブを選定し、さらに、選定された奥村カーブを用いて、受信電波の電界強度推定値を読み取るという作業が不可欠である。このため、パソコンや組み込みプロセッサ等により電波伝搬特性の推定値を自動的に計算することは困難な場合が多く、所望の電波伝搬特性の推定処理に時間や人手がかかるという問題点があった。

一方、上述した秦式[8][9]では、準平滑地形上の市街地、郊外地、または開放地における電波伝搬特性を数式化するに留まるので、多重山岳や陸海混合伝搬路における電波伝搬特性を推定することは困難な場合が多く、上述した問題点を解決するに至らない。同様に、坂上式や拡張坂上式[10][11]も都市構造物における電波伝搬特性の数式化するに留まるので、多重山岳や陸海混合伝搬路における電波伝搬特性を推定することは困難な場合が多く、上述した問題点を解決するに至らない。

なお、上述した多重山岳および陸海混合伝搬路は、日本国内で行われる移動体無線通信の伝搬路として一般的な地形であるので、多重山岳や陸海混合伝搬路における電波伝搬特性を容易に推定することは、移動体無線通信ネットワークにおいて極めて重要な意味をもち、特に、無線アドホックネットワークの構築等においては、この電波伝搬特性を容易に推定できる方法の確立が要望されていた。

本稿で提案する電波伝搬特性推定方式は、このような要望に鑑みてなされたものであって、2地点間で送受信される電波の電波伝搬特性を容易に推定することができ、特に、多重山岳または陸海混合伝搬路における電波伝搬特性の推定処理を自動的に行う電波伝搬特性推定方式やそれを搭載した電波伝搬特性推定装置を得ることを目的とする。

### 3. 移動体通信波の多様な地形での電波伝搬特性推定法

#### 3.1 概要

本節では、前節で述べた課題を解決して目的を達成するために本稿で提案する電波伝搬特性推定法について述べる。提案方式の機能を示すブロック図を図2、手順を図3に示す。従来から知られる方式では、奥村カーブや秦式に基づいて準平滑地形に対応した電波伝搬損失の基準値を推定した上で、2地点間の地形が不規則な場合には、人がそれぞれの不規則地形毎の補正値をグラフ参照等の方法により個別に求めて補正を加える必要があった。それに対して提案方式では、電波伝搬特性を求めたい送受2地点の位置情報(経緯度、地図上の座標等)を入力すると、データベースに格納されている地図データを参照して、送受信を行なう2地点間の断面地形の輪郭を示す地形プロフィールを求め、この地形プロフィールから多重山岳、陸海混合地形等の不規則地形の種類を判断し、それぞれに応じた補正式を求めて、準平滑地形対応の基準値に補正を加える。これにより、多重山岳地形、陸海混合地形を含む多様な地形での電波伝搬特性を、送受2地点の位置情報を入力するだけで推定することができる。

また、多重山岳地形の場合の電波伝搬特性を示すグラフ、陸海混合地形の場合の電波伝搬特性を示すグラフは、それぞれ従来から知られていたが、それぞれを線形近似により定式化し、人手を介さずに参照できるようにした点も本提案の特徴である。この際使用するパラメータは、次のようにすることも本提案の特徴である。すなわち、2地点間の地形が多重山岳地形としての不規則地形と判断された場合には、補正に使用するパラメータは2地点間を結ぶ直線を超える山岳の各超過高さの総和  $\sum H_i$  ( $i=1, \dots, n$ ) であり、この  $\sum H_i$  の値に応じた補正値を、近似式を使用して求める。また、2地点間の地形が陸海混合地形としての不規則地形と判断された場合、補正パラメータは2地点間に存在する水面の割合  $dw/d$  ( $d$ : 局間距離,  $dw$ : 水

