

電波伝搬：物理現象とモデリング

——先達の足跡をたどる——

Radiowave Propagation : Physical Phenomenon and Its Modelling

唐沢好男

Abstract

自然現象の解明に奮闘し、通信システム設計に有用な電波伝搬モデル構築や研究指針を示した先人たちの足跡を訪ねてみたい。ここに取り上げる例は、いずれも、我が国の先達はその構築に主導的役割を担い、かつ、今日の無線通信の基礎となっている伝搬研究とその結晶である伝搬モデルである。具体的には、移動伝搬理論を支える確率分布：仲上 n 分布（今日の仲上・ライス分布）と仲上 m 分布を生み出した仲上稔氏の研究、陸上移動伝搬の概念構築と回線設計手法を打ち立てた奥村善久氏の研究開発、広帯域移動通信時代を予測してアンテナ（A）・伝搬（P）・システム（S）の融合研究（A・P・S三位一体研究）を提唱した池上文夫氏の思想、そしてもう一つの無線通信の重要課題、降雨減衰のモデル化に取り組んだ森田和夫氏の研究開発を取り上げる。

キーワード：電波伝搬モデル、仲上 n 分布、仲上 m 分布、移動伝搬モデル、降雨減衰モデル

1. 不 易 流 行

どの技術分野にも基礎があり、その基礎を最初に打ち立てた人（パイオニア）がいる。無線通信では、そのシステム検討や回線設計において、通信路に生じる電波伝搬劣化の特性把握が重要であるが、対象が不規則性・不確定性を伴う自然現象が相手になり、その取扱いが非常に複雑かつ困難になる。雲をつかむようなところから、徐々に、その法則性を探り当ててゆく道程は並大抵のことではない。そのような状況において、自然現象の解明に奮闘し、通信システム構築に有用な電波伝搬モデルを生み出した我が国の先達の足跡を訪ねてみたい。それぞれの時代の息吹を捕えて、そこに求められる汎用的なもの（世代を超えて生き続けるもの）を構築する姿勢は「不易流行」と呼ばれるが、ここで取り上げる例は正にそれである。

具体的には、移動伝搬理論を支える確率分布：仲上 n 分布（今日の仲上・ライス分布）と仲上 m 分布を生み

出した仲上稔氏の研究 [1940年代]、陸上通信伝搬の概念構築と回線設計手法を打ち立てた奥村善久氏の研究開発 [1960年代]、広帯域移動通信時代を予測してアンテナ（A）・伝搬（P）・システム（S）の融合研究（A・P・S三位一体研究）を提唱した池上文夫氏の思想 [1980年代]、そしてもう一つの無線通信の重要課題、降雨減衰のモデル化に取り組んだ森田和夫氏の研究開発 [1970年代] を取り上げる。仲上氏の研究は1940年代であり、50年の歴史を振り返る今回の企画の範ちゅうからは逸脱しているが、抜いて語ることはできないという筆者の意志でこれも含めている。

本稿は、これらのモデルへの温故知新、すなわち、そのれい明期を訪ね、そこで生まれたモデルや思想が今日の無線通信の技術基盤として、広く継承・発展している様をまとめる。（なお、以下の文章中では個人名への敬称を省略している。）

2. 源 流 を 訪 ね る

2.1 フェージングの基本確率分布：仲上分布

1940年代、国際電気通信株式会社で短波通信の伝搬研究を行っていた仲上稔は、その確率現象から今日の移動通信の伝搬モデルに引き継がれている三つの確率分

唐沢好男 正員：フェロー 電気通信大学先端ワイヤレス・コミュニケーション研究センター
E-mail karasawa@ee.uec.ac.jp
Yoshio KARASAWA, Fellow (Advanced Wireless and Communication Research Center, University of Electro-Communications, Chofu-shi, 182-8585 Japan).
電子情報通信学会誌 Vol.99 No.8 pp.792-798 2016年8月
©電子情報通信学会 2016

布： n 分布（今日の仲上・ライス分布）， m 分布， q 分布（今日の仲上・ホイット分布）を生み出している。ここでは、現在においても移動通信の主要な基本モデルとしての役割を担っている n 分布と m 分布を取り上げる。

