

## 第 4 世代移動通信システムの市街地伝搬損失推定式

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いるが、従来からある推定式の適用範囲は 2GHz までである。第 4 世代システムで必要になる推定対象範囲を周波数 3～6GHz、距離 0.1～3km、基地局高 10～100m として、都市部において伝搬損失測定を行った。これにより、距離や基地局高、周波数、道路幅、道路角などの伝搬特性を明らかにした。距離係数は 40、基地局高係数は 30、周波数係数は 21 となる。周波数特性が他のパラメータから独立であることを示して、従来推定式を第 4 世代用に拡張できることを明らかにした。従来式である坂上式を元にした推定式を提案する。

**キーワード** 移動伝搬、伝搬損失、第 4 世代移動通信システム、マイクロセル

### 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。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 程度のマイクロセルが適していると考えられる。このため、推定の距離範囲はセルの内側及び隣接セル干渉も求められるように 100m～3km 程度が必要となる。

また、従来のセルラーの形態以外に屋外無線 LAN の形態も考えられている。屋外無線 LAN では電柱のような高さに基地局を設置する場合もあるために、基地局高の範囲は電柱の 10m から鉄塔の 100m 程度までをカバーする必要がある。

無線回線設計を行う際には、伝搬損失の推定式が必要である。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。これらの推定式の適用範囲と本稿での対象範囲との関係を図 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、坂上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。

推定式には局所的な場所まで推定する Sight-Specific なタイプと長区間特性を対象とした Sight-General なタイプがある。本報告では無線回線設計に適している Sight-General な推定式について検討する。以前に報告した内容[8]は基地局高が平均ビル高より高い場合であった。本報告では基地局高が低い場合も検討したので、これらをまとめて報告する。

最初に、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、伝搬損失と関連の高い距離、基地局高、周波数、道路角および道路幅との関係について検討する。そして、重回帰分析により上記パラメータを用いて測定回帰式を作成する。最後に従来式を拡張して推定したときの推定精度について検討して、拡張坂上式を簡略化した式を用いた推定が有効であることを示す。

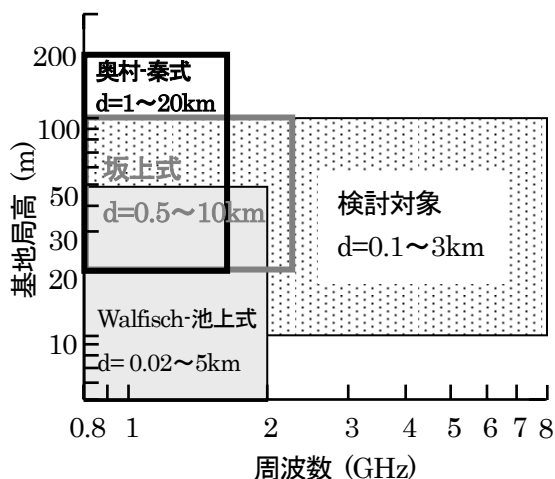


図1 本検討対象と従来式の対象範囲

## 2. 測定の概要

市街地の伝搬損失特性を明らかにするために横浜関内、都内の蔵前及び千代田で測定を行った。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、基地局を鉄塔と屋上に設置した。さらに基地局が平均的なビル高以下のときの測定を行うために、2つのビル（立体駐車場）の途中階に基地局を設置した。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。途中階は9~30m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、移動局高 $h_m$ の特性を明らかにするために、 $h_m=1.5, 3, 5m$ のときの測定を行った。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、オムニ指向性のアンテナまたはセクタアンテナを使用した。

表1 測定諸元

基地局	移動局	周波数	走行距離	備考
<高基地局高の測定> 横浜 鉄塔(80m) 屋上(35m) 蔵前 鉄塔(80m) 屋上(35m) 千代田 鉄塔(117m) 屋上(38m)	測定車 (2.1m or 2.75m)	0.457, 4.7, 0.812, 5.2, 2.2, 8.45 GHz 3.35,	24km <sup>(※)</sup>	出力 ;10~20W 送受信間距離 ;3km以内 送信アンテナ ;スリーブアンテナor セクタアンテナ 受信アンテナ ;スリーブアンテナ
<低基地局高の測定> 横浜 立体駐車場 3F(9m,10m), 5F(17m), 7F(21m,25m), 10F(30m)		0.812, 2.2, 4.7, 8.45 GHz	12km <sup>(※)</sup>	
<移動局高測定> 横浜 鉄塔(80m)	台車(1.5m) and, 測定車(3m, 5m)		42m × 18ポイント	

※基地局高ごとの平均走行距離

## 3. 測定結果

従来からの検討で伝搬損失Lossに対して影響の大きいパラメータは距離 $d$ 、基地局高 $h_b$ 及び周波数 $f$ であることが知られている。また、次節で示すようにLossは各パラメータの対数に比例するので次式で示される。

$$Loss = \alpha_d \log(d) + \alpha_{hb} \log(h_b) + \alpha_f \log(f) + C \quad (1)$$

