

IV. 伝搬研究の始まりと終わり

池上文夫*

(昭和62年7月15日受理)

IV. THE BEGINNING AND THE END OF PROPAGATION STUDIES

By

Fumio IKEGAMI

Propagation research in the past developed alongside radio systems. That is “A system generates propagation studies”. In a scientific sense, propagation research may be eternal as long as it concerns natural phenomena. In an engineering sense, however, propagation research ends when a system is completed. If propagation studies are to expand, they must be based on the study of propagation mechanisms; seeking a new system concept. That is “Propagation creates new systems”. When will propagation engineering end? When the system reaches the simplest propagation media—the free space. This should be the ultimate aim of propagation researchers.

——はじめに——

URSI-F 小委員会がその前身の電波気象談話会以来300回も続いたことは全く感慨に耐えません。心からお祝い申し上げるとともに、関係された方々の意欲と熱意に最大の敬意を表したいと思います。

さて、300回も続いたこの会は一体いつまで続くのか。いつまでも続いて欲しいと思うが、いつかは終るのだろうか。というわけで伝搬研究の始まりと終わりについて考えてみたい。

——伝搬研究の推移——

まず戦後からこれまでの対流圏伝搬の歴史を第1図によって概観してみる。1949年ころ、電電公社電気通信研究所(通研)でマイクロ波中継システムの研究とともに見通し内伝搬、特にフェージングの研究が始まった。中継局の選定法、フェージング推定法、空間ダイバーシチ受信などの研究を経て、4 GHz から6 GHz へと発展したマイクロ波回線網が全国に完成するに至って研究は一段落した。

その後50年代に入りマイクロ波のデジタル方式やSSB方式の研究に伴ない、周波数選択性フェージングによる帯域内振幅変化に着目する研究が再開された。周波数利用効率の高い高度な通信方式が完成してこの研究も

終了している。

山岳回折伝搬の研究では通信省電波局のグループが、筑波山背後で電界強度が異常に高くフェージングのない安定な状態が得られることを見いだした。後に山岳利得と呼ばれる現象である。その後、電波研究所による富士山裏側などでの測定が行われたが、これらは基礎的な研究としてひとまず終わった。

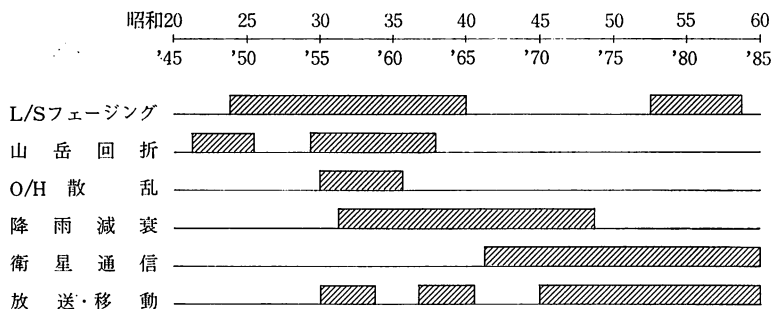
その後、マイクロ波帯での山岳回折伝搬の研究が通研で再開され、この研究の中で独創的な回折網が考案された。

これら一連の山岳回折伝搬の研究は基礎的研究として行われたが、改良された回折網は11 GHz 帯回線に実用され、また山岳利得現象は九州一奄美大島一沖縄間の見通し外回線に利用された。これらの実用とともに山岳回折伝搬の研究は終了し、その後行われていない。

見通し外対流圏散乱伝搬の研究は米国で始まり、日本でも仙台一國分寺(電波研究所)、和歌山一宮崎(通研)、瀬戸内海地域(KDD研究所)などで盛んに実験が行われたが、実用されたのはKDDの韓国一浜田間の回線のみに、その後研究は行われていない。

降雨減衰の研究は、マイクロ波の高い周波数帯を開拓するために開始された。通研を中心に降雨減衰量の推定法が開発され、11, 15, 20 GHz 帯が実用されるに至った。また電波研究所で更に詳細な研究が進み、交差偏波識別度(XPD)など新しい問題も生まれたが、この研究

* 京都大学 工学部



第1図 対流圏伝搬研究の歴史

は衛星通信における研究へと引き継がれる。

衛星通信では雑音温度やシンチレーションの研究（KDD 研究所）の後、降雨減衰を中心に地上での研究結果を発展させて、仰角の影響など減衰量の推定の研究が各機関で精力的に行われた。これらの研究は CCIR の場で一応実用的段階に達し、その後研究の主体は海事衛星通信における海面反射によるフェージングへと向けられた。

放送に関する伝搬研究は TV 放送に関連して早くから行われ、移動通信の伝搬と合わせて研究が進んだ。TV 放送が定着した後は、SHF 地上放送の伝搬を経て衛星放送へと進み、CCIR の推定法に寄与してほぼ終了している。

移動通信の伝搬研究は 400 MHz 帯自動車電話を対象に行われ、有名な奥村カーブを生んだ。このシステムは実用に至らなかったが、その後 900 MHz 帯セル方式の研究とともに伝搬研究も再開され、この方式の実用後も更に大容量化、デジタル化を目指して盛んな研究が行われている。

——伝搬研究とシステム——

これまでの伝搬研究の推移を概観すると、伝搬研究がシステムとともに推移してきたことがみられる。すなわち新しいシステムの構想や研究開発とともに、あるいはそれに先立って伝搬研究が始まり、システムが完成すると、伝搬研究もそれとともに自然に消滅する。すなわち『システムが伝搬を作る』ということができる。

もちろん若干の例外がなかったわけではない。例えば山岳回折伝搬の研究は、全くその needs のないときに始められ、needs につながらずに終わった。しかしその研究成果が後に実用に役立った。また降雨減衰の研究は、11 GHz 帯の実用に先立ち 7 年ほど前から開始された。

一般に伝搬の研究には長い時間がかかる。自然現象を相手にするため長期間のデータを取る必要があり、一つ

の段階を画するには通常 10 年程度かかる。したがって伝搬研究の成果をシステムに反映させるためには、システムの計画に先立って研究を始めねばならない。しかし将来どのようなシステムが出てくるかを予想することはなかなか難しく、伝搬研究の計画を立てるときには常にこのことが最大の悩みである。システムの見通しを誤らなかったときはよいが、もし誤ったときにはその研究の終結を強いられる。それが研究の途中であるときには終結はなおさら難しい。システムの要求が明確な場合にはこのような悩みが少なく研究を開始できる。そのかわりに伝搬研究はシステムの要求に追いつまなければならないことになる。

