

電子航法研究所報告

ELECTRONIC NAVIGATION RESEARCH INSTITUTE PAPERS

No. 27

VOR位置選定基準について

川 田 輝 雄

1980. 8

運輸省 電子航法研究所

Electronic Navigation Research Institute

Ministry of Transport

VOR位置選定基準について

川 田 輝 雄 *

A Study on VOR Siting Criteria

Teruo KAWADA

Abstract

The site selection of a very-high-frequency omnidirectional radio range (VOR) is a difficult task since many objects, buildings, towers, wires, sea, and mountains may give adverse effect on the omnirange radiation pattern.

This report deals with the effect of the nearby objects on the operation of the VOR.

目 次

1. まえがき	1
2. VORの概要	1
2.1 C-VOR	2
2.2 D-VOR	2
3. 建物による誤差	2
3.1 概 要	2
3.2 誤差計算式	2
3.3 スカロッピング周波数計算式	3
3.4 比反射強度の計算式	3
3.4.1 積分表示式	3
3.4.2 近似式	4
3.5 スケールモデル実験	4
3.6 飛行実験	5
3.6.1 仙台実験用C-VOR	5
3.6.2 仙台教育用D-VOR	7
3.7 建物による誤差パターンの特徴	9
3.8 建物による誤差の軽減対策	9
3.9 建物による誤差のまとめ	10
4. 鉄塔による誤差	13
4.1 概 要	13
4.2 誤差計算式	13
4.3 スカロッピング周波数計算式	13
4.4 比反射強度の計算式	13
4.5 飛行実験	13
4.5.1 加治木D-VOR	13
4.5.2 羽田D-VOR	13
4.5.3 秋田D-VOR	13
4.5.4 FAA C-VOR	15
4.6 鉄塔による誤差パターンの特徴	15
4.7 鉄塔による誤差の軽減対策	15
4.8 鉄塔による誤差のまとめ	15
5. 架空線による誤差	17
5.1 概 要	17
5.2 誤差計算式	17
5.3 スカロッピング周波数計算式	17
5.4 比反射強度の計算式	17
5.4.1 積分表示式	17
5.4.2 近似式	18
5.5 スケールモデル実験	18

5.6	飛行実験	18
5.6.1	秋田D-VOR	18
5.6.2	FAA C-VOR	20
5.7	架空線による誤差パターンの特徴	20
5.8	架空線による誤差の軽減対策	20
5.9	架空線による誤差のまとめ	22
6.	海面による誤差	22
6.1	概要	22
6.2	誤差計算式	23
6.3	海面反射計算モデル	23
6.3.1	総合モデル	23
6.3.2	丘を含めた垂直面指向性の計算	23
6.4	スケールモデル実験	24
6.5	飛行実験	25
6.5.1	銚子実験用C-VOR	25
6.5.2	銚子D-VOR	25
6.5.3	御宿C-VOR	25
6.5.4	横須賀D-VOR	25
6.6	海面反射による障害の特徴	29
6.7	海面反射による障害の軽減対策	29
6.8	海面反射による障害のまとめ	29
7.	山岳による障害	31
7.1	概要	31
7.2	誤差計算式	31
7.3	山岳反射計算モデル	33
7.4	飛行実験	33
7.4.1	横須賀D-VOR	33
7.4.2	長崎D-VOR	33
7.5	山岳による障害の特徴	34
7.6	山岳による障害の軽減対策	35
7.7	山岳による障害のまとめ	36
8.	むすび	36
	参考文献	37

1. まえがき

VOR（超短波全方向式無線標識）は、短距離航法援助施設として航空路や空港に設置され、航空機の安全な運航に重要な役割を果たしている。この施設は100 MHz 帯の電波を使用しているため、周辺の建物、鉄塔、架空線等の構造物や、海面、山岳等の地形による妨害をうけやすく、現在我国で運用中の施設のうちAIP（航空路誌）に何らかの運用制限をつけられているものは22局にもおよんでいる。このような運用制限を少なくするには、その設置位置の選定にあたり電波障

害の予測をおこなう必要があるが、従来、定量的な予測方法がなく施設建設後に不具合が明らかになることも多かった。

このため、運輸省航空局が当所に、上述の電波障害予測のための「VOR位置選定基準案」の作成を依頼した。これを受けて51年度から3カ年間、表1の順序で調査研究を進め、電算機シミュレーション、スケールモデル実験、飛行実験等各種の手法で予測を行ない、基準作成に必要な資料をととのえることができたのでその概要を報告する。

表1. 研究の経過

	51年度	52年度	53年度
建 物 鉄 塔 架空線	(1) 近似式による誤差計算プログラムの作成	(1) 数値積分による誤差計算プログラムの作成 (2) スケールモデル実験 (3) 飛行実験 ① C-VOR 実験局仮設（仙台空港） ② 仙台航保大教育用D-VOR ③ 秋田D-VOR	(1) 航空局の依頼により実際に適用 ① 移設および新設VOR位置選定 ア. 新当別, 1. 仙台, ウ. 久米島 ② 既設VORの電波障害計算 ア. 那 須一送電線新設 1. 銚子一防護さく新設 ウ. 館 山一電々マイクロ鉄塔新設 エ. 羽 田一夜間駐機位置の検討 オ. 新 潟一防衛庁格納庫改造 カ. 名古屋一工事用大型車輛の影響
海 面	(1) プロフィルチャートによる障害区域予測	(1) 飛行実験 ① 横須賀D-VOR ② 長 崎D-VOR	(1) 誤差計算プログラムの作成 (2) スケールモデル実験 (3) 飛行実験 ① C-VOR 実験局仮設（銚子市） ② 銚子D-VOR ③ 御宿C-VOR (4) 実際に適用 当別VOR移設
山 岳		(1) 飛行実験 ① 熊本D-VOR	(1) 単一山岳による誤差計算プログラムの作成 (2) 飛行実験 ① 横須賀D-VOR
報告書	(1) 位置選定手順書	(2) 障害物評価基準	(3) 根拠資料集 (4) 飛行実験データ集

2. VORの概要

VORは短距離航法援助システムの標準方式であり、航空機に方位情報を与えるために用いられる。VORから全方位にわたって同一の位相をもつ基準位相信号と、方位が変わるにしたがって位相がくれ、方位が860度変ると1サイクル遅れる可変位相信号を送信する。機上ではこの2信号の位相差を測定して磁北からの方位

を知ることができる。図2.1に2信号の位相関係を示す。

現在我国で運用されているVORの方式には、旧来型のC-VOR（Conventional VOR）と、ドブラ効果を利用したD-VOR（Doppler VOR）とがある。

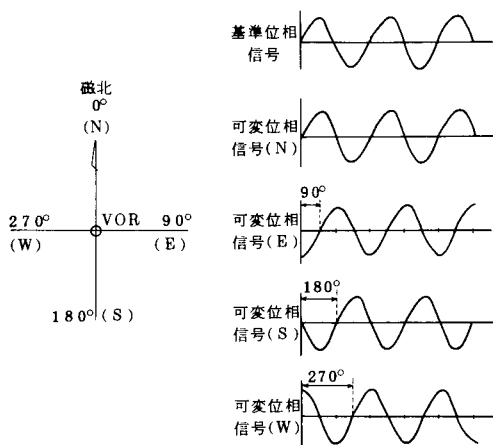


図 2.1 基準位相信号と可変位相信号の関係

2.1 C-VOR

1) 基準位相信号

30 Hz で 9960 Hz の副搬送波を周波数変調 (変調指数 16, 周波数偏位 ± 480 Hz) した後, 搬送波を振巾変調 (変調度 30%) したものの。

2) 可変位相信号

30 Hz で搬送波を振巾変調 (変調度 30%) したものの。

3) 本方式は, 周辺の障害物からの反射信号が, 方位情報を含む可変位相信号にそのままベクトル的に加わるため大きな方位誤差を生じる欠点をもつ。このため D-VOR に置換えられつつある。

2.2 D-VOR

1) 基準位相信号

30 Hz で搬送波を振巾変調 (変調度 30%) したものの。

2) 可変位相信号

搬送波より 9960 Hz 高い信号を, 半径約 6.5 m の円周上に設置した 50 本の空中線に給電し, 円周上を毎秒 30 回転するようにディストリビュータで切換えることにより, C-VOR の基準位相信号と同様な周波数変調波を作る。

3) 本方式は, 方位情報を含む可変位相信号が周波数変調波であるため, その特性上, 反射波による方位誤差が C-VOR の数分の 1 とかなり軽減される。

3. 建物による誤差

3.1 概要

VOR 周辺の格納庫, ビルディング等は方位誤差発

生の原因となる。建物による誤差には建物面の反射方向に発生する反射誤差と, 建物方向に発生する回折誤差との 2 種類がある。前者は建物反射面を平滑で均一な金属平板の集合と仮定することにより, また後者は建物を完全な遮蔽体と仮定することにより誤差を計算することができる。

3.2 誤差計算式

3.2.1 C-VOR

1) 誤差 S_c は, 次式で表わされる。^{1), 2)}

$$S_c = \pm \tan^{-1} \left[\frac{A \sin(\theta_0 - \theta_1)}{1 + A \cos(\theta_0 - \theta_1)} \right] \quad (1)$$

$A \leq 0.1$ のように, A が 1 に比べて小さいときは, 次の式で近似できる。

$$S_c = \pm \tan^{-1} [A \sin(\theta_0 - \theta_1)] \quad (2)$$

ここに図 3.1 のような配置を考え, 上式中の諸量は次の通りである。

θ_0 : VOR からみた航空機の磁方位

θ_1 : VOR からみた反射体の磁方位

$$A (\text{比反射強度}) = \frac{E_R (\text{妨害波電界強度})}{E_D (\text{希望波電界強度})}$$

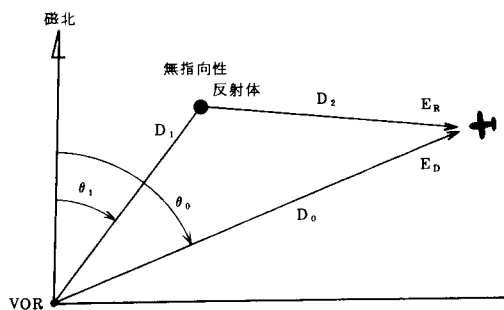


図 3.1 誤差計算説明図

2) 飛行実験を行なって検討した結果, 後に図 3.1.2 ~ 図 3.1.6 に示すように, 反射誤差, 回折誤差ともほぼ (1) 式に一致することがわかった。

3.2.2 D-VOR

1) 誤差 S_D は, 次式で表わされる。³⁾

$$S_D = \tan^{-1} \left[\frac{A}{8} J_1 \left(3.2 \sin \left(\frac{\theta_1 - \theta_0}{2} \right) \right) \sin \left(\frac{\theta_0 - \theta_1}{2} \right) \right] \quad (3)$$

ここに $J_1(x)$ は, 第 1 種第 1 次のベッセル関数であり

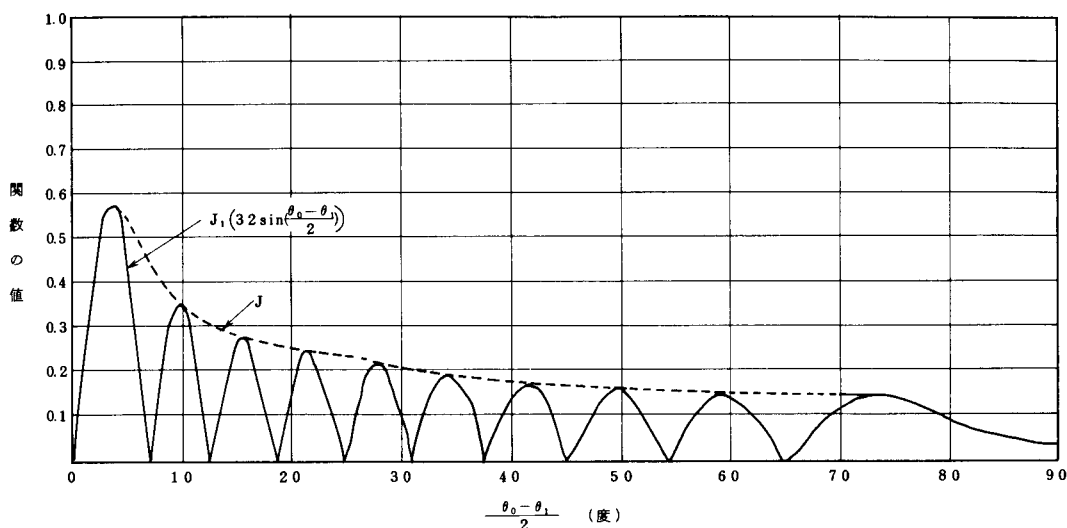


図 3.2 $J_1 \left(32 \sin \left(\frac{\theta_0 - \theta_1}{2} \right) \right)$ の瞬時値と包絡値

その絶対値を図 3.2 に示す。

2) 飛行実験を行なって検討した結果、次の結論をえた。

(ア) 反射誤差は、後に図 3.1 7 に示すように(3)式の 7～8 倍となる。

(イ) 回折誤差は、後に図 3.1 8 に示すように、ほぼ(3)式に一致する。

3.3 スカロッピング周波数計算式^{1), 2)}

1) オービットフライト

VOR を中心とする円周上を飛行する場合のスカロッピング周波数 f_s は次式で示される。

$$f_s = \frac{N \sin(\theta_0 - \theta_1)}{\sqrt{1 + \left(\frac{D_0}{D_1}\right)^2 - 2\left(\frac{D_0}{D_1}\right) \cos(\theta_0 - \theta_1)}} \quad (4)$$

ここで、航空機の対地速度を G_s 、搬送波の波長を λ とし $N = \frac{G_s}{\lambda}$ としている。

2) ラジアルフライト

VOR のラジアル上を飛行する場合のスカロッピング周波数 f_s は次式で示される。

$$f_s = N \left[1 - \frac{\left(\frac{D_0}{D_1}\right) - \cos(\theta_0 - \theta_1)}{\sqrt{1 + \left(\frac{D_0}{D_1}\right)^2 - 2\left(\frac{D_0}{D_1}\right) \cos(\theta_0 - \theta_1)}} \right] \quad (5)$$

3) 飛行実験の結果、後に図 3.1 3～図 3.1 8 に示すように実測値と計算値はほぼ一致した。

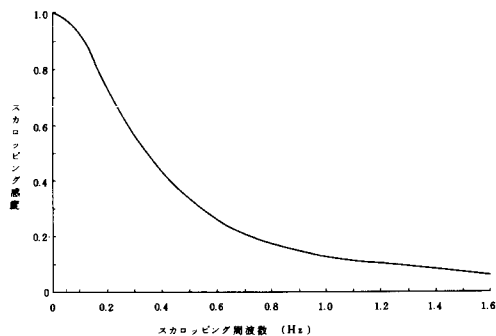


図 3.3 VOR 受信機のスカロッピング感度

4) 3.2 に示した誤差式により求めた誤差は、静的な値である。機上指示器は低域フィルタとみなしうるので、動的な値は、静的な値より小さくなる。一般的な VOR 受信機のスカロッピング感度を図 3.3 に示す。

3.4 比反射強度の計算式

妨害波（反射波または回折波）電界強度と希望波電界強度との比 A を求める。

3.4.1 積分表示式

1) 自由空間に、図 3.4 のようにおかれたとき、受信点における希望波電界強度は(6)式により簡単に求められる。

$$E_D = \frac{E_0}{D_0} e^{-jKD_0} \quad (6)$$

2) 妨害波電界強度の計算には、一般に電磁波動的

性質を考慮したホイヘンスの原理による解が用いられる。4)5)6)

これによれば、自由空間に図 3.4 のようにおかれた金属平板からの反射波（回折波）は次式で表わされる。

$$E_R = \frac{E_0}{2\lambda} \int_S (\cos \alpha + \cos \beta) \cdot \frac{e^{-jK(D_1+D_2)}}{D_1 D_2} dS \quad (7)$$

ここで、上式中の諸量は次の通りである。

- S : 金属板面積
- E_0 : 空中線放射の電界強度に比例する値
- α : 入射角
- β : 反射（回折）角
- λ : 波長
- K : $2\pi/\lambda$

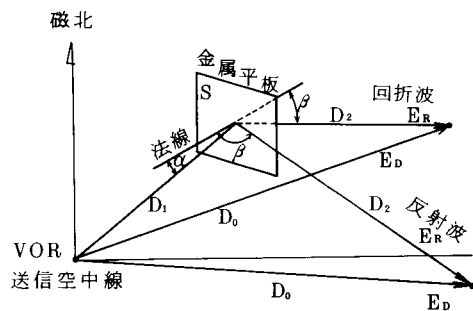


図 3.4 説明図

3) 電算機計算においては、希望波電界強度と妨害波電界強度は、地上反射波も考慮して数値計算により求めた。

3.4.2 近似式

1) (7)式を解くには、電算機を用いて数値計算を行なうと高い精度がえられる。しかし、大略の誤差を手計算により求めることが必要なときもある。このため、(7)式を下記の条件のもとに解いた近似式を用いた。⁷⁾

- (ア) 反射（回折）板は地面に垂直な長方形とする。
- (イ) 反射板および大地の反射係数は -1 とする。
- (ウ) 反射（回折）板の中 L 、高さ h は、反射（回折）板と送信空中線との距離 D_1 ならびに受信空中線との距離 D_2 に比べて十分小さいこと。

$$A = \frac{E_R}{E_D} = M \cdot \sin \theta_1 \cdot R_H \cdot \frac{R_V}{D_V} \quad (8)$$

