

グライドパスに対する構造物・地形の影響について

藤 井 直 樹* 落 合 進 一* 川 田 輝 雄**

A Prediction of the Glide Slope Performance.

Naoki FUJII*, Shin-ichi OCHAI*, Teruo KAWADA**

Abstract

A major problem with Instrument Landing System (ILS) Glide Slope is the scattering effects of structures and uneven terrain, since the Glide Slope system always radiates horizontally wide UHF wave and utilizes its ground image.

In this paper a mathematical model based on physical optics is studied to predict the performance of the Glide Slope in the three siting problems; (1) with structure scattering, (2) with rough ground surface, and (3) with severe dropoff.

Comparisons of deviation currents are made between computed values and measured values, which were obtained in anechoic chamber test with a scale model of null-reference array and in flight tests with null-reference, quadrature and capture-effect types.

The results have yielded comparatively good agreement, whose relative error is $(-4 \pm 26) \%$ at maximum deviation current. This indicates that the mathematical model developed here can be applied for a prediction of the ILS Glide Slope performance.

* 航空施設部; Avionics Standards Division.

** 航空局 ; Civil Aviation Bureau.

1. はじめに

グライドパス (Glide Path) は、航空機の着陸進入時に進入降下路を示す ILS¹⁾ (Instrument Landing System) の構成要素であり、航空機に対して正規の降下角からの偏位を指示するための装置である。進入降下路であるパスは、UHF 帯 (329MHz~335 MHz) の連続 AM 電波を広域に放射することと、直接波と地面による反射との空間合成によって形成されることのために、送信アンテナ前方の構造物や地形の起伏の影響を受けやすい。このため設置場所や周辺地形などが適当でない場合には、パスの乱れが許容値 (CAT-I では 30 μ A)²⁾ を越え、十分な性能での運用が防げられることも少なくない。従って、グライドパスにおよぼす構造物や地形の影響を把握し、障害の程度を予測することは、運用に適した設置場所や送信方式の選定と、放射域内に新たに作られる構造物への事前対策を検討するために必要である。

グライドパスの乱れを予測する方法として、おもに物理光学的手法³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾ (Physical Optics) と幾何光学的手法⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾ (Geometrical Theory of Diffraction) が使われている。幾何光学的手法は、比較的単純な地形による影響の障害予測に適し、計算時間も短い。構造物による影響や複雑な地形による影響の障害予測には適用が難しい。物理光学的手法は、広い適用性があり、建物や鉄塔などの構造物による影響と地形の起伏による影響などの障害予測に使われるが、計算時間は長い。

構造物と地形の影響による障害を把握するために、実験を行い、適用範囲の広い物理光学的手法による予測計算と比較・検討を行った。実験は、基本的な予測計算に対する考え方を調べるための電波無響室における 9.6GHz (29分の1) のスケールモデル実験と、実際のグライドパスに対する構造物や地形による影響を調べるための空港における飛行実験である。飛行実験は 3つの空港で行われ、仙台空港においては構造物による影響を、千歳空港においては起伏のある地形による影響を、そして大分空港では送信アンテナ前方に段差がある地形による影響を調査した。本報告はこれらの実験結果と予測計算について述べる。

2. 予測計算について

グライドパスに対するパスの乱れを表す単位としては偏位電流 (I dev) の単位 μ A を用いた。一般に、

グライドパスでは、偏位電流と受信信号における 90 Hz 信号と 150Hz 信号の変調度の差 (DDM; Difference in Depth of Modulation) との間には次の関係がある。¹¹⁾

$$I_{dev} = \frac{150}{0.175} DDM \quad (1)$$

従って、予測計算においては先に DDM を求めることになる。今回の計算方法では、グライドパスから放射されるキャリア系信号、サイドバンド系信号とクリアランス系信号の各電界強度を求め、合成することにより DDM を計算する¹²⁾。

これらの電界を求める方法としては Kirchhoff-Huygens の原理に基づく物理光学的手法を用いる。すなわち、閉曲線 C を境界にもつ閉曲面 Γ を通って来る電波に対する、点 x における電界は、

$$E(x) = \frac{1}{4\pi} \iint_{\Gamma} (E(x')(\hat{n} \cdot \nabla) \phi - \phi(\hat{n} \cdot \nabla) E(x')) d^2S \\ + \frac{1}{4\pi} \int_C (E(x') \times \hat{t}) \phi dl \\ + \frac{j}{4\pi\epsilon\omega} \int_C (H(x') \cdot \hat{t}) \nabla \phi dl \quad (2)$$

ただし

$$\phi = \frac{\exp[-jk|x-x'|]}{|x-x'|} \quad (3)$$

と書ける¹³⁾。 x は面 Γ 上の点であり、 $\hat{n}$ は x' における面 Γ の x に向う方向の単位法線ベクトルであり、 $\hat{t}$ は閉曲線 C の単位接線ベクトルである。第 3 項は縦波成分を表していることから、閉曲線 C と受信点 x の距離が波長に比べて十分に大きいと考えられるときは除去できる。また、第 2 項は鏡面反射方向付近などの電界 $E(x)$ が極大値をとる領域においては、第 1 項に比べて十分小さくなるために無視する。ここで面 Γ と送信点 x_0 の距離が波長に比べて十分大きく送信電界を

$$E(r) = \frac{E_0(\hat{r}) \exp[-jkr]}{r} \quad (4)$$

と表わすことができる。とき、(2)式は次のように近似できる。

$$E(x) = \iint_{\Gamma} \frac{jkE_0(\hat{r}_1)(\cos \alpha + \cos \beta) \exp[-jk(r_1 + r_2)]}{4\pi r_1 r_2} d^2s \quad (5)$$

ただし

$$\begin{aligned} r_1 &= x' - x_0, & r_2 &= x - x' \\ r_1 &= |r_1|, & r_2 &= |r_2| \\ \hat{r}_1 &= r_1/r_1, & \hat{r}_2 &= r_2/r_2 \end{aligned}$$

$$\cos \alpha = \hat{n} \cdot \hat{r}_1, \quad \cos \beta = \hat{n} \cdot \hat{r}_2$$

反射の場合は、反射面に対するイメージ送信点か

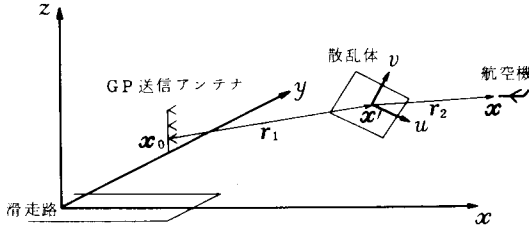


図1 座 標 系

ら反射面を通して電波が到達すると考えて反射電界を計算する。回折の場合は、回折面を通して到達するはずの電波が遮蔽されると考えて電界を計算する。

座標系としては図1のようにとる。全体の座標系としては (x, y, z) 系をとり、(5)式の位相項である $r_1 + r_2$ を散乱体表面の点 (u_0, v_0) において Taylor 展開するために、局所座標系 (u, v) 系を散乱体表面にとる。ここでは以下の三つの場合に分類し、Taylor

