

■4群(通信工学) -2編(アンテナ・伝搬)

11章 電波伝搬

(執筆者：今井哲朗) [2010年5月 受領]

■概要■

地球上の伝搬媒質は大地，対流圏，電離圏に大別でき，それらは電波の周波数に依存して伝搬に異なる影響を与える．VLF から HF の周波数帯の電波は電離層の影響を著しく受ける．VHF 以上の周波数帯の電波は電離圏の影響を殆ど無視することができるが，対流圏の影響を大きく受ける．大地はすべての周波数帯の電波に影響を与えるが，特に LF 以下と VHF 以上の周波数においてその影響を把握することは重要となる．

また，無線通信における電波伝搬において重要となる伝搬特性は，対象とするシステムによって異なり，

- ・ 固定衛星通信システム：対流圏による影響として，大気中の減衰，交差偏波識別度の劣化，対流圏シンチレーションの特性
- ・ 移動体衛星通信システム：固定衛星通信システムで考慮すべき特性に加えて，通信ユーザの移動にともなう信号強度の変動特性（フェージング特性）
- ・ 陸上移動通信システム：見通し外環境を通信ユーザが移動することにもなう複雑な信号強度の変動特性（フェージング，シャドウイング，距離減衰が重畳された変動特性）及び通信品質改善や伝送速度向上において重要となる伝搬遅延や到来角度などの特性
- ・ 都市内アクセス無線システム：端末局の位置が固定であり，基地局との間で見通し伝搬路を確保することが基本となることから，サービスエリア内における伝搬路の見通し率及び干渉要因となる反射波の到来確率の特性

などがあげられる．通信システムの回線設計などではこのような特性の把握のみならず，その特性が十分に考慮された伝搬モデルが必要とされる．

【本章の構成】

本章では，先ず地球上における電波伝搬の概要（11-1 節）について述べ，次に固定衛星通信の伝搬（11-2 節），移動体衛星通信の伝搬（11-3 節），陸上移動通信の伝搬（11-4 節），都市内アクセス無線の伝搬（11-5 節）に関して各通信システムの回線設計において特に重要とされる特性について述べる．

■4群 - 2編 - 11章

11-1 電波伝搬の概要

(執筆者：今井哲朗) [2010年5月 受領]

地球上の伝搬媒質は大地，対流圏，電離圏に大別でき，それらは電波の周波数に依存して伝搬に異なる影響を与える．図 11・1 はこの影響から生じる伝搬様式の代表例を示したものである．これらの伝搬様式は伝搬媒質である大地，対流圏，電離圏に応じて，それぞれ地上波伝搬，対流圏伝搬，電離圏伝搬に分類される．VLF から HF の周波数帯の電波は電離層の影響を著しく受ける．VHF 以上の周波数帯の電波は電離層の影響を殆ど無視することができるが，対流圏の影響を大きく受ける．地上波伝搬はすべての周波数帯の電波がもつ伝搬様式であるが，特に LF 以下と VHF 以上の周波数で重要である．

以下では地上波伝搬，対流圏伝搬，電離圏伝搬について概説する．なお，これらの詳細については文献 1)~3) を参照されたい．

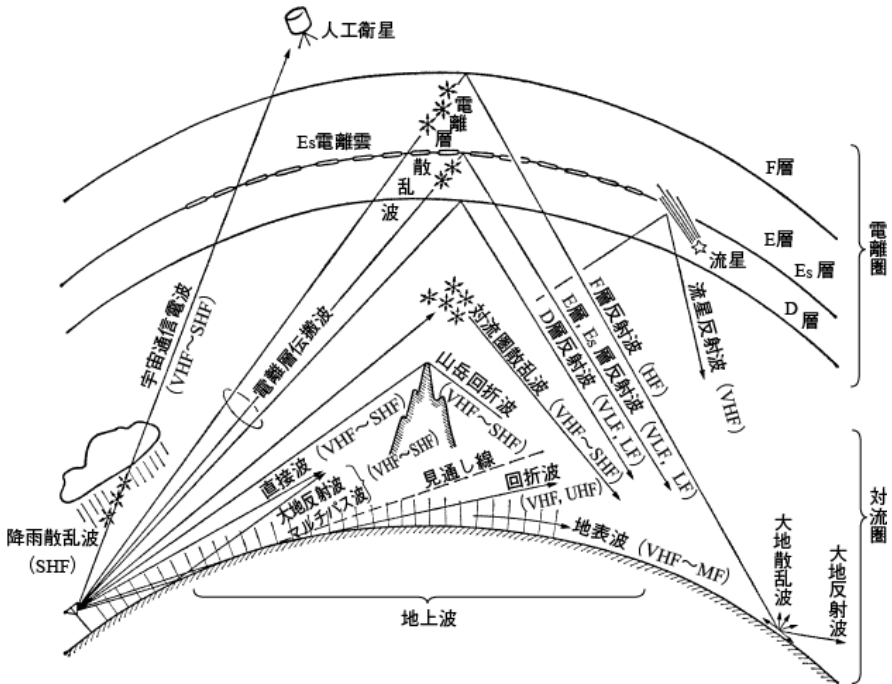


図 11・1 各種電波伝搬様式¹⁾

11-1-1 地上波伝搬

地上波は，主に大地及び大地上の地形・地物の影響を受けながら伝搬する電波のことであり，“地表波”，“直接波”，“大地反射波”，“大地による回折波”“山岳回折波”からなる．ここで，地表波は大地上のアンテナから電波を放射した際に大地に誘起された電流によってそ

