

## 400MHz ~ 8GHz 帯のマイクロセル伝搬損失推定式

北尾 光司郎 市坪 信一

(株) NTTドコモ 〒239-8536 神奈川県横須賀市光の丘 3-5

E-mail: {kitaok, ichitsubo}@nttdocomo.co.jp

**あらまし** 第 4 世代移動通信システムでは、3GHz 以上の周波数帯の使用が想定されており、従来の PDC (800 ~ 900MHz 帯) や IMT-2000 (2GHz 帯) より伝搬損失が増加することが考えられる。また、大容量なデータ通信の需要の高まりにより、加入者容量の増大が必要になると考えられる。このような条件を考慮するとセルの大きさは半径 1km 以内程度のマイクロセルとすることが有望である。システムの無線回線設計では、伝搬損失の推定を行うことが必要であるが、従来提案されている推定式は、本システムの周波数帯を対象としていない。そこで、本報告では市街地において取得した伝搬損失データを回帰して、簡易で実用的な推定式を提案した。また、奥村 - 秦式の 1km 以内への拡張を考えて、その推定精度について検討した。

**キーワード** 移動伝搬, 伝搬損失, マイクロセル, 回帰分析

### 1. まえがき

第 4 世代移動通信システム[1]では、通信に使用する周波数帯として 3GHz 以上のマイクロ波帯が想定されている。このため、従来の PDC 及び IMT-2000 といったシステムより周波数帯が高くなり、同一電力で基地局及び移動局より送信を行った場合には、電波の伝搬距離が短くなる。また、今後はさらに大容量なデータ通信の需要が増加して、加入者容量を増大させることが必要になると考えられる。このような条件を考えると、セルの大きさは半径 1km 以内程度のマイクロセルが適していると考えられる。加えて、従来のセルラー環境のように、円形セルを想定しているために、基地局高はビル高以上で 30m ~ 100m 程度になると考えられる。

システムの無線回線設計を行う際には、伝搬損失の推定を行うことが必要である。これまでに提案されている代表的な伝搬損失推定式としては、奥村 - 秦式[2,3]や Walfisch - 池上式[4] ~ [6]がある。これらのモデルの適用範囲と第 4 世代移動通信システムが対象としている範囲の関係を図 1 に示す。奥村 - 秦式では、基地局からの距離が 1km 以上の範囲を対象としているために、第 4 世代移動通信システムの伝搬損失推定にそのまま適用することはできない。加えて、周波数帯も 150MHz ~ 1.5GHz の範囲しか

対象としていない。Walfisch - 池上式の適用範囲を見ると、距離に関しては 20m ~ 5km のために、第 4 世代移動通信システムの対象範囲をカバーしているが、周波数は 800MHz ~ 2GHz までしか対象としていない。この他にも、マイクロセルを対象とした伝搬損失推定式が提案されているが[7]、3GHz 以上の帯域は対象範囲外である。そこで、本報告では第 4 世代移動通信システムの無線回線設計用の伝搬損失推定式を提案することを目的とする。検討する推定式は、前述した条件を考慮して半径 1km 以内の都市内マイクロセルを対象とする。また、周波数は 3GHz ~ 6GHz 帯、基地局高は 30m ~ 100m を対象とする。

伝搬損失の推定の方法としては、奥村 - 秦式に代表されるように環境の似通ったエリアの平均的な特性を推定する site-general な方法がある。これとは対照的に、ある特定の場所の特性を推定する site-specific な方法もある。本報告では無線回線設計に適している site-general な推定式について検討する。

また、推定式を作成する方法としては、奥村 - 秦式のように測定データを回帰分析して作成する方法や、Walfisch[4]や Xia[8]のように街構造を仮定して理論的に計算する方法があるが、ここでは、測定

