



アンテナ・伝播研究会
(H27.12.10)

電波伝搬：物理現象とモデリング ～先達の足跡を辿る～

唐沢 好男
電気通信大学

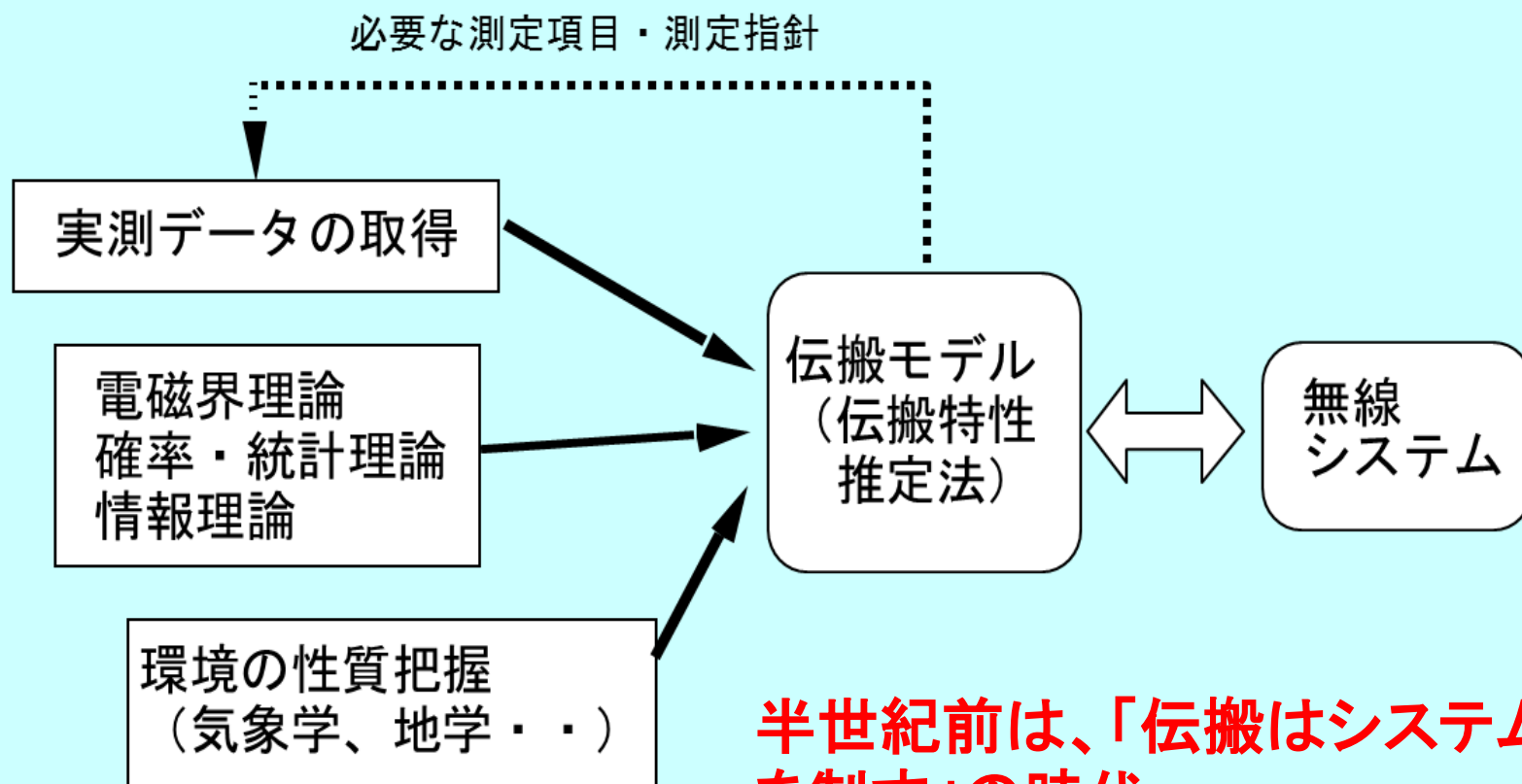


発表の内容

- 電波伝搬研究概観(50年(以上)を振り返って)
- 先達の足跡を辿る(源流から潮流へ)
 - ・フェージング確率分布: 仲上 稔氏
 - ・移動伝搬モデル: 奥村 善久氏
 - ・移動通信の三位一体研究思想: 池上 文夫氏
 - ・降雨減衰モデル: 森田 和夫氏
- まとめ