の近傍に生ずる電磁界である。受信アンテナ高が地表上すれすれにある場合には“地表波”のみが受信される。受信アンテナ高がある程度高くなると、見通し内の場合には“地表波”に加えて“直接波”と“大地反射波”が、見通し外の場合には“地表波”に加えて“大地による回折波”が受信される。また、送受信点間が山岳により見通し外となっている場合には、“地表波”と“山岳回折波”及び“大地反射波”が受信される。

実際の大地は平滑な球面ではなく、不規則な凹凸の地形から成っている。また、その大地上には建造物や樹木などの地物も存在している。一般に、この地形・地物による凹凸が波長に比べて十分に小さい場合には大地を平滑大地として近似することができる。一方、大地上の地形・地物による凹凸が波長に比べて大きい場合には受信波に大きな影響を与えることから平滑大地では近似できない。地形・地物による凹凸の規模は数十 m と考えられることから、これらは波長が 10 m 以下となる VHF 以上の周波数帯において実際上の問題となる。

11-1-2 対流圏伝搬

対流圏は地表から高度十数 km の間に位置する地球大気の一層の一つであり、標準状態で気温が高度の上昇とともにおよそ -6.5 K/km で低下する領域である。この高度とともに低下する気温構造による鉛直方向の対流により、対流圏では雲や霧の発生や降雨などの活発な気象現象が見られる。

対流圏における電波伝搬では、大気分子による吸収・減衰、気温や気圧の不均一性やゆらぎに起因する屈折やシンチレーション、気象粒子（雨、雪、霧、雲など）による吸収・散乱が問題となる。これらの中で、大気分子による吸収・減衰や気象粒子による減衰は UHF 帯以下では通常無視してよいが、10 GHz 以上の周波数帯では気象条件によりこれらの影響が伝搬特性に顕在化してくる。

11-1-3 電離圏伝搬

電離圏は、高度が約 50 km から数千 km の間に位置し、地球大気を構成する分子や原子が太陽から放射される紫外線や X 線などによって電離している領域である。また、電離圏は更に、伝搬特性の異なる D 領域（高度約 50 から 90 km の領域）、E 領域（高度約 90 から 160 km の領域）、F 領域（高度約 160 km 以上の領域）に分類される。D 領域は VLF と LF 帯に対しては反射層として、MF から HF 帯にかけては吸収層として働く。E 領域は主に MF 帯の電波伝搬に影響を与え、F 領域は HF 帯の伝搬に支配的な役割を果たす。

■参考文献

- 1) 電子情報通信学会(編), “アンテナ工学ハンドブック(第2版),” 13.1~13.4章, オーム社, 2008.
- 2) 細矢良雄(監修), “電波伝搬ハンドブック,” 第1部, リアライズ社, 1999.
- 3) 後藤尚久, 中川正雄, 伊藤精彦(共編), “アンテナ・無線ハンドブック,” II編3章, オーム社, 2006.

■4群 - 2編 - 11章

11-2 固定衛星通信の伝搬

(執筆著：今井哲朗) [2010年5月受領]

電波が電離圏を透過する必要がある固定衛星通信システムでは周波数帯が VHF 帯以上である必要があり、実システムとしては 6/4 GHz 帯、14/12 GHz 帯、30/20 GHz 帯などのマイクロ波帯や準ミリ波帯が用いられている。固定衛星通信の伝搬では対流圏と電離圏の影響を受けるが、使用する周波数帯がマイクロ波帯やミリ波帯である固定衛星通信の回線設計においては電離圏による影響は概して少ないことから対流圏の影響を評価することが重要となる。

以下では対流圏が伝搬に与える影響として、大気中の減衰、交差偏波識別度の劣化、対流圏シンチレーションについて概説する。なお、これらの詳細については文献 1)~3) を参照されたい。

11-2-1 大気中の減衰

雨や霧などの水滴を含まない晴天時の大気がマイクロ波帯やミリ波帯の電波伝搬に与える影響としては、主に酸素と水蒸気による電波の吸収に起因する減衰が問題となる。図 11・2 は 1 気圧 (1013 hPa)、気温 15°C における大気ガス減衰の周波数特性を乾燥大気、水蒸気成分及びこれを含めた湿潤大気に対して示したものである。なお、縦軸は海拔高度から天頂方向を見た伝搬路における減衰量であり、また湿潤大気の水蒸気密度 (絶対湿度) は 7.5 g/m^3 である。乾燥大気における減衰は酸素による吸収が主たる要因であり、湿潤大気における減衰は酸素と共に水蒸気による吸収が主な要因である。

