

移動体・パーソナル衛星通信の 電波伝搬環境と高稼働率化技術

ATR環境適応通信研究所

第三研究室 室長

唐沢 好男



〔目 次〕

1. まえがき
2. グローバルパーソナル通信と移動ISDN
 2. 1 インフラストラクチャ
 2. 2 移動ISDN時代の回線品質と稼働率
3. 衛星回線における伝搬劣化要因
4. 陸上移動体衛星通信の電波伝搬環境
 4. 1 伝搬劣化要因と伝搬状態の分類
 4. 2 衛星見通し率
 4. 3 樹木による減衰
 4. 4 受信レベルの累積分布
 4. 5 その他の伝搬特性
5. 伝搬チャネルモデル
 5. 1 基本的統計分布の物理的イメージ
 5. 2 従来のLMSS伝搬チャネルモデル
 5. 3 3状態モデル
 5. 4 LMSS-VとLMSS-P
 5. 5 広帯域デジタル伝送特性
6. 衛星ダイバーシチ
 6. 1 衛星ダイバーシチの原理
 6. 2 衛星配置
 6. 3 周回衛星システムにおける衛星ダイバーシチの効果
7. 一つの理想、一つの夢
8. むすび

著者略歴

- | | |
|---------|---|
| 1950年8月 | 長野県（下伊那郡）に生まれる |
| 1973年3月 | 山梨大学工学部電気工学科卒業 |
| 1977年3月 | 京都大学大学院工学研究科修士課程修了（電子工学専攻） |
| 1977年4月 | KDD入社、研究所配属
入社以来、衛星通信・移動通信の電波伝搬の研究、特に各種マルチパスフェージング、降雨減衰、シンチレーション等の理論及び実験的研究に従事。1992年に結成されたINMARSAT Project 21のTiger TeamメンバーとしてLMSS伝搬チャネルモデルの構築に寄与。工学博士（1992年1月） |
| 1993年7月 | 国際電気通信基礎技術研究所（ATR-I）に出向。ATR光電波通信研究所無線通信第一研究室長。光衛星間通信技術、高機能アンテナの研究統括。 |
| 1996年4月 | ATR環境適応通信研究所第三研究室長。現在に至る。
この間、電子情報通信学会アンテナ伝播研究専門委員会幹事、日本学術会議電波科学研究連絡委員会F分科会幹事等。 |

1. まえがき

「ユニバーサルサービス」という理念がある。これは米国の通信会社であるAT&Tが、電話サービスの展開を都会から地方に至るまで普く公平にと言う思想で1908年に打ち出したスローガンが起源であると言われている⁽¹⁾。現在、米国ではクリントン／ゴアのNII（全米情報基盤）構想の下、光ファイバ網や無線通信網による情報スーパーハイウェイをマルチメディア通信（サービス）時代の新しいユニバーサルサービスと位置づけている⁽²⁾。我が国においても、通信と放送、コンピューターと娯楽産業までが融合したマルチメディア時代の有力な概念として議論が湧きつつある。

ユニバーサルサービスは、地上固定網から移動通信網にまで展開して初めて「至るところ普く公平に」という理想が現実のものとなる。このためには映像信号や高速データに代表される広帯域信号（マルチメディア情報）が移動通信環境において伝送可能なインフラストラクチャの構築が不可欠となる。その一つとしてサービスの広域性に特長を有する移動体衛星通信システムがある。特に近年盛んに提案されている（低軌道）周回衛星通信システム^{(3)・(4)}が順調に発展して行った将来の姿は正にマルチメディアユニバーサルサービスを移動通信環境で実現するインフラストラクチャたり得るものと期待できる。

本稿では、将来多数の（低軌道）周回衛星によって構成されるマルチメディアパーソナル衛星通信時代を想定し、そのような通

信において求められる良好な品質・途切れない回線の実現に最も大きな考慮を払うべき要因「電波伝搬」の問題とその対策技術を取り上げる。

衛星と移動体間の伝搬通路は、樹木・建物等による電波の遮蔽・回折、地面や周囲構造物からの散乱波によるフェージングがあり、それらが市街地・郊外地あるいは山岳地域といった環境によって異なるので電波伝搬現象は非常に複雑な様相を呈する。地上系の移動通信では電力的に余裕のある回線設計を行なうことができ、上記伝搬劣化要因はある程度克服できる。しかし衛星通信では大きな電力マージンを得ることが一般には困難であるため、上記要因のいずれもが通信品質劣化を引き起こすものとなる。このため、信頼性のあるサービス提供を行なうためには陸上移動通信環境における伝搬特性の把握が極めて重要となる。一方、パーソナル通信サービスの提供を目指した（低軌道）周回衛星システムの実現が目の前に迫っており、稼働率を精度良く評価するための電波伝搬モデルの確立や高稼働率対策が早急に求められている。このようにニーズが先行する中で、その期待に応えるべく電波伝搬の研究や対策技術が進められている。

第2章で、ユニバーサルサービス実現の一翼を担うインフラストラクチャとしての移動体衛星通信（LMSS: Land Mobile Satellite Service）の役割を述べる。第3章で衛星通信の電波伝搬の概要を述べた後、様々な側面からLMSSの電波伝搬環境を第4章で明らかにする。また、システム設計に必須な伝搬モデルが構築されつつある現

状を第5章で紹介する。そこでは、伝搬モデルが改良されていく過程を追った後、筆者等が提案している新しいモデルを紹介する。第6章では、高稼働率化の切り札と期待される衛星ダイバーシティを取り上げ、緒についたばかりの研究の一端を述べる。最後に、このようなシステムの実現に理想的なインフラストラクチャを、一つの夢として語る。

2. グローバルパーソナル通信と移動ISDN

2.1 インフラストラクチャ

世はまさに携帯電話の時代である。「ケータイ」や「ポケベル」の愛称で親しまれる移動通信端末は、ビジネスマンがその機動性を発揮するための大事な武器であり、若者達はその青春を謳歌するために欠かせない道具ともなっている。このようなサービスは、アナログやデジタルのセルラーシステム、より簡易なPHS（Personal Handyphone System）に求められ、何れも地上の基地局からの電波を利用している。サービスエリアは市外地から郊外に至る様々な地域を網羅し、マルチメディア時代を想定した高速・広帯域化もその視野に入っている。このような時代の趨勢を見ると、移動体衛星通信システムという新たなインフラストラクチャの必要性がどこにあるのかという疑問が生じてくると思う。

図1（a）は西暦2,000年における地上系セルラーのサービスエリア予想図⁽⁵⁾である。図は非常に大雑把なもので、例えば、全地域が黒く塗りつぶされている（＝サー

ビスエリアとなっている）日本においても、その山間僻地ではサービスが提供されないであろうことは容易に想像がつく。

図1（b）は同じ世界地図上に、人口密度をプロットしたもの⁽⁷⁾である。人口密度は潜在的な通信需要を知る一つの目安となるであろう。中国・インド・東ヨーロッパといった地域に新たなインフラを待ち望む潜在的需要があることが分かる。冒頭に述べた「ケータイ」利用者の恩恵もグローバルスケールで見ると、決して十分には浸透していないということになる。そこで登場するのが、衛星通信によって提供されるパーソナル通信サービスである。

広い視野で通信のインフラストラクチャを示したものが図2である。米国のNII（National Information Infrastructure）構想やわが国の光ファイバー網計画に代表されるように、固定系での通信ネットワークの充実は目覚ましい進展が予想され、21世紀初頭にはB-ISDN（Broadband ISDN）で結ばれたマルチメディア社会が実現するであろう。その様なインフラが図2の①で示した光ファイバーネットワークである。これによって、ローカル／グローバルを問わず固定系での大容量で高い信頼性を有するサービスが提供されるようになる。②、③は冒頭に述べた地上系セルラーのイメージである。無線通信の国際標準化機関であるITU-Rで検討が進められている公衆陸上移動通信システム（FPLMTS）が目指しているISDN（Narrowband ISDN; B-ISDNと区別した従来のISDN）相当のインフラ②に対して、大都市ではより高度な（例えば、B-ISDN相当の）サービス③が実現するであろうとして、

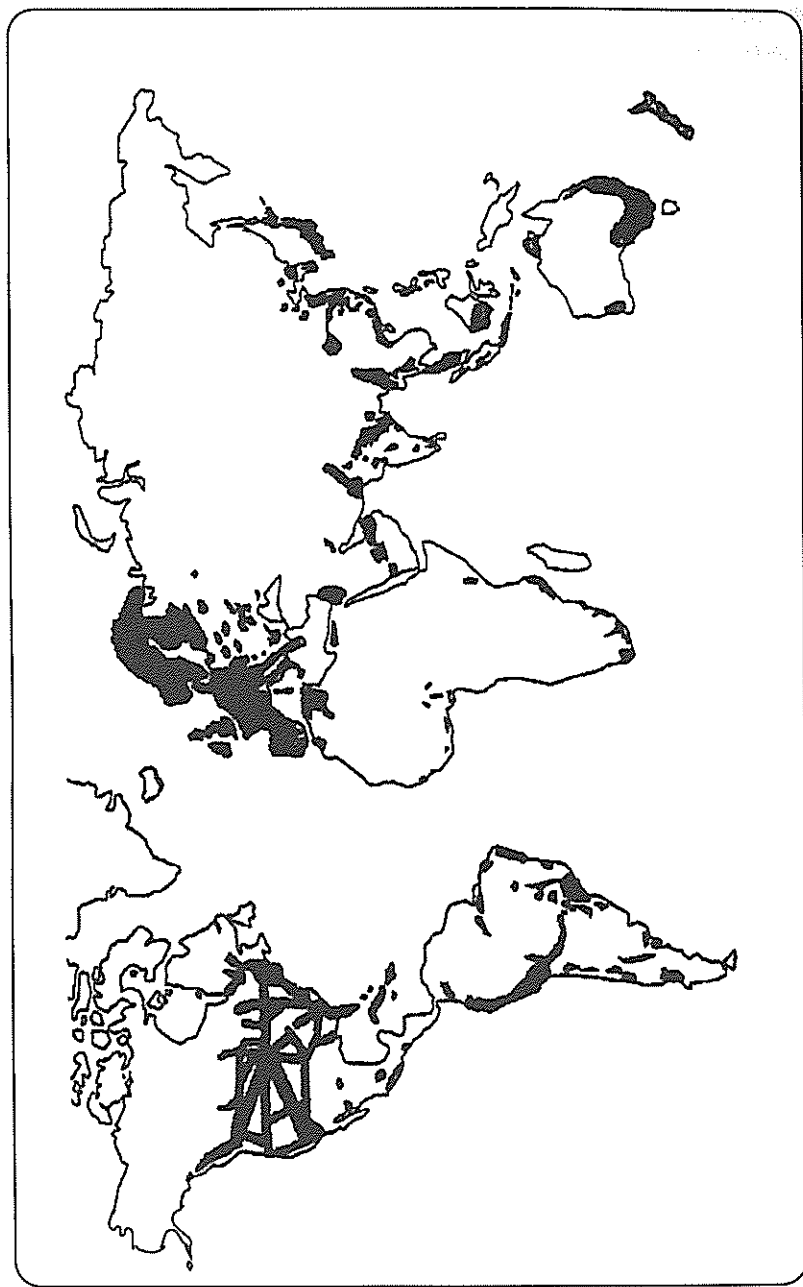


図1 (a) 西暦2,000年における地上系セルラーのサービスエリア予想 (6)

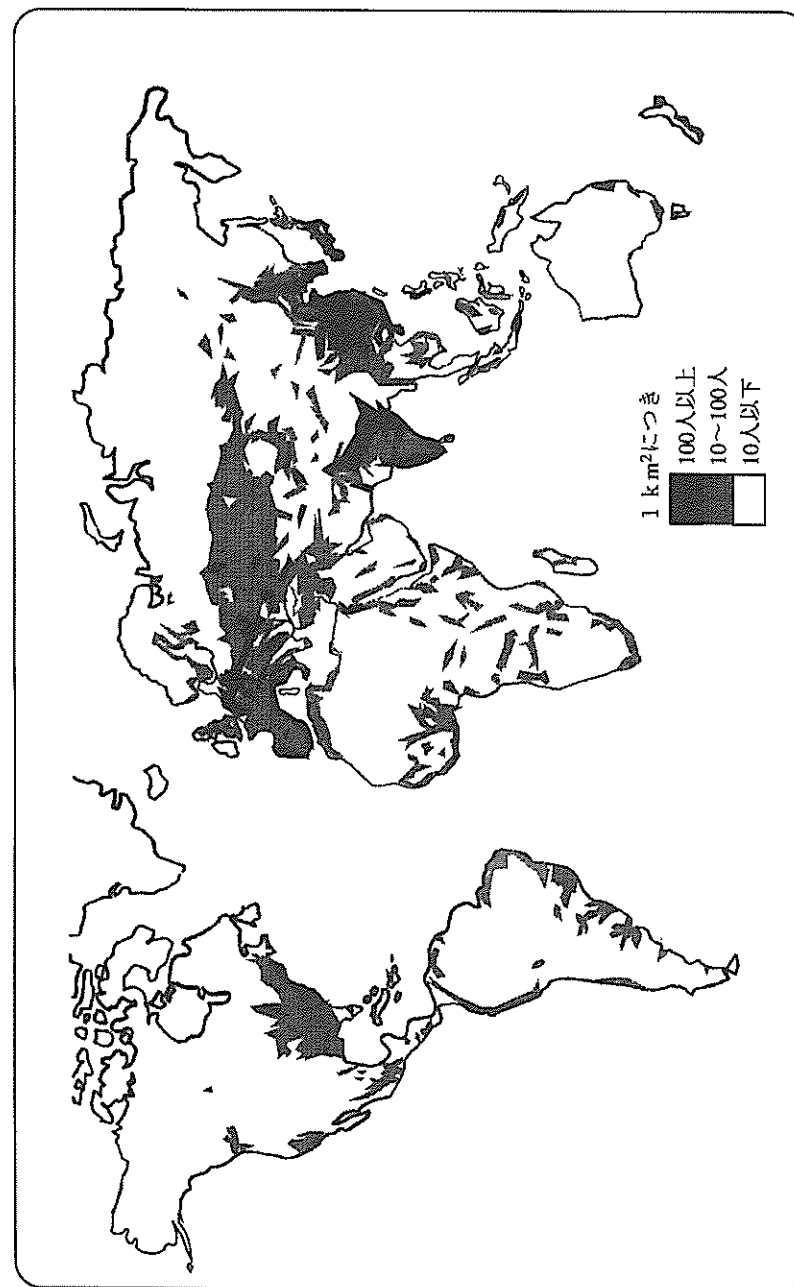
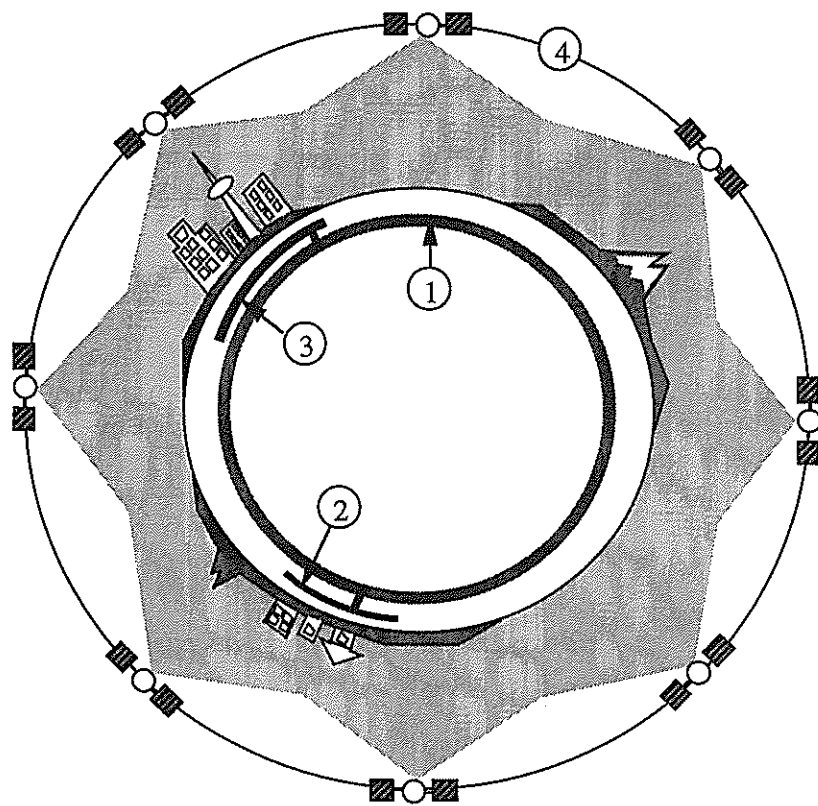


図1 (b) 世界の人高密度 (Alexander Weltatlas 1986 など (7))



- ① 光ファイバーネットワーク
- ② 地上系セルラー (N-ISDN相当)
- ③ 地上系セルラー (B-ISDN相当)
- ④ 移動体・パーソナル衛星通信

図2 通信のインフラストラクチャーの展開

2つのインフラを区別して示している。本稿のテーマである移動体・パーソナル衛星通信④は地上系の移動通信がカバーできないエリアを含んでグローバルなサービスを担う新しいインフラである。①～④によって、インドアやアウトドアの様々な環境でのユニバーサルサービスの実現を可能とする役者が揃ったことになる。

2.2 移動ISDN時代の回線品質と稼働率

ISDN（サービス総合デジタル網）は共通なインターフェースの下、一本の加入者回線で電話・ファクシミリ・テレビ会議・データ通信等多様な通信を可能とするもので、高度情報化社会推進の重要な役割を担っている。現在このサービスは地上及び衛星通信を含めた固定系伝送路によっているが、将来は移動体への通信も含めて、総合的なパーソナル通信（UPT: Universal Personal Telecommunications）を実現するものとして期待されている。

移動通信は、限られた周波数資源を利用する無線伝送路によってのみ実現できるものであるため、各種の制限があって固定系のISDNサービスと同等にはいかない。そこで、無線を介して端末の移動性（Terminal mobility）を保証しながらISDNライクな利用が可能な移動体通信のためのサービス総合デジタル通信網の構想が示され、「移動ISDN」と呼ばれている⁽⁹⁾。この移動ISDNは地上系移動通信はもとより、衛星移動も含め総合的な移動通信を対象としている。

上述のように、ISDN（あるいはUPT）では伝送路は通信実現の具体的手段であって

有線・無線に特定されるわけではなく、伝送品質も伝送速度ごとにend-to-endで規定される。このため、地上系固定通信や固定衛星通信では共通な土俵で伝送品質を評価できるよう、通信の稼働状態、稼働時間中の品質規定方法に関する定義がITU-T（通信の標準化に関する国際機関）から勧告されている⁽⁹⁾。これまでの移動通信のように、個別（stand-alone）の通信システムを提供するような場合には、信号品質評価もサービスの性質に応じて個別に対応することで問題はない。しかしながら、移動通信もISDNの一つのパイプを担う時代（＝移動ISDN時代）には品質評価に関する定義を共通にし、品質規定に関しても固定系ISDNと整合性を持たせていく必要がある。

通信の信頼性や品質を評価する尺度、あるいは品質を規定する手段として、つぎの二つの量を定義する。一つはLink Quality (LQ)であり、もう一つはService Availability (SA)である〔注：この概念は移動通信の回線設計に不可欠なためこれまでも種々の議論があると思われるが、本稿で述べる内容は筆者の主観的な解釈が入っており類似の言葉（定義）とは必ずしも一致しない〕。LQは一回の通信が行なわれている間の品質であり、回線設定に際して規定される量である。「規定の品質」とは「通信として許容される最低限度以上の特性」であり、1秒間のBERが 10^{-3} 以下と言ったような与え方である。筆者等は文献⁽¹⁰⁾で、近く到来する移動ISDN時代に備え、固定系の品質規定と整合をとるため稼働率や稼働時間内品質特性評価にはITU-T勧告G821の定義⁽⁹⁾に基づいて行なうことの必要性を述べた。ここ

という「規定の品質」とは、そういった新たな規定や従来の個別通信目的ごとの規定を含む広い意味に用いる。回線の特性(LQ)を評価する場合には「平均BERが 10^{-3} 以下」あるいは「1秒間のBERが 10^{-3} 以下である時間率が90%以上」という様な使い方をする。又、回線品質(サービス品質)を規定する場合には「1秒間のBERが 10^{-3} 以下である時間率が95%以上でなければならない」というように用いる。

一方、Service Availability (SA) は「通信が試みられるであろう空間的な領域」に対して、「規定のLQが満たされる空間的な領域」の占める割合で表される。衛星またはユーザ端末の移動によって、空間的な変化が時間的な変化となって現われることから、上記の表現において「空間的な領域」を「時間」という言葉で置き換えてもよい。LQは通信を行なうために満たさなければならない必要条件であるが、SAは必ずしも規定する必要はない(ただし目標は必要である)。SAが小さいということは「限られた所(あるいは時間)でしか通信ができない」という事を意味する。

自動車等高速移動体を対象とする通信(以下LMSS-Vと呼ぶ、V: vehicular)では、短時間に広範囲を移動するので一回の通信の中で様々な伝搬状態を経験する可能性を持つ。電力マージンがあまり大きく取れない(例えば10dB程度の)衛星通信システムでは衛星が見通し外になると通信品質が著しく低下するので、衛星の見通し場所率(以下単に見通し率と呼ぶ)が直接的にLQに反映される。市街地の衛星見通し率は衛星仰角・都市構造等によって異なるが、後

