

移動通信における多重波伝搬の周波数特性

市坪 信一†a)

Frequency Dependence of Multipath Propagation for Mobile Communications

Shinichi ICHITSUBO†a)

あらまし 移動通信で使われる電波の周波数は様々で、同じサービスでも世代ごとに周波数は変わる。電波伝搬の周波数特性が広い帯域にわたって解明されれば、周波数ごとの研究は必要なくなり、自システムの回線設計だけでなく他システムとの干渉設計にも有益である。本論文ではこれまでに報告されてきた移動伝搬の周波数特性をまとめて全体像を明らかにする。対象とした伝搬特性は、屋外のマイクロセル環境や屋内環境における伝搬損と建物侵入損、伝搬遅延、到来波の角度広がりである。その結果、ほとんどの環境で周波数による伝搬特性の差が小さいことを示す。むしろ周波数に依存する伝搬特性やその環境を指摘する方が困難である。また、周波数の影響が小さくなる原因についての検討結果も示す。

キーワード 移動伝搬, 伝搬損, 遅延プロファイル, 建物侵入損, 周波数特性

1. まえがき

電波の周波数は有限であるため周波数の有効利用は重要な課題であり国内でも検討が行われている [1]。移動通信で使われる電波の周波数は様々で、同じサービスでも世代ごとに周波数が変わってくる。例えば、携帯電話の第2世代では800 MHz帯、第3世代では主に2 GHz帯（他に800 MHz帯や1.7 GHz）が使われており、第4世代では3 GHz帯が使われる予定である。移動通信のシステム設計を行うには使用する周波数での電波伝搬特性が必要である。しかし、周波数が変わるごとに伝搬特性を調査し直すのは効率が悪いので、周波数によって伝搬特性がどのように変化するかという周波数特性の解明が重要になってくる。

この周波数特性を精度良く体系立てて明らかにするには広い周波数範囲を研究対象にしなければならない。しかしながら、通信事業者としては次期システムで使用される周波数での伝搬特性には関心があり調査や研究にも熱心だが、直接的に関係のない周波数についての研究にはあまり投資したくないというのが現状であ

る。このために、広い周波数範囲をカバーする研究は敬遠されてきた感じが否めない。周波数特性を明らかにすることは、将来のシステム設計に役立つばかりでなく他の周波数を用いている既存の他システムとの干渉設計にも役立つために社会的な意義は大きい。

本論文では移動通信の無線回線設計に必要な伝搬特性における周波数依存性を検討する。伝搬特性として、伝搬損と建物侵入損、伝搬遅延、到来波の角度広がりを取り上げる。図1(a)に基地局から路上の移動局までの伝搬路を示すがこの区間での損失が伝搬損であり、これは屋外のサービスエリアの大きさを決めるのに必要である。また、図1(a)にビルの屋外からビル内の伝搬路を示すがこの区間の損失が建物侵入損であり、これは屋内エリアの大きさを決めるのに必要である。図1(b)には基地局に到来する多重波の様子を示す。この多重波が時間的に遅れて基地局に到来することを伝搬遅延といい、この特性は狭帯域通信では伝送速度を決めるのに必要である。更に、多重波が基地局に到来してくるときの空間的な広がりを到来波の角度広がりといい、この特性は空間ダイバーシチを行うときのアンテナ間隔や指向性アンテナのビーム幅を決めるのに必要である。

これらのほかに無線回線設計では受信レベルの短区間変動特性（シャドーイング特性）や偏波特性も重要

†九州工業大学工学研究院, 北九州市

Department of Electrical Engineering, Kyushu Institute of Technology, 1-1 Sensui-cho, Tobata-ku, Kitakyushu-shi, 804-8550 Japan

a) E-mail: ichtsubo@ecs.kyutech.ac.jp

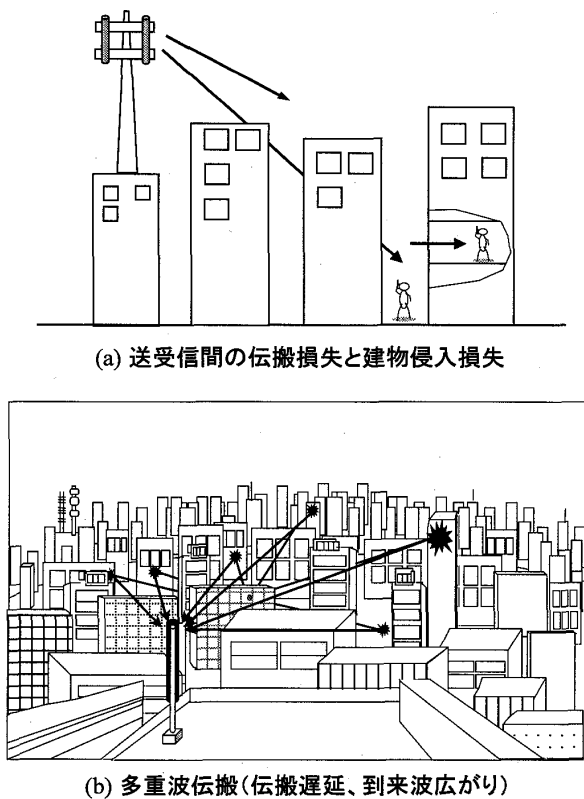


図 1 伝搬特性

Fig. 1 Propagation characteristics, (a) Path loss and building penetration, (b) Multipath Propagation.