展開の必要な次数まで利用して近似計算を行い、受信電界を求めた。

2.1 構造物の場合

現用方式のグライドパスではパスを形成するために大地反射を利用しているの、一つの送信アンテナから航空機までの伝播経路には図2で示す二つがある。このうち大地の反射波による電界は、地表面に対するイメージによって計算する。構造物がある場合には散乱波が生じ、パスが乱れることになる。この散乱波の電界を計算するために次の近似を行う。(1)構造物によって生じる散乱波の伝播経路は図2に示す4経路である。(2)構造物の表面は1個または数個の長方形から成る。(3)送信アンテナから見える構造物の面でしか反射・回折が起きず、多重散乱の寄与はない。この3つの仮定に基づき、構造物表面を $2\Delta u_i$ と $2\Delta v_i$ であるような長方形 m 個に分割して、Taylor 展開の1次の項までとると、(5)式は

$$E(x) = \sum_{i=1}^m \frac{jE_0(\hat{r}_i) \cdot (\cos \alpha_i + \cos \beta_i) \sin[k(\cos \theta_{1i} - \cos \theta_{2i})\Delta u_i] \cdot \sin[k(\cos \varphi_{1i} - \cos \varphi_{2i})\Delta v_i]}{4\pi k r_{1i} \cdot r_{2i} (\cos \theta_{1i} - \cos \theta_{2i}) (\cos \varphi_{1i} - \cos \varphi_{2i})} \cdot \exp[-jk(r_{1i} + r_{2i})] \quad (6)$$

ただし

$$\cos \theta_{1i} = \hat{r}_{1i} \cdot \hat{u}, \quad \cos \theta_{2i} = \hat{r}_{2i} \cdot \hat{u}$$

$$\cos \varphi_{1i} = \hat{r}_{1i} \cdot \hat{v}, \quad \cos \varphi_{2i} = \hat{r}_{2i} \cdot \hat{v}$$

となる。添字に i が付いている記号は展開の中心における値である。構造物のある場合における受信電界は、パスを形成する図2の2経路による電界と、(6)式を使用する図3の4経路の散乱電界の合成として計算する。

2.2 地形の場合

2.2.1 空港が海岸にある場合

パス形成に必要な反射面としての平坦な土地が空港用地内しかとれない海岸にある空港では、反射面が狭いことと、海岸の段差によって回折したグライドパス電波が海面に反射しパスに干渉することによってパスに乱れが生じる。この場合における予測計算には図4で示すモデルを考える。航空機が海上にある時には、グライドパス電波は必ず段差の上空を通ることになるから、この段差の上空に面を仮定し、地表面に対する送信アンテナのイメージと海面に対する航空機のイメージを考慮に入れた4経路に対して(5)式を仮定した面に適用する。 u 方向として鉛直方向を、 v 方向として水平方向をとるが、大地に傾きがある場合には、傾いた方向に v 方向、その垂直方向に u 方向をとることとする。アンテナと航空機を結ぶ線と仮定した面の交点において2次まで展開すると、(5)式は

$$E(x) = \frac{(1+j)E_0(\hat{r}_{10})F(u_c) \cdot \cos \alpha_0}{\sqrt{2\pi(4AC-B^2)} \cdot r_{10} \cdot r_{20}} \cdot \exp[-jk(r_{10} + r_{20})] \quad (7)$$

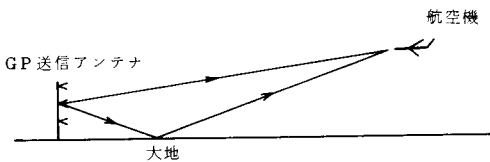


図2 パスを形成するため電波伝播経路

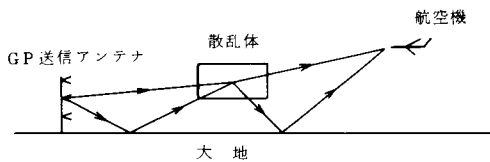


図3 パスに乱れを生じさず電波伝播経路

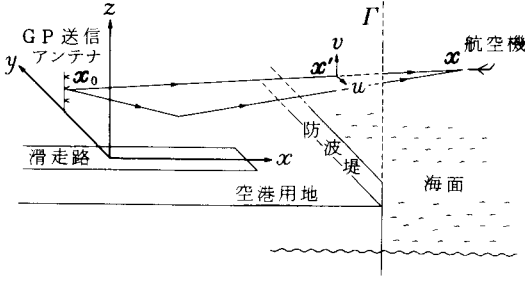


図4 空港の海岸の近くにある場合の電波伝播経路
(海面による航空機のイメージによる電波伝播経路を考えないとき)

ただし

$$F(x) = \int_x^\infty \exp[-jt^2] dt^2$$

$$A = \frac{\sin^2 \theta_{10}}{2r_{10}} + \frac{\sin^2 \theta_{20}}{2r_{20}}$$

$$B = -\frac{\cos \theta_{10} \cos \phi_{10}}{r_{10}} - \frac{\cos \theta_{20} \cos \phi_{20}}{r_{20}}$$

$$C = \frac{\sin^2 \phi_{10}}{2r_{10}} + \frac{\sin^2 \phi_{20}}{2r_{20}}$$

となる。 u_c は u 軸と大地または防波堤と交わる点の u 座標である。また添字₀の付いた記号は展開する点における値である。距離、角度などのとり方は、(5)式、(6)式と同様である。それぞれ経路ごとの電界を(7)式で計算し、4経路による合成電界として求めた。

2.2.2 送信アンテナ前方の地形に起伏がある場合

大地による反射を利用しているグライドパスでは、送信アンテナ前方に地形の起伏があるときにパスが乱れやすい。この場合における予測のために大地による反射波の電界を計算する。グライドパスが持つ、フレネルゾーンが x 軸方向に広がるために x 軸方向の地形の変化が、 y 軸方向の変化に比べて大きな影響をパスに与えやすいという特性から、図5に示す地形が一方方向にしか変化しないモデルを考える。この場合の座標系として、地形が変化する方向に u 軸方向、変化しない方向に v 軸方向をとる。そして、地表面を u 軸方向に $2\Delta u$ 、 v 軸方向には切断しない無限大の長さを持つ m 個の短冊に近似する。従って、大地による反射波の電界は

$$E(x) = \sum_{l=1}^m \frac{(1+j)E_0(\hat{r}_{1l})(\cos \alpha_l + \cos \beta_l) \sin[k(a - \frac{bB}{2C})\Delta u_l]}{4\sqrt{2\pi kC}(a - \frac{bB}{2C})} \cdot \exp[-jk(r_{1l} + r_{2l} - \frac{b^2}{2C})] \quad (8)$$

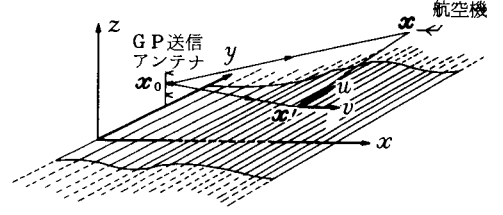


図5 送信アンテナ前方の地形に起伏がある場合

ただし

$$a = \cos \theta_{1l} - \cos \theta_{2l}$$

$$b = \cos \phi_{1l} - \cos \phi_{2l}$$

$$B = -\frac{\cos \theta_{1l} \cos \phi_{1l}}{r_{1l}} - \frac{\cos \theta_{2l} \cos \phi_{2l}}{r_{2l}}$$

$$C = \frac{\sin^2 \phi_{1l}}{2r_{1l}} + \frac{\sin^2 \phi_{2l}}{2r_{2l}}$$

となる。距離、角度などのとり方は、(5)式、(6)式と同様である。(8)式により計算した大地による反射波の電界と直接波との合成により受信電界を求める。

3. 実験方法

3.1 スケールモデル実験

電波無響室¹⁴⁾において、予測計算の基本的な考え方の適否を調べるために、9.6GHzのマイクロ波を使い約29分の1のスケールモデル実験を行った。装置は、中村ら⁵⁾の製作したローカライザー用の装置を、グライドパス用に改造した装置を使用した。図6に実験の概要を示す¹⁵⁾。実験は単純なナル方式グ