面距離,) であり、この  $dw/d$  に応じた補正値を近似式を用いて求める。

以上で述べた準平滑地形の場合の基準値、多重山岳地形の場合の補正、陸海混合地形の場合の補正のそれぞれの場合について、以下に詳述する。

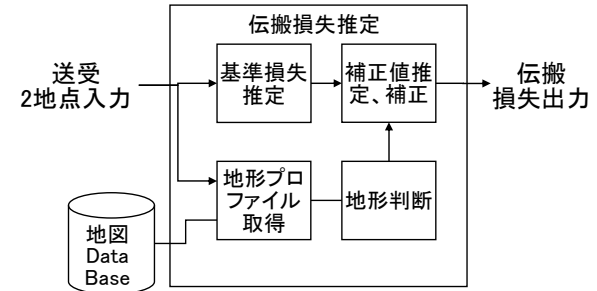


図2 移動体通信波の多様な地形での電波伝搬特性推定法機能ブロック

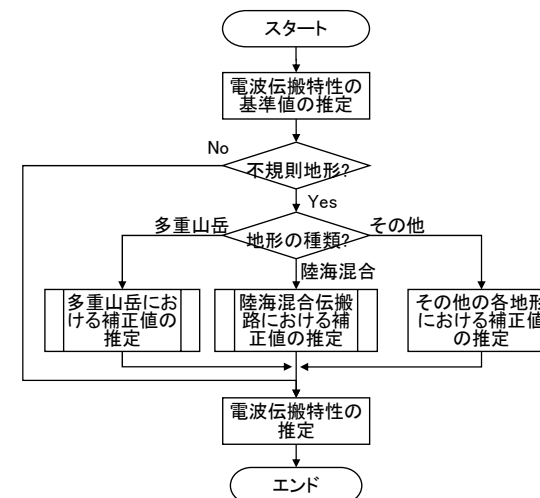


図3 移動体通信波の多様な地形での電波伝搬特性推定法の手順

### 3.2 準平滑地形

本節では、準平滑地形において基準値を求める方法について説明する。まず、準平滑地形の場合の奥村カーブの一例を図 4 に示す。

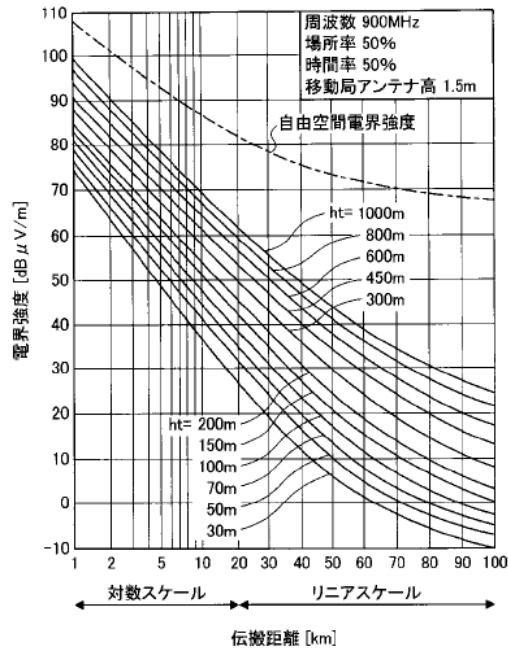


図 4 市外地における 900MHz の電界強度距離特性(奥村カーブ) [9]図 2.5, [12]図 11

次に、奥村モデル・秦式による伝搬特性の算出式を以下に示す[7][8][9]。市街地の場合の伝搬損[dB]は次式で求められる。

$$L_b = 69.66 + 26.16 \log f - 13.82 \log h_b b - a(h_m) + (44.9 - 6.55 \log h_b) \log R \quad (2-1)$$

中小都市の場合は

$$a(h_m) = (1.1 \log f - 0.7) h_m - (1.56 \log f - 0.8) \quad (2-2)$$

大都市の場合は

$$a(h_m) = \begin{cases} 8.29 (\log 1.54 h_m)^2 - 11 & f \leq 200 \text{MHz} \\ 3.2 (\log 11.75 h_m)^2 - 4.97 & f \geq 400 \text{MHz} \end{cases} \quad (2-3)$$

となる。

郊外地における伝搬損[dB]は

$$L_{bs} = L_b - 2\{\log(f/28)\}^2 - 5.4 \quad (2-4)$$

開放地における伝搬損[dB]は

$$L_{bo} = L_b - 4.78(\log f)^2 + 18.33 \log f - 40.94 \quad (2-5)$$

で求められる。

但し

$f$ : 周波数 150~1500MHz

$h_b$ : 基地局アンテナ高 30~200m

$h_m$ : 移動局アンテナ高 1~10m

$R$ : 伝搬距離 1~20km

である。

また、上記の伝搬損中央値  $L_b$  (dB) と電界強度(送信電力: 1kWerp) [dB μV/m] との関係は次式で求められる。

$$E = 139.4 + 20 \log f - L_b \quad (2-6)$$

伝搬に伴う電波の減衰は、送信端から受信端までの伝搬損か、または送信条件(利得、送信電力)をある値に仮定したときの受信点における電界強度として表される。電界強

度と伝搬損は送信の条件を規定すれば一対一対応関係にある。送信側条件は、習慣的に 1kWerp (effective radiation power), 半波長ダイポールアンテナで送信電力 1kW が用いられる。

### 3.3 多重山岳地形に対する補正

#### (1) 多重山岳モデル

複数の山岳が重畳した不規則地形における伝送路は、多重山岳回折伝搬路になり、厳密な解析は困難である。簡易化したモデルとして、図 5 に示すように、送受信点間を結ぶ直線を越える各山岳の高さの総和  $\sum H_i$  をパラメータとして、電界補正値を算出する方法が提案されている[7][13]。