ここで、図 3.5 のような配置を考え、上式中の諸量は次の通りである。

$$M = \frac{Lh}{\lambda D_1} \quad \dots\dots (\text{係数})$$

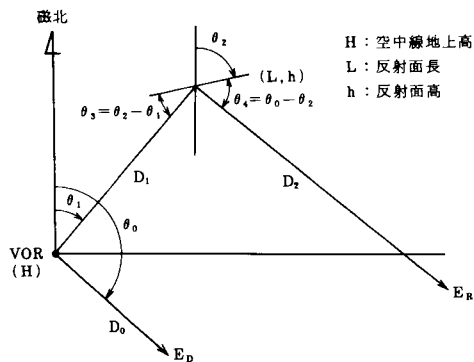


図 3.5 近似式諸元図

$$R_H = \sin C \left[\frac{KL}{2} (\cos \theta_3 - \cos \theta_4) \right] \quad \dots\dots (\text{反射波の水平パターン})$$

$$R_V = \sin C \left[Kh \left(\frac{H}{D_1} - \frac{Z}{D_2} \right) - \sin C \left[Kh \left(\frac{H}{D_1} + \frac{Z}{D_2} \right) \right] \right] \quad \dots\dots (\text{反射波の垂直パターン})$$

$$D_V = \sin \frac{KHZ}{D_0} \quad \dots\dots (\text{直接波の垂直パターン})$$

$$\sin C(x) = \sin(x) / x$$

2) 近似式による誤差計算値は、後の図中に●印で記入した。

3.5 スケールモデル実験

3.5.1 実験概要

VOR誤差計算プログラムにおいて、妨害波電界強度と希望波電界強度の比 A の計算を確認するために、当所電波無響室でILSローカライザスケールモデル（縮尺約 $1/100$ ）を用いて実験を行なった。

本装置のコース偏位は(9)式で表わされるので、VOR誤差計算プログラム内で計算した A の値を(9)式に代入して偏位を計算し、これを実測値と比較した。

$$\text{偏位}(\mu A) = \frac{91 \times 0.65A}{1 + 0.65A} \quad (9)$$

なお、スケールモデルの概略を図 3.6 に示す。

3.5.2 実験結果

図 3.7～図 3.8 に、金属平板からの反射によるコース偏位の電算機計算値と実測値を示す。偏移の大きさ、周期ともほぼ一致したので、金属平板に対する A の計

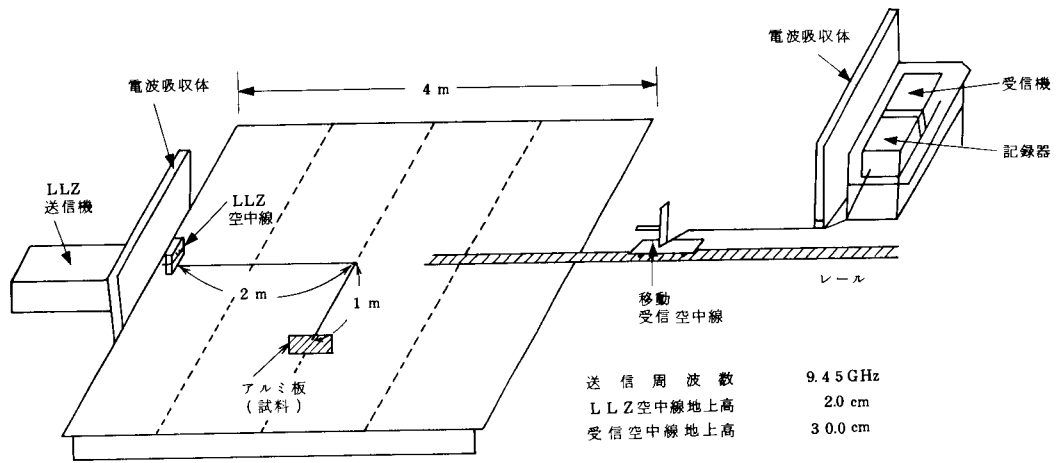


図 3.6 スケールモデル実験装置概略図

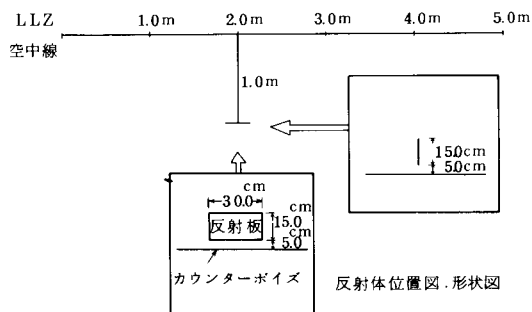
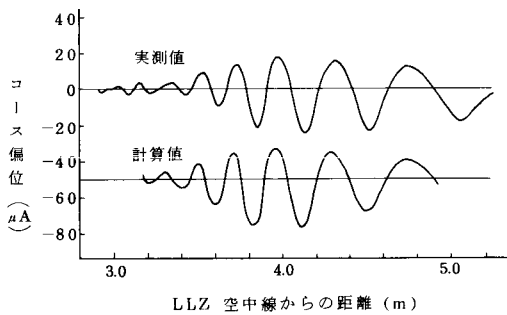


図 3.7 ローカライザ・スケールモデル実験

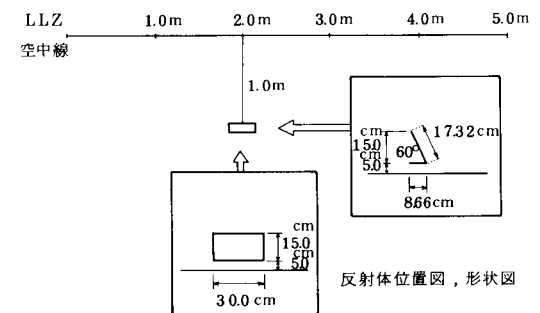
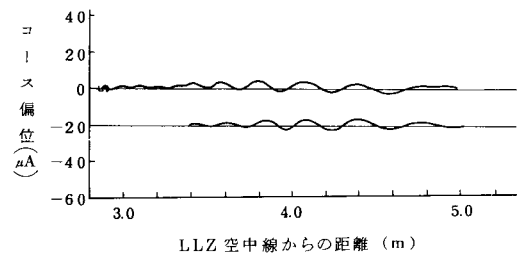


図 3.8 ローカライザ・スケールモデル実験

算の近似のよさが確認できた。

3.6 飛行実験

3.6.1 仙台実験用C-VOR

1) 周辺電波障害物位置を図 3.9 に、航大ハンガ形状を図 3.10 に、JAL ハンガ形状を図 3.11 に示す。

2) 図 3.12 に、航大ハンガ、JAL 訓練所、JAL ハンガの 3 つの建物による反射誤差の電算機計算値と

実測値とを示す。図中、点線は 3.4.1 でのべた数値計算結果であり、 $\odot$ 印は 3.4.2 の近似計算結果である。なお、航大ハンガ、JAL ハンガの扉は全て閉じている。

3) 図 3.13 に、航大ハンガおよび JAL ハンガの扉を全て開き、図 3.12 と同一の条件で飛行したときの計算値と実測値を示す。扉を開けた時の方が、閉じた時より約 20% 誤差が増加した。このことから、ハ

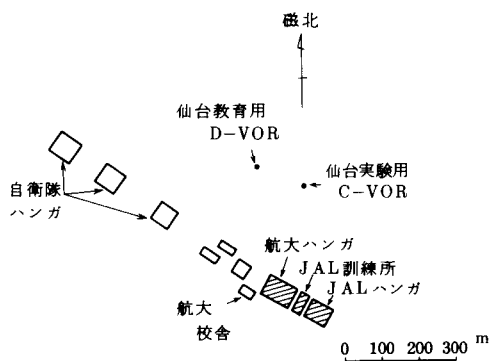


図 3.9 仙台VOR周辺電波障害物位置図

ンガにより発生している誤差は、ほとんど扉上部の固定部から発生していることがわかる。また、扉からの反射電界は、上部の固定部からの反射電界を相殺するように働いていることがわかる。

4) 図 3.1 4 に、半径 7 マイル、高度 5,000 フィートのオービット飛行の結果を示す。飛行高度が高くなると反射誤差が小さくなることがわかる。

5) 図 3.1 5, 図 3.1 6 に、回折誤差の電算機計算値と実測値を示す。飛行高度は 1,500 フィート、5,000 フィートであり、反射誤差と同様、飛行高度が高くなると誤差が小さくなることがわかる。