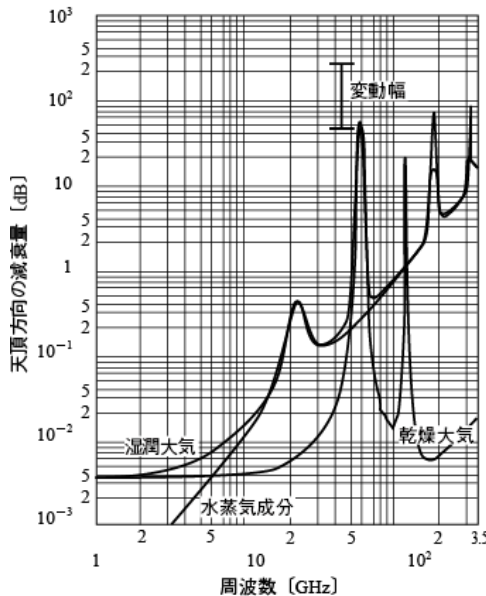


図 11・2 大気吸収による減衰量¹⁾

図においてマイクロ波帯からミリ波帯にかけて酸素及び水蒸気による吸収線が数本存在することが分かる。現在固定衛星通信に割り当てられている周波数帯は、吸収線と吸収線間の大気ガスによる減衰が相対的に少ない電波の窓領域と呼ばれる帯域である。窓領域における大気ガスによる減衰は降雨による減衰に比べると小さいものであるが、天候にかかわらず存在しかつ周波数が高くなるとともに増加することから、ミリ波帯以上の周波数では回線設計上無視できなくなる。

波長が3 cm以下となる10 GHz以上の周波数帯では、最大直径が5 mm程度となる降雨時の雨滴による吸収や散乱に起因する減衰が最も大きな問題となる。衛星通信回線において、降雨減衰の影響は一般的に年間累積時間率で評価される。例えば、茨城県鹿嶋市での測定から、11.7 GHzでは年間0.1%と0.01%の時間率に対してそれぞれ約2 dBと約7 dBを越える減衰の発生が報告されており、19.45 GHzでは年間0.1%と0.01%の時間率に対してそれぞれ約6 dBと約15 dBを越える減衰の発生が報告されている⁴⁾。なお、年間0.1%と0.01%の時間率に対する降雨強度はそれぞれ15 mm/hと40 mm/h程度である⁵⁾。年間降雨減衰分布の推定法としては、ITU-Rの方法、森田-樋口の方法、Dissanayake-Allnutt-Haideraの方法などがある。これらの詳細については文献2)を参照されたい。

11-2-2 交差偏波識別度の劣化

降雨時の雨滴は、落下時の空気抵抗や水平風速の高度勾配(鉛直シア)により非球形となる。固定衛星通信では、この非球形雨滴と上空の氷晶の影響により交差偏波識別度(XPD)の劣化が生じる。図11-3は大阪府寝屋川市で10年間にわたり測定されたXPD劣化の測定結果である。図の理論値は非球形雨滴による影響のみを考慮した理論式より求めた値であり、 σ は雨滴傾き角の標準偏差である。

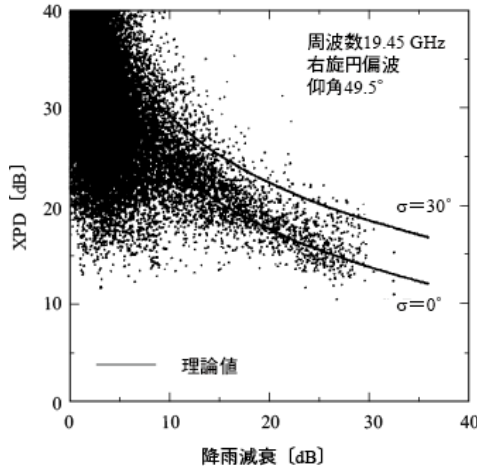


図 11-3 大阪府寝屋川市における降雨減衰と XPD 劣化の測定値¹⁾

降雨減衰が10 dB以上の強雨時には理論値と測定値がよく一致していることが分かる。一方、降雨減衰が10 dB以下の場合には理論値以上のXPD劣化が測定されている。これは雨域

高さより上空に存在する氷晶の影響による。なお、IRU-R の勧告では交差偏波識別度の推定式として非球形雨滴に加えて氷晶による影響も考慮した経験式が提言されている²⁾。

11-2-3 対流圏シンチレーション

対流圏シンチレーションは大気屈折率の時間的・空間的な変化に起因して電波の受信レベルや到来方向が変動する現象である。一般に対流圏シンチレーションは媒質中を伝搬する距離が長くなるほど(低仰角であるほど)、また周波数が高くなるほど増大する。観測例としては、1982年のインテルサットのインド洋衛星と山口地球局との間の伝搬路(仰角 6.5° 、周波数11GHz帯)にて 10dB_{pp} を越える大きなシンチレーションが生じたという報告がある^{1),4)}。仰角が 4° 以上の場合には対流圏シンチレーションによる減衰分布を推定する方法が存在する。この推定法では気温、湿度、周波数、伝搬路仰角などをパラメータとするが、詳細は文献2)を参照されたい。

対流圏シンチレーションの影響が問題となることがあるのは、高仰角を使用する国内衛星通信よりも低仰角を使用する国際衛星通信においてである。国内衛星通信の品質に与える影響としては、対流圏シンチレーションよりも降雨減衰などの他の要因の方が概して大きい。

■参考文献

- 1) 電子情報通信学会(編)，“アンテナ工学ハンドブック(第2版),”13.5章，オーム社，2008.
- 2) 細矢良雄(監修)，“電波伝搬ハンドブック,”第2部20章，リアライズ社，1999.
- 3) 後藤尚久，中川正雄，伊藤精彦(共編)，“アンテナ・無線ハンドブック,”II編3章，オーム社，2006.
- 4) 飯田尚志，“衛星通信,”オーム社，1997.
- 5) H. Fukuchi, T. Kozu, K. Nakamura, J. Awaka, H. Inomata, and Y. Otsu, “Centimeter wave propagation experiments using the beacon signals of CS and BSE satellite,” IEEE Trans. Antennas & Propagation, vol.31, no.4, pp.603-613, 1983.

