



AP 研特別講演
(H27.10.22)

衛星通信の電波伝搬研究 1980年代 ～ 私の研究原点 ～

唐沢 好男

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



あらまし 筆者は1977年4月にKDD(現KDDI)に職を得て以来約15年間、研究所において衛星通信の電波伝搬の研究に取り組んだ。KDDのサービスが国際衛星通信であったため、低仰角衛星に対する伝搬問題が研究対象になった。具体的には、海事衛星通信における海面反射フェージング、低仰角固定衛星通信での対流圏シンチレーションや降雨減衰のモデル化(減衰推定法)などが研究テーマであった。1990年以降はKDD研究所やATR、その後の電気通信大学において、主に地上系移動通信を対象としたワイヤレス情報伝送技術のテーマへと移って行ったが、全時代を通じて、電波伝搬の研究にいつも軸足を置いていた。今日の私の研究への取り組み姿勢(マインド)や研究スタイルは、その前半である衛星通信伝搬の研究を通じて上司・先輩・同僚の皆さん(職場や学会を含めた)から学んだものである。本講演では、私の研究の原点である衛星通信の電波伝搬研究(1980年代の)を題材に、研究者として形ができあがってゆく過程(DNA形成の過程)を述べ、次に続く世代の人たちに、そのDNAを伝えたい。



講演の話題

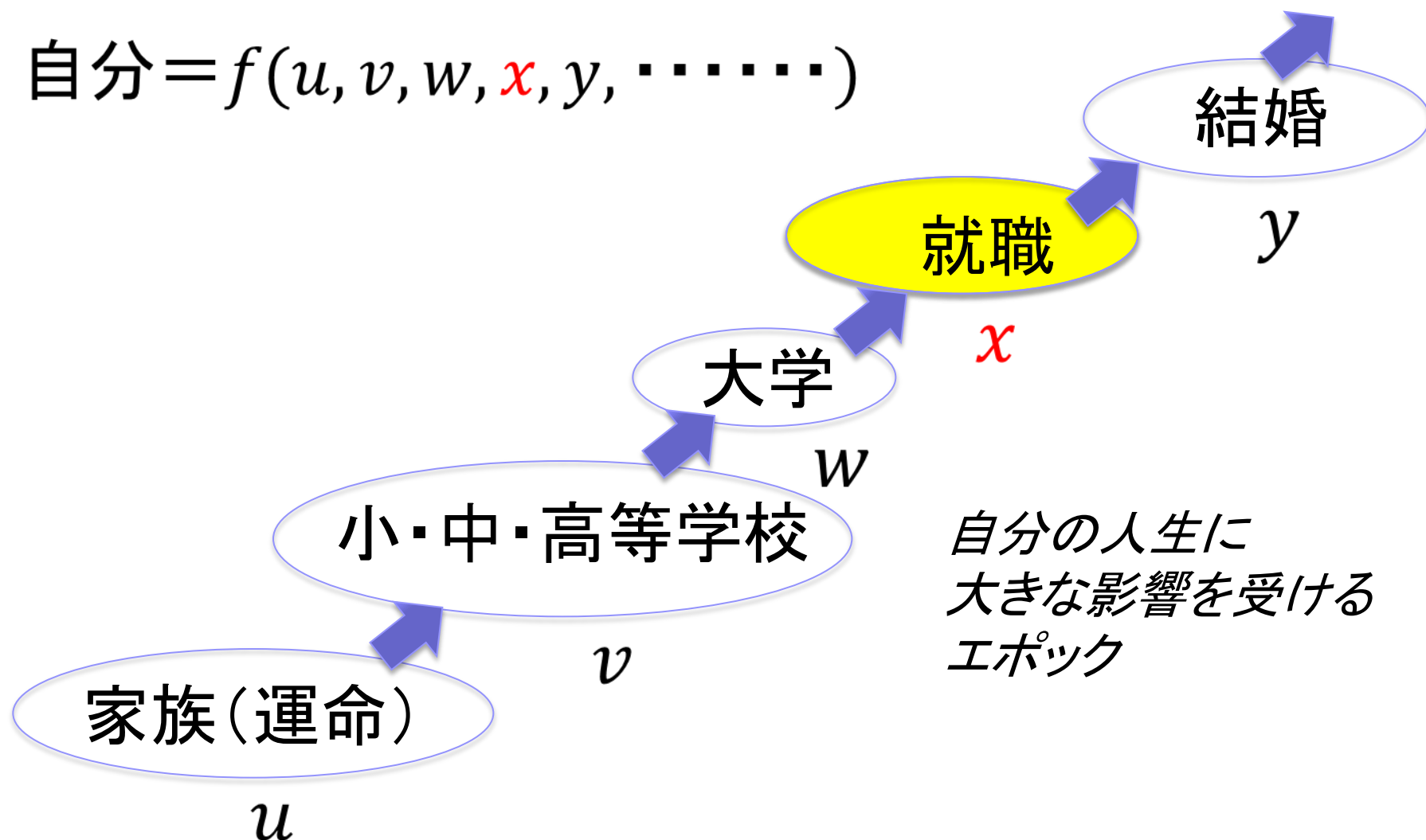
- 私の人生(ささやかな研究者としての)
- 衛星通信の電波伝搬の研究: 1980年代
 - 海面反射フェージング
 - 対流圏シンチレーション
 - それらで学んだこと
- 論文を書くということ
- 雑感

[当日の講演で使用したアルバム写真数枚はこの資料から省いています]



人生、選択の繰り返しで、後戻りができない

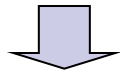
$$\text{自分} = f(u, v, w, \textcolor{red}{x}, y, \dots)$$



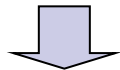


私の研究遍歴 (1972～現在)

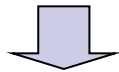
大学の卒研 (～1973) : 亜硝酸ナトリウムの結晶成長



民間企業に就職(2年間): 電子部品部半導体課(ハイブリッドICの開発・設計)



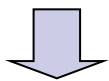
大学院修士課程に入学 (1975): 地球電磁気学(流星レーダーの研究)



KDDに入社(1977～1993): 研究所にて衛星通信の電波伝搬の研究

衛星が低仰角になる場合に伝搬問題が顕在化(伝搬モデルの確立)

- ・ 海事衛星通信の海面反射フェージング
- ・ 対流圏シンチレーション
- ・ 電離圏シンチレーション
- ・ 降雨減衰
- ・ 陸上移動体衛星通信の伝搬モデル



KDD研・ATR・電通大(1990～現在): 地上系移動通信の情報伝送技術

衛星—地上伝搬路に発生する伝搬劣化要因

[電離圏シンチレーション]

電離圏F層(高度300—400km)

電離圏E層(高度100km付近)

降雨(高さ約4km)

[降雨減衰]

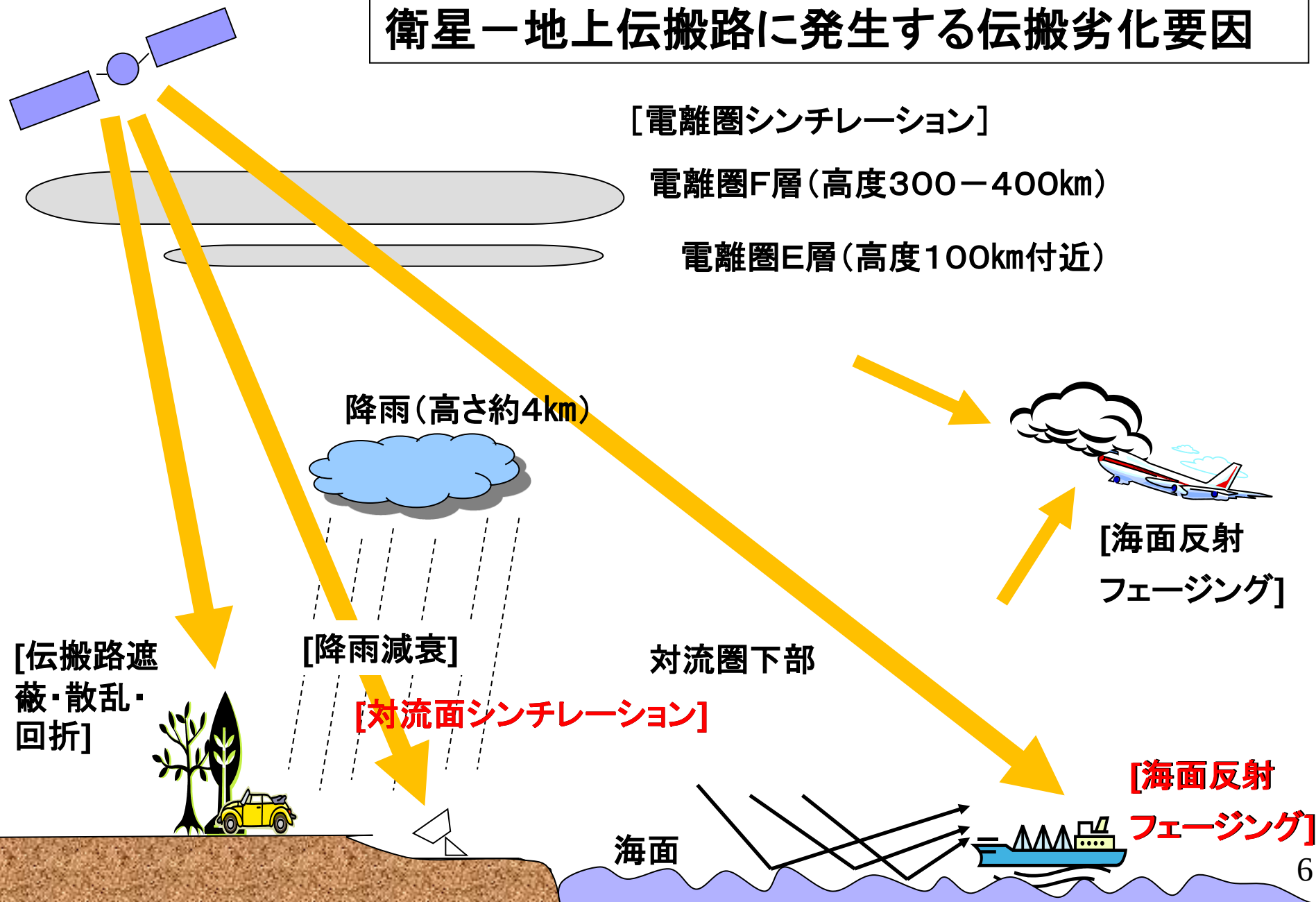
[対流面シンチレーション]