な伝搬特性であるが、広い周波数範囲にわたっての詳細な報告が少ないため対象から外した。

本論文の構成は 2. で移動伝搬の周波数特性を示し、3. で周波数特性の検討を行い、4. で周波数特性の活用を述べ、5. でまとめを行う。

2. 移動伝搬の周波数特性

2.1 屋外マイクロセル環境

ここではマイクロセル環境として、基地局高は周辺ビル高以上で、距離がおおよそ 1 km 以内のエリアを想定している。

2.1.1 屋外の伝搬損

屋外のマクロセルにおける伝搬損推定として従来から奥村-秦式 [2] が使われている。この奥村-秦式の適用範囲は送受信間距離が 1~20 km で、周波数範囲は 150~1500 MHz であり、伝搬損 L の周波数 f に対する特性は、 $L = 26.16 \log f$ [dB] とされている。これを準マイクロ波帯の 1500~2000 MHz で適用できるように測定結果をもとに拡張が図られたが、1500~2000 MHz における周波数特性は $33.9 \log f$ とされた [3], [4]。建物屋上を回折して路上に到達する電波の

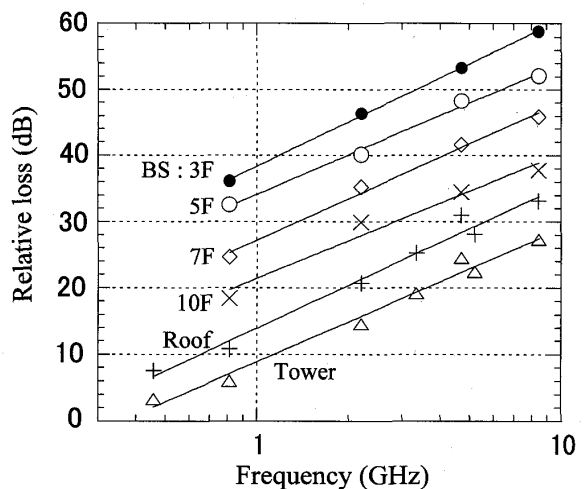


図 2 伝搬損の周波数特性 [12]

Fig. 2 Frequency characteristics of propagation loss [12].

回折損は周波数が高くなるにつれて増加する。この回折損のイメージによって周波数特性の傾きが大きくされたのではないかとと思われる。基地局から移動局の近くまで建物上空を伝搬するときは高い建物による遮へい損が発生する。高い周波数ほどフレネルゾーンが小さくてすむためこの遮へい損は小さくなる。この現象も考慮してその後に Walfisch-池上式 [3] や坂上式 [5], Xia 式 [6] などいくつもの推定式が提案されてきた。

伝搬損の周波数に対する傾きを精度良く測定するには周波数差の大きい電波を用いた方がいい。しかし、サービスも計画されていない高い周波数の電波を用いての研究はあまり実益に結び付かないと考えられ敬遠されてきた。これに対して小田らはマイクロセルを対象として周波数 457 MHz と 813 MHz, 2.2 GHz, 4.7 GHz, 8.45 GHz, 15.45 GHz を用いて都内で測定を行い、周波数特性は自由空間損と同じ $20 \log f$ になることを示した [7]。また、坂和らも 3.35 GHz と 8.45 GHz, 15.75 GHz を用いて周波数特性が $21.9 \log f$ になることを示した [8]。これまでに多くの周波数特性が測定されてきたにもかかわらず明確な特性を示せなかったことを考えるとこれらは画期的なことであった。この結果を受けて他機関からも $20 \log f$ に近い周波数特性になることが報告されている [9]~[11]。

筆者らも都内や横浜で伝搬損の測定を行った [12]。測定を行った周波数は 458 MHz から 8.45 GHz の七つである。また送受信間距離は干渉波の推定も考慮して 3 km まで行った。図 2 は基地局高ごとに周波数に対する伝搬損の相対値を示す。基地局から複数の周波数

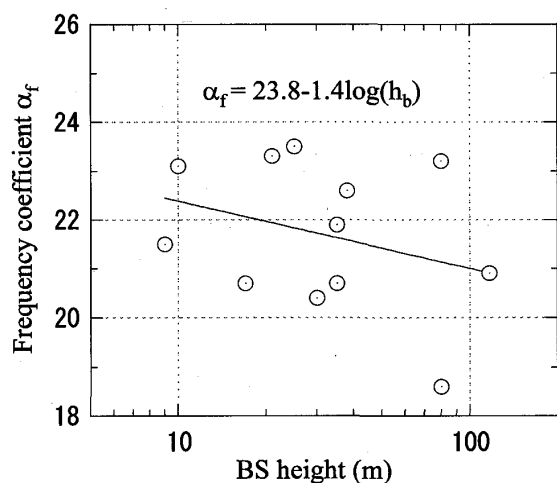


図3 基地局高に対する周波数係数 [12]
Fig. 3 BS height vs. frequency coefficient [12].

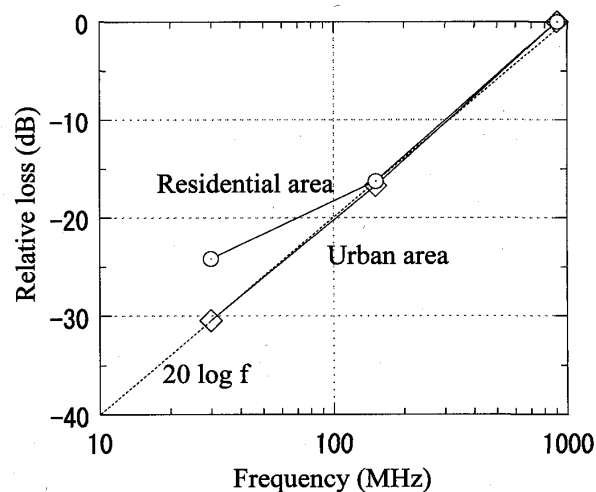


図4 30~900 MHz の伝搬損の周波数特性
Fig. 4 Frequency characteristics of propagation loss in 30~900 MHz.