■4群 - 2編 - 11章

11-3 移動体衛星通信の伝搬

(執筆者：今井哲朗) [2010年5月 受領]

移動体衛星通信は、衛星と通信ユーザを結ぶユーザリンク（またはサービスリンク）と衛星と地上ゲートウェイ局を結ぶフィードリンクにより回線が形成される。フィードリンクにおける電波伝搬は11-2節の“固定衛星通信の伝搬”と共通であることから、本節ではユーザリンクにおける電波伝搬を対象とする。また、移動体衛星通信はサービスの形態から海上移動体衛星通信、航空移動体衛星通信、陸上移動体衛星通信に分けられ、回線設計における電波伝搬上の諸問題も各サービス形態により異なる。

衛星との通信では大きな電力マージンを得ることが困難であることから、ユーザリンクの回線設計においては移動体の移動にともなう信号レベルの変動（フェージング）の特性を把握することが重要となる。以下では、海上移動体衛星通信、航空移動体衛星通信、陸上移動体衛星通信において現れるフェージング特性について概説する。なお、これらの詳細については文献1)~3)を参照されたい。

11-3-1 海上移動体衛星伝搬

船舶などの海上移動体を対象とする海上移動体衛星通信では、衛星からの直接波と海面での反射波（前方散乱波）の合成によりフェージングが生じる。また、反射波は、直接波に対して相関をもつコヒーレント成分（鏡面反射成分）と時間的に不規則に変動するインコヒーレント成分に分けて考えられることから、フェージング特性は受信信号を直接波成分、コヒーレント成分及びインコヒーレント成分の合成とみなすことでモデル化できる。ここで、反射波を構成するコヒーレント成分とインコヒーレント成分の割合は海面上の波高に依存し、波が小さく穏やかな場合にはコヒーレント成分が、波高が大きくなるにつれてインコヒーレント成分が支配的となる。なお、コヒーレント成分の電力とインコヒーレント成分の電力との間には近似的にはあるがエネルギー保存則が成り立つ、すなわち各々の電力の和は波高によらずほぼ一定と考えてよい。

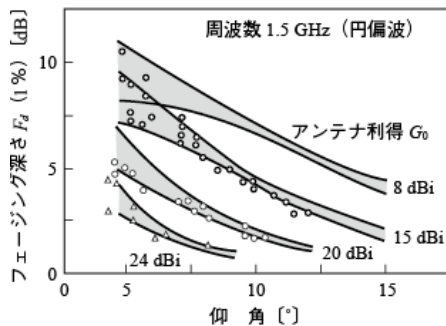


図 11-4 フェージング深さの仰角特性¹⁾

図 11-4 は 1.5 GHz (L 波帯) においてインコヒーレント成分が支配的となる状態 (波高 1

～3 m 程度)におけるフェージングの深さ(累積確率1%値)を仰角に対して評価した結果である。図において、○と△は実測値であり、曲線は理論値である。なお、理論値の幅は海面の傾度偏差(波の傾きの標準偏差)を0.04～0.07としたことによるものであり、理論値の導出も含めて詳細は文献2)を参照のこと。図より、仰角が小さくかつアンテナ利得が小さいほど大きなフェージングが生じることが分かる。これは主に船舶側アンテナの指向性によるものであり、アンテナ利得が小さいアンテナは主ビーム幅が広く反射波方向の利得が大きくなるためである。

11-3-2 航空移動体衛星伝搬

移動局として航空機を対象とする航空移動体衛星通信においては海面反射に加えて大地反射に起因するフェージングの把握が重要となる。

海面反射フェージングについては理論面も含めて扱いは基本的に海上移動体衛星通信の場合と同じである。ただし、移動体の高度が高いために、

- ① 海面の全体の広がりが見えてくることにより、フェージングの深さがやや小さくなること
 - ② 直接波と反射波の伝搬通路長差が大きくなることにより、比較的狭い帯域の信号に対して周波数選択性フェージングとなりやすいこと
- また、移動体のスピードが速いために、
- ③ フェージングの時間的変動速度が速くなること

が特徴となる。図11・5は1.5 GHz(L波帯)においてインコヒーレント成分が支配的となる状態(波高1～3 m程度)におけるフェージングの深さ(累積確率1%値)を受信点の海面高度に対して評価した結果である⁴⁾。図において、○は実測値であり、曲線は理論値である。なお、理論値の幅は海面の傾度偏差(波の傾きの標準偏差)を0.04～0.07としたことによるものであり、理論値の導出も含めて詳細は文献4)を参照のこと。図において高度が高くなるほどフェージングの深さが減少するのは海面全体の広がりが見えてくることの影響による。

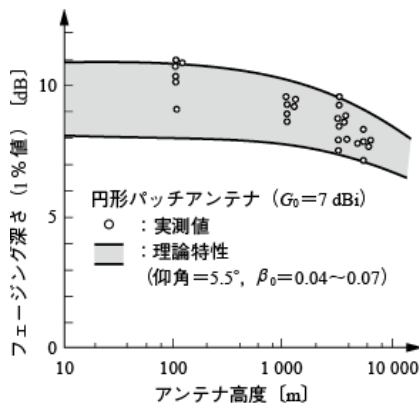


図11・5 フェージング深さのアンテナ高度特性¹⁾

大地反射フェージング特性は反射点の地形や植生に大きく依存することから理論的なモデルによる定量的評価が困難である。そこで、大地反射フェージングについては主にフィールド実験より特徴として