2.1.1 仲上 n 分布

不規則信号の振幅の確率分布の理論的研究は、我が国では仲上により、米国ではベル研究所のライス (S.O. Rice) により、1940 年代に独立に行われていた。仲上は短波^(用語)の受信信号の強度分布の理論的考察から、一つの確率分布を与える式を 1940 年の電気通信学会雑誌に発表した⁽¹⁾。同じ式は、ライスにより、雑音下での信号の強度分布を与える分布として、ベル研の技術雑誌 BSTJ に、1944/1945 年に発表された⁽²⁾。（一つの論文が 2 回に分けて発表され、当該分布が提示されているのは 1945 年の号。）論文誌の国際性や認知度の違いから、この分布は世界（主に欧米）では長く「ライス分布」と呼ばれてきたが、我が国先達の努力によって、「仲上・ライス分布」の呼び名が定着しつつある。（ITU-R の文書では、仲上・ライス分布が用いられるが、IEEE の論文誌などではまだライス分布と呼ばれることが多い。）

上述のとおり、この分布は、今日、「仲上・ライス分布（あるいはライス分布）」と呼ばれているが、ここでは、その歴史を語るときは当時の呼び名に従って「仲上 n 分布」と呼ぶ。

定常信号と不規則信号の合成信号振幅の確率分布を考える。これは、マルチパスフェージングで言えば、①直接波と多数の散乱波が合成された信号の振幅、あるいは、②粗面に反射された波の定常成分（コヒーレント成分）と不規則変動成分（インコヒーレント成分）の合成振幅であり、通信では、③信号に雑音が重畳された信号の振幅の確率分布に相当する。

用語解説

短波, VHF 帯, UHF 帯, ミリ波 周波数帯によって定義される電波の種類。短波：3~30 MHz, VHF 帯：30~300 MHz, UHF 帯：300 MHz~3 GHz, ミリ波：30~300 GHz。

半ガウス分布 平均値 0 の正規分布（ガウス分布）の正部分側 ($r \geq 0$) のみで定義される確率分布。

アダプティブアレー 干渉波等が存在する劣悪な電波環境において、良好な受信特性になるよう適応的にアンテナ指向性が変化する高機能アレーアンテナ。

MIMO 多入力多出力の略。送受信の双方にアレーアンテナを具備して、大容量通信を実現する高機能無線通信システム。

OFDM 直交周波数分割多重。広帯域の信号を多数の狭帯域直交周波数に分割するマルチキャリア変調方式の一つで、大容量通信を阻むマルチパス遅延に耐性を有する通信方式。

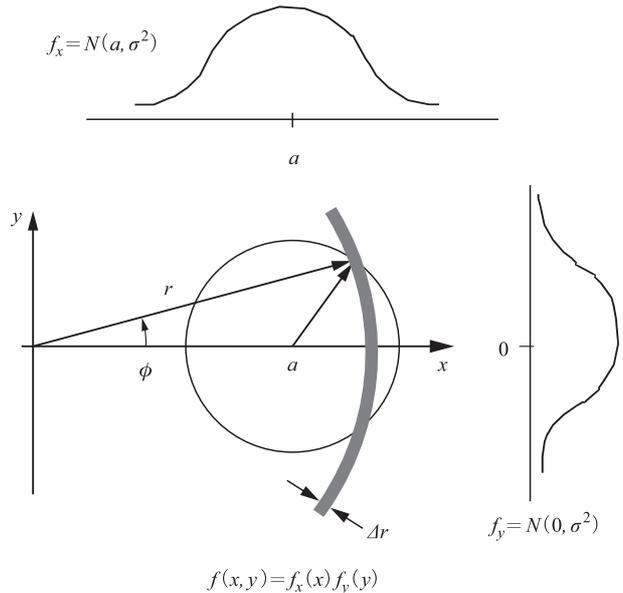


図1 定常成分と不規則変動成分の合成 仲上・ライス分布の説明には、この図が使われる。しかしこの説明は、ライス流であって仲上流ではない。

現在、多くの教科書や専門書において、仲上・ライス分布は、図1のように説明されている。定常信号と不規則変動成分を二つの複素数で表し、合成信号の振幅と位相を r, ϕ とする。合成信号を複素平面上に x, y で表すと、 x, y の確率分布は、図のケースでは、それぞれ、 $N(a, \sigma^2), N(0, \sigma^2)$ の独立な正規分布であるため、 r と ϕ の結合確率分布は次式で表される。

$$f_{r\phi}(r, \phi) = \frac{r}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{a^2 - 2ar \cos \phi + r^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

これを、位相 ϕ について積分すれば、次式が得られる。

$$f_r(r) = \int_0^{2\pi} f_{r\phi}(r, \phi) d\phi = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{a^2 + r^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{ar}{\sigma^2}\right) \quad (2)$$