対流圏下部

[海面反射
フェージング]

[海面反射
フェージング]

海面





海事衛星通信における海面反射フェージングの研究

衛星電波の海面反射によるフェージング

低仰角・ビーム幅の広いアンテナ(=小型アンテナ)で
問題顕在化(回線設計に必要なモデルが求められていた)
(インマルサット標準B, C)

1980年代の日本の同テーマ研究者

電波研・通総研: 大森慎吾さん

NTT研究所: 小園 茂さん、吉川 誠さん、(細矢良雄さん)

KDD研究所: 唐沢好男、(塩川孝泰さん)

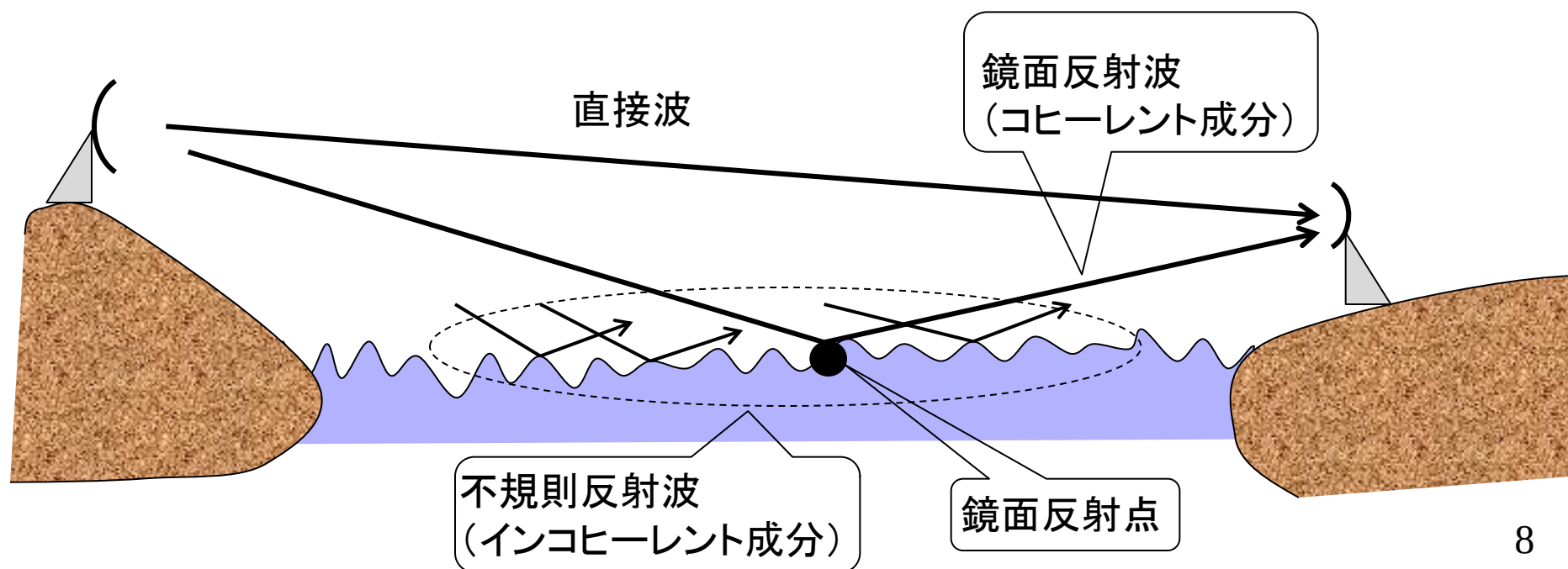
AP研では超マイナー分野

世界的にも米国コムサット研、ドイツの研究所、など数少ない
(当時、まだ本格的な研究にはなっていなかった)

マイナー研究にはマイナー研究の良さがある

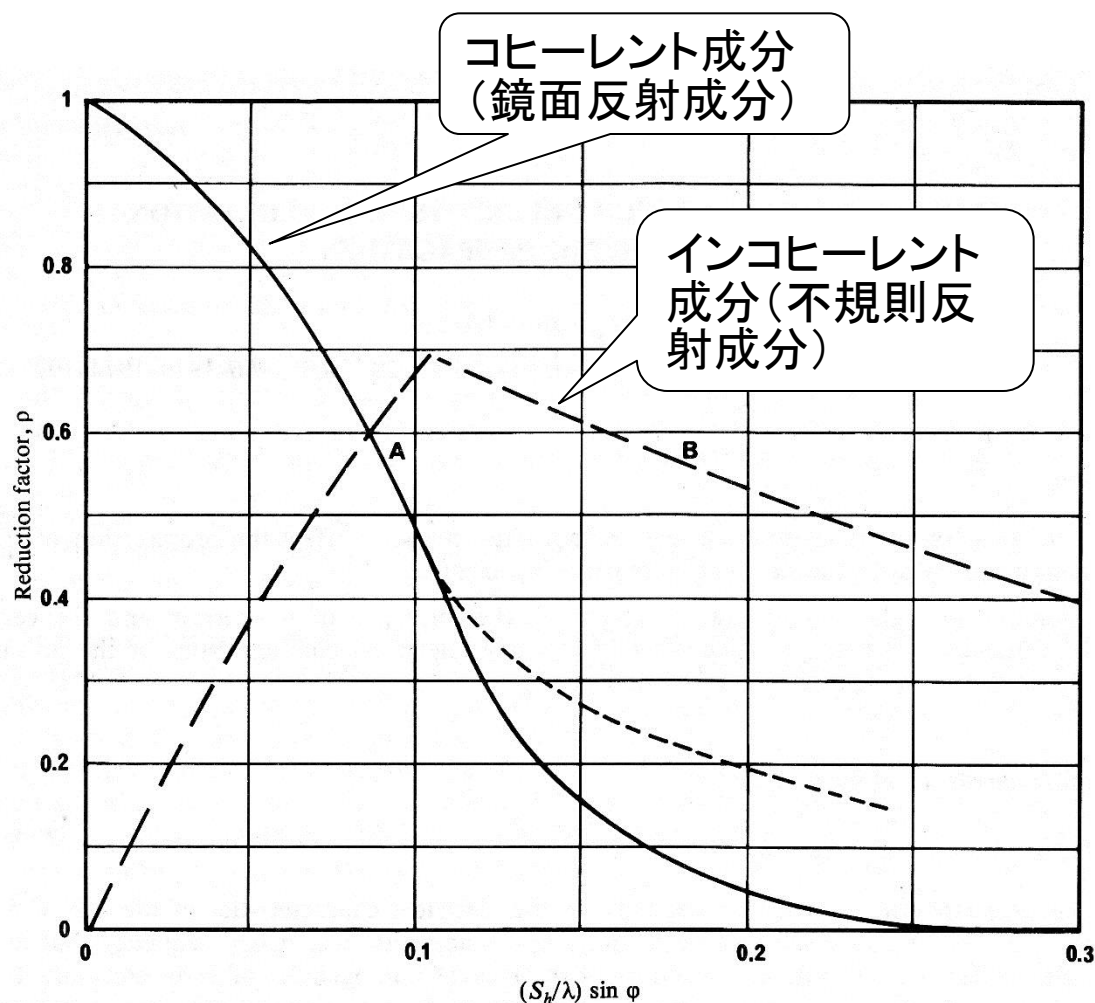
海面反射波のコヒーレント成分とインコヒーレント成分

地上系通信の海面反射フェージング(研究論文:多数)と
衛星通信の海面反射フェージングは
なにがどう違うか？



地上系海面反射の反射波強度の海面状態依存性

反射波の実効強度
(反射係数で正規化した振幅値)