6) 以上の結果から、3.2.1 の(1)式の C-VOR 誤

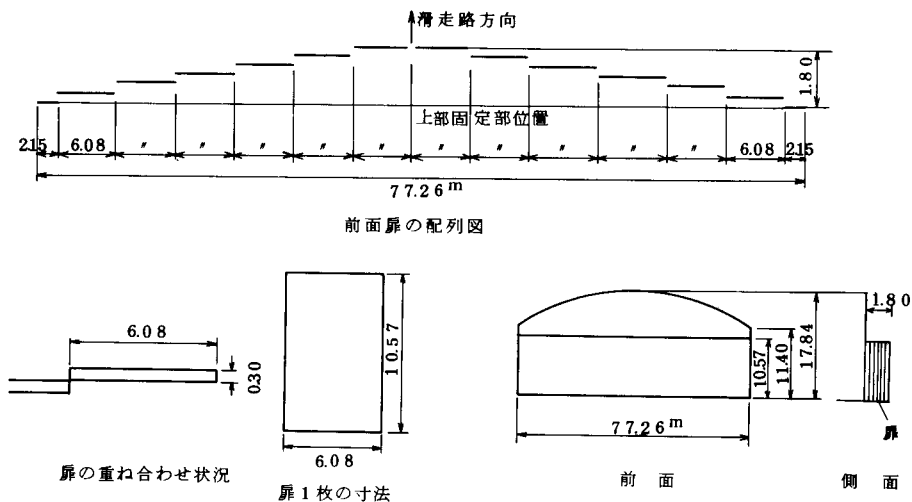


図 3.10 航大ハンガ形状図

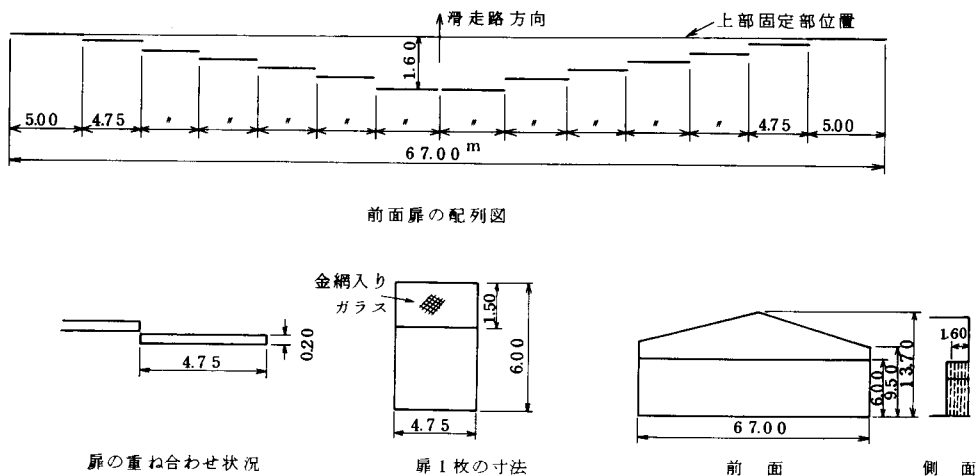


図 3.11 日航ハンガ形状図

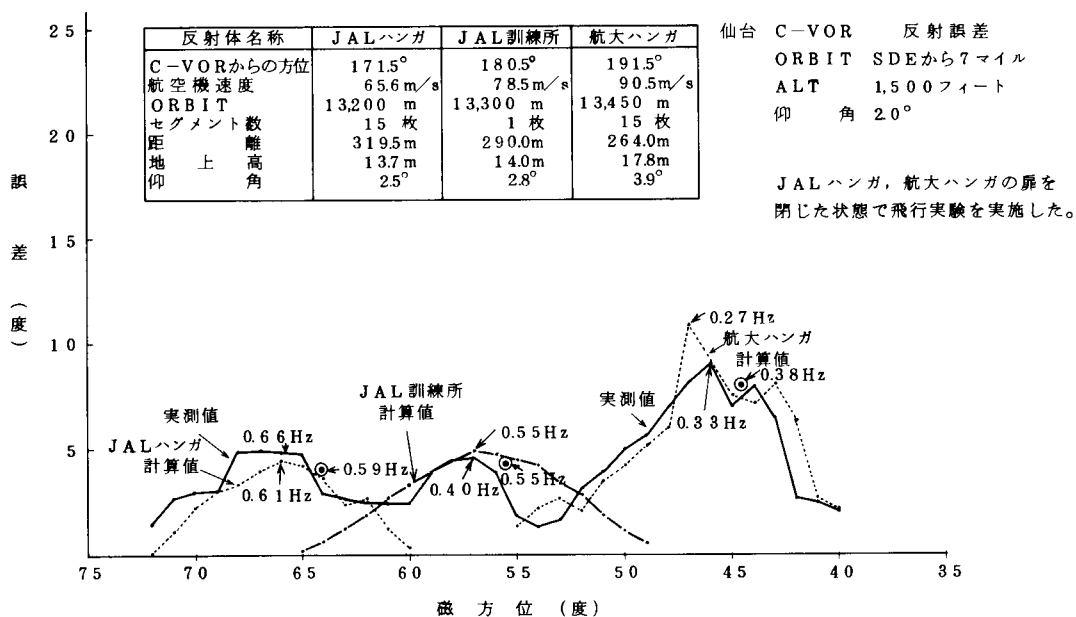


図 3.12 仙台C-VOR反射誤差

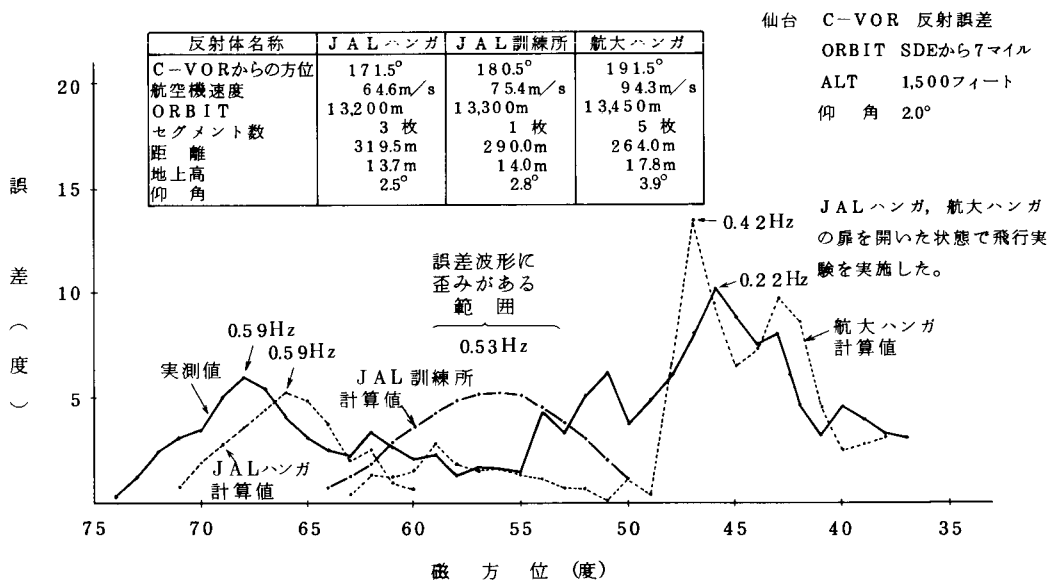


図 3.13 仙台C-VOR 反射誤差

差計算式ならびに 3.3 の(4)式のスカロッピング周波数計算式は実測値とほぼ一致することがわかった。

3.6.2 仙台教育用D-VOR

1) 航空保安大学校岩沼分校の教育用D-VOR位置と周辺電波障害物位置は, さきの図 3.9 ~図 3.11 に示す。

2) 図 3.17 に, C-VORと同じ3個の建物によ

る反射誤差の電算機計算値と実測値を示す。

計算値として, (1)式により計算したC-VOR誤差の1/7および(3)式により計算したD-VOR誤差の7倍の値を示してある。

この図から, D-VORの反射誤差は(3)式の7~8倍となることがわかる。

3) 図 3.18 は, 2)と同じ建物による回折誤差の電

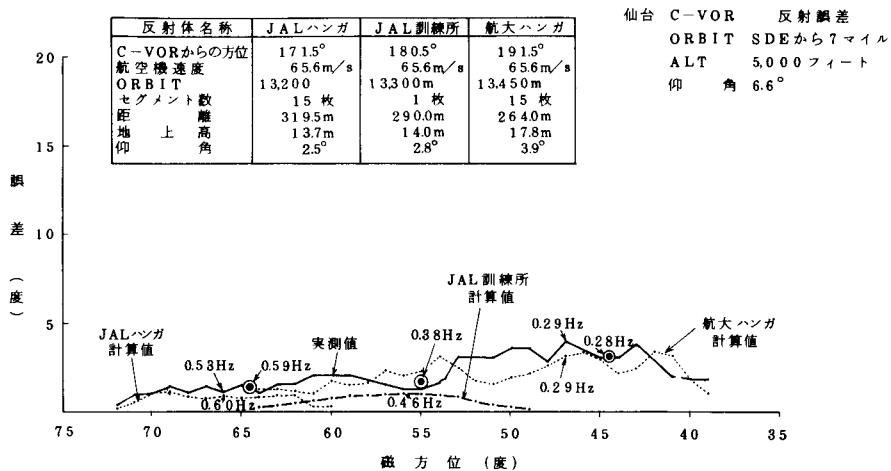


図 3.1 4 仙台C-VOR反射誤差

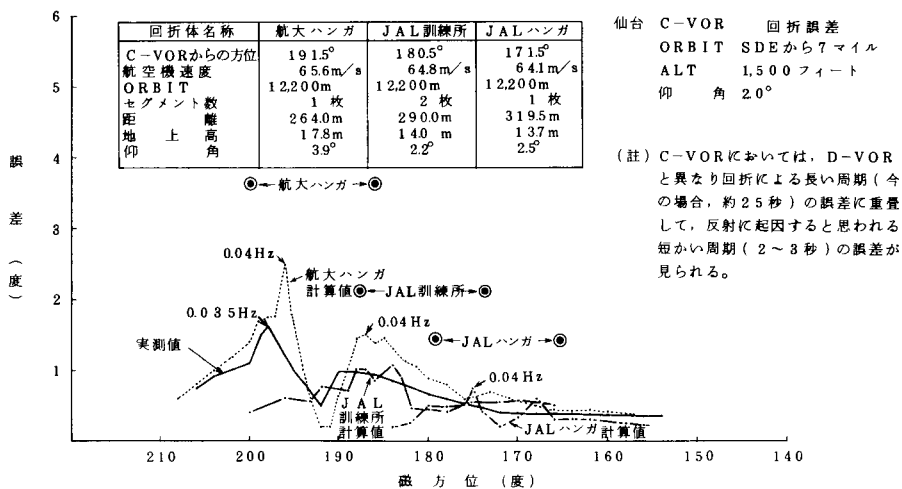


図 3.1 5 仙台C-VOR回折誤差

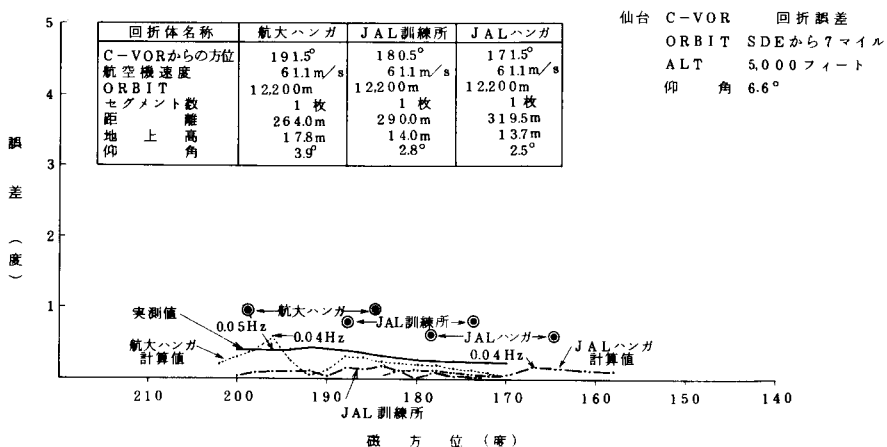


図 3.1 6 仙台C-VOR回折誤差

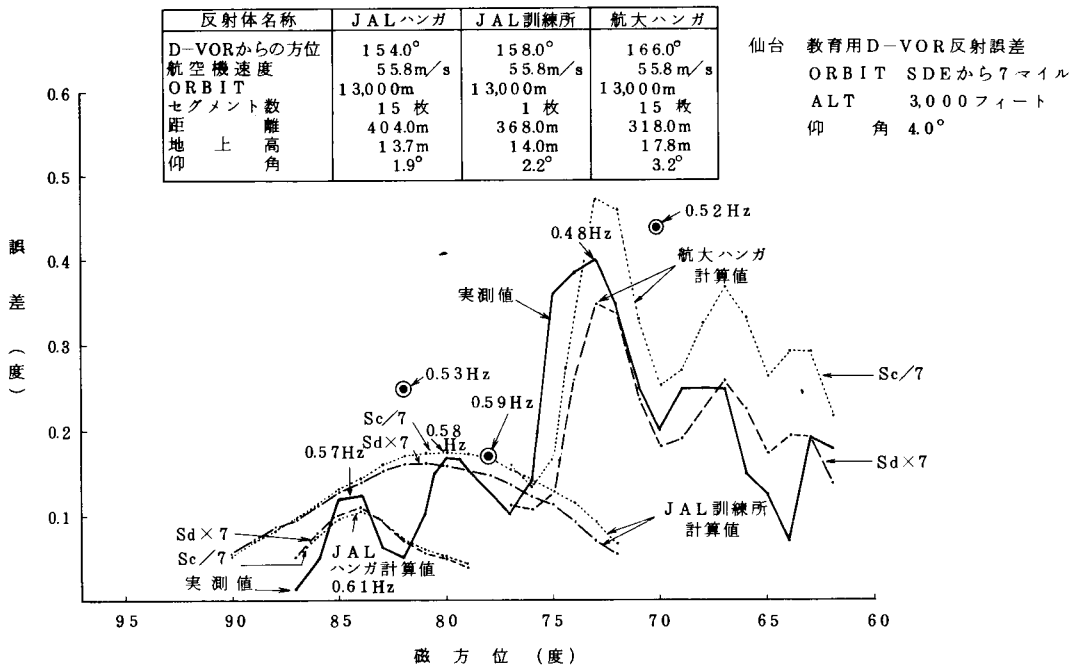


図 3.1 7 仙台教育用D-VOR反射誤差

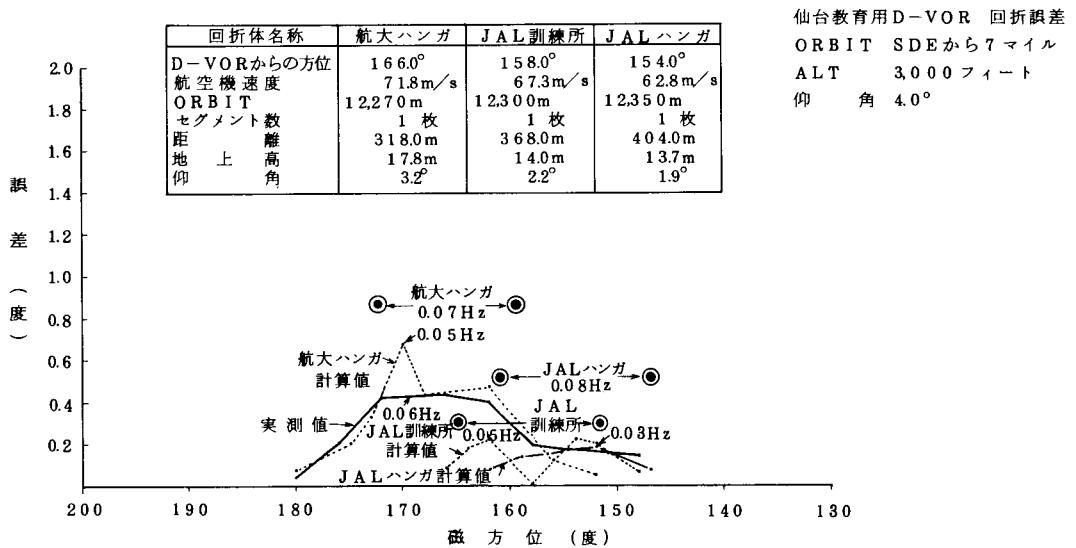


図 3.1 8 仙台教育用D-VOR回折誤差

算機計算値と実測値とを示す。

この図から、D-VORの回折誤差は(3)式にほぼ一致することがわかる。

4) また、図 3.1 7～図 3.1 8 から、スカロッピング周波数は(4)式にほぼ一致することがわかる。

3.7 建物による誤差パターンの特徴

建物による反射誤差および回折誤差パターンは、表 2 の特徴をもつことがわかった。

3.8 建物による誤差の軽減対策

誤差の軽減対策を、表 3 に示す。

表2. 建物による誤差のパターン

誤差種別	VOR型式	説 明	誤 差 の パ タ ー ン
反 射 誤 差	D-VOR	① 反射波の強い鏡面反射方位で誤差を生じる。 ② C-VORに比べ最大誤差は1/8以下となる。	水平面
	C-VOR	① 反射波の強い鏡面反射方位で大きな誤差を生じる。 ② 回折誤差よりほぼ1桁大きい誤差となる。 ③ D-VORに比べ最大誤差は8倍以上となり誤差の水平面内の広がりも大きくなる。	水平面
回 折 誤 差	D-VOR	① 建物方位±10°のセクタ内において誤差を生じる。 ② 誤差のピークは、約±6.6°に現われる。 ③ 反射誤差と同程度の誤差となることもある。	水平面
	C-VOR	① 建物方位±30°のセクタ内において誤差を生じる。 ② 誤差のピークは約±7°に現われる。 ③ 反射誤差よりほぼ1桁小さい誤差となる。 ④ D-VORより誤差は若干大きくなる。	水平面
	共 通	① 建物の面が、直角でないときは誤差パターンは非対称となる。 ② 建物が長いときには、回折誤差ローブの中心の落ち込みは、図点線の様に浅くなる。	水平面
共 通	共 通	① 航空機の仰角(θ_z)によって、誤差は振動的に変化する。	垂直面

(注) 回折誤差と反射誤差との比較は、VORを中心としてオービット飛行を行ったとの仮定に基づいている。

3.9 建物による誤差のまとめ

1) 積分表示式による誤差計算プログラムの有効性が確認された。

2) D-VORの反射誤差は、従来の理論式³⁾の約

8倍となる。

3) 建物による反射、回折誤差の予測がある程度可能となった。

表 3 建物に対する誤差の軽減対策

対 策 項 目	効 果		説 明
	反射	回折	
1. VORと建物間の距離 D_1 を大きくする。	◎	◎	1) 建物の巾Lが、第1フレネルゾーン巾L_Fの$1/2$より小さいとき、誤差は距離D_1の2乗に反比例する。 2) LがL_Fの$1/2$より大きいとき、誤差は距離D_1の$3/2$乗に反比例する。
2. 建物の高さ h を低くする。	◎	◎	1) LがL_Fの$1/2$より小さいとき、誤差は高さhの2乗に比例する。 2) LがL_Fの$1/2$より大きいとき、誤差は高さhの3乗に比例する。
3. 建物の巾 L を狭くする。	○	○	1) LがL_Fの$1/2$より小さいとき、誤差は巾Lに比例する。 2) LがL_Fの$1/2$より大きいとき、誤差は巾Lに無関係となる。
4. 反射係数を小さくする。	○	×	1) 反射係数を小さくするには、次の方法がある。 ① 反射面をクサビ形にして電波を乱反射させる。 ② 反射面に電波吸収材をとりつける。 ③ 反射面にエキスパンドメタルをとりつける。 2) 上の1)でのべた方法は、回折誤差の軽減には効果はない。 建 物 VOR 反射面が平滑なとき 反射波が鋭いビームになり誤差が大きくなる。 建 物 VOR 反射面がクサビ形の時 回折誤差は軽減されない。 乱反射されることにより反射誤差は小さくなる。

表3 建物に対する誤差の軽減対策（続き）

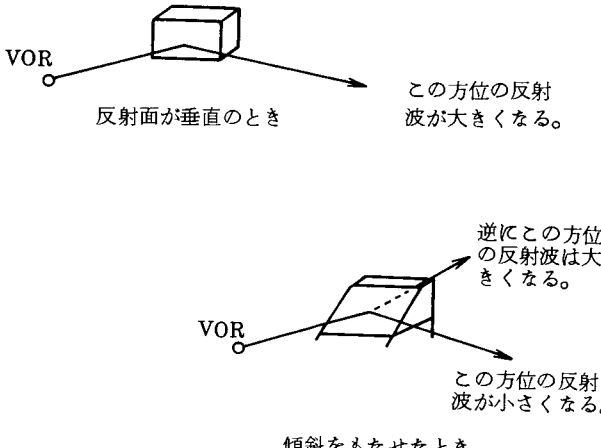
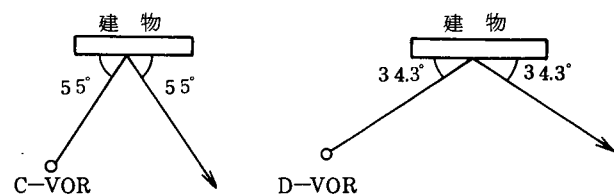
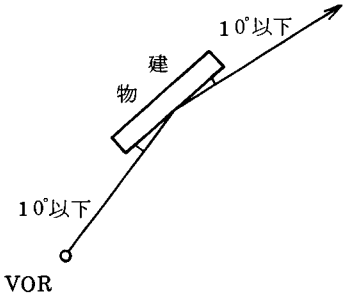
対 策 項 目	効 果		説 明
	反 射	回 折	
5. 反射面に傾斜をもたせる	○	×	反射面に傾斜をもたせることにより、重要方位での誤差を軽減できる。  この方位の反射波が大きくなる。 逆にこの方位の反射波は大きくなる。 この方位の反射波が小さくなる。 傾斜をもたせたとき
6. 建物の向きを変える	○	○	建物の幅Lが第1フレネルゾーン巾L_Fの$1/2$より小さい場合、建物への電波入射角が、C-VORでは約55°のとき、又D-VORでは約34.3°のとき反射誤差が最大となる。 入射角が1°以下になると誤差は極めて小さくなり、入射角0°ではその反射面による誤差は皆無となる。同時に遮蔽面積も小さくなるので回折誤差も小さくなる。  反射誤差が最大のとき

表3 建物に対する誤差の軽減対策(続き)

対 策 項 目	効 果		説 明
	反 射	回 折	
			 反射誤差が極めて小さくなる時 従って、建物の広い反射面への入射角を10°以下に、できれば放射状にすると反射誤差が小さくなる。同時に、遮蔽面積も小さくなるので、回折誤差も小さくなる。 又、この方法によれば、反射波の方向を変えて運用上重要な方向での誤差発生を避けることもできる。

4. 鉄塔による誤差

示した計算式でよいことがわかった。

4.1 概 要

VOR周辺のレーダ鉄塔、対空通信鉄塔、送電鉄塔、給水鉄塔等は方位誤差発生の原因となる。鉄塔による誤差も建物と同様に、反射誤差と回折誤差とがある。前者は鉄塔の表面を平滑で均一な金属平板と仮定することによって、また後者は鉄塔を完全な遮蔽体と仮定することによって誤差を計算することができる。