ここで、 I_0 は、第一種の 0 次変形ベッセル関数である。

我々は、このようにして、仲上・ライス分布を学んでいると思うが、仲上の導出過程はこれとは異なっている（上述の説明はライス流である）。

以下、仲上の導出過程を追う。（文献(3) § 9.4 に、その導出過程が整理してまとめられている。）短波の伝搬環境では、振幅の異なる多数の正弦波が合成されていると考える。多数の確率変数の和の分布は、確率密度関数の畳込み積分になるので、各分布を特性関数に変換（フーリエ変換等）して積の形にし、そこで解析するのが常道である。そのとき、仲上はこの変換に、ハンケル

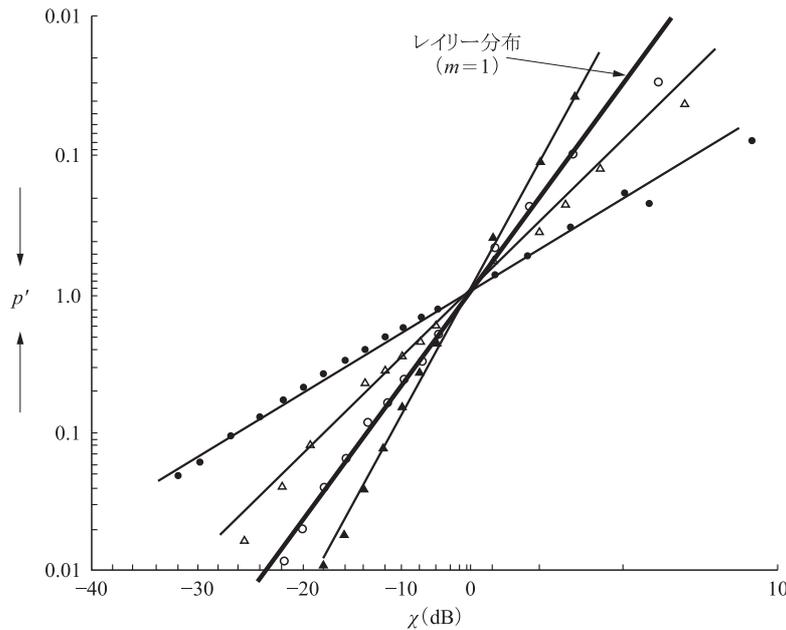


図2 短波通信に見られるフェージングの相対頻度特性 (m 分布誕生のルーツ)⁽⁴⁾
 この相対頻度グラフは、レイリー分布の確率密度関数（累積分布ではない）が $y=x$ の直線になるように縦軸・横軸が変換されている。短波フェージングのイベントごとのデータは、この図において種々の傾きを持つ直線で近似できる。

変換型の特性関数（フーリエ・ベッセル変換）⁽³⁾を利用している。

振幅 r_i の正弦波のハンケル変換は $F(k) = J_0(\lambda r_i)$ (J_0 : 第一種 0 次ベッセル関数, $k: r$ が変換された領域での変数) となり, 振幅が異なる多数の正弦波の合成波振幅 r のハンケル変換は

$$F(k) = \prod_{i=1}^N J_0(kr_i) \approx \exp\left(-\frac{\sigma^2 k^2}{2}\right) \quad (N \gg 1) \quad (3a)$$

$$\sigma^2 = \left(\sum_{i=1}^N r_i^2\right) / 2 \quad (3b)$$

となる。式(3a)の最後の辺の式は、波の数 N が十分大きい場合の近似である。

これに振幅 a の正弦波が一つ加わった信号強度のハンケル変換型特性関数の逆変換（確率密度関数）は

$$f(r) \approx r \int_0^\infty k J_0(rk) J_0(ak) \exp\left(-\frac{\sigma^2 k^2}{2}\right) dk \quad (4a)$$

$$= \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{a^2 + r^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{ar}{\sigma^2}\right) \quad (4b)$$

で表される。この式(4b)は、式(2)と同形である。

このようにして、同時代の洋の東西で、異なる目的、異なる手法で、後の時代の移動伝搬の基本式、仲上・ライス分布が生まれたことが興味深い。

2.1.2 仲上 m 分布

仲上を世界的に有名にしているのは、1943年に論文として発表されたこの仲上 m 分布 (the Nakagami distribution) である⁽⁴⁾。以下、この分布が生まれる過程を追う。

最近は見掛けないが相対頻度という表記がある。確率密度関数の最大値（モード）を1として正規化したものである。この相対頻度を p' 、信号強度のデシベル値を χ とし、最大値1を与える χ を 0 dB にとる。縦軸 y 、横軸 x を各々特殊な変換をして、レイリー分布の確率密度関数（累積分布関数ではないことに注意）が $y=x$ の直線で表される図（図2）を用いる。