述のとおり大部分は80%以下であり、このような低い見通し率では満足なLQがとれず、結論として市街地でのLMSS-Vサービスは無理である(ただし特別な不感地対策がされていない状態で)。

一方、歩行程度の低速移動が主となる携帯電話(LMSS-P, P: personal)では、一旦見通しのある場所(例えば市街地なら交差点付近)で通信回線が設定できればその状態が暫く続くと期待できる。故に見通し率の大部分はLQでなくSAに反映されることになり、市街地でのサービスも十分成立する。このように同じような伝搬環境であっても、通信品質と稼働率という観点で見ると二つのサービスは性格が大きく異なることが分かる。図3は通信品質という観点から見たLMSS-VとLMSS-Pの電波環境の違いを模式的に表わしている。LMSS-Pでは、様々な伝搬状態を含む広いエリアの中の一部(図の例では伝搬状態「良」と「可」からなるエリア)で通信が試みられ、この場合は通信が成立(○)している。一方、LMSS-Vでは、一回の平均通信時間の中に伝搬状態「悪」を何回も含み、満足なLQを得られない様子(通信として×)を示している。同じ様なエリアをサービス対象とする通信であっても、その利用形態によって回線の設計思想が大きく異なる一つの例である。

LMSS-Pを対象とした中～低軌道(MEO～LEO)周回衛星システムでは一つの衛星が一つの地点を連続的にカバーできる時間は限られており、LEOシステムでは数分である。故にLEOシステムではこれがLQに影響し、信頼性低下の原因となる。一方で

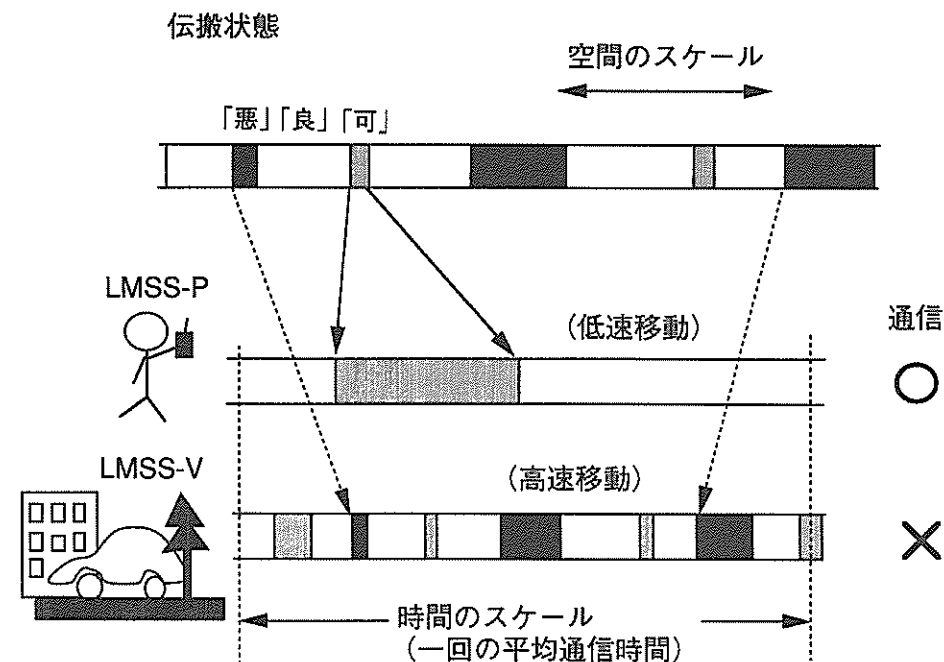


図3 通信品質という観点から見たLMSS-VとLMSS-Pの電波環境の違い
(伝搬状態「良、可、悪」は図7の状態「A、B、C」に対応)

LEOシステムは、衛星数に余裕を持ったシステム設計がなされていれば地上からの視野に複数の衛星が入ることになるので、見通し率低下の対策として後述の衛星ダイバーシチが有効になる。LMSS-Pの場合衛星ダイバーシチはLQの向上と共にSAの向上にも大きく寄与するものとなろう。

3. 衛星回線における伝搬劣化要因

移動体衛星通信は二つの無線リンクによって回線が形成される。衛星と通信ユーザを結ぶ「ユーザリンク(あるいはモバイルリ

ンク)」と、衛星と地上ゲートウェイ局とを結ぶ「フィーダリンク」である。フィーダリンクに現われる電波伝搬問題は、固定地球局を対象に通信が行われている固定衛星通信の電波伝搬問題と共通する。次章以降では、移動体との通信を行うユーザリンクの電波伝搬問題に焦点を当てるが、衛星通信回線全般における電波伝搬劣化要因の概要を本章で述べる。

図4は衛星通信で問題となる各種伝搬劣化要因を現象別に示したものである⁽¹¹⁾。固定衛星通信サービスでは、伝搬路上に遮蔽物が存在しない見通し内回線であるため大部分の時間においては電波伝搬上の問題は

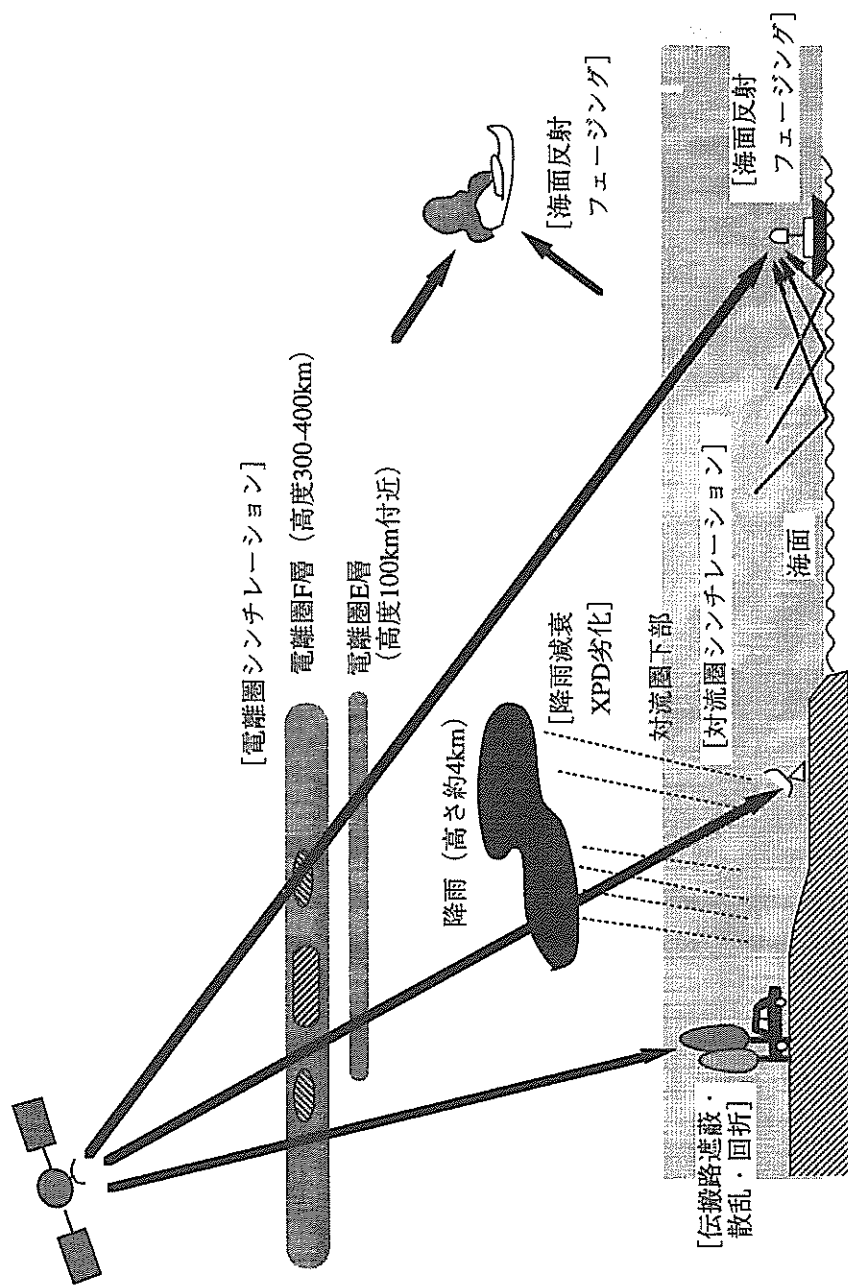


図4 衛星一地上間に発生する伝搬劣化要因

ない。それでもこれが問題として取り上げられるのは、回線の高信頼度が求められるためである。例えば、年間の回線稼働率を99.99%以上とするためには、0.01%以下の時間（1年間で約52分）でしか回線断が許されない。このように、稀にしか起こらないような事象に焦点を当てると、そこには豪雨によってもたらされる電波の減衰や偏波特性（交差偏波識別度、XPDと呼ばれる）の劣化、磁気嵐のあとに発生しやすい電離圏シンチレーション（信号強度が激しく変動する現象）、地表大気屈折率の揺らぎによって生じる対流圏シンチレーション等がある。これらの伝搬現象は、地球の対流圏や電離圏のなかの自然現象（電波気象）によってもたらされ、それぞれの現象特有の周波数・衛星仰角・地域・季節依存性を持つ。表1は、各現象について、その原因・特徴・対策をまとめている。それぞれの詳細については、本分野を対象としてまとめられた教科書【参考文献(12)】を参照されたい。

10GHz以上の周波数帯では、通常、降雨減衰の問題が一番大きくなるが、無降雨時のみにサービスを提供するシステム（低稼働率・低マージンシステム）では、対流圏シンチレーションが次に考慮すべき伝搬劣化要因となる。一方、低い周波数帯（例えばLバンド）では電離圏シンチレーションが問題となる。電離圏シンチレーションは、地震の発生と同じように突発的に発生し、様々な要因に支配されている。このため、定量的な評価を可能とする推定法は確立されておらず、その影響も回線設計上無視されているが、11年ごとに（すなわち、太陽

黒点数がピークを迎える年ごとに）騒がれる問題になっている。

移動体衛星通信のフィードリンクには、ユーザリンクより高い周波数の電波が用いられることが常であり、例えば、「イリジウム」や「オデッセイ」ではKa帯（20～30GHz帯）の電波が用いられる⁽²⁾。また、マルチメディアサービスを対象とした「テレデシックスシステム」ではユーザリンクそのものにKa帯の電波を用いる計画である⁽⁶⁾。このような、高い周波数が用いられるリンクでは降雨による減衰が最大の伝搬問題となり、これに対する正確な稼働率評価や対策が求められる。この降雨減衰の問題と対策については、文献（12）に詳しくまとめられているので、興味ある読者はこれを参照されたい。

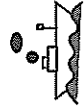
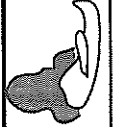
移動体衛星通信の場合には、そのサービスの対象とする環境に起因して特有な伝搬問題が生じる。表2は4つのサービス【海事衛星通信（MMSS）、航空衛星通信（AMSS）、陸上移動体衛星通信（LMSS-V: Vehicular）、パーソナル衛星通信（LMSS-P: Personal）】について電波伝搬環境の特徴をまとめている^{(10),(11)}。

船舶との通信を行う海事衛星通信（MMSS）や飛行機等との通信を行う航空衛星通信（AMSS）では、衛星から直接到来する波（直接波）と海面で反射された波（反射波）との干渉によって生じるマルチパスフェーディング（海面反射フェーディング）が主な伝搬劣化要因となる。移動局アンテナの小型化に伴って（すなわち、ビーム幅の広いアンテナが用いられるに従って）、直接波と海面反射波を共に主ビームで受信する

表 1 衛星通信（移動体衛星通信を除く）の伝搬劣化現象とその特徴および対策

	降雨減衰	交差偏波識別度 (XPD)劣化	対流圏シンチレーション	電離圏シンチレーション
発生原因	雨滴による吸収と散乱	雨滴の非球形 (偏平) 性 氷晶	対流圏の屈折率のゆらぎ (主に水蒸気成分)	電離圏F層中の屈折率の乱れ (スプレッドF) スプラディックE層の発生
特徴	周波数の増加と共に単調に増加 ($f^{1.7} : f \leq 30\text{GHz}$) 周波数10GHz以上で影響大 低仰角程減衰大 減衰の大きさは地域依存性大	周波数の増加と共に劣化増 低仰角ではCバンドでも劣化が無視できない 発雷時にXPDが急変する観測結果もある	気温・湿度が共に高いときに大きなシンチレーションが発生する (熱帯地域や、中緯度地域の夏期に大) 仰角 10° 以下で仰角の低下と共に急激に増加 周波数依存性は比較的小さい($f^{0.5}$ 程度)	スプレッドFに起因するシンチレーションでは、太陽活動が盛んな年、その春・秋・秋分の季節、地方時の20~24時付近に発生しやすい。(特に赤道地域) 突然発生し10分~数時間持続する GHz帯電波では低い周波数ほど影響大($f^{-1.5}$ 程度) スバイク状変動もあり (QPシンチレーション: E層の可能性大)
対策	サイトダイバーシチ 送信電力制御 衛星電力適応分配、等	交差偏波補償装置 サイトダイバーシチ	特に積極的な対策は講じられていない	

表 2 移動体衛星通信の電波伝搬環境とその特徴 (表内の数値は1帯周波数での目安値)

サービス 性質	MMSS 	AMSS 	LMSS-V 	LMSS-P 
通信環境 伝搬劣化の 主たる要因 信号劣化の程度 (フェージング 深さ*) C/M** 変動の基本 周波数成分	見通し内 海面反射 フェージング 10 dB 以内 6 dB 以上 0.5~数Hz 程度	見通し内 海面反射 フェージング 大地反射 フェージング 8 dB 以内 7 dB 以上 20 ~数百 Hz	見通し内・見通し外混在 地勢、地上構築物、 樹木による遮蔽 マルチパス フェージング 環境条件により多様 (最大では20 dB 以上) 0~10 dB~20dB (多様) 10~数十Hz (マルチパス フェージング、樹木遮蔽) 1 Hz以下長周期 (地勢、 地上構築物遮蔽)	見通し内 (一般に見通し 外では通信成立せず) LMSS-Vにほぼ同じ 人体 (頭部) による 遮蔽 10 dB 以内 6 dB 以上 数Hz かそれ以下

* フェージングの深さ: 信号強度累積分布の50-99%値

** C/M: 直接波成分電力と平均分散電力の比

低仰角運用時での信号強度の劣化が回線設計上の大きな問題となっている⁽¹³⁾。また、航空衛星通信の場合には、直接波と反射波の伝搬遅延差が大きいため、周波数選択性フェージングの性質を持つようになる⁽¹⁴⁾。

海面反射フェージングについては1980年代に国内外の各機関で精力的な研究がなされ⁽¹³⁾⁻⁽¹⁷⁾、現在、回線設計に十分な精度を有する伝搬劣化推定法が確立されている⁽¹⁸⁾。図5は太陽が水平線に沈む直前に光が海面によって反射される様子を示したものである。電波の海面反射波は直接目で見ることはできないが、同図に見られる太陽の反射光と同じように海面の様々な方向から到来してくるものと考ええるとよく理解できる。後述する陸上移動体・パーソナル衛星通信（総称してLMSS）に現われる複雑な電波伝搬環境に比べて現象がすなお（＝粗面散乱理論が適用しやすい）であることがモデル化に幸いしている。

陸上移動体衛星通信（LMSS-V、-P）の場合は、上記2つのサービス（MMSS、AMSS）の電波伝搬環境に比べて取り扱いが非常に難しい。図6はいくつかの通信環境の例である。（a）はLMSSが本来想定している環境で、完全なオープンサイトである。このような環境では電波伝搬上の問題はない（地面からの反射波があるが、その程度の劣化はマージンの中で吸収できる）。（b）のような樹木のある環境に対してはどうであろうか。広いサービスエリアを確保するためにも、通信ができる環境であってほしいと思うのであるが。市街地（c）はどうも電波が届きそうもないので絶望的だろうか。でも、ホテルの窓際にもって行けば通信ができるかもし

れない。筆者等電波伝搬の研究者には、このような問に的確に答えることが期待されているが、それは結構難しい。

LMSSの電波伝搬環境は、市街地、郊外地、田園地帯、山岳地帯といった大雑把な分類は可能であるが、各々の中でも遮蔽・回折・多重波伝搬など様々な伝搬劣化要因が混在して複雑な様相を呈する。このため、伝搬モデルも、まだ個々の現象を表現するレベル（例えば、樹木による減衰や、孤立ビルの回折等）に留まっている。一方で、パーソナル通信サービス（LMSS-P）の提供を目指した（低軌道）周回衛星システムの実現が目前に迫っており⁽²⁾⁻⁽⁵⁾、稼働率を精度良く評価するための電波伝搬モデルが早急に求められている。このようにニーズが先行する中で、その期待に応えるべく電波伝搬の研究が進められている。

4 陸上移動体衛星通信の電波伝搬環境

4.1 伝搬劣化要因と伝搬状態の分類

LMSSは自動車電話に代表される高速かつ広範囲に移動するものを対象とするサービスと、ハンドヘルド端末による携帯電話のような低速移動（あるいは固定）状態で利用されるサービスの2つに大別される。ここではこの2つを区別して前者をLMSS-V、後者をLMSS-Pと呼んでいる。

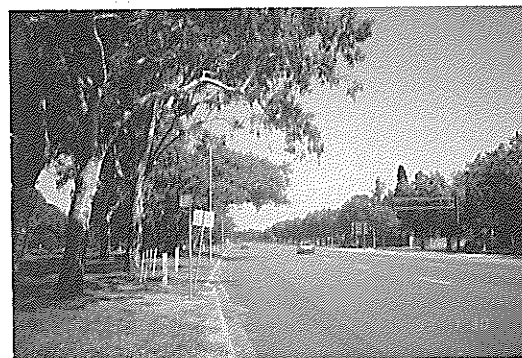
LMSS-Vの伝搬劣化要因には、(i) 山岳・ビル・トンネル等による電波の遮蔽、(ii) 街路樹等による電波の減衰、(iii) 地面や地上



図5 太陽光の海面散乱の様子【電波の散乱の様子を目で直接見ることはできないが、これはそのおおよそのイメージを与えている】



(a) 遮蔽物の全く無いオープンサイト (オーストラリアにて筆者撮影)



(b) 街路樹のある道路 (同上)



(c) 市街地 (東京)

図6 LMSSの通信環境の例

構造物からの散乱波によるマルチパスフェージング、(iv) アンテナ搭載車の構造に起因するブロッキングやフェージング等がある。図7はこの様子を模式的に示している。図では衛星からの直接波が見える状態を「状態A」、樹木等の遮蔽によって信号レベルがある程度低下し不安定なレベル変動が発生する領域を「状態B」、ビル等によって電波が完全に遮蔽されてしまう状態を「状態C」としている。通信の環境としては、各々、「良 (Good)」、「可 (Fair)」、「不可 (Bad)」に対応するイメージである。

LMSS-Pの伝搬環境は、本質的にはLMSS-Vと変わらない。ただし上記(iv)のかわりに、ハンドヘルド端末については人体(特に頭部)による電波のブロッキングが、又、ビル内での通信では建物への電波の浸透性が問題になる。一方、(i)の要因は、そのような環境では通信が試みられないであろうから、LMSS-Vほど重要なファクタとはならない。しかしこれらの要因が信号品質(LQ、SA)に現われる影響という目で見ると、LMSS-VとLMSS-Pでは異なった捕え方になることは前章で述べたとおりである。

LMSSの伝搬データは、まだ量的に十分なものがなく、そのデータをベースとして構築すべき伝搬モデルは現在まだ手探り状態にある。以下では、その中でも比較的データが集まりつつある衛星見通し率や樹木の影響をを中心とした電波伝搬環境を明らかにする。

4.2 衛星見通し率

大きなマージンをとることが困難なLMSS回線では、伝搬路が遮蔽状態になるとほとんど通信不能となる。特に都市内ではそのような状態は頻繁に発生しやすいので、見通し率を把握することが重要となる。送受信間の見通し率の評価は、例えば地上の加入者無線回線等、種々のサービスに対して検討が進められているが⁽¹⁹⁾、ここでは衛星回線に対して行われている幾つかの試みを紹介する。

太陽光の影の分布の航空写真解析⁽²⁰⁾

太陽が丁度所定の衛星方向にある時の道路上での影の部分の割合が、その衛星の遮蔽率に対応する点に着目し、晴天時の市街地の航空写真から道路上の影の部分を抽出し、その割合を解析した結果がNHKの伊藤により報告されている⁽²⁰⁾。本測定は、Ku帯の衛星放送の移動体受信を目的としてなされた測定であるが、データはLMSSの見通し率推定にそのまま利用出来る。図8は衛星方位方向を基準(0°)とする道路の向きに対する衛星の見通し率で、市街地における仰角38°のデータである。文献(20)には、主要道路別見通し場所率の測定結果も示されている。これらのデータに基づき、市街地の一般道路では65.3%、首都高速では94.1%の見通し場所率(いずれも仰角38°)となることが報告されている。