海面状態 (波高に比例)

インコヒーレント成分の最大平均電力は
コヒーレント成分の半分以下

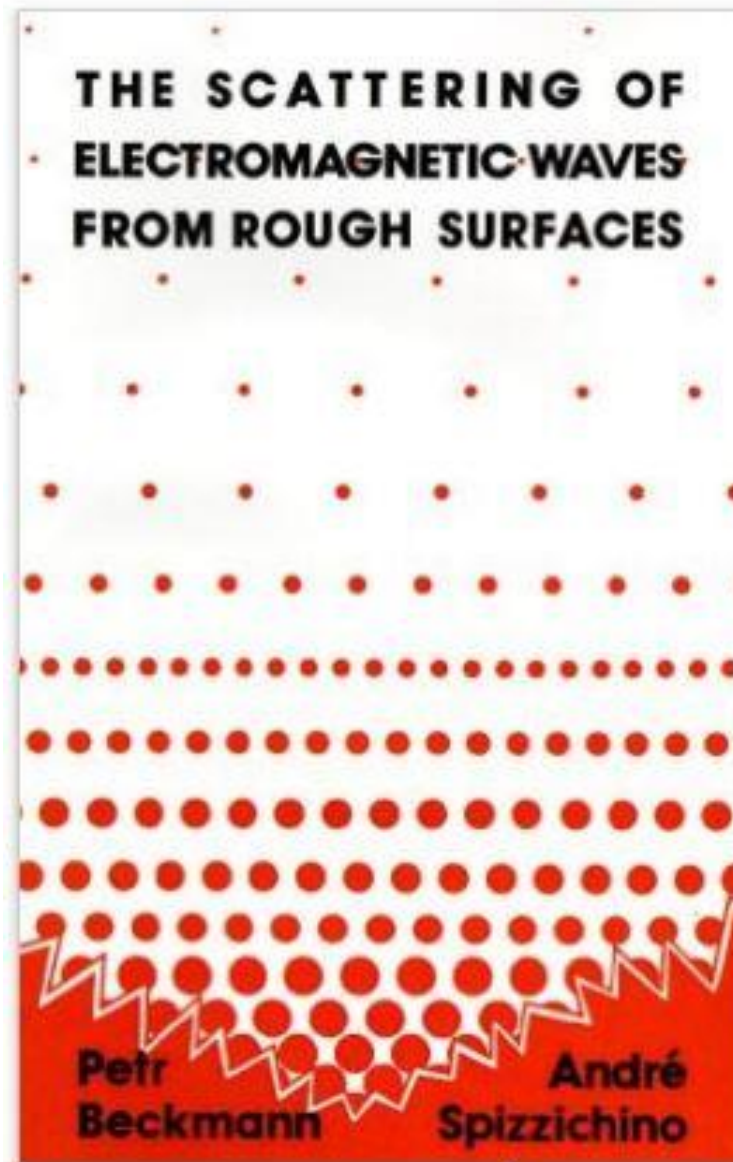
太陽光の海面反射

低い仰角にある衛星からの
電波は、

海に当たるとどうなるか？

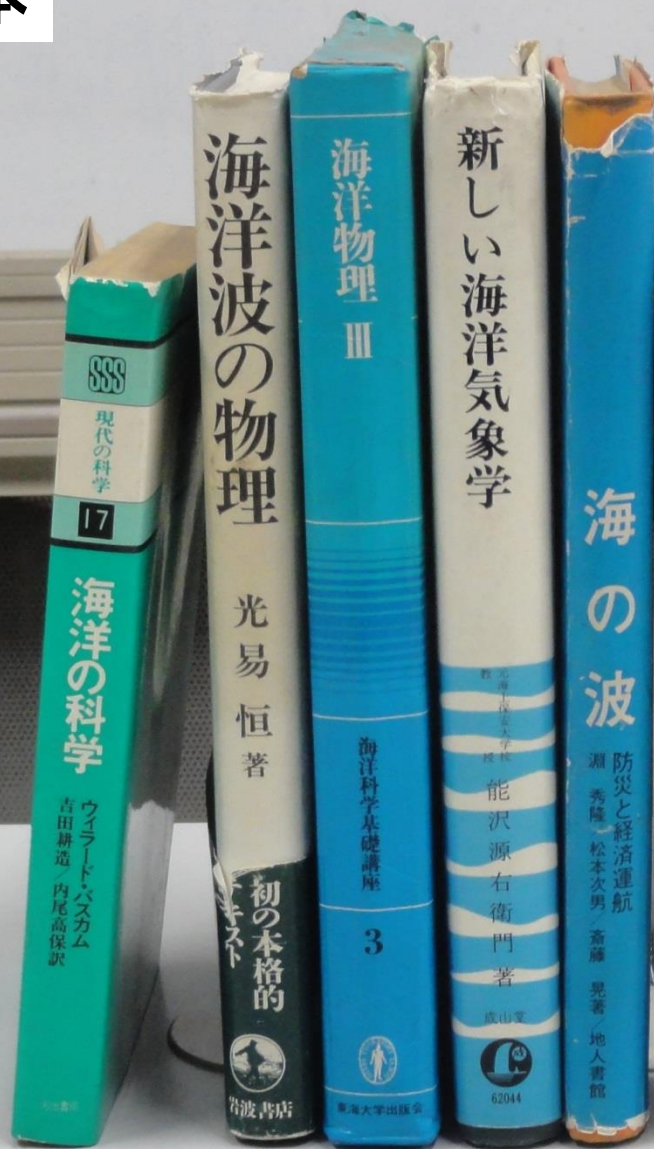
[見えない電波を目で見るに
は]

散乱理論を勉強した本



(注: 復刻版の表紙
のため、当時の表紙
とは変わっている)

海の波を勉強した本



Ocean Wave Statistics

海面反射フェージング基本モデル

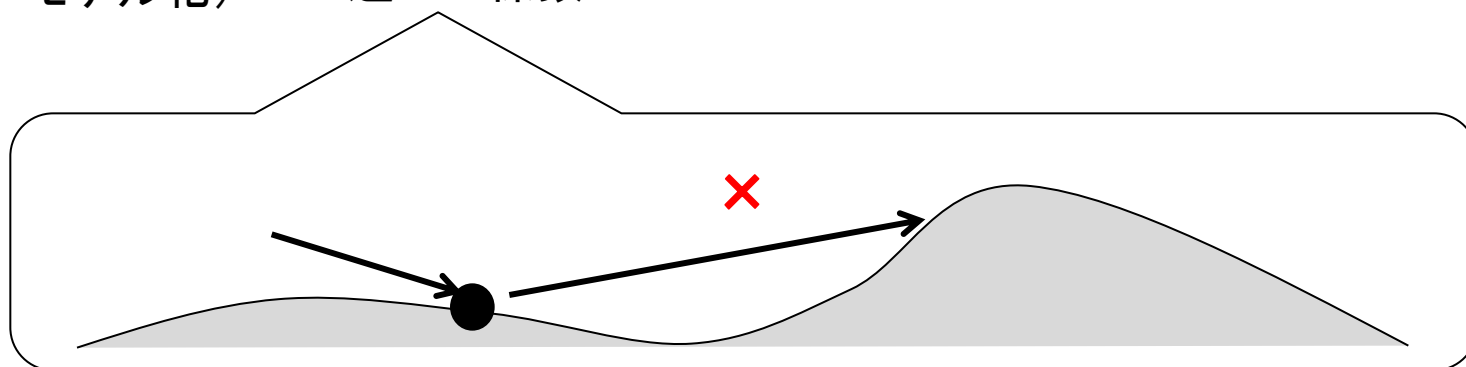
$$P_I = \frac{1}{4\pi} \iint_{\text{全海面}} \sigma_0 S \Gamma G \tan(\theta_s, \phi_s) d\phi_s d\theta_s$$

完全導体の
散乱断面積
(海面状態の
モデル化)