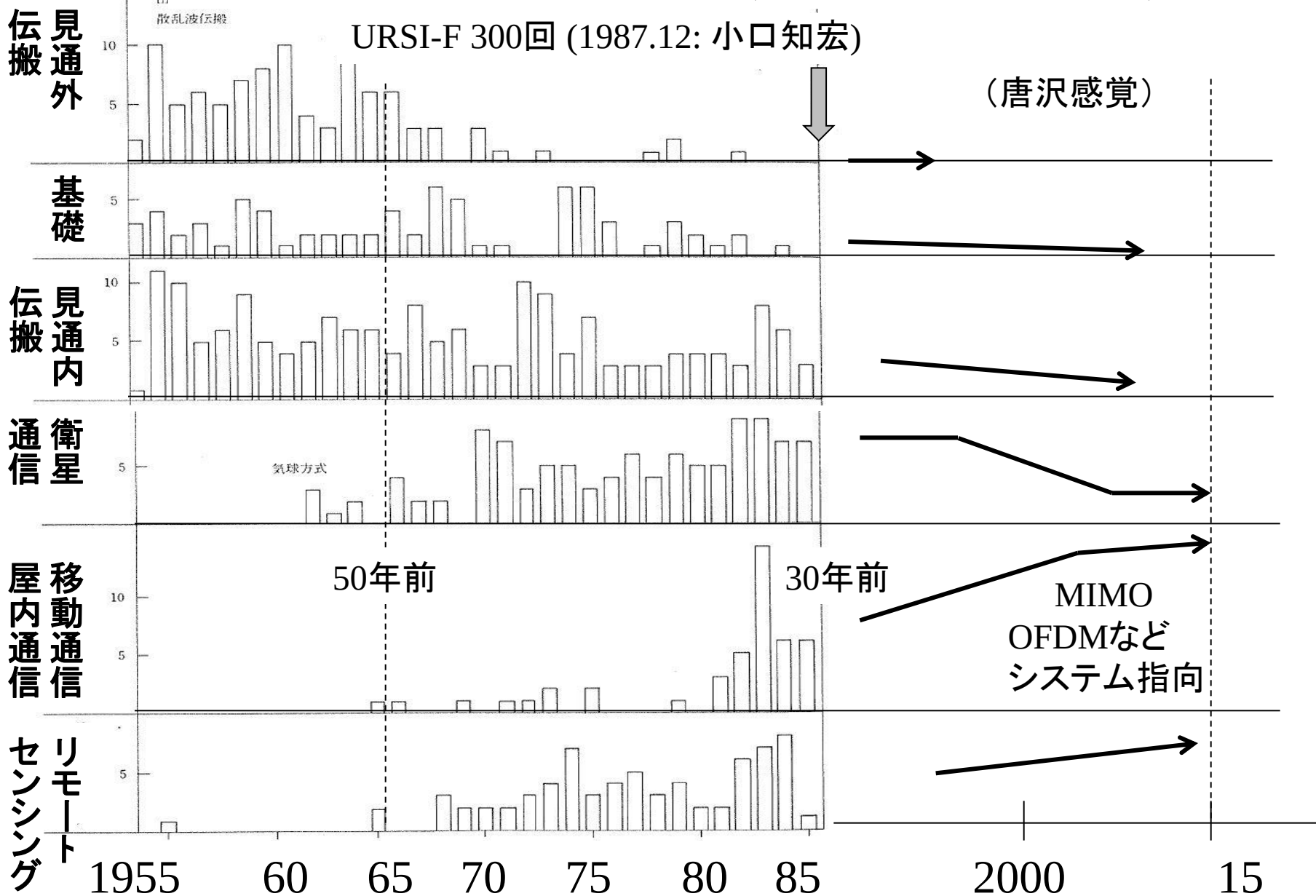
電波伝搬の研究： 理論・実測・モデリング



半世紀前は、「伝搬はシステムを制す」の時代



我が国の電波伝搬研究 (URSI-F発表件数)推移





■我が国の先達が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を取り上げる。(不易流行)

■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)

■移動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)

■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)



フェージングの確率分布の研究

仲上稔氏（国際電気通信株式会社）の研究（1940年代）

短波のフェージングの研究が移動通信のマルチパスフェージングの基礎的確率分布として花開いている

仲上が生み出した3つの確率分布

n分布（仲上・ライス分布）

m分布

q分布（仲上・ホイト分布）



仲上n分布

歴史

【短波のフェージングの研究】

仲上稔, “位相ならびに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),” 電気通信学会誌, no. 202, 1940.01.

【信号と雑音の研究】

S. O. Rice, “Mathematical analysis of random noise,” Bell System Tech. Jour. (BSTJ), vol. 23, no. 3, 1944, and vol. 24, no. 1, pp. 46–156, 1945.

ライス分布 → ライス・仲上分布 → 仲上・ライス分布



仲上n分布

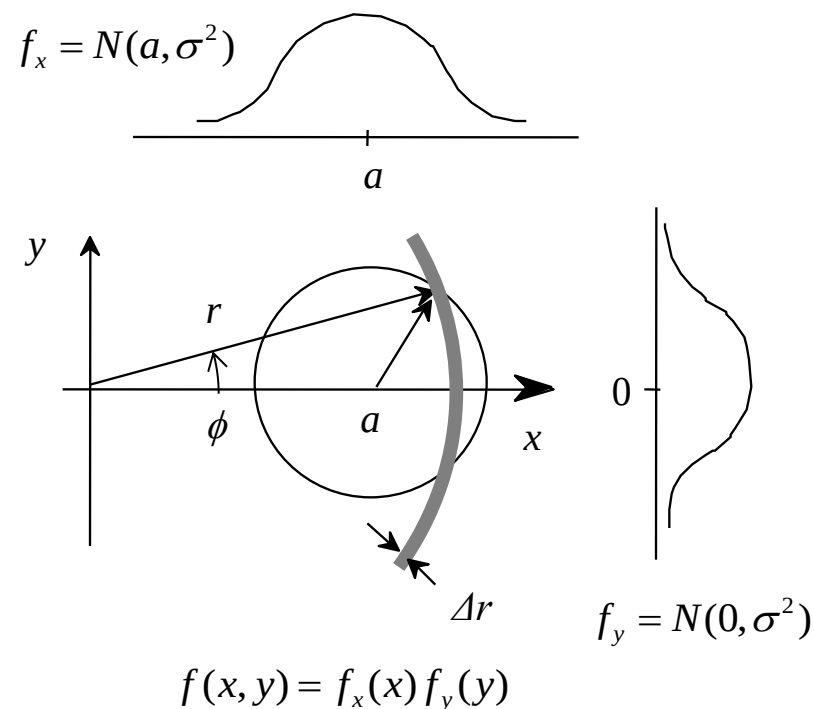
仲上・ライス分布の現代の理解

$$f_{r\phi}(r, \phi) = f_x(x) f_y(y) \begin{vmatrix} \frac{\partial x}{\partial r} & \frac{\partial x}{\partial \phi} \\ \frac{\partial y}{\partial r} & \frac{\partial y}{\partial \phi} \end{vmatrix}$$

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

$$f_r(r) = \int_0^{2\pi} f_{r\phi}(r, \phi) d\phi$$

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



この導出はライス流



仲上n分布

誕生

仲上は振幅が異なる多数の正弦波の合成振幅 r の確率分布を考えた

ハンケル変換形の特性関数(フーリエ・ベッセル変換)を利用

$$F(k) = \int_0^{\infty} J_0(rk) f(r) dr$$

$$f(r) = r \int_0^{\infty} k J_0(rk) F(k) dk$$

振幅 r_1, r_2 , 位相差 ϕ の正弦波の合成波の包絡線(振幅)は

$$r = \sqrt{r_1^2 + r_2^2 + 2r_1r_2 \cos \phi}$$

ハンケル変換形の特性関数

$$F(k) = J_0(kr_1)J_0(kr_2)$$



仲上n分布

振幅が異なる多数の正弦波の合成波のハンケル変換形特性関数

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

振幅 a の強い正弦波が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

$$\begin{aligned} f(r) &\approx r \int_0^\infty k J_0(rk) J_0(ak) \exp\left(-\frac{\sigma^2 k^2}{2}\right) dk \\ &= \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{a^2 + r^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{ar}{\sigma^2}\right) \end{aligned}$$