ここで、 $\alpha_d$ は距離係数、 $\alpha_{hb}$ は基地局高係数、 $\alpha_f$ は周波数係数である。各係数は各特性の傾きに相当する。各係数は定数であるとは限らず、他のパラメータの関数になっている可能性もあるので、まずは $\alpha_d(h_b, f)$ 、 $\alpha_{hb}(d, f)$ 、 $\alpha_f(d, h_b)$ と考える。上記以外に道路角 $\theta$ と道路幅 $W$ の特性についても検討した。

### 3-1 距離特性

図2に横浜の鉄塔と屋上で測定した3.35GHzの距離特性を示す。測定値は送受信間距離の100m間隔ごとに50m短区間中央値の測定データを平均した値で示している。距離特性は対数で近似できることが分かる。次に $\alpha_d$ の特性について調べる。基地局高が同じデータごとに、距離 $d$ と周波数 $f$ 、道路角 $\theta$ 、道路幅 $W$ をパラメータにした次式のような回帰式を作成して $\alpha_d$ を求める。

$$Loss = \alpha_d \log(d) + \alpha_f \log(f) + \alpha_\theta \theta + \alpha_w \log(W) + C \quad (2)$$

このように道路角と道路幅もパラメータに入れることで測定環境のばらつきによる影響を小さくできる。これから基地局高ごとの距離係数と周波数係数が得られる。図3に得られた距離係数 $\alpha_d$ を示す。 $\alpha_d$ は30~50まで変化し、基地局高が低くなるに従い大きくなる傾向がある。平均的な $\alpha_d$ は40程度となる。 $\alpha_d$ が基地局高によって変化することは奥村-秦式にも示されているように従来から知られている。基

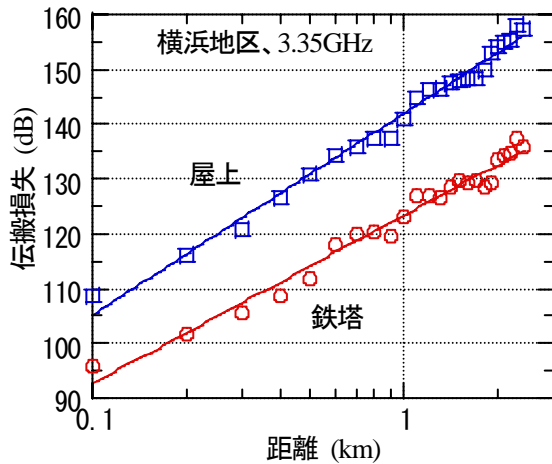


図2 距離特性(横浜)

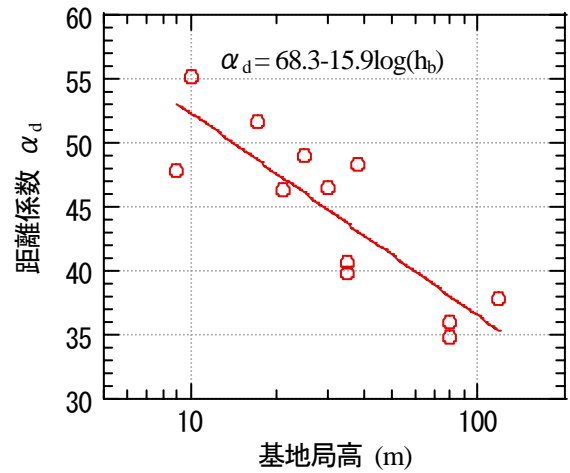


図3 基地局高と距離係数の関係

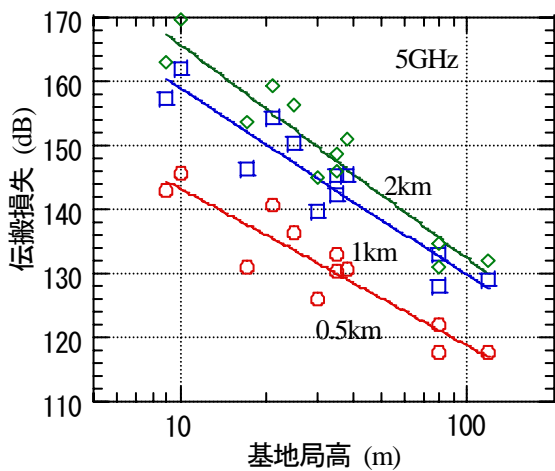


図4 基地局高と伝搬損失

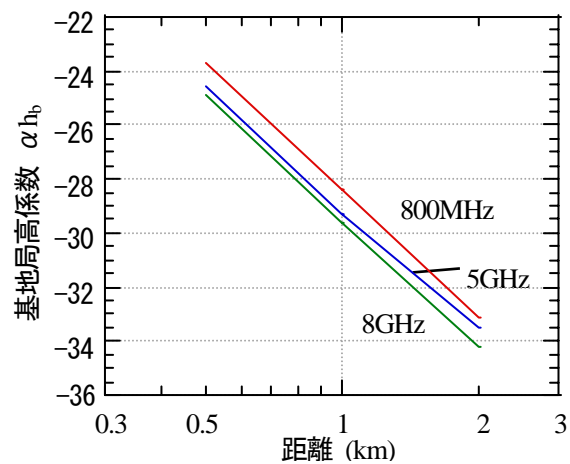


図5 距離に対する基地局高係数

地局高が低くなると  $\alpha_d$  が大きくなる理由は、基地局高が低くなると伝搬路がビルによって遮蔽される確率が増え、さらに遮蔽される区間の長さは距離に比例するためと考えられる。