の電波を送信して走行中の移動局でそれらの受信レベルを同時測定した結果である。これにより基地局高ごとの周波数に対する伝搬損の変化を示している。図2の鉄塔と屋上のカーブは鉄塔のある三つのビルで基地局を鉄塔と屋上に設置して測定した結果の平均値である。また、3F~10Fのカーブは別の二つのビルで基地局をそれぞれのフロアに設置した場合である。このため図2の各カーブの損失は相対値であり、各カーブの傾きだけに意味がある。相対損 L は周波数 f の対数値に対して直線的に変化して、 $L = \alpha_f \log f$ の関数で近似すると傾き α_f は20に近い。図3に基地局ごとに求めた周波数の傾き α_f を基地局高に対して示す。周波数の傾きはばらついているが基地局高に対してわずかに比例する傾向がある。基地局高10~100mで周波数特性は $23 \log f \sim 20 \log f$ であった。

また、400 MHzより低い周波数での特性を調べるために北九州市の市街地と住宅地で30 MHzと152 MHz、903 MHzの周波数を用いて測定を行った。基地局高は市街地では45mで、住宅地では23mと35mである。また、測定した市街地はビル街であり10F程度のビルが多く、建物高累積分布50%値が5F、80%値が8Fである。住宅地は大半の建物高が2Fや3Fで、50%値が2F、80%値が3Fである。図4に測定結果を示す。市街地では900 MHzから30 MHzまで $20 \log f$ に近い特性となり、住宅地では30 MHzが $20 \log f$ のカーブより損失が大きくなる。150 MHzより低い周波数特性については今後の検討が必要であるが、少なくとも150 MHzまでは $20 \log f$ に近い特性である。

これまでの報告から、屋外のマイクロセル環境にお

いては150 MHzから15 GHzまでは $20 \log f$ に近い周波数特性になるといえる。

2.1.2 建物侵入損

屋外の基地局がカバーするサービスエリアは屋外ばかりでなく屋内も対象である。このため、電波が屋外から屋内に侵入する伝搬損の推定も必要である。建物侵入損とは屋外の路上での受信レベルと屋内の受信レベルとの差のことである。送受信間に見通しが無いマイクロセル環境を対象にした建物侵入損に関する報告は次のとおりである。

COST231でBergは周波数が900 MHz~1.8 GHzでの建物侵入損の推定式を提案している[13]。この中で侵入損は900 MHzに比べて1800 MHzでは2 dB増加すると記述されている。これは周波数特性を対数で表すと $6.6 \log f$ となる。

Davidsonらは、自ら測定した900 MHzと1500 MHzの測定データと従来の測定データをもとにして、35 MHzから3 GHz近くまでの侵入損特性を提案している[14]。これによると周波数特性は $-7.9 \log f$ であり、周波数が増加すると侵入損は減少することが示されている。しかしながら、自らの測定結果では900 MHzと1500 MHzの侵入損の差は1 dBもないことも示されている。

筆者らも建物侵入損の周波数特性を明らかにするために横浜の都市環境にある12個のオフィスビルと五つの立体駐車場で測定を行った[15]。基地局は鉄塔の高さ80mに設置した。測定周波数は810 MHzと2.2 GHz、4.7 GHz、8.45 GHzの四つで同時測定を行っ

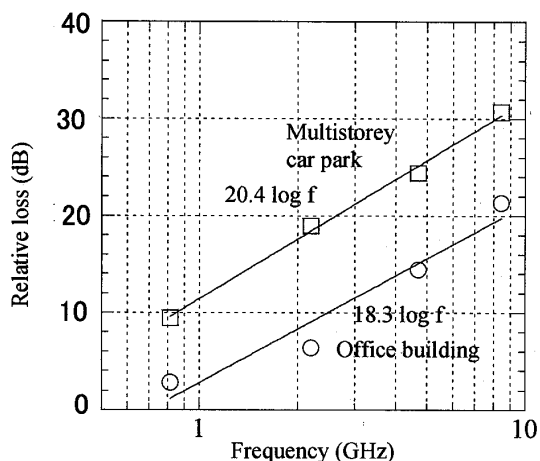


図 5 基地局と屋内移動局間の伝搬損周波数特性 [15]
 Fig. 5 Frequency characteristic of propagation loss between BS and indoor MS [15].

た。オフィスビルでは 1F から 13F にあるオフィスや会議室、ロビー、教室等で、立体駐車場では 1F から 9F の駐車スペースで測定を行った。測定された立体駐車場はすべて窓にガラスをもっておらず、この条件はオフィスビルと異なる。また、建物侵入損の基準となる屋外の受信レベルはビルの周囲を 1 周する車道上の受信レベルの平均値とした。

図 5 に送受信間の伝搬損の周波数特性を示す。これは送受信間の伝搬損であり建物侵入損ではない。基地局から四つの周波数の電波を送信して屋内で移動局の台車を移動させながら同時に受信レベルを測定した結果である。オフィスビルや立体駐車場の測定データを平均してそれぞれの周波数特性を示している。測定条件である送受信間距離やフロア高は測定場所ごとに異なるので二つのカーブの損失は相対値であり、カーブの傾きだけに意味がある。図 5 からオフィスビルと立体駐車場のどちらも周波数の傾きは自由空間損の 20 に近い値である。

図 6 に建物侵入損の周波数特性を示す。測定で得られた測定場所ごとの建物侵入損を単純に平均した値を示す。建物侵入損は屋外の受信レベルから屋内の受信レベルを引いて求めた。四つの周波数の同時測定を行っているのでカーブの傾きには意味がある。しかし、フロア高が異なるデータを平均しているため二つのカーブの損失値やそれらの差には物理的な意味がなく相対値で表している。この結果から侵入損は 800 MHz から 8 GHz までほとんど変化しないことが分かる。

2.1.3 屋外の伝搬遅延

伝搬遅延を表す指標に遅延プロファイルと遅延スペクトル、平均遅延がある。図 7(a) に到来波の受信電

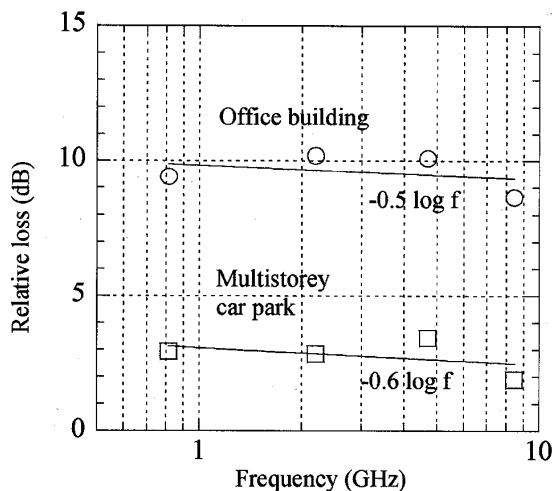


図 6 建物侵入損の周波数特性 [15]
 Fig. 6 Frequency characteristic of building penetration loss [15].