散乱波の
前方波浪による
遮へい係数

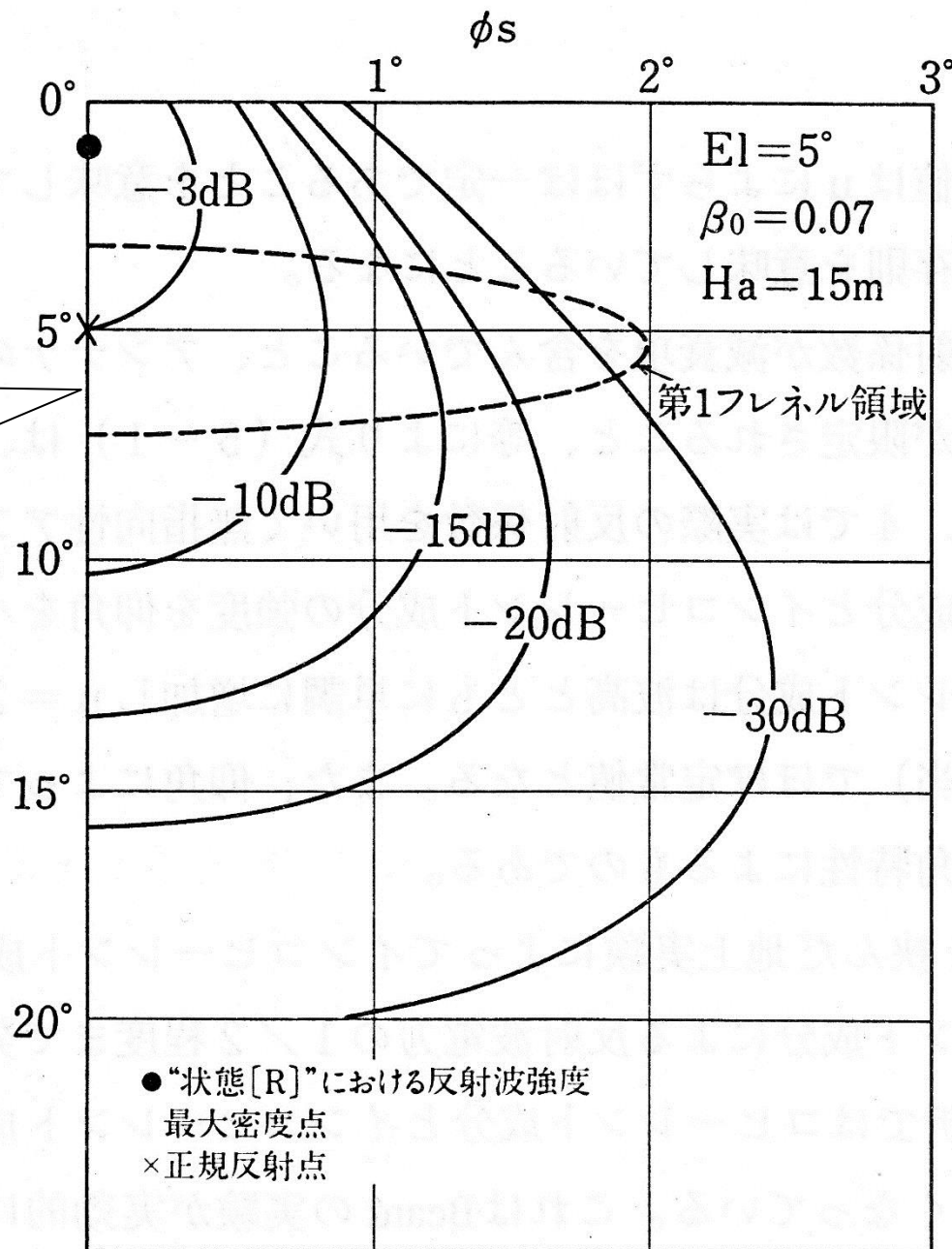
海面の
フレネル反射係数

散乱波到来方向の
受信アンテナ利得

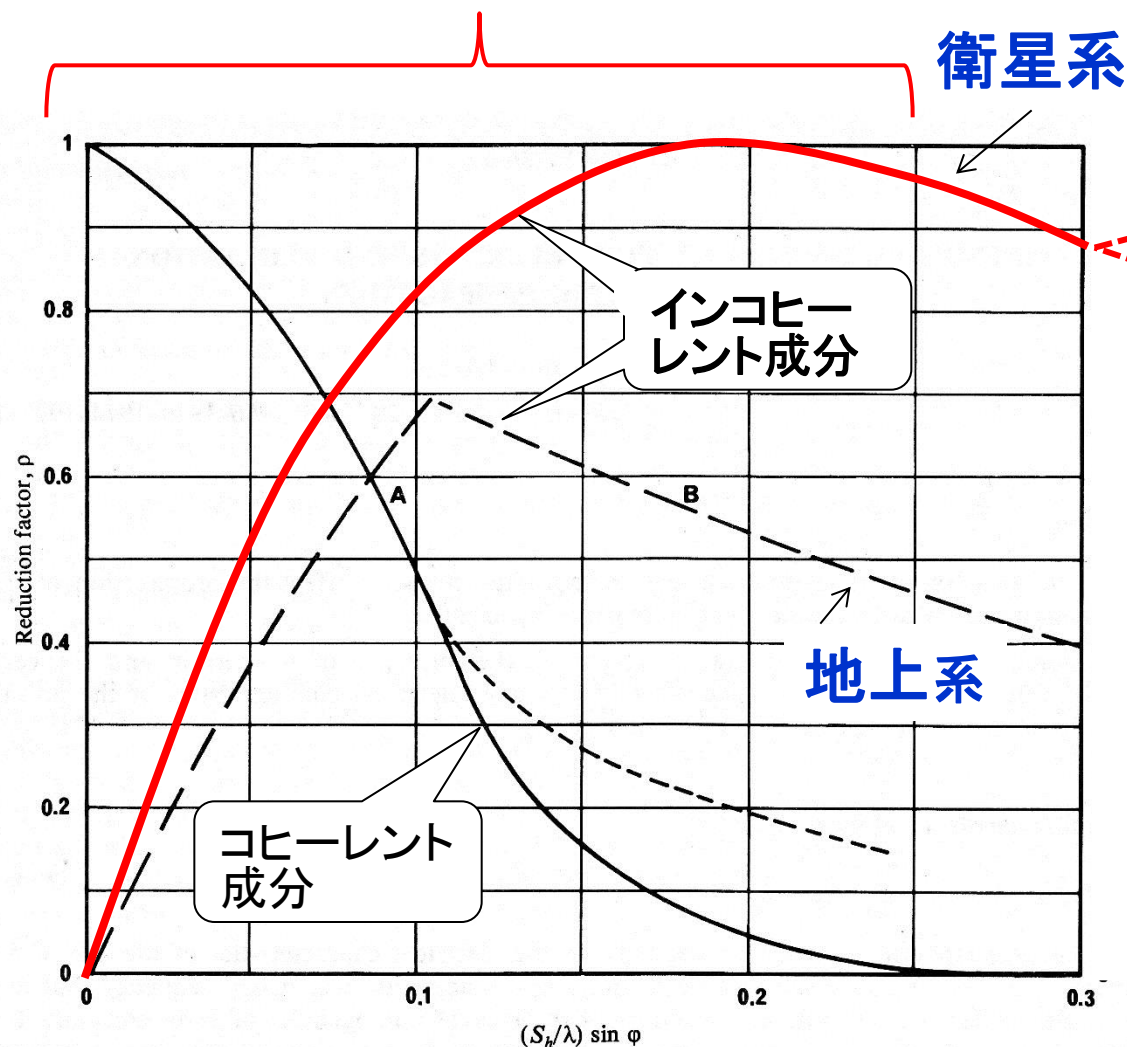


海面上の
散乱波強度を
求めてみると

太陽光の散乱強度
イメージと結構
あっている



低仰角衛星通信回線では
エネルギー保存側が成立している



海面状態(波高に比例)



エネルギー保存則の
性質を利用した
海面反射フェージング
簡易推定法確立へ
(ITU-R勧告モデル)

反射波の実効強度
(反射係数で正規化した振幅値)



Characteristics of *L*-Band Multipath Fading due to Sea Surface Reflection

YOSHIO KARASAWA, MEMBER, IEEE, AND TAKAYASU SHIOKAWA, MEMBER, IEEE

Abstract—For low *G/T* ship-based earth stations in future maritime satellite communications, the effect of multipath fading due to sea surface reflection will be very important at low elevation angles. However, a practical model of the *L*-band multipath fading for fade prediction has not been available so far. A practical fading model is presented based on the shadowed Kirchhoff approximation theory for the coherent and incoherent components of the scattered power as a function of sea surface conditions. Using this model, theoretical fading depths are presented as a function of elevation angle, wave height, and antenna gain. The results indicate that intense fading occurs for wave heights greater than 50 cm, and the dependence on wave height is small under these conditions at *L*-band frequencies. Theoretical results presented agree well with experimental results obtained by field experiments.

I. INTRODUCTION

IN MARITIME satellite communication systems such as the International Maritime Satellite Organization (INMARSAT) system, multipath fading due to sea surface reflection generates signal degradation at low elevation angles. Although the effect of multipath fading at *L*-band is not so significant for the current standard-A system (ship antenna gain: 20-24 dBi) of the INMARSAT operating at elevation angles greater than 5°, it will be severe for proposed low *G/T* systems such as standard -B (gain: 13-16 dBi) and -C (gain: less than 10 dBi) because the beamwidth of the smaller ship antennas will be much wider than that of the Standard-A system. In this respect, it is essential to clarify the characteristics of multipath fading due to sea surface reflection.