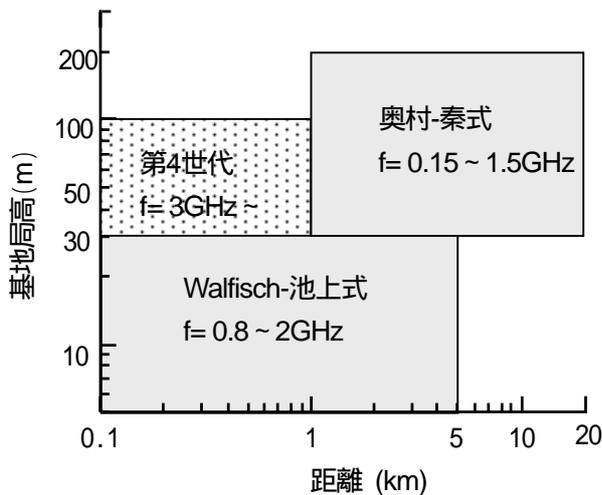


図1 第4世代移動通信システムの対象範囲

データを回帰分析する手法をとる。

本報告では、まず、推定式作成のために市街地で行った伝搬損失測定の概要について説明する。次に、測定したデータの回帰分析を行い、周波数、距離及び基地局高といった各パラメータと伝搬損失の関係について検討する。そして、重回帰分析により上記3パラメータを用いた簡易な伝搬損失推定式を提案する。また、提案式と従来の推定式と特性を比較する。最後に、奥村-秦式の1km以内への拡張を考えて、その推定精度について検討する。

## 2. 測定の概要

伝搬損失の測定を横浜管内、都内の蔵前及び千代田で行った。測定諸元を表1に示す。基地局高による特性を確認するために、基地局を鉄塔及び屋上に設置した。そして、基地局周辺を測定車で走行して、複数の周波数の受信レベルを同時に測定した。基地局高は鉄塔の場合は80m、117mで、屋上の場合は35m、38mである。移動局高は2~3mである。測定周波数は、400MHz~8GHzとして、今回のシステムで対象としている周波数帯以外の測定も行い、これまで検討されている周波数特性との関係について検討した。また、測定は基地局からの距離1km以内と遠距離の特性も確認するために1km以上のエリアでも行った。測定した環境は、横浜はビルの間隔が比較的広く、時折高層ビルが存在する環境である。蔵前はビルが非常に密に存在しており、平均的な建物高で同じような高さのものが多い。千代田局では、建物密度が密であり、かつ高層ビルが多く存在している環境である。アンテナは、移動局側ではオムニ指向性のものを使用した。基地局側では、距離1km以内では、オムニ指向性のアンテナを使用

表1 測定諸元

項目	横浜	蔵前	千代田
移動局高;測定車	2.1 m	2.75 m	2.75 m
基地局高;鉄塔	80 m	80 m	117 m
;屋上	35 m	35 m	38 m
送受信間距離	0~1km	0~1km	0~1km
[測定延距離]	[42km]	[35km]	[35km]
	1~2.5km	1~7km	1~17km
	[13km]	[34km]	[37km]
周波数	0.457, 0.813, 2.2, 3.35, 4.7, 5.2, 8.45 GHz		
移動局アンテナ	スリーブアンテナまたはダイポールアンテナ		
基地局アンテナ	スリーブアンテナまたは指向性アンテナ		

したが、距離1km以上の遠距離の測定を行う際には、アンテナ利得の高い指向性アンテナを使用した。

## 3. 測定結果

### 3-1 周波数特性

周波数特性の一例として、蔵前エリアでの測定結果を図2に示す。測定値は各周波数の50m区間の中央値を1km以内と1km以上に分けて、同一基地局高のデータを平均した値である。周波数 $f$ (GHz)と伝搬損失 $Loss$ (dB)の関係を示すために、次式のように回帰を行った。

$$Loss = \alpha_f \log(f) + C \quad (1)$$

ここで、 $C$ は定数である。回帰係数 $\alpha_f$ は約20で基地局高や距離に依存していない。表2に各エリアの回帰係数 $\alpha_f$ を示すが大きな違いはない。確認のために、50m区間ごとに各周波数での伝搬損失から周波数の回帰係数 $\alpha_f$ を求め、これを距離 $d$ と基地局高 $H_b$ で重回帰した。その結果、重回帰式で計算した値と測定値の相関係数である決定係数 $R$ は0.11と低く、やはり $\alpha_f$ は $d$ や $H_b$ とは相関が低いことがわかった。

従来の推定式の周波数特性と比較すると奥村-秦式やWalfisch-池上式[6]では回帰係数 $\alpha_f$ は26及び26~29となり今回の結果と差があるが、Walfisch[4]や小田[9]の検討では21及び20となり近い特性を示している。

