

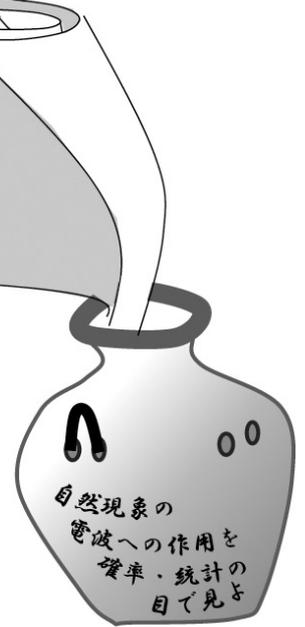
# 衛星伝搬の壺

## 第4講

### 海面反射フェージング：反射波は光の道を通して

電気通信大学名誉教授  
唐沢 好男

本シリーズでは衛星回線の電波伝搬に焦点を絞り、種々の伝搬現象のメカニズムやモデリングの壺を解説している。第4講では、海上移動通信の低仰角運用時に問題になる海面反射フェージングを取り上げる。この影響を受けるのは船舶や航空機と言った限られた対象ではあるが、陸上と海上を結ぶ通信、海や湖を挟んだ地上系の通信とも共通部分が多い。フェージングの原因となる反射波は海面状態によって異なる姿を見せる。強いフェージングはどのような海面状態でおきるのでしょうか。



#### 海面反射フェージングとは

電波の海面散乱には後方散乱と前方散乱の二つのタイプがある。後方散乱は海洋レーダのように放射した電波が海の波に反射して自局に戻ってくる散乱を言い、前方散乱は衛星通信のように前方から飛来する電波の散乱を言う。本講の海面反射フェージングは図1に示す前方散乱が対象になる。

海面に波が無く鏡面のような状態であれば、反射波は海面上の正規反射点（鏡面反射点）方向から到来する。この反射波は直接波との位相関係が幾何学的に定まるのでコヒーレント成分（位相同期成分）と呼ばれる。コヒーレント成分の強さは、波高の増加と共に指数関数的に弱くなる。これに対して、海が荒れてくると広い範囲から多数の散乱波が到来する状態となり、受信信号の振幅や位相は不規則に変動する。この変動成分はインコヒーレント成分（位相非同期成分）と呼ばれる。

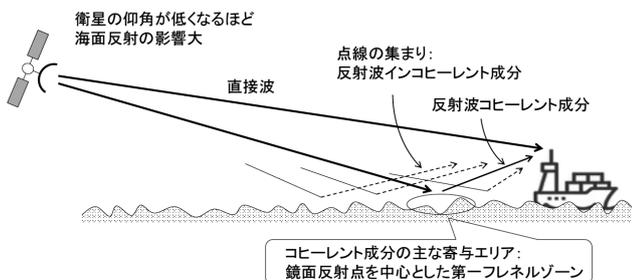


図1 船舶を対象とする衛星通信の海面反射フェージング（低仰角運用において反射波のコヒーレント成分とインコヒーレント成分が直接波成分に干渉し信号強度の変動が起きる）

衛星電波の受信信号（振幅と位相の変動を表す複素数表示の信号）の振幅  $r$  は、図2に示すように、直接波信号成分（振幅： $r_D$ 、位相： $0$ ）、反射波信号のうちのコヒーレント成分（ $r_C, \phi_C$ ）、インコヒーレント成分（ $r_I, \phi_I$ ）の3成分の和となり、次式で表される。

$$r(t) = \left| r_D + r_C e^{j\phi_C(t)} + r_I(t) e^{j\phi_I(t)} \right| \quad (1)$$

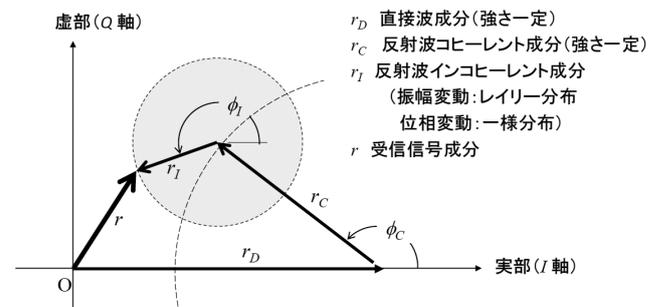


図2 海面反射フェージング受信信号の成分分解

コヒーレント成分は振幅一定で、かつ、アンテナ位置や衛星仰角によって幾何学的に決まる位相  $\phi_C$  をもつ。インコヒーレント成分は不規則信号の特徴である振幅  $r_I$  がレイリー分布、位相  $\phi_I$  が  $0^\circ \sim 360^\circ$  の一様分布となる。ゆえに受信信号強度の確率分布は“2定常波 + 1不規則波”の分布になる。海が穏やかなときはコヒーレント成分が強いが、波が高くなるとインコヒーレント成分が主体になる。反射波がインコヒーレント成分のみになると、受信信号の確率分布は伸上・

