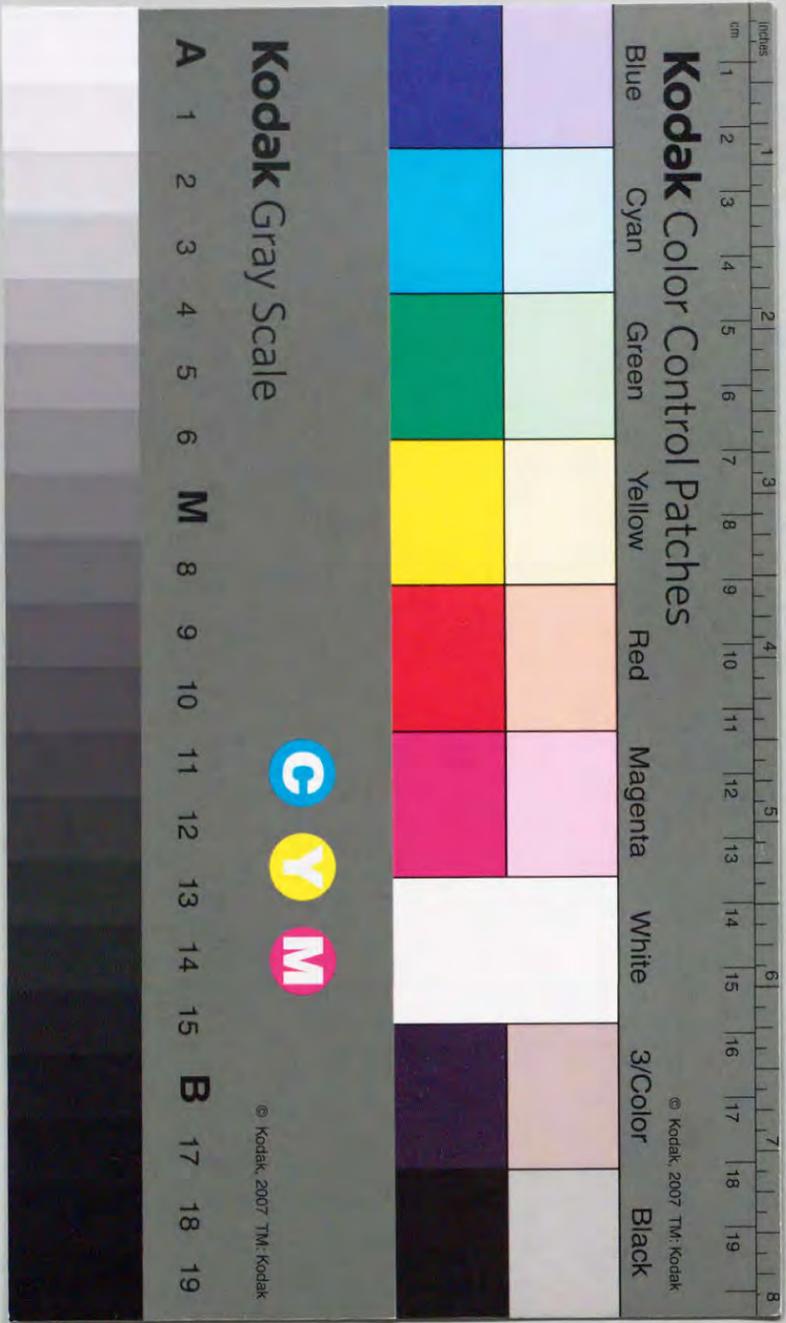


早稲田大学審査学位論文(博士)

鏡面修整による反射鏡アンテナの高性能化  
に関する研究

1992年12月

野本真一



①

鏡面修整による反射鏡アンテナの高性能化  
に関する研究

1992年12月

野 本 真 一

## 内 容 梗 概

本論文は、無線通信の分野におけるマイクロ波通信用反射鏡アンテナの高性能化に関する一連の研究をとりまとめたものであり、鏡面修整によるアンテナ放射指向性の合成について論じている。即ち、アンテナの指向性に対する要求に応じ、これを実現する最適な鏡面系を求めるという課題を研究の対象としている。

