

# 航空衛星通信における マルチパスフェージング特性

安 永 正 幸\*      唐 沢 好 男\*\*  
塩 川 孝 泰\*\*

Multipath Fading in Aeronautical Satellite Communications

By

Masayuki YASUNAGA : R&D Management Division Engineering Department  
Yoshio KARASAWA and Takayasu SHIOKAWA :  
Applied Radio Systems Group R&D Laboratories

The effect of multipath fading due to sea and ground surface reflection is severe problem in aeronautical satellite communication systems using a low G/T terminal operated at low-elevation angle.

This paper presents the theoretical model of sea reflected waves, taking account of the spherical effect of earth which becomes more significant with increasing the altitude. Using this model, characteristics of sea reflected multipath fading are shown comparing with results obtained by the field experiments aboard a helicopter. Measured results of the ground reflected multipath fading are also described for several geographical features of reflected area. As a result, the theoretical estimates have a good agreement with the experimental ones. The depth of ground reflected multipath fading is almost equal to or less than that of sea reflected multipath fading.

## 1. ま え が き

衛星を介した航空機・地上間通信（航空衛星通信）は海事衛星通信に続く移動体通信として近年特に注目され、そのサービスインも真近なものとなっている。インマルサット（国際海事衛星機構）では、グローバルな航空衛星通信の実現に向けて、システム構成の検討や、航空機搭載用通信機器の標準化作業を進め、そのSDM<sup>(1)</sup>（システム定義マ

ニュアル：System Definition Manual）を1987年6月に発出し、現在ほぼシステム導入への最後の調整段階に入ったところである。

ところで、航空機に搭載されるアンテナは、現在のところ、電話級サービスに対して10～15dBi程度、低速データ通信では0 dBi程度の利得を有するアンテナが検討の対象となっている。このような低利得アンテナを用いる場合には、アンテナのビーム幅が広いため、海事衛星通信と同様、低仰角運用時に海面からの反射波と衛星からの直接波の干渉によるマルチパスフェージング（以下、

\* ネットワーク開発本部開発部 研究開発課

\*\* 研究所 無線応用グループ

海面反射フェージングと呼ぶ)が発生し、その影響を受けて回線品質が低下するという問題がある<sup>(2)</sup>。航空機は船舶に比べてその航行速度や高度が非常に大きいため、航空衛星通信における海面反射フェージングは海事衛星通信とは異なった性質を呈するものと考えられる。さらに、航空機は海上だけでなく、陸上も飛行するため、大地での反射によるマルチパスフェージング(以下、大地反射フェージングと呼ぶ)も発生する。したがって、航空衛星通信システムの回線設計やフェージング軽減方式の検討を行う際には、これらのマルチパスフェージングの性質を定量的に把握することが重要である。

航空衛星通信における海面反射フェージングに関しては、これまでも理論や実験的に検討を行った幾つかの報告がある<sup>(3)</sup>が、システム設計への適用を考慮して、その性質を論じたものはあまりない。また、地形や反射係数等の取扱いが難しいため、大地反射フェージングについては、その性質を検討した報告は皆無といえる。

本稿は航空衛星通信における海面反射および大地反射フェージングの性質についてまとめたものである。まず、海面反射フェージングに関して、アンテナ高度とともに大きくなる地球の丸みの影響を考慮した理論モデルを導出する。次に、ヘリコプターを用いて行ったフィールド実験<sup>(2)</sup>の概要を示し、本実験で得られた結果と海面反射フェージングの理論モデルによる特性との比較を行う。さらに、大地反射フェージングについては、反射点の地形とフェージングの大きさとの関係、海面反射フェージングとの対比等を、実験結果を基に考察を行う。

## 2. 海面反射フェージングの理論モデル

筆者らは、先に海事衛星通信を対象とした海面反射フェージングの諸特性を推定する理論モデルを提案し<sup>(4)</sup>、幾つかのフィールド実験<sup>(5)</sup>により得られた結果との比較を通じて、本モデルが実際のフェージングの性質を良く評価できることを明らか

にした。

上記モデルは海面の平均レベルが無限平面であると仮定して導出されている。航空衛星通信の場合には、飛行高度、すなわち海面からのアンテナ高度が高いことから、地球の丸みによる影響を考慮する必要がある。以下、地球の丸みを考慮した反射波モデルを導出する。

図1はここでの解析に用いる座標系を示している。図において、航空機は高度 $H_p$ の $P$ 点を飛行しているとし、衛星、航空機および地球の中心は同一平面( $y-z$ 平面)上にある。また、衛星仰角を $\alpha$ とする。さらに、 $\theta_i$ は海面上の点 $Q$ における衛星電波の入射角であり、 $\theta_s$ 、 $\phi_s$ はその点から航空機方向への角度である。