さて、これまでは「システムが伝搬を作る」歴史が主体であった。無線通信の急速な発展期にはこれも必然性があったと言えるが、果たして今後もこのような歴史が続くのであろうか。これからの極めて高度な通信が必要とされる時代には、それでは済まされないと私は思うのである。この問題を考えるために、伝搬研究のあり方について述べる。

——伝搬研究の目的——

工学的な伝搬研究の目的は、まず第一にシステムの設計に必要な伝搬特性を明らかにし、その定量的な推定法を提供することにある。電界強度やフェージングの大きさ、あるいは伝搬歪などを任意の条件に対して推定する方法がまず要求される。これ自体大きな研究問題で多大の時間と労力がかかるものであるが、これは伝搬研究の入り口に過ぎない。

より良いシステムを作るには、第二の目的として伝搬特性をいかにして改善するかが要求される。フェージングや伝搬歪を軽減するための研究は、伝搬研究者のより積極的なターゲットである。これは無線通信の宿命を克服するための努力であって、研究者にとって極めて手ごわい相手であるが、それだけに興味をそそる仕事である。

無線通信のもう一つの宿命である、電波の周波数の制約を克服するために、伝搬研究が直接あるいは間接に大きく貢献できる分野が広い。これも伝搬によるシステム改善の一つである。

通常、伝搬研究の目的は以上の二つが主要なものと考えられがちであるが、第三の重要な目的を忘れてはならない。それは新しいシステムの発案である。電波を利用する限り伝搬特性がシステムの特性を左右するので、伝搬研究の成果が新しいシステムを生むことができる。過去の歴史の中にも、山岳回折通信、回折網通信、対流圏散乱通信などにその例を見ることができる。

これらの目的を意識すると、伝搬研究を進めるための研究手法にこれを反映しなければならないことがよく理解できる。

——伝搬研究の手法——

伝搬研究の手法は個々のテーマによって様々であるが、大まかには第2図に示すようになる。まず最初に伝搬現象があり、研究は現象の観察から始まる。現象の性質や主要なパラメータを探り、これらがおおよそ把握できるといよいよ本格的な研究に入る。

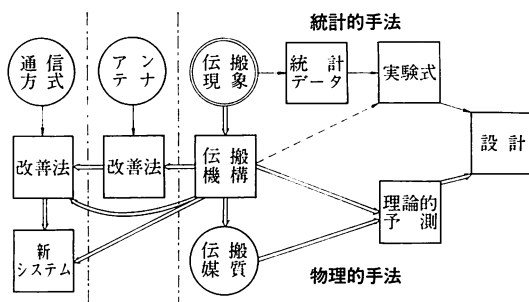
研究の第一の目的である伝搬特性の推定には、大別して“統計的手法”と“物理的手法”がある。

“統計的手法”は、主要なパラメータの種々の条件に対して伝搬実験を行う。多量の実験データを統計的に整理して主要パラメータの影響の定量的関係を見だし、統計的に推定実験式を作って設計に利用する。

この推定法は特定のデータに基づくため必ずしも普遍性をもたず、また推定精度は必ずしも高くないが、現象を定量的に記述できるのでシステムの概念設計あるいは基本設計には非常に有用である。

これに対して“物理的手法”は現象の原因、伝搬機構を物理的に解明しようとする。原因すなわち伝搬媒質と現象との因果関係が理論的にも明らかになれば、現象は定量的に記述できる。伝搬媒質は多くの場合自然現象によって左右されるので、必ずしも一意に決まるものではない。伝搬媒質の統計的性質を調べて理論と結びつけることができれば、この手法により現象を理論的に予測することが可能となる。

この手法は現象を物理的に理解できるので、その全ぼうの把握が容易である。したがって現象の一面だけでなく他の角度から見た性質も理解することができる。さらに伝搬媒質の性質さえ明らかになれば、どんな条件に対しても利用でき普遍性に富む。しかし複雑な現象に対しては因果関係を理論的に記述することが難しく、適用できる範囲にはおのづから限界がある。



第2図 伝搬研究の手法

実際の伝搬研究ではこれら二つの手法を併用し、多くのフィードバックループを構成しつつ進めるのが普通である。

伝搬研究の第二の目的すなわち伝搬特性の改善には物理的手法が必要である。伝搬機構を知れば、伝搬特性を改善できるように伝搬パラメータ（周波数や伝搬路など）を選ぶことができる。またアンテナの特性を適当に選ぶことにより、伝搬路とアンテナを含めた総合伝送特性を改善する手法は非常に有効である。また伝搬機構から考えて伝送特性を改善できる通信方式を選定することも、物理的手法によって可能である。

第三の目的すなわち新しいシステムの発案にも、物理的手法が不可欠である。伝搬機構とアンテナ、並びに通信方式を総合的に考察することにより、新しいシステムの発想が生まれる可能性がある。

——二つの手法の例——

統計的手法の代表的なものは、見通し内ダクト形フェージングの推定である。ダクトの発生は電波気象の複雑な条件に支配されるので、多量のフェージング実験データの統計的解析により推定式が作られ、マイクロ波回線設計に利用された。

初期のマイクロ波伝送ではフェージングが最も重要な要素であったが、超広帯域伝送では多重波による伝搬歪が大きな問題となり、多重波の通路差がクローズアップしてきた。この目的にはそれまでの多量のフェージングデータはほとんど無力であり、ダクトによる多重波の伝搬機構を知る必要がある。筑波山と川口のNHK放送鉄塔の間でフェージングと電波気象の同時測定が行われ、フェージングとダクトとの密接な関係が明らかとなり、ray-tracing法による解析を用いて多重波とフェージングの発生機構が解明された。また周波数掃引法による通路差測定の実測結果を理論と対比して、2700チャンネルの超多重伝送を実現に導いた。これは二つの手法を組み合わせた例である。

当時私は、ダクトによるフェージングの予測を物理的手法によってできないかと考えていた。フェージングの発生機構がほぼ明らかになったので、ダクトの統計的性質が分かればフェージングを理論的に、あるいは少なくとも純実験的にでなく、ダクトをパラメータとして予測できるはずである。この試みは失敗に終わったが、減衰フェージングと干渉フェージングを分離し、統計的手法と組み合わせることによって推定式の中に反映させることはできた。その後この考え方は、ラジオゾンデのデータをダクトと結びつけて、フェージングの世界的分布の推定に用いられている。通路差の推定についても当時はその可能性の見通しを得るに終わったが、後継者達によってある程度可能な結果が得られている。