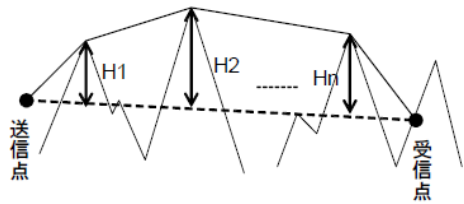


図 5 多重山岳簡易モデル

#### (2) 多重山岳の近似式

多重山岳地形の多くの実験資料から得られた電界強度補正値の代表的な推定曲線 (400-900MHz) が知られている[7][13]。これは、次の式(2-7)または式(2-8)で表すことができる。

$$M = \min(M_a, M_b)$$

$$\begin{cases} M_a = -12.49 \log_{10} \sum_i H_i + 20.96 \\ M_b = -21.40 \log_{10} \sum_i H_i + 37.21 \end{cases} \quad (2-7)$$

$$\begin{cases} M = -12.49 \log_{10} \sum_i H_i + 20.96 & \text{if } \sum_i H_i < 66.65 \\ M = -21.40 \log_{10} \sum_i H_i + 37.21 & \text{if } \sum_i H_i \geq 66.65 \end{cases} \quad (2-8)$$

式(2-7)または式(2-8)による近似値とオリジナルな推定曲線との比較を図 6 に示す。両者はよく合致している。

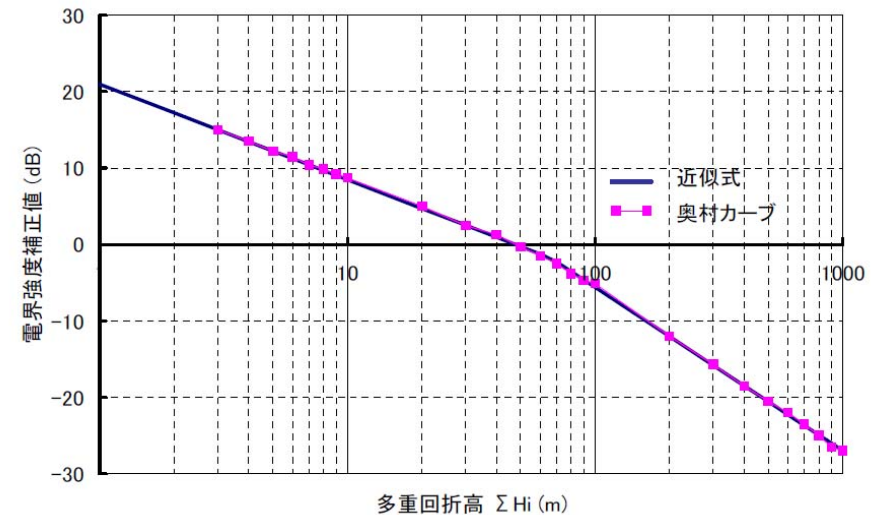


図 6 近似式と奥村カーブの比較

### 3.4 陸海混合地形に対する補正

伝送路に海面または湖面が混在する場合、電界強度はすべてが陸上だけの場合よりも高くなる[7]。この補正値は、厳密には、海面または湖面が移動局側にある場合と基地局側にある場合によって異なる。図7の実線は水面が移動局側にある場合(a)、破線は水面が基地局側にある場合(b)で、水面が伝搬路の中間にある場合には両曲線の中間値をとる。地形パラメータとしては、基地局-移動局間距離  $d$  に対する水面の占める距離  $dw$  の比  $dw/d$  が(図7の横軸)が用いられる[7]。図7の補正値  $K$  は、大雑把に見れば、次の式(2-9)で近似することができる。この近似は前節の多重山岳の式に比べ、粗いものであるが、伝搬状況の目安を得るための実用上は役にたつ。

$$\begin{cases} K = 10 \times dw/d & d < 30m \\ K = 15 \times dw/d & d > 60m \end{cases} \quad (2-9)$$

### 4. おわりに

本稿では、まず移動体無線通信システムの発展にともなう電波伝搬モデルの研究開発の変遷を示し、次に移動体無線通信において、通信波の多様な地形での電波伝搬特性を推定する方法を示した。多様な地形上を移動する移動体の通信では、自動車、列車、船舶、航空機、人間等の移動体(移動局)相互間、あるいは地上に設置された固定局との間で電波伝搬が行なわれ、伝搬路内の建物や樹木等の地上妨害物、丘陵や山岳等の地形、海面波等の影響を絶えず受ける一方、通信資源には限りがあり、与えられた電力、帯域、周波数を有効に利用する必要があるため、状況に応じた電波伝搬特性の推定が重要となる。