海面反射フェージングは衛星からの直接波と海面からの反射波との干渉により発生する。一般に、海面からの反射波は二つの成分から構成される。すなわち、波が少なく穏やかな海面状態で支配的となるコヒーレント成分と、荒れた海面状態で卓越するインコヒーレント成分である<sup>(3)</sup>。前者の成分は海面が鏡のように滑らかなになるほど反射波に

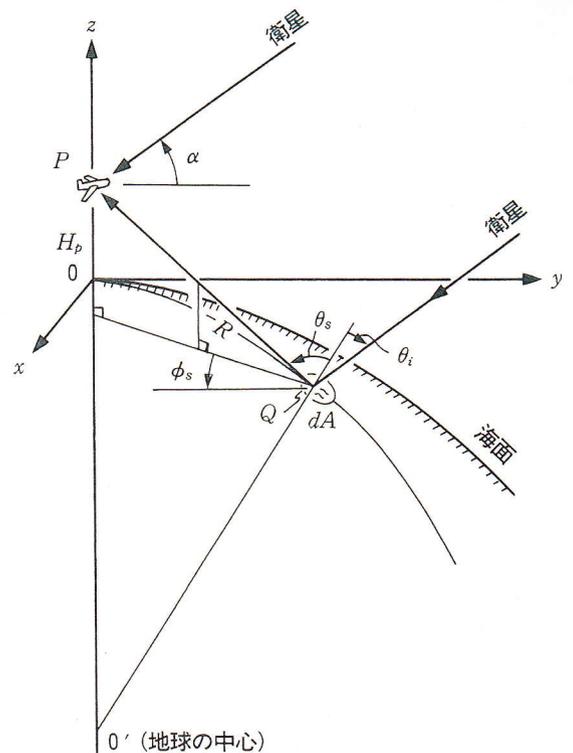


図1 座標系

### 3. 実験の概要

特に低仰角運用時でのマルチパスフェージングの性質を実験的に評価するため、ヘリコプターを用いたフィールド実験を実施した<sup>(2)</sup>。

フィールド実験は1987年3月および1988年3月の二度にわたり実施した。図2は、本フィールド実験の実施場所を示している。1回目の実験は、衛星仰角が5～6°となる紀伊半島海上においてインド洋上のインテルサットV号衛星(63°E)からのLバンド電波(1,537.5MHz)を受信して行った。2回目は、千葉県銚子沖海上および関東平野上空で実験を行い、仰角が9～10°となるマリサット衛星(73°E)からの電波(1,541.5MHz)、および仰角が2°程度となる上記インテルサット衛星からの電波を受信した。本実験では、ショートバックファイアアンテナ(SBF, 利得 $G_0=15.5$ dB, 電力半値幅: 32°)、9素子マイクロストリップアレーアンテナ<sup>(8)</sup>(MSA,  $G_0=15$ dB, 32°)および円形パッチアンテナ(CPA,  $G_0=7$  dB, 90°)の3種類のアンテナを使用した。

写真1は実験に使用したヘリコプターの写真である。写真に示すように、MSAおよびSBFはヘリコプターの進行方向に直交する向きを正面とし、それぞれがヘリコプターの左右の側面に設置され、窓越しに衛星電波を受信している。また、CPAはヘリコプターの進行方向(ほぼ北あるいは南)に応じて設置場所を左右に変えて測定した。ヘリコプターは衛星仰角が一定となる方向に進路をとり、かつその機首方向を衛星方向と直交する方向に常に向けて飛行した。機首方向は常に±2°以内の精度で制御されていること、およびヘリコプターの動揺が少ないこと(ローリングが±2°以内)から、衛星追尾や動揺補償は行わず、各アンテナともそのメインビームは衛星方向に固定した。ヘリコプターの飛行高度としては、100m, 1,000m, 3,000mおよび5,000mを選定し、各高度において、種々の速度(300km/h以下)での飛行を行った。

実験当日の海面状態は1回目および2回目で、それぞれ波高が1～2m, および1m程度であり、

占める割合が大きくなり、鏡面反射成分とも呼ばれる。一方、後者の成分は、海面の色々な点で反射された電波が合成されたものであり、その強度はランダムに変動する。

コヒーレント成分の強度 $E_c$ は次式で良く近似できることが知られている<sup>(6)</sup>。

$$E_c = |D\Gamma G_c| \exp(-u^2/2) I_0(u^2/2) \dots\dots(1)$$

ここで、 $I_0$ は0次の変形ベッセル関数、 $G_c$ は衛星方向の利得を基準とした鏡面反射点方向の相対アンテナ利得、 $D$ は地球の丸みによる反射波の拡散係数、 $\Gamma$ は正旋円偏波入力に対する海面の正旋円偏波成分の反射係数である<sup>(7)</sup>。