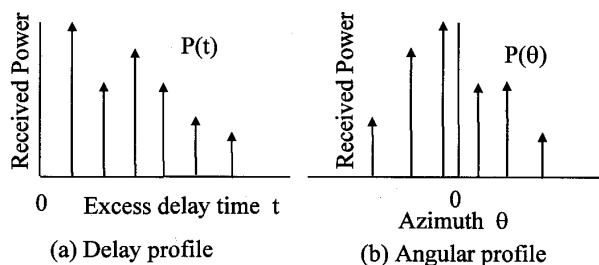


図 7 遅延プロファイルと角度プロファイル
 Fig. 7 Delay profile and Angular profile.

力とその時間的な遅れを表す遅延プロファイル $P(t)$ を示す。到来時間を t とすれば、遅延スペクトル S_D と平均遅延 τ は、

$$S_D = \sqrt{\frac{\int_0^\infty P(t) \cdot (t - \tau)^2 dt}{\int_0^\infty P(t) dt}} \tag{1}$$

$$\tau = \frac{\int_0^\infty P(t) \cdot t dt}{\int_0^\infty P(t) dt} \tag{2}$$

である。

屋外のマイクロセル環境における伝搬遅延の報告は数多いが、周波数特性についての報告は数が少ない。関澤らは都内で周波数 755 MHz と 1.5 GHz, 2.3 GHz を用いて平均遅延を測定して、平均遅延の場所ごとの分布はどの周波数でも同じになることを示している [16]。小田らはもっと高い周波数 3 GHz と 8 GHz, 15 GHz を用いて都内で伝搬遅延測定を行い、周波数によらず同じ遅延プロファイルになることを示している [7]。測定された 3, 8, 15 GHz の遅延スペクトルの累積分布もほとんど同じで、累積 95% 値で 3 GHz と 15 GHz

の遅延スペクトルの差はわずか 2 ns しかないことも示されている。更に太田や藤井らの報告 [17], [18] でも 2~8 GHz の周波数では遅延プロファイルは変わらないことが示されている。これらのことから伝搬遅延特性は 755 MHz~15 GHz までは周波数によって変わらないといえる。

なお、ストリートマイクロセル環境においても増井らが周波数 3 GHz と 8 GHz, 15 GHz を用いて都内で測定を行っている [19]。この測定から得られた遅延スペクトルの累積分布を見ると周波数によってあまり差がないことが分かる。

2.1.4 到来波の角度広がり

到来波の角度広がりを表す指標に角度プロファイルと角度スペクトル, 平均到来角度がある。図 7 (b) に到来波の受信電力とその到来角度を表す角度プロファイル $P(\theta)$ を示す。到来角度を θ とすれば, 角度スペクトル S_θ と平均到来角度 θ_m は,

$$S_\theta = \sqrt{\frac{\int_{-\pi}^{\pi} P(\theta) \cdot (\theta - \theta_m)^2 d\theta}{\int_{-\pi}^{\pi} P(\theta) d\theta}} \quad (3)$$

$$\theta_m = \frac{\int_{-\pi}^{\pi} P(\theta) \cdot \theta d\theta}{\int_{-\pi}^{\pi} P(\theta) d\theta} \quad (4)$$

である。

屋外の基地局に到来する到来波の角度広がり特性は空間ダイバーシティを設計するために検討されてきた。また, 伝搬遅延は到来波を到着時間で表しているのに対して, 到来波の角度広がりには空間的な角度で表している。このため, 街中でのマイクロセル環境における多重波伝搬メカニズムを明らかにする目的としても到来波の角度広がりが検討されている。

角度プロファイルの周波数特性は, 表らが市街地や郊外地, 住宅地で 1.5 GHz と 3.35 GHz, 5.77 GHz, 8.45 GHz の周波数を用いて測定している [20]。水平方向の半値角が 3 度の指向性アンテナを基地局で回転させることで角度プロファイルを測定し, 周波数による差がほとんどないことを示している。

筆者らも到来波の角度広がりの周波数特性を 458 MHz と 2.2 GHz, 8.45 GHz の周波数を用いて市街地で測定した [21]。基地局で周波数ごとに水平方向に一定間隔した 2 本のアンテナで瞬時受信レベルを測定して, アンテナ間隔に対する相関カーブを求めて周波数による違いを検討した。

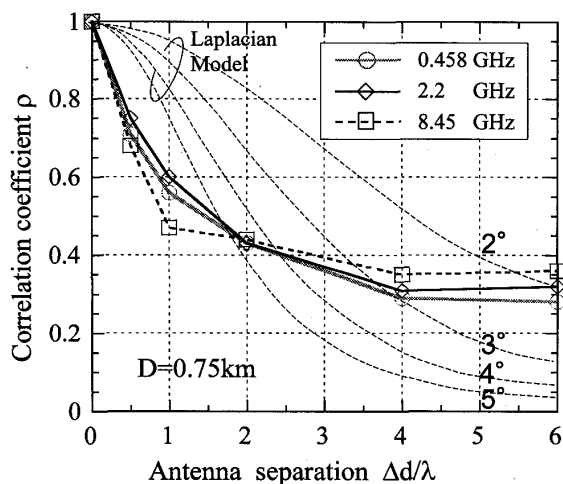
この測定方法で到来波の角度広がりを求められる原

理は次のとおりである。二つのアンテナを一定間隔離して配置したときに, 二つのアンテナの正面方向から到来する電波は二つのアンテナまでの距離が同じになるため同じ位相で受信される。しかし, 水平方向で見たときに正面からでなくある水平角度で到来する電波は二つのアンテナまでの距離が異なるので受信される位相も異なる。このときに正面を基準にした水平角度が大きくなるに従って位相差も大きくなる。位相差が大きくなると瞬時受信レベル変動の相関係数が小さくなる。この原理に基づいて到来波の角度広がりを求めることができる。