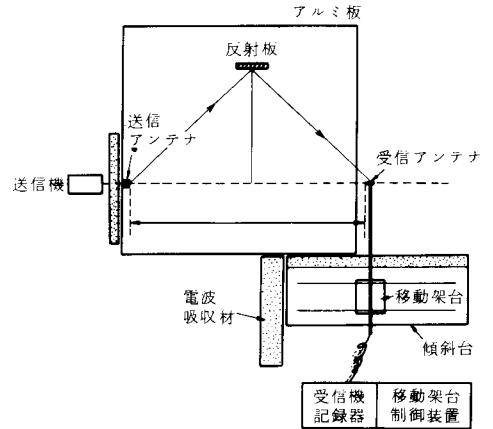
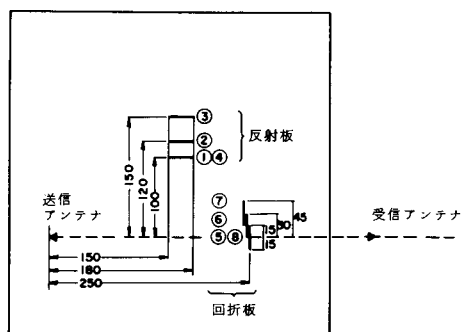


図6 スケールモデルの実験概略図



④,⑤は①④の位置で60°の傾を持つ

図7 反射板・回折板設置位置図

ライドパスを用い、大地にみたてた4.0 m×4.0 mのアルミ板の上に送信アンテナと障害物を置き、受信アンテナを、傾斜台上に置かれた木製の移動架台に取り付けて、グライドパス施設と航空機とした。大地とみたてたアルミ板が小さいことを補うために、スケールモデルのパス角を実際のパス角の約2倍の6.69度とし、パス幅を1.12度とした。障害物としては30.0 cm×15.0 cmのアルミ板を図7に示すように置き、構造物に対する予測計算と比較した。また、空港が海岸にある場合の予測計算と比べるために、2.0 m×1.0 mのアルミ板を3.5 cm持ち上げて大地反射面に、残されたアルミ板を海面にみたてて実験を行った。送信アンテナから段差までの距離を1.8 mに設定し、単純な段差しかない場合と、防波堤のある状態をモデル化した段差の上に高さ1 cmのアルミ板を取り付けた場合について実験を行った。また送信アンテナ前方の地形に起伏がある場合については、1.0 m×2.0 mのアルミ板の中央を高くし丘にみたてて実験を行った。その丘の高さは3.2 cmと7.5 cmである。

3.2 仙台空港飛行実験

構造物の影響に関する実用機材を使った実験を仙台空港で行った。グライドパスの方式としては、我国で採用されている、ナル方式、Mアレイ方式と二周波方式を使った。送信周波数は、ナル方式、Mアレイ方式と二周波方式のディレクショナル系には329.899MHz、二周波方式のクリアランス系には329.895MHzである。ナル方式においては、パス角3.0度、パス幅0.7度、送信出力950mWとした。Mアレイ方式においては、パス角2.95度、パス幅0.65度、ディレクショナル系の送信出力480mW、クリアランス系の送信出力80mWとした。また、二周波方式においては、パス角3.05度、パス幅0.65度、ディレク

ショナル系の送信出力900mW、クリアランス系の送信出力100mWとした。障害物としては、図8と図9で示す反射板、回折板と建造物模型を使い、実験した。反射板と回折板には、10 m×10 mの鉄枠に呼称網目16mmの金網を張ったものを二個合わせて幅20 m、高さ10 mの障害物とした。また、建造物模型には、10 m×10 mの鉄枠を3.7 mの高さに木枠で固定し、その表面に同じく呼称網目16 mmの金網を張った物を使用した。航空機が飛行の際に設定したパス角からずれることによって生じるみかけのパスバンドを、シネセオドライトを使用して、1秒間に1回の割合で機影を写真撮影することによって実際の進入角を測定し求めた。

3.3 大分空港飛行実験

空港が海岸にある場合のグライドパスに対する影響を調べる実験を大分空港において行った。運用中

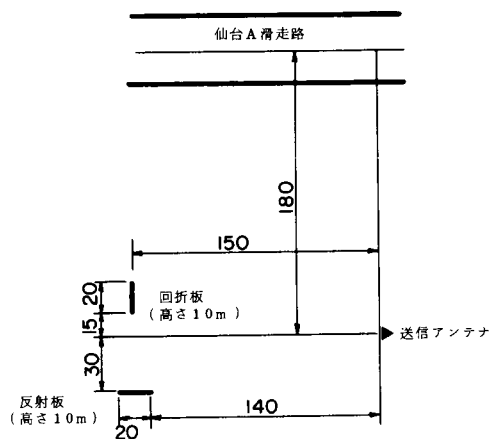


図8 仙台空港飛行実験、反射板・回折板設置位置図

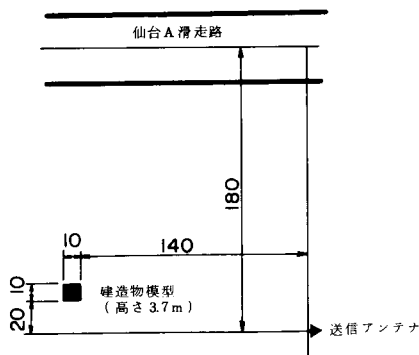


図9 仙台空港飛行実験、建造物模型設置位置図

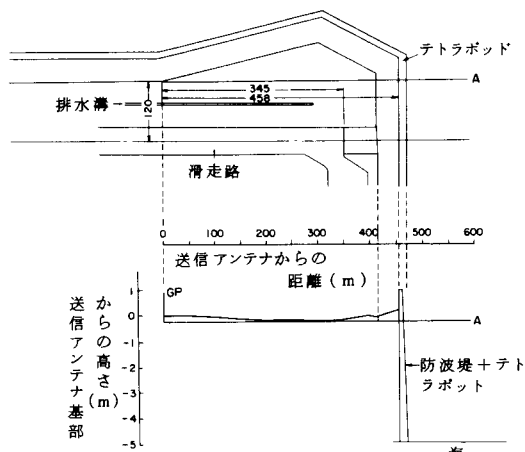


図10 大分空港グライドパス送信アンテナ前方地形図

の送信周波数332.9MHz、パス角3.0度、パス幅0.72度のナル方式グライドパスを使用し、図10に示す地形による影響を調べた。この空港の地形の特徴は、グライドパス送信アンテナ前方458mまでは空港用地内としての平坦な地形が続く、その先約20m間はテトラポッドが空港用地内より約1m高い高さまで積まれていて、さらに前方は空港用地内約5m低い海面となっている。また空港用地内の平坦な地形についても、細かくみると送信アンテナと滑走路との間に排水路があるために、排水路付近は送信アンテナ基部付近より0.3mから0.7mほど低くなっている、斜面を二つ合わせた浅いV字地形である。実験の方法は、シネセオドライトを使った仙台空港の実験と同じ方法である。

