

海事衛星通信における海面反射フェージング

唐 沢 好 男*

塩 川 孝 泰**

Characteristics of Multipath Fading due to Sea Surface Reflection
in Maritime Satellite Communications

By

Yoshio KARASAWA, Takayasu SHIOKAWA : Radio Transmission Laboratory,
KDD Research and Development Laboratories

For low G/T ship earth stations in future maritime satellite communications, the effect of multipath fading due to sea surface reflection will be significant, particularly operating at low elevation angles.

This paper presents a practical fading model based on the Kirchhoff approximation theory for the coherent and incoherent components of reflected waves as a function of sea surface conditions. Using this model, theoretical fading depths are presented as a function of the elevation angle, wave height and antenna gain. The result indicates that intense fading occurs under the sea condition that the incoherent component is fully developed. Theoretical results presented in this paper agree well with experimental results obtained by field experiments.

1. ま え が き

船舶と陸上との通信を、静止衛星を介して行う海事衛星通信が、1976年マリサットシステムにより開始され、現在、これを発展的に引き継いだインマルサットシステムにより全世界的な規模での通信サービスが提供されている。この海事衛星通信では、衛星仰角 5° 以上をサービスエリアとしているが、仰角が 5° に近い低仰角運用の際には、衛星からの直接波と海面からの反射波が干渉し、信号強度の変動、いわゆるマルチパスフェージングが発生する。インマルサットの現用システム（標準A船舶地球局：G/T=-4 dBK、アンテナ利得20~24 dBi）では、比較的ビーム幅の狭いアンテナが用いられるため、仰角 5° 以上の運用を考える際には、フェージングの影響はあまり問題にはならないが、インマルサットの将来

システムとして検討が進められている低 G/T システム、例えば標準B（アンテナ利得15 dBi程度）や標準C（同10 dBi以下）では、アンテナのビーム幅が広くなるので、海面反射フェージングは、回線設計上重要な問題となる。

このため、インマルサットシステムにおける衛星と船舶の間の通信に用いられているLバンド電波（1.6/1.5 GHz：右旋円偏波）における海面反射フェージングの現象の解明や、その大きさの定量的な把握を行うための実験的・理論的研究が各機関で進められている^{(1)~(6)}。しかしながら、理論面では、海面という複雑な自然現象が対象であることによる取扱いの難しさが、また実験面では、測定の規模によって、アンテナ利得、仰角、海面状態等のパラメータが限定されてしまうため、回線設計に足る理論モデルや実測データはないようである。例えば、CCIRのRep. 763⁽¹⁾では、Beckmannの理論⁽²⁾に基づく近似式によりフェージング推定値を示しているが、フェージングを考える際に重要なインコヒーレント

* 研究所 無線伝送研究室主査

** 主任研究員

成分の取扱いに関して、波によるしゃへい効果を考慮していない等の不備が多く、中低利得アンテナによるフェージング実測値とは、かなり大きなずれになることが指摘されている⁽⁸⁾。

そこで、本稿では、フェージングの現象を理論的に明らかにするため、キルヒホッフ近似による散乱理論(Beckmann 等の方法)⁽⁷⁾を適用し、かつ低仰角の場合に重要な働きを持つ散乱波のしゃへい現象を考慮した理論モデル⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾を示し、このモデルによるフェージングの理論推定値を求める。更に筆者らの行ったフィールド実験を含む幾つかの実測データとの比較を行い、理論モデルの妥当性を示す。

2. 波浪の基本的性質

フェージングの現象を理論的に取り扱うためには、まず電波の反射体である波浪の性質を把握しておく必要がある。この波浪は時間的にも空間的にもランダムに変動しており、一見何の法則性もないように見える。しかしながら波浪の基本パラメータである波高、波長、周期等に注目すると、これらは固有の統計的性質を有していることが知られている。ここでは次章で述べる散乱理論の適用に際して重要なパラメータである波高と傾度偏差について述べる。

2.1 波 高

波浪は図1に示すように基本的な波の上に種々のスケールの小さい波が重畳した複合波であるが、ここではこの基本波の性質に着目する。一般に波高 H は基本波の隣り合う山と谷の高さの差で、また、波長 L は山と山(あるいは谷と谷)の長さでそれぞれ定義される。また波浪の周期は重力波の性質から、

$$\text{周期} = \sqrt{\frac{2\pi}{g} L} \dots\dots\dots(1)$$

(g : 地上の重力加速度)

となる。

波高 H は個々の波の場合について与えられるもので、海面状態を規定する場合には、すべての波高 H の平均

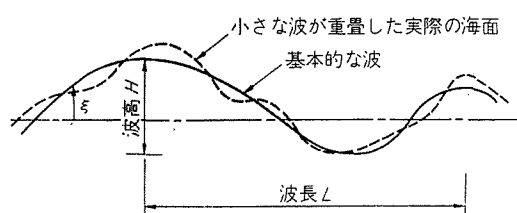


図1 海の波

(Oct. 1984)