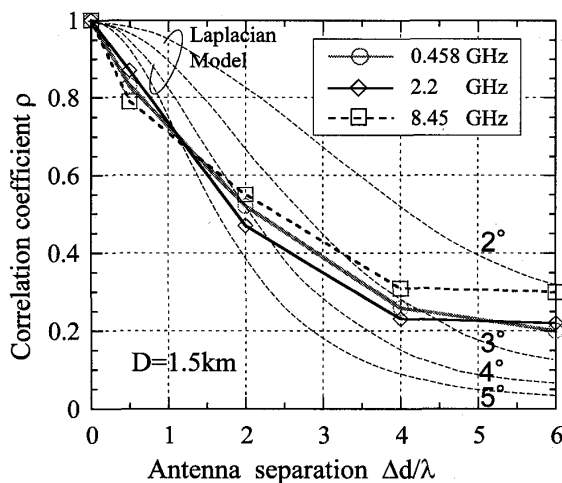
基地局は鉄塔の高さ 80 m に設置した。基地局アンテナはすべて半値角 120 度のアンテナを用いた。測定コースは二つの四角形の周回コース (A コースと B コース) であり, 基地局と測定コースとの平均距離はそれぞれ 0.75 km と 1.5 km である。

図 8 (a) と (b) に各コースの受信アンテナ間隔に対する受信レベルの相関係数を示す。アンテナ間隔 $\Delta d/\lambda$ は波長で正規化した。また, 角度プロファイルをラプラシアン関数 [22] として角度スペクトルをパラメータとした計算結果も示す。角度プロファイルのモデルとしてラプラシアン関数は変数が一つであるため扱いが簡便であるが, 実際の測定結果とのずれもある。このため変数の数を増やした角度プロファイルのモデルもあるが, ここでは大まかな角度スペクトルを見るために簡易なラプラシアン関数を用いた。図 8 の相関カーブは周波数や送受信間隔距離によって変化している。どちらの影響が大きいかを調べるために次の RMS 値を求めた。周波数とアンテナ間隔が同じで距離だけが異なる相関係数の差の RMS 値 (二乗平均平方根) と, 距離とアンテナ間隔が同じで周波数だけが異なる相関係数の差の RMS 値を求めた。その結果, 距離が異なるときの RMS 値は 0.09 で, 周波数が異なるときは 0.05 であった。距離による変化に対して周波数による変化が小さいことが分かる。

400 MHz より低い周波数特性を調べるために 902 MHz と 151 MHz の周波数を用いて, 北九州市の住宅地で同様の測定を行った [23]。基地局アンテナは 5 素子の八木アンテナである。二つの地域で測定し, 基地局高は 33 m と 15 m である。図 9 に全コースの測定結果を平均した相関カーブを示す。また, 図 8 と同様に角度プロファイルをラプラシアン関数として角度スペクトルをパラメータとした計算結果も示す。図 9 から測定結果とラプラシアン関数による結果は



(a) Measurement course A



(b) Measurement course B

図 8 アンテナ間隔に対する受信レベル相関係数 [21]
Fig. 8 Correlation coefficient for received level versus antenna separation [21].

アンテナ間隔が大きい範囲でずれが大きくなるが、角度スプレッドのオーダーとしては $3^\circ \sim 5^\circ$ である。また、900 MHz と 150 MHz の差は、ラプラシアン関数での角度スプレッドの 1° の差より小さく、平均的に見ると周波数による差は小さい。

これらのことから、150 MHz ~ 8 GHz の周波数範囲において到来波の角度広がり周波数による差は小さいことが分かる。

2.2 屋内環境

2.2.1 屋内の伝搬遅延

送受信とも同じ建物内にあるときの伝搬遅延に関する報告は数多くある。ITU-R ではこの屋内伝搬遅延に関する勧告 P.1238-2 として次の推定式を提案している [24].

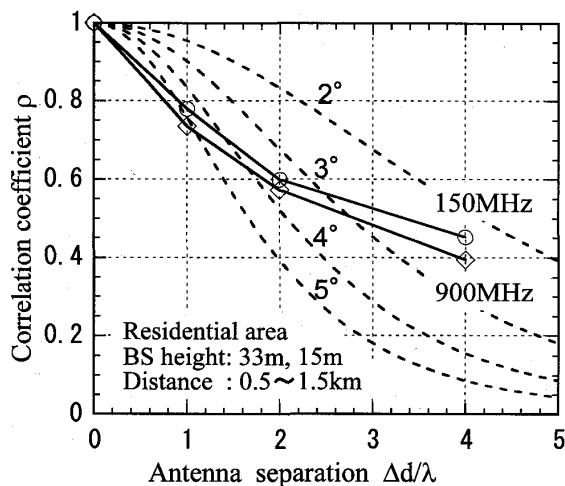


図 9 150 MHz と 900 MHz でのアンテナ間隔に対する受信レベル相関係数 [23]

Fig. 9 Correlation coefficient for received level versus antenna separation at 150 MHz and 900 MHz [23].

$$L_{total} = 20 \log_{10} f + N \log_{10} d + L_f(n) - 28 \quad (5)$$

ここで、 L_{total} は伝搬遅延 (dB)、 N は距離特性係数、 f は周波数 (MHz)、 d は送受信間距離 (m)、 $L_f(n)$ はフロア透過遅延 (dB)、 n は送受信間のフロア数 ($n \geq 1$) である。 N の値は場所 (住宅、オフィス、商業建物) や周波数ごとの値が示されているが、周波数に対する明確な傾向はない。周波数 f の適用範囲は 900 MHz ~ 100 GHz である。周波数特性は自由空間遅延と同じ $20 \log f$ が提案されている。