また、 $u$ は海面の状態を表すパラメータ(roughness factor)であり、次式で与えられる<sup>(4)</sup>。

$$u(\theta_i, \theta_s) = kH(\cos\theta_i + \cos\theta_s)/4 \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 $k$ は自由空間の波数、 $H$ は有義波高\*(以下、単に波高と呼ぶ)である。波高が大きくなると、 $u$ が2以上になると、コヒーレント成分はほぼ無視できる。Lバンド(1.6/1.5GHz)電波において、 $u$ が2以上となる荒れた海面状態は、仰角5°では波高 $H$ が1.4m以上、仰角10°では0.7m以上に相当する。

一方、インコヒーレント成分の平均電力 $P_i$ は、海面全体(面積 $A$ )からの反射電力を総和したもので、以下のように与えられる。

$$P_i = \frac{1}{4\pi} \iint_A \frac{1}{R^2} \sigma_0(\theta_i, \theta_s, \phi_s) G_I^2 dA \dots\dots\dots(3)$$

ここで、 $R$ は海面上の反射点 $Q$ と受信点 $P$ の間距離、 $G_I$ は衛星方向のアンテナ利得で規格化した反射点 $Q$ 方向の相対利得、また、 $\sigma_0$ は単位面積当たりの平均散乱断面積であり、海面の傾度偏差 $\beta_0$ 、衛星仰角等に依存して変化するものである。

\* 波高は基本的な波の上に種々の小さな波が重畳した合成波である。一般に、波高は基本波の隣り合う山と谷の高さの差、波長は山と山(あるいは谷と谷)の長さでそれぞれ定義される。有義波高は上記波高の上位1/3を取って平均したもので、目視によって観測された波高とよく合うことが知られている。本稿では有義波高を単に波高と呼んでいる。一方、波高と波長の比は波形勾配と呼ばれ、波の険しさを表すパラメータである。式(3)の平均散乱断面積の算出に用いられる海面の傾度偏差 $\beta_0$ と波形勾配 $\delta$ の間には近似的に $\beta_0 = \pi\delta/\sqrt{2}$ の関係がある。