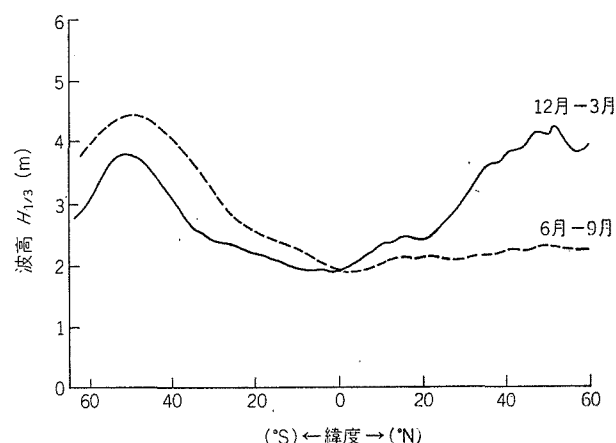


図2 平均的に発生する有義波高 (GEOS-III による測定)⁽¹²⁾

値である平均波高 H_0 、あるいは上位 1/3 を取って平均した有義波高 $H_{1/3}$ 等が用いられる。これらの波高と海面偏位量 ξ の rms 値 h_0 とは、

$$H_0 \approx 2.5h_0, H_{1/3} \approx 4h_0 \dots\dots\dots(2)$$

$$h_0 \triangleq \sqrt{\xi^2}$$

の関係にある⁽¹¹⁾。また平均水面からの偏位量 ξ の分布は、正規分布で近似されることが知られている。本稿では海面状態を、有義波高 $H_{1/3}$ を用いて表わすこととし、特に断りのない限りこれを単に波高と呼ぶことにする。

図2はアメリカの地球観測衛星 GEOS-III が長期にわたって測定した有義波高の平均値を示している⁽¹²⁾。図より、年間を通じて波高 2~4 m の波が平均的であること、また両半球の中緯度地域のそれぞれの冬期に海が荒れやすいこと等がわかる。

2.2 傾度偏差

波高と波長の比 δ ($\triangleq H/L$) は波形勾配 (Wave Steepness) と呼ばれ、波の険しさを表わすパラメータである。この波の険しさは、海面散乱波の到来領域と密接な関係を有し、 δ が大きいほど、広い範囲から反射波が到来することになる。3章において必要とされる海面の傾度偏差 β_0 は波の各点での傾きの rms 値、波形勾配 δ とは、

$$\beta_0 = \pi / \sqrt{2} \delta \dots\dots\dots(3)$$

で近似できる。

波形勾配 δ は波令*に依存することが知られているが⁽¹³⁾、波高との対応は明確にされていない。そこで筆者らは、各波高に対する β_0 の目安を知るために、様々な海域にわたる波高と周期の長期測定データ⁽¹⁴⁾から、周期を式(1)を用いて波長に換算し、図3のような、波高

* 波令: 波の速度と風速の比で定義され、波の年齢的意味を有する。すなわち、風によって波が発達段階にあるときは波令 < 1 、定常状態で波令 ≈ 1 、風がやんで波だけが残っているときは波令 > 1 になる。

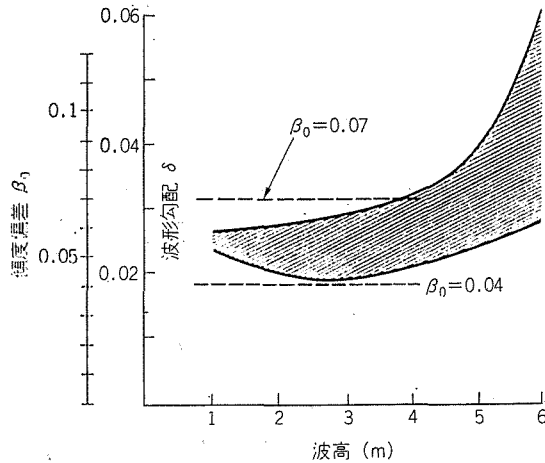


図3 波高と波形勾配および傾度偏差の関係

と波形勾配、傾度偏差の関係を求めた。図における斜線の幅は、海域ごとに得られた δ の値が異なることによって生じたものである。図3より、波高1~4 mでは、波形勾配は0.02~0.03の間にあって、かつ波高依存性の小さいことがわかる。この値は「波形勾配は1/18~1/90にあって約1/40が最も多い」といわれる海洋学上の知識⁽¹³⁾とも矛盾がない。図3より傾度偏差 β_0 は、波高4 m以下では波高によらず、0.04~0.07程度と考えておいてよいことがわかる。

3. フェージングの理論モデル

3.1 海面状態の分類

海事衛星通信では、海面による電波の前方散乱が問題となる。海面からの反射波は、直接波 D に対して、相関を持つコヒーレント成分（鏡面反射成分） C と、不規則な変動をするインコヒーレント成分 I から成る。受信信号 T は、これら3つの成分の合成であり、図4は、この様子をベクトルの示したものである。コヒーレント成分と直接波成分の位相差 φ は、アンテナ高によって変わり、これに起因する信号強度の変動は、ハイパターフェージングと呼ばれる。