2.2.2 屋内の伝搬遅延

Bultitude らはカールトン大学の屋内で 910 MHz と 1.75 GHz の周波数を用いて遅延プロファイルを測定し、遅延スプレッドの累積分布の差が小さいことを示している [25]。Devasirvatham らはオフィスビルの屋内で 850 MHz と 1.7 GHz、4 GHz の周波数を用いて遅延プロファイルを測定し、統計上で周波数による差がないことを示している [26]。また、商用の大型建物でも 850 MHz と 1.9 GHz、4 GHz、5.8 GHz の周波数を用いて遅延プロファイルを測定し、同様に周波数による差がないことを示している [27]。更に、高井らは高分解能パルス圧縮法によって室内の見通し環境での遅延プロファイルを 240 MHz と 910 MHz、2.3 GHz で測定し、周波数による遅延プロファイルに差がないことを示している [28]。以上のことから 240 MHz から 5.8 GHz までは周波数による差は小さいことが分かる。

3. 周波数特性の検討

3.1 屋外マイクロセル環境

3.1.1 屋外の伝搬損

屋外のマイクロセル環境においては 150 MHz から 15 GHz までは $20 \log f$ に近い周波数特性と考えられる。これは送受信間の伝搬損を対象にしているので自由空間損分も含まれている。自由空間損の周波数特性は $20 \log f$ であるが、これはアンテナの実効利得から生じるために伝搬路での伝搬特性とは直接関係がない。このため、自由空間損分を除くと周波数特性は $0 \log f$ となり伝搬損は周波数に依存しない。

電波の通り道であるフレネルゾーンが建物に遮へいされることで回折損が生じるが、この回折損は周波数によって変わる。フレネルゾーンは波長に比例するため、例えば周波数 150 MHz と 15 GHz のフレネルゾーン面積は 100 倍も違う。このことを考えると伝搬損が周波数に依存しないという結果は不思議である。しかし、建物による反射損は周波数によってあまり変わらない。このため、電波は街中を回折しながら伝搬するのではなく建物に反射しながら伝搬すると考えれば周波数による差が小さいことを説明できる。しかし、建物に反射して伝搬すると考えれば距離の 4 乗で減衰することを説明できない。

回折現象で説明する Xia 式 [6] や Walfisch 式 [29] では基地局高が周辺建物高より高い場合は、ビル屋上越えの多重回折で $-9 \log f$ 、移動局近傍のビル回折で $10 \log f$ の損失になり自由空間損の $20 \log f$ を加えて全体で $21 \log f$ になる。これは測定結果に近いので電波は回折しながら伝搬すると考えてもよさそうだが基地局高が変わると説明がつかなくなる。Xia 式では基地局高が周辺建物高と等しいときは $30 \log f$ になり、基地局高が周辺建物高より低いときは $40 \log f$ になる。また、Walfisch 式は基地局高が周辺建物高より高い場合しか示していないが基地局高が周辺建物高より低いときは基地局近傍回折の $10 \log f$ により $31 \log f$ になってしまう。これに対して実測の図 2 では基地局アンテナ高にかかわらずすべて $20 \log f$ に近いという結果である。このため回折現象を主体とする説明でも実測結果と合わない点がある。

周波数特性や距離特性も含めて伝搬メカニズムをうまく説明できるモデルはまだ示されていない。150 MHz 以下または 15 GHz 以上での伝搬特性を明らかにすることで伝搬メカニズムの解明が進むものと思われる。

3.1.2 建物侵入損

建物侵入損の周波数特性については、文献 [14] に過去の測定結果が集約されているがばらつきが大きくまだ統一的な見解に至っていない。文献 [15] で示したように建物侵入損が 800 MHz から 8 GHz まで周波数に依存しないとすれば、その理由は次のように考えられる。

電波が室内に侵入するときは窓を通ってくる。周波数が高いほどフレネルゾーンが小さくなるので窓を通りやすくなる。ここで、遠方から送信された電波が室内の 10 m 奥で受信される場合を考えると、窓での第一フレネル半径は周波数 800 MHz で約 2 m である。窓枠の大きさを仮に $2 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ とすればその大きさは第一フレネルゾーンの半分である。第一フレネルゾーンの半分以上が遮へいされなければ遮へい損は生じないので、このときは窓による遮へい損は生じない。また、ガラスの透過損は 1~2 dB 程度で周波数による差は小さいので、800 MHz 以上の周波数では窓を通るときの損失は周波数によらず同程度である。窓に対して斜め入射するときは回折損が生じる。これは周波数が高いほど大きくなる。

屋外の通りで散乱された複数の電波が窓から侵入することを考えれば、窓の正面から回折しないで侵入する電波が支配的となる。このときは斜め入射による回折損は生じない。これらのことから、測定を行った 800 MHz 以上の周波数では建物侵入損に差が生じないと考えられる。

3.1.3 屋外の伝搬遅延

屋外のマイクロセル環境における伝搬遅延は 755 MHz~15 GHz までは周波数によって変わらないと考えられる。この理由は 3.1.1 と同じように説明できる。受信点で受信される複数の電波が回折ではなく反射によって伝搬してきたと考えれば周波数による差は小さくなる。しかしながら詳細を説明できる伝搬メカニズムのモデルはまだ示されていない。

3.1.4 到来波の角度広がり

屋外のマイクロセル環境における到来波の角度広がりには 150 MHz~8 GHz までは周波数によって変わらないと考えられる。伝搬遅延と到来波の角度広がりには街中の多重波伝搬特性を到達時間と到達角度という視点から見ているので周波数特性も同じになるはずである。周波数に依存しない理由は 3.1.3 と同じである。伝搬遅延を測定するには広帯域が必要だが、到来波の角度広がりには狭帯域で測定できる。この利点を利用した 150 MHz 以下の周波数特性の検討が期待される。