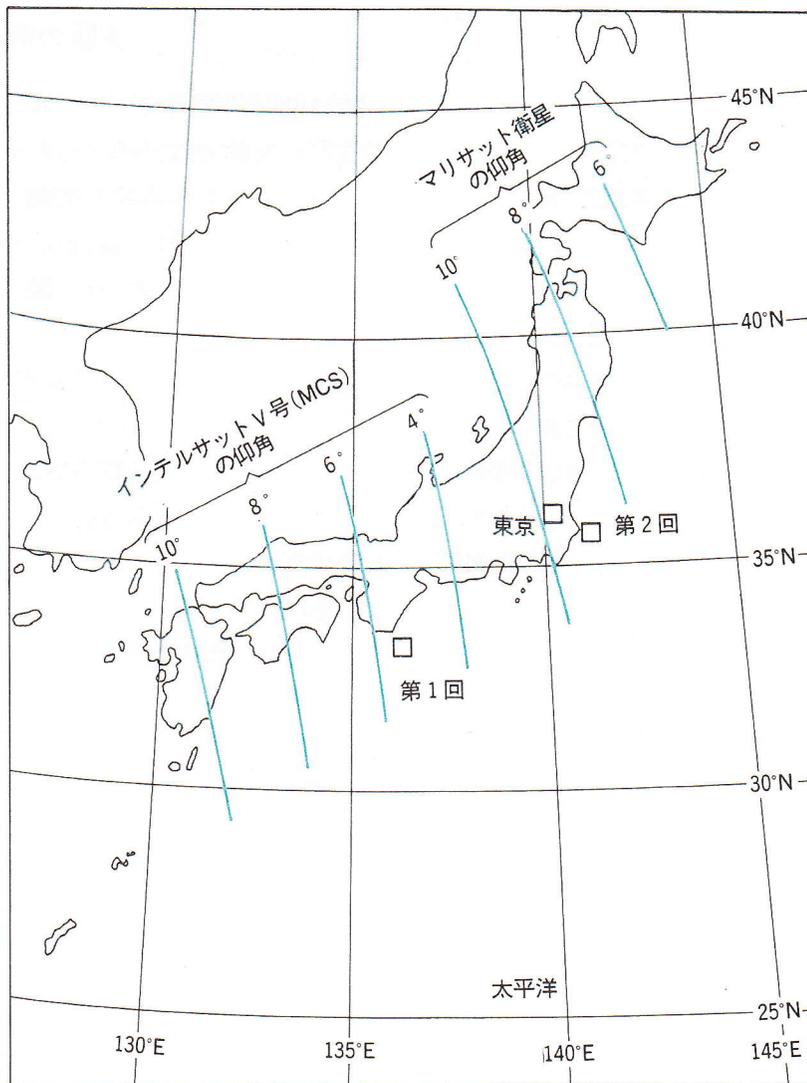


図2 実験場所

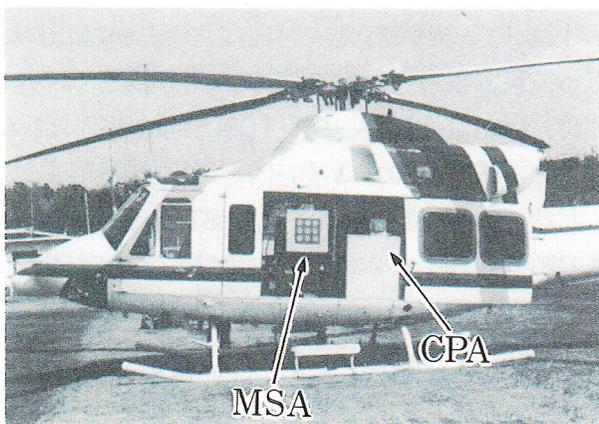


写真1 実験で使用したヘリコプター

Lバンド電波においては、インコヒーレント成分が卓越する状態とみなすことができる。

#### 4. 海面反射フェージングの性質

##### 4.1 フェージングの深さ

海面反射フェージングを受けた全受信強度 $E$ はコヒーレント成分、およびインコヒーレント成分に直接波を加えた3波モデルで表され、任意の時間率におけるフェージングの深さをこのモデルを用いて算出することができる。

図3は各飛行高度における時間率99%におけるフェージングの深さ(99%フェージング値)をCPAおよびMSAで受信した場合について示したものである。図において○は実測値である。衛星仰角 $5.5^\circ$ 、波の傾度偏差 $\beta_0 = 0.04 \sim 0.07$ (荒れた海面状態ではほぼこの範囲にある)における99%フ

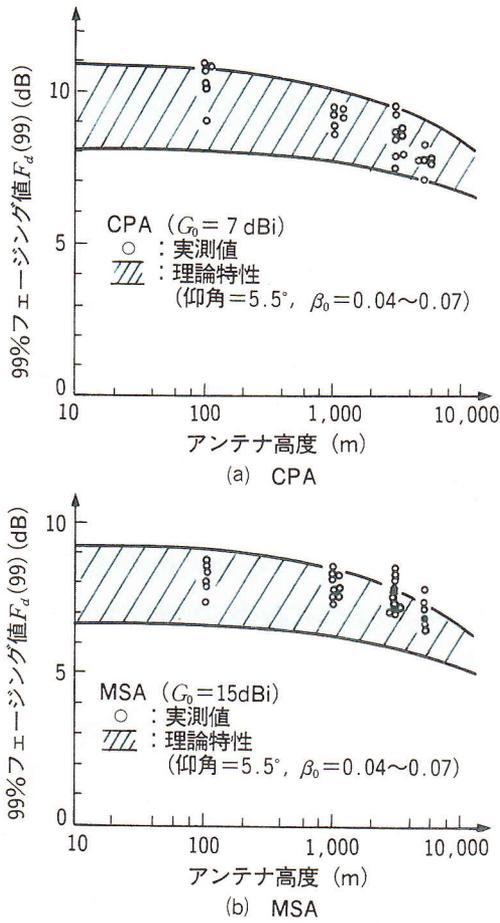


図3 99%フェージング値の高度特性

フェージング値の理論特性を斜線で示した。同図から明らかなように、実測値にはある程度ばらつきがあるものの、理論モデルで推定した値とよく一致している。また、フェージングの深さは高度とともに減少する傾向がある。高度が高くなるとともに、地球の丸みの影響が大きくなり、特に、水平線に近い領域で、海面でいったん反射した電波がアンテナに届く前に他の波によって遮蔽される確率が高くなるのが一つの理由である。しかしながら、高度1万m程度となる航空衛星通信においても、海事衛星通信における99%フェージング値(アンテナ利得15dBiにおいて7~9 dB)からの低下量はたかだか2 dB程度であることが分かる。

図4は、高度5,000mにおける仰角対99%フェージング値特性を各種アンテナ利得 $G_0$ について示したものである。同図から、仰角5°における99%フェージング値は、アンテナ利得が7 dBi, 15dBiに対して、それぞれ7~9 dBおよび5.5~7 dBと