図3は式(2)を用いて距離係数を求めているので、周波数の影響は除かれている。距離係数に対する周波数の依存度を確認するために、基地局高と周波数ごとに回帰式を作成して距離係数を求めた。その結果、周波数の影響はみられなかったため、距離係数は基地局高だけの関数  $\alpha_d(h_b)$  となる。

### 3-2 基地局高特性

基地局高特性を検査するために、式(2)の回帰式に距離  $d$  と周波数  $f$  を入れ、道路幅  $W$  は 20m、道路角  $\theta$  は 45 度として基地局高ごとの伝搬損失  $Loss$  を求める。図4にこのようにして求めた 5GHz の特性を示す。基地局高に対する伝搬損失は大まかに  $\log(h_b)$  で表わせることが分かる。また、送受信間距離が長くなるに従い伝搬損失の傾き(基地局高係数  $\alpha_{hb}$ )の絶対値は大きくなる。

図5に送受信間距離に対する基地局高係数  $\alpha_{hb}$  を示す。距離 1km では基地局高係数は  $\alpha_{hb} = 30$  程度

である。距離とともに基地局高係数  $\alpha_{hb}$  の絶対値が大きくなることから分かる。これは図3の距離特性の傾き(距離係数)は基地局高が低くなるほど大きくなることに対応している。図5からはわずかに周波数の影響があることも分かる。これは次節で示すが周波数係数が基地局高に依存することに対応している。

従来式は関数系が複雑なので基地局高係数  $\alpha_{hb}$  は直接的には分からないが、奥村-秦式の場合で約-17、坂上式で約-30である。Walfisch-池上式の基地局高特性は基地局高  $h_b$  が平均ビル高  $H_0$  より小さくなると急激に変化する。これは街中のビルの高さを全て同じに仮定したためである。これによりビル間をすり抜ける波や高いビルに反射する遅延波は存在しなくなり、先頭波に相当するビル屋上回折波だけを対象とするので平均ビル高  $H_0$  の影響が大きくなると考えられる。

### 3-3 周波数特性

周波数特性は従来の報告[9]、また最近の報告[10-12]からも  $20\log(f)$  に近い特性であるといわれている。

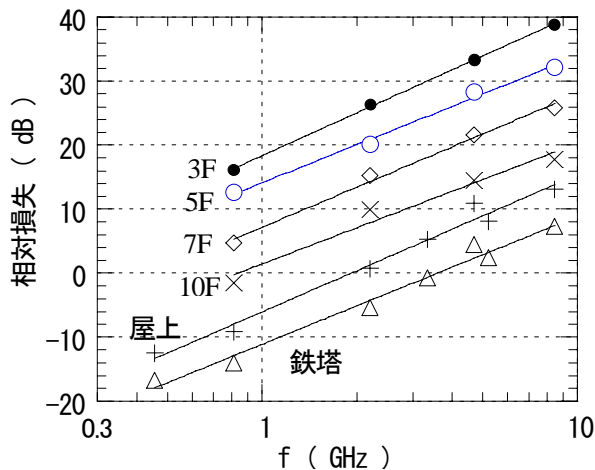


図6 周波数特性

図6に周波数特性を示す。複数の周波数を同時測定したので周波数ごとの伝搬損失差として表している。400MHzから8GHzまでを $\alpha_f \log(f)$ の関数で近似できることが分かる。周波数ごとの短区間中央値変動の相関係数は高く、どの場合も相関係数は0.9以上である。2つの周波数の比が1に近いほど相関係数が高くなっている。また、周波数ごとの50m短区間中央値での伝搬損失差のばらつきは標準偏差で2~3dBと小さい。

図7に基地局高に対する周波数係数を示す。これは式(2)で求めた値である。ばらつきが大きい。基地局高が高くなると周波数係数 $\alpha_{hb}$ が小さくなる傾向にある。Walfisch[4]モデルを簡略化したXia式[13]では基地局高 $h_b$ と平均ビル高 $H_0$ との関係で周波数係数 $\alpha_f$ は次のようになる。

$$\begin{aligned} h_b > H_0 \text{ のとき } & \alpha_f = 20 \\ h_b = H_0 \text{ のとき } & \alpha_f = 30 \\ h_b < H_0 \text{ のとき } & \alpha_f = 40 \end{aligned}$$

ここで、 $H_0$ を測定したエリアでのビル高50%値とすると横浜と蔵前が16m、千代田が28mとなる。図7をみると $h_b > H_0$ のときは $\alpha_f$ は21程度である。

しかし、 $h_b = H_0$ 及び $h_b < H_0$ では $\alpha_f$ は22~23程度となる。先に述べたように、Walfischモデルはビル屋上を回折する先頭波によって受信レベルが決まると仮定している。しかし、実際の街ではビル高にばらつきがあるため、ビル反射した遅延波やビル間のすり抜け波もある。受信レベルはこれらの波の合成であり、ビル反射波やビル間のすり抜け波はあまり周波数の影響は受けないので、周波数係数はあまり大きくならないと考えられる。