実際には、D-VORの場合は回折誤差のみについて検討すればよいことが多い。

4.2 誤差計算式

鉄塔による誤差計算式は、4.5に示す飛行実験データを検討した結果、3.2に示した計算式でよいことがわかった。

4.3 スクロッピング周波数計算式

4.5に示す飛行実験データを検討した結果、3.3に

4.4 鉄塔の比反射強度の計算式

誤差計算式中の妨害波電界強度と希望波電界強度の比Aの計算式は、3.4の建物の場合と同じになる。

4.5 飛行実験

4.5.1 加治木D-VOR

1) 図4.1は、ASR空中線鉄塔の回折による誤差の電算機計算値と実測値を示す。◎印は、近似式による計算値である。

4.5.2 羽田D-VOR

1) 図4.2は、対空受信鉄塔による回折誤差の電算機計算値と実測値を示す。

2) 図4.3は、グライドパス空中線鉄塔による回折誤差の電算機計算値と実測値を示す。

4.5.3 秋田D-VOR

1) 図4.4は、モニタ柱のFRPの部分に金網を巻いて模擬モニタ空中線鉄塔としたときの回折誤差の電

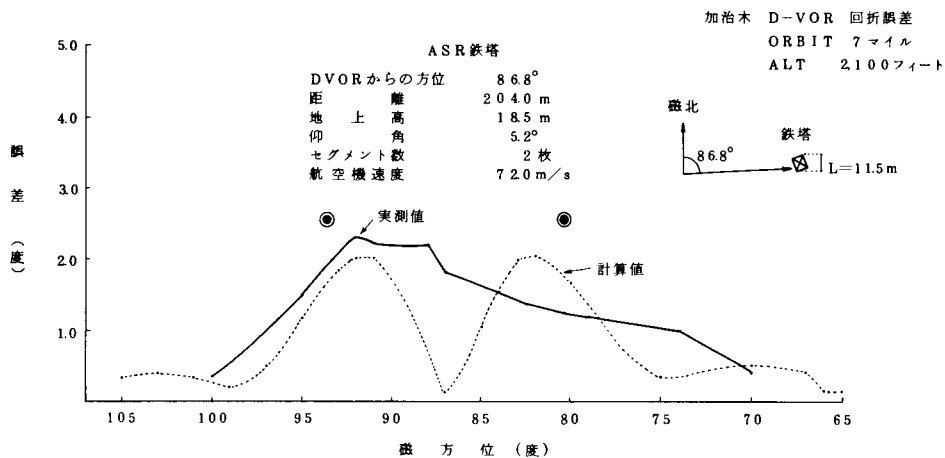


図 4.1 加治木D-VOR ASR鉄塔

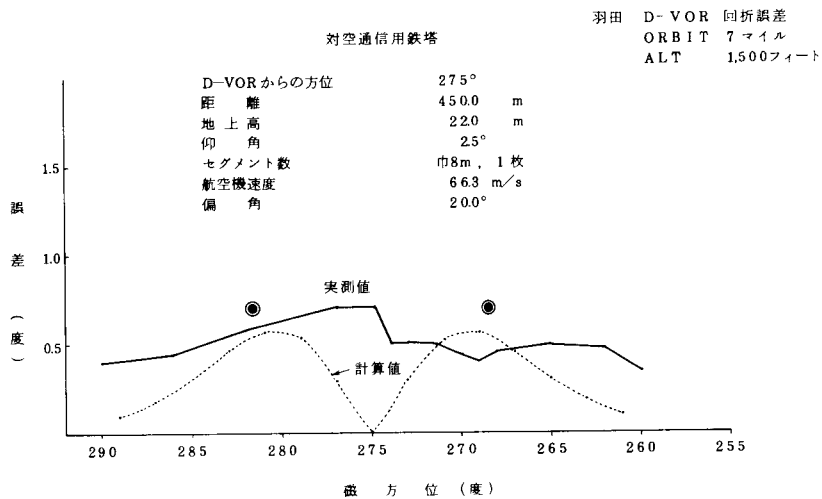


図 4.2 羽田D-VOR 対空通信鉄塔

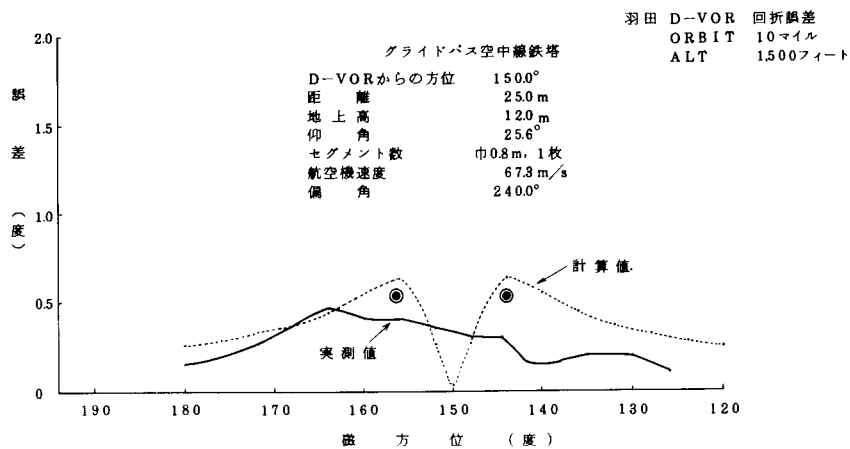


図 4.3 羽田D-VOR GP空中線鉄塔

秋田D-VOR 回折誤差
ORBIT 4マイル
ALT 700フィート

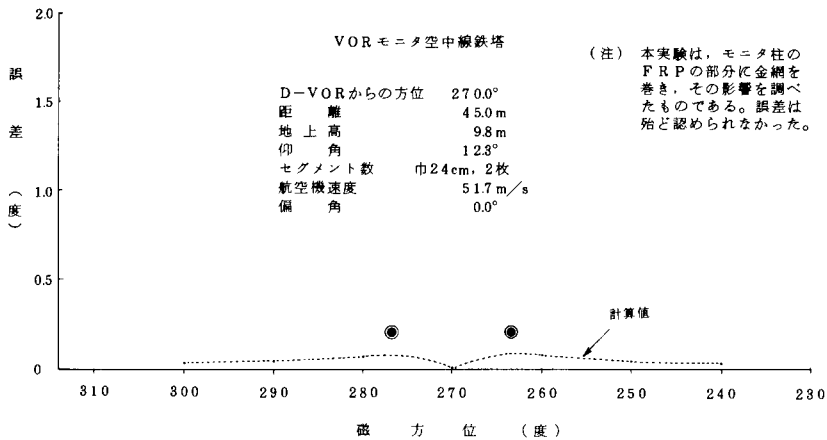


図 4.4 秋田D-VOR モニタ空中線鉄塔

算機計算値と実測値とを示す。

4.5.4 FAA C-VOR

1) 図 4.5は、FAA VOR/VORTAC SITING CRITERIA¹⁾の試験鉄塔の実測値と、当所での電算機計算値とを示す。

4.6 鉄塔による誤差パターンの特徴

鉄塔による反射誤差および回折誤差パターンは、表 4 の特徴をもつことがわかった。

4.7 鉄塔による誤差の軽減対策

誤差軽減対策を、表 5 に示す。

4.8 鉄塔による誤差のまとめ

- 1) 反射誤差は、C-VORをD-VORにかえると大幅に減少する。
- 2) 回折誤差は、D-VORにかえてもほとんど減少しない。
- 3) 鉄塔による誤差の予測がある程度可能となった。

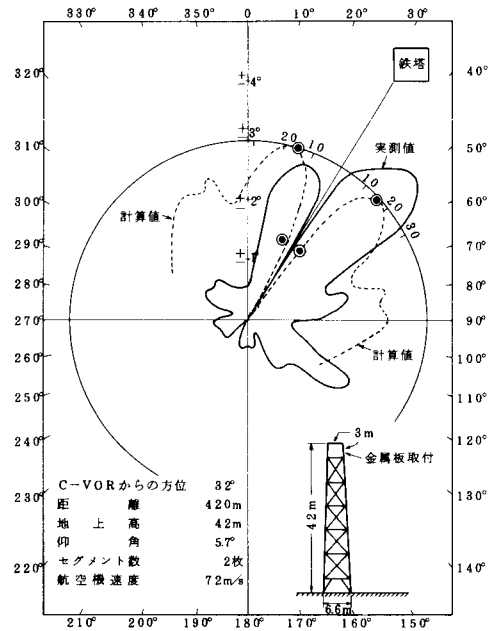


図 4.5 FAA C-VOR

表4 鉄塔による誤差のパターン

誤差種別	VOR型式	説明	誤差のパターン
反射誤差	D-VOR	① 一般に、無視できる程小さくなる。	
	C-VOR	① 鉄塔方位±90°附近および鏡面反射方位においてかなりの誤差を生じる。	水平面 (注) 点線は回折誤差パターン
	共通	① 鉄塔面への入射角に差がある時又は、2面の長さが違う時には誤差パターンは非対称となる。	回折誤差の共通の項の点線で示す様な誤差パターンとなる。
回折誤差	D-VOR	① 鉄塔方位±10°のセクタ内において大きな誤差を生じる。 ② 誤差のピークは、約±6.6°に現われる。 ③ 反射誤差より大きな誤差となる	水平面
	C-VOR	① 鉄塔方位±30°のセクタ内において大きな誤差を生じる。 ② 誤差のピークは、15°附近に現われる。 ③ 反射誤差より一般に大きな誤差となる。 ④ D-VORより若干大きな誤差となる。	水平面 (注) 点線は反射誤差パターン
	共通	① 鉄塔面への入射角に差がある時又は2面の長さが違う時には、誤差パターンは非対称となる。 ② 回折誤差ローブ中心の落ちこみは、実測では鎖線の様になる。	水平面 (注) 点線はC-VOR反射誤差パターン
共通	共通	① 航空機の仰角(θ_z)によって誤差は振動的に変化する。	垂直面

(注) 回折誤差と反射誤差との比較は、VORを中心としてオービット飛行を行ったとの仮定に基づいている。

表 5. 鉄塔に対する誤差の軽減対策

対 策 項 目	効 果		説 明
	反射	回折	
1. 距離 D_1 をはなす。	◎	◎	誤差は、VORと鉄塔との距離 D_1 に反比例する。
2. 鉄塔の高さ h を低くする。	◎	◎	誤差は、鉄塔の高さ h の3乗に比例する。
3. 鉄塔の巾 L を狭くする。	○	○	誤差は、鉄塔の巾 L に比例する。
4. 鉄塔の位置を変更する。	◎	◎	1) D-VORにおいては、鉄塔方位 $\pm 10^\circ$ のセクタ内においてのみ誤差が発生するので、鉄塔位置を変更して誤差発生方位を運用上重要な方位からはずす。 2) しかし、C-VORに対しては、有効な手段とはいえない。

5. 架空線による誤差

5.1 概 要

VOR周辺の送電線や通信線は、方位誤差の原因となる。架空線による誤差は、反射方向についてのみ発生する。¹⁾²⁾ 実際上は、D-VORでは問題とならないことが多いが、C-VORでは大きな誤差となるので注意を要する。

5.2 誤差計算式

5.6に示す飛行実験データを検討した結果、3.2に示した計算式でよいことがわかった。

5.3 スカロッピング周波数計算式

5.6に示す飛行実験データを検討した結果、3.3に示した計算式でよいことがわかった。

5.4 架空線の比反射強度の計算式

5.4.1 積分表示式

1) 自由空間に、図 5.1 のようにおかれたとき、受信点における希望波電界強度は(10)式により簡単に求められる。

$$E_D = \frac{E_0}{D_0} e^{-jK D_0} \quad (10)$$

2) 架空線からの妨害波電界強度は(11)式により求めることができる。(付録1 参照)

$$E_R = \int \frac{E_0}{Z_0} \times \frac{60\pi \cos \beta}{\lambda D_1 D_2} e^{-jK(D_1+D_2)} dl \quad (11)$$

ここで、上式中の諸量は次の通りである。

L : 架空線長

E_0 : 空中線放射電界強度に比例する値

β : 反射角

λ : 波長

K : $2\pi/\lambda$

$Z_0 = 30\pi K \cos \alpha H_0^{(1)}(KR \cos \alpha)$

$H_0^{(1)}(KR \cos \alpha) \approx 1 + j 1.466 \log_{10} \left(\frac{0.466}{R \cdot \cos \alpha} \right)$

R : 線の半径

3) 電算機計算においては、希望波電界強度は直接波と地上反射波との2ルートを考慮した。また、妨害波電界強度の計算においても地上反射波を考慮して数値積分を行なった。

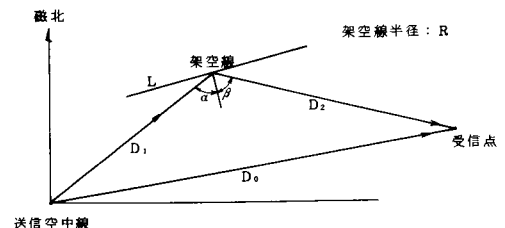


図 5.1 架空線反射諸元図

5.4.2 近似式

1) (11)式は、電算機を用いて数値計算を行なうと精度のよい解がえられる。しかし、大略の誤差を手計算により求めることが必要なときもあるので、図 5.2 に示されるような配置を考え、下記の条件のもとに解いた近似式を用いた。

- (ア) 架空線は地面に平行で無限長とする。
- (イ) 大地反射係数は -1 とする。
- (ウ) 反射波計算は、鏡面反射点附近に限定する。

$$A = M \cdot \sin \theta_4 \cdot \frac{R_F}{D_F} \quad (12)$$

上式中の諸量は次のとおりである。

$$M = \frac{145 L_F}{2 D_1 Z_0} \quad \dots\dots\dots (\text{係数})$$

$$R_F = \sin\left(\frac{KHh}{D_1}\right) \cdot \sin\left(\frac{KhZ}{D_2}\right) \quad (\text{反射波の垂直パターン})$$

$$D_F = \sin\left(\frac{KHZ}{D_0}\right) \quad \dots\dots\dots (\text{直接波の垂直パターン})$$

$$\sin C(x) = \sin(x)/x$$

L_F : 架空線上の第 1 フレネルゾーン巾

2) 近似式による誤差計算値も後出の図中に○印で記入した。

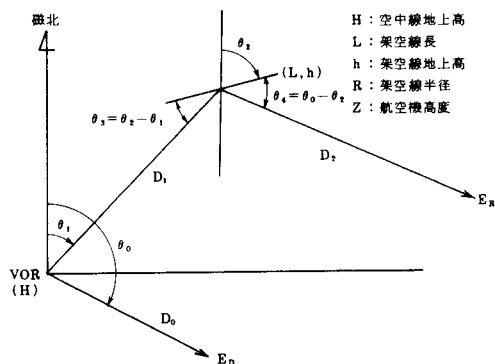


図 5.2 近似式諸元図

5.5 スケールモデル実験

5.5.1 実験概要

架空線誤差計算プログラムにおいて、妨害波電界強度と希望波電界強度との比 A の計算を確認するため、3.5 と同様に、当所電波無響室で ILS ローカライザスケールモデルを用いて実験を行なった。

本装置のコース偏位は(9)式で表わされるので、VOR 誤差計算プログラム内で計算した A の値を(9)式に代入して偏位を計算し、これを実測値と比較した。

5.5.2 実験結果

1) 図 5.3 に、架空線反射によるコース偏位の電算

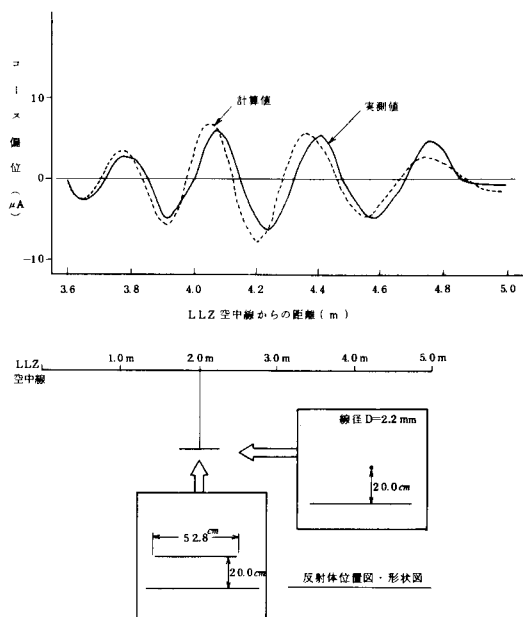


図 5.3 ローカライザスケールモデル実験

機計算値と実測値を示す。偏位の大きさ、周期ともほぼ一致したので、架空線に対する A の計算の近似のよさが確認できた。

5.6 飛行実験

5.6.1 秋田 D-VOR

1) VOR 位置および実験用架空線の位置、形状を図 5.4 に示す。

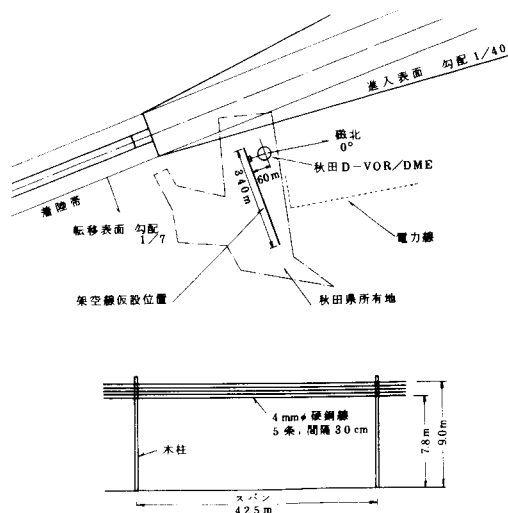


図 5.4 秋田 D-VOR 架空線実験

2) 図 5.5 に、1 条の架空線による反射誤差の電算機計算値と実測値を示す。測定は、秋田VOR/DME を中心として半径 4 マイル、高度 1,700 フィートのオービット飛行により行なった。

3) 図 5.6 に 5 条の架空線による反射誤差の電算機計算値と実測値を示す。飛行条件は 2) と同じである。

4) 図 5.5 および図 5.6 では、計算値と実験値との間にかなりの差があった。この差の原因としては下記のものが考えられる。

(ア) 130 度から 30 度の方位には、VOR から約 500m の位置に 20～30m の丘があること。

(イ) 地面が砂地であること。

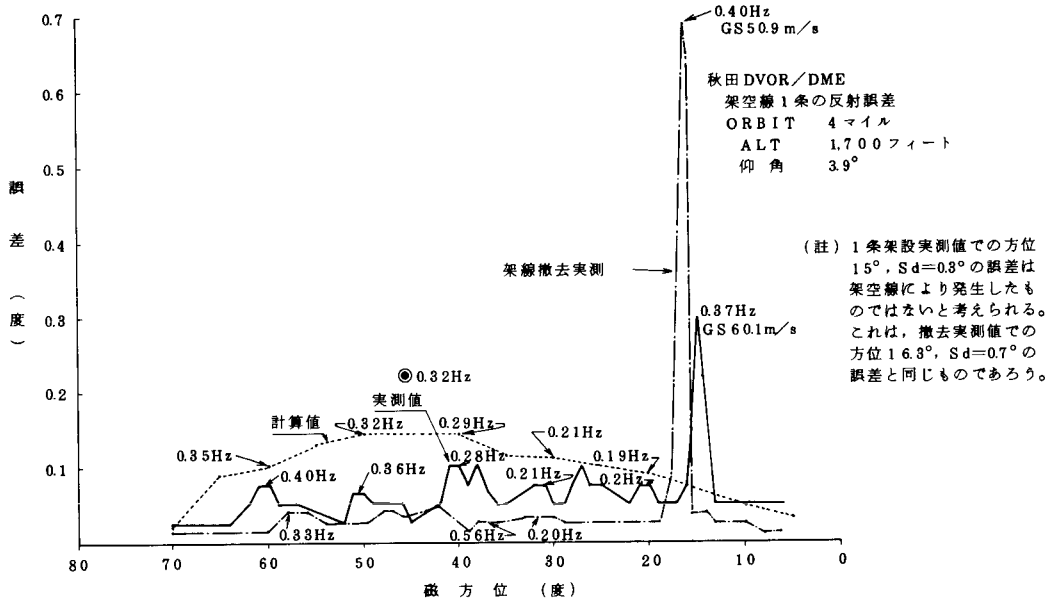


図 5.5 秋田D-VOR (1 条)

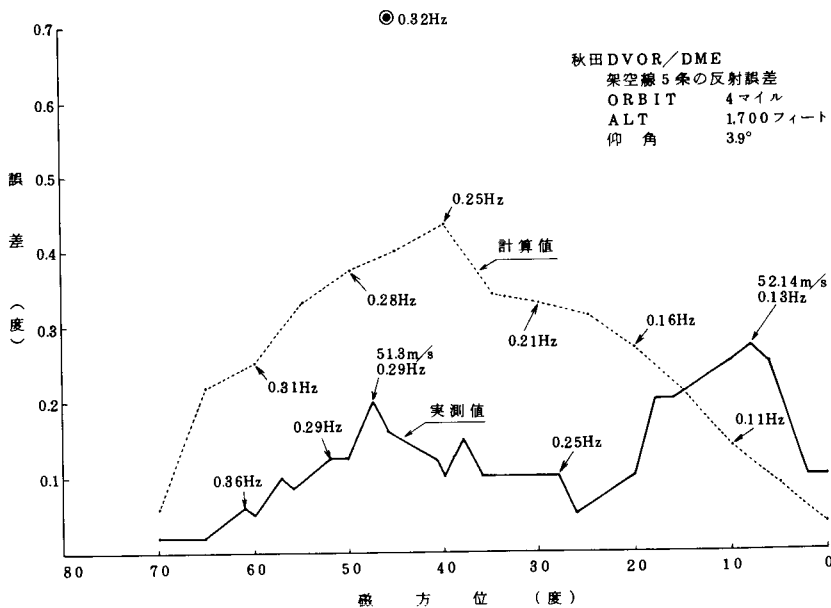


図 5.6 秋田D-VOR (5 条)