ラジオメータを用いた測定⁽²¹⁾

ラジオメータは雑音温度を測定する装置

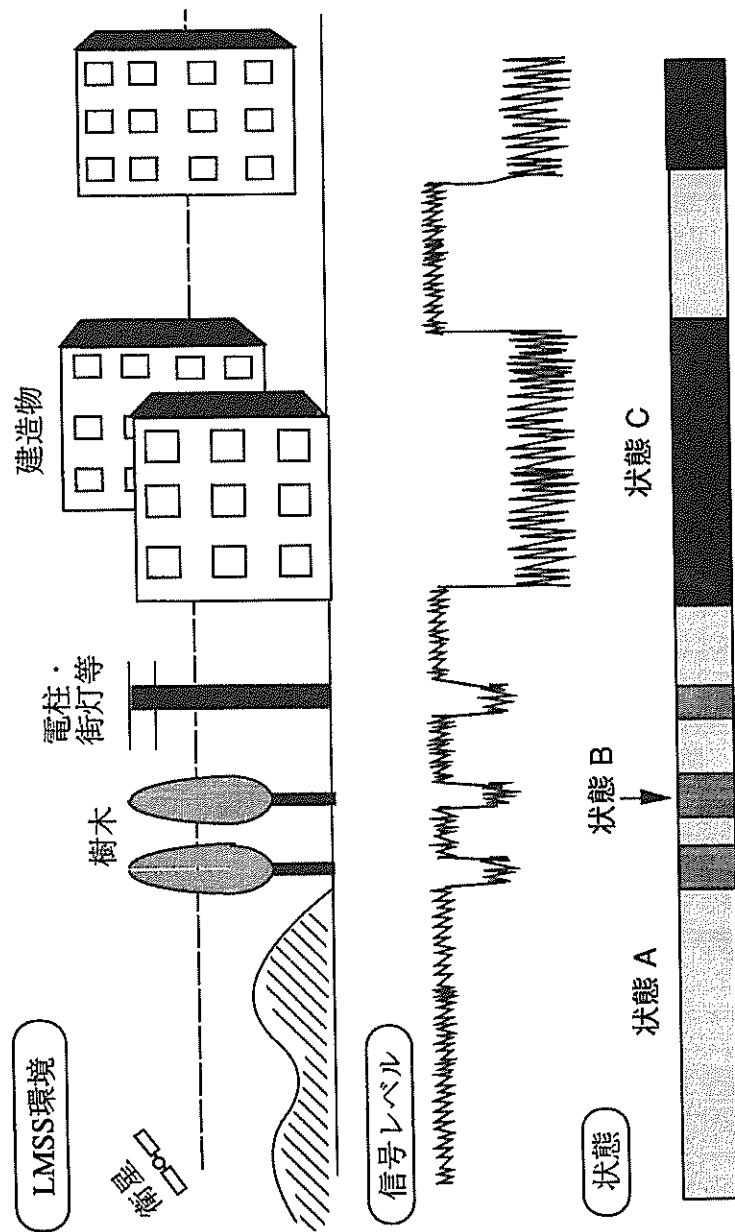


図7 陸上移動体衛星通信の電波伝搬環境と伝搬状態の分類

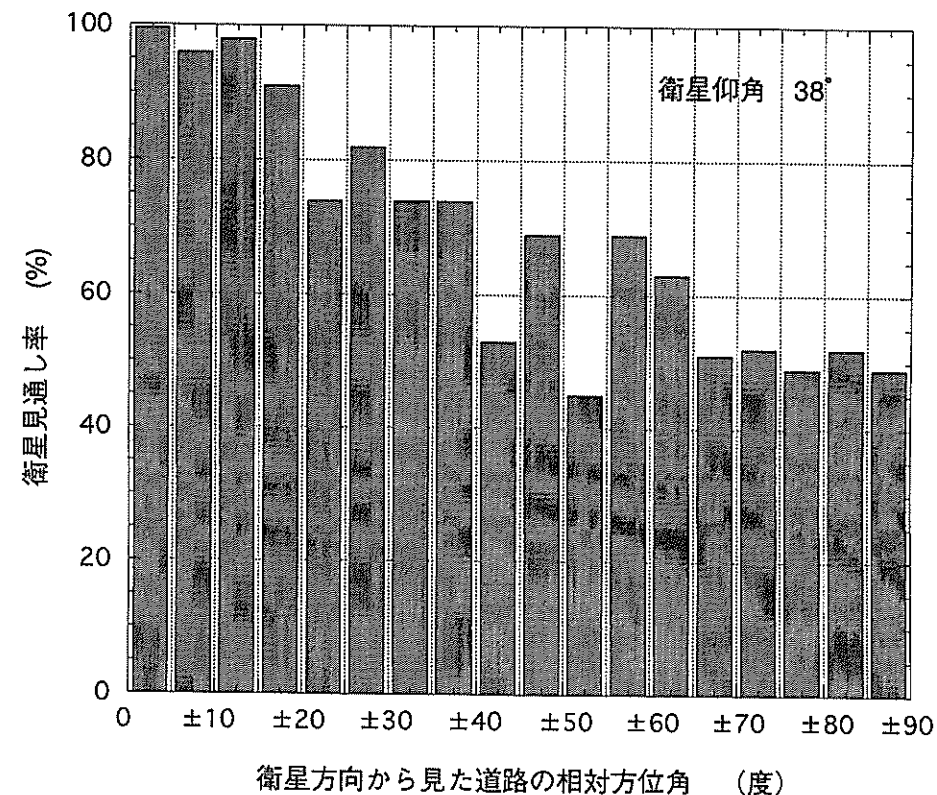
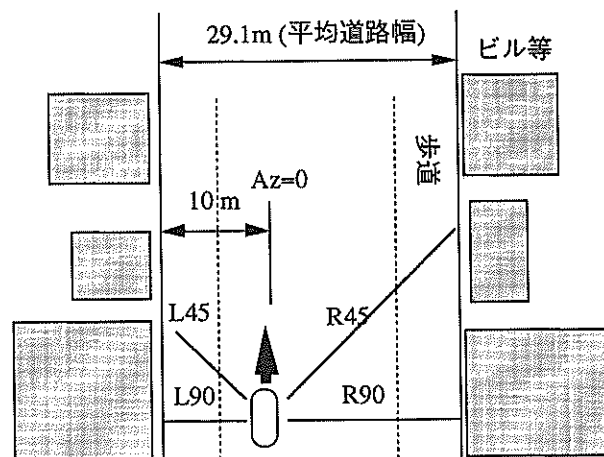


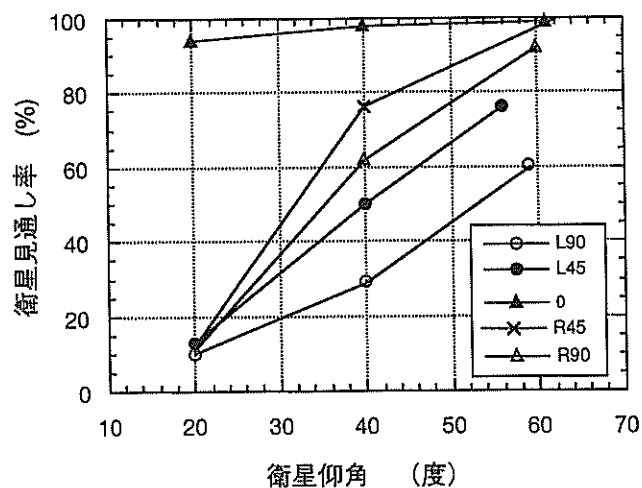
図8 市街地における「衛星と道路との方位差」と「衛星見通し率」との関係⁽²⁰⁾

である。指向性アンテナを衛星があると想定する方向に向けて雑音温度を測定すると、遮蔽物がない場合は天空の極めて低い温度（アンテナ・仰角・周波数等に依存するが、例えば20K）が得られ、また、アンテナビーム内に（すなわち伝搬通路上に）遮蔽物がある場合には減衰の程度に応じて常温（300K）に近い値にまで上昇する。この原理を用いた市街地における衛星見通し率測定がKDDの松戸等により行われている⁽²¹⁾。12GHz帯ディック型ラジオメータ（帯域幅

100MHz, 時定数0.1秒）に半値幅約10°のホーンアンテナを付け、これを自動車に搭載して市街地（新宿）での測定を行っている。自動車の進行方向に対してアンテナの向き（方位角）を一定に取り付けておき、この状態で広い範囲を走行すれば、道路と衛星との相対方位角に対する見通し率が得られる。あらかじめ、校正サイトでビルがアンテナのビームを半分遮へいた状態での雑音温度を測定し、この値（ $T_s=176K$ ）をしきい値として $T_s > T$ で「見通しあり」、 $T_s < T$ で



(a) 平均的道路環境と方位角の定義



(b) 市街地における衛星見通し場所率と衛星仰角の関係

図9 ラジオメータで測定した見通し場所率の仰角と方位角特性⁽²¹⁾

「見通しなし」と判断した。図9(b)はその仰角と相対方位角に対する見通し率の測定結果で、平均的な道路環境と相対方位角の定義を図9(a)に示している。仰角特性、方位角特性の各々に、市街地構造や日本の交通ルール(左側通行)がよく反映されている。

魚眼レンズカメラによる測定⁽²²⁾

全方位のスカイラインを含む風景を魚眼

レンズカメラを天頂に向けて撮影し、このデータを画像処理をすることによって見通し率を求めるアプローチが、テキサス大のVogel等によって行われている⁽²²⁾。図10は、魚眼レンズカメラによる1シーン(これは日本で撮影されている)である。図11は、市街地における状態A,B,Cの仰角特性である。Vogel氏が日本で開催された国際会議に出席の折に撮影した写真に基づく日本の市街地(東京・京都・奈良・広島・鎌倉)のデ

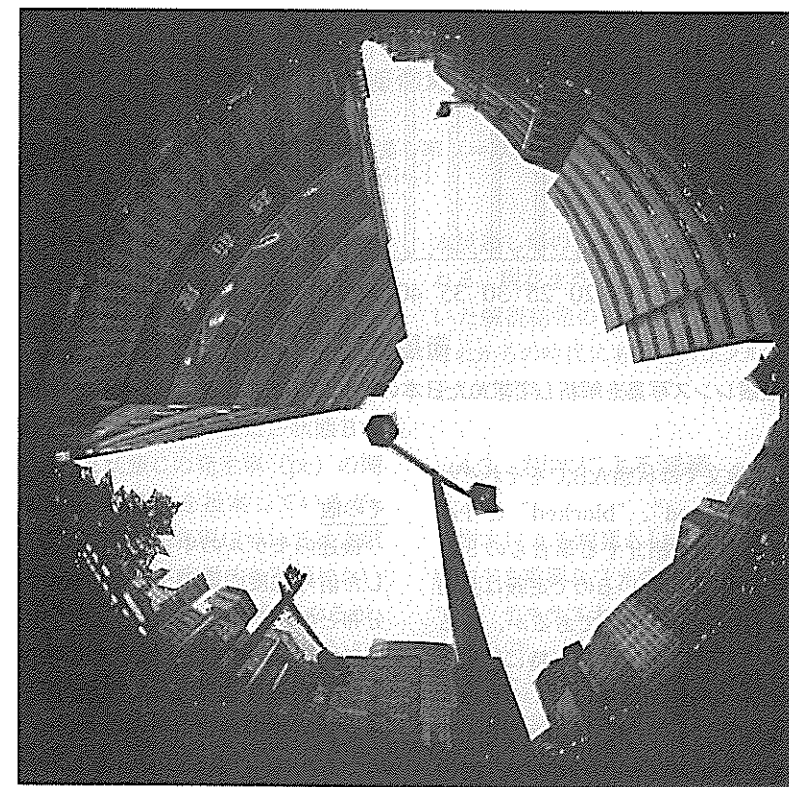


図10 魚眼レンズカメラで撮影した市街地の一風景(資料提供: Vogel博士)

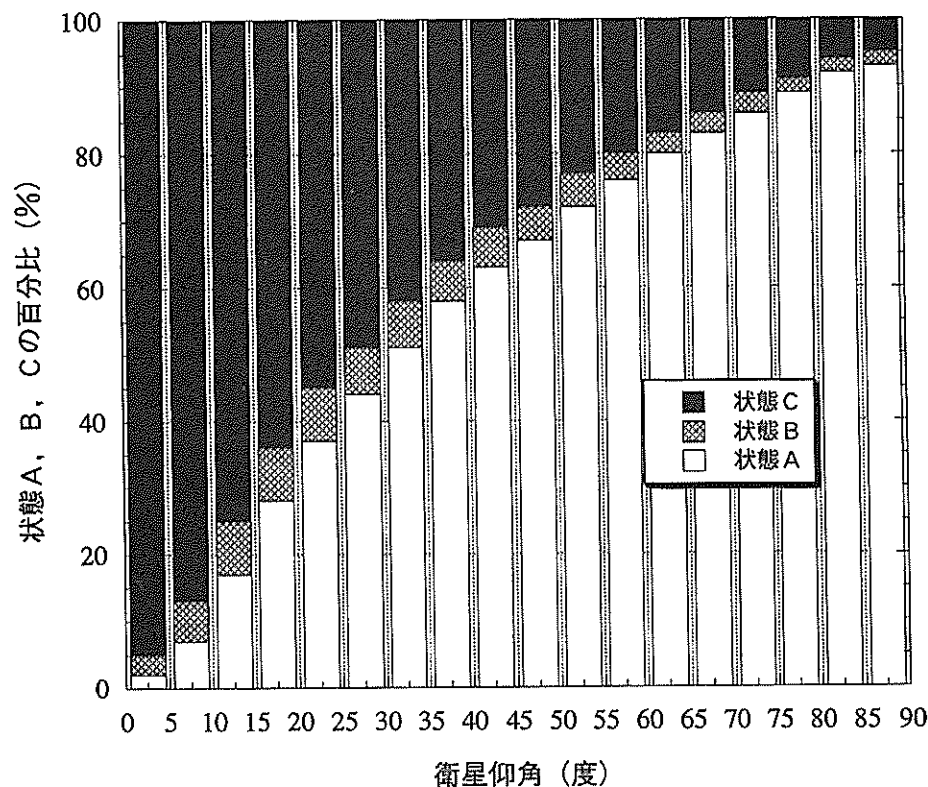


図11 魚眼レンズ写真を解析して求めた日本の市街地における状態A,B,Cの仰角特性⁽²²⁾

ータである。論文では状態A,B,Cをそれぞれ“clear”、“shadowed”、“blocked”と呼んでいるが、第5章で紹介する筆者らの3状態モデルをベースとしているので定義は共通である。統計的に十分な量であるか、あるいは、そのデータ解析の詳細（特に状態Bの判定法）等は明らかにされていないが、結果を見る限り（すなわち上述の太陽光測定やラジオメータ測定等と比較して）極めて妥当と思われる値を示しており、全く恐れ入るところである。

その他

後述のモデルの中で述べるように、測定した信号強度の累積分布から仮定する確率分布とのパラメータフィッティングにより、逆に見通し率を推定することも可能である。図12は、衛星の見通し率（＝状態Aの発生率： p_A ）と仰角の関係をもとめて示したものであり⁽²⁴⁾、上述の太陽光を利用した測定、ラジオメータ測定、実測累積分布からの推定値（文献⁽²⁵⁾の表1）をまとめてプロッ

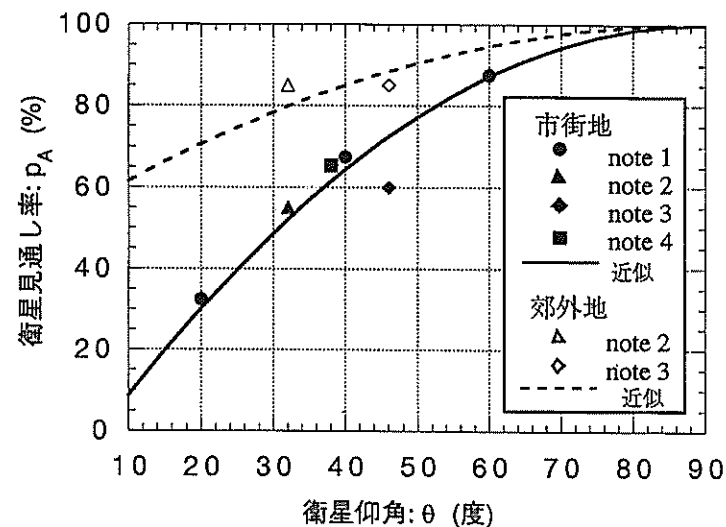


図12 市街地および郊外地における平均見通し率（＝状態A発生率）と衛星仰角の関係
[データの詳細：note 1-4は文献⁽²⁴⁾に]

トしている。データは極めて限られており、全貌を把握するには不十分であるが（特に郊外地）、筆者等は状態Aの発生率（ p_A ）の仰角（ θ ）特性については、実線（市街地）および点線（郊外地）で表わされる関係を以後の解析で用いている。また、状態Bの発生率（ p_B ）と状態Cの発生率（ p_C ）の関係についても、近似式を提案しているが、これらの具体的な数式表現については文献⁽²⁴⁾を参照されたい。定量的な評価においては、より現実に即した値が必要になるが、後述する衛星ダイバーシチ効果の軌道パラメータ依存性を調べるような定性的な傾向を知りたい場合には上記のような大胆な仮定でも十分である。

近年、土地・建物データベースがCD-ROM化されて充実したものになりつつあり、

本見通し率の推定等には格好のものと思われる。現在まだこのようなデータベースを用いた解析結果の報告を筆者は知らないが、これからの時代にあったパワフルな解析手法として期待している。

4.3 樹木による減衰

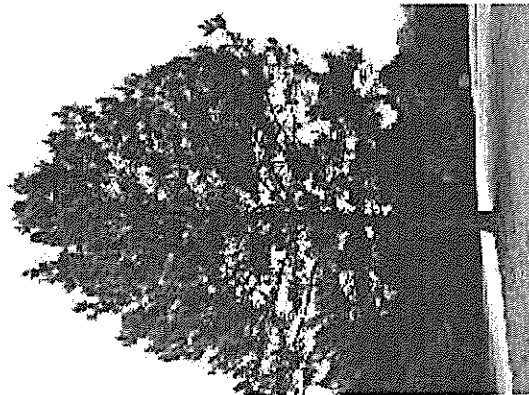
樹木による減衰もLMSS伝搬における考慮すべき重要なファクタである。これについては、テキサス大のVogel等の貢献が非常に大きい⁽²⁵⁾。多くのデータが報告されているが、ここでは系統的に測定された最近のデータ⁽²⁶⁾を紹介する。一本の木による減衰を1.6 GHzと2.5 GHzで測定したものであり、送信は、地上のタワーを利用している。測定に用いた樹木は図13に示す3本の木、す



(a) ポプラ (Cottonwood)



(b) ペカン (Pecan)



(c) 松 (Pine)

(写真は、木の葉が落ちてくる時のものであるが、測定は木の葉が繁っている状態で行っている)
図13 樹木の減衰測定に用いた3種類の木⁽²⁶⁾ (資料提供: Vogel博士)

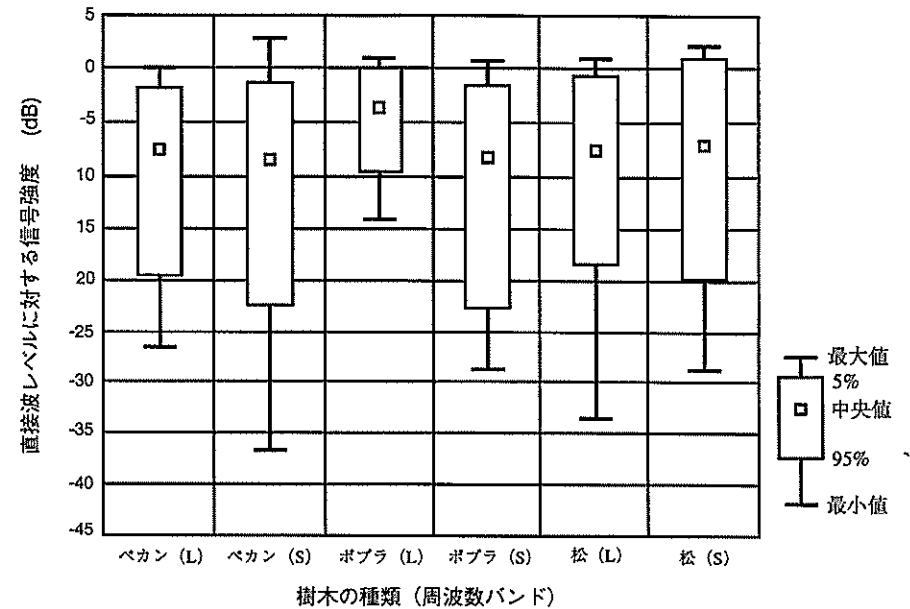


図14 樹木の減衰測定結果をまとめた箱ヒゲ図⁽²⁶⁾

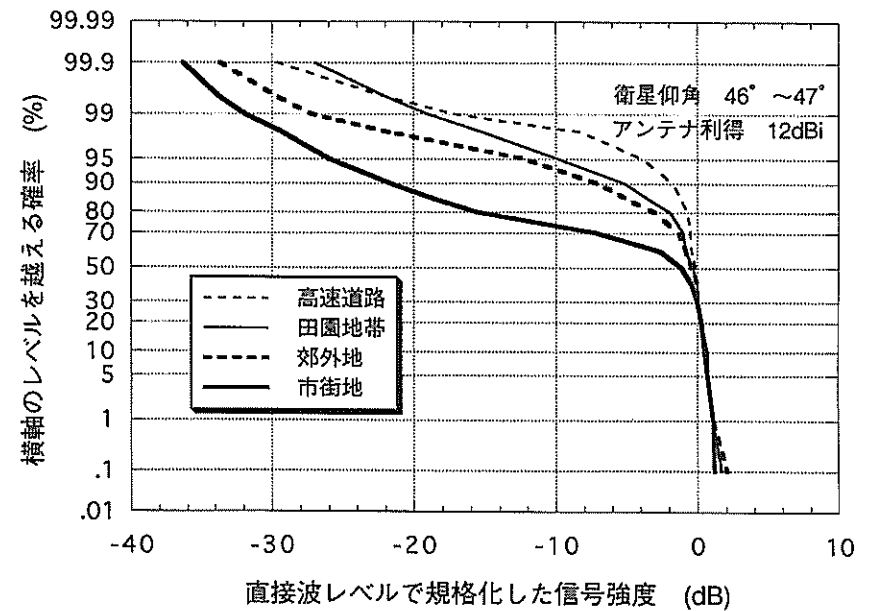


図15 様々なLMSS-V伝搬環境における信号強度の累積分布特性 [ETS-V衛星を用いたCRLの測定⁽³⁰⁾]