Gaussian random process is assumed for both probability density function and space correlation function of the sea surface profile heights. It is well-known that the probability density function of the real ocean agrees well with Gaussian [11], but the space correlation function may be somewhat different from the Gaussian. Accordingly, the model presented here is based on simplified assumptions for a practical purpose against the complicated phenomenon.

First we consider the coherent component of reflected waves under the condition that the ship antenna is fixed at a given height above mean sea level of $z = 0$. In this case, the amplitude of the coherent component E_r^C relative to the incident field is given by averaging reflected waves as follows [12]:

$$E_r^C = |\Gamma(\theta_i)G(2\alpha)|e^{-u^2/2} \quad (1)$$

where $G(2\alpha)$ is an antenna gain toward the specular reflection point (in this case, $\alpha = \pi/2 - \theta_i$ in Fig. 1) relative to the gain toward a satellite direction, Γ is the Fresnel reflection coefficient of the sea surface [12] for an *L*-band circularly polarized wave. The roughness parameter u indicating the roughness of the sea surface is generally given by

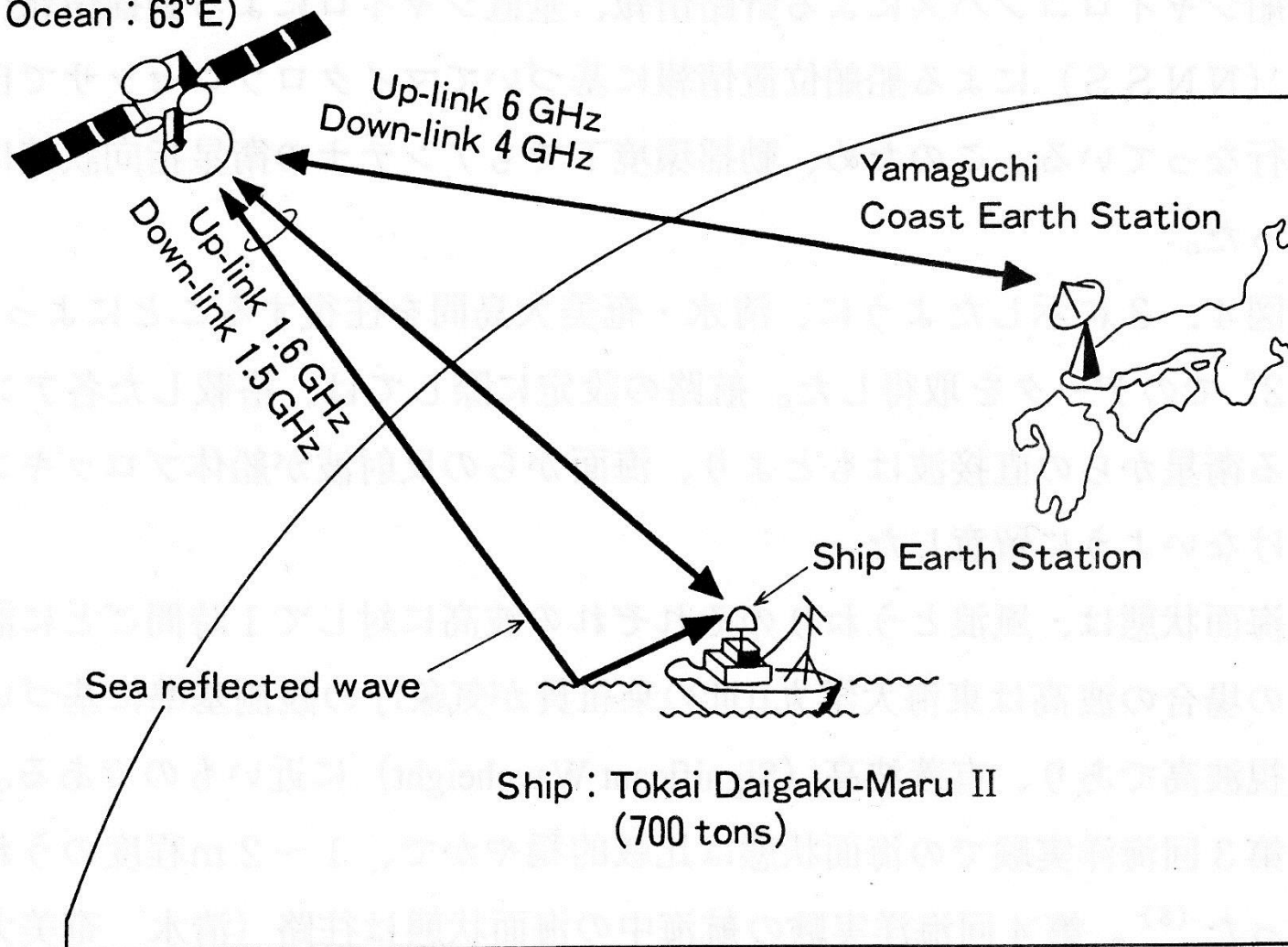
$$u = kh_0(\cos \theta_i + \cos \theta_s) \quad (2)$$

where $\theta_i = \theta_s$, k denotes the wavenumber in free space and h_0 represents the root mean square (rms) surface profile height

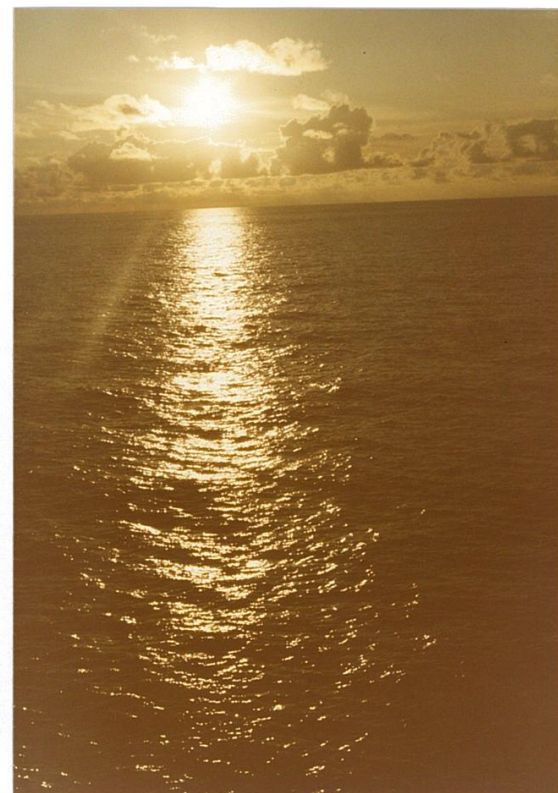
インマルサット衛星を利用した船舶実験(伝搬実験・通信実験)

INTELSAT-V MCS
(Indian Ocean : 63°E)

苦勞と楽しさを共に味わった思い出



(清水港 (EI=2°) ⇔ 奄美大島 (EI=12°))





海面反射フェージングの研究で得たこと・学んだこと

論文いっぱい書けたこと(マイナーな分野であったから競争少ない)

論文はIEEEで勝負しようと思ったこと

測ってみて分かった驚きと喜び

思い出いっぱい: 楽しかったこと、苦労した(切羽詰まった)こと

フィールド実験は多くの方のお世話になったこと(特に船舶実験)