第1章は序論であって、反射鏡アンテナの鏡面修整技術に関する研究の歴史的経緯を論じ、本研究の背景と位置づけを明かにする。また、本論文の構成を述べる。

第2章及び第3章は本研究の理論的根幹を成しており、第2章では幾何光学(GO)近似に基づいてファンビームを合成する単反射鏡並びにペンシルビームを合成する双反射鏡の鏡面修整の理論を展開する。また、第3章では幾何光学近似が成立しない領域、即ち、小形アンテナに適した物理光学(PO)的鏡面修整法について検討する。

第4章では、上記鏡面修整理論に基づいて設計した各種通信用アンテナについて述べる。

4-1章では、衛星搭載用コンタービームアンテナとして、ファンビームを放射する2重曲面反射鏡を基本としたアンテナ構成を検討する。i/V/U/S字といった形状のコンタービームの合成法を確立し、次に、国際通信衛星への応用を想定し、2重曲面反射鏡と一次元の一次放射器アレーとを組み合わせたアンテナシステムを提案する。

4-2章では、21GHz帯LDR(端末系広帯域無線伝送方式)の多方向型システムの基地局用に開発した広いサービスエリアを最適な成形ビームで照射する広角成形ビームアンテナについて述べる。口径約80cmの単反射鏡からなる本アンテナは水平断面内では幅90°のファンビームパターンを、また垂直断面内では改良コセカント2乗パターンを持った3次元的成形ビームを放射する。

4-3章では、主反射鏡に球面鏡を採用したマルチビーム地球局アンテナについて述べる。本アンテナは、球面の持つ回転対称性を最大限に活用しつつ、その欠点である球面収差とオフセット給電時に生じる開口面電界分布の歪みを2枚の修整補助反射鏡の導入によって除去するものである。テレポートなど都市部周辺への設置を目的としたKu帯6.5m4ビーム地球局アンテナを開発・商用化した。

4-4章では、次世代の国際通信衛星への応用を想定し、極めて多数のスポットビームを放射する双反射鏡形式多焦点アンテナについて検討する。静止衛星軌道から地表を望んだ視野内の6つの異なる方向に対応させた6焦点を構成するように、2枚の鏡面を最適設計した。振幅誤差を劣化させることなく位相誤差(収差)を低減させた前方給電型修整オフセットカセグレンアンテナを試作し、評価実験により設計の妥当性を確認している。

4-5章では、VSAT(超小型地球局)用に開発したKu帯1.2m修整オフセットグレゴリアンアンテナについて述べる。物理光学的鏡面修整法により設計された本アンテナは、小形で高能率かつ極めて低いサイドローブ特性を有しており、その類まれな耐干渉特性を生かして大電力送信が必要で機動性が求められるSNG(衛星によるニュース取材)用小型車載地球局アンテナとしても実用に供されている。

第5章は結論であり、本研究で得られた結果をまとめ、鏡面修整技術を総括する。また、鏡面修整技術に関する今後の課題について言及する。

目次

1. 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 従来の研究とその問題点	1
1.2.1 幾何光学的鏡面修整	1
1.2.2 物理光学的鏡面修整	4
1.3 本論文の構成	4
2. 幾何光学的鏡面修整理論	8
2-1. 単反射鏡によるファンビームの合成	8
2-1.1 まえがき	8
2-1.2 従来の問題点とその解決	8
2-1.2.1 2重曲面反射鏡の曖昧さ	8
2-1.2.2 問題点の明確化	10
2-1.2.3 2重曲面反射鏡の表現式	10
2-1.2.4 曖昧性の除去	13
2-1.3 Spine 曲線に関する方程式	14
2-1.3.1 電力の平衡条件	14
2-1.3.2 Rib 曲線で張られる $d\omega$ の具体的表現	15
2-1.3.3 発散系鏡面と収束系鏡面	17
2-1.4 シミュレーションによる検証	18
2-1.5 偏微分方程式と解の一意性の証明	21
2-1.6 カーブしたファンビームへの一般化	22
2-1.7 まとめ	24
2-2. 双反射鏡によるペンシルビームの合成	25
2-2.1 まえがき	25
2-2.2 双反射鏡系の幾何学	25
2-2.2.1 座標系及び記号	25
2-2.2.2 反射の法則	27
2-2.2.3 等位相条件	28
2-2.2.4 可積分条件	30
2-2.2.5 交差偏波消去条件	32
2-2.3 回転対称な開口面写像	32
2-2.4 新しい範疇の反射鏡系	35
2-2.4.1 鏡面形状	35
2-2.4.2 偏波特性	36
2-2.5 鏡面修整による開口面電力密度分布の制御	38