なわち(a)ボプラ (Cottonwood)、(b) ペカン (Pecan)、(c) 松 (Pine) である (写真は、木の葉が落ちている時のものであるが、測定は木の葉が繁っている状態で行っていると、述べられている)。図14は、測定結果をまとめた箱ヒゲ図である。全ての場合について5~10 dBの平均的な減衰、5~95%の時間率に対して0~20 dB程度の減衰があることが分かる。1.6GHzと2.5GHzの比較では、2.5GHzでやや減衰が大きくなっているがそれほど顕著ではない。

Ka帯のように著しく高い周波数を用いられる場合には、樹木は非常に大きな減衰を有する遮へい物として働くと推定される。高い周波数に対する樹木減衰の測定例はまだあまり多くない。一例として、Olympus衛星 (周波数18.9GHz) の電波を受信した例では、見通し状態から樹木の陰にはいることによって20 dB ~ 30 dBの減衰があるというデータが報告されている⁽²⁷⁾。高い周波数では樹木でもこのような大きい減衰となるので、実際に通信が可能な環境は、ほとんど見通しのある場所 (状態A) だけである。

4.4 受信レベルの累積分布

LMSS-V環境での信号強度の累積分布の測定が実際の衛星を用いて行われている^{(26),(28)}。これらのデータのいくつかについてはITU-Rのデータバンク (SG3)⁽²⁹⁾に登録されており、通信回線の設計やモデルの構築のため等に自由に利用できる環境が整いつつある (ただし、実際には降雨減衰データについては十分な量のデータが登録されてい

る反面、LMSSを含む他の伝搬データはまだほとんど充実していない)。図15は、日本のETS-V衛星 (1.5 GHz, 円偏波) を利用してCRLが測定したもので⁽³⁰⁾、ITU-Rのデータバンクに登録されているデータである。この測定環境は、本稿の定義にあわせるとLMSS-Vの環境である。回線設計上マージンとして考慮すべき10dB ~ 20dBに対応する累積確率 (=場所率) で伝搬環境の良さを見れば、「高速道路>田園地帯>郊外地>市街地」という傾向がはっきり現われている。市街地では見通し率が悪いため、仰角が47° という高仰角にもかかわらず、10%のエリアで20 dB以上の減衰となることを示している。

LMSS-V環境での累積分布のカーブの形状は、他の伝搬特性に比べても独特なものである。これは、マルチパスフェージング、木による減衰、電波の遮蔽等、様々な現象が混在しているためである。図15の市街地データで時間率の60%付近、郊外地データで時間率の80%付近、高速道路データで時間率の95%付近でカーブに大きな曲がりが見られるが、この時間率がほぼ見通し率に相当すると考えられる。

より高い周波数ではこのカーブの曲がりが見え顕著に現われる。前述のOlympus衛星 (周波数18.9 GHz) を利用した受信強度の累積分布特性が文献 (27) にいくつか示されているが、何れもその傾向が強い。Ka帯 (20/30 GHz) のような高い周波数では、(樹木を含んで) 見通しがないところでは減衰が大きく通信が不可能であることを意味している。この分布形状についてはモデルの章 (第5章) で言及する。

4.5 その他の伝搬特性

減衰持続時間特性

信号強度があるしきい値レベルより低下し再びそのレベルに回復するまでの時間を減衰持続時間 (fade duration)、回復してから次のしきい値以下になるまでの時間を減衰発生間隔 (interfade interval) と呼ぶ。ここでは、便宜上しきい値以下の状態をフェードと呼ぶ。回線設計上はフェードの発生を時間的な性質と捉える必要があるが、物理現象としての理解のためには現象を時間的な変動として時間の領域で捕えるのではなく、場所に対して変化する特性として空間の領域で把握する方が分かりやすい。

比較的短い時間の間に何回もフェードが発生している回線 (図3に示したLMSS-Vのイメージ) はLink quality (LQ)の悪い回線であり、フェードがきわめて長い状態は、Service availability (SA)が悪いことを意味する。このように通信品質を評価する観点から、減衰持続時間特性は重要な特性である。しかしながら図3や図7からも分かるように、この特性は非常に評価が難しい。例えば、状態A、B、C各々の中にその現象の性質を反映した短周期 (short-term) の変動があり、状態の遷移にみられるような長周期 (long-term) の変動もある。又、移動通信のフェージングの特徴として、その時間的な変動はユーザー端末が移動することによって生じるものであるため、その性質は端末の移動速度に大きく依存する。

短周期変動は、基本的にマルチパスフェージングによって生じる変動であり、その最

も速い変動成分は「移動速度/電波の波長」で与えられる最大ドプラー周波数である。移動速度を1m/s (LMSS-P)、20m/s (LMSS-V)、周波数を2 GHzとすると、それぞれ6.7 Hz (LMSS-P)、133Hz (LMSS-V)となる。これらの値は、あくまで最大値であり電波の到来方向分布と移動方向の関係に依存して、より小さい値になる。時間のスケールで見ると、その逆数の0.15 sec (LMSS-P)、7.5 msec (LMSS-V) となり、減衰持続時間の目安となる。

長周期変動は「状態A」→「状態C」→「状態A」といった状態の変化であり、これは、その状態を作り出す原因となる物の実質的な大きさ (状態Bでは樹木、状態Cでは建物といった) と移動体の速度との関係で決まる。例えば5m幅の樹木のそばを1m/sの速度で歩けば、約5秒間状態Bとなるといった算定である。周回衛星の場合には、ユーザー端末が動かなくても、衛星の動きによって徐々に状態が変わってくる。この影響は低軌道 (LEO) 衛星で顕著である。筆者は長周期変動 (状態遷移) に衛星の動きを考慮したマルコフモデルを提案しており⁽³¹⁾、その概要は次章で紹介する。

なお、ここでは概要説明に終始したが、個々のケースでの減衰持続時間特性については文献 (25)、(28) に測定データがまとめられているので参照されたい。

衛星電波の屋内浸透

これは、ビジネスマンがホテルで衛星電話を使いたいといった場合に現実的に重要な問題である。地上系のセルラーでは、屋内での使用も頻繁であるが、電波が強いので、

通信可能な場合が多い。マージンが小さい衛星通信の場合は、通信ができたとしても衛星を直接見ることができる窓側に限られるであろう。では、どの程度まで可能かが問題となるが、これを定量的に判断できるデータが少なく理論的検討もまだあまり進んでいない（あるいは、結果がオープンにされていない）。Vogel等はこの問題に取り組んでいるが⁽³²⁾、系統的なとりまとめはこれからである。

人体頭部の遮蔽による減衰

電波伝搬の直接の問題からは外れるかもしれないが、この問題にも少し触れる。衛星電波を利用者の頭部が遮る形で携帯電話を利用するとどの程度の減衰が生じるであろうか。これは、衛星系/地上系を問わず携帯電話に共通する問題であり、人体への影響も含めて、電磁界解析理論に基づくシミュレーションも試みられている⁽³³⁾。ここでは、実際の衛星電波を用いてKDDが行った測定結果⁽³⁴⁾を紹介する。周波数1.5GHz（円偏波）の衛星電波を4線巻ヘリカルアンテナ（Quadrifilar antenna: 上半球に対してほぼ円偏波無指向性のアンテナ）で受信した。図16にその結果を示す。衛星方向から見てアンテナがほぼ頭部で隠れる状態（相対方位角 $180^\circ \pm 60^\circ$ ）で約6dBの減衰、それ以外の角度では1dB以内の減衰となっている。この影響は周波数が高くなるほどシビアな問題になると予想される。

実際の運用ではどうであろうか。厳しいリンクバジェットの中で伝搬損失の中にこの6dBをさらに上乘せするのはかなり設計が苦しくなるであろう。利用者の協力

（User Cooperation: 利用者に通信状態の良くなる方向に向きを変えてもらう）に期待することになるのであろうか。

5. 伝搬チャネルモデル

無線通信システムの回線設計は、チャネルモデルを用いてなされる。その伝搬部分を対象とするのが伝搬チャネルモデルである。前章で述べたLMSS伝搬特性は伝搬チャネルモデル構築のための基礎データであり、モデル化に必要な情報の内のごく一部である。そのため、モデルの構築に際しては、「細心にして大胆な」発想が求められる。先ずニーズを満たす機能を有するその時点でのベストを作り、データの充実によってより良いものに変えてゆくという姿勢である。以下では過去の歴史を踏まえ、筆者等が行っているモデル化の試み^{(35),(36)}を紹介する。

5.1 基本的統計分布の物理的イメージ

本稿ではLMSS伝搬チャネルモデル（以下、単に伝搬モデルと呼ぶ）として、正規分布をベースとするレイリー分布（あるいは、レイリーフェージング）や伸上-ライス分布（伸上-ライスフェージング）、真値の対数が正規分布する対数正規分布を紹介する。大部分のモデルはこれらの組み合わせを工夫する形で提案されている。まず、その理解を確かなものとするために、これらの物理的イメージを簡単に述べる。

正規分布は、確率変数 x の確率密度関数 $p(x)$ が、

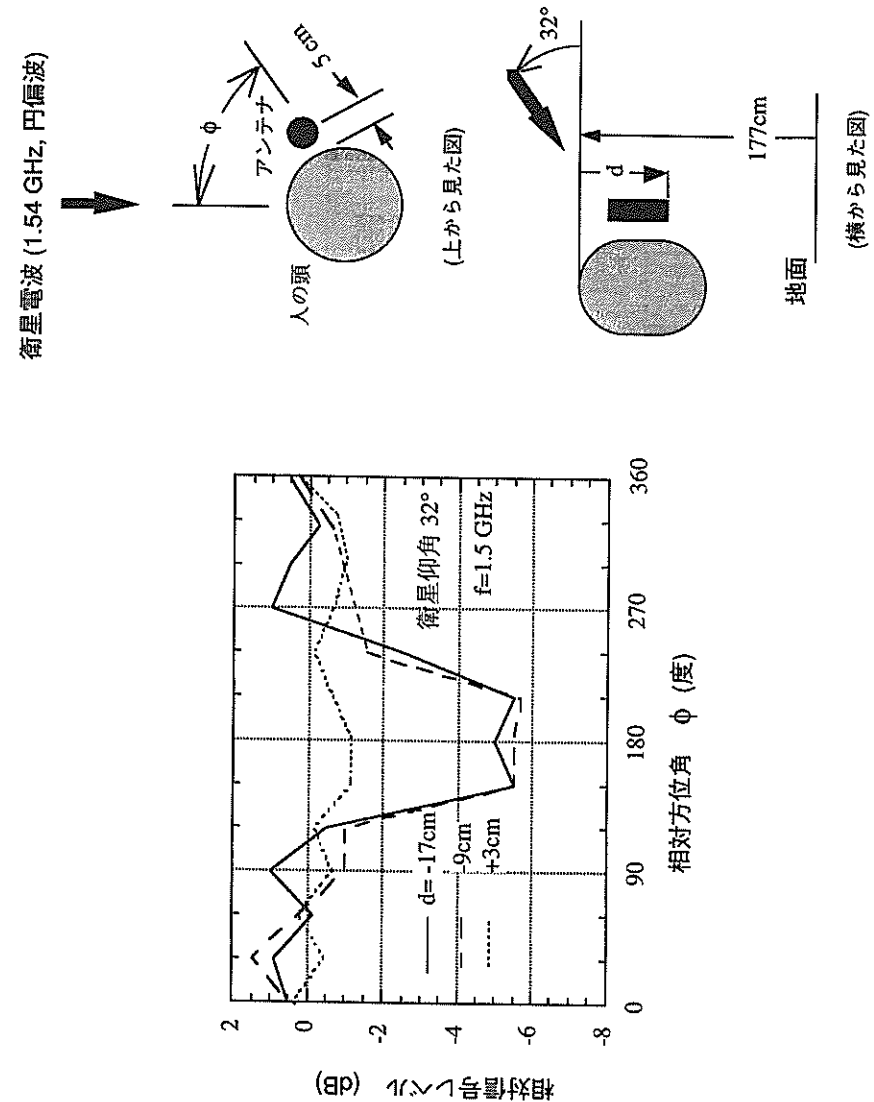


図16 人間頭部が受信強度に与える影響⁽³⁴⁾
(文献⁽³⁴⁾と d の与え方が異なるが、これが正しい)

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

となるものをいう。ここで、 μ は x の平均値、 σ は標準偏差である。今ここに、独立な確率変数 x と y があり、共に平均値が0、標準偏差が同じ(σ)のとき、次式で表わされる振幅 r の分布がレイリー分布(関数形省略、文献(12)参照)である。

$$r = |x + jy| (= \sqrt{x^2 + y^2}) \quad \dots\dots\dots(2)$$

レイリー分布は、位相のランダムな波が多数集まった時の信号の強度に現われる。直接波がなくなり、たくさんの散乱波だけが受信される地上系移動通信の電波環境が代表的な例である(同程度の振幅の波であれば、5波集まればかなり良いレイリー分布となることが知られている)。このように、振幅の変動がレイリー分布する伝搬環境をレイリーフェージング環境と呼んでいる。

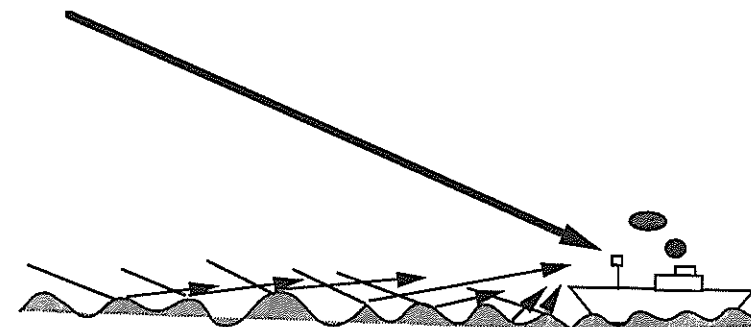
このレイリーフェージングに定常波(通常のケースでは直接波)が1波加わった電波の強度が伸上ーライス分布となる(式(2)の x を $1+x$ と置き換えたもの)。図17は伸上ーライスフェージング環境が現われやすい具体的な例として、海事衛星通信における海面反射フェージング(a)と、LMSSの市街地における状態Aの電波環境(b)を示している。図で直接波(太線の矢印)が無い状態がレイリーフェージング環境である。

次に対数正規分布を考える。対数正規分布は、確率変数 x の対数($\log x$, dB値等)が正規分布するものを言う。これはどうい

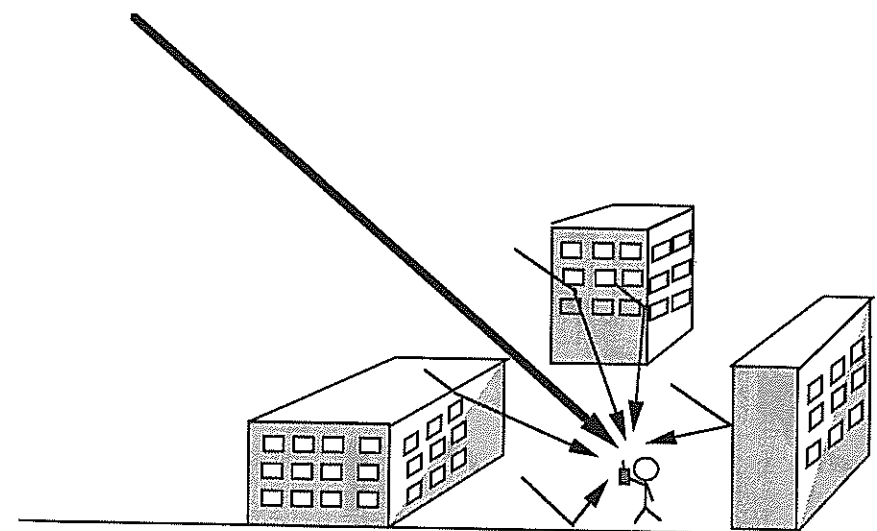
う物理的イメージであろうか? 正規分布を多数のランダムなものの和の分布と考えるとき、対数正規分布は多数回の積の分布と言える(対数をとったものが和になる→正規分布)。伝搬路の途中で何回も伝搬障害に会って、その都度ランダムに強度を弱めながら、受信点にたどり着いたときの電波の強度を近似する分布といえる。図18にはこの例として、層の厚い樹木中を伝搬する例(a)と、市街地で見通し外の電波が伝搬する場合(b)を示している。前者の例はLMSS伝搬を対象としたLooのモデル⁽³⁷⁾の中に、後者の例は、移動伝搬における短区間中央値変動⁽¹²⁾として、伝搬モデルの中に取り入れられている。(実際に、図18の様な例が、対数正規分布するかどうかの定量的な評価はまだ十分ではない。しかしながら、分布の持つ物理的な性質を反映しているという点で、筋の良い近似であると筆者は思っている。)

5.2 従来のLMSS伝搬チャネルモデル

LMSS伝搬環境における信号劣化を推定する方法として、ITU-R (SG 3)ではERS法(Empirical Roadside Shadowing model)を勧告している⁽³⁴⁾。これは文字通り、街路樹に覆われた道路での伝搬データ(図6(b)の様な環境、図18(a)のイメージ)をベースに構築された経験的なモデル⁽²⁵⁾なので、これが適用できる範囲は限られている。その限定された範囲(周波数1.5 GHz、場所率80%~99%、衛星仰角20°~60°)での信号強度の低下量と衛星仰角の関係を図

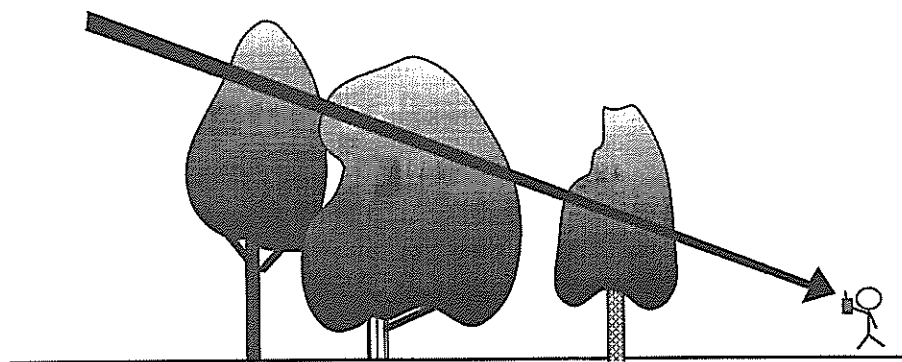


(a) 海面反射フェージング

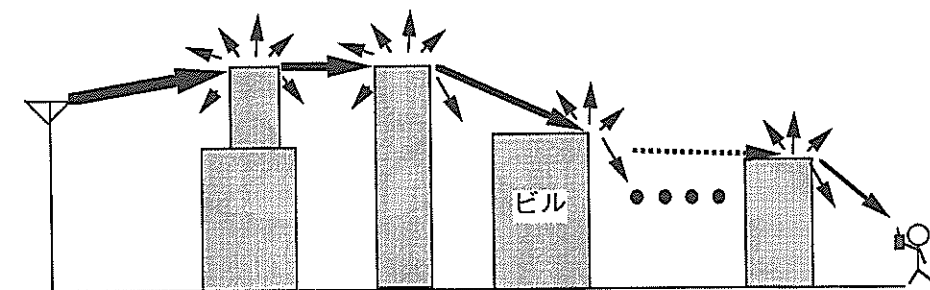


(b) LMSSの市街地環境における「状態A」

図17 伸上ーライスフェージング環境の例(図中の直接波が無い環境がレイリーフェージング環境である)



(a) 層の厚い樹木中を伝搬する例



(b) 市街地で見通し外の電波が伝搬する例

図18 対数正規分布型フェージング環境の例

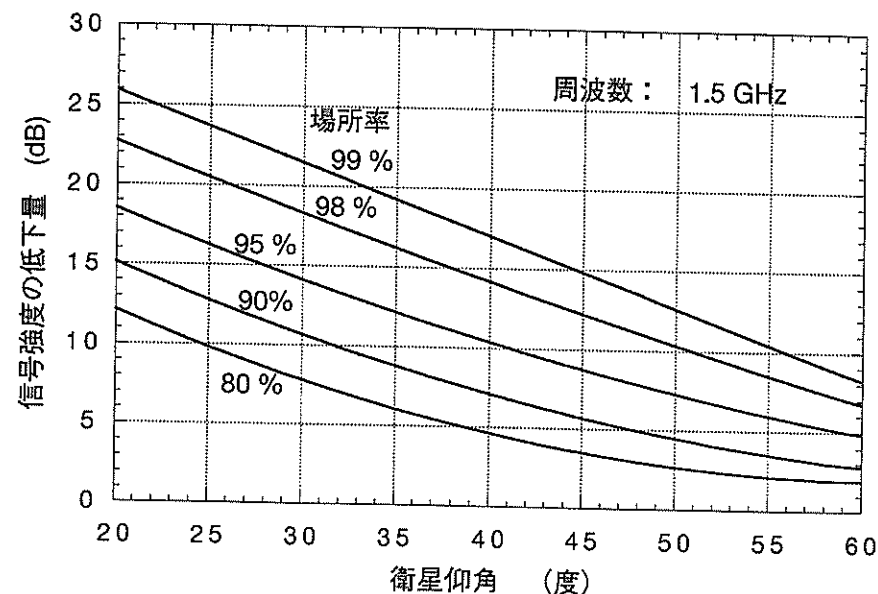


図19 ITU-R 勧告手法 (ERSモデル) で算定した場所率に対応する信号劣化量と衛星仰角の関係

19に示す。このように、適応範囲に多くの制約があるので、後述する衛星ダイバーシチ等種々の伝搬環境での評価が求められるようなケースには適していない。以下では、確率統計理論に基づく従来技術を述べ、その特徴と限界を明らかにする。