物理的手法の例としてはk形フェージング、山岳回折や降雨減衰があげられる。これらは比較的単純な現象であり、理論的に解析できる。降雨減衰の場合、雨の統計量が分かれば減衰量を予測できる段階に達している。

私の場合、ダクト形フェージング予測の物理的手法には失敗したが、移動通信の伝搬について今再び物理的手法を試みている。これについては後に述べる。

その他、多くの伝搬研究において二つの手法の組み合わせによって推定法が作られ、また物理的手法による伝搬機構の解明を利用して各種の伝搬特性改善法が得られている。これからの伝搬研究では、物理的手法の重要性が従来にもまして強調されることになろう。

——システムを創る伝搬研究——

これまでの歴史は、あるシステムを想定しその設計に必要な伝搬特性の推定と改善法の研究が、伝搬研究の主な対象であった。すなわち「システムが伝搬を作る」歴史であった。

しかし現在では、通常の見方によるシステムはほとんど出尽した感がある。一方新しい各種の通信サービスの要求が急激に高まっており、システムには従来以上に高度な機能や特性が要求されている。これらの要求を従来のシステムで満足させるための努力が進められているが、多くの場合システムの限界に近いところまできており、より高度化のための技術的困難さは急激に増大する。システムによってはそろそろシステムそのものの考え方を抜本的に考え直さねばならない時期にあると思われる。

新しいシステムの発案は言うはやすくして行うは難しい。これまでシステムの構想は主として通信方式の研究者によって作られてきたが、アンテナや伝搬の研究者にもチャンスがある。特に伝搬研究者にはその可能性が高い。その理由は………。

無線通信は基本的に伝搬に依存する。システムがより高度な要求を満たすのに障害となるのは、劣悪な伝搬特性によるのが普通である。要求される高度な特性を既存のシステムの改良で実現するのがいかに難しいかを最も良く知っているのは、伝搬特性の劣悪さを身をもって体験している伝搬研究者である。またどのような伝搬条件ならば要求を満足できるか、を最も良く知っているのも伝搬研究者である。

もちろん、新しいシステムの発案には、伝搬、アンテナ、通信方式を理解する研究者であることが必要であるが、これが最も容易なのは伝搬研究者である。伝搬研究者がアンテナや通信方式を理解するよりも、アンテナや通信方式の研究者が伝搬を理解することの方が難しい。なぜならば、アンテナや通信方式は系統的な学問ができやすいが、伝搬現象はなかなかきれいな式ですべてを表すことができず、経験や勘に頼る部分が依然として多いからである。

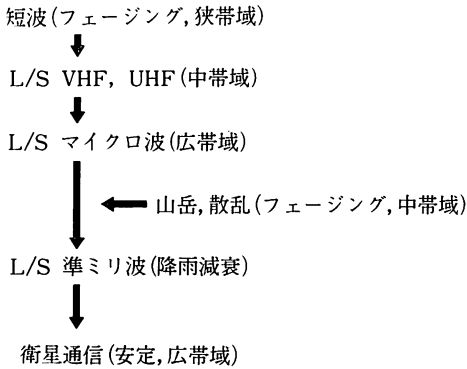
伝搬特性が、システムの特性を左右すること、及び伝搬研究者が、新しいシステムを考えるのに有利であることから、これからの新しい高度なシステムについては、『伝搬がシステムを創る』でなければならない。さらに極言すれば『伝搬はシステムを制す』とさえ言うことができよう。伝搬研究者には、単なる伝搬研究のみでなく新しいシステムの発案を目標とする研究も期待され、これにこたえる使命があると考えられる。

——伝搬研究の終わり——

ここで伝搬研究の終わりについて考えてみる。物理学的な伝搬研究には終わりはない。それは伝搬研究の主な対象が自然現象だからである。ちょうど気象学や地震学におけると同様に、自然現象を相手とする学問には終わりはない。長島茂雄ではないが「伝搬は永遠に不滅」なのである。

工学的研究の場合はどうであろうか。「システムが伝搬を作る」時代には、確かに伝搬研究はシステムと共に終わりを告げた。しかし前述のように伝搬研究は新しいシステムを発案する可能性を持っている。「伝搬がシステムを創る」時代には、伝搬特性の改善法や新システムを志向した研究を行う限り伝搬研究に終わりはこないことになる。あるシステムが完成したとき、さらにすぐれた次のシステムを創るための伝搬研究が始まる。無線通信が存在する限り、工学的な伝搬研究も「永遠に不滅」のように思える。

果してそうだろうか。今ここでちょっと別の観点から眺めて見よう。伝搬研究が主な目的とする無線通信は、良い伝送特性と低いコストを最終目標とする。したがっ



第3図 遠距離通信の歴史

てシステムは常により良いものをねらって変化する。第3図に示すように、過去の歴史の中にこの変化を見ることができる。

昔の短波通信は小電力で非常に遠距離まで通信ができた。しかし安定度が悪く、また伝送帯域幅が狭く多量の情報伝送には適しなかった。そこで多重電話の伝送に見通し内伝搬を用いた超短波システムが用いられるようになった。さらに超多重をねらってマイクロ波中継方式が生まれた。

一方、中継局の設置が困難な山岳地帯、沙漠、あるいは海上の遠距離通信を目的として、見通し外の対流圏散乱や山岳回折の伝搬様式が用いられた。これらは中継局を必要としない特長をもつが、フェージングが大きくなると伝送帯域幅は見通し内伝搬に劣る。

マイクロ波より高い周波数として準ミリ波帯が開拓されたが、降雨減衰が著しく利用が制限される。そこで気球を成層圏に上げて中継するというアイディアも出てきたが、遠距離通信の本命として衛星通信が登場する。衛星通信はフェージングが小さく安定であり、しかも極めて広帯域の伝送が可能である。これは衛星通信の伝搬媒質がほとんど自由空間に近いからである。

通信の目的から言えば、伝搬媒質は自由空間が最も理想的である。過去の通信の歴史は、通信の目的を達成するために、第4図のように自由空間に近い、より単純な伝搬媒質を求めて発展してきた。複雑な伝搬構造をもつ電離層伝搬や見通し外伝搬は、ごく一部の特殊な目的に用いられるのみで、通信の本流からは姿を消した。衛星通信は遠距離通信の終着駅のように思える。