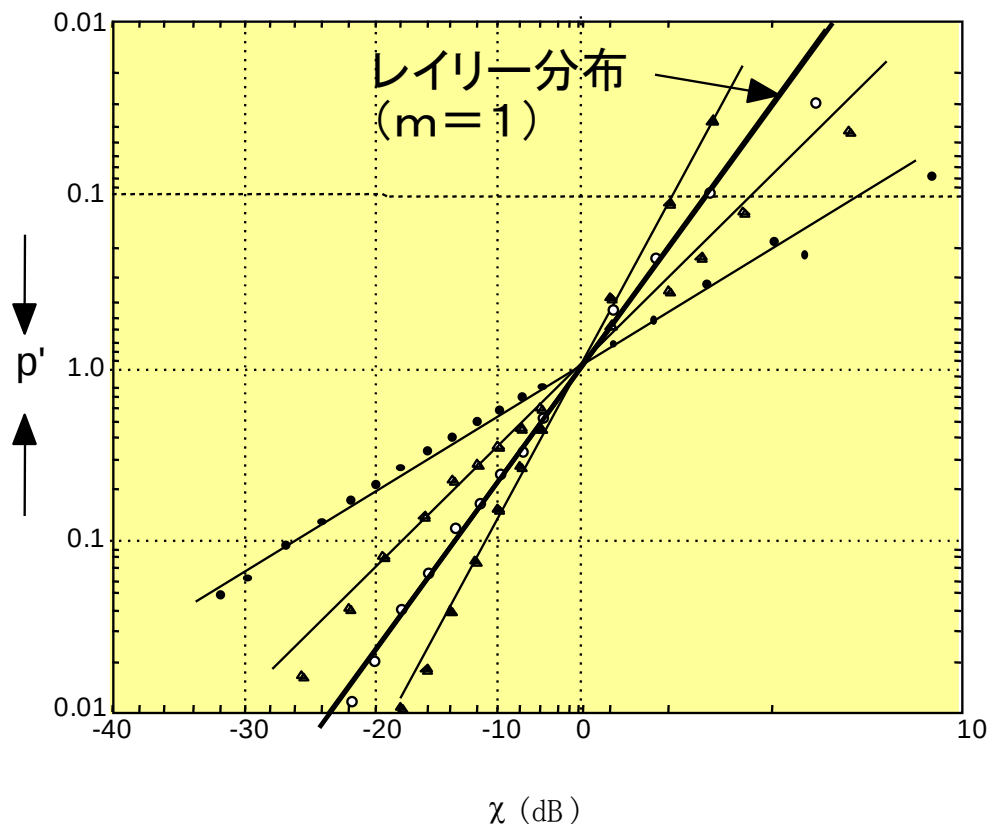
同時代の洋の東西で、異なる目的、異なる手法で、後の時代の移動伝搬の基本式: 仲上・ライス分布が生まれた



仲上m分布

そのルーツ

短波のイベント毎の相対頻度特性



相対頻度特性：特殊方眼紙

$$x = 1 + \frac{2}{M} - \exp(2\chi / M)$$

$$(M \equiv 20 \log e)$$

$$y = \ln p' \quad (\text{for } \chi \leq 0)$$

$$= -\ln p' \quad (\text{for } \chi > 0)$$

レイリー分布

$y = x$ の直線になる

どのイベントでも

$y = m x$ の直線になる

m分布の誕生



仲上m分布

現代の理解

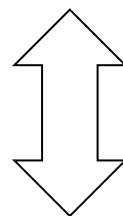
m分布
(振幅の分布)

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

$$m \geq 0.5$$

$$r = \sqrt{z}$$

$$z = r^2$$



ガンマ分布
(電力、SNRの分布)

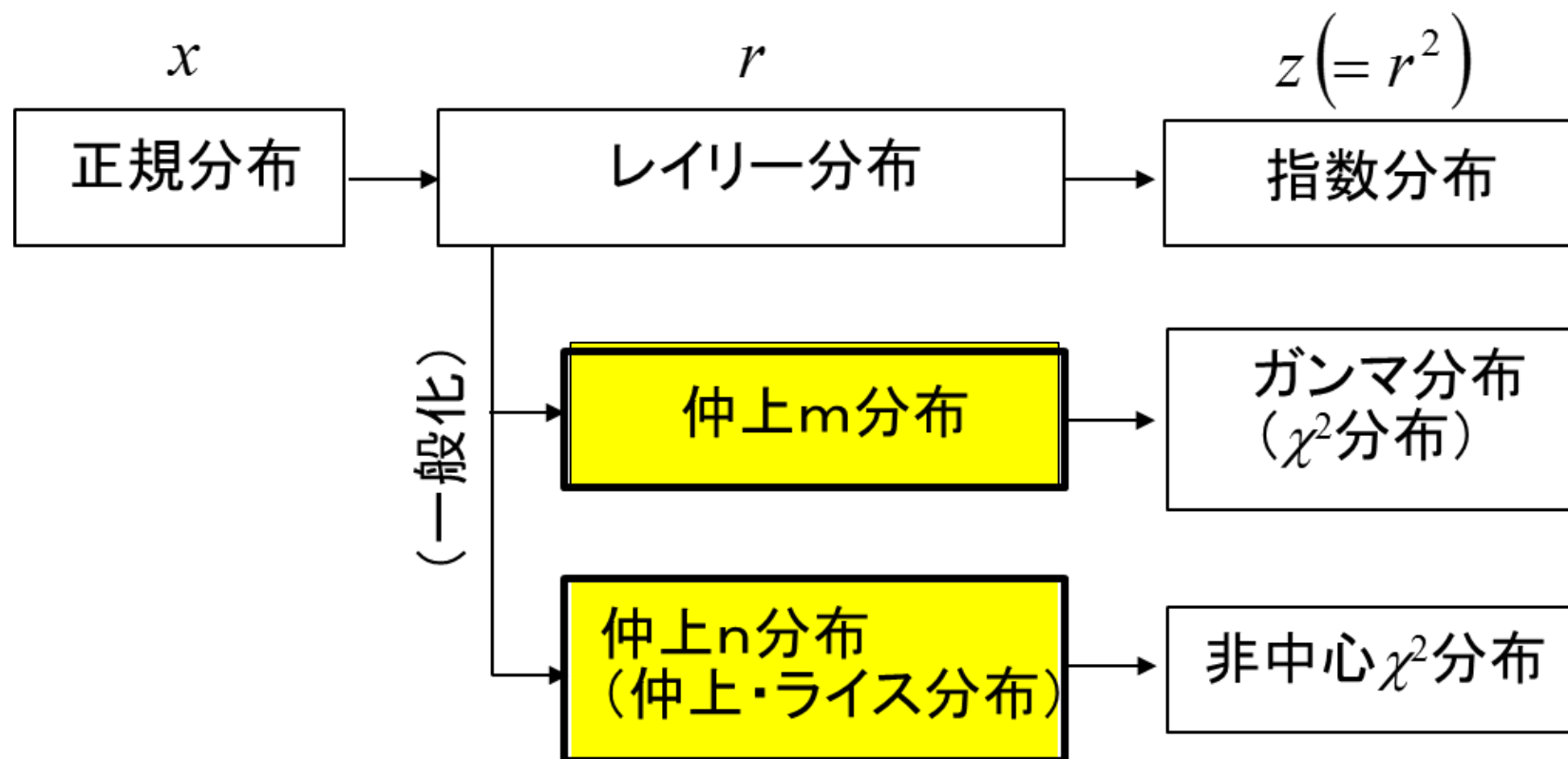
$$g(z) = \frac{m^m}{\Omega^m \Gamma(m)} z^{m-1} \exp\left(-\frac{m}{\Omega} z\right)$$

m分布は、

- ・ 数学モデルとしてガンマ分布から変換されたものではなく「発見的手法」によって生まれた
- ・ 仲上・ライス分布を一定の範囲で近似する
- ・ 他の関数と組み合わせた変換をするときの解析性に優れている