2-2.5.1	電力の平衡条件	38
2-2.5.2	数値計算例	40
2-2.6	まとめ	42
3.	物理光学的鏡面修整理論	43
3.1	まえがき	43
3.2	幾何光学的鏡面修整法の限界	44
3.3	物理光学的鏡面修整法	48
3.3.1	鏡面の最適化	48
3.3.2	PO修整アンテナの設計例	49
3.3.3	鏡面修整の有効領域の検討	50
3.3.4	遠方放射パターンの直接最適化	51
3.4	まとめ	52
4.	各種通信用アンテナの開発	53
4-1.	衛星搭載用コンタービームアンテナ	53
4-1.1	まえがき	53
4-1.2	ファンビームを一般化して得られるコンタービーム	53
4-1.2.1	i字形コンタービームの合成	54
4-1.2.2	V字形コンタービームの合成	55
4-1.2.3	U/S字形コンタービームの合成	57
4-1.3	ファンビームを素ビームとするマルチ/コンタービームアンテナ	58
4-1.3.1	ファンビームの一次元アレイ化	58
4-1.3.2	ファンビームのビーム偏向特性	59
4-1.4	国際通信衛星搭載用マルチビームアンテナの検討	60
4-1.5	まとめ	64
4-2.	LDR基地局用広角成形ビームアンテナ	65
4-2.1	まえがき	65
4-2.2	アンテナ設計の指針	66
4-2.2.1	基本的要求条件	66
4-2.2.2	目標ビームパターン	67
4-2.2.3	鏡面形式	70
4-2.3	一次放射器	72
4-2.4	鏡面設計	73
4-2.4.1	ビームノーズ部	73
4-2.4.2	ビームスカート部	77
4-2.5	21GHz帯LDR基地局用アンテナ	79
4-2.5.1	諸元	79
4-2.5.2	放射特性	79
4-2.5.3	降雨対策	81
4-2.6	まとめ	87
4-3.	マルチビーム地球局用球面鏡アンテナ	88

4-3.1	まえがき	88
4-3.2	基本構成	89
4-3.3	鏡面設計	90
4-3.3.1	交差偏波最小条件	90
4-3.3.2	反射鏡の展開表現	92
4-3.3.3	開口面電力密度分布	92
4-3.3.4	マルチビーム化	92
4-3.4	Ku帯6.5mマルチビーム地球局アンテナ	93
4-3.4.1	諸元	93
4-3.4.2	給電部の斜交配置	97
4-3.4.3	放射特性	100
4-3.5	まとめ	104
4-4.	マルチスポットビーム用多焦点アンテナ	105
4-4.1	まえがき	105
4-4.2	基礎的考察	106
4-4.3	鏡面設計法	109
4-4.4	シミュレーション結果	111
4-4.5	試作アンテナとその放射特性	115
4-4.5.1	アンテナ諸元	115
4-4.5.2	評価用一次放射器	116
4-4.5.3	ビーム偏向角	116
4-4.5.4	利得	117
4-4.5.5	放射パターン	119
4-4.6	まとめ	120
4-5.	VSAT用低サイドローブアンテナ	122
4-5.1	まえがき	122
4-5.2	基礎的検討	123
4-5.2.1	単反射鏡と双反射鏡の比較	123
4-5.2.2	物理光学的鏡面修整の検証	124
4-5.3	Ku帯1.2m修整オフセットグレゴリアンアンテナ	126
4-5.3.1	アンテナ設計	126
4-5.3.2	アンテナ構成	128
4-5.3.3	放射特性	132
4-5.4	まとめ	132
5.	結論	134
5.1	本研究の要点	134
5.2	鏡面修整技術の総括	136
5.3	今後の課題	137
謝辞		139
参考文献		140