一般に波の低い穏やかな海面ではコヒーレント成分が、

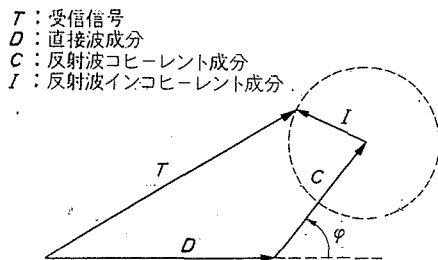


図4 フェージングのベクトルモデル

また、波高の高い荒れた海面ではインコヒーレント成分が卓越する。両成分の比率は、次式で定義される roughness factor u に依存する。

$$u = kh_0(\cos \theta_i + \cos \theta_s) \quad (4)$$

θ_i : 電波の入射角

θ_s : 電波の反射角

(コヒーレント成分に対しては $\theta_s = \theta_i$)

k : 電波の自由空間における波数

この場合、コヒーレント成分の強度 $C(=|C|)$ は、

$$C = |\Gamma \cdot G(\theta_s)| e^{-\frac{u^2}{2}} \quad (5)$$

となる⁽⁷⁾。ここで Γ は海面の反射係数⁽⁷⁾、 $G(\theta_s)$ は、正規反射点方向のアンテナ正規化利得（衛星方向に対して1）である。式(5)から明らかなようにコヒーレント成分は、波高の2乗に対して指数関数的に減少していくことがわかる。この傾向は多くの実験によっても確かめられている。

便宜上コヒーレント成分が主体となる海面状態を“状態[C]”，インコヒーレント成分が卓越する状態を“状態[R]”，その中間的な領域を“状態[M]”，さらに波高が高く波の砕け等が発生して、理論的取扱いが複雑となる状態を“状態[V]”とすると、1.5 GHz 電波では海面状態は図5のように分類される。ここに、[C]と[M]の境界を $u=0.5$ 、[M]と[R]の境界を $u=2$ としてある。図2から明らかなように、通常の波高が2~4 mであることを考えると、大部分の海面状態は、“状態[R]”に分類される状態であることになる。この状態でのフェージングを検討する際には、インコヒーレント成分の大きさを正確に把握する必要があるが、これについては、その取扱いが明確にされていない。次節では、このインコヒーレント成分について述べる。

3.2 インコヒーレント成分

インコヒーレント成分は、海面の不規則な波からの寄

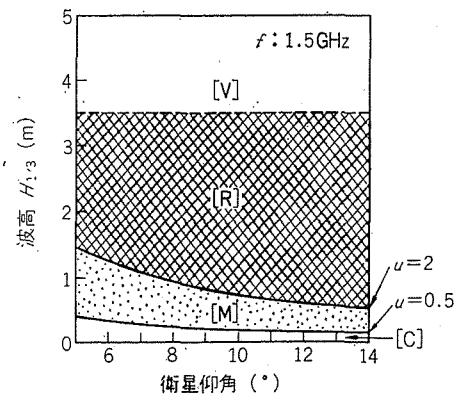


図5 1.5 GHz 電波で見た海面状態の分類

与によるため、その強度分布は理論上レーレー分布となる。このため、インコヒーレント成分に関しては、その強度の分散 V_I を求めれば、与えられた時間率に対応するフェージングの大きさを決定することができる。

図6の座標系で海面上の適当な領域 ds を考える。この ds は、領域内のどの点の散乱角 (θ_s, ϕ_s) も一定とみなし得る程度に小さく、かつ、波の上に局所的に生じる鏡面反射点(図7参照)を十分多く含む程度には大きい、いわゆる巨視的微小領域である。

この ds が完全導体の粗面であって、かつ散乱波のしゃへい現象、多重散乱がない場合のインコヒーレント成分の単位面積当りの平均散乱断面積 σ_0 は次式となる⁽¹⁰⁾。

$$\sigma_0 = \frac{u^2}{\beta_0^2} \sec^4 \gamma \sum_{m=1}^{\infty} \frac{u^{2m}}{m!m} e^{-u^2 \left(1 + \frac{\tan^2 \gamma}{m\beta_0^2}\right)} \dots \dots \dots (6)$$

ここで

$$\gamma = \tan^{-1} \left\{ \frac{(\sin^2 \theta_i - 2 \sin \theta_i \cdot \sin \theta_s \cdot \cos \phi_s + \sin^2 \theta_s)^{1/2}}{\cos \theta_i + \cos \theta_s} \right\}$$