無線通信の研究者が目標とするのは、自由空間に近い伝送特性で、しかもコストが安いシステムである。二つの条件は相反するので、この目標の実現には技術的に多くの困難があるが、まず既存システムの伝搬特性を見極

複雑な伝搬媒質

単純な伝搬媒質
(自由空間)

第4図 伝搬媒質の歴史

めることが必要である。既存の伝搬様式を改善する手段の限界を知ったとき、自由空間に近い、より単純な伝搬様式のシステムが、現実的な候補として浮び上がってくる。

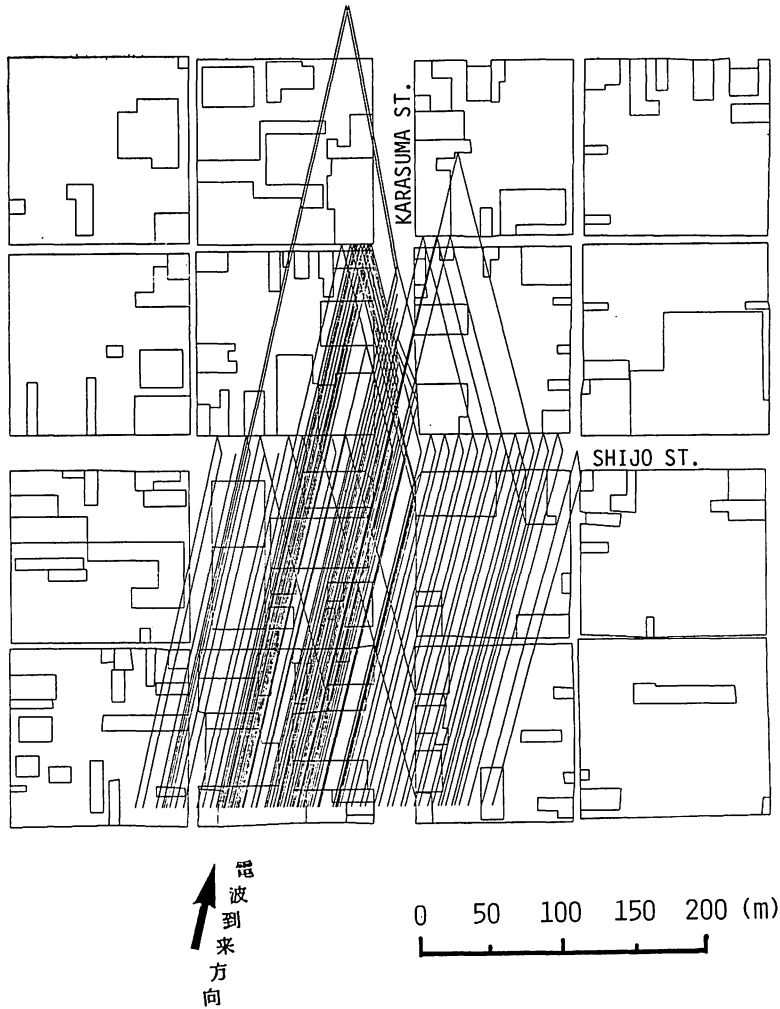
こうして、自由空間に近い伝送特性をもち経済性にもすぐれたシステムに到達すると、ここで伝搬研究は終わる。すなわち、伝搬研究を必要としないシステムを研究するのが伝搬研究の最終目標であり、したがって伝搬研究は“不滅”ではない。

——移動通信における伝搬——

無線通信に用いられる伝搬様式の中で、伝搬特性が最も劣悪なものは電離層伝搬、対流圏散乱伝搬と移動通信の伝搬であろう。これら3大劣悪伝搬は伝搬媒質が極めて複雑なものの代表でもある。その複雑さのゆえに、伝搬研究者にとって非常に魅力的な研究対象である。その中で前2者は衛星通信の出現により過去のものとなった。移動通信の伝搬は現在もなお残る最も劣悪な伝搬である。

移動通信の伝搬の特徴は、建物の減衰により平均電界強度が低く、レイリーフェージングの周波数が100 Hz程度にも達し、さらに多重波の遅延時間のため伝送帯域幅が狭いことにある。また、通常の伝搬現象は自然現象に支配されるため伝搬特性の中に法則性を見いだしやすいが、移動通信の伝搬では建物など人工的構築物の影響が大きいため現象に法則性を認め難い。すなわち統計的手法を用いるときには解析が困難である。

以下、移動通信における物理的手法の効用について、私達の研究を例に御紹介したい。これまで都市内ではすべての方向から無数のランダム波が到来するという、統計モデルが用いられてきたが、よく調べてみると単純な幾何光学的法則に従う回折波や反射波が重要な役割を演じ、主要な伝搬特性がこの伝搬モデルに支配されることが分かってきた¹⁾。その他、建物の散乱波や道路沿いの導波モードも観測される。すなわち伝搬の物理モデルはこれらの波の組み合わせで与えられ、条件によってあるものが卓越すると考えるのが妥当である。このように物理的手法によって伝搬構造が解明されると、各種の伝搬特性の予測や改善法の研究に役立つ。例えば建物がそれほど高くない京都市内では、平均電界強度のほとんどすべ



第5図 計算機による多重波伝搬経路の追跡例

ての特性が幾何光学モデルによってよく表現できるので、計算機による理論的予測が可能となる⁽²⁾。建物の配置と高さを計算機に入力しておき、受信点に到達する幾何光学波の経路を追跡する。各多重波の強度を計算し、その電力和から平均電界強度を理論的に予測する方法を開発した⁽³⁾。第5図は京都市内の多重波追跡の例、第6図は予測値と実測値の比較を示す。かなり良い一致がみられる。従来の統計的手法（奥村カーブ）では予測できない、場所による変化も求められ、建物のデータさえ分かればどんな条件にも普遍性をもって即座に計算できる。他の伝搬モードも考慮に入れることができれば、さらに普遍的な条件に対して精度を上げることができるはずである。