(ウ) オービット半径が4マイルと小さく、かつ飛行高度も低かった事に加え、気流の乱れもあったため、オービット飛行の半径および高度が指定の値とならなかったこと、並びに、飛行姿勢の変化に伴う受信パターンの変化があったこと。

5) 秋田D-VORを利用しての実験の結果、D-VORに対しては、中心から60mしか離れていない悪い条件においても誤差は実用上全く問題とならない程小さいということが確認できた。

5.6.2 FAA C-VOR

1) 図5.7は、FAA VOR/VORTAC SITING CRITERIAの実測値に、当所で行った電算機計算値を記入したものである。

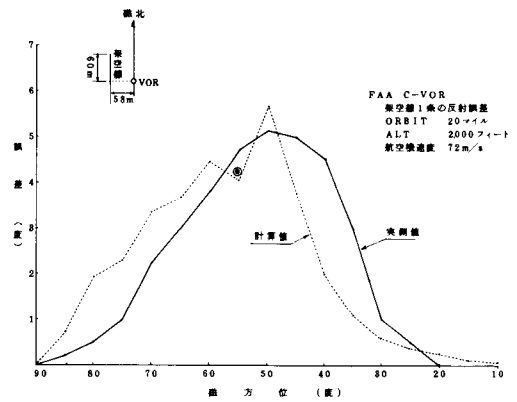


図5.7 FAA C-VOR (1条)

5.7 架空線による誤差パターンの特徴

架空線による誤差パターンは、表6の特徴をもつことがわかった。

5.8 架空線による誤差の軽減対策

軽減対策は、表7のとおりとなる。

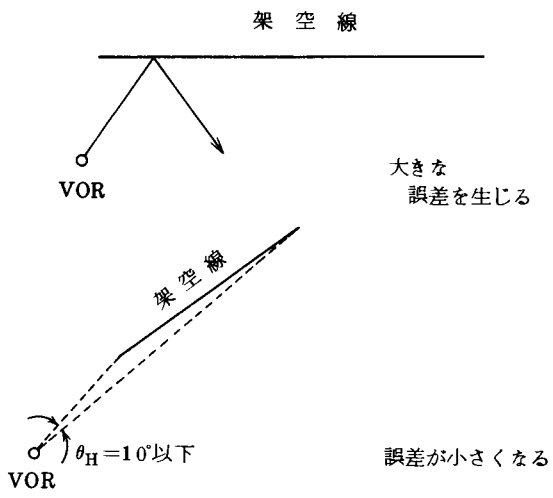
表6 架空線による誤差のパターン

誤差 種別	VOR 型式	説明	誤差のパターン
架空線 反射方向 誤差	D-VOR	① 架空線による反射方向に小さな誤差ローブが発生する。 ② 上記誤差ローブのピークは、VOR電波の架空線への入射角θ_sが$4.3^\circ, 9.9^\circ, 15.7^\circ, 21.6^\circ, 27.8^\circ, 34.3^\circ, 41.4^\circ, 49.4^\circ, 58.9^\circ, 71.5^\circ$のそれぞれに等しい反射角方向に現われる。比反射強度Aが一定と仮定すれば、このうち、入射角34.3°の場合の誤差ローブが最大値となる。 ③ 上記誤差ローブのナルは、入射角θ_sが$0^\circ, 6.9^\circ, 12.7^\circ, 18.5^\circ, 24.6^\circ, 31.0^\circ, 37.8^\circ, 45.3^\circ, 54.1^\circ, 65.2^\circ$及び$90^\circ$のそれぞれに等しい反射角方向に現われる。	水平面
	C-VOR	① 架空線による反射方向に大きな誤差ローブが発生する。 ② ①の誤差ローブは、架空線の①②部分からの反射により発生する。	

表 6 架空線による誤差のパターン

誤差 種類	VOR 型式	説 明	誤 差 パ タ ー ン
		③ ⑧の誤差ローブは、架空線の⑥⑦部分からの反射により発生する。 ④ 比反射強度Aが一定と仮定すれば、上記誤差ローブのピークはVOR電波の架空線への入射角θ_sが55°に等しい反射角方向に現われる。 ⑤ 上記誤差ローブのナルは、入射角θ_sが0°、90°及び180°のそれぞれに等しい反射角方向に現われる。 ⑥ 架空線が⑥⑦の部分しかない場合には、⑧の誤差ローブしか発生しない。	
	D-VOR C-VOR 共 通	航空機の仰角 (θ_z) に伴って、誤差は振動的に変化する。	垂直面

表 7 架空線に対する誤差の軽減対策

対策項目	効 果	説 明
1. 距離 D_1 をはなす	◎	誤差は距離 D_1 の3/2乗に反比例する。
2. 地上高 h を低くする	◎	誤差は、地上高 h の2乗に比例する。
3. 向きを変える	◎	VOR近傍で、特に大きな誤差発生の原因となっている架空線部分の向きを、VORからの角度θ_Hが10°以下となるよう変更する。 
4. 地下埋設とする	◎	VOR近傍で特に大きな誤差の発生原因となっている架空線を地下埋設とする。
5. 誤差打消し用架空線を用いる	□	既設架空線からの反射電界を打消すための架空線を適切な間隔で平行に張る。 架空線が多条のときは、複雑であり効果が期待できない。

5.9 架空線による誤差のまとめ

- 1) 誤差計算プログラムは、スケールモデル実験ではほぼ一致した。
- 2) 飛行実験の結果では、電算機計算値と実測値との間にかなりの差があったので、今後さらに検討を行いたい。

6. 海面による誤差

6.1 概 要

- 1) VOR空中線から海面への見通しがあり、かつ、

空中線の海面からの高さが 10 m 以上となるときには、直接波と海面反射波が干渉して、垂直面内指向性に電界強度の極端に低下したナルができる。このようなナル点では電界強度が最低受信強度($90\text{ }\mu\text{V/m}$ 又は -107 dBm/m^2)以下となって使用不能となったり、又は、最低受信強度以上であっても、周辺の建物や架空線からの妨害波により方位誤差が大きくなり使用不能となることがある。

- 2) 我国で運用中のVORのうち、海面反射が原因で通用制限が付されていると思われるものの名称および制限内容を表8に示す。なお、AIP(航空路誌)

表 8 海面反射による運用制限

局 名	空中線海拔高／地上高	A I P (航空路誌) 記載制限事項
御 宿 C-VOR	101.7m／1.37m	172° , 30～32NM, 3000FT 以下 223° , 30～34NM, 3000FT 以下
いわき D-VOR	159.1m／8.1m	135° , 18～27NM, 3000FT 以下

に記載されているこれらの制限は、運用を目的とした特定のラジアルおよびオービットで行なった航空局の飛行検査に基づいているものであるから、検査対象以外の部分において制限がないことを意味していないことに注意する必要がある。

6.2 誤差計算式

6.2.1 VOR 周辺に障害物があるとき

VOR の周辺に、建物、鉄塔、架空線などの電波反射（回折）体があるときには、3.～5.でのべた方法で海面上での方位誤差を計算できる。図 6.1 に、御宿 VOR のタカン鉄塔の位置に反射体があると仮定したときの電算機計算値と実測値を示す。両者の傾向は似ている。このことから、海面反射のナル点での誤差の原因は、VOR 周辺の障害物であることが推察できる。

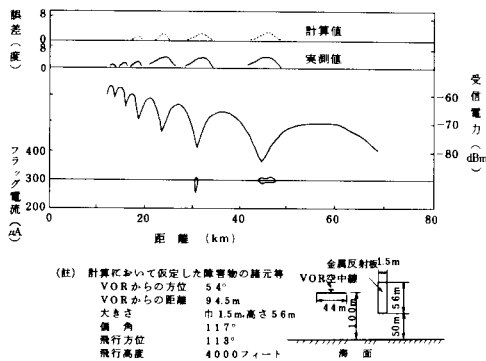


図 6.1 御宿 C-VOR の周辺に障害物を仮定したときの方位誤差

6.2.2 VOR 周辺に障害物がないとき

VOR の周辺に顕著な障害物がないときでも、海面反射によるナル点において方位誤差が生じることがある。この様なときには、後に 6.5 でのべる飛行実験結

果から求めた(13)式により大略の誤差を計算できる。なお、ここで求める誤差は、平均化した VOR コースからのずれを示す相対誤差である。

$$S = K \times G \times (T - G) \quad (\text{度}) \quad (13)$$

ここで、上式中の諸量は次のとおりである。

$$K: \begin{cases} 3.12 \times 10^{-3} & \dots\dots \text{C-VOR} \\ 1.25 \times 10^{-3} & \dots\dots \text{D-VOR} \end{cases}$$

$$T: \text{合成電力密度} \quad (\text{dBW/m}^2)$$

$$G: \text{合成電力密度の包絡値} \quad (\text{dBW/m}^2)$$

図 6.2 に概略の誤差パターンを、図 6.3 に(13)式による計算値と実測値を示す。

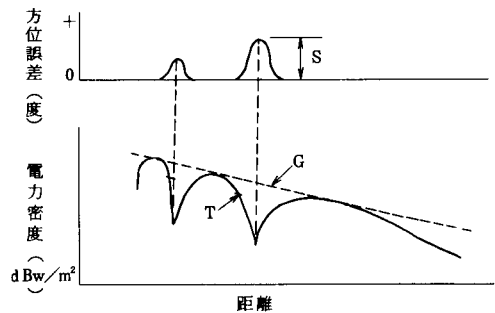


図 6.2 受信電力密度と誤差の距離パターン

6.3 海面反射計算モデル

6.3.1 総合モデル

図 6.4 に示すように、カウンターポイズの中心 O 点に垂直面指向性 $D(\theta)$ の空中線があるものと仮定し、直接波電界と海面反射波電界とを合成した。ここで、 $D(\theta)$ は丘を含めたカウンターポイズ付空中線の垂直面指向性を示す。また、海面は球面とし、球面発散係数も考慮した。

6.3.2 $D(\theta)$ の計算

図 6.5 のモデルを用いて、上記の各伝搬路を経由する入射波によりアルフォード空中線に誘起される電流を、O 点を位相基準点としてベクトル合成することにより、丘を含めたカウンターポイズ付空中線の垂直面

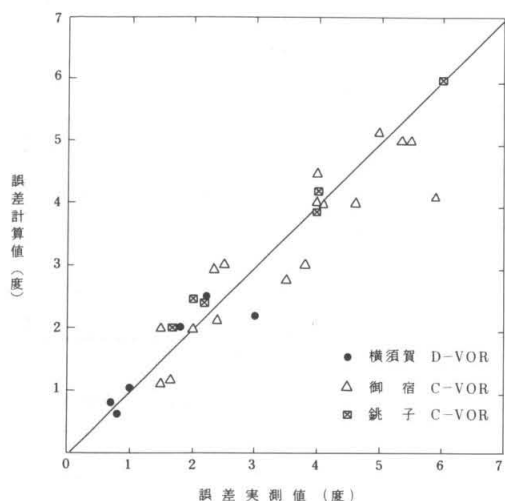


図 6.3 海面反射による誤差の実測値と計算値の比較

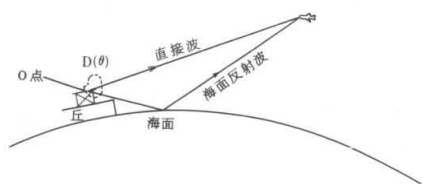


図 6.4 総合モデル図

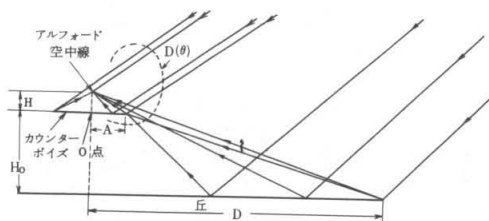


図 6.5 $D(\theta)$ の計算図

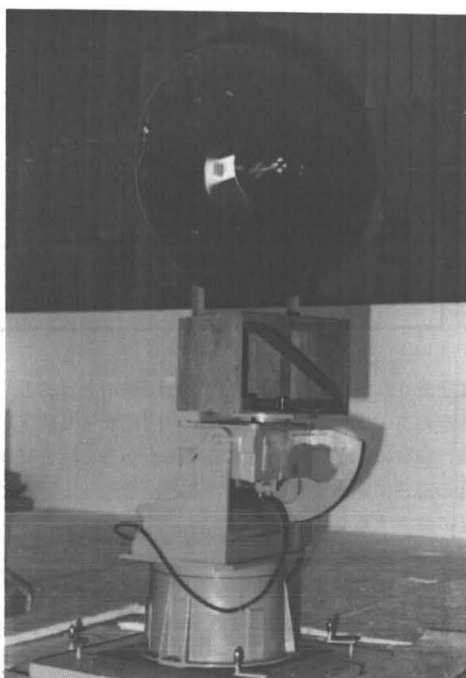
指向性 $D(\theta)$ を計算した。カウンターボイズ付アルフォード空中線の垂直面指向性の計算方法を付録 2 に示す。

6.4 スケールモデル実験

1) 丘を含むカウンターボイズ付空中線の垂直面指向性 $D(\theta)$ の電算機計算プログラムを確認するため、当所電波無響室において図 6.6 に示すようなスケールモデル(縮尺約 $1/10$)を用いて実験した。

2) 実験に用いたアルフォード空中線の水平面指向性は 0 ± 1 dB 以内の円であった。図 6.7 に垂直面指向性の実測値と計算値を示す。計算値は、垂直面指向性(電界比)を $\cos \theta$ としている。

3) 図 6.8 に、カウンターボイズ付アルフォード空



$F=1120\text{ MHz}$ $A=15\text{ cm}$ $D=50\text{ cm}$
 $H=18.5\text{ cm}$ $H_0=11.5\text{ cm}$

図 6.6 スケールモデル実験

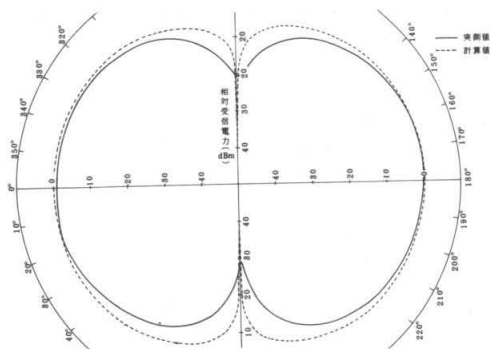


図 6.7 実験用アルフォード空中線垂直面指向性

中線の垂直面指向性の電算機計算値と実測値を示す。また、図 6.9 に、2 段カウンターボイズ付のときの垂直面指向性の計算値と実測値を示す。この実験は、図 6.8 の空中線とカウンターボイズとの間に、カウンターボイズを一枚挿入したものであり、仰角 50 度附近の 패턴の落込みが軽減されている。

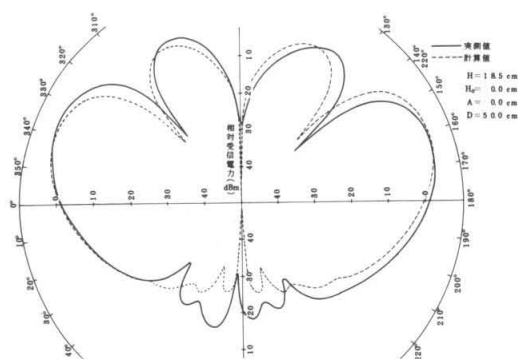


図 6.8 カウンターボイズ付アルフォード空中線垂直面指向性

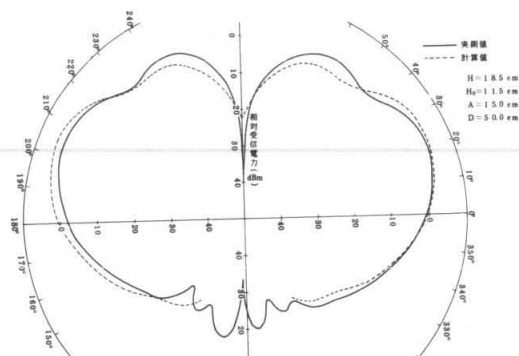


図 6.9 2 段カウンターボイズ付アルフォード空中線垂直面指向性

6.5 飛行実験

6.5.1 銚子実験用 C-VOR

1) 海面反射による障害データを収集するため、千葉県銚子市三崎町の屏風ヶ浦に面した海拔約 45 m の崖の上に移動型 C-VOR を仮設して飛行実験を行った。

図 6.10 に仮設位置図を、図 6.11 に仮設写真を示す。実験は、C-VOR 仮設位置を、崖から 20 m、60 m、100 m と変化させ、当所のビーチ 99 を用いて受信電力、コース偏位、フラッグ電流を記録した。なお、飛行高度は、1,000 フィート、2,000 フィート、4,000 フィートとした。

2) VOR から崖までの距離を変化したとき

(1) VOR から崖までの距離を 20 m、60 m、100 m と変化したときの受信電力と、方位誤差の電算機計算値と実測値を図 6.12 に示す。崖までの距離が大きくなるに従って、受信電力パターンは平滑化され、方位誤差も小さくなっている。