式中の β_0 は、海面傾度の rms 値で、2章で述べたように波高 4 m 以下の海面状態では 0.04~0.07 程度の値を有している。

式(6)は $u^2 \ll 1$ (“状態 [C]”), $u^2 \gg 1$ (“状態 [R]”) の場合には、さらに簡単化され次式となる。

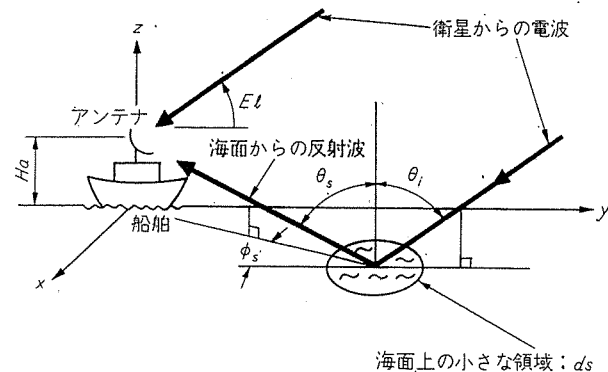


図6 海面反射波とその座標系

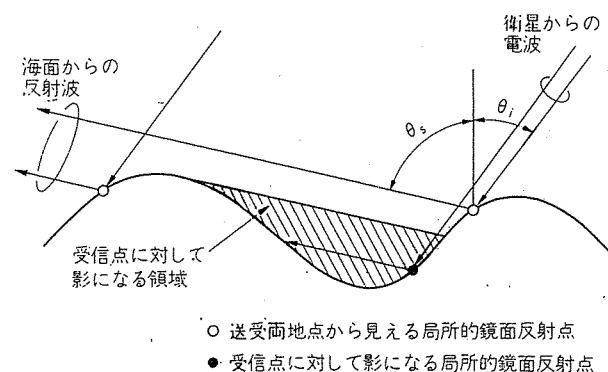


図7 局所的鏡面反射点とそのしゃへい

$$\sigma_0 = \begin{cases} \frac{u^4}{\beta_0^2} \sec^4 \gamma e^{-u^2 \left(1 + \frac{\tan^2 \gamma}{\beta_0^2}\right)} & (u^2 \ll 1) \\ \frac{1}{\beta_0^2} \sec^4 \gamma e^{-\frac{\tan^2 \gamma}{\beta_0^2}} & (u^2 \gg 1) \end{cases} \dots \dots \dots (7.1)$$

$$\dots \dots \dots (7.2)$$

式(7.2)は Barrick が、幾何光学的手法 (Specular Point Theory) によって求めたもの⁽¹⁵⁾と同じ形であるため、“状態 [R]” でのインコヒーレント成分は、図7に見られるような、小さな局所的鏡面反射点からの寄与によっていると理解することができる。

低仰角伝搬路では、海面で反射された電波も、そのうちの幾つかは、前方の波によってしゃへいされ、受信アンテナに到達できなくなる (図7参照)。このため、個々の散乱波が、受信点まで到達できる確率 $S(\theta_i, \theta_s)$ を考え、これによって式(6)で求めた散乱断面積を補正する必要がある。このしゃへい効果は、海面への入射波、海面からの反射波の双方に対して働くが、仰角 5° 以上の通信を考える際には、入射波に対しては無視でき、主に $\theta_i \simeq 90^\circ$ (水平線方向) からの反射波に対して強く働いている。S を与える式は、多くの方法によって求められているが、以下の計算では、Smith のしゃへい係数 $S(\theta_s)$ ⁽¹⁶⁾を用いる。これを考慮するとインコヒーレント成分の分散 V_I は次式となる⁽¹⁰⁾。

$$V_I = \frac{1}{4\pi} \iint_{\text{全海面}} \sigma_0 \cdot S \cdot \Gamma^2 \cdot G^2 \cdot \tan \theta_s \, d\phi_s \, d\theta_s \dots (8)$$

3.3 フェージングの深さ

直接波の強度を 1、コヒーレント成分の強度を C 、インコヒーレント成分の分散を V_I とし、また直接波とコヒーレント成分の位相差を φ とすると、受信強度 T の確率密度関数 f は次式で与えられる⁽⁷⁾。

$$f(T, \varphi) = \frac{2T}{V_I} \exp \left(-\frac{T^2 + 1 + 2C \cos \varphi + C^2}{V_I} \right) \times I_0 \left(\frac{2T \sqrt{1 + 2C \cos \varphi + C^2}}{V_I} \right) \dots \dots \dots (9)$$

I_0 : 0 次修正ベッセル関数

“状態 [R]” ではコヒーレント成分 C が無視できるので、上式は、一定常波と一不規則波の分布、すなわち仲上-ライス分布となる。

フェージングの深さ Fd は、一般に、直接波の受信レベルを基準にした信号強度の低下量をいう。ここでは、あるレベル T_0 を考え $T_0 \leq T$ となる確率が $p(\%)$ であるとき、時間率 p に対するフェージング深さ $Fd(p)$ を $-20 \log T_0$ で定義する。実際に Fd を求める場合にはコヒーレント成分の位相差 φ の取扱いによって、幾