確率分布の相互関係

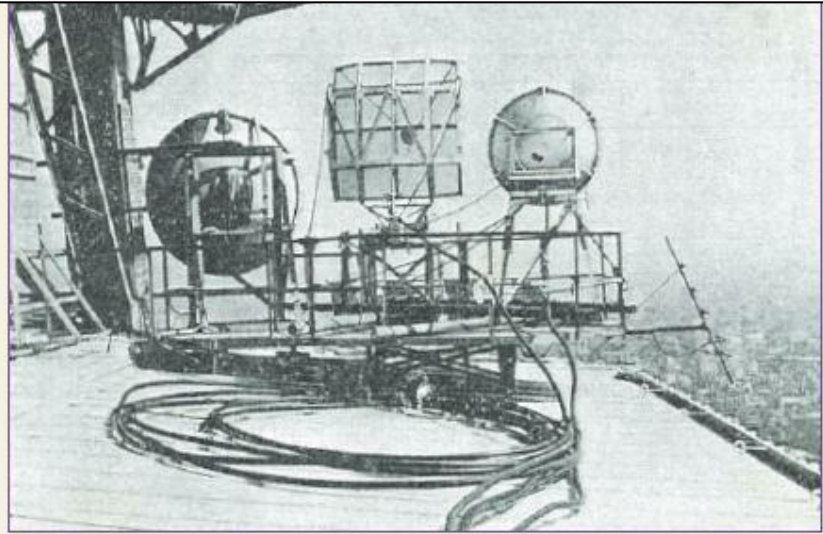


IEEE Xplore “Nakagami distribution”

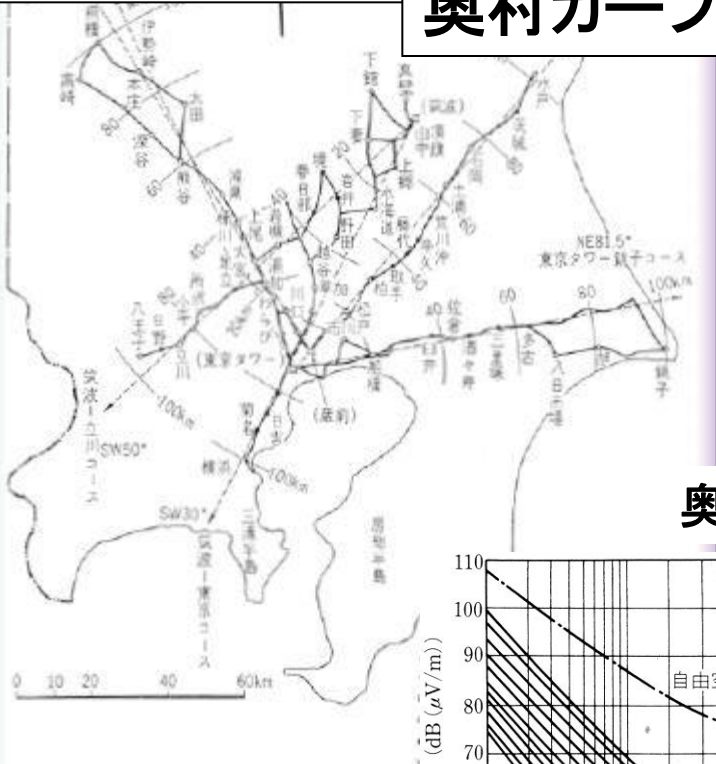
1430件のヒット → 世界的なモデル

移動伝搬・移動通信研究のパイオニア 奥村善久氏(当時:電電公社通研)