3.4 千歳空港飛行実験

グライドパス送信アンテナの前方に起伏がある地形による影響を調べる実験を、千歳空港において二周波方式グライドパスを用いて行った。送信周波数は、ディレクショナル系332.305MHz、クリアランス系332.297MHz、送信出力は、ディレクショナル系1.5W、クリアランス系135mW、パス角2.75度、パス幅0.70度とした。送信アンテナ前方の地形を図11に示す。送信アンテナから前方約400mまではほぼ平坦な台地であるが、約400mから約600mにかけては緩やかな標高差3mの下り坂、また約600mから約700mにかけては標高差5mの上り坂になっており、その先の約700m以遠は再び平坦な台地が続いている。実験方法は、ILS受信機でグライドパス電波を受信しながら、航空機が設定したパス角からずれることによるみかけのパスバンドをR.T.T.

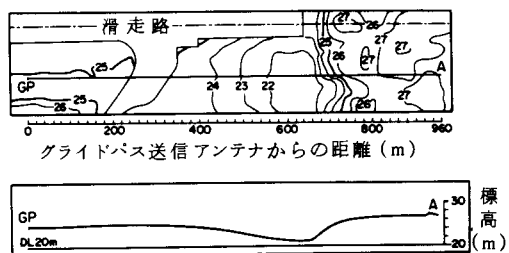


図11 千歳空港グライドパス送信アンテナ前方地形図

(Radio Telemetry Theodolite) を使って補正した。この方法は、セオドライトにより航空機を追跡して、その進入角とパス角との差を地上から航空機に対して、90Hz信号と150Hz信号との変調の差として送信し、機上においてグライドパスの受信信号と合成することにより、航空機のパス角からのずれを連続して補正する方法である。

4. 結果

4.1 構造物の場合

4.1.1 スケールモデル実験

電波無響室で行なった構造物の影響に関するスケールモデル実験の結果と予測計算結果を、図12から図19までに示す。実線が実験値であり、破線が計算値である。図12から図19までは図7における①から⑧までの位置に対する結果を順に示している。そのうち、図12から図14までは地面を模擬したアルミ板の上に反射板を垂直に立てた場合、図15は60度の傾斜をもつ反射板の場合、図16から図18まではアルミ板に回折板を垂直に立てた場合、図19は、回折板が60度の傾斜を持つために、反射と回折の二つの現象が現れる場合を示している。予測計算は実験結果とよく一致をしているが、図19の場合の反射の影響の現れる2.4mから2.6mまでの区間において計算値が実験値より小さな値となっていることは、計算において受信アンテナの垂直面におけるサイドローブを無視しているためである。

4.1.2 飛行実験

仙台空港で行った構造物の影響に関する飛行実験の結果と予測計算結果を、図20から図37までに示す。これらのうち偶数番の図には実験値を、奇数番の図には計算値を示した。偶数番の図において、実線は機上における偏位電流の測定値を示し、破線は航空機の進入角の変化を偏位電流に対応して示している

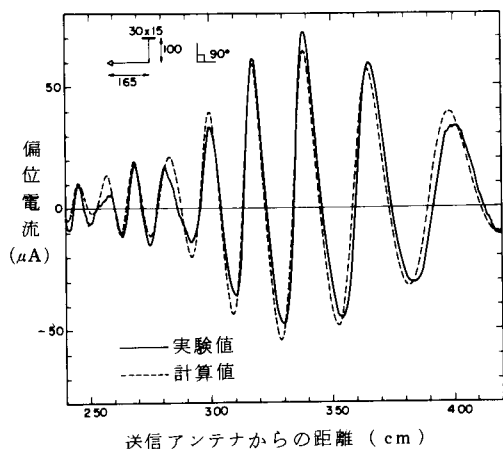


図 1.2 スケールモデル実験結果 (反射板①)

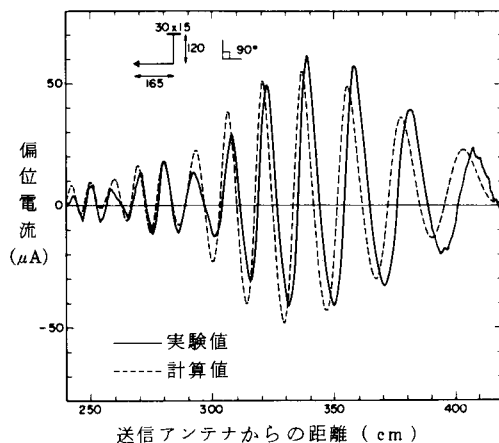


図 1.3 スケールモデル実験結果 (反射板②)

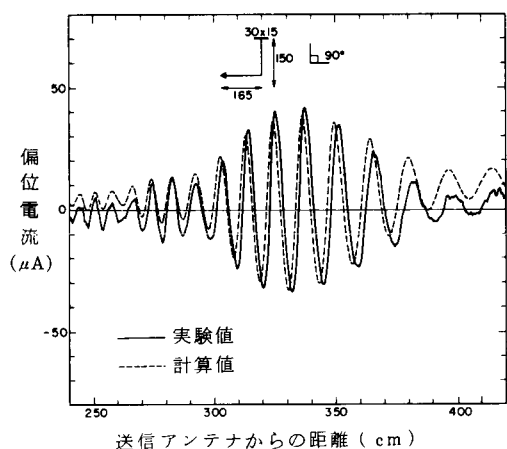


図 1.4 スケールモデル実験結果 (反射板③)

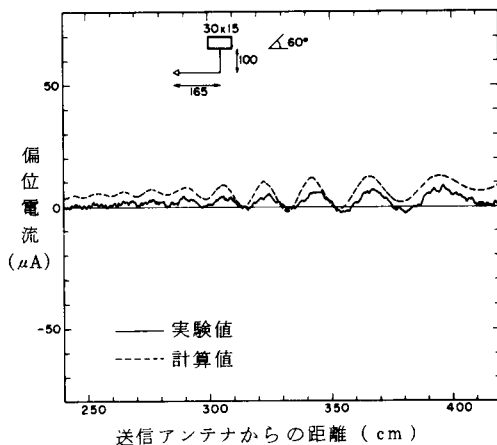


図 1.5 スケールモデル実験結果 (反射板④)

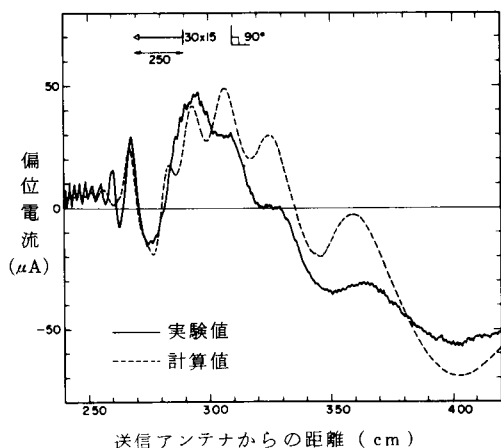


図 1.6 スケールモデル実験結果 (回折板⑤)