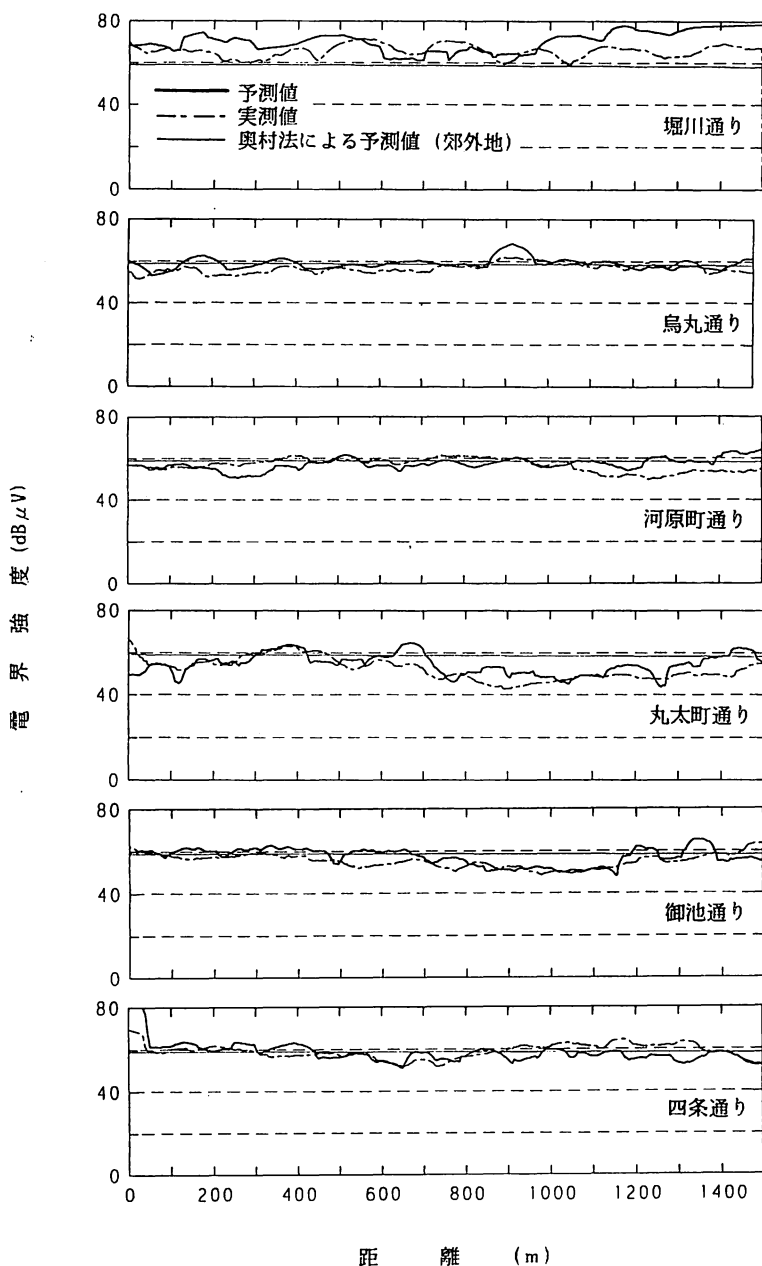
幾何光学モードの重要性から、指向性アンテナがフェージング軽減効果をもつことが明らかとなり、指向性ダ

イバーシチ受信の発想が生まれた⁽⁴⁾。4方向に指向性をもつアンテナを組み合わせた第7図の受信システムは、1台の受信機で4枝の理想的選択受信に近いフェージング改善度が得られる（第8図）。指向性アンテナを用いると伝送帯域幅を広げる効果もあることも明らかになりつつある。

このように複雑な伝搬環境をもつ移動通信では、物理的手法による伝搬研究が特にその効果を発揮する。

——デジタル移動通信——

物理的手法を必要とする研究対象の一つにデジタル移動通信がある。デジタル移動通信では、フェージング周波数が高くまた遅延時間の大きい多重波のために符号誤り率が著しく劣化する。第9図⁽⁵⁾は野外測定の一例で、SN比が大きくても誤り率がある値以下に減らな

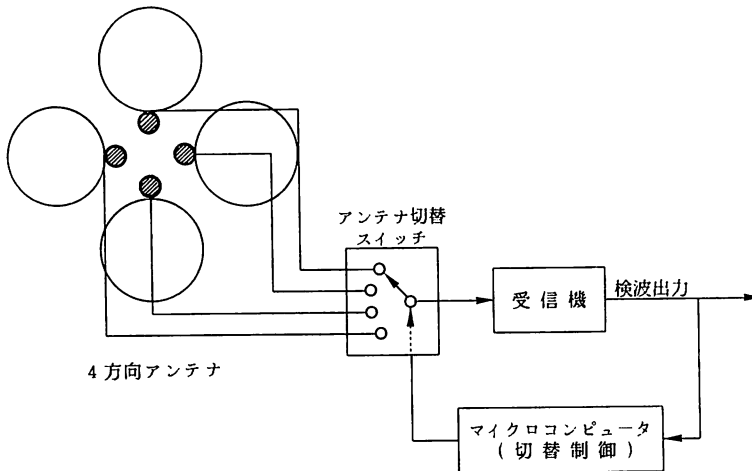


第6図 平均電界強度 (50 m 区間ごと) の理論的予測と実測値の比較

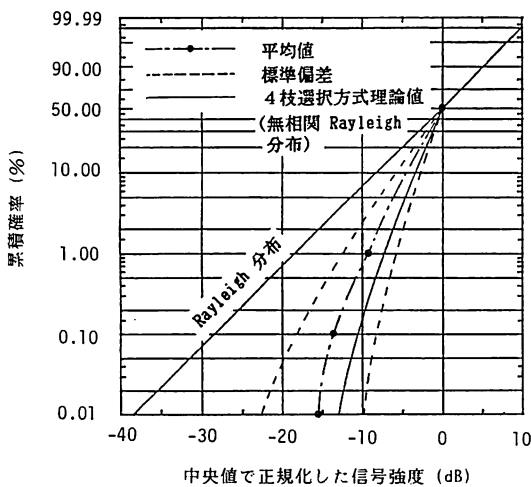
い、いわゆるフロア現象が生ずる。このため移動通信では 10~20 kbps 以上の高速伝送が非常に難しい。

この誤りを軽減する方法として、ダイバーシチ受信、自動等化、誤り制御などが検討されているが、現在のところ実現性の高いのはダイバーシチ受信で他の方法はまだ研究の段階にある。これらの方法を用いたとしても、移動通信では数百 kbps 以上の高速伝送は極めて難しいと考えられている。