ライス分布（“1 定常波 + 1 不規則波” の分布）になる。

図3はインド洋上の衛星電波を受信しながら、太平洋を西に向かって進んでいるときの海面反射フェージングの記録である。衛星仰角は船の航行と共に3°から4°へと徐々に変わっている。このときの海面はかなり穏やか（波高が40cm～60cm）でコヒーレント成分がやや強い状態になっている。図には数時間の周期を持つ大きなうねりとそれに重畳する短周期の変動が見える。このうねりは、衛星仰角変化に伴うコヒーレント成分の位相 $\phi_c$ の変化によるものである。図でaは図2の $\phi_c=180^\circ$ （直接波成分と逆相）、bは $0^\circ$ （同相）付近になっている。インコヒーレント成分の平均強度は図の範囲でほぼ一定であるが、aでは、信号強度の平均値が下がっているところにインコヒーレント成分が加わっているので変動幅自体も大きくなっている。単純に、海が穏やかか荒れているかだけでは語れない難しさがあると理解してほしい。

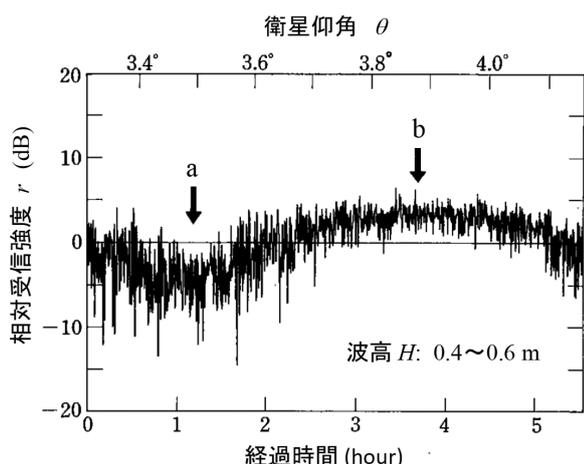


図3 穏やかな海面上を長時間航行したときの受信強度変化の様子（仰角の変化に伴うコヒーレント成分位相 $\phi_c$ の変化によりフェージングに大きなうねりが見られる）

コヒーレント成分は海面上の鏡面反射点を中心とする第1フレネルゾーン（各点からの反射波の位相が同相で到来する範囲）から来ている。一方のインコヒーレント成分はどのような広がりをしているのであろうか？これが体感できるよい例がある。見えない電波を目で見る試み、そう、図4に示す太陽光の海面反射である。太陽が低い位置にあるとき、あたかも光の道ができるような広がり方をする。なぜこのような帯状になるのかは図の左側説明部分（反射波が到来するために必要な面の傾きとその発生確率の関係）を見ていただきたいが、実際、散乱強度を理論解析してみると、その等高線は大体こういう形になるのである [1]。

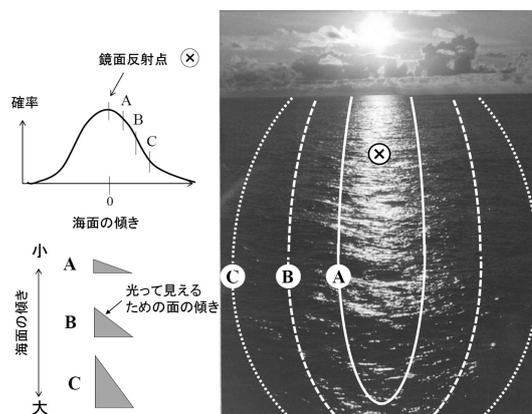


図4 太陽光の海面反射（太陽高度や海の荒れ方によってパターンは変化するが、電波の散乱パターンの目安になる）

### 地上回線と衛星回線

海面反射フェージングは、衛星通信以前にも地上系無線回線に多くの測定データがあった。その経験から、フェージングは穏やかな海面で問題になるとされていた。しかし、1970年代後半、海事衛星通信の試験運用が始まってみると、むしろ少し荒れた海の方がフェージングは強いようだとの報告が上がってきた。地上回線とは何が違うのだろうか。