(2) 図 6.13 に、崖までの距離を変化したときの

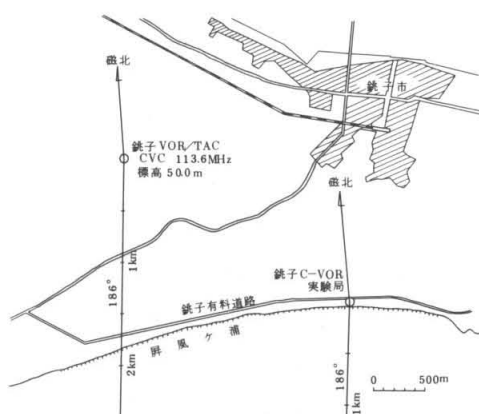


図 6.10 銚子 C-VOR 実験局、銚子 D-VOR 位置図

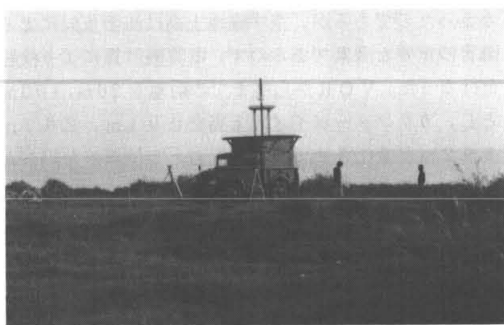


図 6.11 銚子 C-VOR 仮設写真

崖を含めたカウンターボイズ付空中線の垂直面指向性の電算機計算値を示す。崖までの距離が大きくなるに従って、放射パターンの仰角 0 度附近の勾配が小さくなり、シャープカットオフのパターンとなるので、直接波と海面反射波のレベル差が大きくなり、ナル点での電界の落ちこみが軽減されることになる。

また、崖までの距離が大きくなるに従って、受信電界は次第に低下するが、後に 4) で のべる空中線地上高の変化に伴うものよりはゆるやかとなる。

3) 飛行高度を変化したとき

(1) 図 6.14 は、崖から VOR までの距離を 20 m、カウンターボイズ地上高を 2.67 m として、飛行高度を 1,000 フィート、2,000 フィート、4,000 フィートと変化したときの電算機計算値と実測値を示す。

飛行高度が高くなるに従って、同一次数のナルとの遭遇点は遠方へ移り、かつ、ナル点での方位誤差が大きくなっている。

4) 空中線地上高を変化したとき

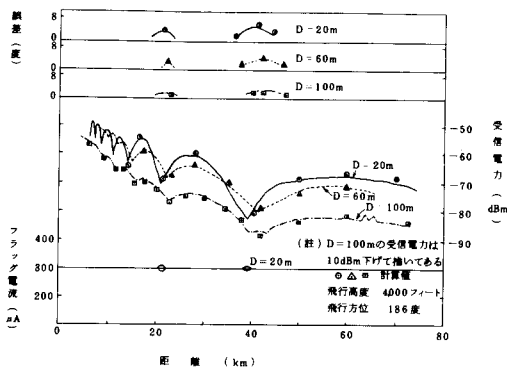


図 6.1 2 銚子C-VOR (VORから崖までの距離 Dを変えたとき)

銚子の実験では、VOR空中線の地上高は変化させなかったのであるが、空中線地上高は海面反射による障害の重要な要素であるので、電算機計算により検討を行なった。VORから崖までの距離を20m, 100mとし、カウンターポイズ地上高を0.01m, 2.67m, 5.92mと変化させて、受信電力と方位誤差を調べた。

(1) 崖までの距離が20mのとき

図 6.1 5に、受信電力および方位誤差の電算機計算値を示す。カウンターポイズ地上高が2.67mのときは実測値も記入した。カウンターポイズ地上高を高くすると方位誤差が大きくなることがわかる。

図 6.1 6に、丘を含んだカウンターポイズ付空中線の垂直面指向性の電算機計算値を示す。カウンターポイズ地上高が大きくなるに従い、急激に低仰角の放射が大きくなることがわかる。

(2) 崖までの距離が100mのとき

図 6.1 7は、崖までの距離が100mの位置においてカウンターポイズ地上高を変化したときの、電算機計算値を示す。カウンターポイズ地上高が2.67mのときは実測値も記入した。カウンターポイズ地上高を大きくすると、受信電力は大きくなるが、方位誤差はほとんど変化しないことがわかる。

図 6.1 8に、丘を含んだカウンターポイズ付空中線の垂直面指向性の電算機計算値を示す。カウンターポイズ地上高を変化すると、仰角0度附近の放射の大きさは変化するが、勾配はほとんど変化しない。従ってこのようなときには、受信電力は低下するが、ナル点での方位誤差はほとんど変化しないことが予想されることになる。

(3) 結局、空中線地上高の変化に伴う、方位誤差の変化は、崖までの距離が20mと小さいときは著しいが、崖までの距離が100mと大きくなると、ほ

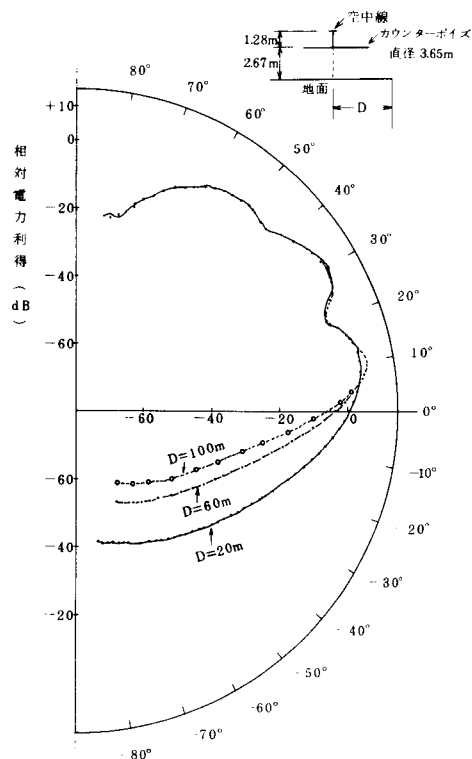


図 6.1 3 崖までの距離と垂直面指向性 (計算値)

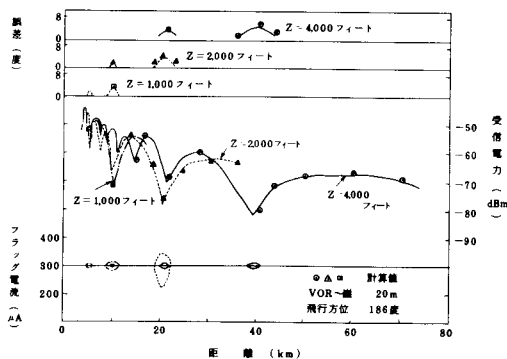


図 6.1 4 銚子C-VOR (飛行高度 Zを変化したとき)

とんど一定となってしまうことがわかる。

5) 崖の高さを変化したとき

銚子の実験では、崖の高さは45mであったが、崖の高さを変化した場合の障害の傾向を調べるため、電算機計算により検討を行なった。

図 6.1 9に、VORから崖までの距離を20mとして、崖の高さを10m, 45m, 100mと変化したときの電算機計算値を示す。なお、崖の高さが45m

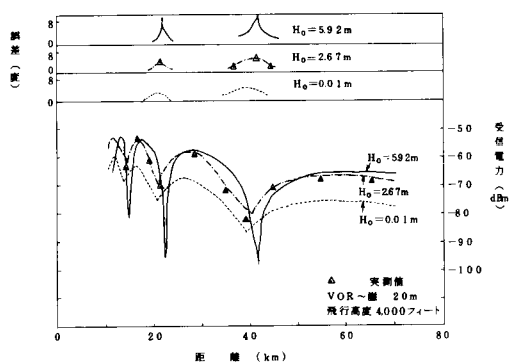


図 6.15 銚子C-VOR (崖から20mの点で、カウンターボイズ地上高 H_0 を変化したとき)

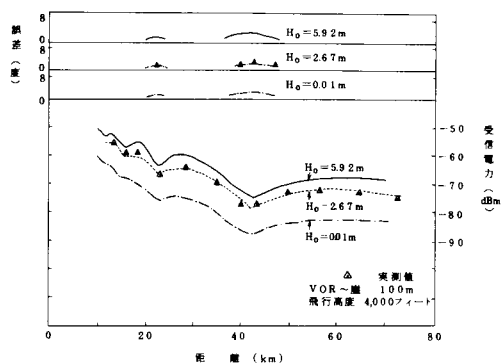


図 6.17 銚子C-VOR (崖から100mの点で、カウンターボイズ地上高 H_0 を変化したとき)

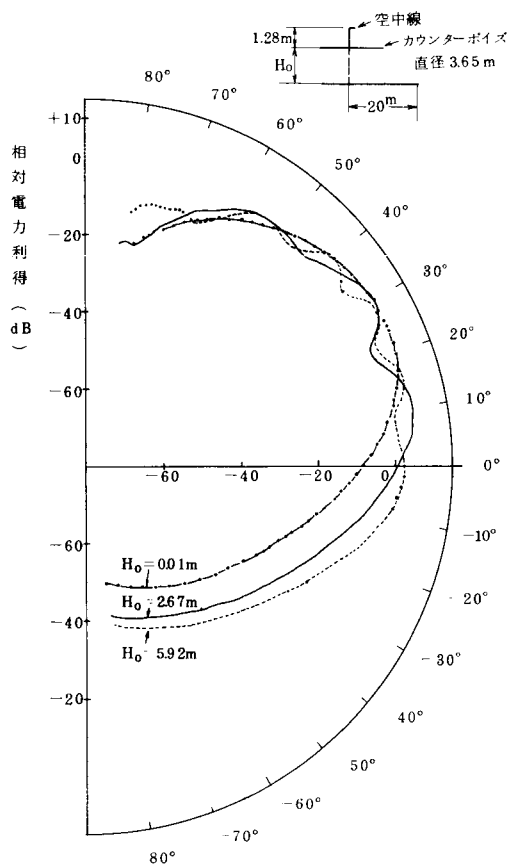


図 6.16 カウンターボイズ地上高と垂直面指向性 (崖までの距離を20mとしたときの計算値)

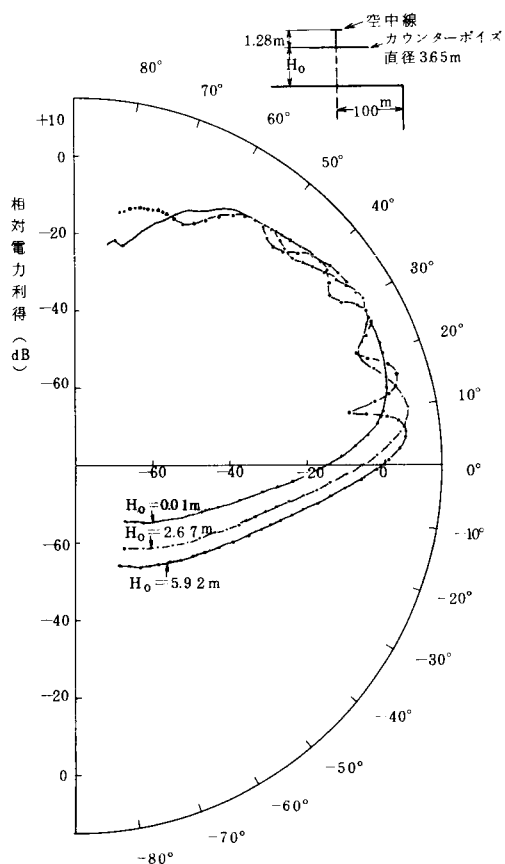


図 6.18 カウンターボイズ地上高と垂直面指向性 (崖までの距離を100mとしたときの計算値)

のときは、実測値も記入した。崖が高くなるに従って、同一次数のナルとの遭遇点は遠方へ移り、かつ、方位誤差は少し大きくなることがわかる。

6.5.2 銚子D-VOR

1) VORの位置は、さきの図6.10に示す。当VORは、海岸から約1km陸地に入った標高約50mの平坦な大地上に設置されており、周辺に顕著な障害物はない。カウンターボイズの直径は50m、地上

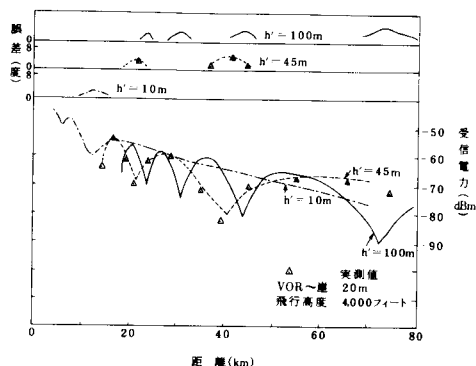


図 6.19 銚子C-VOR (崖の高さ h' を変化したとき)

高は 15 m である。

2) 図 6.20 に 186 度方位の受信電力の電算機計算値と実測値を示す。実測では、方位誤差、フラッグ電流ともに乱れはほとんどなかった。

また、計算でも方位誤差は現れない。

3) 当 VOR とほとんど同じ海拔高の、6.5.1 の銚子C-VOR 仮設実験および 7.4.2 の長崎D-VOR の飛行実験結果と比較すると、当 VOR の設置位置が優れていることがわかる。

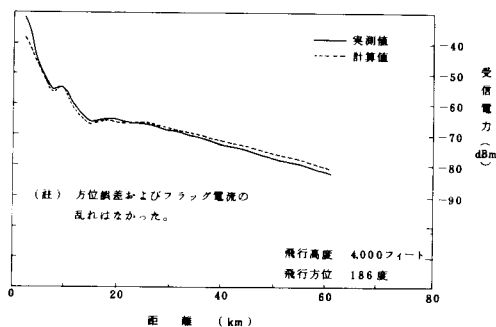


図 6.20 銚子D-VOR (186 度方位)

6.5.3 御宿C-VOR

1) 図 6.21 に、VOR 位置および飛行方位を示す。当 VOR は、海に面した標高 100 m の山頂に設置されている。

2) 図 6.22 に 210 度方位の、図 6.23 に 130 度方位の受信電力と方位誤差の電算機計算値と実測値を示す。130 度方位は 210 度方位に比べ、受信電力が 2～3 dB 高くなっている。これはカウンターポイズの広さが、130 度方位は半径 22 m、210 度方位は半径 42 m であることが原因と思われる。

41 km 附近のナル点において、4～6 度の大きな

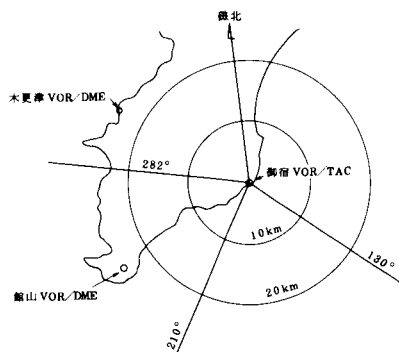


図 6.21 御宿C-VOR 位置図

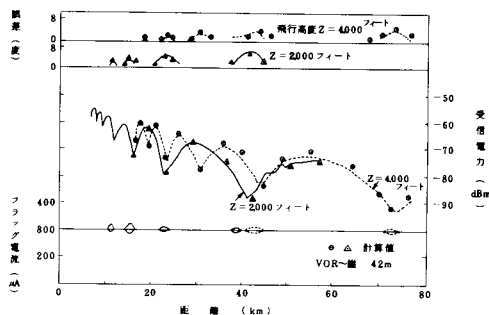


図 6.22 御宿C-VOR (210 度方位)

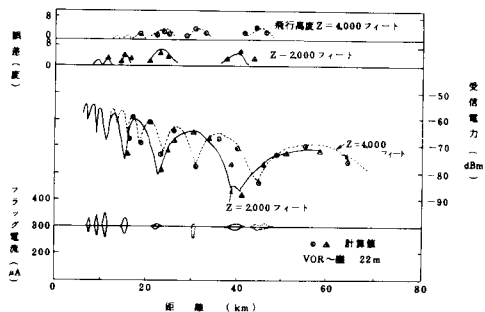


図 6.23 御宿C-VOR (130 度方位)

方位誤差が現れているが、フラッグ電流は $290 \mu A$ で僅かしか変化していない。山岳上空においては、フラッグ電流が広範囲にわたって大きく低下することと対照的である。

3) 図 6.24 に 282 度方位の電算機計算値と実測値を示す。この方位は陸上となるため、海上において測定された様な受信電力の干渉パターンは現われていない。計算では、大地反射係数を -0.1 としている。

6.5.4 横須賀D-VOR

1) 図 6.25 に、VOR 位置および飛行方位を示す。

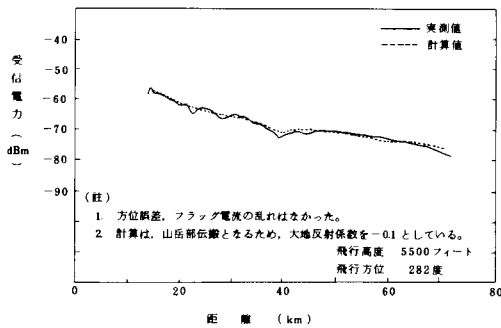


図 6.2.4 御宿C-VOR (282度方位)

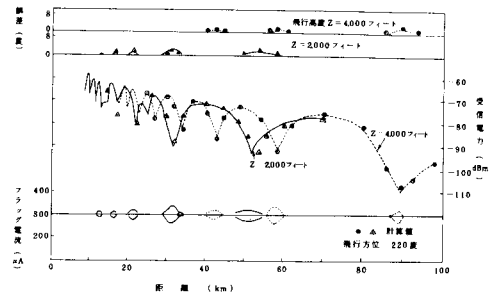


図 6.2.6 横須賀D-VOR (220度方位)