移動伝搬の原点 (1962 ~ 1965): 奥村カーブ



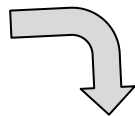
東京タワー設置の送信アンテナ



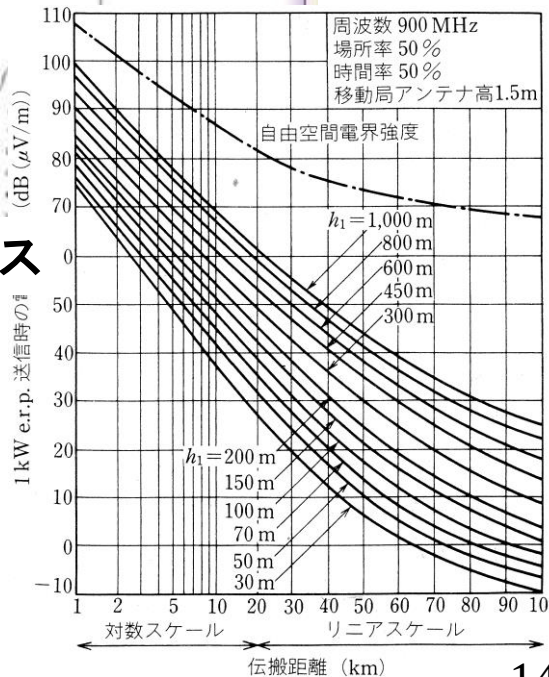
移動伝搬実験測定コース



受信電界強度測定車



奥村カーブ



写真類出典:
奥村幸彦:
通ソマガジン No. 29,
2014より

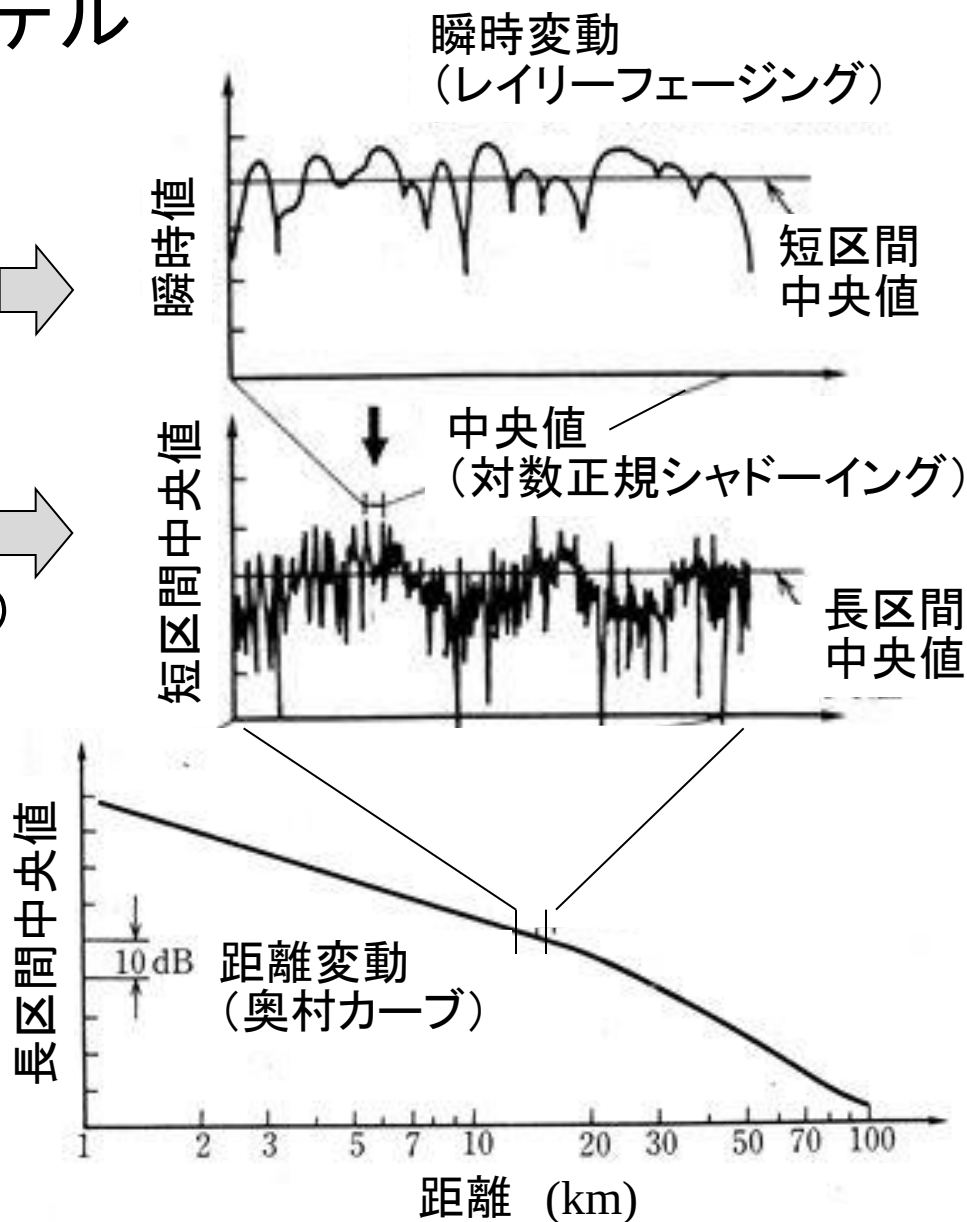


移動伝搬基本構造モデル 【奥村モデル】

加算的
確率過程
(正規分布系)

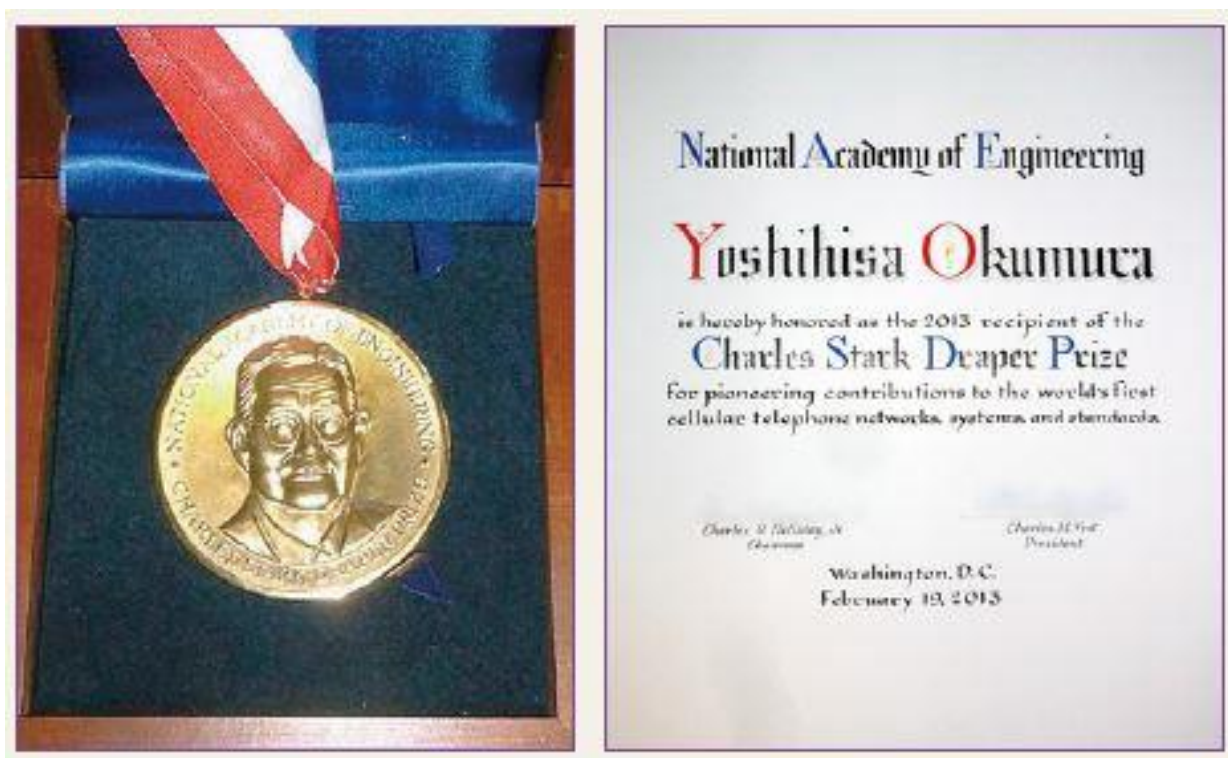


積算的
確率過程
(対数正規分布系)



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

移動伝搬研究(奥村カーブと奥村モデル)を含めた『**世界初のセルラー電話ネットワーク、システム及び標準規格に対する先駆的貢献**』により、2013年、**全米工学アカデミー**より、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)」受賞。日本人研究者として初めての快挙。