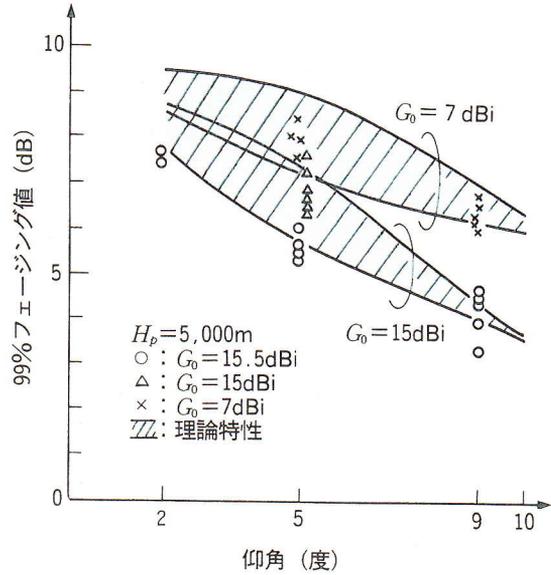


図4 99%フェージング値の仰角特性

推定される。

#### 4.2 フェージングの変動周期

デジタル移動衛星通信における変復調装置の設計やビット誤り分布の検討の際にはフェージングによる信号レベルの変動周期を把握しておく必要がある。その変動周期は、衛星仰角、航空機の飛行方向や速度、さらには海面の波の進む速さ等に依存する。フェージングの変動周期はその周波数スペクトルから推定でき、以下各種飛行状態における周波数スペクトルについての検討結果を示す。

図5は水平飛行時において、飛行速度 $V_p$ が300 km/hおよび150km/hであるときのフェージングのスペクトルの理論値と実験値を比較して示したものである。この図から、理論特性と実験値は周波数の高い領域を除いてはよく一致しており、相対電力レベルが-10dBとなる周波数(以下、-10 dB帯域幅と呼ぶ。フェージングの変動周期はほぼこの周波数以下とみなせる)は $V_p$ が300km/hのとき約7 Hz, 150km/hでは約4 Hzとなっており、-10dB帯域幅は飛行速度にほぼ比例することが分かる。

図6は、ヘリコプターが速度約200km/hで高度5,000mから下降したときのスペクトルであり、実

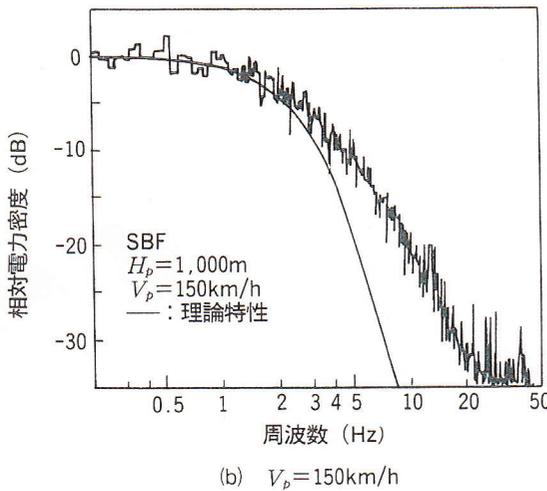
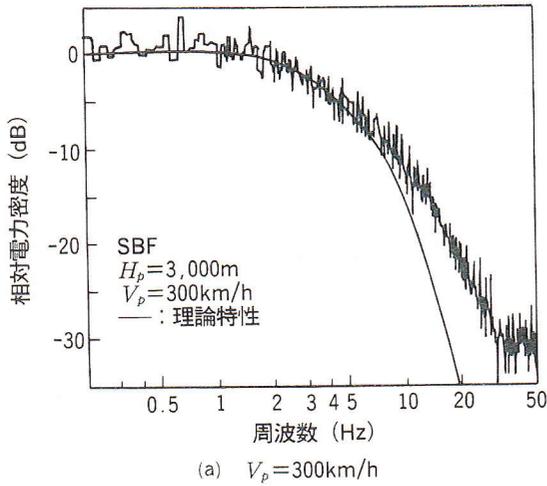


図5 海面反射フェージングのスペクトラム (水平飛行)

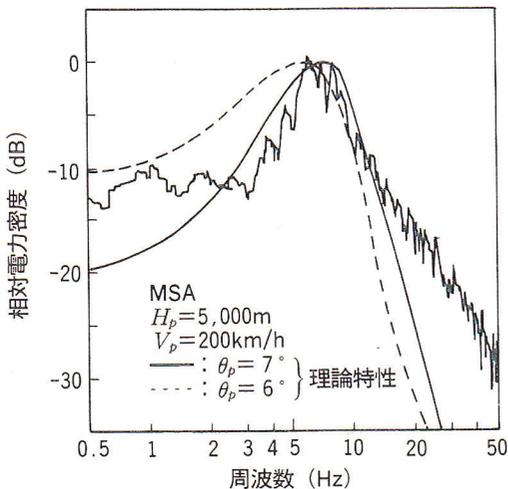


図6 フェージングのスペクトラム (下降時)

線および点線はそれぞれ下降する角度 $\theta_p$ を $7^\circ$ および $6^\circ$ と仮定したときの理論特性である。航空機がある程度大きな角度で上昇あるいは下降する場合には、特定の周波数成分が主体となるフェージングが発生する。これは、衛星からの直接波に対するドップラシフトによる周波数偏差と海面反射波に対する周波数偏差との差が大きくなるためであり、その差がほぼピークの周波数となる。