電波伝搬特性の推定のためには多種多様のツールが開発され、販売されている(例えば RapLab[14]等)。移動体通信波の多様な地形での電波伝搬特性推定は、実験段階では、これらの市販ツールを単独、あるいは複数組合せて行なうことも有効と考えられる。しかし多重山岳と陸海混合地形を含む多様な地形での電波伝搬特性推定に関しては、本稿で提案した方法を C++等のプログラム言語で記述して実現すれば、各ユーザーの要求に合わせた変更や拡張が可能であり、ファームウェア化してユーザーの装置に組込むことも可能となる。さらに伝搬特性推定ツールのライセンスや更新費用が不要という利点もある。

本稿で提案した推定方法は、多重山岳地形、陸海混合地形とも、従来から知られて

いるグラフの線形近似による単純な方法ではあるが、実用上は有効である。しかし、今後の課題として、複数地点間での電波伝搬状況の実測実験、あるいは環境条件(地表の植生、海面波浪形状等)の実状に合わせたモデル化等を行ない、これらの結果を反映して本稿の提案方式を拡張することにより、ユーザーのニーズに合わせたよりよい電波伝搬推定が可能となる。

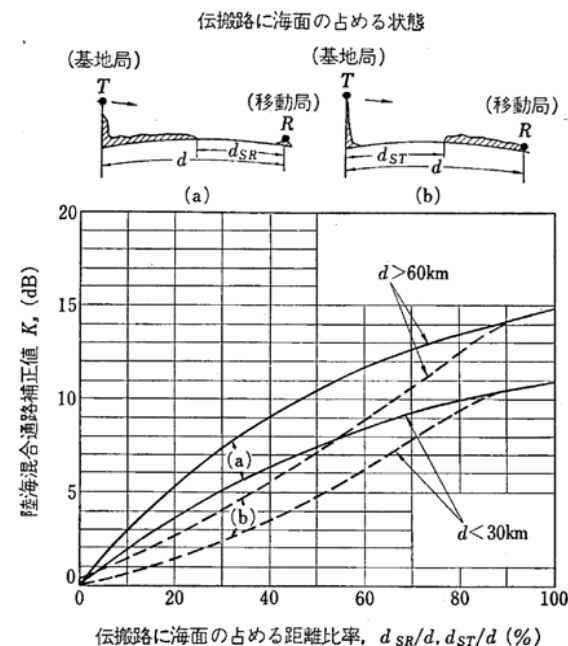


図7 伝搬路に海面を含む場合の電界強度中央値の基準中央値に対する補正値(混合通路補正) [7]p.52 図 2.32

## 参考文献

- 1) 藤井輝也, 表英毅, 太田喜元: 広帯域移動体通信における時空間電波伝搬モデル, 信学論(B), Vol.J91-B, No.9, pp.901-915 (2008).
- 2) 藤井輝也: 新たな時代に対応した移動体通信電波伝搬技術[I]—電波伝搬遅延プロファイルモデル—, 信学誌, Vol.94, No.6, pp.494-499 (2011).
- 3) 藤井輝也: 新たな時代に対応した移動体通信電波伝搬技術[II]—電波到来角度プロファイルモデル—, 信学誌, Vol.94, No.7, pp.591-596 (2011).
- 4) 田中哲, 明山哲, 小園茂: 移動通信における市街地の多重路伝搬遅延特性, 信学論(B-II), Vol.J73-B-II, No.11, pp.772-778 (1990).
- 5) 藤井輝也, 今井哲郎: 広帯域 DS-CDMA 移動通信方式における有効パスに関する一検討, 信学論(B), Vol.J82-B, No.10, pp.1923-1927 (1999).
- 6) 奥村善久, 大森英二, 河野十三彦, 福田倚治: 陸上移動無線における伝ぱん特性の実験的研究: 研実報, Vol. 16, No.9, pp.1705-1764 (1967).
- 7) 奥村善久, 進士昌明 監修: 移動通信の基礎, 電子情報通信学会 (1986).
- 8) Hata M: Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services, IEEE Trans. Veh. Technol., Vol.VT-29, No.3, pp.317-325 (1980).
- 9) 笹岡秀一: 移動通信, オーム社 (1998).
- 10) 坂上修二, 久保井潔: 市街地構造を考慮した伝搬損の推定, 信学論(B), Vol.J86-B, No.1, pp.17-25 (1991).
- 11) 藤井輝也: 陸上移動伝搬における伝搬損推定式—坂上式の拡張, 信学論(B), Vol.J86-B, No.10, pp.2264-2267, (2003).
- 12) 河東晴子: 電波伝搬特性推定装置, 電波伝搬特性推定方法および電波伝搬特性推定プログラム, 特許第 4152249 号(2008)
- 13) 奥村善久: 山岳地域における UHF 移動電界強度, 信学技報 AP84-88 (1984).
- 14) 電波伝搬解析ツール RapLab, 構造計画研究所, <http://www.kke.co.jp/>