周波数係数は基地局高 $h_b$ と相関はみられるが、周波数係数 $\alpha_f$ の変化が小さいため $\alpha_f$ を定数として扱っても推定精度への影響は小さい。

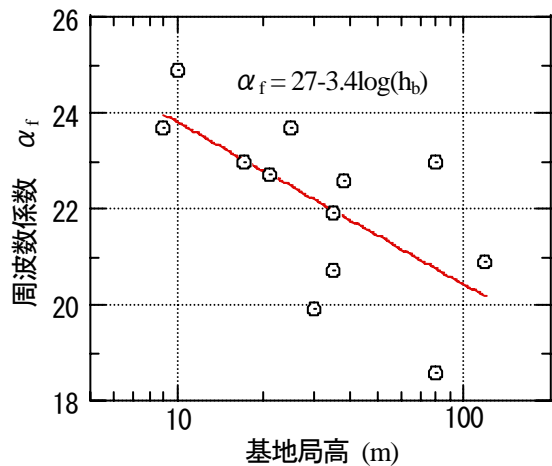


図7 基地局高と周波数係数

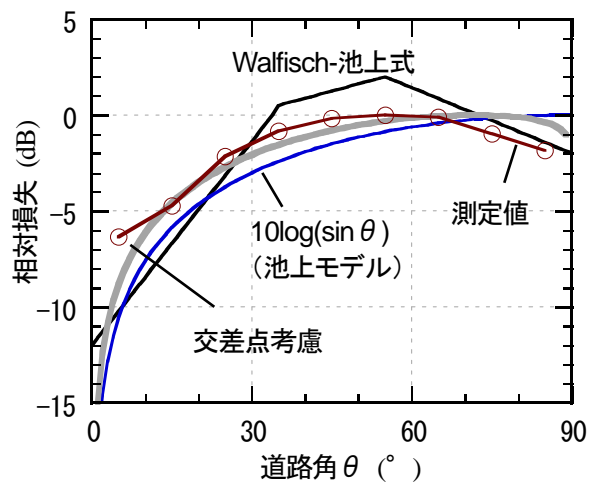


図8 道路角特性

次に送受信間距離に対する周波数係数 $\alpha_f$ を調べると距離に対する影響はみられなかった。これは3-1節で距離係数 $\alpha_d$ に対する周波数の影響がないこととも一致する。

### 3-4 道路角と道路幅の特性

道路角の特性を確認するために、道路角を除いた4パラメータ(距離、基地局高、周波数及び道路幅)を用いて測定値の重回帰式を作成して、測定値から重回帰式の計算値を減算した。この値を道路角に対する伝搬損失の特性とした。道路幅の特性についても同様に処理した。

図8は上記処理で求めた相対損失を道路角に対してプロットした結果である。ここで測定値はバラツキを除くために $10^\circ$ ステップで平均した値である。図を見ると $30 \sim 60^\circ$ の間にピークがあるように見える。測定値を2次の多項式で回帰すると以下のような結果が得られた。

$$Loss = 0.3\theta + 0.003\theta^2 + C \quad (3)$$

得られた特性は、池上式[5]の $10\log(\sin \theta)$ と近いが、池上式の場合は $\theta = 90^\circ$ でピークとなる。

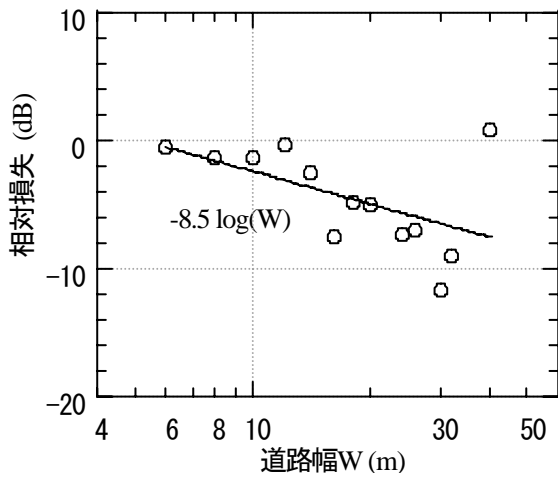


図9 道路幅特性

道路角は道路方向と基地局方向がなす角度のことなので、交差点では道路角は2つある。道路角が小さいほど伝搬損失も小さくなるので、交差点では小さい方の道路角を用いるべきである。しかし、測定データは測定位置の精度が良くなかったので、交差点でこのような処理を行っていない。池上式の道路角特性から、進行方向による道路角を用いて道路角特性を求めてみる。道路100m毎に幅20mの交差点が存在すると仮定すると、交差点である確率は1/5であり、交差点で進行方向による道路角が小さい方の道路角でない確率は1/2である。これらより進行方向による道路角を用いたときの道路角度特性は次式となる。

$Loss = (9/10)10\log(\sin\theta) + (1/10)10\log(\sin(90-\theta))$  (4)

式(4)の計算結果を図8に示す。図8から式(4)の結果は測定値の特性にさらに近くなっていることがわかる。このことから、池上式の道路角特性が妥当だといえる。また、図8にWalfisch-池上式の道路角特性を示す。道路角45°付近で盛り上がっている傾向は同じであることから、Walfisch-池上式も交差点での道路角を考慮しないで道路角特性を求めたことが分かる。