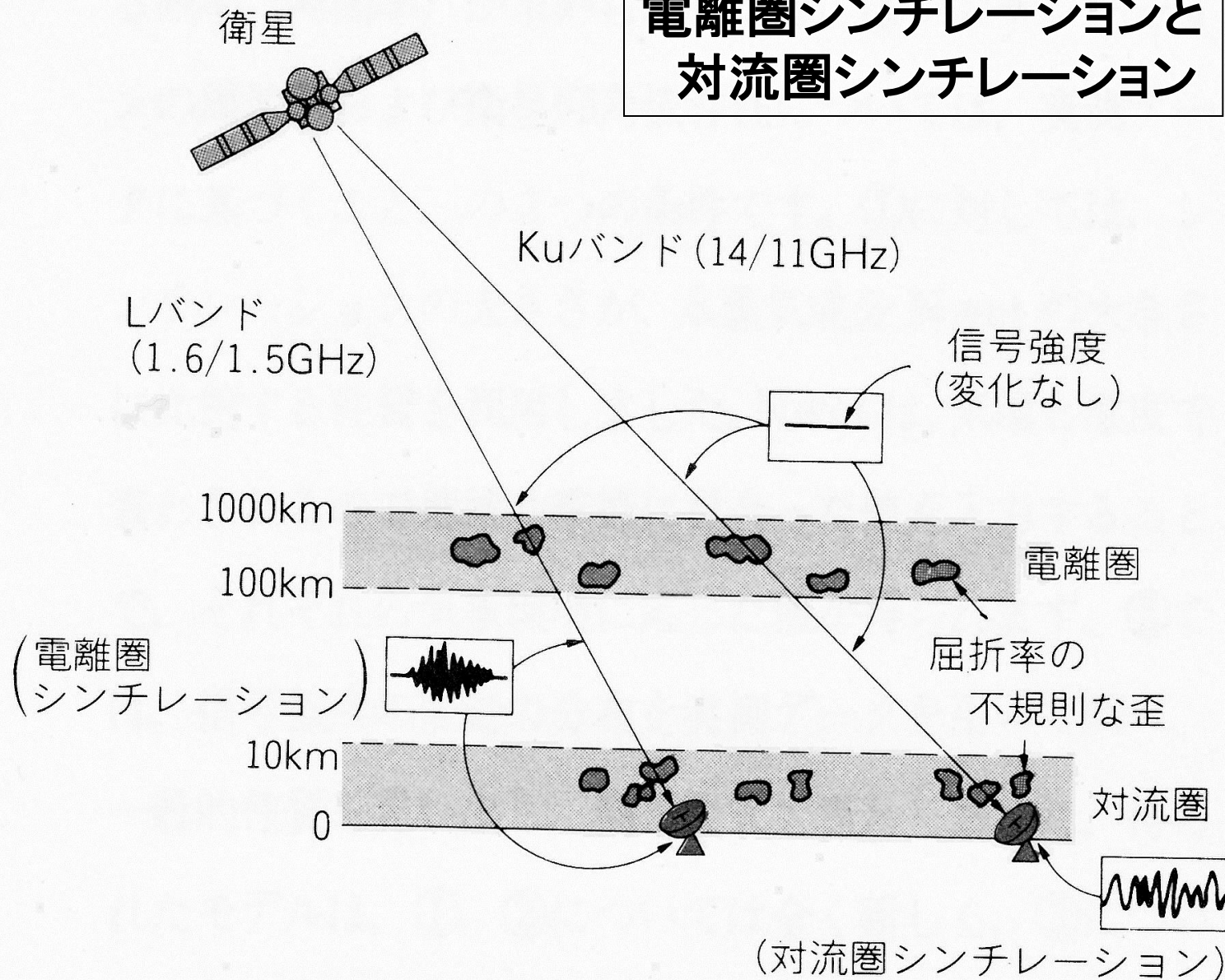
学位をいただいた

次のテーマに連続して行けた

- ・航空衛星の海面反射フェージング
- ・陸上衛星移動体通信の伝搬モデリング
(INMARSAT Project 21 (ICO))
- ・地上系の移動通信の情報伝送技術



電離圏シンチレーションと 対流圏シンチレーション





Ku帯(14/11GHz)低仰角衛星回線における電波伝搬の研究

- ・固定衛星通信(インテルサットシステム)で、C帯電波から**Ku帯電波利用**への拡張
- ・**低仰角運用**(衛星仰角 5° 以上)で、降雨による減衰の影響が大きくなると予想され、これを明らかにして、回線設計に資する伝搬モデル(降雨減衰推定法)を構築する

降雨減衰・降雨強度特性に関する研究

国内外で多数の理論・測定・モデル化の研究(当時の研究の主流)

対流圏シンチレーションの研究(降雨減衰研究の副次的研究)

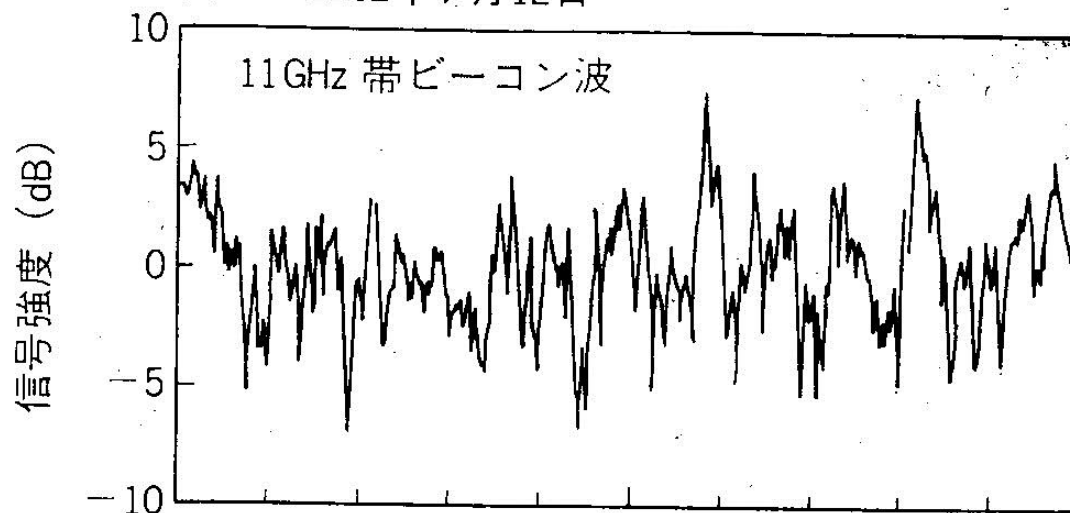
理論基盤: 乱流大気伝搬の理論(V. I. Tatarskii: 1967)

伝搬モデリング: R. K Craneのモデル(1976)