地上回線ではインコヒーレント成分の最大電力はコヒーレント成分の最大電力の半分程度以下とされていた。図5は海面の反射係数で正規化した反射波の電圧次元の強度を、波高に比例する海面の粗さを表す粗面係数  $g = (\sigma_h / \lambda) \sin \theta$  [単位は無次元] を横軸に示している。 $\sigma_h$ は海面高変化の標準偏差 [m]、 $\lambda$ は電波の波長 [m]、 $\theta$ は海面への入射角（水平面となす角）である。同図の破線が地上系で測定されたインコヒーレント成分の強さである。この図から、インコヒーレント成分電力 ( $P_I$ : 図の振幅の2乗値) は最大でもコヒーレント成分電力 ( $P_C$ ) の半分程度にしかならない。ゆえに、フェージングはコヒーレント成分が強い静かな海面で問題になっていたわけである。

衛星回線について理論モデルを立て、インコヒーレント成分を求めてみると、図5の「衛星系」と示す線まで発達することがわかった [1]。衛星回線では散乱面が帯状に長く広がっていて、散乱波が全部集まると、コヒーレント成分に匹敵する大きさになるのである。その結果、両電力の和には、次式に示すように、海面状態によらず一定という性質（エネルギー保存則）が見られるのである。

$$P_I(g) + P_I(g) \approx P_C(0) \quad (g < 0.25) \quad (2)$$

低仰角衛星通信回線では、両成分の電力和に保存側が成立している

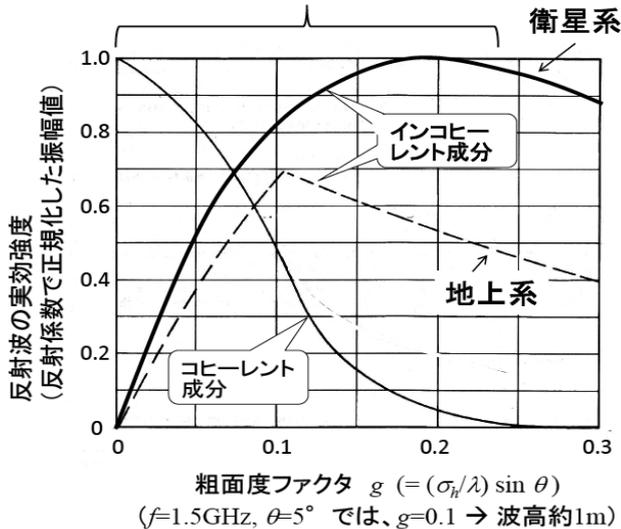


図5 反射波コヒーレント成分とインコヒーレント成分強度 (反射係数と反射点方向のアンテナ利得の積で正規化した実効振幅値；衛星系以外の図は CCIR Rep. 1008, 1990 より)

### フェージングの深さと海面状態

回線設計においては、大きなフェージングが発生する海面状態を把握することが大事になる。海面からの反射波の性質は受信点におけるインコヒーレント成分位相のばらつきの大きさにより決まる。この位相のばらつきの標準偏差  $\sigma_\phi$  [単位：ラジアン] は、粗面係数  $g$  に比例し、おおよそ  $4\pi g$  で与えられる。海面の状態は波高  $H$  (専門用語で“1/3 有義波高”) で表されるが、 $\sigma_\phi$  と  $H$  には  $H \approx 4\sigma_\phi$  の近似関係がある。整理すると次式である。

$$\sigma_\phi \approx 4\pi g \approx \pi(H/\lambda)\sin\theta \quad (3)$$

図5に見られるように、波が低いうちはコヒーレント成分強く、波高の増加と共に、コヒーレント成分が指数関数的に弱くなる一方で、インコヒーレント成分が発達してくる。粗面係数  $g$  が 0.15 (すなわち  $\sigma_\phi$  が 2) を超えるようになると反射波はほぼインコヒーレント成分のみになる。直接波も反射波もアンテナの主ビーム内に入射する場合、すなわち、ビーム幅の広い低利得のアンテナを低仰角の通信に用いる場合、おおよその意味で、式(2)のエネルギー保存則が満たされる。インコヒーレント成分電力  $P_I$  を正確に求めるには、海面全体にわたる反射波電力の数値積分計算が必要になって容易ではないが、コヒーレント成分電力  $P_C$  が簡易な式で計算できるため、(2)式により、 $P_I$  もその