仲上は、この x, y 軸を持つ特殊方眼紙上に短波のフェージングの相対頻度をプロットすると、図2のようにフェージングが強い場合も弱い場合も、直線で表される性質があることを見いだした。そこで、新しいパラメータ m を導入し、 $y=mx$ になる分布を求めた。「歴史の誕生」である。信号強度を真数表現 $r(\geq 0)$ として変数変換し、その確率密度関数を求めると、次式を得る。この導出は原著論文⁽⁴⁾に、またその詳細は文献(5)の付録1に示されている。

$$f(r) = \frac{2m^m}{\Omega^m \Gamma(m)} r^{2m-1} \exp\left(-\frac{m}{\Omega} r^2\right) \quad (r \geq 0) \quad (5)$$

ここで、 Γ はガンマ関数、パラメータは、 $m \geq 1/2$, $\Omega = \langle r^2 \rangle$ である。

上記経緯から、伸上 m 分布は発見的手法により、レイリー分布を拡張した分布として、生み出されたことになる。パラメータ m は 0.5 以上の値を持ち、 $m=0.5$ が半ガウス分布^(用語)、 $m=1$ がレイリー分布である。 $0.5 \leq m < 1$ ではレイリーフェージング以上に深いレベル低下がある分布を表現できる。伸上 m 分布は、短波 (HF) 帯でのフェージングの分布として見いだされたものであるが、近年、GHz 帯における移動伝搬でのマルチパスフェージングにも広く適用できることが実証されている (具体例は次章に)。

今日では、確率変数 z がガンマ分布するとき、 $z=r^2$ とした r の分布が伸上 m 分布になることが知られている⁽⁶⁾。ガンマ分布は、より古くから知られていたもので、ガンマ分布する変数 z から、 r の分布を求めたいニーズがあれば、変数変換手法によって、直ちに、式(5)の分布形は得られたであろうが、それとは関係ないところから、発見的手法によってこの汎用的な分布が生まれた点に、歴史の面白さがある。また、当時、その経験則的性格のゆえに、伸上自身がその物理的意味合いを求めて思考を重ねた苦悩が、文献(6)等ににじみ出ている。

2.2 移動伝搬：奥村カーブと奥村モデル

1960 年代初め、日本電信電話公社 (電電公社：現 NTT) に本格的な移動通信サービスを開始する機運がまだないころ、新しい周波数に対応した移動通信システムを構築するために、新たな無線回線設計の手法を確立することの必要性を感じて、執念的な取組みをしたのが奥村善久である。その取組みの全貌と得られた成果については研究実用化報告 (研実報) に 60 ページの論文としてまとめられている⁽⁷⁾。また、その研究開発の経緯は文献(8)の中に詳しくまとめられている。

移動伝搬に関わる奥村の業績を二つ挙げたい。一つは、膨大な測定実験を重ねて得られた移動伝搬特性データに基づく伝搬劣化の距離特性、いわゆる「奥村カーブ」である。組織を挙げて取り組んだ研究開発であったため、奥村の先見性と統率力の賜物と言った方がよいのかもしれない。周波数 453~1,920 MHz 間の五つの周波数、実験場所は市街地や郊外地を含む関東一円の距離 100 km 内のエリアにわたる、とてつもない大規模実験によるデータ取得であった (その苦労話は文献(8)に詳しい)。奥村カーブは VHF 帯^(用語)・UHF 帯^(用語) の電波伝搬曲線に関する CCIR (現 ITU-R) 勧告⁽⁹⁾ となり、世界中に広く知れ渡ることとなった。その後、奥村カーブは世界の無線システムの構築やサービスの品質向上など、様々な場面で活用されている。