3.2 屋内環境

3.2.1 屋内の伝搬損

屋内の伝搬損の周波数特性は ITU-R で 900 MHz～100 GHz の範囲で $20 \log f$ とされていた。屋内でも屋外と同様に伝搬路で周波数による差は生じない。これは送受信間に見通しがないうちでも回折波より反射波や透過波が支配的になると考えれば説明がつく。

3.2.2 屋内の伝搬遅延

屋内の伝搬遅延は 240 MHz から 5.8 GHz までは周波数によって変わらないと考えられる。周波数に依存しない理由は 3.2.1 と同じだと考えられる。

4. 周波数特性の活用

移動伝搬における周波数特性を見てきた。これらを見るとほとんどの場合に周波数による伝搬特性の差が小さいことが分かる。むしろ周波数に依存する伝搬特性やその環境を指摘する方が困難である。ただし、周波数範囲を限定していることには注意が必要であり、ここでは主に UHF 帯と SHF 帯の一部までしか対象にしていない。また、平面大地反射モデルが適用できる見通し道路では、距離特性の傾きが変わるブレイクポイントまでの距離は周波数によって変わるので、この場合の伝搬損は周波数に依存する。更に、ここで述べている周波数による差が小さいという意味は、物理的に周波数による変化が発生しないということではなく、システム設計上で考慮しなくてもよいと思われる程度の差しか生じないという工学的な意味合いである。

周波数によって伝搬特性が変わらないと仮定すれば、これまでに異なる周波数で得られた伝搬特性を別の周波数でも活用できる。また逆に、これから実環境やスケールモデル環境で測定するときや計算機シミュレーションを行うときに利便性の良い周波数で実施できる可能性がある。例えば、実環境の 1 GHz を 1/100 スケールモデルで再現するには 100 GHz が必要だが、実際にはもっと低い周波数でも再現できる可能性がある。また、FDTD 法などの計算機シミュレーションでも実環境の高い周波数をそのまま用いなくてもよい可能性がある。本論文では実測結果を中心に検討したが計算機シミュレーションについては文献 [30] などがある。

5. むすび

移動通信における多重波伝搬の周波数特性を検討した。対象とした伝搬特性は、屋外のマイクロセル環境や屋内環境における伝搬損と建物侵入損、伝搬遅延、

表 1 周波数の適用範囲

Table 1 Applicable range of frequency.

伝搬環境	伝搬特性	周波数範囲
屋外マイクロセル環境	伝搬損失	150MHz～15GHz
	建物侵入損	800MHz～8GHz
	伝搬遅延	755MHz～15GHz
	到来波角度	150MHz～8GHz
屋内環境	伝搬損失	900MHz～100GHz
	伝搬遅延	240MHz～5.8GHz

到来波の角度広がりである。これまでの報告をもとにして、各伝搬特性は表 1 に示す周波数範囲では周波数による差が小さいことを示した。

ただし、送受信間の伝搬損では伝搬路特性とは関係ない自由空間損の周波数特性分を除いてある。また、建物侵入損は報告例が少ないので今後の検証が必要である。

広い周波数範囲をカバーする周波数特性の研究は短期的に見れば実益が小さいかもしれないが、周波数特性が明確であれば異なる周波数でも対応できるという点で長期的に見れば有益である。また、広い周波数範囲を実測によって明らかにするには複数の実験電波が必要となる。最近では特定実験試験局制度もできて実験電波の取得が以前より容易になっており、周波数特性の研究はよりいっそう進むものと思われる。本論文では伝搬特性が周波数によって変化しないことを示したが、変化が起こる境界の周波数やその伝搬メカニズムを明らかにすることも重要であり、これらは今後の検討課題である。

謝辞 本研究は科学研究費補助金（基盤研究 (C) 21560403）の助成を受けたものである。

文 献

- [1] 総務省, 電波新産業創出戦略—電波政策懇談会報告書, http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/02kiban09_090713_1.html
- [2] M. Hata, "Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services," IEEE Trans. Veh. Technol., vol.VT-29, no.3, pp.317-325, Aug. 1980.
- [3] European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research EURO-COST 231, "Urban transmission loss models for mobile radio in the 900 and 1800 MHz bands," Revision 2, The Hague, Netherlands, 1991.
- [4] 藤井輝也, "陸上移動通信の伝搬," 電波伝搬ハンドブック, 細矢良雄 (監), p.205, リアライズ社, 東京, 1999.
- [5] 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 (B-II), vol.J74-B-II, no.1, pp.17-25, Jan.