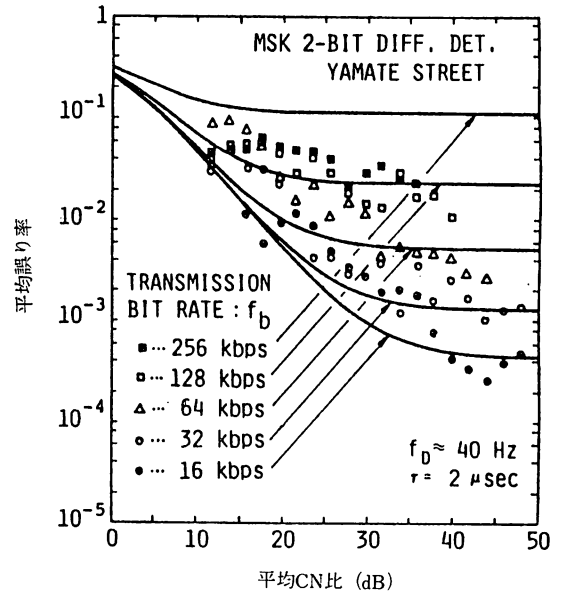
このフロア誤りの原因がフェージングによる急激な位相変化と多重波伝搬歪であることは知られていたが、多重波歪による誤りの発生機構については不明な点が多かった。これを解明するには多重波フェージングと誤り発生との関係を詳細に研究する必要があると考え、私の研究室では理論と実験による綿密な解析を行った。その結果、多重波フェージングに伴ってアイパターンが急激に揺らぎ、ビット同期の不完全あるいは同期外れにより



第7図 指向性ダイバーシチ受信の構成



第8図 指向性ダイバーシチ受信によるフェージングの軽減実験結果



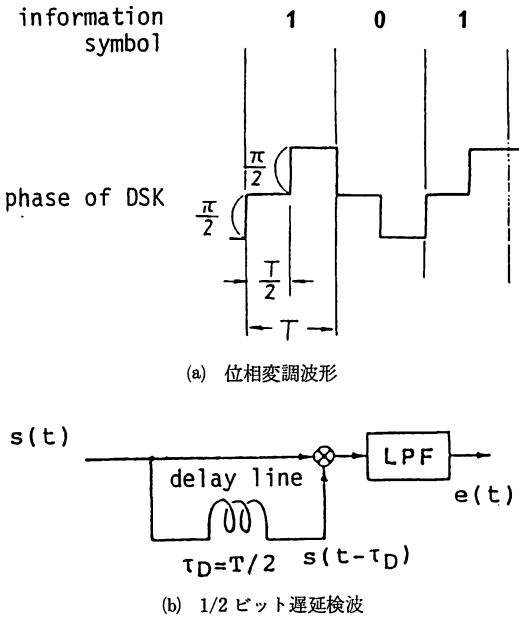
第9図 デジタル移動通信の誤り率特性実測例 (東京, 山手通り, 900 MHz 帯)

バースト誤りが発生するのが原因であることが分かった⁽⁶⁾。

発生機構が分かれば誤り対策の手が打てる。発生した誤りを軽減する方法ではなく、誤りの発生を防止するにはアイパターンの揺らぎを軽減すればよい。その方法としてアイの揺らぎの少ない変復調方式、DSK (Double phase Shift Keying) 方式を見いだした⁽⁷⁾。これは第10図のように1ビット中に位相を90°づつ2回変化させる変調方式と、1/2ビットの遅延検波とを組み合わせたものである。一種のダイバーシチ効果によりアイの揺らぎを

防止し、フロア誤りを発生しない。また第11図に示すように、遅延多重波のある場合には多重波のない場合より誤り率が小さい。

DSKの考案はデジタル移動通信に大きな意義をもつと考えられる。それは変復調方式によってフロア誤りを軽減できるという事実が初めて示され、誤り対策にもう一つの強力な武器を得たからである。この結果、悲観視された高速デジタル伝送に可能性がみえ、改良された方式によれば1 Mbpsの伝送も決して不可能ではないと考えられるようになった。



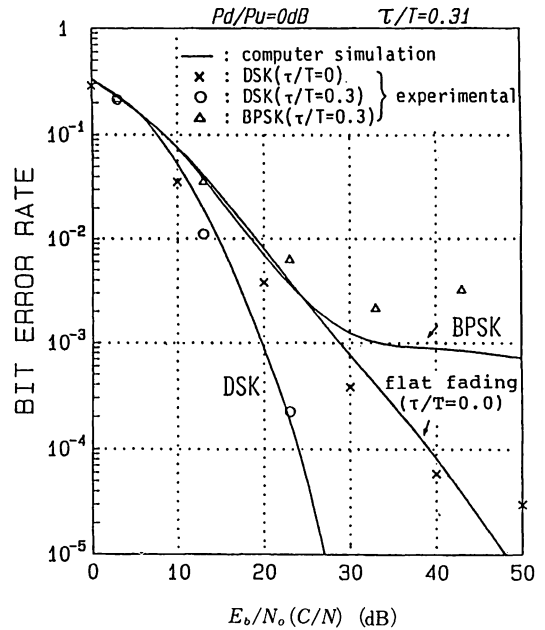
第10図 多重波に強いDSK方式

しかし、DSK が効果を発揮するにはビット速度と多重波の遅延時間の間にある条件がある。DSK にせよ、他の方式にせよ、一般に高速デジタル伝送において多重波の遅延時間の研究が重要な課題としてクローズアップしてきた。そのためには多重波伝搬構造を物理的手法によって明らかにすることが不可欠で、これからの移動通信の伝搬研究の重要な目標がここにある。

——三位一体の研究——

この多重波に強い変復調方式の開発の裏には一つの哲学があった。数年前から提唱していた“三位一体”論である⁽⁸⁾。

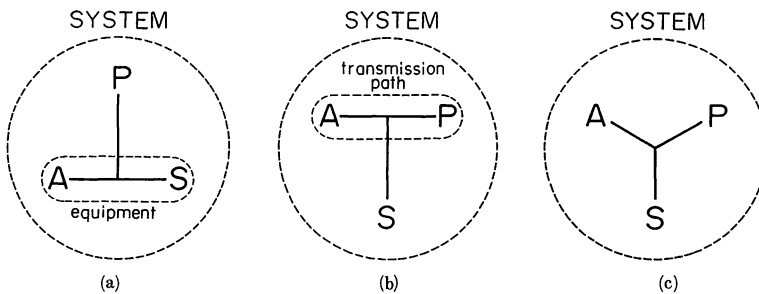
無線通信システムは第12図のように、伝搬(P)、アンテナ(A)及び通信方式(あるいは送受信機)(S)から成る。初期には第12図(a)のように伝搬特性に対応して通信装置(アンテナと送受信機)が設計された。このシステム設計は、伝搬特性をあるがままに受入れる受動的姿勢であ