次に道路角に対する周波数特性を検討する。複数周波数を同時測定したので50m短区間値ごとに周波数係数 $\alpha_f$ が得られる。この周波数係数 $\alpha_f$ と道路角との相関を調べるとほとんど相関がみられなかった。このことから道路角特性は周波数に依存しないことが明らかになった。

図9に平均化した道路幅特性を示す。道路幅が大きいところで、伝搬損失が道路幅に比例していないために回帰の相関はそれほど大きくないが、対数及び線形回帰を行うと、対数回帰の方がわずかながら相関係数が大きくなった。回帰式は以下のようになった。

$$Loss = -8.5 \log(W) + C \quad (5)$$

この式は、Walfisch-池上式の道路幅特性 $-10 \log(W)$

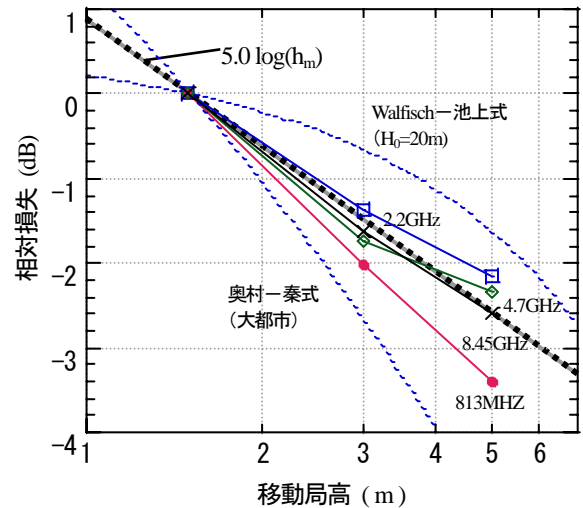


図10 移動局高と伝搬損失

や坂上式での $-7.1 \log(W)$ と近い特性である。

道路幅と周波数係数 $\alpha_f$ との相関を調べると、相関係数が低かったため、周波数による依存はないことが分かった。

### 3-5 短区間中央値変動特性

短区間中央値の変動特性について検討する。3-7節で示すように道路角と道路幅のパラメータを用いて測定データを回帰しても標準偏差で約6dBのばらつきが残る。測定値から距離変動を除いて得た短区間中央値変動に対して道路角と道路幅特性による変動との相関係数は $\rho=0.5$ 程度とあまり高くない。道路角や道路幅以外に短区間中央値変動を発生させる別の要因があることが分かる。

短区間中央値変動の自己相関係数が0.5となる自己相関長は測定データから140mであった。今回の検討では交差点の影響を考慮していないが、交差点間隔が100m程度であることを考えると短区間中央値変動の要因になっている可能性もある。

### 3-6 移動局特性

横浜地区の車道上の18地点で移動局高特性を測定した。1地点での平均の測定長は42mである。移動局高が1.5mの場合は台車を、3mと5mの場合は測定車を用いた。図10に周波数ごとに平均した移動局高特性を示す。周波数ごとに特性は多少ばらつきがその差は小さく、周波数による違いはみられない。全ての周波数のデータを用いて求めた移動局高特性 $a(h_m)$ は次式で近似できる。

$$a(h_m) = 5.0 \log(h_m) \quad (6)$$

ここで、 $h_m$ は移動局高である。

参考のために図10中に従来式の特性を示す。ここでは、奥村一泰式の大都市用とWalfisch-池上式の平均ビル高 $H_0=20m$ での特性を示している。式(6)は両者の中間程度の特性である。



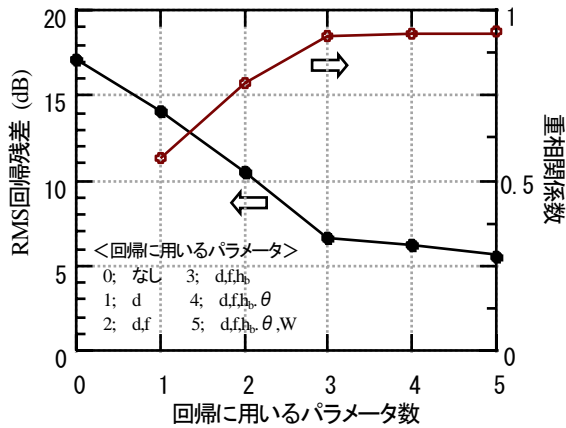


図11 パラメータとRMS残差

### 3-7 重回帰分析

測定した伝搬損失 Loss (dB) を重回帰分析して推定式の検討を行う. 3-1~3-4 節で検討した 5 つのパラメータ (距離, 基地局高, 周波数, 道路角及び道路幅) を用いて重回帰を行った場合, 次式が得られる.

$$Loss = 42 \log(d) - 30 \log(h_b) + 21 \log(f) + 0.3\theta - 0.003\theta^2 - 9 \log(W) - 5 \log(h_m) + 55 \quad (7)$$

このとき, 式(7)を計算することで得られる値と測定値との差の実効値である回帰残差は 5.9dB である. また, 式(7)で得られる値と測定値との相関係数である重相関係数 R は 0.94 である.