## 第1章 序論

### 1.1 研究の背景

固定衛星通信用の地球局アンテナに代表される高利得マイクロ波アンテナには、従来から反射鏡アンテナが専ら用いられている。衛星通信の初期の地球局には直径30mにもおよぶ大口径アンテナが必要であったが、デジタル衛星通信技術の発達、衛星搭載用通信装置の高性能化等と相俟って、アンテナの高性能化によりその小形化が図られてきた。最近では、衛星放送受信用として、一般家庭向けの「パラボラアンテナ」が各種市販されるなど、反射鏡アンテナも大変身近なものとなった。

しかし、これらの反射鏡アンテナの中には、もはや「パラボラアンテナ」と呼ぶのが正確ではないものが多い。それは、アンテナの鏡面を回転放物面（パラボラ）から僅かに変化させること（鏡面修整）によってアンテナの特性を改善する方法が実用上極めて効果的であり、この手法によって高性能化された修整反射鏡アンテナが順次採用されているためである。近年ではアンテナ製造技術の発達と歩調をあわせて、回転対称系のアンテナのみならずオフセット系の反射鏡アンテナにも修整鏡面を持つものが実用化されつつある。

鏡面修整による反射鏡アンテナの高性能化は、利得の改善（高能率化）のみならず、電波干渉を抑圧するための低サイドローブ化、直交偏波を利用して同一周波数を2重に利用するための低交差偏波化、1つの反射鏡アンテナから同時に多数のビームを放射するマルチビーム化、さらには衛星搭載用アンテナ等で要求されるような放射ビームを最適な形状に合成するビーム成形などに対しても、極めて有効である。このため、通信用アンテナに対する時代の要求に応じ、鏡面設計技術も大きく進歩しており<sup>[1.1], [1.2]</sup>、多種多様な修整鏡面アンテナが各方面で研究開発されている。

### 1.2 従来の研究とその問題点

#### 1.2.1 幾何光学的鏡面修整

鏡面として回転放物面を用いたパラボラアンテナが高利得なペンシル（棍棒状）ビームを放射することは古くから知られていた。これに対し、第2次世界大戦の頃、航空機の方角を特定するためのレーダ用として、コセカント2乗ビームと呼ばれる特殊な成形ビームが必要とされるようになった。米国マサチューセッツ工科大学（MIT）の放射研究所（Radiation Laboratory）では、2重曲面反射鏡（doubly curved reflector）と名付けられた、回転放物面とは異なる鏡面によりこのような成形ビームを実現する手法が開発され

た<sup>[1.3]</sup>。この鏡面設計法には、幾何光学 (Geometrical Optics : GO)<sup>[1.4]</sup> が用いられており、鏡面上での反射の法則並びに1次ビーム (反射鏡への入射ビーム) と2次ビーム (反射鏡からの反射ビーム) との間の電力の平衡則とから導かれる方程式を解くことによってビーム成形を実現する鏡面が決定された。しかしながら、この鏡面修整理論には曖昧さを含んでいることが指摘されている<sup>[1.5]</sup>。これは、その理論が、鏡面上での反射の法則を偏微分方程式として厳密に扱うことをせずに、幾何学的な直観から編み出されたものであることによる。そのため、この種の扇状の成形ビーム (ファンビーム) を合成する単反射鏡系の設計理論の厳密な取り扱いの必要性が認識されている。