概略値が算定できる。

では肝心の疑問、フェージングはどの海面状態で大きくなるのであろうか。円偏波による衛星通信の低仰角運用を想定すると、海面の反射係数は 0.5 に近い。この値と式(2)の関係を使って累積確率 1% の減衰値 (これより悪くならない確率が 99% の値：以後、この値を“フェージングの深さ： $f_d$ ”と呼ぶ) を調べてみよう。確率分布の理論計算値は図2のモデルで求められる。以下の3つの状態：

- ① 海面が完全鏡面状態 ( $H=0$ 、 $P_C$  のみ、位相  $\phi_c$  は  $0^\circ \sim 360^\circ$  で一様分布)
- ② コヒーレント成分とインコヒーレント成分がほぼ同等、 $\phi_c$  は  $0^\circ \sim 360^\circ$  で一様分布 (図3の全体を見たイメージ)
- ③ インコヒーレント成分が十分発達した状態

その結果はフェージングの深い順に

- ② (10dB)  $\approx$  ③ (10dB)  $>$  ① (6dB)

である [1]。三つを比べると②、③の状態、すなわち、コヒーレント成分とインコヒーレント成分がほぼ等しくなるあたりからインコヒーレント成分が十分に発達した状態で強いフェージングになることが分かる。

図6は、アンテナ利得 15dBi、仰角  $5^\circ$  におけるフェージングの深さ  $f_d$  の理論推定値を周波数と波高に対して示している [2]。フェージングの深さそのものは、波高が同じでも、波の傾きの分布によって幅を持つので、数値はあくまで目安値である。図より、大きなフェージングの発生は、一定の波高範囲に収まり、周波数の増加と共に、波高の低いほうに偏ってくるのが分かる。2GHz以下の周波数帯では、波高 0.5 ~ 2m 程度の海面状態でフェージングは最も大きくなる。

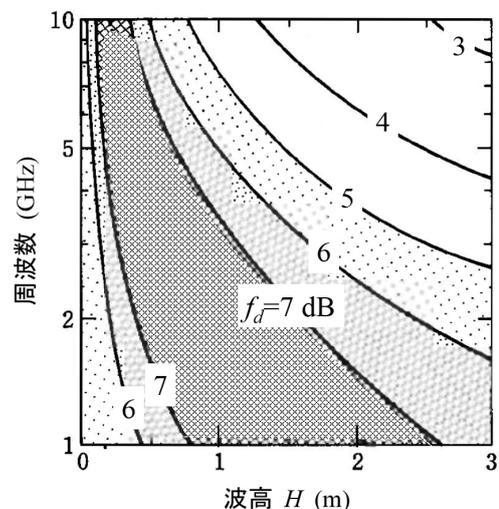


図6 海面状態および周波数に対するフェージングの深さ (円偏波、衛星仰角  $5^\circ$ )

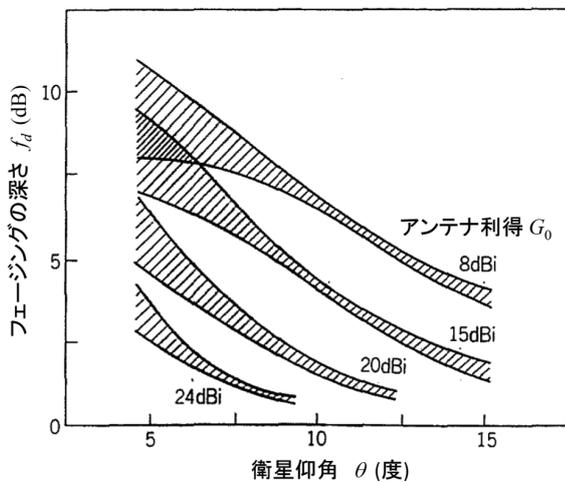


図7 アンテナ利得と衛星仰角に対するフェージングの深さ (円偏波、図6の最大値付近)

図7は、上述の③の状態（インコヒーレント成分が十分発達した状態）におけるフェージングの深さをアンテナ利得  $G_0$  と衛星仰角  $\theta$  に対して示している [1]。衛星回線における海面反射フェージングは、ビーム幅が広い低利得アンテナを低仰角で用いるときに問題になることが理解できると思う。