つかのケースが考えられるが、ここでは、以下に示す2つのケースについて考える。すなわち、

$$1 - \frac{p}{100} = \begin{cases} \int_0^{T_0} f(T, \pi) dT & (\text{ケース1}) \\ \frac{1}{\pi} \int_0^{T_0} \int_0^{\pi} f(T, \varphi) d\varphi dT & (\text{ケース2}) \end{cases} \quad (10)$$

ケース1は、フェージングの最悪ケースを与えるもので、アンテナ高が常にハイトパターンの谷の位置に固定されているような状態に対応する。またケース2は、アンテナ高がハイトパターンに対して一様に分布する状態で、この分布は森田分布と呼ばれる。船舶上で受信する場合には、海が穏やかな場合でも、通常ハイトパターンの1サイクル以上のアンテナ上下動があるため、実用的な観点からは、ケース2の場合を考えておいて十分である。

4. フェージングの理論推定値

フェージングの大きさを求めるに先立ち、まず海面の散乱特性について述べる。海面から到来する散乱波の空間的な強度分布は式(8)の被積分関数を計算することにより求まる。仰角 5° で荒れた海面の例として $\beta_0=0.07$ とした場合の結果を図8に示す。図で点線は、アンテナ高15mの場合の第1フレネルゾーンの大きさを表わし、コヒーレント成分の主な寄与領域となるものである。

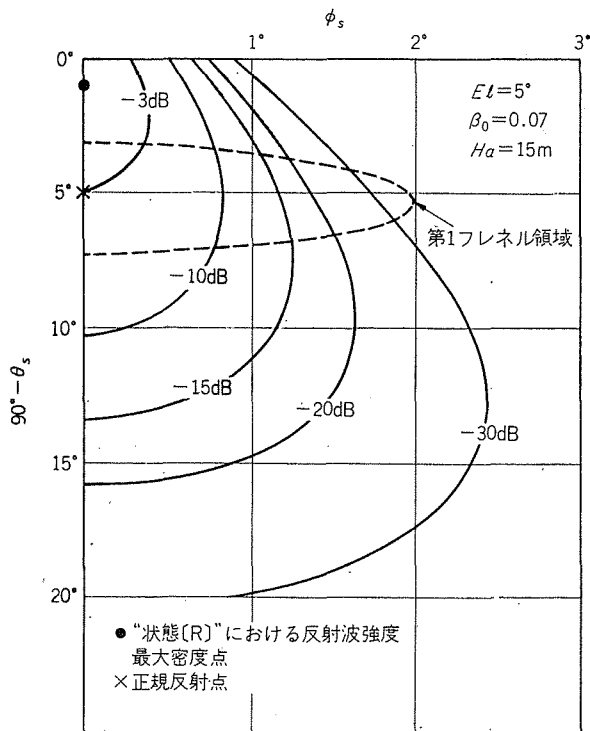


図8 海面の散乱強度分布 (仰角 5° の場合)

また実線は、“状態[R]”におけるインコヒーレント成分発生強度の等高線を示している。図より、穏やかな海の場合の主なる寄与領域が鏡面反射点を中心とする $\pm 2^\circ$ (θ_s, ϕ_s 共) 程度であるのに対し、インコヒーレント成分の -3 dB 等高線は、 ϕ_s 方向に 0.5° 以下に狭まり、 θ_s は逆に 5° 程度まで広がる。また散乱強度密度の最大点は海が荒れてくると、正規反射点 (図中の×印) より遠方 (水平線方向) に移動する (このように、海が荒れているときの散乱波が細く長い領域から到来するのは、夕日が尾を引いたように細長く海面に映える現象とも符合して興味深い)。

以下、フェージングを求めるに際して、表1のようなアンテナ特性を仮定する。衛星電波および受信アンテナの偏波特性は完全円偏波の理想状態を考える。

図9は、コヒーレント成分の実効反射係数 C とインコヒーレント成分の実効反射係数 $\sqrt{V_I}$ の波高特性を仰角 5° と 10° の場合について示したものである。同図を見ると、波高の増加に対するコヒーレント成分の減少とインコヒーレント成分の増加、あるいはコヒーレント成分の β_0 による若干のばらつきがあるものの、両成分のエネルギー和 (2乗和) は海高依存性が小さく、次式で示されるエネルギー保存則が、かなりよく満足されていることがわかる。