### 4.3 周波数相関特性

図7は、アンテナ高度と相関周波数の関係を示す理論特性である。ここで、相関周波数とは周波数が異なる2波の信号強度の相関係数が $1/e (= 0.37)$ となる最低周波数差で定義される<sup>(9)</sup>。同図には、コヒーレント成分の相関周波数特性(実線)およびインコヒーレント成分の特性(点線)を仰角 $5^\circ$ および $10^\circ$ について示している。信号帯域幅が相関周波数より大きい小さいかによって、信号に与えるフェージングの影響が異なってくる。大きい場合には、信号帯域内でフェージングの性質が異なる、いわゆる周波数選択性フェージングとなる。逆に小さい場合にはフラットフェージング

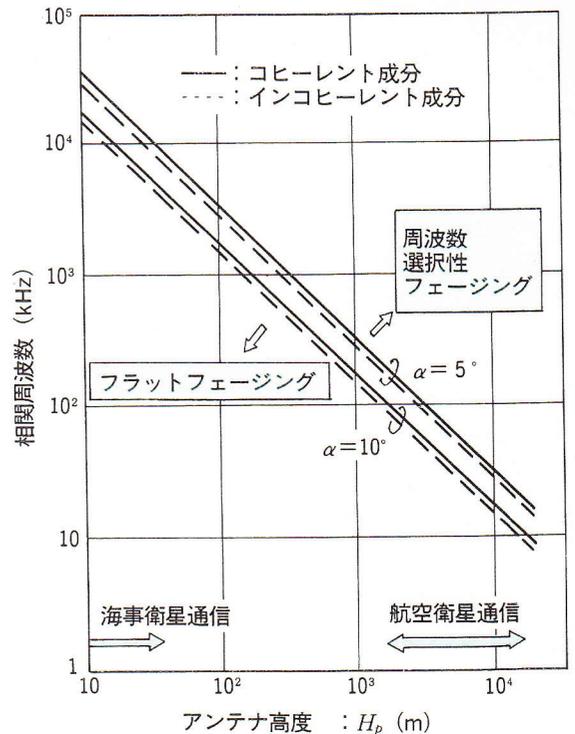


図7 アンテナ高度と相関周波数の関係

表1 航空および海事衛星通信の海面反射フェージングの比較

			航空衛星通信		海事衛星通信	
アンテナ高度 (例)			10,000m		15m	
仰 角			5°	10°	5°	10°
99%フェージング値 <sup>1)</sup>	アンテナ利得	6dBi	6.9~8.7dB	6.0dB	8.2~11.2dB	7.0dB
		10dBi	6.5~8.3dB	5.2dB	7.9~10.9dB	6.2dB
		15dBi	5.4~6.9dB	3.3dB	6.8~9.7dB	4.2dB
フェージングの変動周期 <sup>2)</sup>			15~50Hz (水平飛行) 25~100Hz ( $\theta_p=5^\circ$ で上昇, 下降)		0.3~5 Hz	
相関周波数	コヒーレント成分		30kHz	16kHz	22MHz	11MHz
	インコヒーレント成分		27kHz	14kHz	18MHz	9.2MHz

(注) 1) 荒れた海面状態における値

2) 仰角 5°~10°

グとなる。この点を考慮すると、図7から、フェージングの周波数特性に関して以下の点が明らかとなる。

① 海事衛星通信では、相関周波数は数十MHz程度である。通常、信号帯域は数十kHz以下であるので、この場合はフラットフェージングとなる。一方、送信と受信の周波数は100MHz程度離れているため、送信波と受信波が受けるフェージングにはほとんど相関がないこととなる。

② 高度が1万mとなる航空衛星通信では、相関周波数は10~20kHz程度となる。このことは、航空衛星通信で信号帯域が20kHz程度の通信を行う場合には、周波数選択性フェージングとなる可能性があることを示唆している。

航空衛星通信および海事衛星通信における海面反射フェージングの性質を理論的に比較した結果を表1に示す。

### 5. 大地反射フェージング特性

海面の状態は式(2)で表されるパラメータ $u$ を用いて統一的に規定できるが、大地の場合には反射点の地形や反射係数が関係するため、その状態の取扱いは複雑となる。ここでは、ヘリコプターを用いたフィールド実験で得られた結果から、大地反射フェージングの大きさについて検討を加える。

図8は、ヘリコプターが仰角10°となる地点の陸上を飛行したときに、反射点方向の地形と対応する受信レベル変動を示している。なお、この地形図は見やすくするため、高さ方向を距離に対して10~100倍程度拡大してある。この図から、反射点方向の地形が、ビル街や山岳地帯の場合にはあまり大きなフェージングは発生しないが、反射点が平野部の場合には、上記の地形の場合に比べて大きなフェージングが発生していることが分かる。これは、前者の場合、反射波がビルや山で散乱あるいは遮蔽されやすくなるため、アンテナで受信される反射波強度が小さくなるからである。

表2は各種地形の上空を飛行したときの大地反

表2 測定点周辺の地形と99%フェージング値 (仰角10°, 利得15.5dBi)