回帰に対する各パラメータの有効性を調べたところ, 距離, 周波数, 基地局高, 道路角, 道路幅の順で有効であることが分かった. 図 11 にパラメータの数を制限した場合の回帰残差を示す. パラメータ数が 0 の場合は単に測定値の標準偏差を表す. パラメータ数が 1 の場合は距離 d のパラメータのみを使って回帰した場合の回帰残差である. パラメータ数を増やすことで回帰残差は減少するが, 道路角と道路幅の影響は小さいことが分かる. また, 本稿で検討している Sight-General な推定の場合, 道路角と道路幅を除いた 3 パラメータの推定式を用いることになると考えられる. 3 パラメータの回帰式は次のようになる.

$$Loss = 39 \log(d) - 30 \log(H_b) + 21 \log(f) - 5 \log(h_m) + 60 \quad (9)$$

このとき, RMS 残差は 6.6dB である.

さらに, 3-1 の図 3 にあるように距離係数  $\alpha_d$  と基地局高の関係性を考慮して, 回帰残差が最小になるように  $\alpha_d$  の係数を調整すると次式が得られる.

$$Loss = [-18 \log(h_b) + 70] \log(d) + 18 \log(h_b) + 21 \log(f) - 5 \log(h_m) - 19 \quad (10)$$

しかし, この式による RMS 残差は 6.4dB となり複雑な式にした割には, 推定精度の改善がほとんど見

表2 測定値の回帰式

<測定回帰式>		
$Loss = 39 \log(d) - 30 \log(h_b) + 21 \log(f) - 5 \log(h_m) + 60$ (dB)		
距離	d [m]	100~3,000 m
基地局高	$h_b$ [m]	10~100 m
周波数	f [GHz]	0.8~8 GHz
移動局高	$h_m$ [m]	1.5~5 m
測定環境	都市部	
回帰残差RMS: 6.6dB		
(平均ビル高 $H_0$ [m] 16~28 m, 道路幅W [m] 8~40 m)		

表3 従来式の推定精度

推定式	補正有無	周波数及び定数項	残差RMS (dB)
奥村一秦	無	$69.55 + 26.16(f)$	8.6
	有	$85 + 21 \log(f)$	8.3
Walfisch一池上	無	$78.2 + 30 \log(f) + [-4 + 0.7(f/925 - 1)] \log(f)$	19.9
	有	$88.2 + 20 \log(f)$	7.7
拡張坂上	無	$100 + 20 \log(f)$	7.6
	有	$101 + 21 \log(f)$	6.7

られない. 利便性を考慮すると式 (9) を用いた方がよい. 表 2 に測定値の回帰式のまとめを示す.

## 4.従来式の推定精度評価とその拡張

### 4-1 従来式の評価

3-3 節で示したように周波数特性は距離dや基地局高 $h_b$ , 道路幅W, 道路角 $\theta$ の影響が小さく, 周波数係数は定数として扱える. このことは 800MHz や 2GHzを対象に作られた従来推定式の周波数特性の部分を修正すれば高い周波数にも拡張できることを意味している.

本節では, 測定したデータを用いて奥村一秦式, Walfisch一池上式及び坂上式の推定精度について検討して周波数の適用範囲拡大の可能性について考える. 坂上式の拡張として周波数特性を  $20 \log(f)$  に置き換え, ビル高のパラメータを全て平均ビル高に置き換えた拡張坂上式[10,14]が提案されている. ここでの評価は次式の拡張坂上式を用いる.

$$Loss = 100 - 7.1 \log W + 0.023\theta + 7.5 \log(H_0) - \{24.37 - 3.7(H_0/h_b)^2\} \log h_b + (43.42 - 3.1 \log h_b) \log d + 20 \log(f) \quad (11)$$

ここで, Wは道路幅[m],  $\theta$ は道路角 $^\circ$ ],  $H_0$ は平均ビル高[m],  $h_b$ は基地局高[m], dは距離[km], fは周波数[MHz]である.

今回の測定で得た全てのデータを用いて従来式の推定誤差を求めた. 従来式は今回の測定条件をカバーしているわけではないが, 外挿して推定値を求めた. 計算結果を表 3 に示す. 奥村一秦式で 8.6dB,

表4 提案推定式(簡略化した拡張坂上式)

$Loss = 54 + 40 \log(d) - 30 \log(h_b) + 21 \log(f) + a$ $a = a(H_0) + a(W) + a(h_m) \quad (\text{dB})$	
平均ビル高補正	$a(H_0) = 11 \log(H_0 / 20)$
道路幅補正	$a(W) = -7.1 \log(W / 20)$
移動局高補正	$a(h_m) = -5.0 \log(h_m / 1.5)$
<対象範囲>	
距離	d [m] 100~3,000 m
基地局高	$h_b$ [m] 10~100 m
周波数	f [GHz] 0.8~8 GHz
平均ビル高	$H_0$ [m] 10~30 m
道路幅	W [m] 5~50 m
移動局高	$h_m$ [m] 1.5~5 m
<備考>	
・推奨値 都市部: $H_0=20\text{m}$ , $W=20\text{m}$	
・平均ビル高はエリア内の建物高累積50%値 (対象建物は道路幅15m以上の道路隣建物のみで、 1F以上の建物とする。高さは建物階数×4mで換算)	
・推定誤差は7dB程度	
・見通し道路は推定の対象外	
・移動局位置は路上	