- ① 正規反射点付近の地形がビル街や山岳地帯の場合、あまり大きなフェージングが発生しないこと
- ② 正規反射点が平野部開放地の場合、比較的大きなフェージングが発生する。その大きさは海面反射フェージングの場合とほぼ同等であること

が明らかとなっている。したがって、海上及び陸上を含めた航空移動体衛星通信のフェージングは、海面反射フェージングを評価しておけば実用上十分であると言える。

11-3-3 陸上移動体衛星伝搬

自動車や携帯端末を対象とする陸上移動体衛星通信では、樹木や建物などによる伝搬の遮蔽・回折、及び地面や周囲構造物からの散乱波との干渉によりフェージングが生じる。そこで、陸上移動体衛星伝搬においては、伝搬環境を

- ① 衛星が見通し内にあり、直接波と散乱波の干渉としてフェージングが現れ、受信強度の確率分布が仲上・ライス分布で扱える状態【状態 A】
- ② 樹木などの遮蔽によりレベルがある程度減衰した直接波と散乱波の干渉としてフェージングが現れ、受信強度の確率分布がルー分布（仲上・ライス分布の直接波強度を対数正規分布とする分布）で扱える状態【状態 B】
- ③ 衛星が見通し外で直接波が完全に遮蔽され、散乱波のみによりフェージングが現れ、受信強度の確率分布がレイリー分布で扱える状態【状態 C】

の3状態に分類した“3状態モデル”が伝搬チャンネルモデルとして提案されている。3状態モデルにおいて、受信強度の確率密度関数は三つの状態の確率密度関数をそれぞれの状態発生確率で重み付けした和として表される。3状態モデルで用いるパラメータの種類や推奨値について、詳細は文献2), 3)を参照のこと。

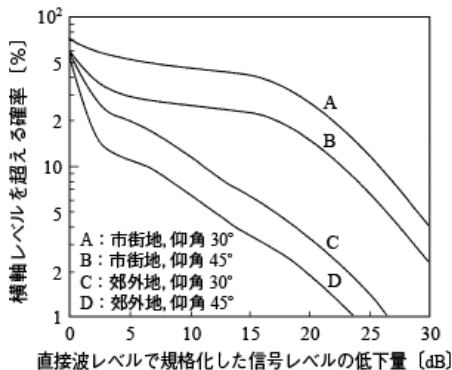


図 11-6 仰角 30° 及び 45° における市街地及び郊外地での累積分布の計算値（周波数 1.5~2.5 GHz）¹⁾

図 11・6 は 3 状態モデルを用いて計算した受信強度の累積分布である。ここではパラメータ値として文献 3) に示されている推奨値が使用されている。図より、市街地では 20 dB 以上の減衰が頻繁に発生することから、通信品質やサービス稼働率の確保が非常に困難であると言える。なお、この対策として期待されている技術の一つに衛星ダイバーシチ (Satellite Diversity) があげられる^{2),3)}。

■参考文献

- 1) 電子情報通信学会(編), “アンテナ工学ハンドブック(第2版),” 13.6章, オーム社, 2008.
- 2) 細矢良雄(監修), “電波伝搬ハンドブック,” 第2部 22章, リアライズ社, 1999.
- 3) 後藤尚久, 中川正雄, 伊藤精彦(共編), “アンテナ・無線ハンドブック,” II編 2章, オーム社, 2006.
- 4) 安永正幸, 唐沢好男, 松戸 孝, 塩川孝泰, “航空衛星通信における海面反射フェージング特性,” 信学論 B-II, vol.J72-B2, no.7, pp.297-303, 1989.

■4群 - 2編 - 11章

11-4 陸上移動通信の伝搬

(執筆者：今井哲朗) [2010年5月 受領]

複数の基地局でサービスエリアを確保するセルラー方式により発展してきた陸上移動通信では、セルの構成法により基地局アンテナの設置形態（主に基地局アンテナの設置高）が異なり、それにともない電波伝搬の特性にも多少の違いが生じる。本節では陸上移動通信において基本となるマイクロ（半径：数百 m～1 km 程度）及びマクロセル（半径：数 km 以上）構成を対象とし、基地局アンテナを周囲建物より高い位置（30～60 m 程度）に設置した場合の伝搬について概説する。

マイクロ・マクロセル構成における陸上移動通信では送信局と受信局の間で見通しが確保される場所が少ないことから、受信局には周囲の構造物において回折・反射・散乱をともなった多数の電波が到来し、これらの電波群が通信の担い手となる。このような環境での伝搬は多重波伝搬もしくはマルチパス伝搬と呼ばれ、受信信号は複雑なレベル変動をともなう。

以下ではこの受信レベルの変動特性とともに、通信品質の改善や伝送速度の向上において重要となる伝搬遅延特性、到来角度特性、交差偏波特性について概説する。なお、詳細については文献 1)～3) を参照されたい。

11-4-1 受信レベルの変動特性

受信レベルの変動特性は図 11-7 に示すように観測領域ごとに瞬時変動、短区間変動、長区間変動と分けて扱われる。瞬時変動はフェージングとも呼ばれ、到来する多重波の干渉に起因する空間的な定在波分布に相等するものであり、その変動分布はレイリー分布として扱うことができる。