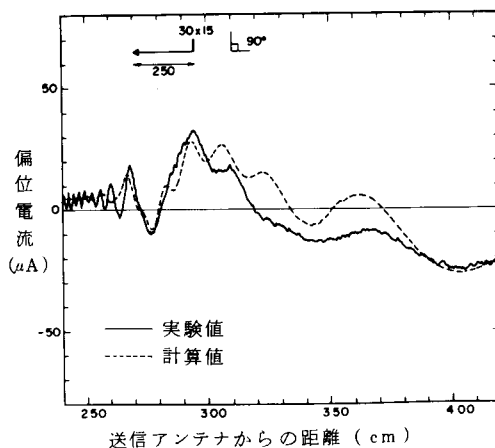


図 1.7 スケールモデル実験結果 (回折板⑥)

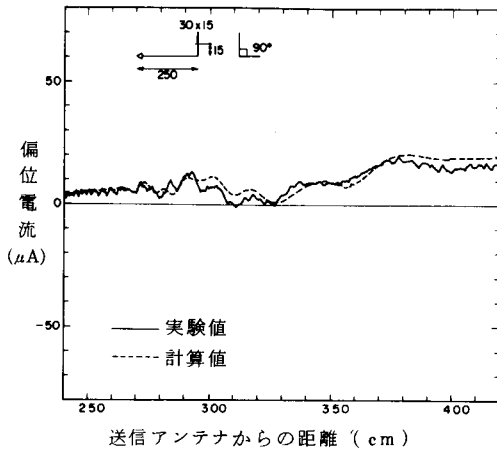


図 18 スケールモデル実験結果 (回折板⑦)

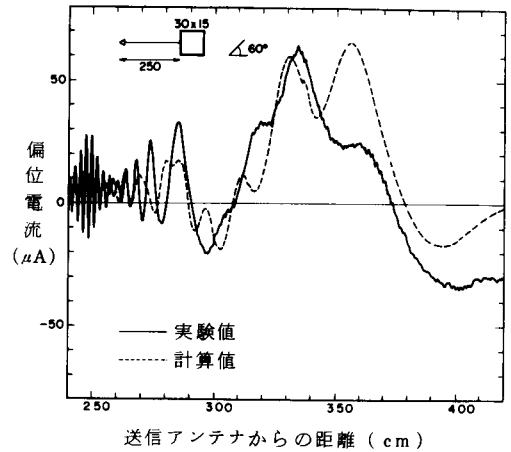


図 19 スケールモデル実験結果 (回折板⑧)

ので、実際のグライドパスの乱れは実線と破線の差となる。図20から図25までには、図8で示した反射板の場合の実験結果と計算結果を、ナル方式、Mアレイ方式、二周波方式の順に示している。計算値が実験に比べて大きくなっているのは、スキヤロップ

ング周波数に対する受信機の応答特性を考慮していないためである。また、図26から図31までは、図8で示した回折板の場合の実験結果と計算結果を、ナル方式、Mアレイ方式、二周波方式の順に示している。図26にみられるピークが2つに割れている現象

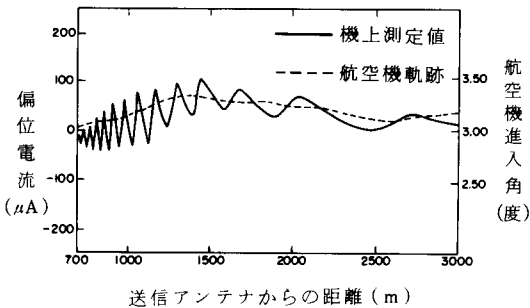


図 20 仙台空港飛行実験結果 (反射板, ナル方式)

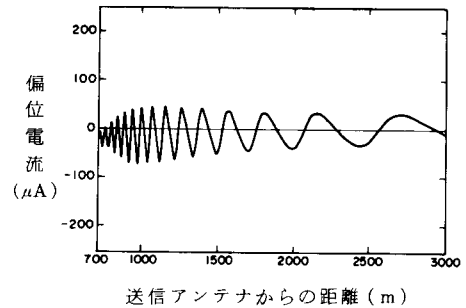


図 21 仙台空港飛行実験予測値 (反射板, ナル方式)

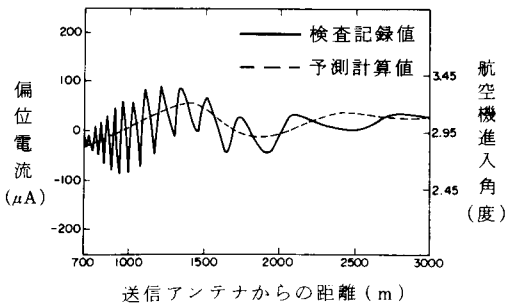


図 22 仙台空港飛行実験結果 (反射板, Mアレイ方式)

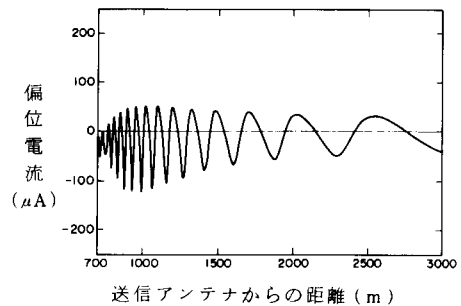


図 23 仙台空港飛行実験予測値 (反射板, Mアレイ方式)

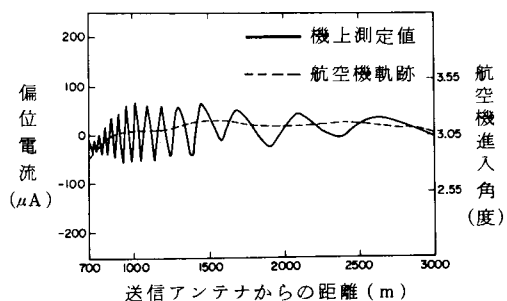


図 2.4 仙台空港飛行実験結果
(反射板, 二周波方式)

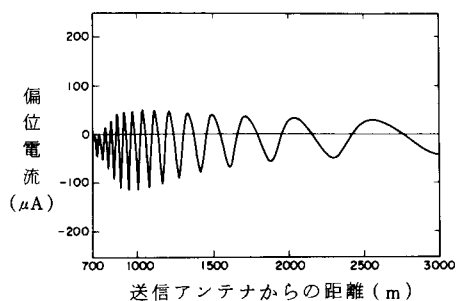


図 2.5 仙台空港飛行実験予測値
(反射板, 二周波方式)

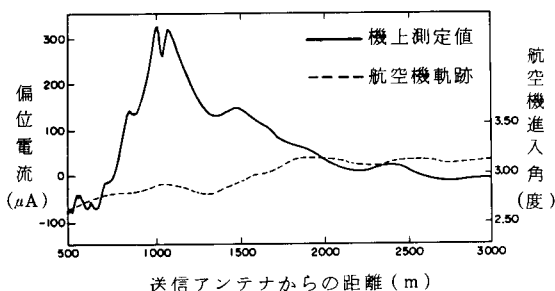


図 2.6 仙台空港飛行実験結果
(回折板, ナル方式)