一方、1960年代に入って宇宙通信用などを目的として開発が進められた高利得/低雑音アンテナには、鏡面が凹の回転放物面である主反射鏡に凸の回転双曲面である副反射鏡を組み合わせたカセグレン型<sup>[1.6]</sup> (あるいは、副反射鏡が凹の回転楕円面であるグレゴリアン型) の双反射鏡アンテナを用いることによって、送受信機を一次放射器の近くに配置し給電損を低減する方法が有効であった。しかもこの双反射鏡アンテナでは鏡面が増えたことによる自由度の増加を生かし、さらに性能改善を図れることが見いだされた。これを初めて示したのは、K. A. Green<sup>[1.7]</sup> であって、副反射鏡の役割が主反射鏡アンテナへの吹き付けビームを作ることだとの理解から、その吹き付けビームパターンを前述の成形ビームの手法により制御すれば主反射鏡開口面上に任意の電界振幅分布が実現できると考えた。主反射鏡の役割は開口面上の電界の位相分布を一様にするのと解釈されるので、副反射鏡の修整の後にその吹き付けパターンに整合するように、主反射鏡の位置を電波の波長オーダーでずらし、主反射鏡の修整を行うものであった。

これとほぼ同時期に、V. Galindo<sup>[1.8]</sup> は、Greenの手法を定式化しカセグレンアンテナの主・副2枚の反射鏡を同時に修整すれば開口面上の電界分布を振幅・位相の両成分について制御できることを明かにした。即ち、幾何光学近似に基づき、

- (1) 主・副両反射鏡上での光線の反射の法則 (スネルの反射の法則)
- (2) 一次放射器波源から開口面 (波面) までの通路長が一定 (等位相条件)
- (3) 光束内を伝わる電力の平衡則

の3つの条件から主反射鏡及び副反射鏡の断面形状を関係づけると、両断面曲線に関する連立微分方程式が導かれる。これを端点 (例えば鏡面の外周) から出発して数値積分により解けば与えられた条件を満たす修整された鏡面が得られる<sup>[1.9]</sup>。こうして所望の開口面電界分布を幾何光学的意味において厳密に実現する修整カセグレンアンテナの主・副2枚の反射鏡の曲面形状がストレートかつ精確に得られるようになり、回転対称な双反射鏡アンテナに対する幾何光学的鏡面修整法が確立された。以来、高能率修整カ

セグレンアンテナが大型アンテナの標準形式となった理由の一つに、鏡面修整技術の寄与を挙げることができる。

回転対称系では一次放射器や副反射鏡がアンテナ開口面上に影を落とす (ブロッキング) ことによる性能の劣化が生じるため、このブロッキングを含めた形で放射特性の最適化を行う必要があった<sup>[1.10]</sup>。これに対し、一次放射器系を開口面からずらしブロッキングを回避したオフセットアンテナ<sup>[1.11]~[1.13]</sup> が低サイドローブ化に対し極めて優位であることが明かになった。そして1970年代半ばには、オフセット系の欠点である開口面電界分布の非対称歪みと交差偏波の発生とを2枚の反射鏡の組み合わせにより除去するオフセット双反射鏡アンテナの研究<sup>[1.14]~[1.17]</sup> が成果を挙げ、オフセット双反射鏡アンテナに対する鏡面修整技術の確立が望まれるようになった。

しかし、回転対称なカセグレンアンテナに対する幾何光学的鏡面修整理論をそのままオフセットカセグレンアンテナに拡張しようとする、曲面の断面を求めるという2次元問題であったものが曲面そのものを求めるという3次元問題になるため、数学的には解くべき方程式が常微分方程式ではなく、偏微分方程式の形で表されることになる。このため、厳密解の存在が保証されないという厄介な事実を含んでいた<sup>[1.18]</sup>。しかもこの点を指摘した B. Ye. Kinber<sup>[1.19]</sup> の論文における「オフセット双反射鏡アンテナに対しては幾何光学的意味での厳密解が必ずしも存在しない」との結論が「必ずしも」が欠落して広く解釈されてしまったために、多くの研究者が近似解を得るための技法を次々と発表する<sup>[1.20]~[1.26]</sup> という混迷の時期が続いた<sup>[1.27], [1.28]</sup>。