LMSS伝搬環境を表現するモデルとしては、図20に示す3つの確率統計モデル (a) Loo model⁽³⁷⁾, (b) Lutz model⁽³⁸⁾, (c) Barts & Stutzman model⁽³⁹⁾ が提案されており、歴史的にも(a)→(c)の順である。Looモデルは、図17 (b) に示した仰上-ライスフェージングモデルが定常波 (=直接波) のレベル変動を考慮していないのに対して、直接波の樹木による変動を対数正規分布として考慮している。本モデルは基本的に状態

Bを表記するのに適したモデルであり、一回のパラメータ設定で、他の状態 (A,C) を含めることが出来ない。Lutzモデルは2つの状態 [状態BとC] の複合確率を表現できるので、Looモデルより柔軟性があるが、状態Aの表現ができない (状態A用にパラメータ値を設定すれば状態Bが表現できない)。Barts & Stutzman モデルも同様に2状態モデル (この場合は状態AとB) であるが、これには状態Cが含まれない。

ここまで述べると、必然的な帰結として状態A,B,Cを含んだ3状態モデルがより広い範囲を含んだ一般的なモデルとして浮かび上がって来よう。

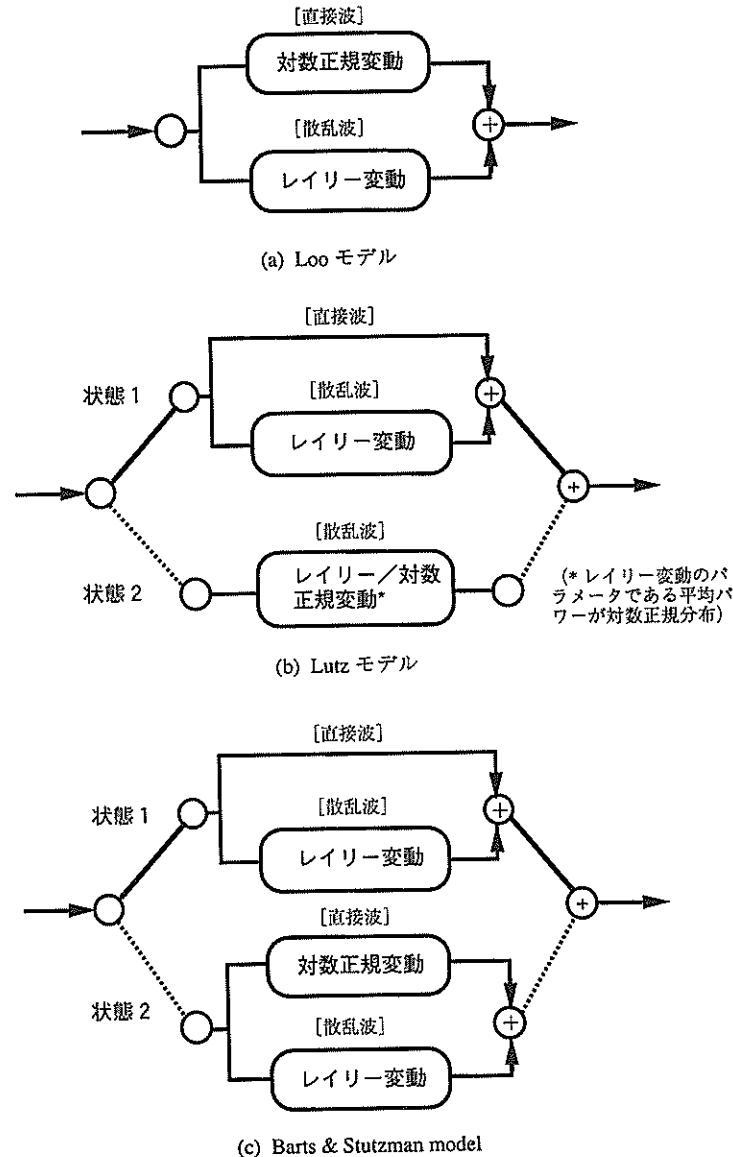


図20 これまでに提案されている確率統計モデル

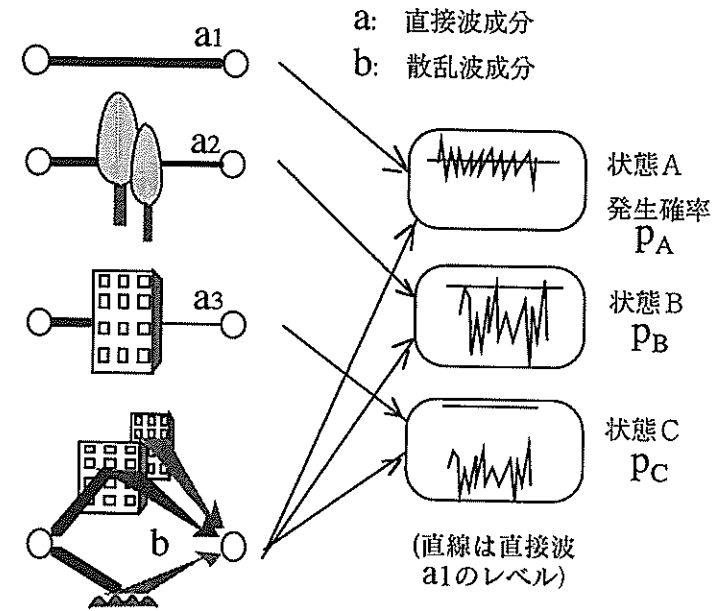


図21 LMSS伝搬劣化要素の分類と各状態の対応

5.3 3 状態モデル

統計モデル

LMSS伝搬路を図21に示すようなエレメントの選択又は組み合わせで表現する。図21でaは直接波のパスで、見通し内 [a_1]、樹木等による中程度の遮蔽 [a_2 : 数dB~10dB程度の遮蔽]、強い遮蔽 [a_3] を表し、bは散乱波[地面反射波や周囲構造物による反射波・回折波]である。ここでは、図7に示したような3つの伝搬状態(状態A: 見通し内伝搬の状態、状態B: 樹木等による中程度の遮蔽が存在する状態、状態C: ビルや山等により直接波が完全に遮蔽

されている状態)によって表現する伝搬チャンネルモデル^{(10),(35)}を紹介する。この場合、状態A、B、Cはそれぞれ $a_1 \cdot b$ 、 $a_2 \cdot b$ 、 $a_3 \cdot b$ の組み合わせで表現できる。図22はこれを伝送路モデルとして表現したものである。全体としての信号強度の確率密度関数 $p(x)$ (信号強度が $x \pm \Delta x/2$ の範囲にある確率を $p(x) \Delta x$ で表わすことができる確率密度)は次式で求められる。

$$p(x) = p_A f_A(x; P_{r,A}) + p_B f_B(x; m, \sigma, P_{r,B}) + p_C f_C(x; P_{r,C}) \dots \dots \dots (3)$$

信号強度の累積確率分布(信号強度 x がある値 x_0 より大きくなる確率)は、確率密度

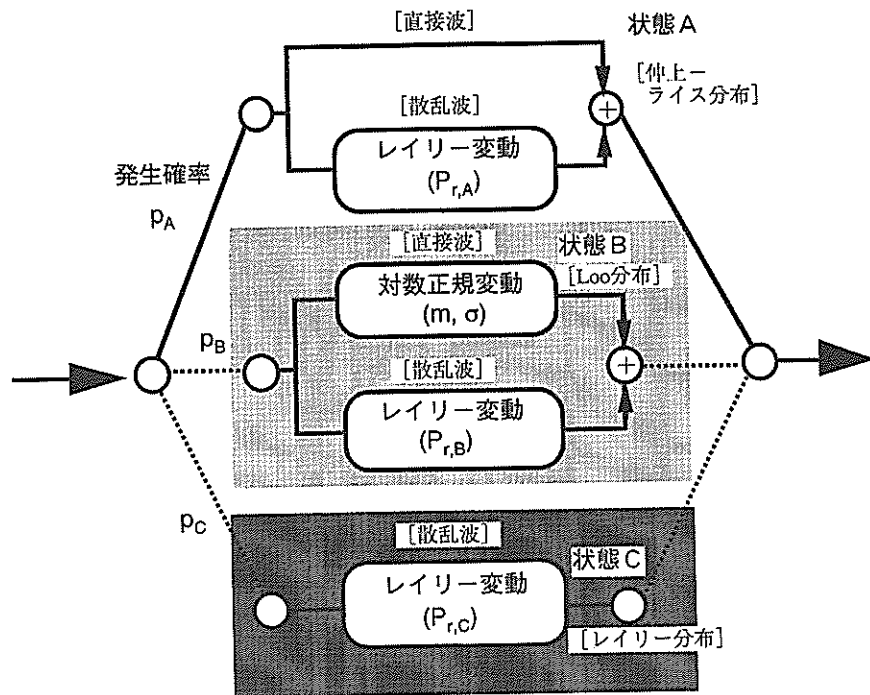


図22 LMSS伝搬チャネルモデル(3状態モデル)

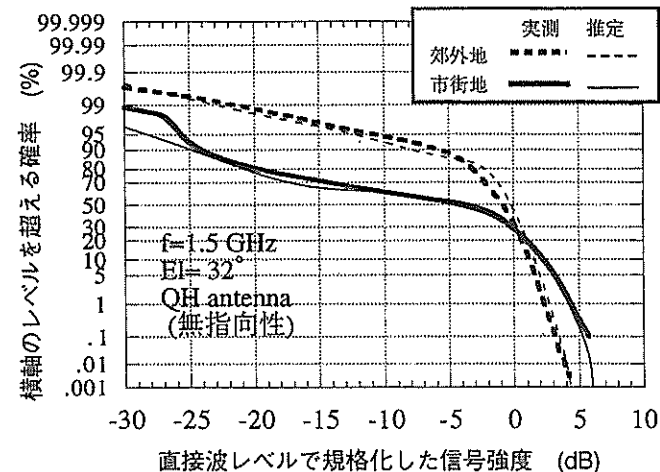
関数の積分で与えられ、

$$\text{prob}[x \geq x_0] = \int_{x_0}^{\infty} p(x) dx \quad \dots\dots\dots (4)$$

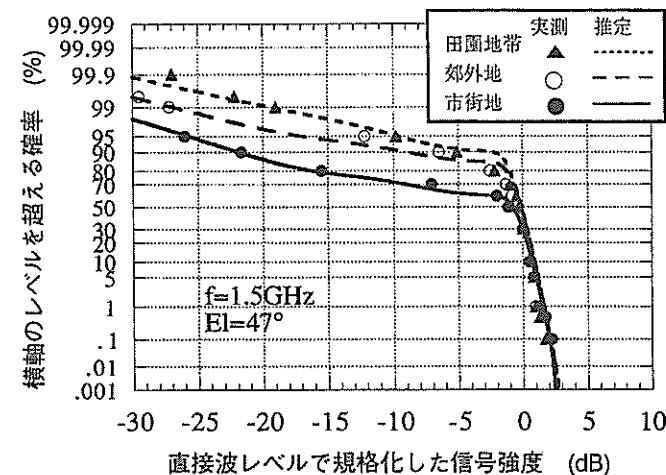
となる。ここで、各状態の信号強度の確率密度関数 f_A, f_B, f_C はそれぞれ、伸上-ライス分布、Loo分布、レイリー分布である(関数形表示省略)。このモデルで用いる伝搬パラメータは以下の8つ(そのうち独立なものは7つ)である。

- p_A, p_B, p_C : 状態 A, B, C の発生確率
(ただし、 $p_A + p_B + p_C = 1$)
- $P_{r,A}, P_{r,B}, P_{r,C}$: 状態 A, B, C における平均散乱波電力
- m, σ : 状態 B における直接波成分の信号強度 (dB 値) の平均値 (m) と標準偏差 (σ)

このモデルは、実際のデータを非常によく説明づけできる。図23 (a) は KDD がインマルサット衛星を用いて行った伝搬実験のデータ(受信レベルの累積場所率)を、本モ



(a) インマルサット衛星電波受信実験結果⁽³⁶⁾との比較



(b) ETS-V衛星電波受信実験⁽³⁰⁾との比較

図23 3状態モデルによる既存データに対するフィッティング

デルのパラメータを適当な値に設定することによって、カーブフィットさせた結果である⁽³⁶⁾。同図 (b) は CRL の ETS-V 実験データ (図 15 で紹介) との対応である⁽²³⁾。カーブフィットした後のパラメータの値は文献 (23) の表 1 にまとめているが、例えば、図 23 (a) のデータについては、状態 A, B, C の各々の発生率 (p_A, p_B, p_C) は、市街地で 55%, 10%, 35%, 郊外地で 85%, 13%, 2% を得た。また、状態 A における平均散乱波電力 (P_{rA}) は -8dB (市街地)、-13dB (郊外地) であった。いずれも妥当な値に思われる。筆者等がカーブフィットを行なった経験から、上記の 8 つのパラメータの内、 p_A, p_B, p_C, P_{rA} がカーブの形状を大きく支配すること、それ以外のパラメータの数値に対しては、それほどセンシティブではないことが分かった。故に、上記 4 つのパラメータ以外のパラメ

ータについては、その推定が準マイクロ波帯周波数を対象とするものであれば、文献 (23) の表 1 の値 ($P_{rB} = -15\text{dB}, P_{rC} = -20\text{dB}, m = 10\text{dB}, \sigma = 3\text{dB}$) を推奨値として用いることを提案する。これらの値は、前章で述べた伝搬測定結果とも符合している。

以上によって、3 状態モデルが単一衛星での LMSS チャネルモデルとして妥当であることが確認できたと思う。そこで、次章での衛星ダイバーシチ検討の際には本モデルをベースとする。ただし、パラメータ値そのものについては、今後より広範な測定によって精度を上げて行く努力が必要なのは言うまでもない。

状態遷移の表現 (マルコフモデル)

状態変化の時間的推移の性質を知ることが、高信頼回線がどの程度の時間持続し得

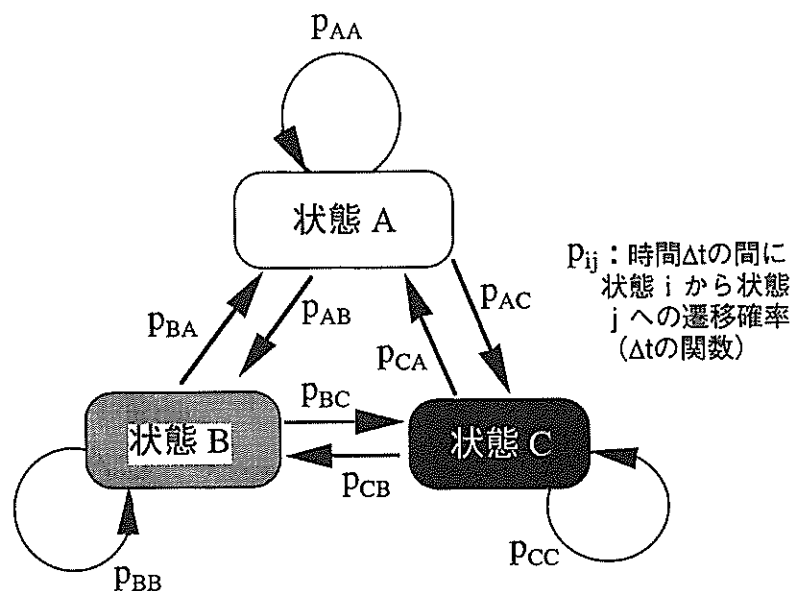


図 24 3 状態の遷移を確率で表わすマルコフモデル (シャノン線図)

るかを評価する際に重要となる。これに適した表現方法としてマルコフモデルがある。マルコフモデルは、現在の状態から時間 Δt 後の状態を予測する際、全ての状態間の遷移確率を予め求めておき、その確率に従って状態を遷移させる動的なシミュレーションに適している。本稿のモデルは 3 状態での表現を基本としているので 3 状態マルコフモデルであり、図 24 で表現できる。状態 i から状態 j への遷移確率 p_{ij} (i, j は A, B, C のいずれかに対応) は時間間隔 Δt 、各状態の発生確率と平均持続時間等に依存する。また、平均持続時間はビルや樹木等现象を発生させるものの物理的な大きさ、移動体や衛星のスピードに依存する。これらを考慮した LMSS 伝搬環境表現用マルコフモデルを文献 (31) で提案している。遷移確率 p_{ij} の数式表現等の詳細は同文献を参照されたい。

ここでは状態間の推移のモデルを述べたが、これは信号レベルの時間的変動全体で見ると long-term 変動を考えたことになる。実際には各状態の中でそれぞれの確率密度分布と周波数スペクトルに従った瞬時変動 (short-term 変動) が起こっているが、次章で述べる衛星ダイバーシチは、long-term 変動に従って衛星切り替えを行なう方法であるので、瞬時変動 (short-term 変動) の詳細についてはここでは触れない。

5.4 LMSS-V と LMSS-P

これまでに提示したデータは、いずれも LMSS-V 環境で測定されたデータである。それらから分かることは、市街地での LMSS-V サービスは 20dB 以上の減衰が頻繁に発生

し、(当然予想されることであるが) 通信品質 (LQ) の確保は絶望的である。では LMSS-P でも同じであろうか? 何らかの方法によって、衛星の見通しが確保できる場所を見つければ、しばらくは (静止衛星の場合はずっと) その状態が維持できるので、通信が可能である。このような場合は衛星の見通し率 (p_A) が、サービス稼働率 (SA) にほぼ対応したものとなる。

図 3 に示したように、LMSS-V の場合には状態 A, B, C 全てが含まれてサービスエリアとなるが、LMSS-P では状態 A+B (あるいは状態 A のみ) がサービスエリアとなるであろう。図 25 は図 23 (a) から抽出したパラメータ値 (前述) を用い、状態 A, B, C を全て含むもの (LMSS-V に相当する環境)、状態 A+B の場合 (ほぼ LMSS-P の伝搬環境)、および状態 A のみの場合 (LMSS-P の最も理想的な伝搬環境) の信号強度の累積分布を示している。もちろん、LMSS-P としての定量的評価や最適なパラメータ値の決定は、より多くの実測データが必要であり、今後の研究課題である。これを踏まえた上で、図 25 の意味するところを述べる。一例として「信号強度がしきい値レベルより大きい状態が全時間の 99% 以上となること」が求められる場合を考える。これを満たすためにはマージンとして、LMSS-V、LMSS-P (状態 A+B)、LMSS-P (状態 A) では、それぞれ 35dB (図の範囲外)、18dB、8dB となる。通信方式の工夫によって上述の 99% が 95% に置き換えられれば、上述の値は、29dB、12dB、5dB と緩和される。後者のケースにおいてマージンが 15dB であるとすると、市街地においても LMSS-P (状態

A+B) のサービスは可能になる。また、状態 A,B,C の発生確率が 55%、10%、35% であったことから、このマージンを設定すれば 65% のエリア p_A+p_B で近似：ただし道路上の) でサービスが可能であると推定できる。このマージンがとれない場合には、例えばマージンを 5dB[95%] として状態 A のみをサービス対象とする、その場合の SA はおよそ 55% (p_A の値) である、という様なことが図から読み取れる。(以上は図の見方を説明したもので、具体的な値については、衛星仰角や都市構造によって異なることに注意)。

上記の解釈は静止衛星を用いるシステムに対してはそのまま利用できる。周回衛星の場合には、ほとんど定地点で通信を行な

う LMSS-P のようなシステムに対しても、伝搬路が時々刻々かわるのでモデルにもパラメータ値にも時間変化を考慮する必要がある。よりよい稼働率を得るための手段として次章で述べる衛星ダイバーシティがある。

5.5 広帯域デジタル伝送特性

移動体衛星通信も、将来は ISDN の一つのパイプを担う時代になって画像信号等広帯域な情報伝送が指向されると考えられる。又、現在においても多元接続には TDMA 方式 (時間分割多元接続方式) や CDMA 方式 (符号分割多元接続方式) が検討されており、このように多重化された信号はそれ自身広帯域性を有している。本節では