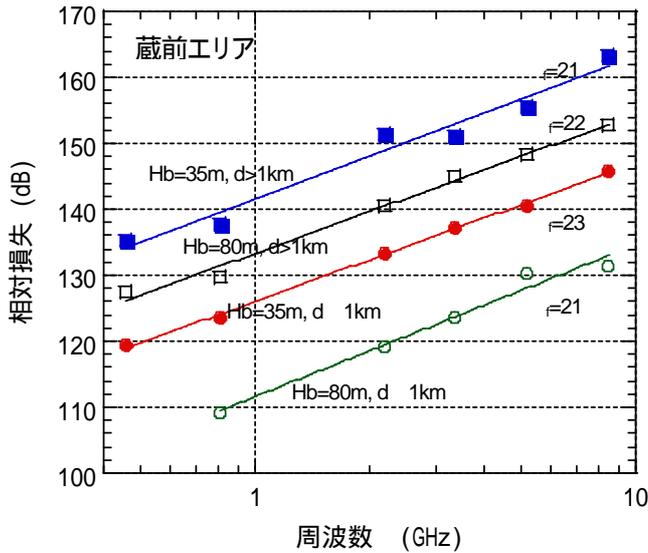


図2 伝搬損失周波数特性

表2 周波数係数  $f$

エリア	距離(1km以内)		距離(1km以上)	
	鉄塔	屋上	鉄塔	屋上
横浜	19	20	19	23
蔵前	23	21	21	22
千代田	20	23	22	-

なお、本報告におけるすべての測定値は、実用性を考えて奥村 - 秦式の補正式により移動局高  $H_m=1.5m$  の値に補正している。補正式を次式に示す。

$$a(H_m) = 3.2\{\log(11.75H_m)\} - 4.97$$

$$(f \geq 400MHz) \quad (2)$$

上式の補正により、 $H_m=2.1m$  の伝搬損失の測定値には 1.2dB を加算している。同様に  $H_m=2.75m$  の測定値には 2.3dB を加算している。

### 3-2 距離特性

前節で周波数特性と距離、基地局高特性とは、関係が低いことがわかった。ここでは、距離による回帰係数  $\alpha_d$  と基地局高  $H_b$  との関係を調べる。回帰係数  $\alpha_d$  は次式により求めた。

$$Loss = \alpha_d \log(d) + \alpha_{H_b} \log(H_b) + C \quad (3)$$

ここで、 $\alpha_{H_b}$  は基地局高による回帰係数である。表3に各エリアの距離による回帰係数  $\alpha_d$  を示す。

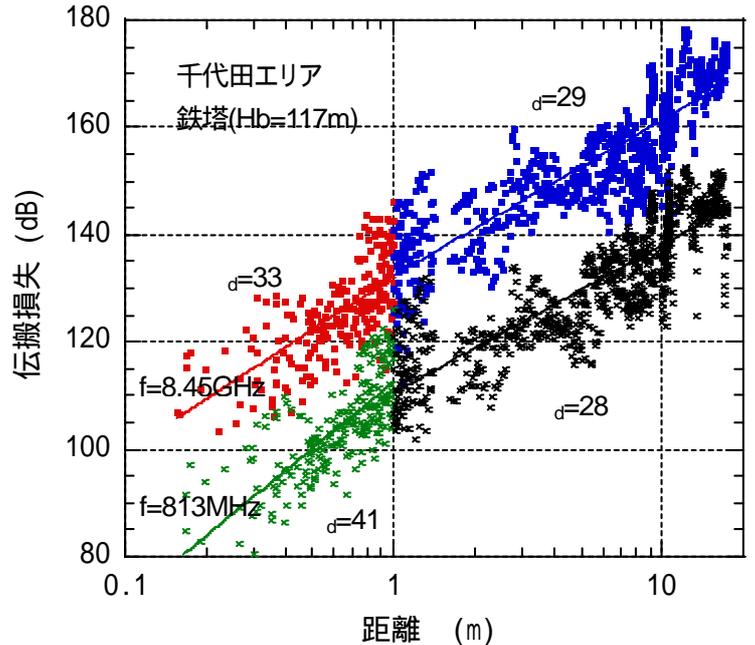


図3 伝搬損失距離特性

表3 距離係数  $\alpha_d$

エリア	距離(1km以内)		距離(1km以上)	
	鉄塔	屋上	鉄塔	屋上
横浜	33	38	33	45
蔵前	39	48	27	32
千代田	37	47	31	-

回帰係数  $\alpha_d$  は距離 1km 以内の方が 1km 以上より大きくなる。また、基地局高  $H_b$  が低い方が回帰係数  $\alpha_d$  は大きくなる。周波数ごとに求めた回帰係数  $\alpha_d$  を基地局高  $H_b$  で回帰すると次式となる。