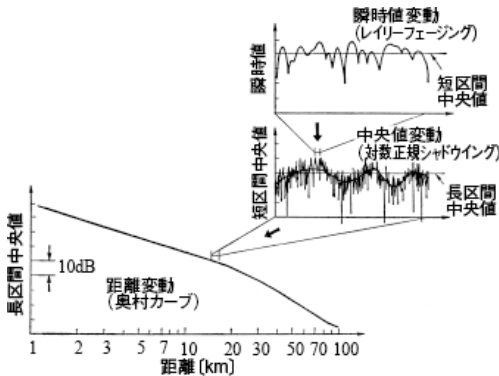


図 11-7 陸上移動通信の受信レベル変動特性¹⁾

瞬時変動の短区間（1 m～10 m 程度の区間）中央値の変動である短区間変動はシャドウイングとも呼ばれ、周囲構造物による遮へいの影響度合いに起因する空間的なエネルギー分布に相等するものであり、その変動分布は対数正規分布として扱うことができる。なお、対数正規分布の標準偏差は市街地において 6～8 dB 程度である。短区間変動の長区間（10 m～100

m程度の区間)中央値の変動である長区間変動は伝搬距離特性とも呼ばれ、送信点からの距離に対する電波の減衰特性に相等するものであり、その特性は送受信間距離 D に対して $D^{-\alpha}$ 則で近似できる。なお、 α の値は市街地において3~4程度である。

本来の受信レベルの変動は瞬時変動、短区間変動及び長区間変動が重畳された変動である。しかし、移動通信システムにおいて、瞬時変動、短区間変動、長区間変動はそれぞれ通信品質の劣化、サービス稼働率(アウテージ)、周波数利用効率を決定する主要因であることから、システム設計において受信レベル変動をこれら3種類に分けて扱うことの意義は大きい。

11-4-2 伝搬遅延特性、到来角度特性、交差偏波特性

伝搬遅延特性の把握はCDMA方式やOFDMシステムといった広帯域デジタルシステムの設計において、到来角度特性の把握は空間ダイバーシチや空間MIMO伝送を実施するためのアンテナシステムの設計において重要な特性である。また、アンテナの設置スペースの問題から最近ではダイバーシチやMIMO伝送に偏波特性をより積極的に利用することが検討されており、その設計において交差偏波特性の把握は重要である。

伝搬遅延特性は遅延プロファイルと呼ばれる遅延時間に対する到来波の電力分布に対してモデル化される。図11・8は都内青山の1.6kmエリア内にて測定した遅延プロファイルを平均化したものである⁴⁾。ただし、遅延時間と受信電力をそれぞれ送受信間距離と最大ピーク電力で規格化している。図からも分かる通り、市街地の遅延プロファイルは一般的に指数分布として扱われる。また、遅延プロファイルを確率密度関数とみなして得られる標準偏差は遅延スプレッドと呼ばれ、到来波の遅延広がりを評価する重要な指針である。遅延スプレッドは送受信間距離が長くなるに従って増加する傾向にあり、1km程度以内のエリアでは0.1~1 μ s程度で分布する^{2)~4)}。なお、図11・8の平均遅延プロファイルの遅延スプレッドは約0.6 μ sである。

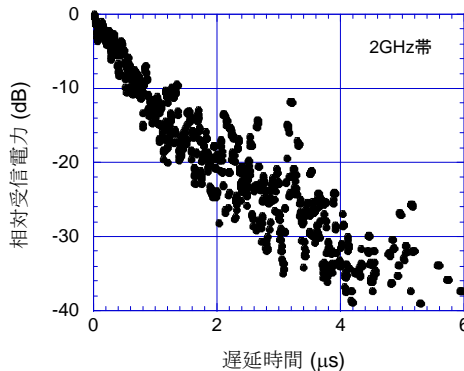
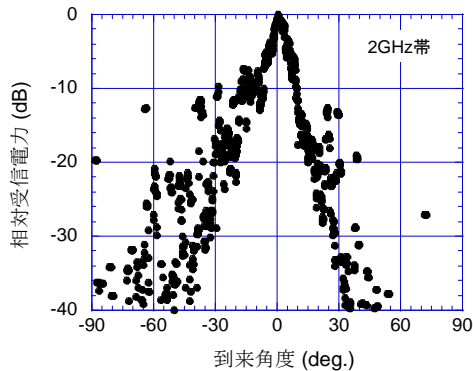


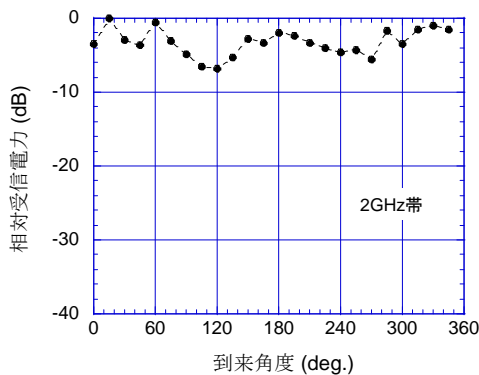
図11・8 平均遅延プロファイルの測定例

到来角度特性は角度プロファイルと呼ばれる到来角度に対する到来波の電力分布に対してモデル化される。図11・9(a)は都内青山の1.6kmエリア内にて測定した基地局受信時の角度プロファイルを平均化したものである。ただし、到来角度と受信電力をそれぞれ移動局方向と