もう一つの業績は、非常に複雑で 100 dB にも及ぶ受信電力差を有する陸上移動伝搬を、距離特性・短区間中

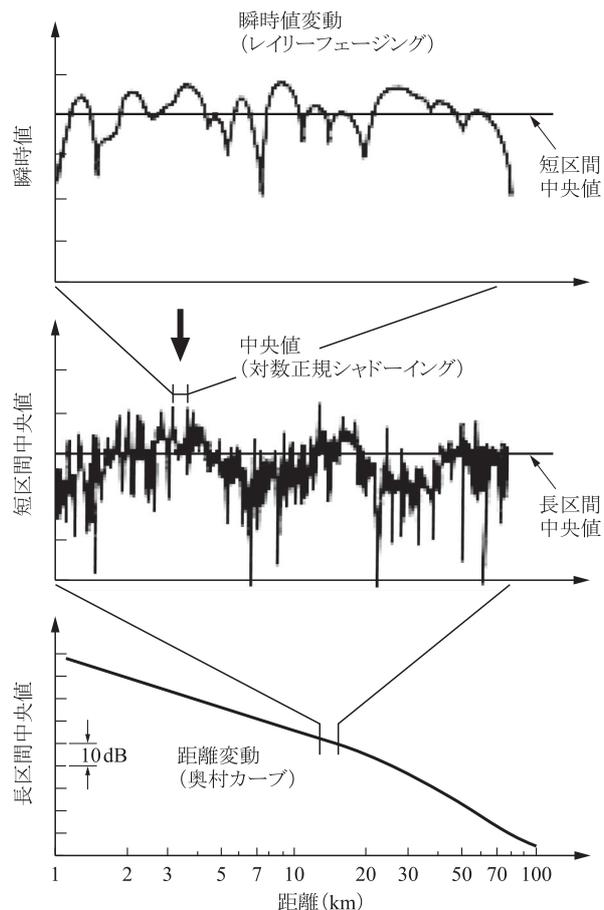


図3 移動通信の伝搬モデル (奥村モデル) 短区間中央値変動 (シャドウイング) は積算の確率過程から導かれる対数正規分布、瞬時値変動は加算の確率過程から導かれるレイリー分布が採られ、物理現象の理にかなっている。

央値変動 (シャドウイング変動)・瞬時値変動の3要素の重畳構造に組み上げたモデル (奥村モデル) を示したことである。このモデルにこそ時代を超えた不易流行の精神を見て取ることができる。図3はこのモデルを示している⁽⁸⁾。距離特性はほぼ d^{-n} ($n=3.5\sim 4$) で表される奥村カーブ、短区間中央値変動は積算の確率過程から導かれる対数正規分布、そして、瞬時値変動は多数のマルチパス波の合成であるレイリー分布、の三層構造で定まる。複雑な移動伝搬環境を物理現象の持つ性質を採り入れた形で組み立てており、見事と言える。

この奥村カーブと奥村モデルを含めたセルラシステムの先駆的研究により、2013年、全米工学アカデミーから、工学のノーベル賞と言われる「チャールズ・スターク・ドレイパー賞 (Charles Stark Draper Prize)」が奥村に与えられた。日本人研究者として初めての快挙である。

2.3 広帯域移動伝搬モデル：A・P・S三位一体の研究（池上哲学）

1980年代まで、無線通信のシステム開発を目的とした伝搬研究では、その守備範囲は比較的明確であった。例えば、無線回線における降雨の影響は、その減衰量を物理現象と結び付けた確率分布で示すことが求められ、あとは、システム側でCN比（搬送波対雑音比）や誤り率の分布に換算して回線設計すればよかった。このころ学会の研究会で伝搬研究者がBER（ビット誤り率）の話にまで立ち入るのは、何か本質を外している雰囲気があった。

ところが近年、伝搬研究の比重が高まっている移动通信、特に広帯域のデジタル移动通信においては、信号強度の低下、伝送波形のひずみ、マルチユーザ干渉等、伝送特性の劣化がシステムに依存して多様になり、ここまでの伝搬研究という境界ははっきりしなくなってきた。アダプティブアレー^(用語)やMIMO^(用語)という伝搬環境の変化に追従して適応的に動作するアレーアンテナ利用の研究も盛んになっているが、これもアンテナと伝搬とシステムの研究の境界が定めにくい。このような複雑な関わりの中で、伝搬研究が従来の守備範囲にとどまっていると、情報の受け渡しが不十分となり、せつかくの研究がシステムの設計・評価に生かされない事態が起きてしまう。膨大な伝搬データが蓄積される一方で、アンテナやシステム評価にはそれと遊離した都合の良い伝搬モデルが用いられている、というのはよくある話である。このような状況では、もはや伝搬(P)単独の研究というより、アンテナ(A)やシステム(S)を含めたA・P・S三位一体の取組み、すなわち、お互いの境界領域にあるギャップを埋めるような研究や関連分野の知識を踏まえた分野横断研究が重要になる。このA・P・S三位一体研究概念は、新しい時代の移动通信の研究に指針を与えた哲学であり、提唱者は池上文夫（当時京都大学）である。その哲学（思想）は文献(10) [1983]、(11) [1987]で熱く語られている。

図4はA・P・S三位一体研究への流れをまとめている⁽¹⁰⁾。図4(a)は、伝搬特性をあるがままに受け入れ、装置は伝搬を、伝搬は装置を与えられたものとする受動的立場である。システム設計の最初はここから始まり、第I世代と位置付ける。図4(b)は、伝搬とアンテナは一つの伝送路を構成し、両者は独立なものではなく、互いに関係して良好な伝送路の実現を目指すとする能動的立場である。これを、第II世代と位置付ける。ここで止まっては駄目だというのがA・P・S三位一体研究の思想であり、図4(c)がそのイメージである。伝送特性の劣化の原因は伝送路のみにあるのではなく、それに反応して動くシステムにもあり（＝伝送路とシステムの相互作用による誤り）、新しい時代の研究（第III世代の研究）方向を指し示したものである。筆者はこのA・P・S三