Walfisch-池上式で 19.9dB となった。また、拡張坂上式では、7.6dB となった。Walfisch-池上式及び拡張池上式で使用されている平均ビル高については、ビル階数の累積 50%値を用いた。ビル 1 階あたりの高さを 4m として計算した。

さて、今回の測定データの周波数特性は  $21 \log(f)$  である。しかし、奥村-秦式では  $26 \log(f)$ 、Walfisch-池上式は今回の周波数範囲では  $26 \sim 32 \log(f)$  となり特性が異なる。Walfisch-池上式の誤差が大きい理由は、このように傾きの大きい周波数特性を無理に外挿したためである。そこで、測定値を用いて従来式の周波数の項と定数項を最適になるように求めて、回帰残差を計算した。

表 3 に計算結果を示す。奥村-秦式の周波数項と定数項は本来の  $69.55 + 26.16 \log(f)$  から  $85 + 21 \log(f)$  で補正される。このことから、周波数 1GHz を中心に周波数の傾きを  $21 \log(f)$  に変えれば測定データとフィットすることが分かる。この場合の回帰誤差は 8.3dB である。同様に Walfisch-池上式についても計算を行うと、回帰残差は 7.7dB と大幅に改善される。拡張坂上式について計算を行うと、回帰残差は 6.7dB であり、評価を行った従来式では最も良い特性となった。なお、ここでも Walfisch-池上式と拡張坂上式に用いる平均ビル高は累積 50%値を用いた。

#### 4-2 拡張坂上式の簡易化

利便性を考慮して、前節で最も推定精度の良かった拡張坂上式の簡易化について検討する。まず、式(11)中にある次の  $L_1$  を平均ビル高  $H_0=10 \sim 30\text{m}$ 、基地局高  $h_b=10 \sim 100\text{m}$  (ただし、 $h_b > H_0$  の範囲)、距離  $d=0.5 \sim 3\text{km}$  の範囲で簡易化する。このパラメータの

範囲は従来の坂上式の範囲内であつ今回の対象範囲である。

$$L_1 = 7.5 \log(H_0) - \{24.37 - 3.7(H_0 / h_b)^2\} \cdot \log h_b + (43.42 - 3.1 \log h_b) \log d \quad (12)$$

具体的には各パラメータの値を順次変えて  $L_1$  を求め、このデータを重回帰して簡易な式にする。これにより次式が得られる。

$$L_1 = 40 \log(d) - 30 \log(h_b) + 11 \log(H_0) + 6.5 \quad (13)$$

このとき回帰残差は 0.68dB であり式(12)からのずれは小さい。

さらに  $\theta = 45^\circ$  として、都市部では  $H_0=20, W=20$  と仮定する。また、周波数特性を 4-1 節の拡張坂上の補正で得られた  $21 \log(f)$  とすると式(11)は次式のように変形できる。

$$Loss = 111 + 40 \log(d) - 30 \log(h_b) + 21 \log(f) \quad (14)$$

測定データに対する式(14)の回帰残差は 6.6dB となる。第 4 世代システムのための推定式として式(14)を提案する。本式の適用範囲を表 4 に示す。表 4 では距離の単位を [m]、周波数の単位を [GHz] に変更している。

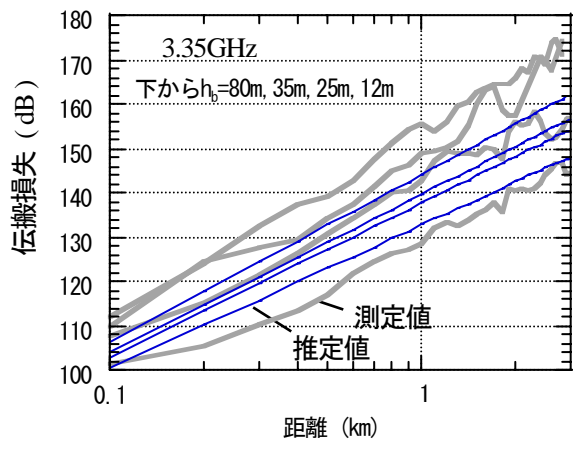
図 12 に測定値と表 3 で補正した各推定式の距離特性を示す。図 12(a)に修正した奥村-秦式の場合、(b)に修正した Walfisch-池上式の場合、(c)に提案式(14)の場合を示す。図中のカーブは推定値も測定値も伝搬損失の小さい順に、基地局高  $h_b=80\text{m}, 35\text{m}, 25\text{m}, 12\text{m}$  の場合である。

奥村-秦式の基地局高特性は  $-17 \log(h_b)$  程度と測定回帰式の  $-30 \log(h_b)$  より係数が小さいため測定値との差が生じる。Walfisch-池上式は基地局高が平均ビル高より低くなると損失が急激に大きくなるため、この場合に測定値との差が生じる。拡張坂上式を元にした提案式の場合は全体的に測定値とフィットすることが分かる。