こういった状況の中で、B. S. Westcottらのグループは複素光線<sup>[1.29]</sup>を導入することによって、幾何光学的鏡面修整に関する問題を、単反射鏡系と双反射鏡系の区別なく、統一的な複素偏微分方程式の形で表現し、鏡面修整理論を体系づけた<sup>[1.30]</sup>。これにより、成形ビームを合成する単反射鏡系とペンシルビームを合成する双反射鏡系との数学的同等性が明確になった。

しかしながら、上記偏微分方程式の数値解のある種の不安定性を回避するためには繰り返し演算などの技法が必要である<sup>[1.31]</sup>ため、個々の事例に対する効率の良い実用的解法が現在なお発表されている<sup>[1.32]</sup>。また、解が存在する条件に対し見通しの良い指針が与えられておらず、さらには、数学的には解が存在するものの (鏡面が折返ったり鏡面自身に重なってしまい) 物理的にアンテナを構成できなくなる場合があるため、一般的な3次元問題についての幾何光学的鏡面修整法は、回転対称双反射鏡アンテナの様な曖昧性のない一般的な設計技術にはなっていない。

1.2.2 物理光学的鏡面修整

幾何光学近似に基づく鏡面修整法では、反射鏡の大きさが小さくなってくると誤差が大きくなり、鏡面修整の効果が減少する<sup>[1.33]</sup>。これは幾何光学近似では、反射鏡の放射界として反射波成分のみを扱い、回折波成分を考慮していないためである。幾何光学的鏡面修整の限界を越え小形反射鏡アンテナにも有効な鏡面設計を行うには、回折波成分を正確に評価するような回折理論 — 例えば物理光学 (Physical Optics: PO)<sup>[1.34]</sup> や幾何光学的回折理論 (Geometrical Theory of Diffraction: GTD)<sup>[1.35]</sup> — 的な取り扱いが必要となる。

回折理論を、反射鏡アンテナの解析だけでなく設計に積極的に取り入れたのは、B. Davaeu<sup>[1.36]</sup> まで遡ることができる。その手法は、いわば Green の鏡面修整法をそのまま拡張したものと考えることができる。回転対称な副反射鏡の断面曲線を適当な関数系を用いて予め展開表示しておき、副反射鏡からの主反射鏡吹き付けパターンを回折波をも含めた形で評価し、それと所望のパターンとの差を最小とするように、鏡面形状を表す展開係数を最適化するものであった。このように、回折理論では反射鏡からの放射界 (反射波+回折波) を解析 (評価) することはできるが、逆に与えられた放射界を実現するような反射鏡曲面を直接得る (「逆問題」を解く) ことはできない。従って、そのため、まず適切な反射鏡の鏡面を与え、それを初期値として数値計画法を用いて最適解としての反射鏡曲面を設計する方法を取らざるを得ない。しかも、回折理論として精度の高い物理光学法を用いようとすると、反射鏡全面に渡って複素ベクトル量である電磁界成分の積分演算を放射界を評価すべき1点1点について行わなければならない。高速な計算機の助けを借りなければ実用になり得ない。このため、物理光学的鏡面修整法は、2次元問題となる回転対称系に対してのみ現実的なものであった。

1.3 本論文の構成

図1.1は、本論文の構成と各章の関係を示している。以下、図1.1に従って、各章の概要を述べる。

第2章『幾何光学的鏡面修整理論』及び第3章『物理光学的鏡面修整理論』は本研究の理論的根幹を成している。

2-1章「単反射鏡によるファンビームの合成」では、ファンビームを合成する修整単反射鏡アンテナの設計理論を幾何光学近似に基づいて展開し、従来の解釈であった曖昧性を否定し厳密解の唯一性を明かにする。また、フラットなファンビームに関する設計理論を3次元的なカーブしたファンビームを含むものに一般化する。