地 形	市街地	平 野			山 岳	
高 度	300m	1,000m	3,000m	5,000m	1,000m	5,000m
フェージングの深さ	1.2dB	5.4dB	5.6dB	3.1dB	0.8dB	0.6dB

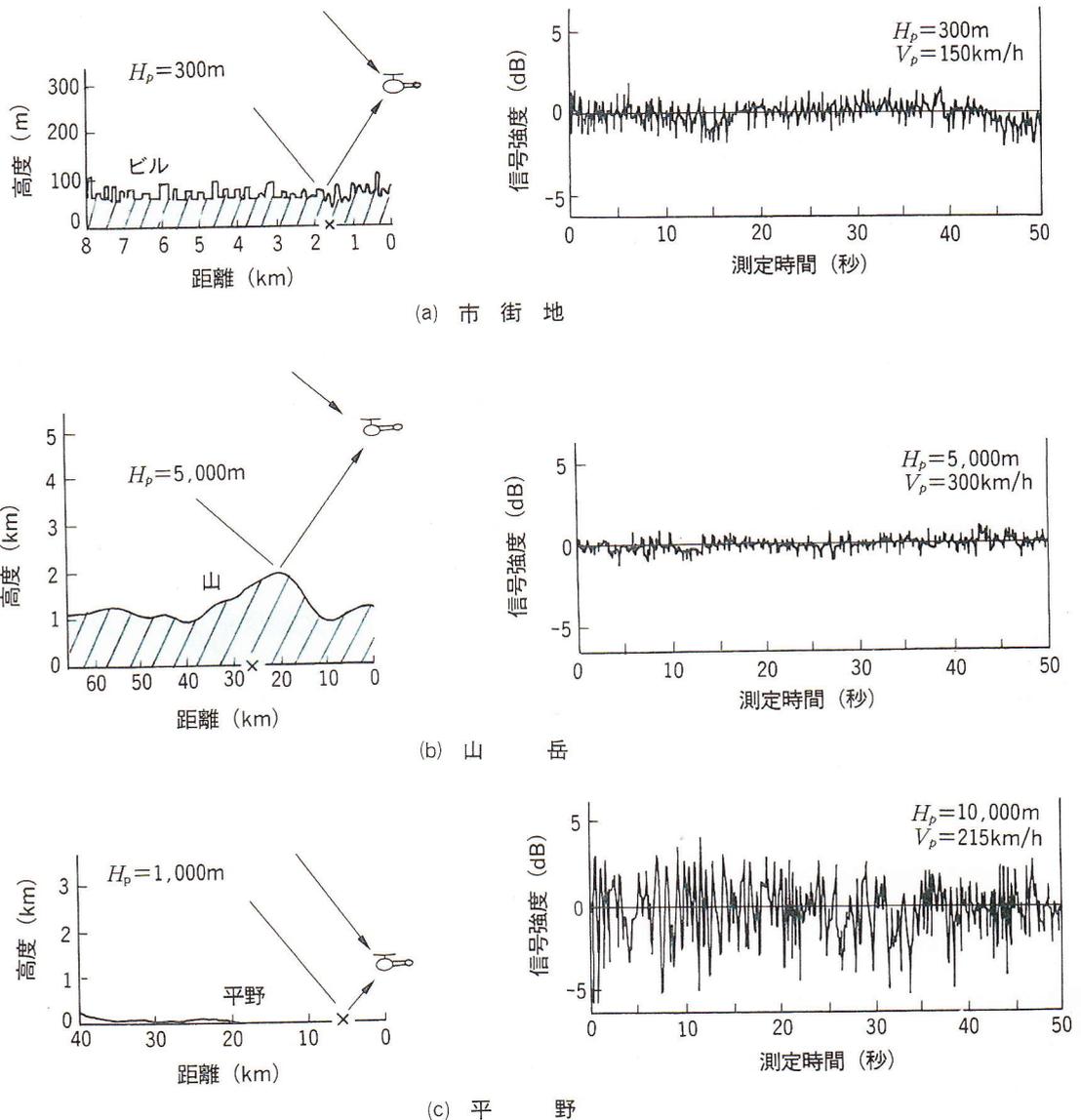


図8 反射点方向の地形とレベル変動  
(仰角10°,  $G_0=15.5\text{dBi}$ )

射フェージングの時間率99%における値を比較したものである。この表から、平野部の上空を飛行した場合、最も大きなフェージングが発生するが、飛行高度が高くなるとその大きさは減少していることが分かる。これは、高度が低い場合には主たる反射点が起伏の少ない平野部にあるが、高度が高くなるとともに、その反射点が遠方に移動し、平野部を飛行している場合でも遠くの山等の起伏のある地形の影響を受けたものと考えられる。また、最大のフェージング値を示す平野部の飛行においても、その値は5dB程度であり、これは、同一のアンテナ利得、衛星仰角における海面反射フ