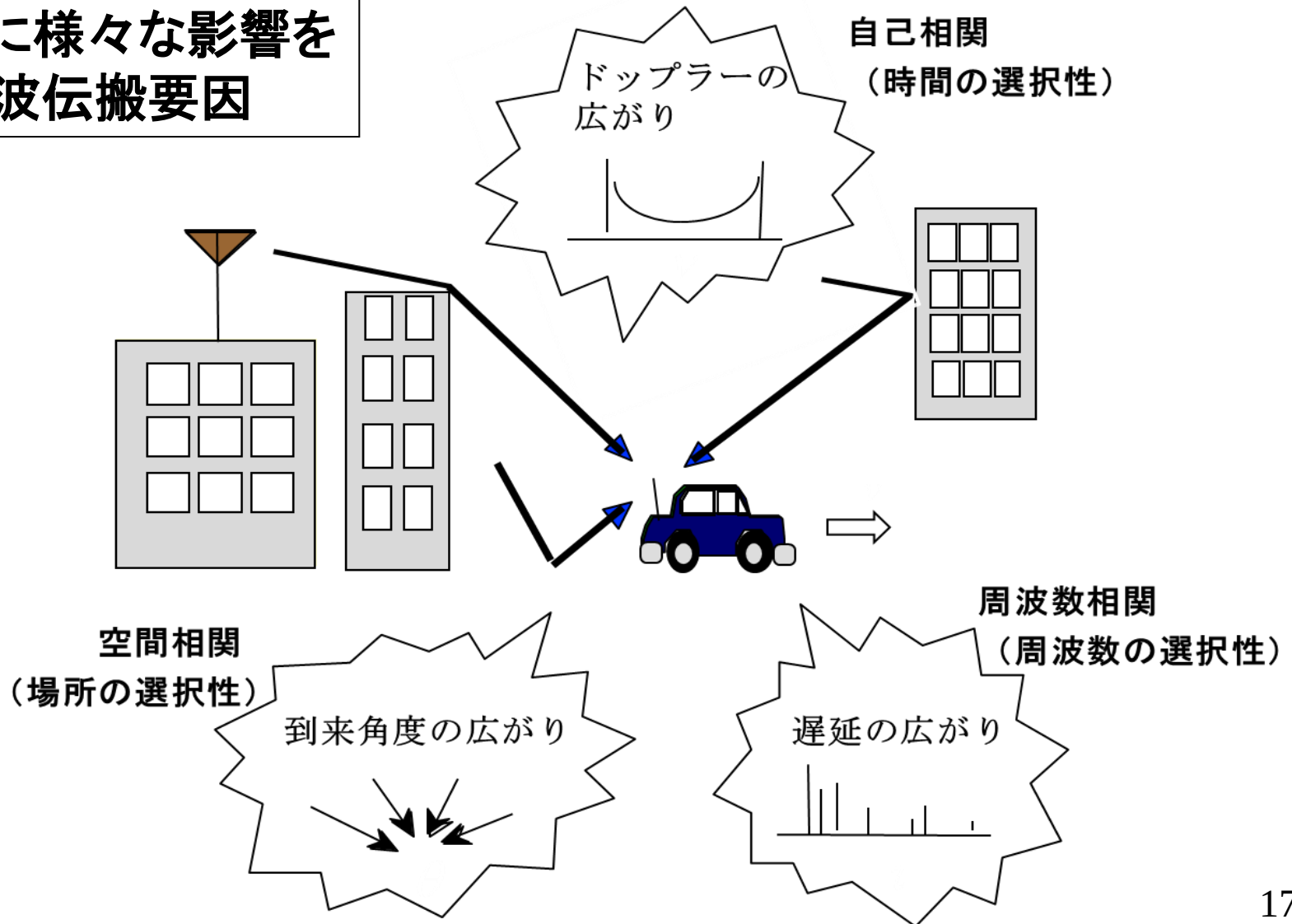


写真類出典：
奥村幸彦：
通ソマガジン No. 29,
2014より

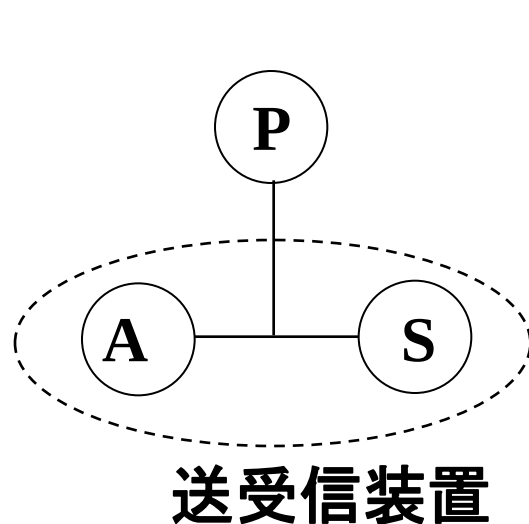
移動通信の研究哲学：A・P・S 三位一体の研究(1980～)

池上文夫氏(当時：京都大学教授)