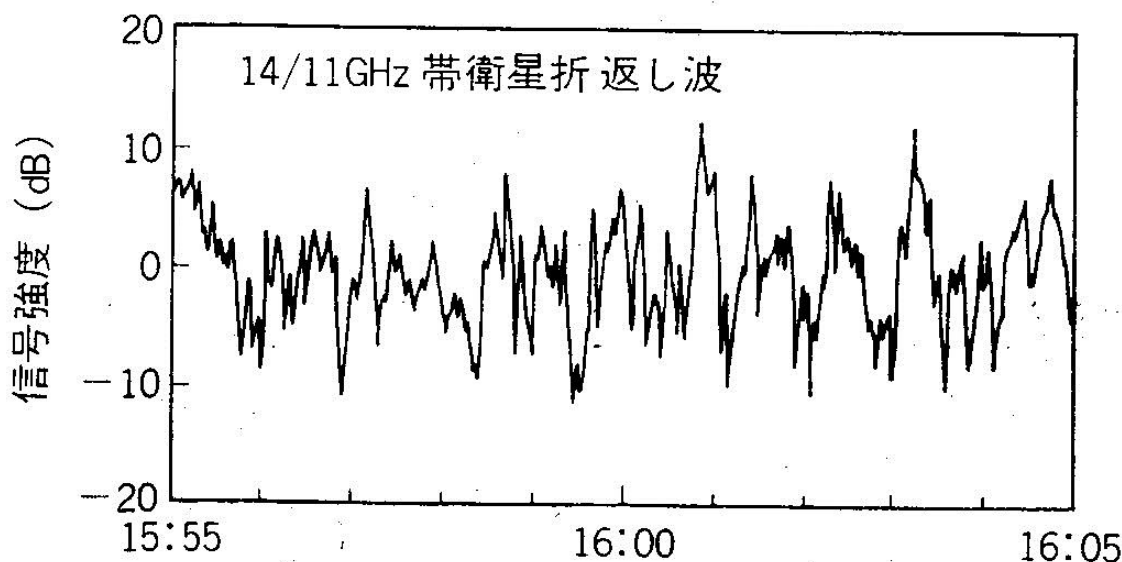


ある夏の日の午後(無降雨時)の衛星電波のふらつき

山口：1982年7月12日 衛星仰角：6.5°



これまでの予想
(CCIR モデル、Crane)
に比べてはるかに大きい変動

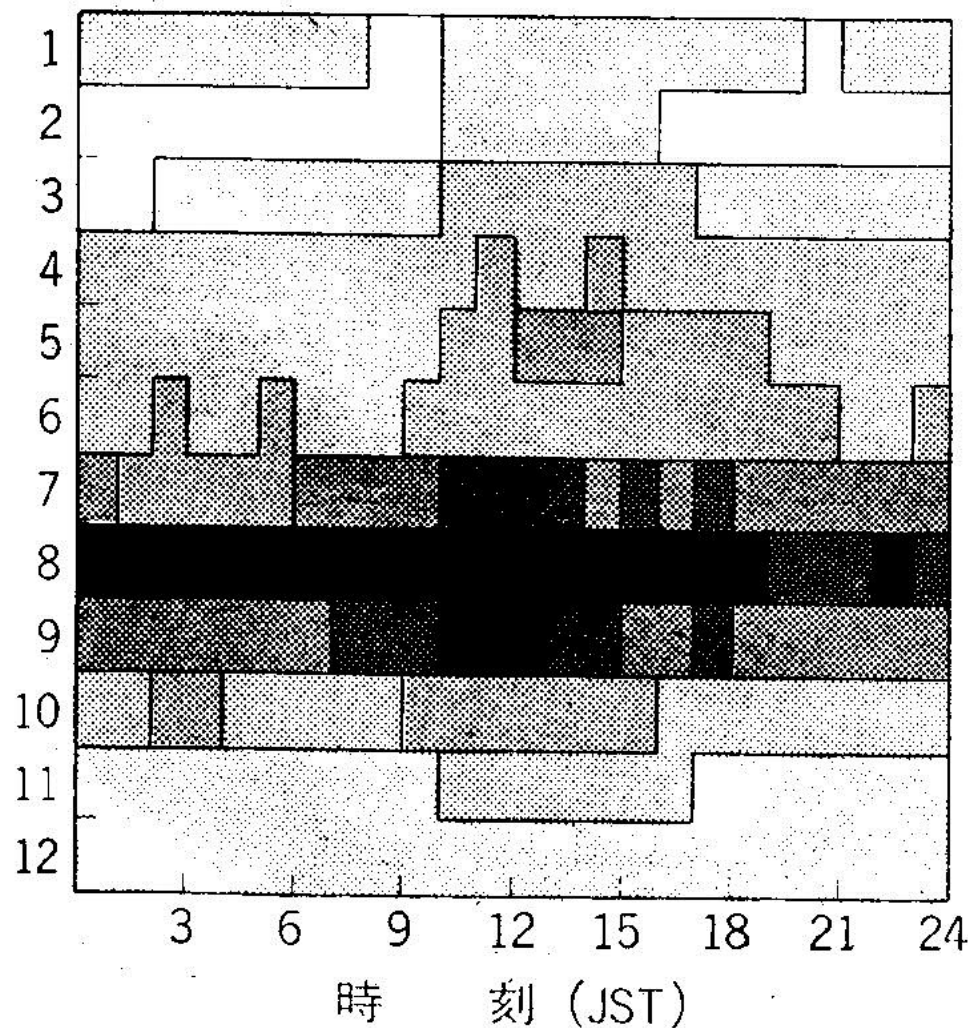


気象要素を取り入れた
精度の良い推定法が
必要

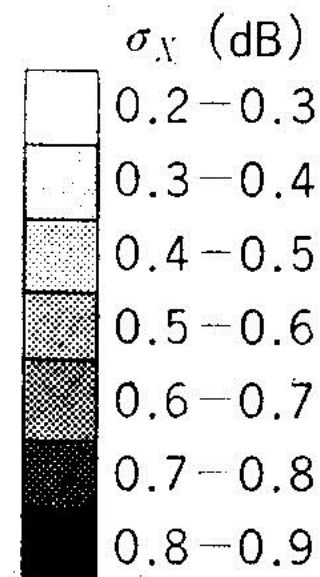


対流圏シンチレーションの季節依存性

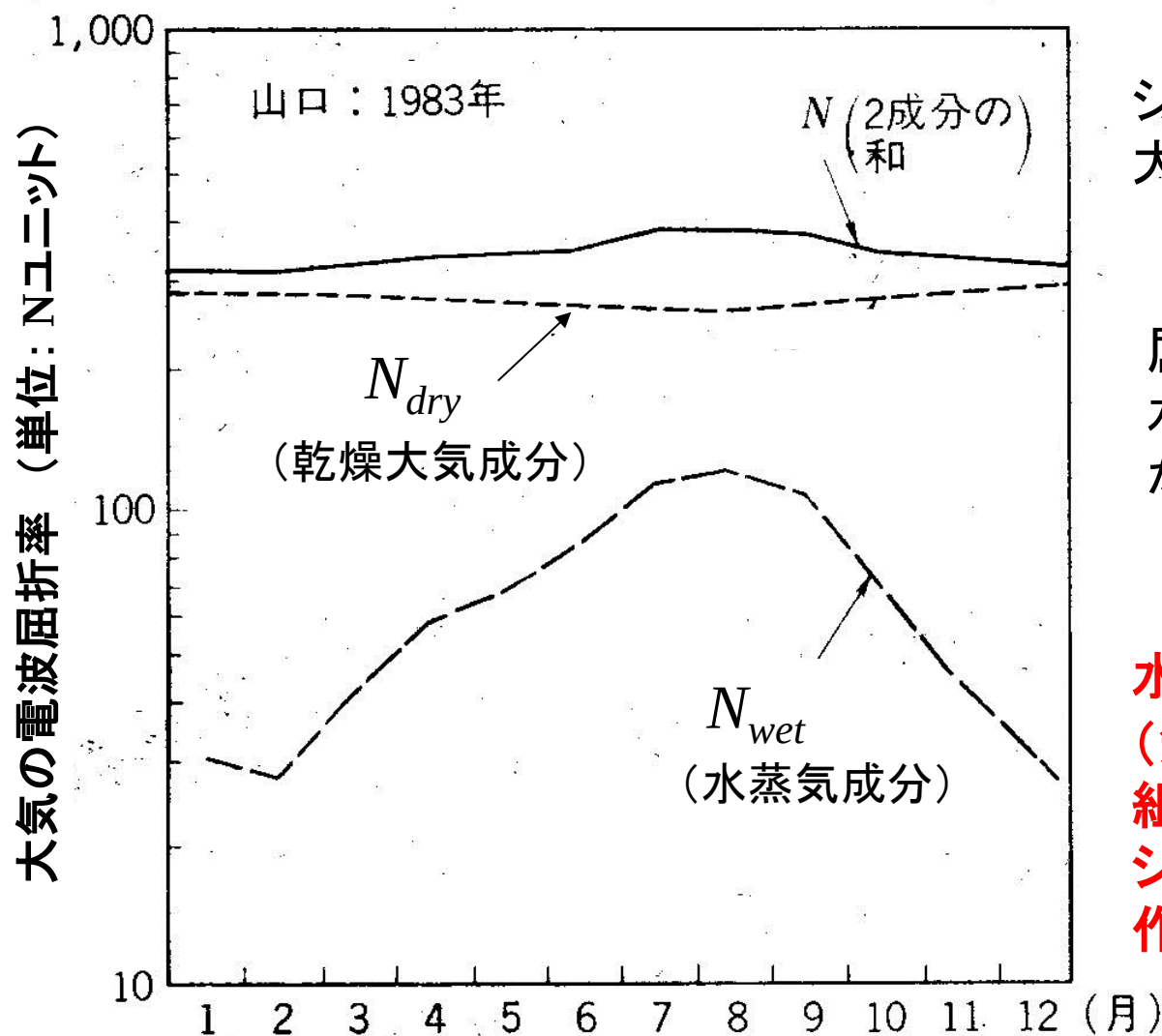
(月)