・近距離 (1km 以下)

$$\alpha_d = -18.1\log(H_b) + 72.3 \quad R=0.65 \quad (4)$$

・遠距離 (1km 以上)

$$\alpha_d = -15.5\log(H_b) + 61.1 \quad R=0.52 \quad (5)$$

また、一例として図3に千代田エリア (基地局高  $H_b=117m$ ) での距離特性を示す。

距離による回帰係数  $\alpha_d$  を基地局高  $H_b$  で回帰した結果において、基地局高が低くなるほど距離による回帰係数  $\alpha_d$  が大きくなる傾向は従来の報告と同様である。これは、基地局高が低くなるほど伝搬路のフレネルゾーンが建物に遮蔽される割合が増加するためだと考えられる。

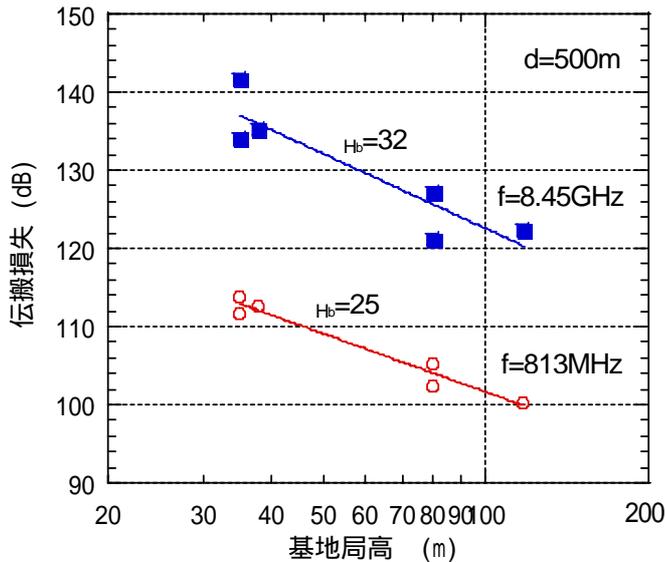


図4 伝搬損失基地局高特性 (d=500m のとき)

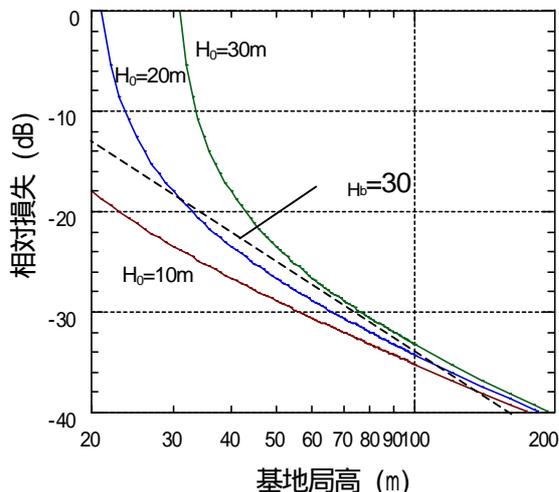


図5 Xia 式の基地局高特性

また、送受信間距離が近いほど傾き  $d$  が大きくなるのは基地局の伏角が遠方より大きく変化することと、近距離になると送受信間に見通しが生じる確率が増えるためだと考えられる。

### 3-3 基地局高特性

前節の検討において、例えば距離 1km 以内では、伝搬損失 Loss は  $[72-18\log(H_b)]\log(d)$  に比例するので、基地局高による回帰係数  $H_b$  も距離  $d$  に依存することになる。一例として、図4に距離  $d$  が 500m のときの基地局高特性を示す。伝搬損失値は各エリアの基地局ごとの測定データを距離で回帰した回帰式の  $d=500$  (m) のときの値である。測定した基地局高の範囲 (35m ~ 117m) では  $\log(H_b)$  に比例する傾向がある。800MHz 及び 8GHz で回帰した場合

には、 $H_b$  はそれぞれ 25 及び 32 となり、奥村 - 秦式と比べると大きな値となっている。

参考までに理論式の Xia 式[8]の基地局特性と比較してみる。図5にXia 式の特性を示す。Xia 式では、基地局高が平均ビル高より十分に高いときには、直線近似できて  $H_b=30$  程度となり、比較的今回の結果と近い結果となる。ただし、基地局高が平均ビル高に近づくと損失が急激に大きくなり測定した特性と差が生じる。