$$C^2(u) + V_I(u) \approx C^2(0) \approx V_I(u \geq 2) \quad (11)$$

表1 計算に用いたアンテナの特性諸元

利 得	ビーム幅	開 口 径	軸 比
24dBi	11°	1.2mφ	全方向 1
20	17°	0.8	
15	33°	0.4	
8	70°	0.2	

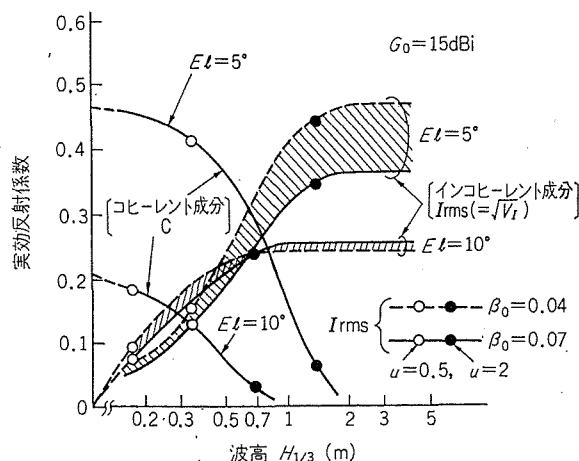


図9 コヒーレント成分とインコヒーレント成分の波高特性

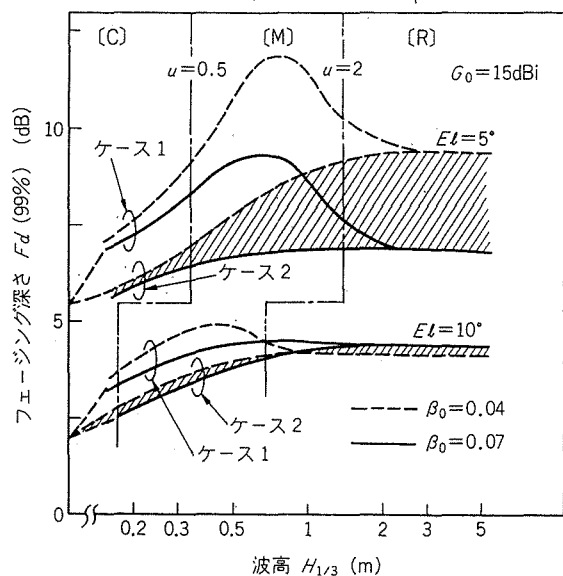


図10 フェージングの波高特性

図10は、図9に示したコヒーレント、インコヒーレント両成分を式(9)、(10)に代入し、2つのケース（ケース1、2）について、それぞれフェージングの99%値を求めたものである。図より最悪ケース（ケース1）を考えると両成分が混在する $u=1$ 付近の海面状態（“状態 [M]”）で最も大きなフェージングとなるが、通常のケース（ケース2：図の斜線で示したカーブ）では、 $u \geq 2$ に相当する“状態 [R]”で最も大きなフェージングになることがわかる。2章で示したように“状態 [R]”は発生頻度も高いことから、この状態でのフェージングを把握しておくことが重要である。

図11は“状態 [R]”でのフェージング深さ99%値を、仰角の関数として示している。図より、将来の海事衛星通信として期待されている標準B船舶地球局（G/T：-10 dBK でアンテナ利得約 15 dBi）の場合には、仰角10°で

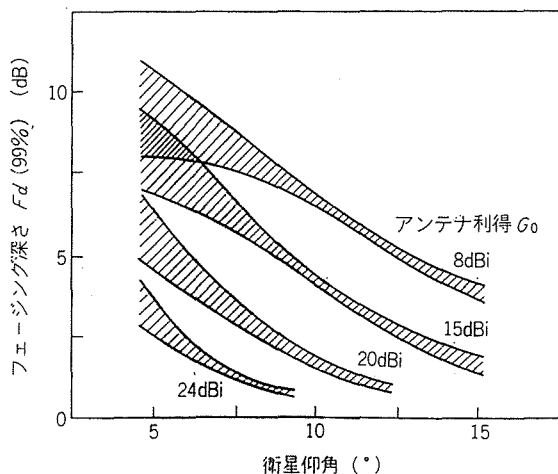


図11 荒れた海面状態におけるフェージング深さの99%値
(Oct. 1984)

4～5 dB、仰角5°で7～10 dBのフェージングが発生すると推定できる。

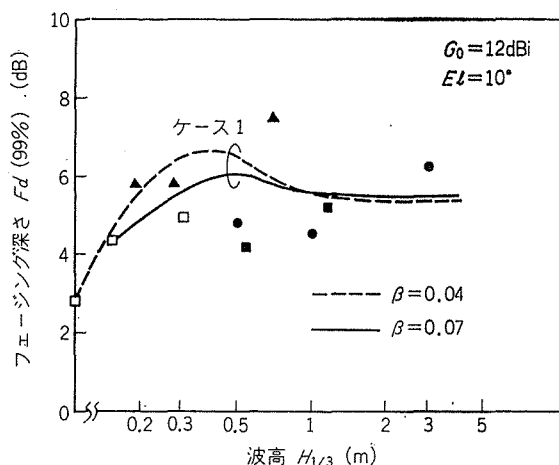
5. 実測値との比較

ここでは、筆者らのフィールド実験を含め、今までに報告されているデータと、本モデルによる理論推定値を比較し、モデルの信頼性を吟味する。

図12は、ケース1に相当する状態での海岸実験結果を集めたもので、仰角10°、利得12 dBiの理論値（波高特性）と比較して示してある。図に示すように、測定状況は少しずつ異なり、データもまたばらつきが見られるが、今までの CCIR モデル⁽¹⁾等に比較してかなりよく現象を説明付けている。