なお、現行の海面反射フェージングの計算法 (ITU-R の勧告手法 [3]) は式(2)の考え方を基本とするモデル [4] に基づいた計算手法が採用されている。

### ✎ 航空機のフェージング

ここまでは船舶に対する海面反射に絞ってその特徴を述べてきたが、海の上空を移動するものとして飛行機やヘリコプタ、ドローンなどがある。航空機の場合は、海上を高度 10,000m、時速 1,000km (凡そマッハ 1) 程度での移動が想定される。伝搬現象としての海面反射フェージングは船舶と同様のメカニズムになるが、フェージングの特性には若干の違いがある。海面反射フェージングを船舶の場合と比較すると

- ① フェージングの深さは飛行機の高度と共に徐々に小さくなる (地球の丸さの影響が現れてくる)
- ② 高速移動により、フェージングの変動速度が速くなる (ドップラー広がりが大きくなる)
- ③ 高高度飛行により、直接波と反射波のパス長差が大きくなる (遅延広がりが大きくなる)

具体的な数値は、周波数や進行方向と電波到来方向の角度関係などに依存するため、ここでは概念的な説明にとどめる。

また、航空機は海の上ばかりでなく陸上も飛行する。

その場合は大地等（植生や地上構造物など）の反射によるフェージングが起きる。測定によって、海面、平坦大地（水田等）、市街地、山岳地の順でフェージングが小さくなることが調べられている。航空機に対するフェージングの一般的な性質や実測データについては [5],[6] にまとめられている。

ティータイム

#### 海面反射研究の思い出

この海面反射フェージングは、筆者が KDD に就職し、研究所で最初に取り組んだ研究テーマであるので、思い入れ・思い込み・思い出のいずれも強い。電波の海面反射を肌で知りたいと思い、新婚当時の女房と西伊豆旅行によく出かけた。夕方になると海岸に行き、夕日の写真を撮り続け、女房からは「何しにきたの」とあきれられた。でも、そのお陰で、電波に対する海面反射のイメージを掴むことができた (図4)。

理論研究と並行して、洋上での衛星電波受信によるフェージング観測やフェージング軽減対策の効果確認のため、2週にわたる洋上実験を何回か行った (図3、図8)。船の掟 (船長さんのプライド) は出航時刻の厳守。切羽詰って綱渡りのように進めた実験準備、船酔いの苦痛に耐えての実験遂行、でも、海が穏やかなときは皆で釣りも楽しんだ非日常的な経験は心に深く刻まれ、今でも時々夢に出る。このようなスケールの大きいフィールド実験ができたのもプロジェクトリーダーであった塩川孝泰博士 (現東北学院大学名誉教授) のリーダーシップのお陰であった。

海面反射フェージングの研究を通じて、不思議を解明することへのワクワク感を味わった。研究の喜びである。硬い研究論文にも自分の気持ちは込められる、これからの人生、これで行こうと思った。



図8 洋上実験に備船した東海大学丸二世号 (701トン) (右上: フェージング軽減機能を組み込んだショートパッチファイアアンテナ; 左上: 船内の測定機器と塩川博士)

#### <参考文献>

[1] Y. Karasawa and T. Shiokawa; "Characteristics of L-band multipath fading due to sea surface reflection," IEEE Trans. on Antennas & Propagation, vol. AP-32, no. 6, pp. 618-623, 1984.

[2] 唐沢好男他, "海事衛星通信における海面反射フェージングの波高及び周波数依存性," 信学論 (B-II), vol. J72-B-II, no. 4, pp. 133-141, 1989.

[3] ITU-R, "Propagation data required for the design of Earth-space maritime mobile telecommunication systems," Rec. P.680-4, 2022.

[4] Y. Karasawa and T. Shiokawa; "A simple prediction method for L-band multipath fading in rough sea conditions," IEEE Trans. on Communication, vol. COM-36, no. 10, pp. 1098-1104, 1988.

[5] 安永正幸他, "航空衛星通信におけるマルチパスフェージング特性," KDD R&D, no. 144, pp. 45-53, 1990. <http://www.radio3.ee.ucc.ac.jp/kokueisei.pdf>

[6] ITU-R, "Propagation data required for the design of Earth-space aeronautical mobile telecommunication systems," Rec. P.682-4, 2022