最大ピーク電力で規格化している⁴⁾。従来、市街地における基地局側受信時の角度プロファイルはガウス分布と考えられてきたが、近年は図から分かるようにラプラス分布として扱うことが一般的となっている。また、角度プロファイルを確率密度関数とみなして得られる標準偏差は角度スプレッドと呼ばれ、到来波の角度広がり进行评估する重要な指針である。角度スプレッドは道路角(移動局の位置する道路方向と移動局が基地局を見込む方向とのなす角)が大きくなるに従って増加する傾向にあり、道路角が0~90°の範囲内で0~20°程度で分布する⁴⁾。なお、図11・9(a)の平均角度プロファイルの角度スプレッドは約10°である。一方、図11・9(b)は都内青山の1.6 km エリア内にて測定した移動局側受信時の角度プロファイルを平均化したものである。ただし、到来角度と受信電力をそれぞれ道路方向(進行方向を0°)と最大ピーク電力で規格化している⁵⁾。移動局側受信時の角度プロファイルは一般的に一樣分布として扱われる。図の結果は道路方向となる0°と180°方向のレベルが数dBほど高いものの、概ね一樣分布とみなすことができる。



(a) 基地局側



(b) 移動局側

図 11・9 平均角度プロファイルの測定例

交差偏波特性は主偏波電力と交差偏波電力の比である交差偏波識別度 XPD で評価される。

図 11・10 は都内の青山と代々木及び横浜にて測定した垂直偏波を主偏波とする XPD の累積分布である⁵⁾。一般的に市街地の XPD は平均が 6~8 dB 程度として扱われる。図の結果においても XPD の平均は 6~9 dB 程度 (標準偏差: 約 3 dB) となっている。また、この結果は XPD の分布を対数正規分布として扱えることを示しており、文献 6) の提案モデルと一致する。

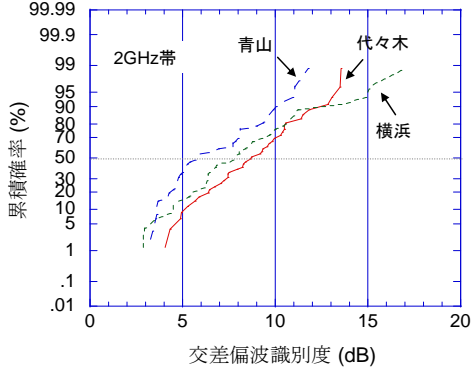


図 11・10 交差偏波識別度の測定例

現在、MIMO 伝送を適用した広帯域システムに対するシステム評価用として、本節でのべた全ての特性を一元化したチャンネルモデルが 3 GPP 及び ITU-R にて標準化されている。詳細については文献 7) を参照されたい。

■参考文献

- 1) 電子情報通信学会(編), “アンテナ工学ハンドブック(第2版),” 13.7章, オーム社, 2008.
- 2) 細矢良雄(監修), “電波伝搬ハンドブック,” 第2部 15章, リアライズ社, 1999.
- 3) 後藤尚久, 中川正雄, 伊藤精彦(共編), “アンテナ・無線ハンドブック,” II編 1章, オーム社, 2006.
- 4) T. Imai, T. Taga, “Statistical Scattering Model in Urban Propagation Environment,” IEEE Trans. VT, vol.55, no.4, pp.1081-1093, 2006.
- 5) 今井哲朗, 北尾光司郎, “市街地における移動局側到来波分布特性,” 信学技報, AP2007-135, pp.75-80, 2008.
- 6) Luis M. Correia (editor), “Wireless Flexible Personalised Communications, COST 259: European Co-operation in Mobile Radio Research,” Chapter 3, Johan Wiley & Sons Ltd., 2001.
- 7) C. Chong, F. Watanabe, K. Kitao, T. Imai, H. Inamura, “Evolution Trends of Wireless MIMO Channel Modeling towards IMT-Advanced,” IEICE Trans. Commun., vol.E92-B, no.9, pp.2773-2788, 2009.

■4群 - 2編 - 11章

11-5 都市内アクセス無線の伝搬

(執筆者：今井哲朗) [2010年5月 受領]

都市内アクセス無線は陸上移動通信と同様に複数の基地局を配置することによりサービスエリアを確保するシステムである。ただし、端末局の位置が固定であることから端末局に指向性アンテナの利用が可能である点、及び基地局と端末との間で見通し伝搬路を確保することが基本となる点が陸上移動通信と異なる。なお、適用周波数帯はUHF～EHFにわたる。

都市内アクセス無線の回線設計においては、サービスエリア内における伝搬路の見通し率及び干渉要因となる反射波の到来確率の特性を把握することが重要となる。以下では、市街地における伝搬路見通し率特性と反射波到来確率特性を都市構造の統計的性質との関係から概説する。なお、回線設計における電波伝搬上の問題としては地形・地物や樹木などの遮へいによる伝搬損失、準ミリ波以上の周波数帯の場合には降雨減衰などがあげられるが、これらも含めて詳細については文献1)～3)を参照されたい。

11-5-1 都市構造の統計的性質

伝搬路見通し率や反射波到来確率の特性はサービスエリア内に存在する建物の高さ、密度、幅の分布と密接な関係にある。そこで、これらの分布は建物分布モデルとして統計データよりモデル化が行われた²⁾。