### 3-4 重回帰分析

推定式を作成するために、測定値の伝搬損失 Loss (dB) を重回帰分析した。距離 1km 以内の測定データを距離、基地局高及び周波数で単純に回帰すると次式となる。

$$Loss = 42\log(d) - 32\log(H_b) + 20\log(f) + 54 \quad (6)$$

このとき決定係数  $R$  は 0.88 となる。回帰式による計算値と測定値の差である回帰残差の二乗平均の平方根 (RMS 値) は 7.10dB となる。また、距離係数  $d$  の基地局高に対する依存性を考慮し、 $[72 - 18\log(H_b)]\log(d)$  を用いて回帰すると次式が得られる。

$$Loss = [72 - 18\log(H_b)]\log(d) + 18\log(H_b) + 20\log(f) - 29 \quad (7)$$

しかし、この式による回帰残差 RMS 値は先ほどの式とほぼ同じの 7.09dB となり、複雑な式にした割には、改善効果がほとんどない。これとは、逆に係数を単純化して次式としても、回帰残差 RMS 値は 7.14dB とほとんど変わらない。

$$Loss = 40\log(d) - 30\log(H_b) + 20\log(f) + 58 \quad (8)$$

これより、実用性を考えると基地局から 1km 以内の範囲では、上式を利用するのが有効だと考える。表4に提案式の適用範囲を示す。

## 4.従来式との比較

### 4-1 特性の比較

本提案式と従来式を比較してみる。各係数を比較するために奥村 - 秦式を基地局高  $H_b=30 \sim 100$ m、距離 1km 以内において、本提案式と同様に次式のように簡易な式に変形してみる。

$$Loss = 35\log(d) - 17\log(H_b) + 26\log(f) + 74 \quad (9)$$

表4 提案式の適用範囲

提案式
$Loss = 40\log(d) - 30\log(H_b) + 20\log(f) + 58$ (dB)
適用範囲
距離: 100 ~ 1000(m)
周波数: 0.4 ~ 8(GHz)
基地局高: 35 ~ 120(m)
移動局高: 1.5(m)
エリア: 都市内

このように近似しても、上記した基地局高及び距離の条件下では、もともとの奥村 - 秦式との近似誤差は1dB以下である。(8)と(9)を比較すると、各パラメータとも比較的大きな差がある。

また、理論式のXia式では、基地局高が平均ビル高より高い場合は、次式で示される。

$$Loss = 38\log(d) - 17\log(\Delta H_b) + 21\log(f) + C \quad (10)$$

ここで、 $H_b$ は基地局高と平均ビル高との差であり、 $C$ は定数である。提案式と比較すると基地局高の定義に違いがあるが、距離と周波数の特性は近い特性を示している。

#### 4-2 従来式の推定精度

1km 以内に関しても奥村 - 秦式を拡張して使用することも考えられる。この場合に、どの程度の推定誤差が生じるかを求めた。図6に奥村 - 秦式で推定した場合の平均誤差を示す。測定値は、50m 区間の中央値を用いた。推定誤差は測定値から奥村 - 秦式による推定値を減算した値で、平均誤差は単純に誤差を足し合わせた平均値である。

図より 800MHz 付近で平均誤差は 0 になり、それより周波数が低くなるにつれて平均誤差が増加し、周波数が高くなるにつれて平均誤差が減少することがわかる。これは、800MHz 付近では誤差は正負均等にばらついているが、周波数が低くなるにつれて推定値が測定値より小さくなる傾向にあり、周波数が高くなるにつれて、推定値が測定値より大きくなる傾向にあるためである。この傾向は、周波数特性が奥村 - 秦式では  $26\log(f)$  だが、測定値では  $20\log(f)$  となっていることに起因していると考えられる。そこで、奥村 - 秦式の周波数項である  $26.16\log(f)$  を  $20\log(f) + 19$  に修正して推定誤差を算出した。