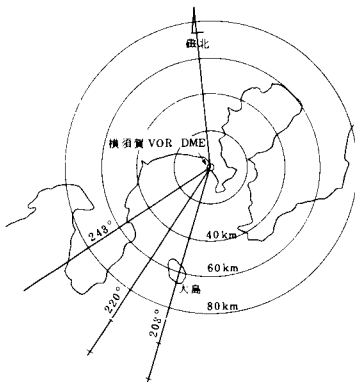


図 6.2.5 横須賀D-VOR位置図

当VORは、海に面した標高約140mの山頂に設置されており、周辺に顕著な障害物はない。なお、カウンターポイズの直径は50m、地上高は4mである。

2) 図 6.2.6 に、220度の海上方向の受信電力と

方位誤差の電算機計算値と実測値を示す。

本図と、図 6.2.2 および図 6.2.3 の御宿C-VOR の記録とを比較すると、海面反射のナル点での方位誤差に対しても、D-VORはC-VORより優れていることがわかる。

6.6 海面反射による障害の特徴

障害は、表 9 の特徴をもつことがわかった。

6.7 海面反射による障害の軽減対策

軽減対策は、表 10 のとおりとなる。

6.8 海面反射による障害のまとめ

海に面した崖の上に設置したVORの受信電力および方位誤差を、送信電力、カウンターポイズの直径および地上高、VORから崖までの距離、崖の高さ、航空機までの距離、飛行高度を関数として計算することがある程度できることとなった。

表 9 海面反射による障害の特徴

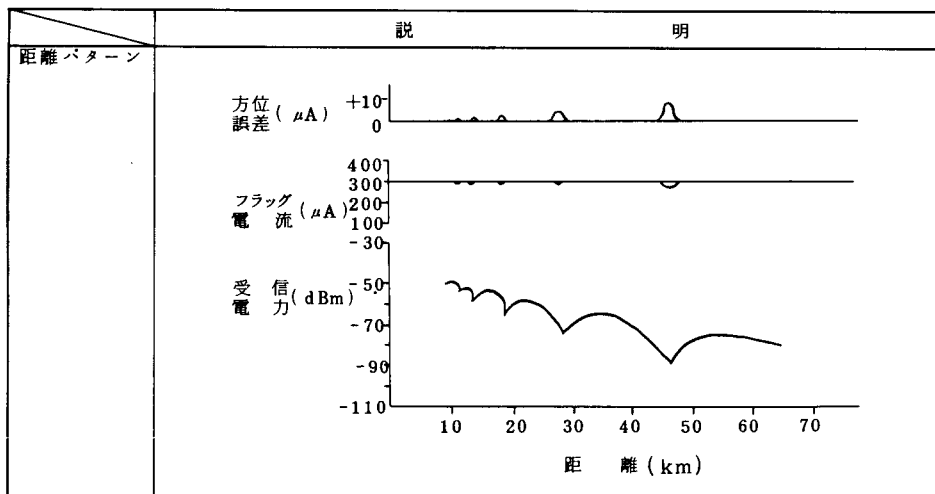
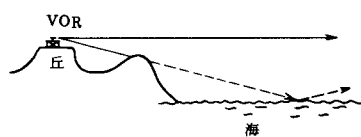


表9 海面反射による障害の特徴(続き)

	説 明																															
方 位 誤 差	(1) ナル点において、大きな方位誤差を生じる。例えば、御宿C-VOR 210', 4000', 72 km においては、6度(12度P-P)もの誤差が記録された。 (2) ナルの次数が低い程、誤差は大きい。従って同一高度でのラジアル飛行では、遠くなる程誤差は大きくなる。 (3) 飛行高度が高くなる程、同一次数のナルとの遭遇点が遠方へ移動するとともに、誤差も大きくなる。 (4) VORから崖までの距離が大きくなる程、誤差は小さくなる。 (5) 崖までの距離が近いときは、空中線地上高を低くすると誤差は著しく減少する。しかし、崖までの距離が遠いときには、空中線地上高の変化に伴う誤差の変化は殆んどない。 (6) 崖の高さ、若しくは空中線海拔高が高くなる程、同一次数のナルは遠方へ移動するとともに、誤差も若干大きくなる。 (7) 当該飛行方向へ、周辺の障害物からの顕著な妨害方位信号が到来するときには、ナル点において極めて大きな誤差を生じることとなる。 (8) D-VORよりC-VORの方が誤差は大きくなる。																															
フ ラ ッ グ 電 流	(1) ナル点において、フラッグ電流の低下を生じるが、240 μ A の許容値以下となることは殆んどない。																															
受 信 電 力	(1) 直接波と海面反射波との干渉により距離パターンに周期的な干渉じまを生じる。 (2) ナル点においては、電界強度が低下し、最低受信強度の90 μ V/m 又は-107 dBm/m ² 以下となり、使用不能となることがある。 (3) 定格出力が同じ場合、D-VORの方がC-VORより受信電力は低くなる。 <table><tr><th>VOR方式</th><th>定格出力(W)</th><th>空中線輻射電力(W)</th></tr><tr><td rowspan="5">D-VOR</td><td>200</td><td>70</td></tr><tr><td>23 dBW</td><td>18.5 dBW</td></tr><tr><td>100</td><td>3.5</td></tr><tr><td>20 dBW</td><td>15.4 dBW</td></tr><tr><td>50</td><td>1.7</td></tr><tr><td></td><td>17 dBW</td><td>12.3 dBW</td></tr><tr><td rowspan="5">C-VOR</td><td>200</td><td>140</td></tr><tr><td>23 dBW</td><td>21.5 dBW</td></tr><tr><td>100</td><td>70</td></tr><tr><td>20 dBW</td><td>18.5 dBW</td></tr><tr><td>50</td><td>3.5</td></tr><tr><td></td><td>17 dBm</td><td>15.4 dBW</td></tr></table>	VOR方式	定格出力(W)	空中線輻射電力(W)	D-VOR	200	70	23 dBW	18.5 dBW	100	3.5	20 dBW	15.4 dBW	50	1.7		17 dBW	12.3 dBW	C-VOR	200	140	23 dBW	21.5 dBW	100	70	20 dBW	18.5 dBW	50	3.5		17 dBm	15.4 dBW
VOR方式	定格出力(W)	空中線輻射電力(W)																														
D-VOR	200	70																														
	23 dBW	18.5 dBW																														
	100	3.5																														
	20 dBW	15.4 dBW																														
	50	1.7																														
	17 dBW	12.3 dBW																														
C-VOR	200	140																														
	23 dBW	21.5 dBW																														
	100	70																														
	20 dBW	18.5 dBW																														
	50	3.5																														
	17 dBm	15.4 dBW																														
	(注1) 受信電力と電力密度 当所のピーチ99の測定系では、航空機がVORに向って飛行しているとき、-107 dBm/m ² の最低受信電力密度においては、-120 dBmの受信電力を表示することが、計算と実験により確かめられた。																															
共 通	(1) 航空機が同一高度でラジアル飛行を行なう場合はナルを横切ることとなるので、障害をうける時間は短くなる。また、飛行高度が高い程、障害時間は長くなる。 (2) しかしながら、航空機が上昇又は下降する場合で丁度ナルに沿って飛行する場合には、障害時間は長くなる。従って、2°~4°で上昇、下降を行なう空港用VORにおいては重大な障害となるおそれがある。  (3) 電界強度、方位誤差の大きさは、送信電力、カウンターポイズの直径および地上高、VORから崖までの距離、崖の高さ、VORから航空機までの距離、飛行高度等の関数であり、更に、周辺の建物、鉄塔、架空線等の障害物の巾、長さ、高さ、距離、向き等の関数となっている。																															

表 1.0. 海面反射による障害の軽減対策

対 策 項 目	効果	説 明																								
1. 空中線海拔高を低くする。	◎	低仰角においてナルが発生しない様に空中線海拔高を15m以下とする。 (実 例) <table border="1"> <thead> <tr> <th>施 設 名</th><th>空中線海拔高(m)</th><th>地上高(m)</th><th>備 考</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>秋 田</td><td>12.77</td><td>8.27</td><td></td></tr> <tr> <td>羽 田</td><td>3.8</td><td>1.8</td><td></td></tr> <tr> <td>木 更 津</td><td>7.67</td><td>4.67</td><td></td></tr> <tr> <td>稚 内</td><td>11.27</td><td>8.27</td><td></td></tr> <tr> <td>那 覇</td><td>8.97</td><td>1.27</td><td></td></tr> </tbody> </table>	施 設 名	空中線海拔高(m)	地上高(m)	備 考	秋 田	12.77	8.27		羽 田	3.8	1.8		木 更 津	7.67	4.67		稚 内	11.27	8.27		那 覇	8.97	1.27	
施 設 名	空中線海拔高(m)	地上高(m)	備 考																							
秋 田	12.77	8.27																								
羽 田	3.8	1.8																								
木 更 津	7.67	4.67																								
稚 内	11.27	8.27																								
那 覇	8.97	1.27																								
2. VORを崖から離す。	◎	海面反射波を小さくするため、VORを崖から離して、出来るだけ内陸部に設置する。 (実 例) <table border="1"> <thead> <tr> <th>施 設 名</th><th>空中線海拔高 (m)</th><th>地上高(m)</th><th>備 考</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>銚 子</td><td>66.27</td><td>16.27</td><td>崖から約1km内陸に設置</td></tr> </tbody> </table>	施 設 名	空中線海拔高 (m)	地上高(m)	備 考	銚 子	66.27	16.27	崖から約1km内陸に設置																
施 設 名	空中線海拔高 (m)	地上高(m)	備 考																							
銚 子	66.27	16.27	崖から約1km内陸に設置																							
3. 海面反射波防止丘を用いる。	○	VOR設置位置を高くせざるを得ない場合に、VORと海面との間に丘がくる様に位置を選定する。  (実 例) <table border="1"> <thead> <tr> <th>施 設 名</th><th>空中線海拔高 (m)</th><th>地上高(m)</th><th>備 考</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>館 山</td><td>185.27</td><td>8.27</td><td></td></tr> </tbody> </table>	施 設 名	空中線海拔高 (m)	地上高(m)	備 考	館 山	185.27	8.27																	
施 設 名	空中線海拔高 (m)	地上高(m)	備 考																							
館 山	185.27	8.27																								

7. 山岳による障害

7.1 概 要

7.1.1 山岳による障害の原因

1) 山岳による見通し遮蔽

VOR空中線と航空機間の見通しが山岳によって遮蔽されると、電界強度が最低受信強度($90 \mu V/m$ 又は $-107 \text{ dBm}/m^2$) 以下となり、VORが使用不能となる。

2) 山岳反射波による障害

航空機が山岳近辺や上空を通過するとき、図 7.1 に示すように、建物反射による障害と同様に、山岳反射波は大きな方位誤差を生じ、さらに、フラッグ電流の著しい低下を生じる。

7.1.2 AIP記載例

表 1.1 に、山岳により制限が付されていると思われるVORの名称および制限内容を示す。現在我国で運用中の施設で、AIP(航空路誌) に制限が付されているもののほぼ半数が、山岳による障害であると考えられる。

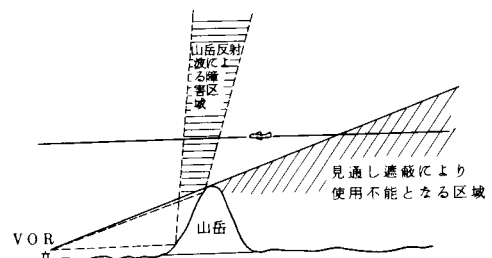


図 7.1 山岳による障害

7.2 誤差・フラッグ電流計算式

7.2.1 単一の山岳の場合

図 7.2 に示すように、海面又は地面上に、山腹面が平坦な単一の山岳があるときは、次に示す計算式により大略の方位誤差およびフラッグ電流を計算できる。

1) 方位誤差計算式

$$S = K \times G \times (T - G) \quad (\text{度}) \quad (4)$$

ここで、上式中の諸量は次のとおりである。

$$K : \begin{cases} 3.12 \times 10^{-3} & \dots\dots\dots C - VOR \\ 1.25 \times 10^{-3} & \dots\dots\dots D - VOR \end{cases}$$

表 1 1. 山岳障害一覧表

局 名	使用制限区間	推 定 原 因
函 館 D-VOR	使用不能 023° 6~8NM, 30NM以上 6000FT以下 105° 3~4NM 183° 24~26NM 206° 36~39NM	6~8NM 松山(663m), 三森山(842m) 山岳反射 30NM以上 三森山(842m) による見通し外 気無山(415m) 山岳反射 下北半島 荒沢岳(672m), 大作山(776m) 山岳反射 津軽半島 袴腰岳(707m) 山岳反射
青 森 C-VOR	使用不能 110°~150°	八甲田山(1585m) による見通し外
山 形 D-VOR	使用不能 101° 30NM以上 7000FT以下 128° 25 " "	水晶山による見通し外 大東岳(1366m) "
美 保 C-VOR	使用不能 109° 20~35NM, 8000FT以下 145° 15~35NM " 215° 20~30NM, 6000FT以下	大山の山腹による反射 宝仏山(1002m), 三子山(1092m) 山岳反射 大平山(410m) 等山岳反射
横須賀 D-VOR	使用不能 259° 26~28NM, 6000FT以下	伊豆半島十国峠(774m) 山岳反射
大 津 C-VOR	下記のラジアルで信頼性をなし 081° 15~40NM, 6000FT 115° 15~25NM, " 090° 10~15NM, 3000FT	湖面反射と山岳反射 山岳反射 湖面反射
大 島 C-VOR	使用不能 310°~330°	三原山による見通し外
高 松 C-VOR	使用不能 053° 30NM以内, 5000FT以下 115° 25NM以上, "	大麻山(538m) 山岳反射
三宅島 D-VOR	使用不能 125°~175°	見通し外
大 分 D-VOR	使用不能 217° 5~8NM, 8000FT以下 248° 3~8NM, " 264° 16~19NM, 9000FT以下 299° 13~17NM, 8000FT以下 119° 36NM以上, 6000FT以下	山岳反射 " " " 伽藍岳(1045m) 佐賀関半島山岳による見通し外
熊 本 D-VOR	使用不能 065° 7~10NM, 8000FT以下 " , 35NM以上, " 287° 10~12NM, 6500FT以下	阿蘇外輪山(800m) による山岳反射 " 見通し外 山岳反射
加治木 D-VOR	使用不能 035°~075° 35NM以上, 12000FT以下 190°~200° 40NM以上, 7000FT以下 290°~310° 35NM以上, "	霧島山(1421m) による見通し外 桜島(117m) " 鳥帽子岳(703m) "
国 分 D-VOR	使用不能 011° 15~17NM以上 15000FT以下	霧島山(1421m) の山岳反射

G： 直接波と海面反射波の合成電力密度の包絡値 (dBw/m^2)

T： 直接波，海面反射波，山岳反射波の合成電力密度 (dBw/m^2)

2) フラッグ電流計算式

$$I = 300 + 20 \times (T - X) \quad (\mu\text{A}) \quad (15)$$

X： 直接波と海面反射波の合成電力密度 (dBw/m^2)

7.2.2 複雑な形状の山岳の場合

起伏に富んだ複雑な形状の山岳による方位誤差やフラッグ電流を計算で求めることは今のところできない。従って、このようなときは、まず検討すべきラジアルのプロファイルチャートを作成し、集約整理された飛行実験データと比較することによって検討することになる。

7.3 山岳反射計算モデル

単一の山岳による方位誤差およびフラッグ電流を計算するためのモデルを図 7.2 に示す。山岳からの反射波電界強度の計算は、山腹を反射板に分割し、各反射板からの反射波電界をベクトル合成して求めた。

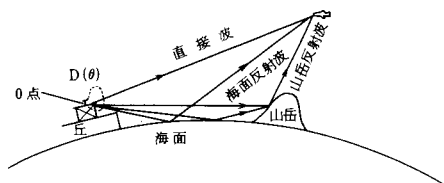


図 7.2 山岳反射総合モデル

7.4 飛行実験

山岳による障害を調べるために、横須賀，長崎および熊本の各 D-VOR の飛行実験を行なった。ここでは、横須賀と長崎の実験についてのべる。

7.4.1 横須賀 D-VOR

1) VOR 位置および飛行方位は先に図 6.2.2 に示した。

2) 図 7.3 に、203 度方位で飛行高度 4,500 フィートの、また図 7.4 に同方位で飛行高度 8,500 フィートの電算機計算値と実測値を示す。

VOR から約 60 Km の伊豆大島の上空では、三原山 (758 m) の山腹反射によりフラッグ電流，受信電力が広い範囲にわたって著しく乱れるとともに，方位誤差も大きく乱れている。飛行高度が高くなると，障害発生区域が遠方へ移動するとともに，障害の大きさが減少している。

また，山岳のない 220 度方位の図 6.2.6 と比較す

ることにより海面反射による障害との違いがわかる。

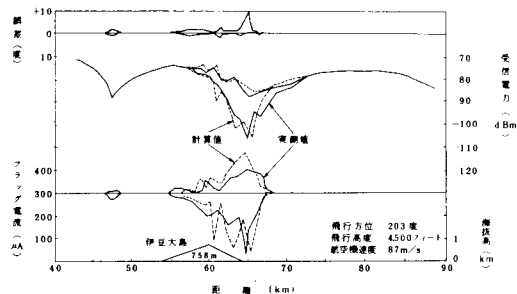


図 7.3 横須賀 D-VOR (203 度方位，高度 4500 フィート)

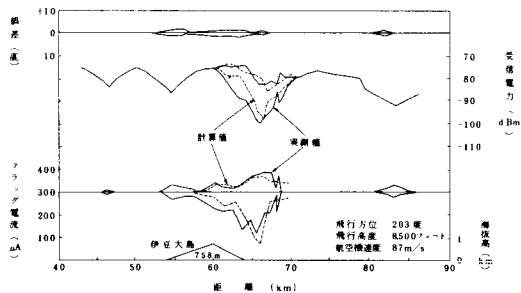


図 7.4 横須賀 D-VOR (203 度方位，高度 8500 フィート)