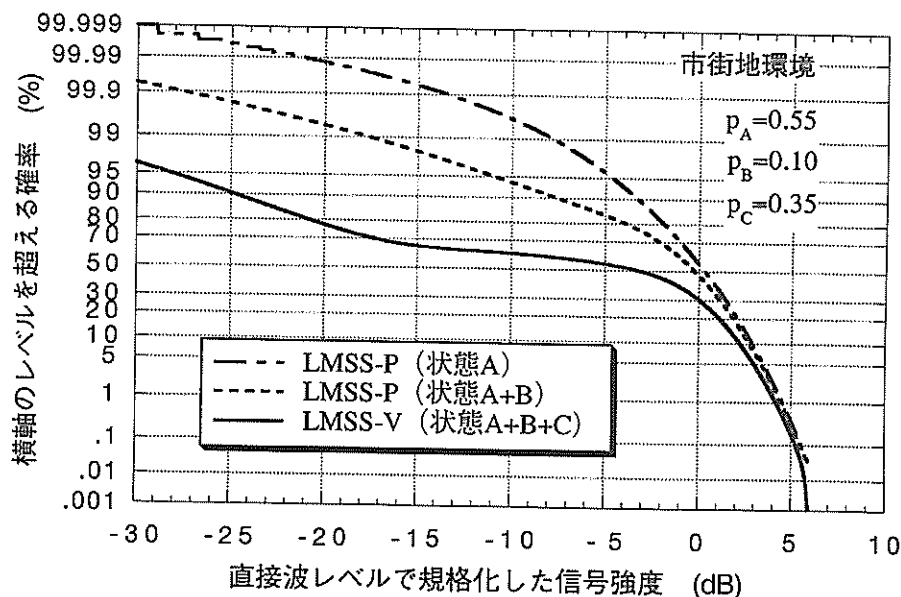


図25 市街地環境におけるLMSS-VとLMSS-Pの信号劣化特性 (パラメータの設定は図23 (a) の市街地データを想定)

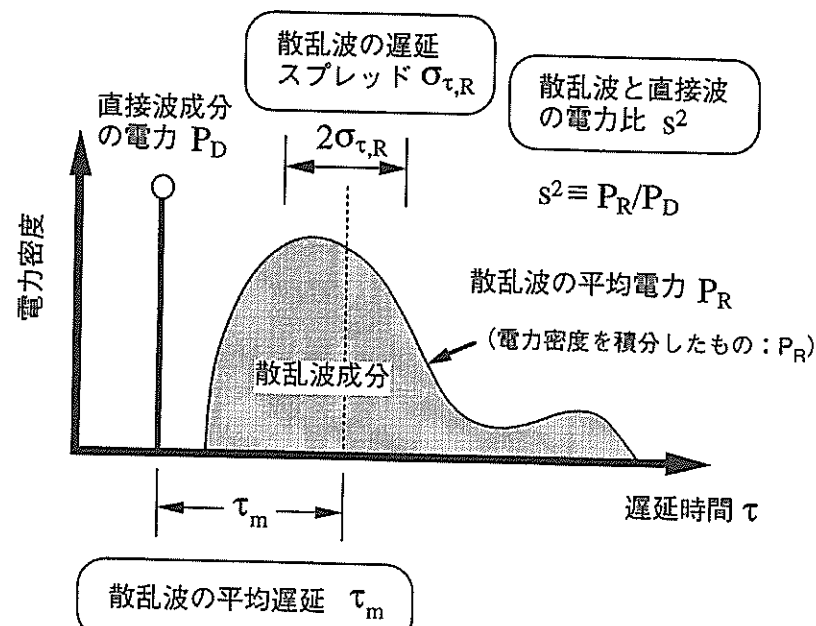


図26 伸上ライスフェージング環境の遅延プロファイル (模式的な表現) (伸上ライスフェージング環境のキーパラメータを囲みで明示)

LMSS伝搬環境のうち状態A (見通し内伝搬環境) において、特別な対策なしでどの程度の高速度データが伝送可能かを述べる。状態Aの伝搬環境は伸上ライスフェージング環境である。

通常、伝送時の誤りは、受信レベルが低下したとき熱雑音によって生じる。伝送信号が広帯域になってくると、散乱波の遅延の広がり (遅延スプレッド) が変調信号の1シンボルの時間長に対して無視できない大きさになり、伝送波形の歪によって誤りが生じるようになる。この誤りは符号間干渉誤りと呼ばれ、信号強度を強くしても改善できない限界値 (エラーフロア) を持つので、軽減不能誤り (irreducible error) と

も呼ばれている。このようなエラーフロアを生じるフェージングの周波数特性を見ると、その帯域内で信号を良く通す周波数成分と通しにくい成分がはっきり現れており、周波数選択性フェージングになっている。これに対して、熱雑音が誤りの発生要因となる狭帯域信号の場合は、フェージングの信号帯域内の周波数特性が平坦なため、周波数選択性フェージングと区別して周波数フラットフェージング (あるいはフラットフェージング) と呼ばれている。

筆者等は先に伸上ライスフェージングにおける符号間干渉誤りのエラーフロアを簡易に算定するモデル (=等価伝送路モデル) を提案しており⁽⁴⁰⁾、本節の検討にはこれを

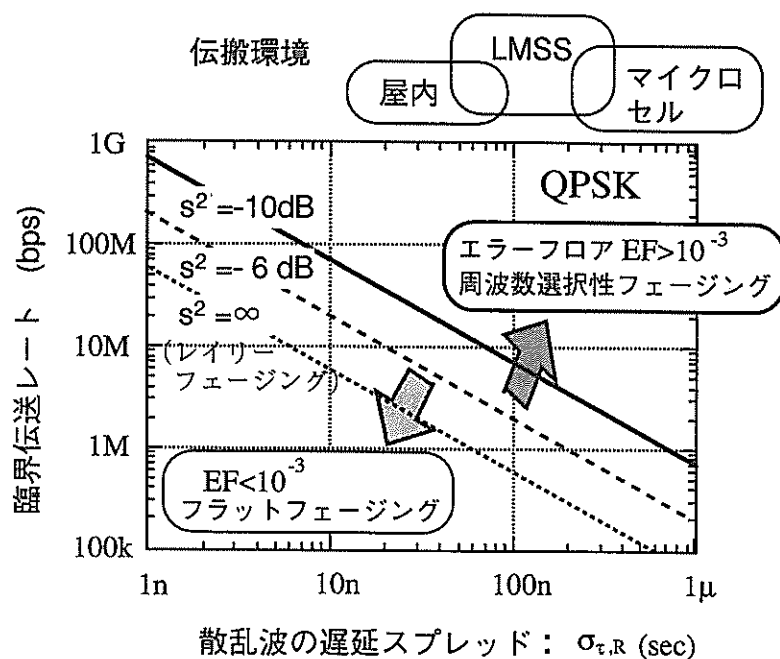


図27 QPSK方式の「臨界伝送速度（エラーフロア＝ 10^{-3} に設定）」と「散乱波の遅延スプレッド」の関係

適用する。

仰上ライスフェージング環境下での符号間干渉誤りは、主として3つのパラメータ[「散乱波の平均電力と定常波電力の比(s^2)」、「定常波の遅延を基準とする散乱波の平均遅延(τ_m)」、「散乱波の遅延スプレッド($\sigma_{\tau,R}$)」によって支配されている。図26は仰上ライスフェージング環境の遅延プロファイル(遅延を伴う散乱波の平均電力密度を遅延量の関数として表現)の一例と上記3つのパラメータを示している。この3つのパラメータは広帯域デジタル伝送特性に本質的に作用しているので、筆者等はこれをキーパラメータと呼んでいる⁽⁴⁰⁾。

移動体衛星通信の広帯域伝搬特性の測定結果やこれに関連する伝搬データは極めて限られている。比較的高仰角のデータによれば、「散乱波の平均電力と定常波電力の比(s^2)」が5～15dB、定常波の遅延を基準とする散乱波の平均遅延(τ_m)と「散乱波の遅延スプレッド($\sigma_{\tau,R}$)」のそれぞれが0.1 μ s程度と見積られる^{(41),(42)}。上記モデルにおいて広帯域伝送特性の具体的な検討を行なう場合にはこれらの値が目安になろう。

QPSKの場合の符号間干渉誤り(BER)の限界値(エラーフロア) 10^{-3} を周波数選択性フェージングとフラットフェージングを分けるしきい値とすると、このしきい値に対応す

る伝送情報レート(臨界伝送レート)は図27となる。臨界伝送レートより低速な伝送では熱雑音が、高速な伝送では符号間干渉が、誤り発生に支配的になる。同図は散乱波の遅延スプレッド(直接波を含んだ全体の遅延スプレッドでないことに注意)に対する臨界伝送レートを散乱波と直接波の平均電力比をパラメータとして示している。伝搬環境でLMSSと示した部分で、かつ電力比 s^2 が-6dB、-10dBの線に着目すると、LMSS伝搬環境においては1Mbps以内の伝送レートであるならば移動体衛星通信のフェージング環境は周波数領域においてフラットフェージングとして取り扱うことができることが分かる。一方、将来の広帯域伝送(例えば10Mbps以上。この場合は搬送波周波数をより高い周波数とする必要があるだろう)を検討する際には、それが周波数選択性フェージングとなるので、何らかの符号間干渉誤り対策が必要となる。

6. 衛星ダイバーシチ

上述のように陸上移動体衛星通信(LMSS)では伝搬路しゃへの確率がかなり高く、かつ、それを克服するような大きな電力マージンをとることができないので、その対策技術が重要である。

無線通信では伝搬劣化の対策としてダイバーシチ技術がよく用いられる。降雨減衰が問題になる場合には、降雨域(降雨セル)の大きさより離れた2地点で受信し、信号劣化の小さいほうの局を選択して受信することにより、良好な通信品質が保たれる。移動体衛星通信の場合にも、遮蔽物の大き

さ以上の距離で同時に受信すれば、衛星見通し確率を高くすることができるが、個々の移動体を通信の対象としているので現実的ではない。又、マルチパスフェージングに対しては、電波の波長程度に離れた二つのアンテナで受信するスペースダイバーシチ方式が効果がある。しかしながら、衛星見通し状態(すなわち状態A)でのマルチパスフェージングの影響は小さく、また、見通し外状態で発生する大きな信号劣化はスペースダイバーシチでは救えない。このように従来技術では、本質的な問題は解決できないように思われる。

他に、ビル影や屋内、あるいは地下街等、本質的に電波が届かない不感地の対策として、見通しの良いところで電波を受信し、この信号をリピータを介して伝送し不感地帯内のアンテナから再放射させ、その電波の届く範囲をサービスエリアとする方式がある。この方式は有力な高稼働率化技術であるが、局所的なものでケースバイケースとなるので、ここではこれ以上触れない。

本章では、将来の技術として検討が進められ、かつ、高稼働率化の切り札と期待される衛星ダイバーシチを取り上げ、電波伝搬の視点からその効果を述べる。

6.1 衛星ダイバーシチの原理

回線断の無い通信を行うためには、空を見上げたとき、その視野の中に少なくとも1機の衛星が常時存在することが必要条件である。その地域を衛星のゾーンがカバーしていても、ビル等による遮蔽があれば、その場所では通信ができない。周回衛星の場合

は、今見えていても、時間がたてば衛星の位置が変わり、やがて見えなくなるかもしれない。この対策として、衛星数に余裕を持たせ1地点で複数の衛星にアクセス可能とし、その中から常に最適な衛星（＝見通し内にある衛星）を選択して通信を行う衛星ダイバーシチがある⁽⁴³⁾。この方法をとれば、見通しのある衛星を捕える確率が格段に上がるので、大きな稼働率の向上が期待できる。図28は衛星ダイバーシチのイメージ図であり、地上の移動体が常に最適な衛星にパスを切り替えつつ通信回線を維持して行く様子を示している。地上に端末をおいて通信する場合でも周回衛星では時々刻々衛星方向が変わって行くため、同様のダイバーシチ方式によって通信の高信頼性が図られる。

図29は3つの衛星のゾーンが重なる地点において、衛星ダイバーシチを適用したときの各衛星電波の受信状態推移とダイバーシチ効果を模式的に示したものである。実際には、衛星の見通しがある状態（状態A）の中でもレベルの瞬時変動（short-term変動）が絶えず存在し、他の衛星の受信レベル変動との比較において強度の逆転が頻繁に発生する場合がある。理想的にはそのような瞬時変動を含めて衛星ダイバーシチを行なうことである。しかしながら、状態Aで発生するフェージングで通信品質が問題となる設計はシステムとしての堅牢さに欠けること、高速切り替えに伴う回線制御の複雑性が極めて大きくなること等で、現実的ではないように思える。又、送受信が異なる周波数で運用されるシステム（例えば、

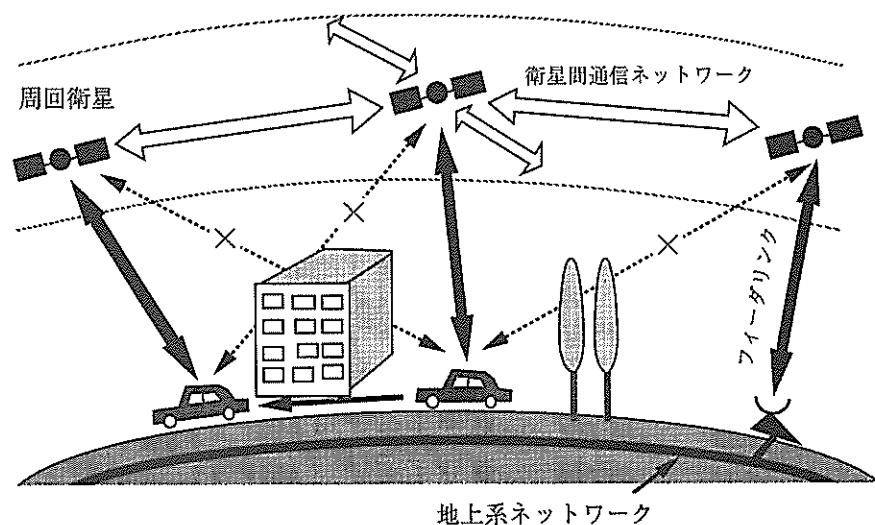


図28 非静止衛星通信システムにおける衛星ダイバーシチのイメージ

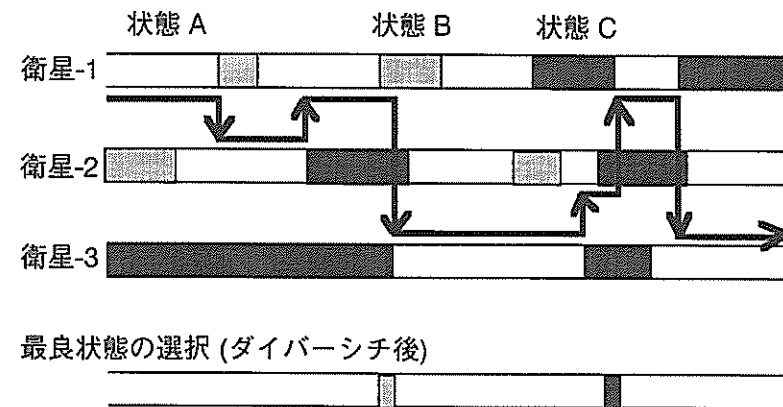


図29 3つの衛星のゾーンが重なる地点において、衛星ダイバーシチを適用したときの、各衛星電波の受信状態推移とダイバーシチ効果（概念図）

up-link:1.6GHz, down-link: 1.5GHz) では、見通し内伝搬状態（状態A）における両リンクの信号の瞬時変動には相関がなくなるので⁽⁴⁴⁾、送受信独立な制御が必要となり、これも瞬時変動まで考慮したダイバーシチを行なう際の課題点となる。故に、本稿で提示するダイバーシチの効果は、図29に示したように状態間の変化（すなわち、ある程度時間的に緩やかな変化（long-term変動））のみに着目して衛星切り替えを行なう方法を採用している。

次節で示すような周回衛星の軌道を決めれば、それに対する衛星の時々刻々の仰角と方位が決まる。それに従って各パスごとの3つの状態の存在確率は、前章で紹介した3状態モデルによって決定できるので、ダイバーシチを行なった後の総合的な状態発生確率や信号強度の累積分布も確率の計算によって容易に求められる（具体的な計算式は文献(24)参照）。

ダイバーシチ適用時の状態の時間的遷移の様子も、先のマルコフモデルをエレメントとする状態選択モデルで評価できる。図30はこれをシミュレーションするときのフローで、一つ一つの衛星に対する伝搬路が3状態マルコフモデルで表わされ、全体のダイバーシチ伝搬路が形成される様子を示す。状態選択回路では視野に入っている複数の衛星の中から伝搬状態の最も良い衛星を選択する機能をもつ。周回衛星の場合は次々と視野内に衛星が現われ、やがては消えて行くが、衛星数を多くすることによって同一時間に常に複数の衛星が存在するようにできる。

6.2 衛星配置

図31は低軌道周回衛星システムにおいてサービスエリア内の任意の地点が最低 $N_{\min}$ 個=1,2,3個のゾーンで覆われるための衛星配

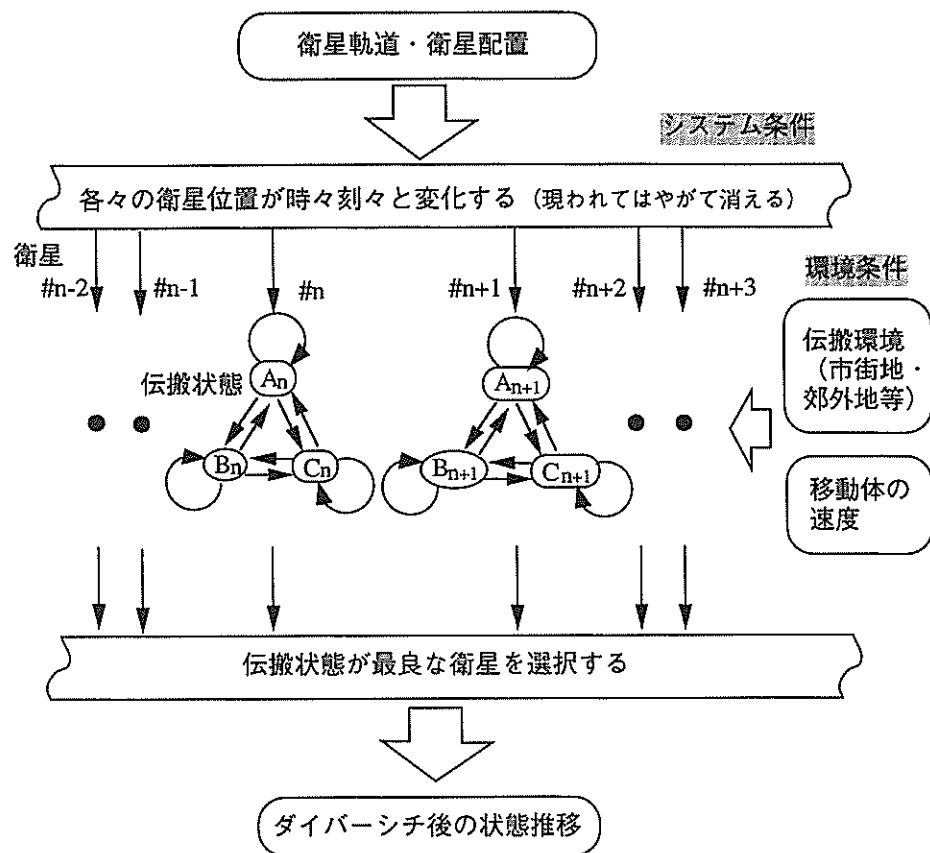
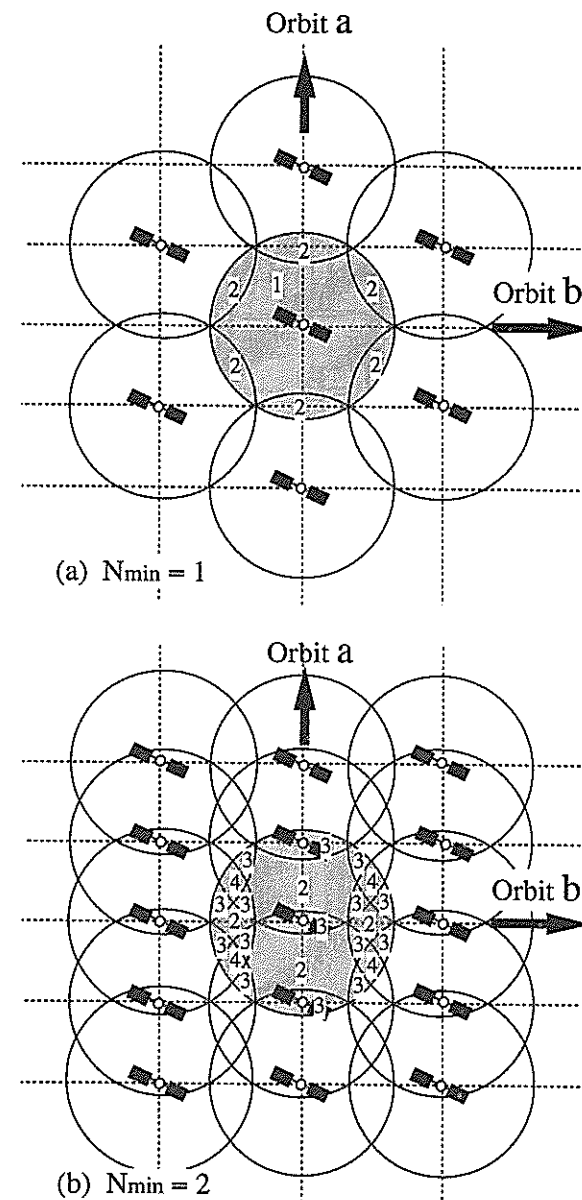
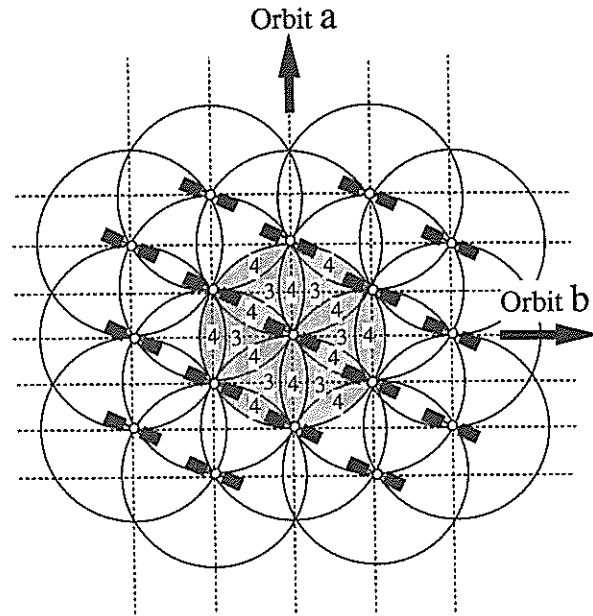