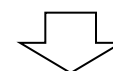
期 間：1983年1～12月
周波数：11.452GHz
仰 角：6.5°



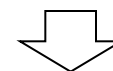
大気の電波屈折率の季節依存性



シンチレーションの原因は
大気の屈折率の揺らぎ



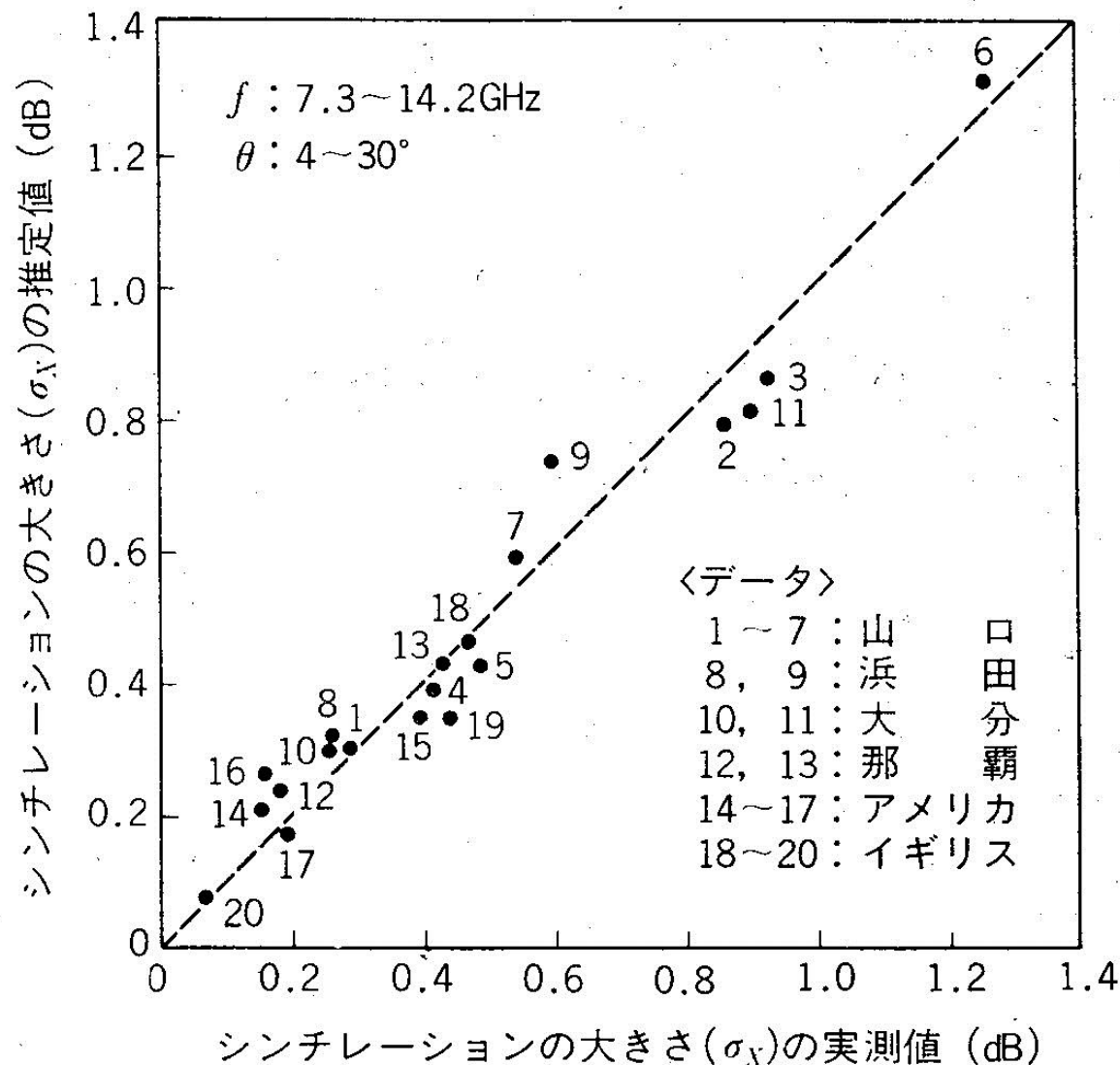
屈折率成分のうち
水蒸気成分 N_{wet}
が支配的



水蒸気成分 N_{wet}
(気温と湿度の関数)を
組み入れた
シンチレーション推定法を
作り上げた



世界のデータによる推定式の検証





A New Prediction Method for Tropospheric Scintillation on Earth-Space Paths

YOSHIO KARASAWA, MEMBER, IEEE, MATSUICHI YAMADA, SENIOR MEMBER, IEEE, AND JEREMY E. ALLNUTT

Abstract—A new method of predicting scintillation fading occurring on earth-space paths is presented based on the data obtained from a low-elevation 14/11-GHz wave propagation experiment at Yamaguchi, Japan. This model includes parameters representing meteorological conditions which have not been covered in existing models and can, therefore, be expected to be applied to wide regions with different climates. Moreover, the prediction accuracy of the method is evaluated based on experimental data collected at four sites in the western part of Japan, as well as data reported thus far on a world-wide basis. Although data used for evaluation are limited, the model presented is proved to have quite good prediction accuracy for frequencies from 7 to 14 GHz and elevation angles from 4° to 30°.

I. INTRODUCTION

IN SATELLITE communications with frequencies above 10 GHz, signal-level fluctuations caused by tropospheric scintillation, together with signal-level attenuation by rain, are among the major problems in radio-wave transmission. In particular, scintillation generated on propagation paths at low-elevation angles often produces considerable signal fading in excess of 10 dB. Therefore, a quantitative understanding of the phenomenon is required to design satellite systems operating at low-elevation angles.

Under such circumstances many studies on the tropospheric scintillation have been carried out both theoretically and

the prediction accuracy of the method will be evaluated based on experimental data collected at four sites in the western part of Japan (namely, Hamada, Yamaguchi, Ohita, and Okinawa) as well as data reported thus far on a world-wide basis.

II. EXISTING PREDICTION METHODS AND THEIR PROBLEMS

Tatarskii introduced a theoretical formulation for the estimate of log-amplitude fluctuations based on the assumption that the spatial structure of the atmospheric refractive index is in accordance with a Kolmogorov-type spectrum [3]. When the atmospheric turbulence lies in the inertial subrange where a relation $l_{\min}^2/\lambda \ll L \ll l_{\max}^2/\lambda$ where $l_{\min}$ [$l_{\max}$] is the inner [outer] scale of refractive index irregularities; L is the effective path length between the boundary of turbulence and the reception point; λ is the wavelength of the radio wave is satisfied, the variance σ_x of log-amplitude in dB is given by [3]

$$\sigma_x^2 = 42.9 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^{7/6} \int_0^L C_n^2(r) r^{5/6} dr \quad (\text{dB}^2). \quad (1)$$

In this equation C_n is the structure parameter of the refractive index varying along the earth-space path. It is known that the structure parameter C_n depends not only on the variance of the atmospheric refractive index but also on the outer scale ($l_{\max}$)



シンチレーション研究で学んだこと

- ・測ってみないとわからない(思っていることと違うことが起きるのが面白い)
「研究の種は実験から生まれる」
- ・研究のきっかけには、タイミング(偶然の幸運)が有る。
(もし、測定開始時期が冬季であったら問題の重要性にしばらくは気づかなかったかもしれない)
- ・国際標準化会合における推定手法提案(思い切って主張することの大事さ)



電波伝搬研究の実用化

- ・伝搬モデル(計算法)が実サービスの回線設計に利用される
- ・回線設計の標準計算法として標準機間で勧告手法となる

無線通信の国際標準化機関 ITU-R SG3 (当時CCIR)に
提案し、勧告手法に採用された衛星回線伝搬モデル
(Karasawa Models)

- | | |
|-------------------|----------------------------|
| ・ 海面反射フェージング | → Rec. ITU-R P. 680 |
| ・ 対流圏シンチレーション | → Rec. ITU-R P. 618 |
| ・ 降雨減衰 | → Rec. ITU-R P. 618 |
| ・ 陸上移動体衛星通信の伝搬モデル | → Rec. ITU-R P. 681 |
- (赤字:現行モデル)

⇒ IEEE Fellowをいただいた



論文投稿の奨め

- ・研究：真理の追究（社会のしがらみと無縁な純粹世界）
- ・論文：生きた証（元気の便り）
- ・自分の表現・意志の伝達（技術論文の中に自分の気持ちを込める）
- ・3つの喜びを味わうことができる

論文投稿 3つの喜び

- 1) 投稿時： 論文完成までの努力に対して
- 2) 査読結果通知時：
このドキドキ感
昔郵便、今インターネット
- 3) 論文出版時
店頭で自分の商品が置かれた
後は買ってくれる（＝引用される）のを楽しみに



論文を書くとき

原稿チェックは念入りに

企業 私のケース 唐沢→塩川→山田→栗原→横井(敬称略)

(複数視点からのコメントにより思考力・文章力が鍛えられる)

大学 学生→指導教員(何回ものフィードバックが必要)

一本目で鍛えると、2本目は・・・(頭やわらかい)

論文書きの美学

「研究は山道を手探りで道に迷いながら行きつ戻りつ進むようなものであるが、やがてある見通しの良いところにたどり着く。それを論文にまとめるときには、到達点から出発点を振り返って、最短コースを見定め、あたかもその道を登ってきたかのように簡潔にまとめなさい」(私は山田松一さんから教えてもらった)

投稿者と査読者の温度差(あって当然のこと)

- ・自信を持って投稿した論文に難癖がつく
(冷静になって考えれば納得できることが多いが)
- ・こんなんでもいいのかと思う論文をほめてくれることも(改良型の論文に多い)
- ・査読者のコメントが納得できない場合(＝内容に自信がある場合)には、
論文誌を変えて挑戦し続けよう(研究者はタフでないとつまらない)

祝工学博士唐海君



有志事竟成

壬申年

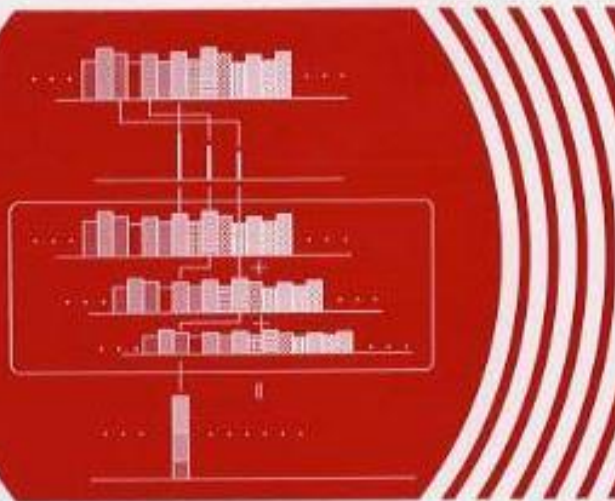
唐海



改訂版（来年2月予定）

デジタル移動通信の 電波伝搬基礎

博士(工学) 唐沢 好男 著



コロナ社

大幅改定(ページ数、倍に)

新規

- ・MIMOと電波伝搬
- ・送信ダイバーシティ(STBC)
- ・OFDMと電波伝搬

内容強化

- ・確率分布
- ・伝搬モデル(フェージング生成法)
- ・伝搬とシステムなど

私の持っている知識を出し尽くした
(若い人たちへの伝言を込めた)
もう、思い残すことはない

嬉しかった思い出を並べた棚



Thank you very much for your kind attention