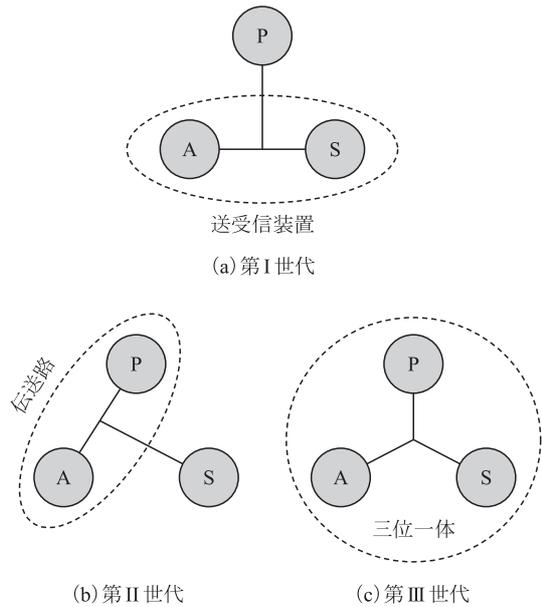


図4 広帯域移动通信でのA・P・S三位一体研究 第I世代は、伝搬を自然現象としてそのまま受け入れる、第II世代は、アンテナと伝搬で力を合わせるアダプティブアレーのイメージ、第III世代は、例えば、MIMOやOFDMのイメージ。

位一体研究の思想に強く共鳴している。

2.4 高周波利用の宿命：降雨減衰（森田・樋口モデル）

前節までは、移动通信の主要課題であるマルチパスフェージングを対象としたが、ここでは、もう一つの電波伝搬の宿命的な問題「降雨減衰」に着目し、その原野を切り開いた森田和夫の研究を取り上げる。

降雨減衰は、周波数依存性が強く、主に10GHz以上の周波数帯で問題が顕著になり、周波数が高くなるほど減衰量が大きくなる（100GHz以上では減衰量は飽和するが）。近年、地上系のアクセス回線、あるいは衛星通信では、広帯域化を目的としてミリ波^(用語)等の利用も検討されているが、そのようなシステムの構築には降雨減衰の影響は避けて通ることができず、古くて新しい問題である。

降雨減衰は、無線回線の設計において世界共通の問題ではあるが、原因となる降雨現象は、雨量の統計的な性質においても、空間的な広がり方においても、地域や季節依存性が強く、年度ごとの変動も大きいため、それぞれの国で独自に推定法が作り上げられてきた経緯がある。その場合でも、降雨減衰計算式の基本構造は、地上系・衛星系共通に、 $A(p) = \gamma(R_p)L_e(R_p)$ の形で表すことが一般的であった。ここで、 A は降雨減衰量 (dB)、 R_p は時間率 p における降雨強度（1分間降雨強度：単位mm/h）、 $\gamma(R)$ は、その降雨が単位区間当り様に分布したときの減衰量（減衰係数：dB/km）、 L_e は伝搬パス

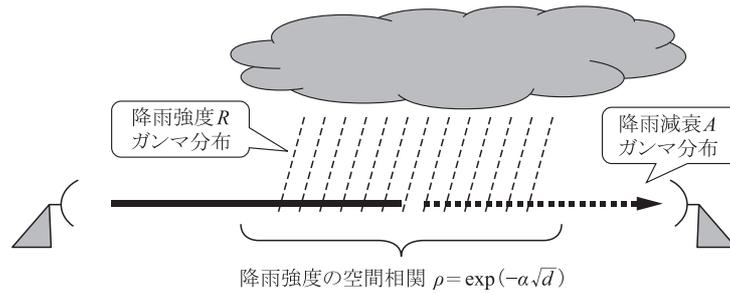


図5 降雨減衰：森田・樋口モデル 我が国の降雨の統計的な性質を取り入れた理論モデル。これをベースに、更なる高精度化への取組みが進められている(3.)。

が雨域中を通過する実効的な通路長（等価通路長：km）である。

我が国においては、電電公社の森田和夫が1970年代、無人の荒野を開拓する勢いで降雨減衰の問題に取り組んだ。特徴は、我が国の降雨の強度と降雨の空間相関特性を調べた結果から、等価通路長とは別の視点で理論的な計算式を目指した点である。このモデル化は、統計数理研究所の樋口伊佐夫との共同で行われており、「森田・樋口モデル」と呼ぶのがふさわしいであろう。