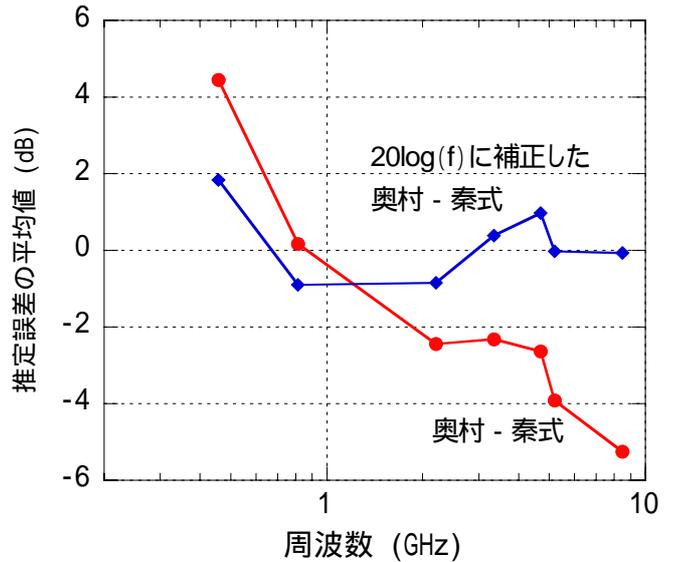


図6 1km 以内のデータに対する奥村 - 秦式の平均誤差

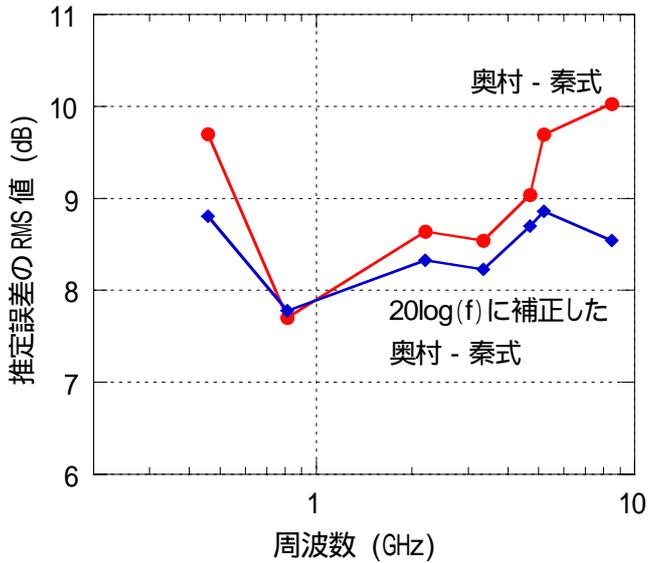


図7 1km 以内の測定データに対する奥村 - 秦式の誤差のRMS値

ここで、定数 19 は測定値との誤差が最小になるように求めている。このように修正することで平均誤差は小さくなるのがわかる。次に誤差のRMS値を図7に示す。奥村 - 秦式の周波数特性を補正した場合の誤差のRMS値は 8 ~ 9dB 程度となる。本報告での提案した回帰式の回帰残差は 7dB となる。

#### 5.まとめ

第4世代移动通信システムの無線回線設計に必要な伝搬損失推定式を作成した。推定式は市街地実験により取得した伝搬損失データの回帰を行い作成した。また、奥村 - 秦式の 1km 以内への拡張を考え

て今回取得したデータを用いてその推定精度について検討した．今後は郊外地における推定式の検討を行う予定である．

### 参考文献

- [1] 山尾泰, 梅田成視, 大津徹, 中嶋信生, “第4世代移動通信の展望 - 無線システムを中心とした課題について,” 信学論(B), vol. J83-B, No. 10, pp. 1364-1373, Oct.2000.
- [2] 奥村義久, 大森英二, 河野十三彦, 福田倚治, “陸上移動無線における伝搬特性の実験的研究”, 通研実報, [16], 9, pp. 1705-1764 (1967)
- [3] M. Hata, “Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services,” IEEE Trans. Veh. Technol., VT-29, No. 3, pp. 317-325, Aug. 1980.
- [4] J. Walfisch and H. L. Bertoni, “A theoretical model of UHF propagation in urban environment,” IEEE Trans. Antennas Propagat., AP-36, No.12, pp. 1788-1796, Dec. 1988.
- [5] F. Ikegami, S. Yoshida, T. Takeuchi, and M. Umehira, “Propagation factors controlling mean field strength on urban streets,” IEEE Trans. Antennas Propagat., AP-32, No. 8, pp. 822-829, Aug. 1984.
- [6] “Urban transmission loss models for mobile radio in the 900 and 1,800-MHz bands,” EURO-COST 231 TD (90) 119 Rev2, Sep. 1991.
- [7] 坂上修二, 久保井潔, “市街地構造を考慮した伝搬損失の推定”, 信学論 J74-B- [1] pp. 17-25, (1991)
- [8] H. H. Xia, “A simplified analytical model for predicting path loss in urban and suburban environments,” IEEE Trans. Veh. Technol., VT-46, No. 4, pp. 1040-1046, Nov. 1997.
- [9] Y. Oda, R. Tsuchihashi, K. Tsunekawa, and M. Hata, “Measured path loss and multipath propagation characteristics in UHF and microwave frequency bands for urban mobile communications,” VTC 2001 Spring, pp.337-341, May. 2001.