第11図 レイリーフェージングにおけるDSKとBPSKの誤り率特性の比較
Pd, Pu: 希望波と遅延波の平均電力
 τ : 遅延波の時間遅れ
T: ビット長

った。

しかしアンテナと伝搬は独立なものではなく、両者を合わせて一つの伝送路と考えることにより伝送特性を改善できるという考え方に移行した。第12図(b)の考え方である。事実、多重波伝搬ではアンテナの特性が伝搬媒質によって、伝搬特性がアンテナによって大きく変わる。対流圏散乱におけるアンテナ-媒質結合損失はその代表的な現象である。アンテナと伝搬の結合作用を考えることにより、フェージングを改善する新しい方法が生まれる。これは劣悪な伝搬特性を人為的に改良しようとする能動的姿勢である。この結合作用はここ20年ほど私の強調してきたところで、多くの研究者の御理解をいただき、無線通信の多くの分野で新しいフェージング改善法が創ら



第12図 “三位一体” への過程

れてきた⁽⁹⁾。

その後デジタル移動通信の研究を行っているうちに、送受信機も伝搬と強い結合作用をもつことが分かってきた。フロア誤りは多重波と受信機の復調とが密接に関係して発生する。したがって両者をそれぞれ独立に研究していたのでは、フロア誤り退治はできないと考えるようになった。この考え方でフェージングと誤り発生との関係を綿密に調べた結果、DSK が生まれたのである。

新しいシステムを考えるには、第12図(c)のように、伝搬、アンテナ、送受信機を総合して“三位一体”の思想による研究が必要であり、一人の人間の頭の中で、あるいはそれぞれの分野の専門家の密接な連携によって、新しいシステムの発想も可能となる。

“三位一体”は伝搬が複雑なほどその効果を発揮する。前述のように、伝搬研究者はアンテナや通信方式の研究者よりもこれを実行するのに有利な立場にあると言える。最も複雑な伝搬をもつ移動通信は、三位一体のもとで“伝搬はシステムを制す”の機会に最も富む分野であろう。

——究極の通信——

このように考えてくると、移動通信の分野では研究すべき問題がまだまだ山積している。フェージングの克服のみをとっても、現在その緒についたばかりである。さらに無線通信のもう一つの宿命である有限な周波数という条件を考えれば、もっと多くの問題がある。通信の究極の目標である、“いつでもどこでも誰にでも”に到達するには何十年あるいは何百年の年月を要するかも知れない。

果して究極の通信は実現できるのであろうか。究極の携帯電話、すなわち全国民が携帯機を持っていつでもどこでも誰にでも電話できるシステムを、現在の自動車電話の延長として実現できるかを検討してみた。極めて荒っぽい試算では、このためには10 GHz程度の周波数帯域幅を必要とし、またすべての人が買える値段には程遠い高価なものとなる。しかも電話公害によるプライバシーの侵害を考えると、多くの人が携帯電話を持つことを拒否する恐れがある。つまり究極の携帯電話は幻想に近い⁽¹⁰⁾。

そこで今、第1表に示すような移動メッセージ通信を提案している⁽¹⁰⁾。短いメッセージを授受するもので、一般大衆にとっては移動中に必要な通信の情報はこの程度で十分な場合が多い。単純なアロハ方式によるパケット無線で、一つの無線ゾーンに上り、下り各1波を割り当て、DSK方式で1 Mbps程度の高速伝送により1ゾーン当たり約60万人を収容でき、数十MHzの周波数幅

第1表 移動メッセージ通信の諸元例

割当無線チャンネル	上り、下り各1チャンネル／ゾーン
1メッセージのビット数	最大 1 k bits
伝送速度	1 M bps (耐多重波変復調方式)
占有周波数帯域幅	1 MHz
平均トラフィック	1メッセージ／時間／人
スループット (上り回線)	184 k bps
収容可能利用者数	6.625×10^5 人／ゾーン
周波数利用率	3 Hz／人

があれば全国民1億人にサービスできる。基地局設備も現在の自動車電話よりはるかにコストが低く、携帯機は数万円程度で大衆にも購入できる。受信したメッセージは記憶されて好きなときに読み出せばよく、プライバシーの侵害もない。

最終的には、携帯電話はビジネス用を主体に、一般大衆は移動メッセージ通信を、というのが最も現実的で望ましい究極の通信の形ではないかと考えている。このような形態は、その気になれば20～30年のうちに実現できると思われる。このように考えると、無限に近いと思われる移動通信の研究も案外早く終わりに近づくかも知れない。

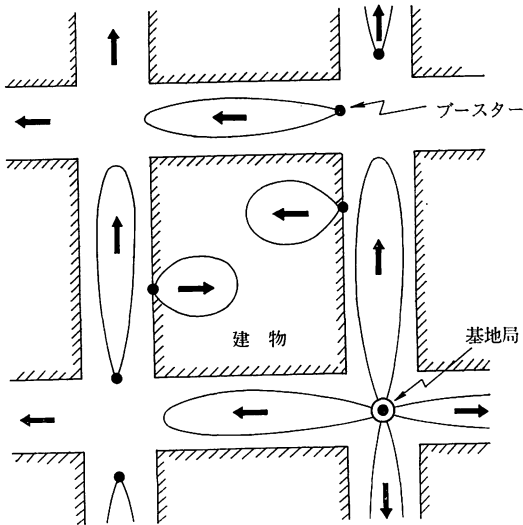
——もう一つの可能性——

このような究極の通信においても、フェージングの克服と電波周波数の有効利用という命題の解決には、実際問題では多大の時間と苦勞が必要であらう。これは馬鹿げた苦勞ではなかろうかという別の考えが頭をもたげる。

現在のセル方式は基地局から数Wの電力を放射し、自由空間損失の他に建物による30～40 dBの回折損失を受けた電波を受信する。さらに多重波干渉によるレイリーフェージングも考慮して、十分な受信電力を確保するよう設計する。このシステムでは、わざわざ劣悪な伝搬条件を作り、通話を可能にするために苦勞して研究していることになる。