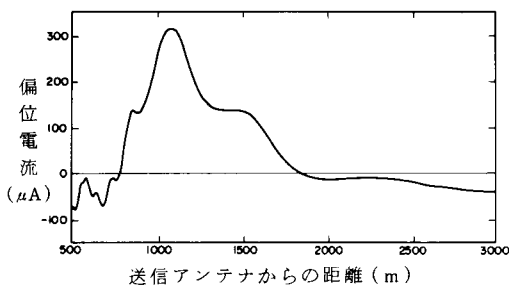


図 2.7 仙台空港飛行実験予測値
(回折板, ナル方式)

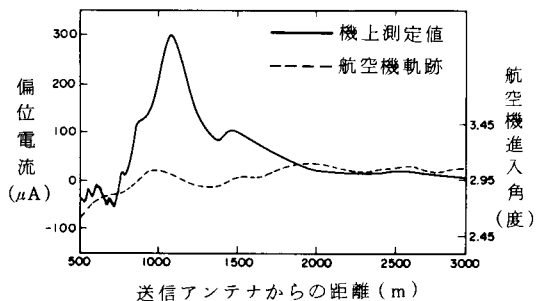


図 2.8 仙台空港飛行実験結果
(回折板, Mアレイ方式)

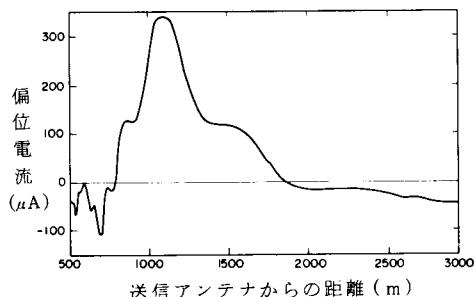


図 2.9 仙台空港飛行実験予測値
(回折板, Mアレイ方式)

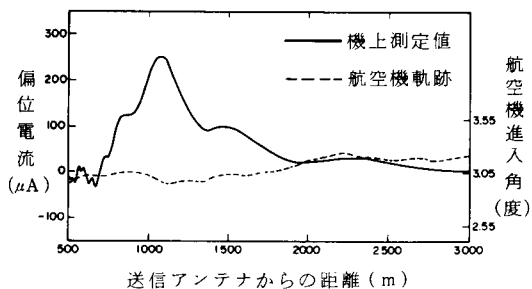


図 3.0 仙台空港飛行実験結果
(回折板, 二周波方式)

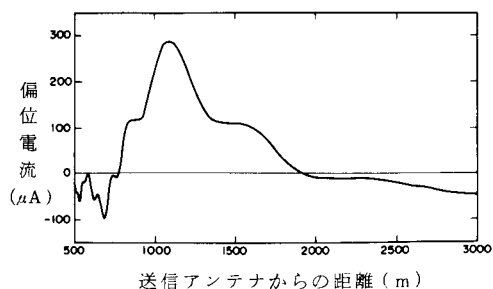


図 3.1 仙台空港飛行実験予測値
(回折板, 二周波方式)

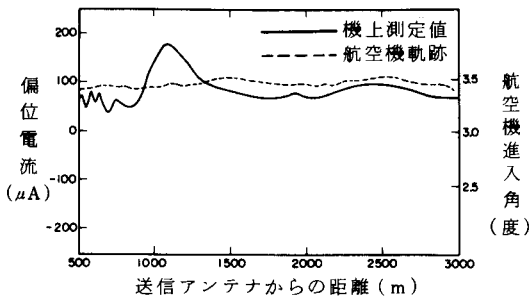


図 3 2 仙台空港飛行実験結果
(建造物模型, ナル方式)

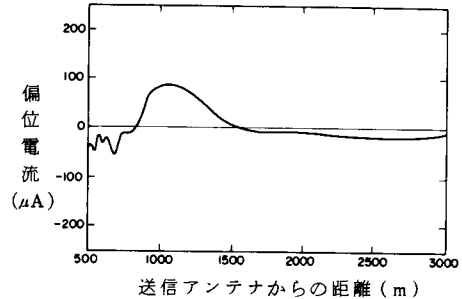


図 3 3 仙台空港飛行実験予測値
(建造物模型, ナル方式)

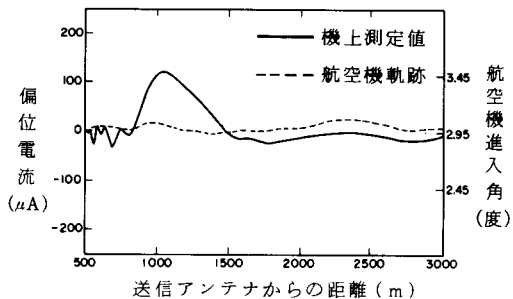


図 3 4 仙台空港飛行実験
(建造物模型, Mアレイ方式)

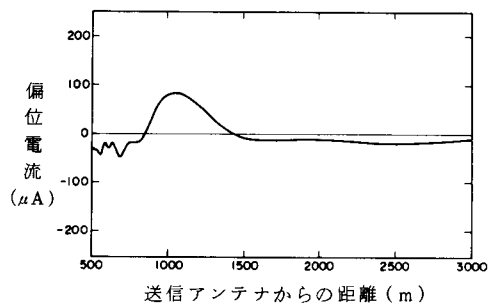


図 3 5 仙台空港飛行実験予測値
(建造物模型, Mアレイ方式)

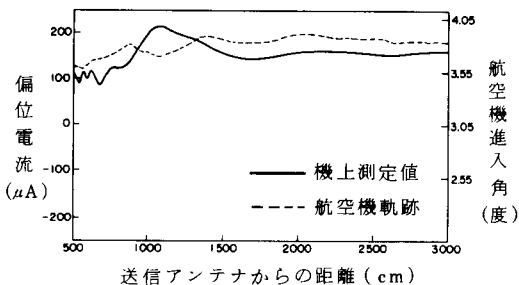


図 3 6 仙台空港飛行実験結果
(建造物模型, 二周波方式)

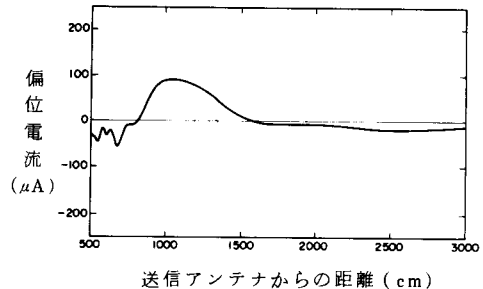


図 3 7 仙台空港飛行実験予測値
(建造物模型, 二周波方式)

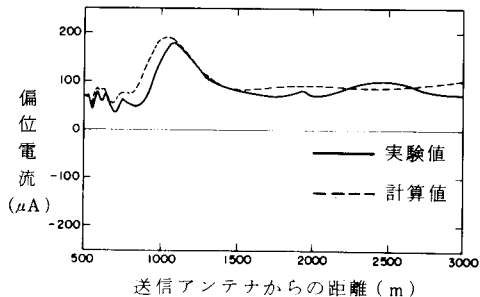


図 3 8 仙台空港飛行実験結果
(建造物模型, ナル方式)