図13は筆者らが、利得13.5 dBiのショートバックファイヤアンテナ（ビーム幅：38°）を用い、実際の船舶上で測定したデータ⁽¹⁷⁾を波高別にプロットしたものである（ $u \geq 2$ に相当する“状態 [R]”でのデータのみ）。図より、データにばらつきがあるものの90%値、99%値共かなりよく理論値に一致していることがわかる。図14は1.2 mφパラボラアンテナ（利得24 dBi、ビーム幅：11°）を用いて測定された結果と理論値を比較している。

現段階では、実測データの量は限られているが、これらのデータと理論推定値は、かなりよく一致しているので、本モデルによる解析結果は、妥当なものであると思われる。



データ
□：筆者ら，SBF（ショートバックファイヤアンテナ）， $E_t=9.3^\circ$ ， $G_0=13\text{dBi}$
▲：筆者ら，4素子ヘリカル， $E_t=9.3^\circ$ ， $G_0=13\text{dBi}$
■：筆者ら，SBF， $E_t=11^\circ$ ， $G_0=13\text{dBi}$
●：吉川ら⁽⁸⁾，SBF， $E_t=10^\circ$ ， $G_0=12\text{dBi}$

図12 フェージング波高特性の理論値と実測値の比較

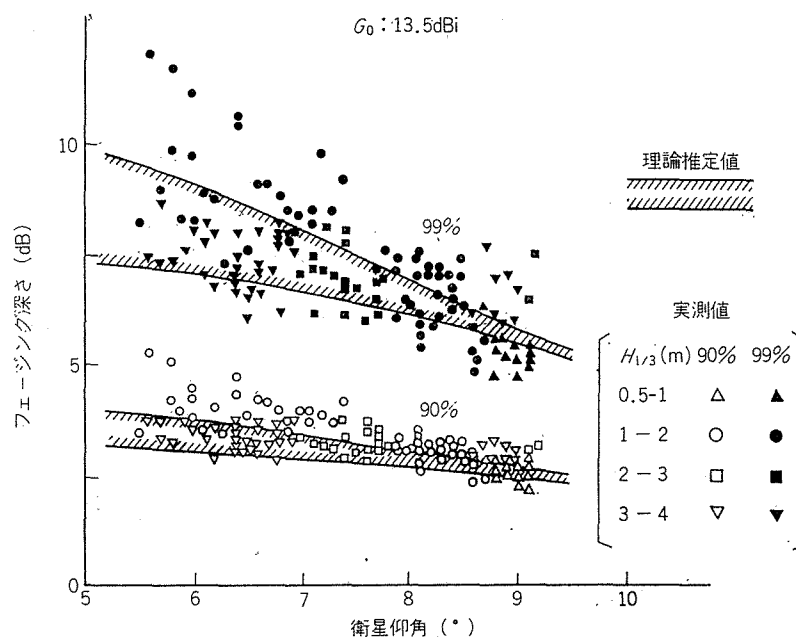


図13 利得13.5 dBiにおけるフェージング深さの実測値と理論値

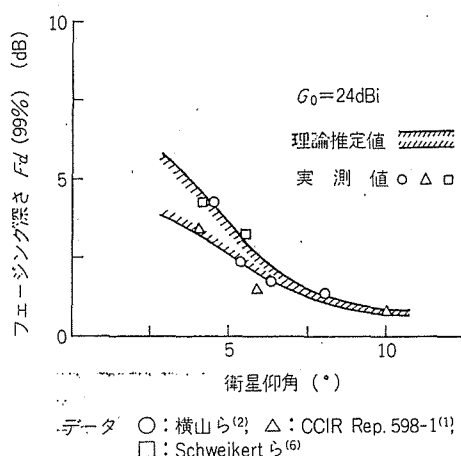


図14 利得24 dBiにおけるフェージング深さ

6. む す び

本稿では、海面によって反射される電波をコヒーレント成分とインコヒーレント成分に分離し、フェージングの理論的なモデル化を行った。特に、今まで取扱いが明確でなかったインコヒーレント成分に関しては、低仰角において問題となる波のしゃべい効果を考慮した散乱断面積を求め、これを海面全体にわたる積分によって求める方法により解析を行った。更に波浪の傾度偏差を調べ結果をモデルに反映させた。

このモデルを用いて1.5 GHz帯電波に対する海面反射フェージングの解析を行った結果、以下の点が明らかとなった。

- ① インコヒーレント成分の主なる寄与領域は、海面

の正規反射点より遠方（水平線方向）にあり、横方向（ ϕ_s 方向）の広がり（ -3 dB 幅）は $\pm 0.5^\circ$ 程度であるのに対し、縦方向（ θ_s 方向）は 5° 程度となり、観測点から見て細長い領域に集中している。