図30 マルコフモデルをエレメントとする衛星ダイバーシティ評価用シミュレーションフロー

置の例を示している（配置の仕方は種々考えられるのでここでは一例である）。図からも明らかに各衛星のゾーンのエッジ付近（＝伝搬状態が最も悪い）では、実質的に $N_{min}+1$ 個か、それ以上の数の衛星によるダイバーシティが可能である。図32は周回衛星システムの例として円形極軌道を想定し、衛星高度をパラメータとした運用仰角に対

する最低必要衛星数（ $N_{min}=1$ の場合）を示している。最低 N 機の衛星で任意のエリアをカバーしたい場合（ $N_{min}=N$ ）に必要な衛星数は図32の衛星数を N 倍することで見積もられる。例えば、高度1,000kmを想定し、運用仰角 30° 以上、 $N_{min}=2$ とするためには $400 (=200 \times 2)$ 個の衛星が必要である。テレデシックシステムでは840個の衛星を用いる





(c) $N_{\min} = 3$

図31 サービスエリア内の任意の地点が最低 $N_{\min}$ 個 [(a) 1, (b) 2, (c) 3] のゾーンで覆われるための衛星配置の例

計画であり⁽⁵⁾必要衛星数が数百というのは決して非現実的なものではない。

地上照射の効率性を考えると、衛星ビームのフットプリントは図31のようにほぼ一意的に決まるが、衛星の配置法には2通りある。一方は図に示したようにOrbit aが北を向く配置であり、他方はOrbit bを90°回転させて北に向けた配置である（ここでは極軌道を考えているため、矢印の方向が夫々の軌道の北になる）。Orbit aは一つの軌道上に多くの衛星を置く方式、Orbit bは軌道上の衛星数はaに比較して少ないが軌道

間隔が狭いことが特徴になる。たいした違いは無いように思われるかもしれないが、後述するとおりダイバーシチ効果に差が出てくる。

2つの軌道配置の差異については、移動体が軌道の真下にある場合（Case 1）と2つの軌道の中間に位置する場合（Case 2）の2つのケースで比較するとよい。移動体から低軌道衛星の動きを見た場合、軌道上での衛星の動きの方が（すなわち南北方向の動きの方が）地球の自転によって軌道が西に動いて行く速さ（すなわち東西方向の

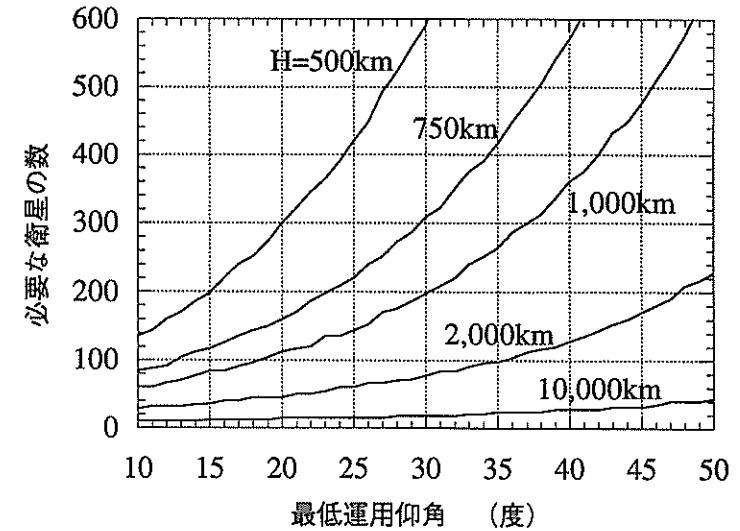


図32 衛星高度をパラメータとした運用仰角に対する最低必要衛星数 ($N_{\min}=1$ の場合、円形極軌道を想定)

動き）より数倍以上速いので、軌道上の衛星が衛星間隔分だけ動いた状態が、短期的な意味での衛星配置の一周期となる。図33は高度1,000km、最低運用仰角10°、 $N_{\min}=2$ の場合の、地上から見た衛星位置が徐々に変化して一周期分動いて行く様子を軌道の中間に位置する場合（Case2）に対して示したものである。Orbit a、Orbit b共に最初4機の衛星（○、●、△、▲）が、ある時間で2機（○、●）になり、やがて別の衛星が加わって再び4機（□、■、○、●）になる。東西方向のわずかなずれがあるもののOrbit aでは340秒、Orbit bでは580秒でほぼ同じパターンに戻る事が分かる。Orbit aは衛星が4機見える時間率が高いが、個々の衛星は低仰角に留まること、

Orbit bは衛星が4機見える時間率は小さいが、衛星が高い仰角にまで上がってくることが特徴である。

6.3 周回衛星システムにおける衛星ダイバーシチの効果

図31の軌道方向をOrbit a方向とした場合とbとした場合のダイバーシチの効果の違いは、以下のような形で現われる⁽²⁴⁾。

i) Orbit aはある地点で長期的に見れば（すなわちCase1とCase2で）電波環境の良否の変化が大きい配置、ii) Orbit bは比較的一様な電波環境をもたらす配置である。Case2で比較すると、市街地環境ではOrbit bの方がOrbit aよりダイバーシチ後の見通

H=1000km $N_{min}=2$ $\theta_{min}=10^\circ$ Case 2

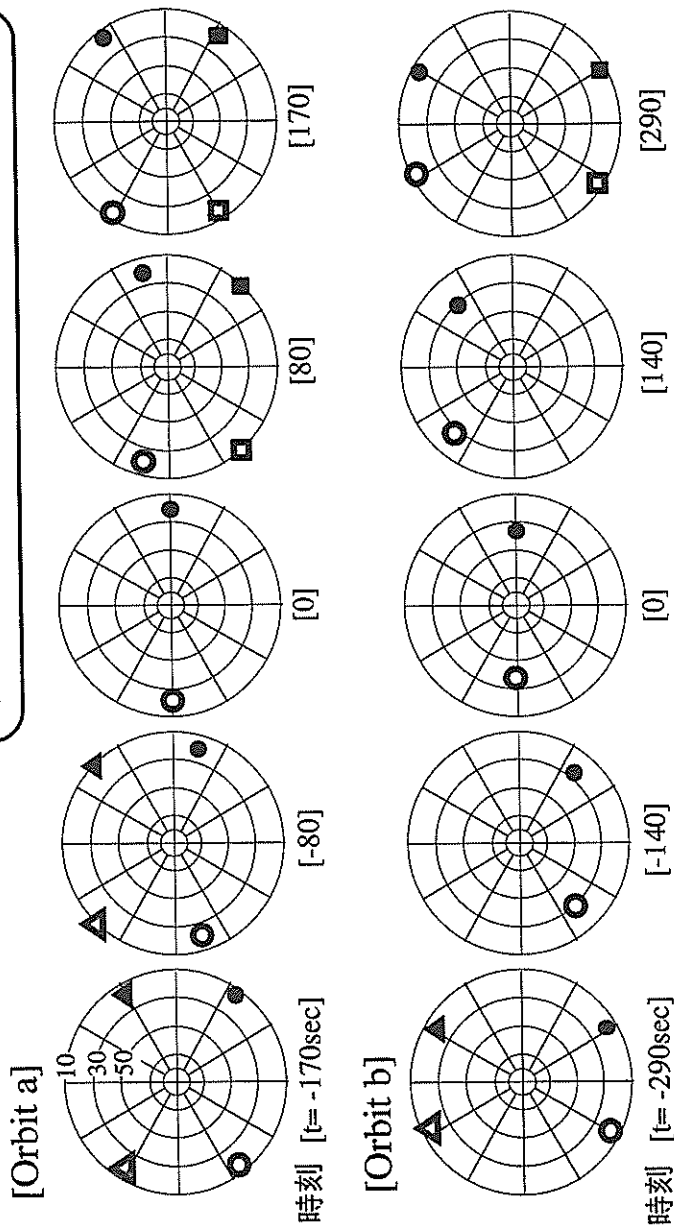


図33 2つの軌道 (Orbit a, b) の各々のCase 2における、地上から見た衛星位置の時間的推移 (緯度方向に対して5つ目の図で1周期)

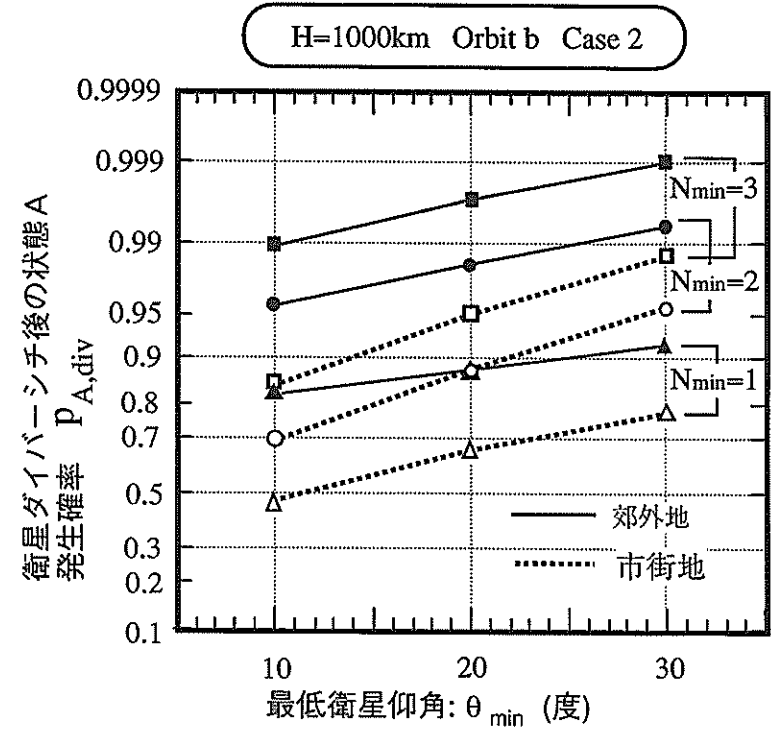


図34 最低同時可視衛星数 N_{min} をパラメータとした、最低運用仰角 (θ_{min}) に対する状態Aの発生確率 ($P_{A,div}$)

し率がやや大きくなる結果が得られているが⁽²⁴⁾、これはOrbit bの方がOrbit aよりCase2において高い衛星仰角が得られる効果が大きく働くためである。このため最悪のケース (すなわちCase 2) において、より良い電波環境が得られるOrbit bの配置が高稼働率を目指すシステムには適している。以下では、Orbit b, Case 2の場合についてダイバーシチ効果を述べる⁽²⁴⁾。

図34は、最低運用仰角 (θ_{min}) を 10° 、 20° 、 30° とし、最低同時可視衛星数 N_{min}

をパラメータとした状態Aの発生確率 ($p_{A,div}$) である。当然ながら、 θ_{min} が大きいほど、また、 N_{min} が大きいほど、状態Aの発生確率が高くなって行く様子が定量的に分かる。大部分の時間では実際の仰角は最低運用仰角 (θ_{min}) より高い位置にある (図33参照) ので、 $N_{min}=1$ に相当する図12の仰角特性と比べて、状態A発生率 (衛星見通し率にほぼ対応) はかなり高い値になっている。最低運用仰角 (θ_{min}) が 20° のシステムでは、 $N_{min}=1$ の場合に市街地における状態A発生

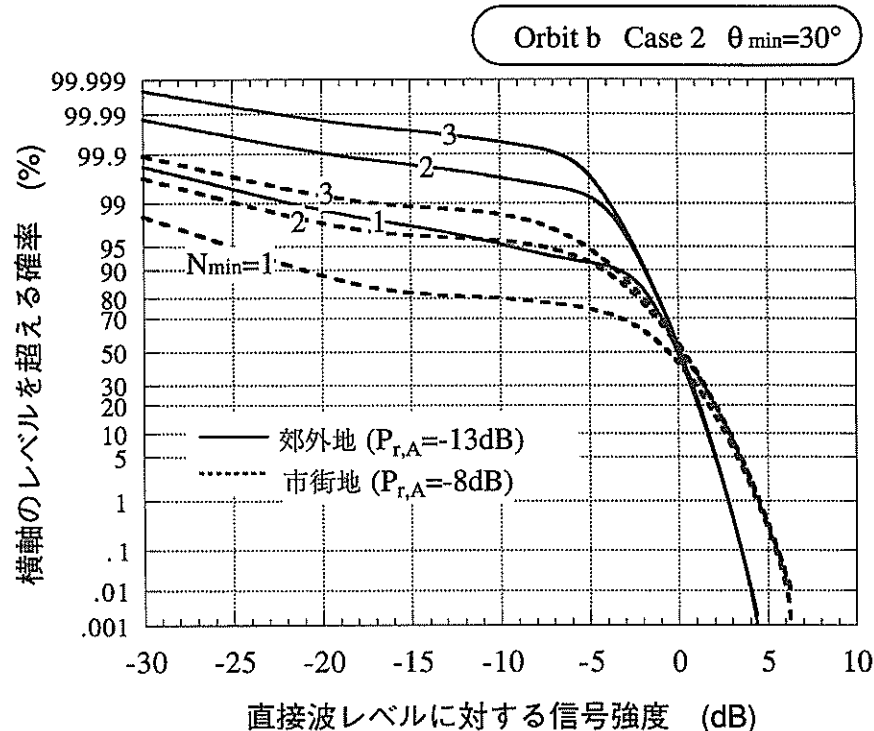


図35 最低運用仰角 30° の場合の最低可視衛星数に対する信号強度累積分布特性

率は約65%であるのに対して、 $N_{\min}=2$ の場合にはそれを85%まで高めることができること、同様に郊外地の場合は85%を98%にまで高めることができることを示している。

図35は $\theta_{\min}=30^\circ$ の6つの場合(市街地と郊外地、各々に対する $N_{\min}=1, 2, 3$)の信号強度累積分布(信号強度が横軸のレベルより大きくなる確率)の計算結果を示している。市街地と郊外地ではベースとなる伝搬特性($N_{\min}=1$)に大きな差があるが、両環境ともダイバーシチの適用によって大きな効果が得られることが分かる。たとえば、

通常の運用($N_{\min}=1$)において郊外地の1%のエリア(図の縦軸99%を見る)で20dB以上の減衰になるのに対して、2機で衛星ダイバーシチを行えば、20dBが5dBに軽減される。 $N_{\min}=2, \theta_{\min}=30^\circ$ を実現するためには、衛星高度1,000kmの場合で衛星が約400個必要であることは既に述べたが、このような配置が許されれば、かなり高品質(=高稼働率)な移動体衛星通信が実現できることが分かる。

なお、これまでの検討では照射ビームが図31のフットプリントを有する配置を想定

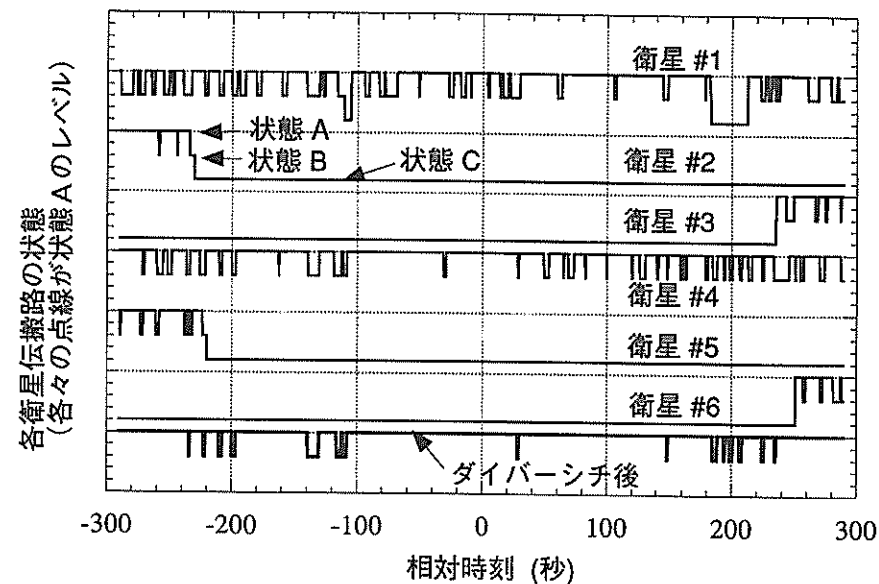


図36 図33のOrbit bの $-290 < t < 290$ に相当する1サイクル分の状態推移を、郊外地で歩行程度の動き(LMSS-P)で受信したときの時系列シミュレーション例

していたが、例えばこのようなパターンが赤道地域で実現されたとすると緯度が高い地点ほど軌道間隔が狭くなるので、高緯度地域では実質的にダイバーシチ効果が大きくなる。効果に顕著な差が出てくるのは緯度が 40° より大きい地域である。

これまでの例は、信号強度低下の統計的な性質を求めたものである。次に、マルコフモデルによってシミュレーションした伝搬状態の時間的な推移の例を示したい⁽³¹⁾。図36は、図33のOrbit bの $-290 < t < 290$ に相当する1サイクル分の状態推移を、郊外地で歩行程度の動き(LMSS-P)で受信したときの時系列シミュレーション例である。各々の衛星の伝搬状態を3つのレベル(状態A

が点線のレベル、Bは1段下のレベル、Cはさらに1段下)で表わしており、衛星が運用仰角以下で見えない状態はCのレベルとしている。この期間の中で6つの衛星(#1~#6)が現われて、常時2~4機の衛星によるダイバーシチが可能であること、その結果として稼働率が著しく向上する様子(図中の「ダイバーシチ後」)がよく分かる。統計的な処理によって、この場合の状態Aの平均持続時間が約40秒であるという性質も明らかになっている。

以上、衛星ダイバーシチが高稼働率の実現に大きく寄与することを示した。伝搬モデルそのものが未だ研究段階にあるので、衛星ダイバーシチの効果の定量的な評価も

十分ではないが、伝搬モデルが確立されるに従って、今後、より高精度でかつきめの細かい推定が可能となろう。

衛星ダイバーシチ技術は、ここで検討を行った電波伝搬的な側面のほかに、切り替えのプロトコルやルーティング、周波数の有効利用等ネットワーク全体で検討しなければいけない課題が多い複合技術である。しかし、「移動ISDN」の一つのパイプを担うためには、高い信頼性のある回線が提供されることが必須であり、衛星ダイバーシチにかかる期待は大きい。

本節では、図31で示した一般的なスポット配置に対する衛星ダイバーシチの効果を述べており、これまで提案されている具体的なシステムの軌道パラメータで衛星ダイバーシチを行った場合の効果については言及していない。実質的には図32で示した高度と最低運用仰角に対する必要衛星数から、衛星数の余裕度（＝実際の衛星数／最低必要衛星数）として、ダイバーシチの枝数（ N_{min} ）が算定できるので、個々のケースの予想が可能である。

7. 一つの理想、一つの夢

筆者は平成8年3月31日までATR光電波通信研究所に在籍した。ATR光電波通信研究所は同日をもって10年間の研究活動を終えた。その研究テーマの一つに光衛星間通信の研究があった^{(45),(46)}。光衛星間通信技術は人類が大気圏外に出て活発に活動する時代には是非とも必要な技術であり、21世紀の冒頭に完成する宇宙ステーション「アルファ」はそのような時代の幕を開ける

ものとなろう。

一方、衛星通信では長く主役であった静止衛星システムに替わって、多数の周回衛星で構成される新しい衛星通信システムの登場に熱い期待がかかっている。イリジウム、ICO、グローバルスターなどのシステムによって提供されるグローバルパーソナル衛星通信サービス、テレデシックが目指すマルチメディア衛星通信サービスのいずれもが新しい時代のパイオニアたらんとしている。衛星を介して多数のユーザ間で広帯域なマルチメディア情報が行き交う時代には、衛星と衛星の間で縦横に通信を行う衛星間通信、その広帯域伝送に適した光衛星間通信が主要な宇宙インフラストラクチャとなろう。図37はレーザー光により衛星間の通信を行う光衛星間通信のイメージであり、将来、光衛星間通信ネットワークがマルチメディア通信時代の宇宙部分の情報ハイウエーを形成するであろうという期待が込められている⁽⁴⁶⁾。

移動体衛星通信システムでは各々の衛星にユーザリンク機能とフィーダリンク機能の二つが具備されている。そのため、衛星もそれなりの大きさになる。そこで、より小型な衛星でのサービス実現を目指して、衛星軌道を2層にして、全体として高度な機能を具現するシステムの提案を行っている⁽⁴⁷⁾。下層の衛星群に移動体との通信機能を、上層の衛星群に地上ゲートウェイとのフィーダリンク機能を持たせ、本来衛星が具備すべき2つの機能を上層と下層で分担するのである。下層（たとえば高度700kmのLEO）に衛星ダイバーシチを前提とした数百の超小型衛星を、上層（たとえば高度2,000 km