システムに様々な影響を与える電波伝搬要因

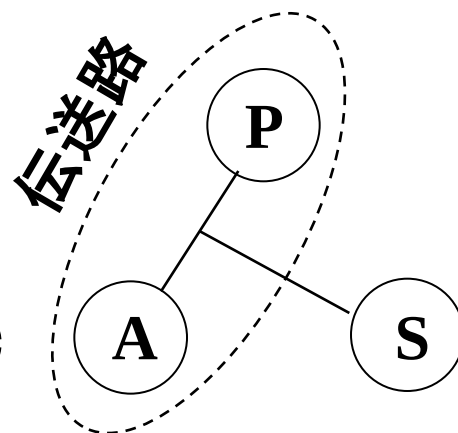


移動通信の研究哲学: A・P・S 三位一体の研究



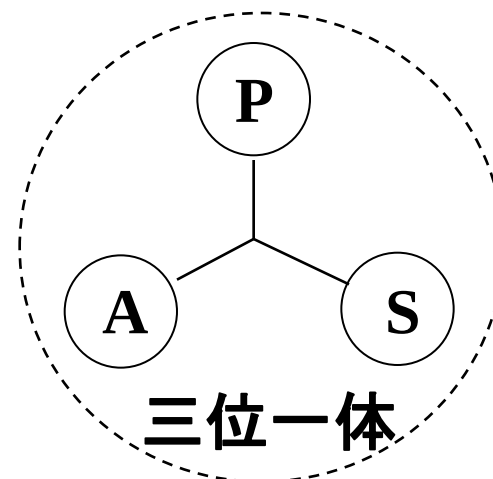
(a) 第 I 世代

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



(b) 第 II 世代

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



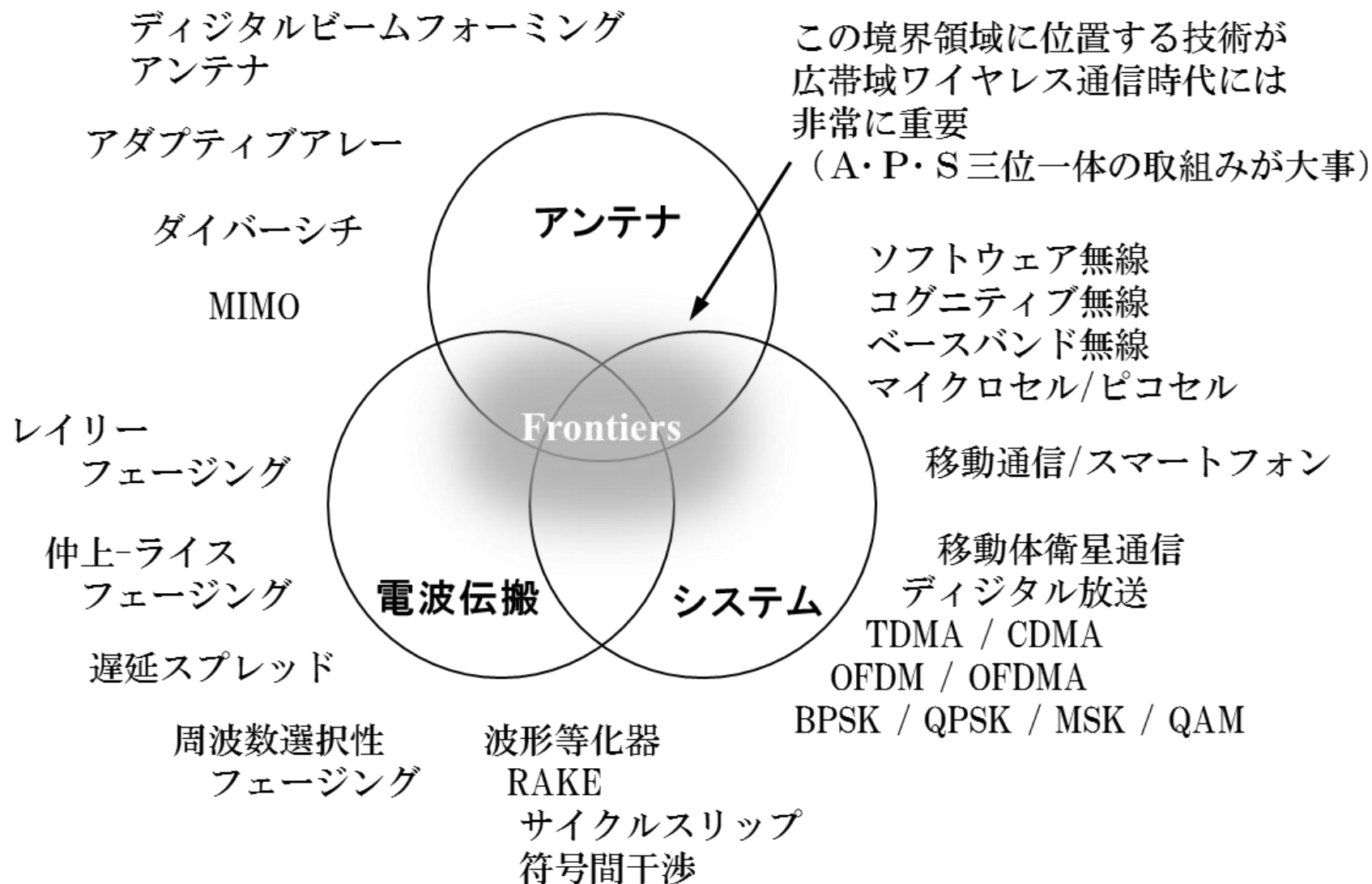
(c) 第 III 世代

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、A・P・S 三位一体研究が必須

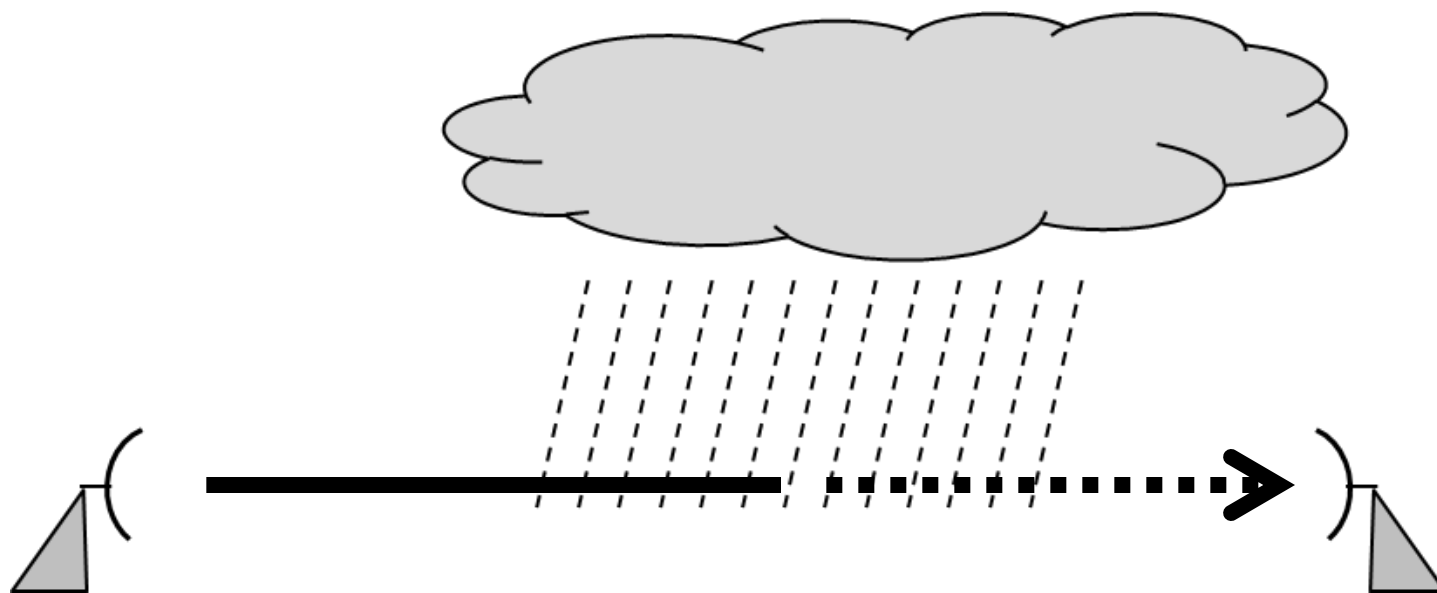
A: アンテナ
P: 伝搬
S: システム



デジタル移動通信 A・P・S 三位一体研究の取り組み

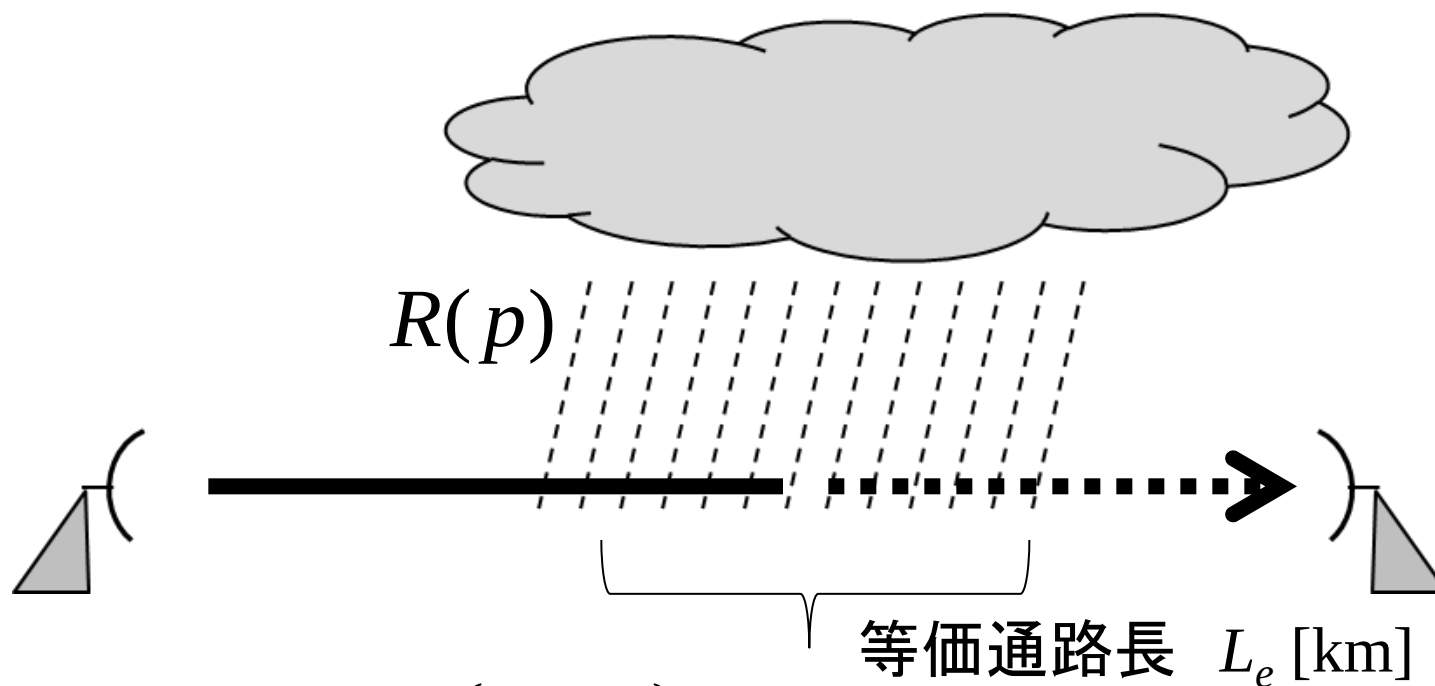


降雨減衰推定法： 森田和夫氏（当時：電電公社通研）
の研究（1960年代後半～1970年代）



- ・周波数が10GHz程度以上で減衰が無視できなくなり
高くなるほど致命的問題に
- ・地上回線・衛星回線に共通の問題
- ・日本は、中緯度地域の中では降雨が多く、この問題が特に深刻に

降雨減衰推定の一般的アプローチ(地上・衛星回線共通)



$$A(p) = k \{ R(p) \}^n L_e(p)$$

時間率 $p\%$ での
降雨減衰 [dB]

降雨強度 R [mm/h]
での減衰係数 [dB/km]

降雨強度の確率分布や
等価通路長を定式化
するのが研究課題



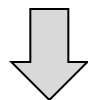
降雨減衰推定：森田・樋口モデル(1975)

[樋口伊佐夫氏(統計数理研究所)]

特徴： 物理現象を数式化した理論モデル

降雨強度分布： ガンマ分布(パラメータ値 ν, β が地域依存)
(1940～1950、1971～1973年代データ利用)

降雨の空間相関特性： $\rho(d) = \exp(-\alpha\sqrt{d})$ (パラメータ値： α)



区間雨量(通路上の各点の雨量の n 乗の積分値)＝電波の減衰量が
ガンマ分布近似で表されることを理論解析で示した



降雨減衰推定：森田・樋口モデル(1975)