エージングとほぼ同等の大きさである。したがって、海上および陸上を含めた航空衛星通信におけるマルチパスフェージングの大きさは、海面反射フェージングの大きさと評価しておけば実用上十分であるといえる。

## 6. あとがき

航空衛星通信における海面反射フェージングの性質を評価する理論モデルを示した。さらに、ヘリコプターを用いて行ったフィールド実験で得られた結果と理論モデルでの推定値の比較検討を行

った。また、大地反射フェージングの大きさについて、反射波方向の地形との関係について考察を加えた。その結果、航空衛星通信におけるマルチパスフェージングの性質として、以下のことを明らかにした。

- ① 荒れた海面状態での海面反射フェージングは飛行高度が高くなるほど小さくなる。仰角 $5^\circ$ で、飛行高度1万mにおける時間率99%のフェージングの大きさは海事衛星通信でのフェージングの大きさに比べて2 dB程度小さい値である。
- ② 海面反射フェージングの変動周期は仰角、飛行速度とともに増加する。仰角が $5^\circ$ から $10^\circ$ の範囲において、航空機が1,000km/hの速度で水平飛行する場合の変動周期は15Hzから50Hz程度であり、 $5^\circ$ 程度の角度で上昇あるいは下降する場合には、100Hz程度になる。
- ③ 海面反射フェージングの周波数相関係数は、飛行高度とともに減少し、高度1万mでは周波数が20kHz程度以上離れた2波では、フェージングによる強度変動の相関がほとんどなくなる。
- ④ 大地反射フェージングの大きさは反射点方向の地形によって大きく変化し、平坦な地形の場合に最も大きなフェージングが発生する。しかしながら、その場合でも、フェージングの大きさは海面反射フェージングの大きさとほぼ同等である。

ヘリコプターを用いたフィールド実験で得られた結果は、飛行高度が5,000m以下、飛行速度が300km/h以下に限定されたものであるが、本論文で提案した海面反射フェージングの理論モデルでの推定値とよく一致している。また、大地反射フェージングの大きさは海面反射フェージングに比べて同程度かあるいはそれ以下である。したがって、航空衛星通信におけるマルチパスフェージングの大きさは海面反射フェージングで評価しておけば実用上十分であり、ここでの理論モデルは航空衛星通信におけるマルチパスフェージングの性質を評価するうえで有効なものであるといえる。

本稿の検討では、衛星からの直接波や海面反射波が機体によって遮蔽されないことを仮定している。実際には、航空機へのアンテナ搭載位置によっては、機体や翼の影響により海面反射フェージングが小さくなる場合や、逆に機体からの反射によるマルチパスが発生する可能性もある<sup>(10)</sup>。アンテナの搭載位置をも含めた各種要因によるマルチパスフェージングの総合的な検討が今後の重要な検討課題と考えられる。

#### 参 考 文 献

- (1) INMARSAT : Aeronautical Satellite Communications System Definition Manual, ver.1.0(June 1987).
- (2) 安永, 唐沢, 松戸, 塩川 : 航空衛星通信における海面反射フェージング特性, 信学論 (B-II) Vol. J72-B-II, No.7, pp.297-303(July 1989).
- (3) 例えば, A. Neul, J. Hagenauer, W. Papke, F. Dolainsky and F. Edbauer : Aeronautical Channel Characterization based on Measurement Flights, Globecom'87 Conference Record, 3, pp.42.3.1-42.3.6(1987).
- (4) Y. Karasawa and T. Shiokawa : Characteristics of L-Band Multipath Fading due to Sea Surface Reflection, IEEE Trans. Antennas & Propag., AP-32, pp.618-623(June 1984).
- (5) Y. Karasawa, M. Yasunaga, S. Nomoto and T. Shiokawa : On-Board Experiments on L-Band Multipath Fading and its Reduction by Use of the Polarization Shaping Method, Trans. IECE Japan, E69, 2, pp.124-131(Feb. 1986).
- (6) C. I. Beard : Coherent and Incoherent Scattering of Microwaves from the Ocean, IEEE Trans. Antennas & Propagat., Vol. AP-9(Sept. 1961).
- (7) P. Beckman and A. Spizzichino : The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces, Pergamon, NY(1963).
- (8) 唐沢, 塩川 : Lバンドにおける海面反射フェージングの空間および周波数相関特性, 信学論 (B), J67-B, 12, pp.1347-1354(Dec. 1984).
- (9) M. Yasunaga, F. Watanabe, T. Shiokawa and M. Yamada : Phased Array Antennas for Aeronautical Satellite Communications, Fifth International Conference on Antennas and Propagation(March 1987).
- (10) 長谷, 若菜, 平良, 大森 : ETS-V衛星を用いた航空衛星通信実験, 信学論(B-II) Vol. J72-B-II, No.7, pp.276-284(July 1989).