- 1991.
- [6] H.H. Xia, "A simplified analytical model for predicting path loss in urban and suburban environments," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol.46, no.4, pp.1040-1046, Nov. 1997.
- [7] 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," *Proc. IEEE VTC2001 Spring*, vol.1, pp.337-341, Rhodes, May 2001.
- [8] K. Sakawa, H. Masui, M. Ishii, H. Shimizu, and T. Kobayashi, "Non line-of-sight microwave propagation characterization for personal communications with high-tier base station antenna," *IEICE Trans. Fundamentals*, vol.E85-A, no.7, pp.1569-1577, July 2002.
- [9] 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*, A-P2003-319, March 2004.
- [10] 米澤健也, 前山利幸, 岩井誠人, 原田博司, "800 MHz 帯/5 GHz 帯伝搬損失比較実験と 5 GHz 帯伝搬モデルの一検討," 第 485 回電波研連 F 分科会, June 2004.
- [11] 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 (B)*, vol.J86-B, no.10, pp.2264-2267, Oct. 2003.
- [12] K. Kitao and S. Ichitsubo, "Path loss prediction formula in urban area for the fourth-generation mobile communication systems," *IEICE Trans. Commun.*, vol.E91-B, no.6, pp.1999-2009, June 2008.
- [13] J.E. Berg, "4.6 Building penetration," in *Digital Mobile Radio toward Future Generation Systems (COST 231 Final Report)*, sect.4.6, pp.167-174, COST Telecom Secretariat, CEC, Brussels, Belgium, 1999.
- [14] A. Davidson and C. Hill, "Measurement of building penetration into medium buildings at 900 and 1500 MHz," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol.46, no.1, pp.161-168, Feb. 1997.
- [15] H. Okamoto, K. Kitao, and S. Ichitsubo, "Outdoor-to-indoor propagation loss prediction in 800-MHz to 8-GHz band for urban Area," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol.58, no.3, pp.1059-1067, March 2009.
- [16] 関澤信也, 守山栄松, "都市内における 1.5 GHz 帯多重路伝搬特性," *信学論 (B-II)*, vol.J72-B-II, no.9, pp.499-501, Sept. 1989.
- [17] Y. Ohta and T. Fujii, "Delay profile prediction in microwave-band for wideband radio propagation," *Proc. ISAP2005*, vol.3, pp.1105-1108, Seoul, Korea, Aug. 2005.
- [18] 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, Sept. 2008.
- [19] H. Masui, K. Takahashi, S. Takahashi, K. Kage, and T. Kobayashi, "Distance dependence of microwave delay spreads measured in urban quasi line-of-sight environments," *IEICE Trans. Commun.*, vol.E82-B, no.12, pp.1997-2003, Dec. 1999.
- [20] 表 英毅, 太田喜元, 三上 学, 藤井輝也, "広帯域移動体通信におけるパス到来角度プロファイルモデル," *信学技報*, A-P2005-184, March 2006.
- [21] K. Kitao and S. Ichitsubo, "Frequency dependence of spatial dispersion of radio waves arriving at base station in 0.4 to 8 GHz band," *Electron. Lett.*, vol.43, no.13, pp.725-727, June 2007.
- [22] K.I. Pedersen, P.E. Mogensen, and B.H. Fleury, "A stochastic model of the temporal and azimuthal dispersion seen at the base station in outdoor propagation environments," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol.49, no.2, pp.437-447, March 2000.
- [23] 浜崎貴史, 市坪信一, "基地局到来波広がり周波数特性," 2009 信学ソ大 (通信), no.B-1-16, Sept. 2009.
- [24] ITU-R Recommendation P.1238-2, "Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radio communication systems and radio local area networks in the frequency range 900 MHz to 100 GHz," 2001.
- [25] R.J.C. Bultitude, S.A. Mahmoud, and W.A. Sullivan, "A comparison of indoor radio propagation characteristics at 910 MHz and 1.75 GHz," *IEEE Trans. J. Sel. Areas Commun.*, vol.7, no.1, pp.20-30, Jan. 1989.
- [26] D.M.J. Devasirvatham, M.J. Krain, D.A. Rappaport, and C. Banerjee, "Radio propagation measurements at 850 MHz, 1.7 GHz and 4 GHz inside two dissimilar office buildings," *Electron. Lett.*, vol.26, no.7, pp.445-447, March 1990.
- [27] D.M.J. Devasirvatham, C. Banerjee, R.R. Murray, and D.A. Rappaport, "Four-frequency radiowave propagation measurements of the indoor environment in a large metropolitan commercial building," *Proc. GLOBECOM '91 on Personal Communications Services*, vol.2, pp.1282-1286, Phoenix, America, Dec. 1991.
- [28] 高井 均, 真鍋武嗣, "高分解能化パルス圧縮法による遅延プロフィールを用いた室内伝搬構造の解析," *信学技報*, A-P90-109, RCS90-39, Jan. 1991.
- [29] J. Walfisch and H.L. Bertoni, "A theoretical model of UHF propagation in urban environment," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol.36, no.12, pp.1788-1796, Dec. 1988.
- [30] 今井哲朗, "レイトレーシング法による移動伝搬シミュレーション," *信学論 (B)*, vol.J92-B, no.9, pp.1333-1347, Sept. 2009.

(平成 22 年 1 月 7 日受付, 4 月 28 日再受付)



市坪 信一 (正員)

昭 60 電通大・通信卒。昭 63 九大大学院修士課程了。同年 NTT 無線システム研究所入所。以来、移動通信の電波伝搬、パーソナル通信の無線回線設計に従事。平 11 NTT ドコモに転籍。平 19 九工大・電気電子・准教授。工博。平 5 IEEE AP-S Japan

Chapter Young Engineer Award 受賞。IEEE 会員。

〈システム考学〉

私の四位一体論

森下 久 (防衛大学校)

携帯電話のような移動通信システムにおいては、アンテナ (A)、伝搬 (P)、システム (S) 及び人体の影響 (H) の 4 項目を連携的に考慮してシステム設計するというのが四位一体論である。さて、私が勤務する大学は横須賀市にあり、そこには携帯電話に代表される移動通信のメッカ的存在である YRP (横須賀リサーチパークの略称) が NTT ドコモを中心にして活動している。実は、歴史を振り返ってみると横須賀は無線通信発祥の地として考えてもおかしくはない。日露戦争時の日本海海戦 (1905 年 5 月 27 日) において連合艦隊の旗艦であった「三笠」が記念艦として保存され、そこには三六式無線電信機のレプリカが展示されている。最近、テレビでドラマ化されて若者にも人気が出ている、司馬遼太郎著の「坂の上の雲」の中の一節には、

「…世界でもっとも性能のいい船舶用無線機とされる三六式無線電信機が積まれており、…」とあり、その電信機に対して東郷平八郎司令長官も日本海海戦大勝利の一要因として述懐している。三六式は、明治 36 年を表しており、西暦では 1903 年である。なんとマルコーニが大西洋横断無線通信実験を行ったのは 1901 年であり、その年には三四式無線電信機が開発され、主要 6 艦に搭載されている。当時、文献などの情報もない時代に、マルコーニ社から高額で 1 台しか買えなかった無線電信機を分解して、より性能の良い電信機を製作した日本産官学の連携・集約した技術力だけではなく、開発に携わった人たちの意欲的な (Ambitious) 精神力 (Spirit) と熱い (Hot) 情熱 (Passion) に驚嘆する次第である。システム設計には、四位一体論を考慮することはもちろんであるが、いつの時代でも、それに携わる人たちの「気概」が常に大事なのかもしれない。