7.4.2 長崎 D-VOR

1) 図 7.5 に、VOR 位置および実験において飛行した方位を示す。カウンターポイズの標高は約 42 m である。

2) 図 7.6 に、140 度方位で飛行高度 3,000 フィートの、また図 7.7 に同方位で飛行高度 10,000 フィートの実測値を示す。また，図 7.8 に山岳上空での基準位相および可変位相信号の 30Hz 検波波形を示す。振幅変調波を利用している基準位相信号は大きく乱れている。

図 7.6 では，諫早と島原の山岳上空でフラッグ電流が約 $220 \mu\text{A}$ まで低下し，許容値の $240 \mu\text{A}$ 以下となつている。この乱れは，高度 10,000 フィートにおいても約 $225 \mu\text{A}$ であり，かなり上空にまで障害がおよんでいることがわかる。

これらの山岳は海拔約 160 m と低いにもかかわらずこの様に大きなフラッグ電流の低下をもたらすので，特に空港進入用 VOR のときは十分に注意する必要がある。

3) 図 7.9 に、326 度方位の飛行高度 3,000 フィートと 10,000 フィートの実測値を示す。高度

3,000フィートのときVORから約33 Km (17.8 マイル)の海拔163mの山岳上空で、フラッグ電流が260 μ Aまで低下している。しかし、高度10,000

フィートのときは、ほとんど乱れていない。

4) 140度方位で35 Kmの位置にある山岳の海拔高は約160mであり、また、326度方位で33 Kmの位置にある山岳の海拔高は163mである。両方位における山岳の条件は似ているにもかかわらず、前者の方が乱れが大きい。

この原因は、140度方位は崖までの距離が約30mと短いに対し、326度方位は約480mと長くなっていることにあってと思われる。すなわち、6.5.1の2)で検討したように、VORから崖までの距離が長くなると、垂直面指向性の仰角0度附近の勾配がゆるやかな、いわゆるシャープカットオフの特性をもつようになるため、直接波と山岳反射波とのレベル差が大きくなり障害が軽減されるものと思われる。

7.5 山岳による障害の特徴

障害は、表12の特徴をもつことがわかった。

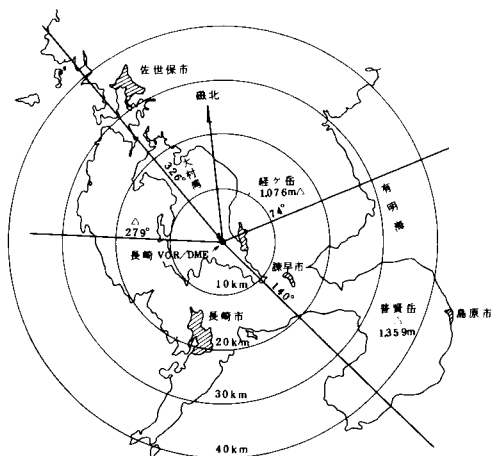


図 7.5 長崎D-VOR位置図

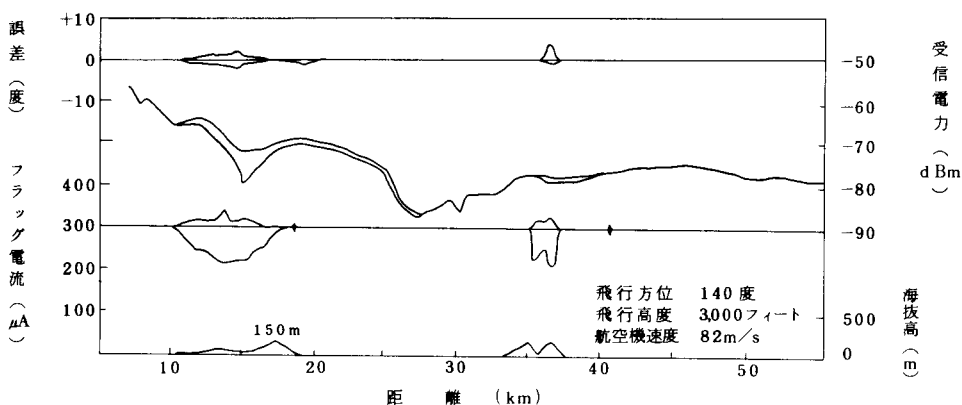


図 7.6 長崎D-VOR (140度方位, 高度3,000フィート)

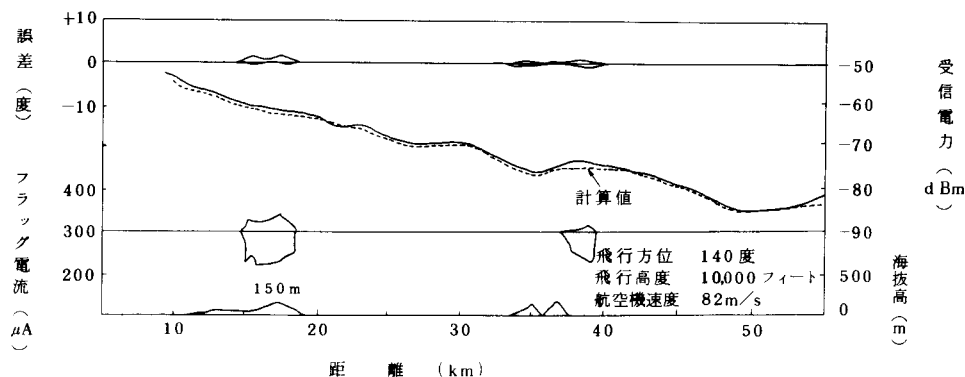


図 7.7 長崎D-VOR (140度方位, 高度10,000フィート)

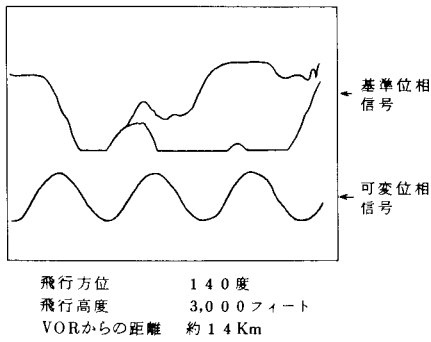


図 7.8 山岳上空での基準, 可変位相信号波形

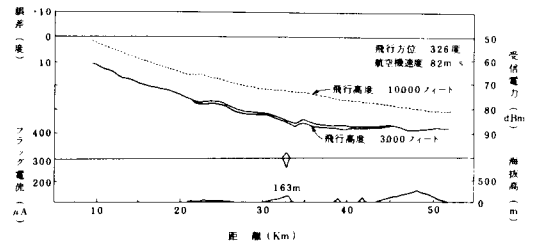


図 7.9 長崎D-VOR (326度方位)

7.6 山岳による障害の対策

軽減対策は, 表13のとおりとなる。

表 12 山岳による障害の特徴

		説	明
距離パターン		方位誤差 (度) +10 0 -10 フラッグ電流 (μA) 400 300 200 100 受信電力 (dBm) -60 -80 -100 -120 -140 高さ (×1000FT) 4 3 2 1 距離 (Km) 0 10 20 30 40 50 60 70	
方位誤差	反射	(1) 山岳反射波の存在する区域内において, 大きな方位誤差を生じる。 (2) 飛行高度が高くなる程, 誤差発生位置は遠方へ移動する。 (3) 飛行高度が高くなる程, 誤差は小さくなる。 (4) 直接波と山岳反射波が干渉して電界が低下することにより, 妨害波が相対的に大きくなり, 誤差も大きくなる。 (5) 海面反射等により発生したナル点と山岳反射とが重畳すると, 誤差は増巾される。 (6) 山岳反射では, 方位誤差の発生する範囲は, 海面反射の場合と比べ, ずっと広い。 (7) 山岳反射による方位誤差は, D-VORにしてもC-VORと殆ど同じとなる。	

表 1 2 山丘による障害の特徴 (続き)

		説 明
方位 誤 差	見通し 遮 蔽	(1) 見通し遮蔽区域内では、電界強度が最低受信強度以下となって、VORは使用不能となり、方位誤差も大きくなる。
フラッグ 電 流	反 射	(1) 山岳反射の存在する区域内において、フラッグ電流が著しく低下し、240 μ A の許容値以下となって、VORが使用不能となることが多い。 (2) 飛行高度が高くなる程、フラッグの障害発生位置は遠方へ移動する。 (3) 飛行高度が高くなる程、障害は小さくなる。 (4) D-VORにしても、C-VORと殆ど同じである。 (5) 山岳反射では、フラッグ電流の乱れる範囲は広く、かつ、乱れも大きい特徴がある。海面反射による障害がナル点においてのみ発生するのと対照的である。
	見通し 遮 蔽	(1) 見通し遮蔽区域内では、電界強度が低下して最低受信強度以下となってVORは使用不能となり、フラッグ電流も極端に低下する。
受 信 電 力	反 射	(1) 山岳反射波の存在する区域内において、電界強度が乱れ、受信電力も乱れる。 (2) しかしながら、最低受信電界強度以下にまで落ちこむことはほとんどない。 (3) 干渉による乱れの周波数は、山頂付近において最も高くなり10Hz 近くなることもある。干渉周波数は、飛行高度が高くなる程、低くなる。 (4) 飛行高度が高くなる程、電界の乱れの振巾は小さくなる。
	見通し 遮 蔽	(1) 見通し遮蔽区域内では、電界強度が急激に低下して、最低受信強度以下となり、VORは使用不能となる。

表 1 3. 山岳反射による障害の軽減対策

対 策 項 目	効果	説 明
1. 空中線位置 を低くする	○	VOR空中線が高いと、低角度へ強いロープが発生し、これが山岳による障害を助長することとなるので、これを避けるため空中線位置を低くする。
2. 海面反射と の組合わせ がないよう にする	◎	6.7において述べた海面反射による障害の軽減対策をおこなう。

7.7 山岳による障害のまとめ

1) 山腹面など平坦な単一の山岳による障害の発生区域および障害の大きさの大略の傾向を、計算により予測することができるようになった。

2) 起伏に富んだ山岳による障害の予測については、今後さらに検討する必要がある。

8. むすび

以上、VOR周辺の構造物や地形による障害の予測についてのべてきた。

構造物による障害予測については、従来は定性的な予測方法しかなかったが、本研究により、かなり定量的な予測ができるようになった。この結果、VOR新設にあたって周辺の障害物からどの程度離すべきかということが予測できるようになった。また、既設VORの周辺に新設される構造物の巾や高さ等の諸元をどの程度に設計すべきかということも予測できるようになった。

次に、海水面による障害については、従来はナル点での電界の低下のみについて注目されていたが、実際には最低受信電界強度を満足していても、方位誤差が許容値をこえるおそれのあることが明らかになった。また、障害の程度を、送信電力、空中線地上高、カウンターボイズの直径、崖までの距離、崖の高さ、航空機までの距離、飛行高度等を関数として予測できるようになった。この結果、海水面による障害の少ない置局設計がある程度できるようになった。

また、山岳反射による障害については、なだらかな傾斜を有する単一の山岳による電界の乱れおよびフラッグ電流の変化の予測ができるようになった。特に、VORと山岳との間に海水面が存在するときには、山岳上空で大きな障害の発生することがわかった。なお、複雑な形状を有する山岳による障害予測については、今後さらに研究を行ってゆきたいと考えている。

おわりに、本研究の実施に当り終始御協力を頂いた当所電子航法開発部の中村研究官および山本研究官に深く謝意を表したい。

参考文献

- 1) 「VOR/VORTAC SITING CRITERIA」 (FAA Aug 7. 1968)
- 2) 「VHF OMNIRANGE WAVE REFLECTIONS FROM WIRE」, S.R. Anderson and H.F. Keary (CAA May 1952)
- 3) 「The CAA Doppler Omnirange」, S.R. Anderson and R.B. Flint (May 1959)
- 4) 「二重数値積分を用いたILS電波障害の計算」 中村 第9回電子研究発表会 (S 52. 6)

5) 「ILSにおける電波障害の計算機シミュレーション」, 小林 電波研季報 (Sept 1974)

6) 「ILS Localizer Multipath Analysis」, S.L. SHIH (Janu 1971)

7) 「INSTRUMENT LANDING SYSTEM SCATTERING」, G. Chin, L. Jordan, D. Kahn, S. Horin (Dec 1972)

8) 「ILS スケールモデル実験について」, 石橋, 松田, 他 第6回電子研究発表会 (S 49. 5)

9) 「多導体電線による斜入射電波の反射, シャ蔽特性(その3)」, 竹下, 豊田, 長田, 橋本 電力中央研究所報告 (S 52. 7)

10) 「THEORETICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF PARASTIC LOOP COUNTERPOISE ANTENNAS」, D.L. Sengupta, J.E. Ferris, V.H. Weston (Sept 1968)

11) 「SSB方式ドブラVORにおける固有誤差の発生とその補正方法について」, 長岡, 山本, 松田, 田中, 二瓶 電子航法研究所報告 (1978. 12)

12) 「科学技術者のための電磁理論」, L. ソリマー 秀潤社

〔付録 1〕 架空線からの反射波電界強度の計算

図 5.1 に示すように、入射電界強度 E_i の中においた架空線に誘起される電流密度は、無限長の線路のそれと同じと仮定すると、次式となる。⁹⁾

$$J_i = \frac{E_i}{\eta} \sum_{n=0}^{\infty} (j)^n \epsilon_n \frac{2 \cos n \phi e^{-jKD_1}}{\pi KR \cos \alpha H_n^{(1)}(KR \cos \alpha)} \quad (\text{A/m}) \quad (\text{A 1.1})$$

ここで、上式中の諸量は次の通りである。

E_i : 入射電界強度

η : 自由空間インピーダンス

K : 位相定数

ϵ_n : ノイマン数

R : 線の半径

ϕ : 線上の任意点の円周方向角度

α : 入射角

つぎに、架空線の太さが波長に比べて小さく、架空線表面の入射電界強度が均一であると仮定すると $n=0$ のときについて考えればよいことになり、次式となる。

$$J_i = \frac{E_i}{\eta} \cdot \frac{2 e^{-jKD_1}}{\pi KR \cos \alpha H_0^{(1)}(KR \cos \alpha)} \quad (\text{A/m}) \quad (\text{A 1.2})$$

従って全表面電流は次式となる。¹⁰⁾

$$I = J_i \cdot 2\pi R \quad (\text{A 1.3})$$

次に、電流 I 、長さ dL の微小ダイポールから距離 D_2 離れた点の電界強度は次式となる。

$$dE = \frac{60\pi I \cos \beta e^{-jKD_2}}{\lambda D_2} dL \quad (\text{A 1.4})$$

架空線全長による電界強度は次式となる。

$$E_R = \int_L dE \quad (\text{A 1.5})$$

一方、入射電界強度 E_i は、 E_o/D_1 と表わせるので、 E_R は次式となる。

$$E_R = \int_L \frac{E_o}{Z_o} \cdot \frac{60\pi \cos \beta}{\lambda D_1 D_2} e^{-jK(D_1 + D_2)} dL \quad (\text{A 1.6})$$

ここで、上式中の諸量は次の通りである。

$$Z_o = \frac{\eta \pi KR \cos \alpha H_0^{(1)}(KR \cos \alpha)}{4\pi R} \quad (\text{A 1.7})$$

$$\approx 227 \cos \alpha H_0^{(1)}(KR \cos \alpha)$$

$$H_0^{(1)}(KR \cos \alpha) \approx 1 + j 1.466 \log_{10} \left(\frac{0.466}{R \cos \alpha} \right) \quad (\text{A 1.8})$$

〔付録 2〕 カウンターポイズ付アルフォード空中線の垂直面指向性の計算^{11) 12)}

図 A 1 に示すアルフォード空中線に誘起される電流 I は、直接波によるものを I_1 、カウンターポイズからの反射波によるものを I_2 、エッジからの回折によるものを I_3 で表わすと、入射波が領域 1 にあるときは $I_1 + I_2 + I_3$ 、領域 2 にあるときは $I_1 + I_2$ 、領域 3 にあるときは I_3 となる。

ここで、 $I_1 \sim I_3$ は次式で表わされる。

$$I_1 = C \frac{E_o}{R_o} \cos \theta \cdot e^{jKH \sin \theta} \quad (\text{A 2.1})$$

$$I_2 = -C \frac{E_o}{R_o} \cos \theta \cdot e^{-jKH \sin \theta} \quad (\text{A 2.2})$$

$$I_3 = C \frac{E_o}{R_o} \cos \phi (V(Q, \phi - \alpha) - V(Q, \phi + \alpha)) \quad (\text{A 2.3})$$

C : 比例定数

E_o : 送信点の電界強度に比例する値

$$Q = (H^2 + A^2)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{A 2.4})$$

$$V(Q, t) = \frac{1+j}{2} e^{jKQ \cos t}$$

$$\times \int_{-\infty}^{\infty} 2 \left(\frac{KQ}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \cos \left(\frac{t}{2} \right) e^{-j \frac{\pi}{2} u^2} du$$

$$(\text{A 2.5})$$

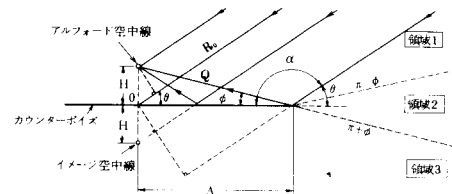
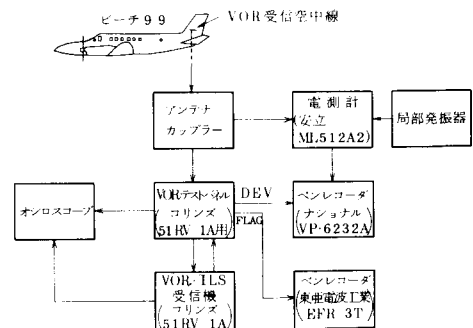


図 A 1 カウンターポイズ付アルフォード空中線の垂直面指向性の計算図

〔付録 3〕 VOR 飛行実験機上測定機器系統図



VOR 飛行実験機上測定機器系統図