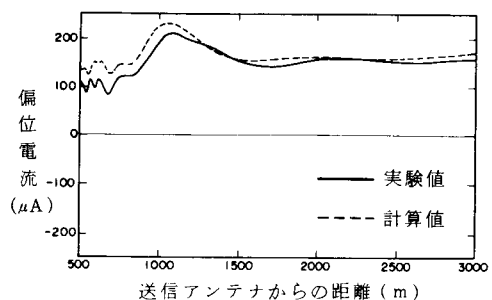


図 3 9 仙台空港飛行実験結果
(建造物模型, 二周波方式)

は、回折板によって受信電界が低下したために生じた偏位電流の出力低下によるものである。同じく、図32から図37までは、図9に示した建造物模型の場合の実験結果と計算結果を、ナル方式、Mアレイ方式、二周波方式の順に示している。しかし、ナル方式と二周波方式の実験では、航空機が設定したパス角より大きく外れたために、ナル方式では3.5度、二周波方式では3.85度の一定角度で航空機が進入したと仮定したときの結果を、図38、図39に示す。実線は実験値、破線は計算値である。これらの結果は、

設定したパス角で進入したと仮定した結果よりも実験値と計算値がよく一致している。

4.2 地形の場合

4.2.1 スケールモデル実験

地形の影響を調べるスケールモデル実験の結果を、図40から図43に示す。図40と図41は空港が海岸にある場合を図42と図43は送信アンテナ前方の地形に起伏がある場合を示し、実線は実験値、破線は計算値を示す。空港が海岸にある場合の実験値と計算値は

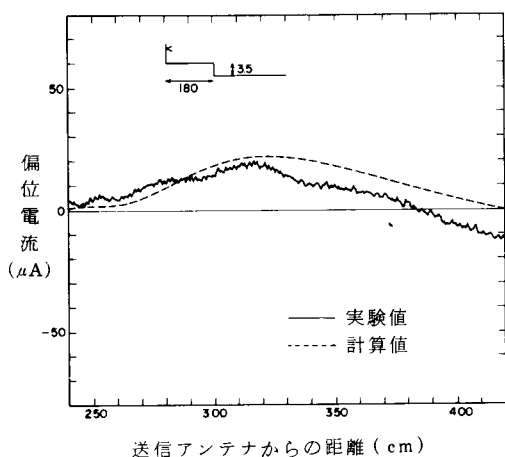


図40 スケールモデル実験結果
(海岸の近くに空港がある場合)

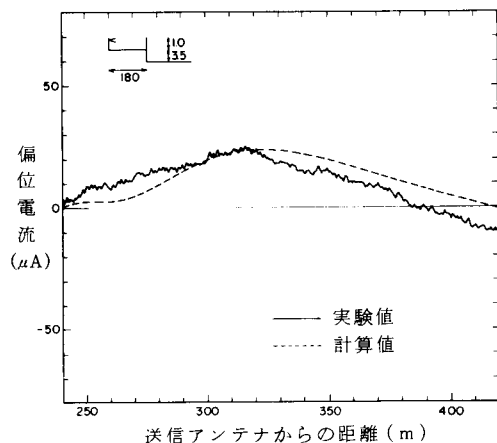


図41 スケールモデル実験結果
(海岸の近くに空港がある場合)

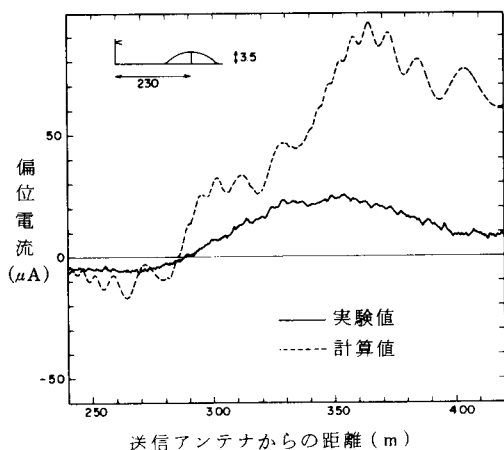


図42 スケールモデル実験結果
(送信アンテナの前方に起伏がある場合)

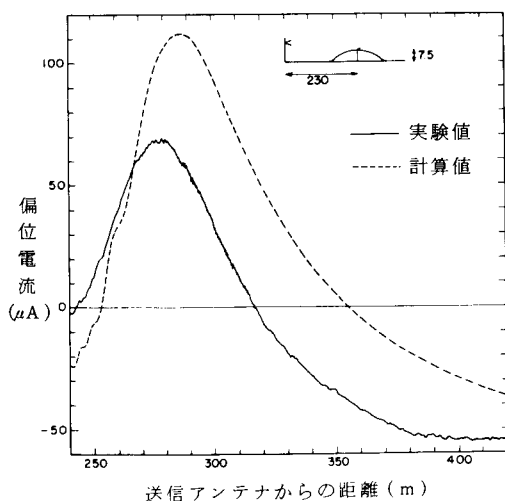


図43 スケールモデル実験結果
(送信アンテナの前方に起伏がある場合)

験結果を、図44に示す。また、千歳空港で行った送信アンテナ前方の地形に起伏がある場合の結果を、図45に示す。参考として、航空局が千歳空港の同じ場所において、ナル方式により行った飛行検査記録とそれに対応する予測計算結果を、図46に示す。実線が実験値または検査記録値であり、破線が計算値である。これらは比較的よく一致している。

よい一致を示しているが、送信アンテナ前方の地形に起伏がある場合の実験では計算値が実験値より大きい。この原因としては、多重反射の影響と垂直偏波成分の干渉が考えられる。

4.2.2 飛行実験

大分空港で行った空港が海岸にある場合の飛行実

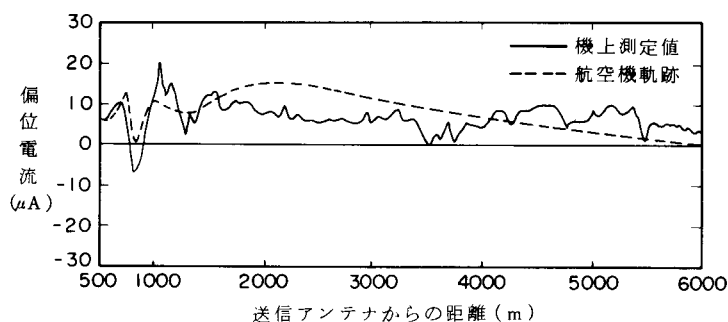


図 4 4 大分空港飛行実験（海岸の近くに空港がある場合）

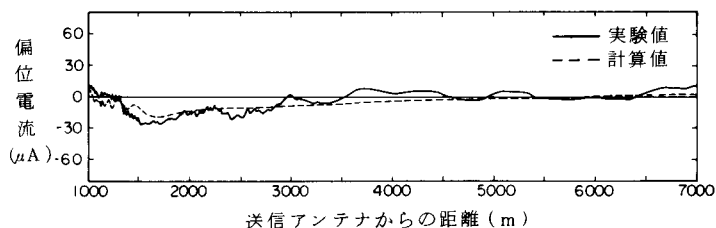


図 4 5 千歳空港飛行実験（送信アンテナ前方に起伏がある場合）

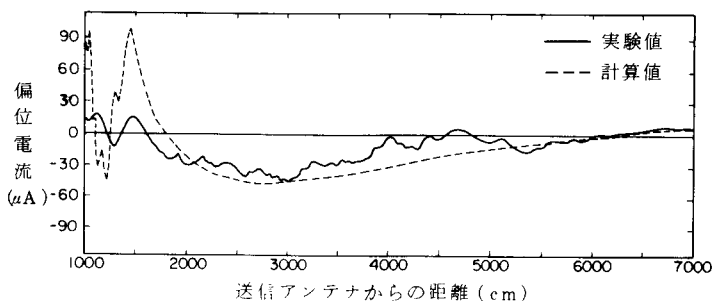


図 4 6 千歳空港飛行検査記録

5. 考察とまとめ

グライドパス送信アンテナ前方の構造物、地形による障害は、UHF 帯の AM 電波を使い、地面の反射を利用するために、グライドパスのもつ避け難い問題である。この問題に対し、今回用いた予測方法が、設置場所と送信方式の選定、新たに作られる構造物への事前対策などを行う上に、有効であること