中高層建物データとしては各自自治体の消防関係部署から発行されている統計資料が適用できる。この統計的資料より、市街地において建物の高さに対する個数の分布は指数分布で良く近似できることが明らかにされており、高さ h [m] 以上の建物密度 N [個/km²] は

$$N = N_0 \cdot \exp\left(-\frac{h-h_0}{h_m-h_0}\right)$$

で与えられる。ただし、 h_0 は統計資料にある最低建物高（一般に 16 m 程度の場合が多い）、 N_0 [個/km²] と h_m [m] は、それぞれ、高さ h_0 [m] 以上の建物密度及び平均高である。各地域の建物分布は建物密度 N_0 と平均建物高 h_m により特徴づけられる。日本の代表的な都市や地域に対する建物密度と平均建物高を表 11・1 に示す。ただし、表の値は $h_0 = 16$ m を前提としたものであり、文献2) の図 23・2 のグラフからの読み取り値である。

建物の幅と高さの間にも相関があることが明らかにされており、市街地において建物幅の平均値 w_m [m] は高さ h [m] より

$$w_m = w_0 \{1 - \alpha \cdot \exp(-\beta \cdot h)\}$$

で与えられる。ここで、 $w_0 = 55$ m、 $\alpha = 1.1$ 、 $\beta = 0.025 \text{ m}^{-1}$ である。なお、これら定数の値は地域の依存性が少なく、各都市や地域に適用できる。

以上が中高層建物群により構成される市街地における建物分布モデルである。低層建物群においても同様のモデル化が行われており、詳細は文献2)を参照されたい。

表 11・1 都市の建物分布例

	建物密度 N_0 [個/km ²]	建物平均高 h_m [m]
浅草	865.4	22.2
銀座	713.7	24.1
新宿	285.6	25.5
渋谷	188.1	25.0
丸の内	55.5	33.4
東京、大阪中心部	267.9	23.5
東京、大阪周辺部	59.2	20.5
横浜中心部	40.9	20.1
名古屋中心部	71.7	21.3
名古屋周辺部	20.5	18.7

11-5-2 伝搬路見通し率特性

11-5-1 節にて述べた建物分布モデルをベースに理論的な解析が行われ、市街地における見通し率は送受信間距離に対して指数関数的に減少することが明らかとなっている。図 11・11 は基地局アンテナ高 h_b と端末局アンテナ高 h_s をそれぞれ 100 m, 24 m としたときの平均見通し距離 R_v (見通し率が $1/e = 0.368$ となる距離) を理論式より求めたものであり、その値を建物密度 N_0 と建物平均高 h_m との関係から示している。表 11・1 との対応より同条件における各都市や地域の平均見通し距離を見積もることが可能である。なお、理論式の妥当性は実地調査や建物データベースによるシミュレーションとの比較より示されており、これらを含めた本節の詳細は文献 2) を参照のこと。

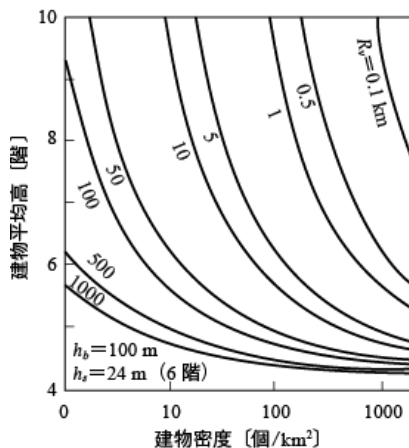


図 11・11 平均見通し距離の建物分布依存性¹⁾

11-5-3 反射波到来確率特性

建物による正規反射波の到来確率は

- ① 基地局-反射建物-端末局の経路が見通しとなる確率
- ② 建物壁面の向きが正規反射方向である確率
- ③ 反射建物の高さが反射点より高い確率

の同時確率として定義でき、更に①～③の確率は 11-5-1 節の建物分布モデルをベースに解析した理論式より値を見積もることが可能である。図 11・12 は、基地局アンテナ高 h_b 、端末局アンテナ高 h_s 及び基地局-端末局間距離 d をそれぞれ 100 m, 24 m, 5 km としたときの反射波到来確率 Q を理論式より求めたものであり、その値を建物密度 N_0 と建物平均高 h_m との関係から示している。図 11・12 においても表 11・1 との対応より同条件における各都市や地域の反射波到来確率を見積もることが可能である。なお、反射波による干渉量の評価には反射波のレベルも必要であるが、これも含めて本節の詳細は文献 2) を参照のこと。

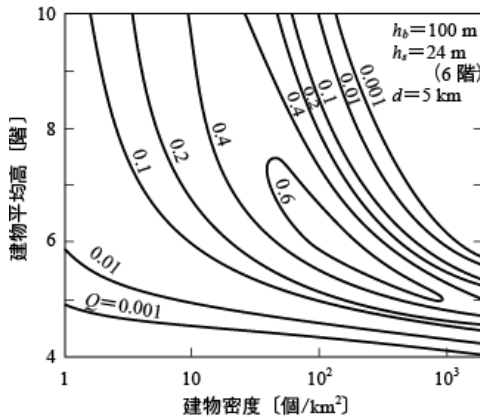


図 11・12 反射波到来確率の建物分布依存性¹⁾

■参考文献

- 1) 電子情報通信学会(編), “アンテナ工学ハンドブック(第2版),” 13.8章, オーム社, 2008.
- 2) 細矢良雄(監修), “電波伝搬ハンドブック,” 第2部 23章, リアライズ社, 1999.
- 3) 後藤尚久, 中川正雄, 伊藤精彦(共編), “アンテナ・無線ハンドブック,” II編 3章, オーム社, 2006.