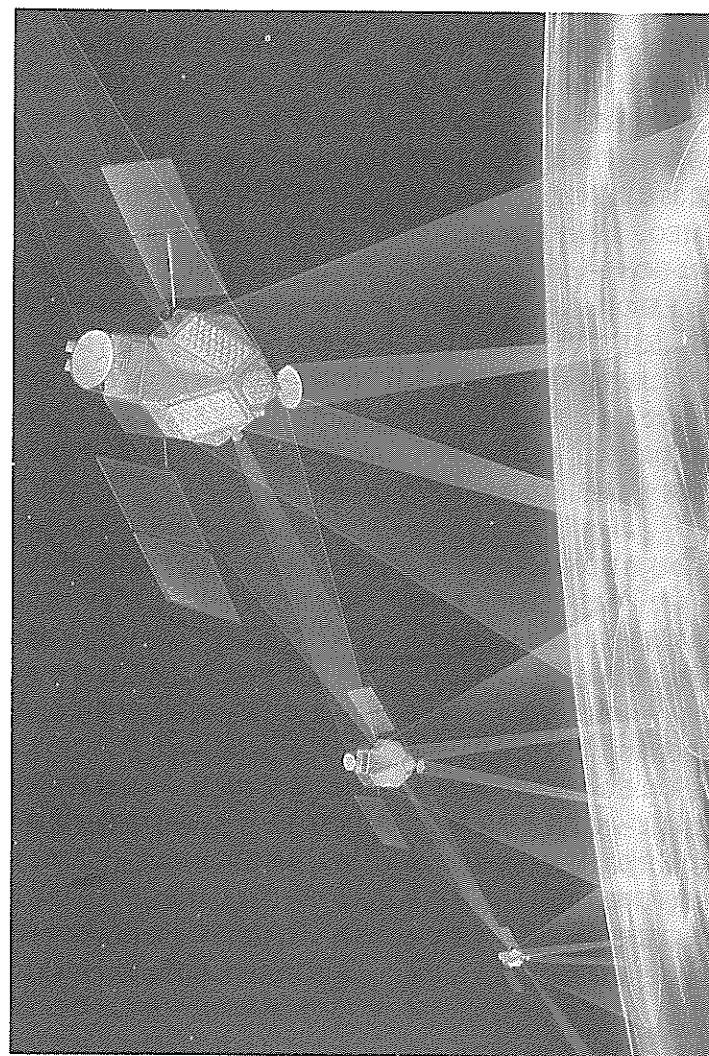


図37 レーザ光により衛星間の通信を行う光衛星間通信のイメージ（写真提供：ATR）

のLEO又は高度10,000 km程度のMEO)に10～数十の比較的大型衛星を配し、それらを光衛星間通信リンクで結ぶのである。低層の衛星は、同一軌道上の前後の2つの衛星および上層の2～3の衛星との光通信機能を、上層の衛星は、同一軌道上の前後の2つの衛星、隣接軌道上の左右4つの衛星、および下層の数機の衛星との光通信機能を有する。図38は衛星の軌道イメージである。上層をMEO、低層をLEOとしている。又、図39はそのサービスイメージである。この図では上層の衛星にさらに高度な通信機能(広帯域伝送等)も付加している。宇宙のハイウェイに地球がすっぽりと覆われたというイメージである。光衛星間通信に適した衛星軌道構成提案、その際の光ビームの捕捉追尾に関する技術的な検討はすませている^{(47),(48)}。

やがて到来する移動ISDN時代には、グローバルなスケールでサービスを提供する移動体・パーソナル衛星通信の果たす役割は大きいと信じている。衛星ダイバーシチによって通信の品質が向上すれば、「光ファイバで結ばれた通信の信頼性」と「ワイヤレスが持つ利便性」を兼ねそなえた通信の理想が、新しい衛星通信によって実現できるかもしれない。ここで紹介した2層構成システムはATR光電波通信研究所が描いた将来イメージである。その意味で、これは理想であり、夢である。

8. むすび

多数の(低軌道)周回衛星によって構成されるマルチメディア移動体衛星通信時代

に求められる高品質・高稼働率サービスを実現する上で大きな課題となっている電波伝搬問題を取り上げ、電波伝搬環境の把握とそのモデル化に関する研究の最前線を紹介した。同じ電波伝搬環境であっても、自動車のような高速に移動しながらの通信と、個人がハンドヘルド端末をもって行うパーソナル通信のような低速移動の通信では、信号の品質劣化に現われる性質が異なることを示した。筆者等はこの2つのサービスを区別するために、LMSS-V(高速・広範囲の移動)とLMSS-P(歩行程度の低速移動)と呼んだ。モデル化に際しても、この二つの違いを考慮した。さらに、高稼働率化の切り札と期待される衛星ダイバーシチを取り上げ、緒についたばかりの研究の一端を紹介した。

本稿では、これまで伝搬データが報告されている準マイクロ波帯(1～3GHz帯、特に1.5 GHzを中心として)での伝搬現象を主に取り上げた。将来、広帯域な通信回線を確保するためには、Ka帯やミリ波帯と言ったより高い周波数の電波も用いられるようになると思われる⁽⁴⁹⁾。このような場合には、衛星の見通しの有無が全体の特性を決めることになり、LMSS伝搬現象としてはむしろ単純になると考えられる。ここで紹介したモデルそのものは広い周波数範囲にわたって共通な汎用性を有すると期待できる。

高稼働率化技術とタイトルにはつけているが、具体的に取り上げたのは衛星ダイバーシチである。衛星ダイバーシチ以外の可能性についても本文中で若干触れたが、ページ数を割くような記述はできなかった。衛星ダイバーシチ適用の際の信号の合成法と

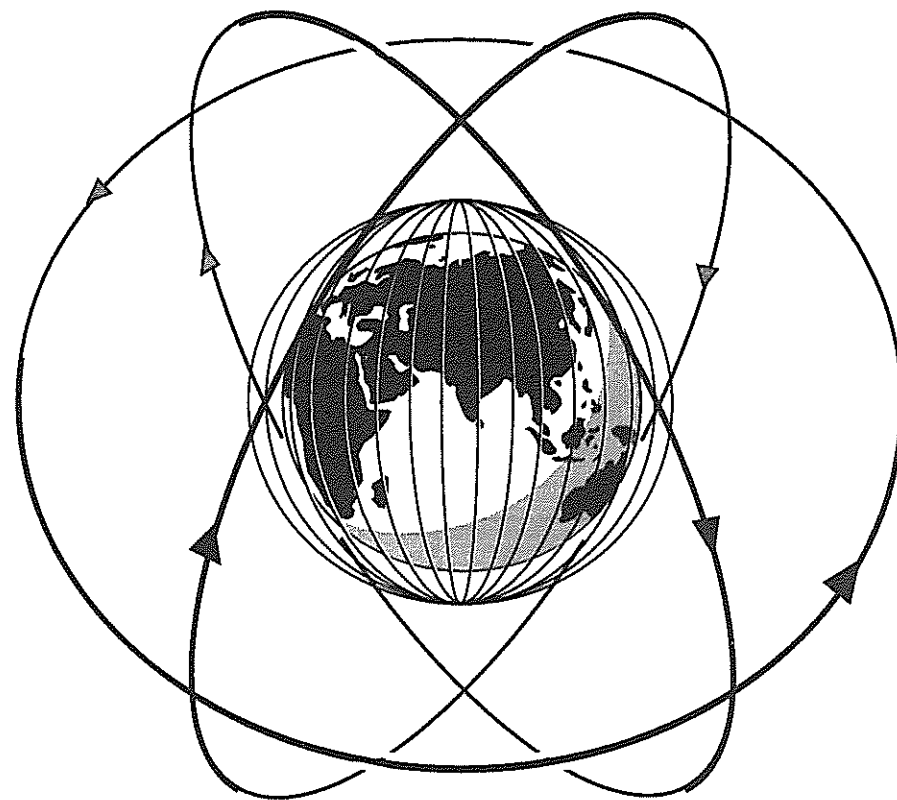


図38 2層構成衛星通信システムの軌道イメージ

して、最も簡単な最適状態切り替え方式を検討の対象として、その効果を示した。より理想的なものとして、瞬時変動に対して最適に合成する方法も将来の技術として考えられる。これらの検討については今後の課題としたい。

本稿では、移動体衛星通信を「マルチメディア通信のユニバーサルサービスをアウトドア環境まで広げることのできるインフラストラクチャ」と位置付け、その役割に期待

した筆調で論を進めた。一方で、サービスは市場原理・競争原理に従って提供されるものであり、「善く公平な」といったユニバーサルサービスの理念と相容れない形で発達する可能性は十分ある。しかし、図2に示したインフラストラクチャによってもたらされるマルチメディア社会は、結果として、いつでも・どこでも・だれとでも・均一な料金で、といったユニバーサルサービスの理念を実践する方向に進めむであろうと筆者

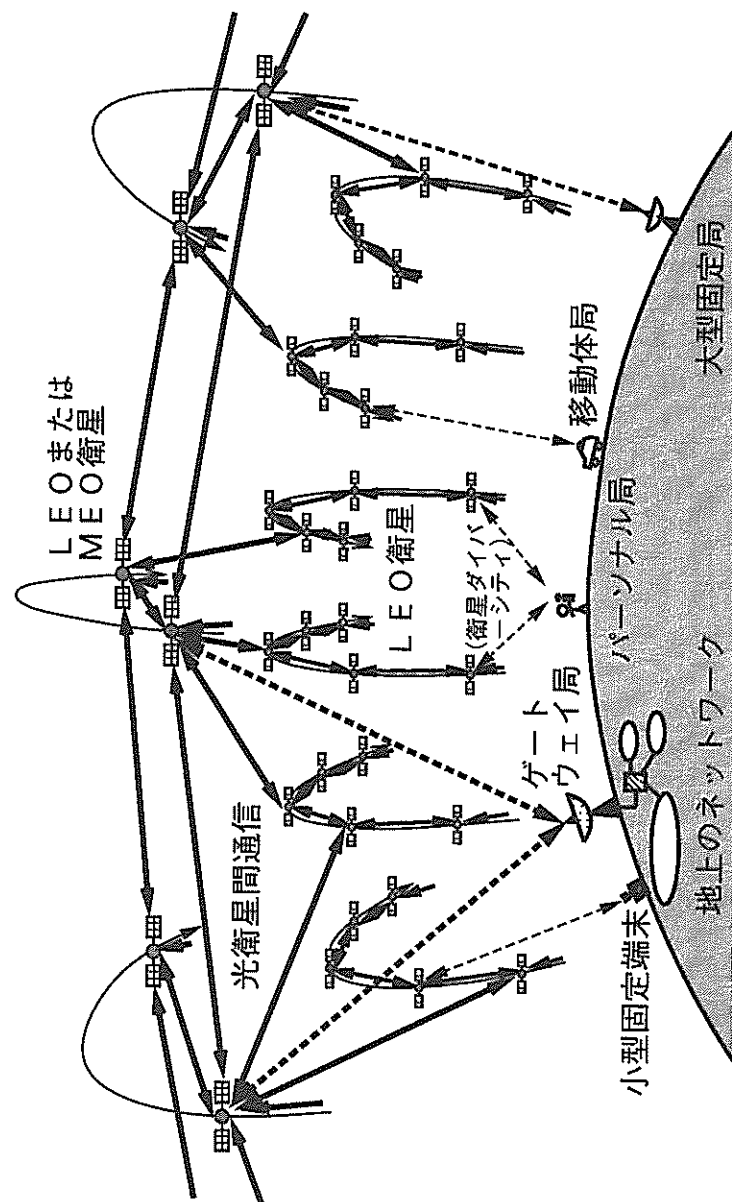


図 39 2層構成衛星通信システムのサービスイメージ(47)

は信じる。

【謝辞】

将来の移動体衛星通信の在り方については、(株)ATR光電波通信研究所猪股英行社長(現電波産業会)、小川英一室長(現摂南大学)、渡辺敏英室長(現NHK技術研究所)を初めとするATR関係各位から有益な議論をいただいた。又、その技術検討については同社木村和宏研究員(現郵政省通信総合研究所)の貢献が大きい。また、LMSS伝搬モデルについては筆者のKDD研究所在籍中に取り組んだテーマであり、共に研究を進めたKDD研究所の南園健一氏(現宇宙通信(株))、松戸孝氏(現アステル東京)の協力に負うところが大きい。テキサス大学のVogel博士には貴重な資料を本稿の作成のために提供していただいた。以上の各氏に謹んで感謝する。

【参考文献】

- (1) 林紘一郎、田川義博：“ユニバーサルサービス”、中公新書、1994
- (2) R.L. Leopold: “Low-Earth orbit global cellular communications network” Mobile Sat. Comm. Sys. Conf., Adelaide, Australia, Aug. 1990.
- (3) R.A. Wiedeman et al.: AIAA 14th Int. Comm. Sat. Sys. Conf., pp.772-786, March 1992.
- (4) H.-C. Haugli, N. Hart and P. Posket: “Inmarsat's future personal communicator system,” Int. Conf. Mobile Sat. Comms., pp.303-304, 1993.
- (5) E. F. Tuck, et al.: “The CALLINGSM network - Global wireless communication system,” Int. Jour. Sat. Comm., vol.12, pp.45-61, 1994.
- (6) J. Ventura-Traveset, I. Stojkovic, F. Coromina and J. Benedicto: “A technology review for future satellite personal communications payloads” AIAA 15th Int. Comm. Sat. Sys. Conf., San Diego (USA), February / March 1994.
- (7) このデータは「現代地図帳、二宮書店、1995.」より読み取り再プロット
- (8) 江口真人、久保田文人、安成知文：“移動ISDNの提案と技術的課題”、信学誌、Vol. 75, 8, pp.827-830, 1992.
- (9) CCITT勧告 G821: “Error performance of an international digital connection forming part of an integrated services digital network,” ITU, Geneva, 1980.
- (10) 唐沢好男、松戸孝、南園健一、塩川孝泰：“移動ISDN時代の移動体衛星通信における不稼働率と稼働時間内信号劣化特性に関する考察”、信学論(B-II), vol.J77-B-II, 3, pp.121-129, 1994.
- (11) 唐沢好男：“宇宙通信の基盤技術、電波伝搬環境と高稼働率化技術”、信学誌、Vol. 79, 4, pp. 383-391, 1996.
- (12) 進士昌明編：“無線通信の電波伝搬”、電子情報通信学会、1992.
- (13) Y. Karasawa and T. Shiokawa: “Characteristics of L-band multipath fading

- due to sea surface reflection:" IEEE Trans. Antennas Propag., vol. AP-32, 6, pp.618-623, 1984.
- (14) 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-B-II, 7, pp.297-303, 1989.
- (15) D.J. Fang, F. Tseng and T.O. Calbit: "A low elevation angle propagation measurement of 1.5 GHz satellite signals in the Gulf of Mexico," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. AP-30, 1, pp. 10-15, 1982.
- (16) 小園茂、吉川誠、細矢良夫："船舶衛星回線における海面反射特性"、信学論(B), vol. J65-B, 6, pp.761-768, 1982.
- (17) S. Ohmori et al.: "Characteristics of sea reflection fading in maritime satellite communications," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. AP-33, 8, pp.838-845, 1985.
- (18) ITU-R: "Propagation data required for the design of earth-space maritime/aeronautical mobile telecommunication systems:" Recs. 680 (maritime) and 682 (aeronautical), ITU-R SG3, 1994.
- (19) 小川英一、佐藤明雄："都市内伝送路における見通し率および反射波伝搬特性"、信学論(B), J69-B, 9, pp. 958-966, 1986.
- (20) 伊藤泰宏："都市内での衛星放送移動受信における伝搬特性"、信学論B-II, vol.J73-B-II, 7, pp.328-335, 1990.
- (21) 松戸孝、南園健一、唐沢好男、塩川孝泰："ラジオメータを利用した都市内での衛星一移動局間見通し場所率の測定"、1993信学春季大会、B-19, 1993.
- (22) R. Akturan and W.J. Vogel: "Elevation angle dependence of fading for satellite PCS in urban areas," Elec. Letters, Vol. 31, 14, pp. 1125-1127, 1995. [Rev. version: ibid, Vol. 31, 25, pp. 2156-2157, 1995.]
- (23) 唐沢好男："移動体衛星通信における衛星ダイバーシチと伝搬チャネルモデル"、信学技報, A.P94-36, pp. 9-16, 1994.
- (24) 唐沢好男、木村和宏："移動体衛星通信における衛星ダイバーシチと伝搬チャネルモデル [II]"、信学技報A.P95-45, pp.37-44, 1995.
- (25) J. Goldhirsh and W.J. Vogel: "Propagation effects for land mobile satellite systems: Overview of experimental and modeling results," NASA Ref. Pub. No. 1274, 1992.
- (26) W.L. Vogel, G.W. Torrence and H. Lin: "Simultaneous measurements of L- and S-band tree shadowing for space-earth communications," IEEE Trans. Antennas Propag., Vol. 43, 7, pp.713-719, 1995.
- (27) C. Loo: "Land mobile satellite channel measurement at Ka band using Olympus," IEEE Vehic. Tech. Conf., pp.919-923, 1994.
- (28) 郵政省通信政策局監修 (ETS-V/EMSS実験推進会議編)："技術試験衛星V型(きく5号)実験"、(財)電子通信振興会、1990.
- (29) ITU-R: "Acquisition, presentation and analysis of data in studies of tropospheric wave propagation," SG3 Rec. 311 (伝搬データバンク、作業班会合ごとに追加、改訂)
- (30) CCIR Japanese Contribution Doc.: WP5B/3-E, July 1991. [H. Wakana: 15th NASA Prop. Experimenters Meeting (NAPEX XV), Canada, pp.88-94, 1991.]
- (31) 唐沢好男："移動体衛星通信における衛星ダイバーシチと伝搬チャネルモデル [III]"、信学技報SAT95-62, pp.19-24, 1995.
- (32) W.J. Vogel and G.W. Torrence: "Propagation measurements for satellite radio reception inside buildings:" IEEE Trans. Antennas Propag., vol.41, 7, pp.954-961, 1993.
- (33) M.A. Jensen and Y. Rahmat-Samii: "EM interaction of handset antennas and a human in personal communications," Proc. IEEE, Vol. 83, 1, pp. 7-17, 1995.
- (34) ITU-R: "Propagation data required for the design of Earth-space land mobile telecommunication systems," Rec. ITU-R PN. 681-1, (Doc. 3M/T/15), Jan., 1995.
- (35) Y. Karasawa, K. Minamisono and T. Matsudo: "A propagation channel model for personal mobile satellite services," PIERS' 94, Nordwijk, The Netherlands, July 1994.
- (36) 南園健一、松戸孝、塩川孝泰、唐沢好男："市街地におけるパーソナル陸上移動衛星通信伝送路モデル"、信学秋季全大、B-24, 1993.
- (37) C. Loo: "A statistical model for a land mobile satellite link," IEEE Trans. Vehicular Tech., vol. VT-34, 3, pp.122-127, 1985.
- (38) E. Lutz, D., M. Dippold, F. Dolainsky and W. Papke: "The land mobile satellite communication channel -Recording, statistics, and channel model", IEEE Trans. Vehicular Tech., vol. 40, 2, pp.375-386, 1991.
- (39) R.M. Barts and W.L. Stutzman: "Modeling and simulation of mobile satellite propagation," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 40, 4, pp.375-382, 1992.
- (40) Y. Karasawa, T. Kuroda and H. Iwai: "The equivalent transmission-path model, - A tool for analyzing error floor characteristics due to inter-symbol interference in Nakagami-Rice fading environments," IEEE Trans. Vehic. Tech., (in press) [同内容は、唐沢、岩井、仲上・ライスフェージング環境における広帯域デジタル伝送特性"、信学技報, A.P 94-106, 1995.]
- (41) CCIR: "Impact of propagation impairments on the design of LEO mobile satellite systems providing personal communication services, CCIR SG8 WP-8D, US Cont. Doc. WP-8D-14, Dec. 1992.
- (42) 新垣吉也、井家上哲史、若菜弘充、鈴木龍太郎："陸上移動体衛星回線のマルチパス測定"、信学技報、A.P93-55, pp.1-7, 1993.
- (43) P.P. Robet and B.G. Evans: "Land mobile satellite communication channel model for simultaneous transmission from a land mobile terminal via two separate satellites," Int. Jour. Satellite Comms., vol. 10, pp.139-154, 1992.
- (44) Y. Karasawa and H. Iwai: "Modeling of signal envelope correlation of line-of-sight fading with application to frequency correlation analysis," IEEE Trans. Comm., Vol. 42, 6, pp. 2201-2203, 1994.
- (45) 古濱洋治："光衛星通信の展望"、国際衛星通信時代、No. 30, 1933
- (46) 国際電気通信基礎技術研究所編："光衛星間通信" ATR先端テクノロジーシリーズ、オーム社、1995.
- (47) K. Kimura, K. Inagaki and Y. Karasawa: "Satellite constellation of low earth orbit (LEO) satellite global communication network using optical inter-satellite links" Proc. SPIE Free-Space Laser Comm. Tech. VII, Vol. 2381, pp. 48-59, San Jose, CA, Feb. 1995.
- (48) K. Kimura, K. Inagaki and Y. Karasawa: "Global satellite communication network using double-layered inclined orbit constellation with optical inter-satellite links," Proc. SPIE Free-Space Laser Comm. Tech. VIII, Vol. 2699, pp. 12-23, San Jose, CA, Jan. 1996.
- (49) 飯田尚志、門脇直人："Kaバンドおよびミリ波帯におけるパーソナル衛星通信の動向について"、ITUジャーナル、vol.24, 6, pp.48-62, 1994.