- ② インコヒーレント成分が主体となる海面状態で発生するインコヒーレント成分の平均強度は、波のないときのコヒーレント成分とほぼ同等の強度となり、船舶上で受信するような一般的なケースでは、前者の海面状態で大きなフェージングが発生する。

- ③ インコヒーレント成分が主体となる海面状態のうち、波高1～4 m程度の海では、フェージングの波高依存性は小さい。

- ④ 低 G/T 船舶地球局では、かなり大きなフェージングが発生する。例えば利得15 dBiのアンテナでは、仰角 10° で4～5 dB、仰角 5° で7～10 dB、また利得8 dBiのアンテナでは仰角 10° で6～7 dB、仰角 5° で8～11 dBと見積られる。

なお、ここで求めた値は、衛星電波および受信アンテナの偏波特性を理想的な円偏波としており、またアンテナの指向誤差もないものとしている。実際的には、若干歪んだ偏波特性であったり、指向誤差があったりするので、これらも考慮した回線設計が必要となろう。

5章で述べたように、本モデルの解析結果は、波高3 m以下の海面状態のフェージング実測データとかなりよい一致を見ている。さらに波高が大きくなると、本解析で無視した重畳波の影響が散乱波の特性に影響を及ぼすことになる。このような場合、等価的な傾度偏差が大きくなるため、多重散乱が発生し、インコヒーレント成分

強度が低下し、したがってフェージングも小さくなるものと予想される。しかし現在のところ、波高 4 m 以上の実測データの報告例は少なく、これを定量的に評価できる段階には至っていない。このような荒れた海面状態におけるフェージングについての理論・実験両面からの検討については今後の課題である。

謝辞 本研究の機会を与えられた KDD 研究所鍛冶所長、野坂副所長、小川次長に謹んで感謝する。また本研究を進めるにあたり、御指導、御鞭撻いただいた山田無線伝送研究室長に深く感謝する。さらに海岸実験、海洋実験の実施に際して多大な御協力をいただいた元同研究室結城調査役（現通信放送衛星機構）に謝意を表する。また、本内容について有益な検討および討論をいただいた京都大学池上文夫教授に深謝する。

参 考 文 献

- (1) CCIR Rep. 763-1, SG 8 (1982), and Rep. 598-1, SG 8 (1978).
- (2) 横山, 佐藤, 清水, 森田: マリサット衛星による通信実験結果, 信学技報, SANE 77-20, (1977).
- (3) 小園, 吉川, 細矢: 船舶衛星回線における海面反射特性, 信学論 (B), J 65-B, 6, pp. 761-768, (1982).
- (4) 大森慎吾: 海面反射多重波によるフェージング, 信学技報, A.P. 80-50, (1980).
- (5) Fang, D. J., Tseng, F. and Calbit, T. O.: A low elevation angle propagation measurement of 1.5 GHz satellite signals in the Gulf of Mexico, IEEE Trans. Antennas Propag., Vol. A.P-30, 1, pp. 10-15, (1982).
- (6) Schweikert, R. et al.: Channel measurement and data transmission via the real and stored maritime satellite channel (MARISAT), DFVLR Internal Report NE-NT-T-26/80, (1980).
- (7) Beckmann, P. and Spizzichino, A.: The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces, Pergamon Press, (1963).
- (8) 吉川, 小園, 細矢: 高仰角における海上伝搬実験報告, 信学技報 A. P 79-89, (1979).
- (9) 唐沢, 堀川: 海事衛星通信における海面反射フェージングの解析, 信学論 (B), J 64-B, 5, pp. 467-468, (1981).
- (10) Karasawa, Y. and Shiokawa, T.: Characteristics of L-band multipath fading due to sea surface reflection, IEEE Trans. Antennas Propag., Vol. A.P-32, 6, pp. 618-623 (1984).
- (11) Kinsman, B.: Wind waves, their generation and propagation on the ocean surface, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, (1965).
- (12) Sandwell, D. T. and Agreen, R. W.: Seasonal variation in wind speed and sea state from global satellite measurements, J. Geophys. Res., Vol. 89, No. C2, 2041-2052, (1984).
- (13) 能沢: 新しい海洋気象学, 成山堂書店 (1978).
- (14) Hogben, N. and Lumb, F. E.: Ocean wave statistics, London Her Majesty's Stationary Office, (1967).
- (15) Barrick, D. E.: Rough surface scattering based on the specular point theory, IEEE Trans. Antenna and propagation, Vol. A.P-16, (1968).
- (16) Smith, B. G.: Geometrical shadowing of a random rough surface, IEEE Trans. Antennas Propag., Vol. A.P-15, (1967).
- (17) 堀川, 唐沢, 結城: 海面反射フェージング軽減方式の海洋実験報告 (I), 信学技報 A.P 83-10, (1983).