$$f(A) = \frac{\beta_e^{\nu_e}}{\Gamma(\nu_e)} A^{\nu_e-1} \exp(-\beta_e A) \quad (0 \leq A[\text{dB}])$$

$$\nu_e = \nu D^2 / M, \quad \beta_e = \beta D / (\gamma M)$$

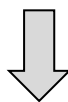
$$M = \frac{4}{\alpha^2} \left[D + 2 \left\{ D + \frac{3}{\alpha} \left(\sqrt{D} + \frac{1}{\alpha} \right) \right\} \exp \left(-\alpha \sqrt{D} - \frac{6}{\alpha^2} \right) \right]$$

ν, β : 降雨強度のガンマ分布パラメータ, γ : 降雨減衰係数
 α : 降雨強度空間相関パラメータ, D : 区間距離 (km)

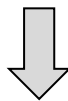
筆者は複雑な自然現象を理論モデルで組み上げた森田の着眼点に敬意を表している。実際の計算では、空間相関の形やパラメータ値 α の地域依存性のため無線通信の国際標準化機関であるCCIR(現ITU-R)での世界標準には至らなかったが、長く我が国の無線回線(特にアクセス回線)降雨減衰推定法の計算法として実用に供されるとともに、その後の降雨減衰推定法高度化の礎となってきた。

降雨減衰推定法の進展(高精度化)

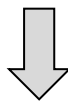
森田・樋口モデル(1975): 降雨強度・降雨減衰: ガンマ分布近似



細矢等改良モデル(1984): 森田・樋口モデルのパラメータの最適化
20GHz帯回線への適用



細矢の降雨強度分布モデル(1988): 降雨強度をM分布で近似
AMeDAS時間降水量データからの降雨強度推定



小野・唐沢モデル(2008): 降雨強度・降雨減衰: M分布近似
年変化特性を考慮した安全係数概念の導入
(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)



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り組みも多く、限られた紙面や時間で、その歴史を網羅するのは講演者の力が及ばない

そこで、現在の潮流の水源地を開拓した四人のパイオニア（1940, 1960, 1970, 1980年代）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。