また送信電力の中で通信に利用されるのは数十万分の一程度で、その他の電力は無駄に放射されるばかりでなく、他の同一周波数のゾーンに干渉を与える原因となる。つまりこのシステムは、電波エネルギーを浪費し、干渉を起こすために送信しているようなものである。この干渉を避けるためにまた一層の苦勞が必要である。

一体われわれは何のためにこんな苦勞をしなければならないのだろうか？



第13図 樹枝状ゾーン構成の構想
(矢印は下り回線のみ示す)

そこでもう一つの別の可能性に気がつく。それは都市内では道路上のみを無線ゾーンとする方法である。第13図のように路傍の柱上か建物の側壁の基地局アンテナから送信する。距離とともに電波が減衰するのでブースターを設けて中継する。近距離の見通しに近い通信だから送信電力は1mW以下ですむ。ブースターを適当に配置すれば、無線ゾーンの大きさは自由に選べる。最初は主要道路のみをサービスエリアとし、必要に応じて狭い道路や建物内へもブースターを増設できるので、初期投資は少なくてよい。サービスエリアを必要に応じて樹枝状に延ばすことができるので、これを樹枝状ゾーン構成と呼ぶ⁽⁹⁾。

この方式では、建物を越えて伝搬する電波は建物の回折により減衰する。すなわち現行セル方式では邪魔であった建物を、干渉防止の遮蔽に利用するわけである。したがって一つおきのゾーンでも同一周波数を使用でき、周波数利用効率が非常に高い。

前述のように通信の目的に最も望ましいのは自由空間伝搬であるが、この方式はそれに近く、伝搬損失もフェージングも少ない。多重波の影響もそれほど大きくないだろう。“発振しないブースター”さえできれば、この方式の実現にはさほどの困難はないように思える。

恐らくこの種の自由空間に近いシステムが移動通信、特に建物と加入者の密度の高い地域での究極の形態になるのではなからうか。もちろん伝搬研究における問題もないではないが、現在のセル方式の著しく難しい問題は氷解する。このような考え方にはまだ多くの変形が考えられるが、問題の山積する移動通信の研究もこの当たり

が終着駅かも知れない。このようなシステムが実現すれば、移動通信の伝搬研究も終わりに近づく。

——この話の終わり——

この世に電波のある限り伝搬の物理学的研究は終わることはないが、無線通信の工学的伝搬研究には終わりがある。この終わりが何十年先か、何百年先かは分からないが、論理の帰結として終わりがあることは間違いない。もし既製のシステムのみ拘泥していれば、一層早く先細りになることは目に見えている。かと言って伝搬研究に見切りをつけるのは余りに早計である。これまでの歴史を見ても、もう研究問題がないと思われる中から突然新しい問題が生まれている。伝搬研究を放棄すれば、無線通信に将来はない。

しかし座して待っていても新しいシステムは生まれてこないし、また新しい伝搬問題も生まれない。伝搬研究者のために新しいシステムを考えてくれる人は誰もいない。伝搬研究者自身が考えねばならないことである。危機感を感じる中から新しいアイディアも生まれる。

幸い伝搬研究者は新しいシステムを考えやすい立場にある。それは何度も申し上げるように、無線通信においては伝搬がシステムを制する最も重要な要素であるからである。この目的には物理的手法による研究が不可欠で、これをベースにしてアンテナや通信方式への広い視野を持ち、新しいシステムを模索することがこれからの研究者の仕事である。

究極的なシステムは、自由空間に近い伝搬にある。つまり伝搬研究者は、伝搬研究を不要にするために研究することになり、これは自分で自分の首を締めるようなものである。しかし研究とは本来そういうもので、その先に新天地があるから研究は面白いのである。

これまでは無線通信を主体に話を進めてきたが、電波の利用にはもう一つの大きな分野として非通信がある。その中でも電波航法やリモートセンシングなどの電波計測が重要である。

とくにリモートセンシングは通信に比べるとその比重はまだ小さいが、これから次第に重要性を増す分野である。これも一つのシステムであるが、この中の伝搬は通信におけるよりもはるかに意味が重い。伝搬現象そのものがその本体を成すからである。現象は主として自然現象であり、この研究に終わりはないかも知れない。しかしここでも通信と同様に、新しい対象、新しいシステムを志向しない限り、急速に収束してしまう危険は避けられない。

これからの伝搬研究について、大変大胆な予想を含めて伝搬研究の始まりと終わりについて述べた。今後の進

展を正しく予測するのは難しいが、私の予想が当たっても当たらなくても、それはすべて研究者の責任である。

何年かの後、URSI-F 小委員会第 500 回記念会のときにその解答の一部がみられると期待している。今後ますますの御発展をお祈りします。

—以 上—

参 考 文 献

- (1) Ikegami, F. and Yoshida, S.; "Analysis of multipath propagation structure in urban mobile radio environments", IEEE Trans. on Antennas and Propagat., **AP-28**, 4, July 1980.
- (2) Ikegami, F., Yoshida, S., Takeuchi, T., and Umehira, M.; "Propagation factors controlling mean field strength on urban streets", IEEE Trans. on Antennas and Propagat., **AP-32**, 8, Aug. 1984.
- (3) Ikegami, F. and Yoshida, S.; "Feasibility of predicting mean field strength for urban mobile radio by aid of building data bases", Proc. IEEE International Conference on Communications,

Boston, **A2-6**, June 1983.

- (4) 池上, 竹内, 吉田; "移动通信の多重波フェージングにおけるアンテナ指向性の効果", 信学論, **J 68-B**, 3, 1985.
- (5) 泰, 三木, 生越; "陸上移動無線における高速デジタル信号伝送特性", 信学論, **J 67-B**, 2, 1984.
- (6) Yoshida, S., Ikegami, F., and Takeuchi, T.; "A mechanism of burst error occurrence due to multipath propagation in digital mobile radio", Proc. ISAP '85, Japan, Aug. 1985.
- (7) Yoshida, S., Ariyavisitakul, S., Ikegami, F., and Takeuchi, T.; "A novel anti-multipath modulation technique DSK", Proc. IEEE Globecom., New Orleans, Dec. 1985.
- (8) 池上文夫; "無線通信はいかにしてフェージングを克服できるか", 信学誌, **66**, 3, Mar. 1983.
- (9) 池上文夫; "携帯通信物語", 信学誌, **67**, 1, Jan. 1984.
- (10) 池上文夫; "移動メッセージ通信方式の提案——究極の通信の試み——", 信学技報, **CS 85-139**, Jan. 1986.

|||||