を確認した。表 1 に、実験の最大パスバンドとそれに対する計算値とを示す。

予測最大偏位電流の実験値に対する相対誤差は、全体では $-4 \pm 26\%$ 、構造物の場合は $-3 \pm 21\%$ 、空港が海岸にある場合は $9 \pm 22\%$ とよく合致しているが、土地に起伏がある場合は $-21 \pm 44\%$ でバラつきが多い。

多重反射が起こりにくく、偏波面も決定しやすい、

表 1 最大偏位電流における実験値と計算値

				実 験 値 A (μ A)	予 測 値 B (μ A)	誤 差 (A - B)/ B (%)	平 均 誤 差 (%)		
構 造 物 の 場 合	スケールモデル実験	反 射	①	7 2.5	6 5	1 2	2 $\pm 1 8$	- 3 $\pm 2 1$ - 4 $\pm 2 6$	
			②	6 1.5	5 5.5	1 1			
			③	4 2	3 8.5	9			
			④	8	1 2	- 3 3			
		回 析	⑤	- 5 7.5	- 6 9.5	- 1 7			
			⑥	3 2.5	2 7.5	1 8			
			⑦	1 9.5	2 0.5	- 5			
			⑧	6 5	5 5	1 8			
	飛 行 実 験	反 射 板	ナ ル	- 7 5	- 7 0	7	- 7 $\pm 2 3$		
			Mアレイ	- 9 5	- 1 2 5	- 2 4			
			二 周 波	- 6 5	- 1 2 5	- 4 8			
		回 折 板	ナ ル	3 4 0	3 1 5	8			
			Mアレイ	3 3 5	3 4 0	- 1			
			二 周 波	2 8 0	2 8 5	- 2			
		建 造 物 模 型	ナ ル	8 5	8 5	0			
			Mアレイ	1 1 0	8 5	2 9			
		二 周 波	6 5	9 0	- 2 8				
	スケールモデル実験	堤 防 な し		2 0	2 2	- 9	- 2	9 $\pm 2 2$	
		堤 防 あ り		2 5	2 4	4	± 9		
		飛行実験	大 分 空 港		2 0	1 5	3 3		
地 形 に 場 起 合 状	スケールモデル実験	3.2 cm		2 6	9 5	- 7 3	- 5 5	- 2 1 $\pm 4 4$	
		7.5 cm		6 9	1 1 1	- 3 8	$\pm 2 5$		
	飛行実験	千歳二周波		2 6	2 0	3 0	1 3		
		千 歳 ナ ル		4 4	4 6	- 4	$\pm 2 4$		

飛行実験の結果だけでは、データ数が少ないが、 $13 \pm 24\%$ とよくなっている。このことから、誤差の原因は、スケールモデル実験のもつ多重反射や垂直偏波の干渉が考えられる。しかし、千歳空港におけるナル方式グライドパスの飛行検査記録が、送信アンテナ1.7kmより近い所において、予測値と合致していないことから、散乱面に対して送信点・受信点が波長に対して十分遠いことなどの近似が成り立たない領域に対して、近似計算を行っているとも考えられる。今後、多重反射、入射角の変化による反射係数の変化などを含めた予測計算を行う必要がある。

また、飛行実験においては、4.1.2でみられた実際の航空機の位置における予測計算が、単なる進入角の変化に対応する偏位電流の補正よりもよく合致していたことから、航空機の位置の測定とその点に対応した計算が重要と考える。

謝辞 資料提供と実験に協力を頂いた、航空局、東京航空局、大阪航空局、航空保安大学、電子航法開発部着陸施設研究室の関係各位に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 岡田實編：“航空電子装置”，pp.57-67(日刊工業新聞，1978)。
- 2) “国際民間航空条約 第10付属書”，第1巻，pp.20-49(航空振興財団，1972)。
- 3) McFarland, R.H., Hill, D., and Luttermoser, D.: “Earth cover and contour effects on image glide paths.”, Final Report EER5-7, Contract FA-64WA-5060, Avionics Research Group, Ohio University, Athens, (Sep. 1986)。
- 4) Lucas, J.G.: “Microwave model of an instrument-landing-system glide path.”, Proc. IEE, Vol. 119, No. 5, pp. 529-536 (May 1972)。
- 5) 小林常人: “ILSにおける電波障害の計算機シミュレーション”，電波研究所季報，Vol. 20, No. 110, pp. 509-516, (Sep. 1974)。
- 6) 中村，石橋，松田，山田，横山: “地上障害物による ILS 電波障害の解析と模型実験” 電子航法研究所報告，No. 31, pp. 1-14, (Mar. 1981)。
- 7) Redlich, R.W.: “Computed performance of glide slope array on sites with limited ground plane.”, IEEE, Vol. AES-7, No. 5, pp. 854-862, (Sep. 1971)。
- 8) Godfrey, J.T., Hartley, H.F., Moussally, G. J., and Moore, R.A.: “Terrain modeling using the half-plane geometry with applications to ILS glide slope antennas.”, IEEE Vol. AP-24, No. 3, pp. 370-378, (May 1976)。
- 9) Godfrey, J.T., Hartley, H.F., Moussally, G. J., and Moore, R.A.: “Half-plane scattering applied to ILS grading criteria.”, IEEE Vol. AES-13, No. 1, pp. 2-9, (Jan. 1977)。
- 10) Luebbers, R., Ungvichian, V., and Mitchell, L.: “GTD terrain reflection model applied to ILS glide slope”, IEEE Vol. AES-18, No. 1, pp. 11-20, (Jan. 1982)。
- 11) “国際民間航空条約 第10付属書”，第1巻，pp. 238, (航空振興財団，1972)。
- 12) Manney, C. 編: “Study of two-frequency capture effects on ILS receivers.”, Final Report Contract FA-66WA-1556, Wilcox, Kausas, (Mar. 1969)。
- 13) Stratton, J.A.: “電磁理論”，pp. 391-400, (生産技術センター，Sep. 1975)。
- 14) 長岡，松田，山本，田中，二瓶: “広帯域大型電波無響室の特性について”，電子航法研究所報告，No. 29, pp. 1-38, (Dec. 1980)。
- 15) 水城南海男: “航空保安施設における建造物壁面に起因する反射障害の低減法”，信学技報，EMC J81-10, pp. 25-30, (May 1981)。