森田・樋口の研究は、電電公社の研実報に1970年⁽¹²⁾、1975年⁽¹³⁾に発表され、前者は蓄積されたデータに基づく降雨減衰推定法の考え方、後者は、地点降雨強度がガンマ分布（パラメータ： ν, β ）に、降雨の空間相関 ρ が $\rho = \exp(-\alpha\sqrt{d})$ （ α ：地域依存パラメータ、 d ：距離）の形に表されることを利用して、通路長 D の降雨減衰（ A (dB)）の分布もガンマ分布（パラメータ： ν_e, β_e ）で与えている。図5は、このモデルを模式的に表している。

世界共通の推定のためには、パラメータ値 α の定め方が難しかったり、それ以上に、空間相関の距離特性の違いのため、無線通信の国際標準化機関であるCCIR（現ITU-R）での世界標準には至らなかったが、長く我が国の無線回線（特にアクセス回線）降雨減衰推定の計算法として実用に供されるとともに、その後の降雨減衰推定法高度化の礎となってきた。

筆者は、伝搬モデルは物理現象に裏打ちされた数理モデルで表されるのが望ましいと考えているが、これは、正にそれを具体化したものであり、森田の着眼点に敬意を表している。

3. 源流から潮流へ

前章で取り上げた伝搬モデルや哲学は、その時代にとどまることなく現在に引き継がれ、大きな潮流を形成している。

・フェージングの確率分布

仲上が編み出した二つの分布（仲上 n 分布と m 分布）は、現在も移動通信のマルチパス環境を表現するモデルとして重要な位置を占めている。仲上 n 分布は、仲上・ライス分布と呼び名が変わって、見通し内の移動体通信のフェージングに適用される基本モデルとして生き続けている。仲上 m 分布は、仲上・ライス分布のような特殊関数を含まないため他の関数と組み合わせる際の解析性の良さから、仲上・ライス分布を代理するもの等として移動通信のマルチパス伝搬環境下のデジタル伝送特性評価に重宝がられている。本稿執筆時点において、IEEE Xploreで“Nakagami distribution”を検索すると1,430件のヒットがある。世界的なモデルとなっている証拠である。

・移動伝搬モデル

奥村カーブは、数値計算を可能とするOkumura-Hataモデルとして⁽¹⁴⁾、ITU-Rの勧告手法となり、世界中の移動通信回線設計に用いられている。更に、市街地の道路や建物分布の特徴パラメータを採り入れた、より高精度な伝搬推定法へと発展している⁽¹⁵⁾。図3で示された3要素構成の伝搬モデル（奥村モデル）は半世紀たった今も、移動通信の基本伝搬モデルとして生き続けている。

・A・P・S三位一体研究

移動通信が広帯域かつ高速移動体へのサービスに向かい、伝送特性劣化の要因が信号強度の低下による熱雑音から、時間領域や周波数領域（＝ドップラー広がりや遅延広がりによる）におけるフェージングの選択性現象に伴う波形ひずみへと変わってきている。現在、通信の主要技術となっているOFDM^(用語)やMIMOなどは、正に、第Ⅲ世代哲学に基づくA・P・S三位一体の研究が実践されていると言っても過言ではない。それらの取組みを、個別に取り上げるスペースがないが、この思想に触発されて行っている筆者らの研究を一つの例に挙げさ

せて頂きたい⁽¹⁶⁾.

・降雨減衰推定

森田・樋口によって作り上げられた降雨減衰モデルは、時代とともに高精度化が図られ、我が国においては、非常に精度良い降雨減衰推定が可能になっている。細矢らは、文献(13)のモデルをベースに、1980年代の降雨減衰測定データにより、比較的短距離の回線に高精度で適用可能な計算法を提示している⁽¹⁷⁾。また、細矢は日本の降雨強度分布が、簡易に計算できるモデル(時間率が小さい部分でガンマ分布に、時間率が比較的大きい部分で対数正規分布に近似できる分布)で精度良く近似できることを調べ、M分布モデルとして提案している⁽¹⁸⁾。また、日本各地に観測点を有するAMeDASの1時間降水量データから精度良く降雨強度分布に変換する手法を提案し、降雨減衰推定の高精度化に寄与している。小野らは、降雨強度も降雨減衰もM分布で精度良く近似が可能であることを自身で測定したデータ等で調べ、それを数式化した推定法を確立している⁽¹⁹⁾。この推定法は、我が国のマイクロ波帯の固定無線システムの回線設計基準に採用され、現時点において我が国での最良推定法になっている。