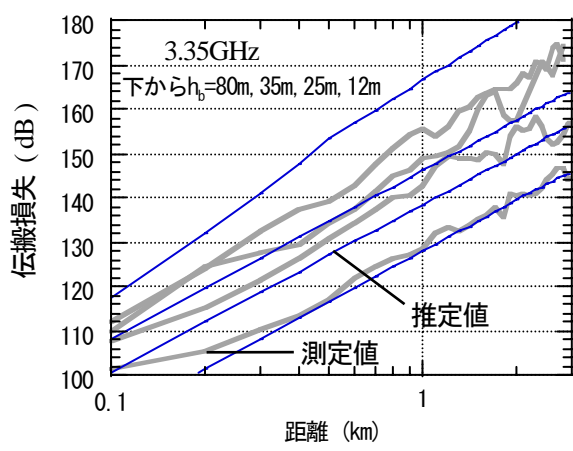
#### 5.まとめ

第 4 世代移動通信システムを対象にした伝搬損失推定式の検討を行った。400MHz~8GHz の測定より明らかにした内容は次のとおりである。

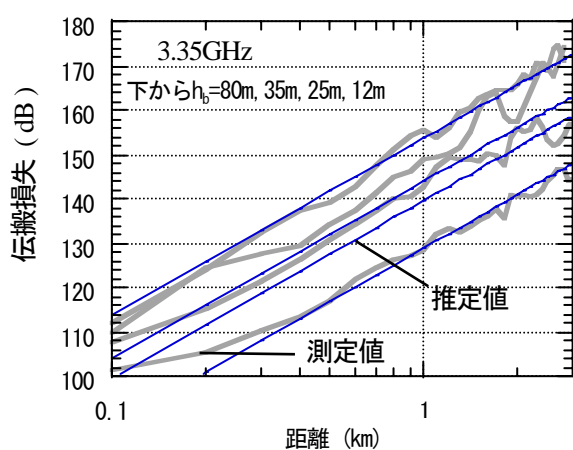
- (1) 距離特性の傾き  $\alpha_d$  は基地局高  $h_b$  に依存し、 $h_b=100\text{m}$  から 10m まで連続的に変化するので低基地局高まで  $\log(h_b)$  の関数で近似できる。また、周波数  $f$  には依存しない。平均的な  $\alpha_d$  は 40 程度である。
- (2) 基地局高  $h_b$  に対する伝搬損失  $Loss$  は  $h_b=100\text{m}$  から 10m まで連続的に変化し、簡易に  $\alpha_{hb} \log(h_b)$  の関数で近似できる。平均的な  $\alpha_{hb}$  は 30 程度である。
- (3) 周波数特性の傾き  $\alpha_f$  と基地局高  $h_b$  との相関はわずかにあるが、伝搬損失に対する影響は小さい。



(a) 修正奥村-秦式



(b) 修正Walfisch-池上式



(c) 提案式(14)

図12 測定結果と各推定式との比較

高基地局高では $\alpha_f$ は21程度、低基地局高では23程度である。

- (4) 移動局高特性は周波数に依存せず  $5.0 \log(h_m)$  で表される。
- (5) 道路角特性は池上モデルの  $10 \log(\sin \theta)$  に近い。交差点を考慮しないと Walfisch-池上モデルに近い特性である。周波数の依存性はない。
- (6) 道路幅特性は池上式や坂上式に近く  $-10 \log(W)$  程度であり、周波数の依存性はない。

(7) 伝搬損失に影響の強いパラメータは今回の対象範囲では距離, 周波数, 基地局高の順番であった。パラメータ数に対する回帰残差を示した。

(8) 3つのパラメータを用いて測定回帰式を作成した。回帰残差は6.6dBである。

(9) 従来の坂上式は第4世代用に拡張できることを示し、測定データを元に拡張坂上式をさらに簡略化して提案式とした。

今回はビルが林立する都市部を対象に検討を行った。第4世代システムの全国的な展開を考えると平均ビル高が低い郊外地やさらに開放地での検討も必要である。郊外地では周波数特性が単純ではないという報告[15]も既にあるので、今後の詳細な検討が必要である。また、第4世代システムでは路上だけでなく建物内エリアも重要になる。これらは今後の課題である。

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-II [1] pp. 17-25, (1991)
- [8] 北尾光司郎, 市坪信一, “400MHz~8GHz 帯のマイクロセル伝搬損失推定式”, 第477回電波研連F分科会, 2003.9
- [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.

- [10] 太田喜元, 表英毅, 三上学, 藤井輝也, “マイクロ波帯における伝搬損失推定式の検討”, 信学技報 AP2003-319, pp. 51-56, 2004.3.
- [11] 米澤, 前山, 岩井, 原田, “5GHz 帯マクロセルシステムにおける伝搬モデル確立のための比較実験” 2004 年信学会総合大会, B-1-5, 2004.3
- [12] 佐藤, 荒木, 芹澤, 野田, 太田, 川端, “周波数共用検討のための 5GHz 帯市街地伝搬特性”, 2000 年信学総合大会, B-1-32, 2000.3
- [13] 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.
- [14] 藤井輝也, “陸上移動通信における伝搬損失推定式—“坂上式”の拡張—”, 信学論, Vol. J86-B, No. 10, pp. 2264-2267, 2003.
- [15] 小田恭弘, 片桐隆行, 土岐幸秀, “郊外地における移動伝搬損失特性”, 2000 年信学総合大会, B-1-33, 2000.3