ここ数年、日本では異常気象が多発(?)し、ゲリラ豪雨に見舞われる時代、新たな視点に立った降雨減衰推定法が必要になっているのかもしれない。

4. むすびに代えて

電波伝搬の研究は、対流圏・電離圏、固定通信・衛星通信・移動通信の多岐にわたり、また、通信・放送・リモートセンシング・電磁干渉など異なる視点からの取組みも多い。限られた誌面で、その歴史を網羅するのは不可能であるので、現在の潮流の水源地を開拓した4人のパイオニアの研究に焦点を当てた。ここで取り上げることができなかった新規性・有効性の高い電波伝搬研究も数多くある。

文 献

- (1) 仲上 稔, “位相並振幅が不規則に変化する多数の振動の合成振幅に関する研究(其の二),” 信学誌, no. 202, pp. 17-27, Jan. 1940.
- (2) S.O. Rice, “Mathematical analysis of random noise,” Bell Syst. Tech. J., vol. 23, no. 3, pp. 283-336, 1944/vol. 24, no. 1, pp. 46-156, 1945.
- (3) 奥井重彦, 電子通信工学のための特殊関数とその応用, pp. 154-157, 森北出版, 1997.
- (4) 仲上 稔, “短波に於けるフェージングの統計的特性,” 信学誌, vol. 27, no. 2, pp. 145-150, Feb. 1943.
- (5) 唐沢好男, 改訂: デジタル移動通信の電波伝搬基礎, コロナ社, 2016.
- (6) 仲上 稔, 和田俊介, 藤村茂幸, “不規則位相問題について—フェージングの立場より—,” 信学誌, vol. 36, no. 11, pp. 595-602, Nov. 1953.
- (7) 奥村善久, 大森英二, 河野十三彦, 福田倚治, “陸上移動無線における伝ぱん特性の実験的研究,” 研実報, vol. 16, no. 9, pp. 1705-1764, Sept. 1967.
- (8) 奥村幸彦, “移動電波伝搬「奥村カーブ」の確立と世界初商用セルラ電話の誕生に向けて,” 信学通誌, no. 29, pp. 66-73, June 2014.
- (9) CCIR Recommendation 70, “VHF and UHF propagation curves for frequency range from 30 MHz to 1000 MHz,” ITU, 1974.
- (10) 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—変貌する対策技術の本質と動向—,” 信学誌, vol. 66, no. 3, pp. 274-279, March 1983.
- (11) 池上文夫, “伝搬研究の始まりと終わり,” 電波研究所季報, vol. 33, 特5, pp. 43-54, 1987.
- (12) 森田和夫, 樋口伊佐夫, “降雨による電波の減衰量に関する統計的研究,” 研実報, vol. 19, no. 1, pp. 97-150, 1970.
- (13) 森田和夫, 樋口伊佐夫, “ミリメートル波帯降雨減衰の推定,” 研実報, vol. 24, no. 9, pp. 2061-2071, 1975.
- (14) M. Hata, “Empirical formula for propagation loss in land mobile radio service,” IEEE Trans. Veh. Technol., vol. VT-29, no. 3, pp. 317-325, 1980.
- (15) 坂上修二, 久保井 潔, “市街地構造を考慮した伝搬損の推定,” 信学論(B-II), vol. J74-B-II, no. 1, pp. 17-25, Jan. 1991.
- (16) 唐沢好男, “広帯域移動通信の「電波伝搬」と「システム」の接点を探る,” 信学誌, vol. 81, no. 8, pp. 830-837, Aug. 1998.
- (17) 細矢良雄, 佐々木 取, 白戸 正, 森田和夫, “20 GHz帯降雨時伝搬特性の推定,” 研実報, vol. 33, no. 6, pp. 1221-1231, 1984.
- (18) 細矢良雄, “日本各地の1分雨量分布の一推定法,” 信学論(B), vol. J71-B, no. 2, pp. 256-262, Feb. 1988.
- (19) 小野健一, 唐沢好男, “安全係数の概念を導入したM分布近似降雨減衰確率推定法,” 信学論(B), vol. J91-B, no. 2, pp. 169-187, Feb. 2008.

(平成28年1月18日受付 平成28年3月20日最終受付)



からさわ よしお
唐沢 好男 (正員: フェロー)

昭52京大大学院修士課程了。同年国際電信電話株式会社(現: KDDI)入社。以来、同社研究所にて、電波伝搬を中心とした無線通信の物理レイヤの研究に従事。平11から電通大・教授。国会論文賞(2回)、電波功績賞等各受賞、著書「改訂 デジタル移動通信の電波伝搬基礎」等、IEEE Fellow。