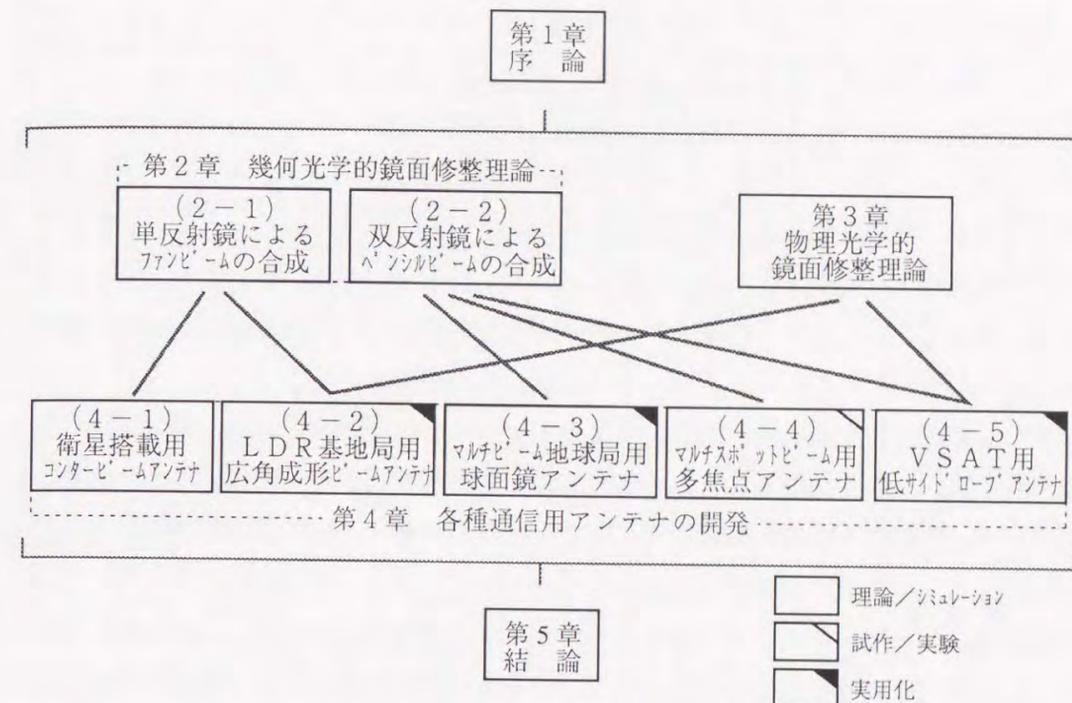


図1.1 本論文の構成と各章の関係

2-2章「双反射鏡によるペンシルビームの合成」では、ペンシルビームを合成する修整双反射鏡アンテナの設計理論を幾何光学近似に基づいて展開し、いくつかの有用な定理を明かにする。解曲面の可積分条件を具体的に書き下すことによって開口面写像に対する拘束条件を演繹的に導き、実現可能な開口面電界分布に関する知見を得る。そして偏微分方程式を常微分方程式に帰着させ、オフセット系でも回転対称系と同等な手順によって鏡面設計が可能となることを示す。さらに、回転対称な開口面写像を持つ新しい範疇の鏡面系が存在することを明かにする。また、双反射鏡系の交差偏波消去条件を修整反射鏡を含むものに一般化する。

第3章『物理光学的鏡面修整理論』では、幾何光学近似が成立しない領域、即ち、反射鏡口径が波長に比較して十分大きいと見なせない小形アンテナに適した新しい鏡面修整理論として、電波の波動的性質 (回折現象) を考慮した物理光学 (PO) 的鏡面修整法について論じる。ここでは幾何光学的鏡面修整の限界を明かにすると共に、物理光学的鏡面修整による改善効果を反射鏡口径対波長比をパラメータとして定量的に示し、低サイドローブアンテナの設計に関する基礎資料を得る。また、開口面電界分布を合成するのではなく、遠方放射電界を直接最適化する手法を提案する。

第4章『各種通信用アンテナの開発』では、上記鏡面修整理論に基づき設計・開発し

た各種通信用アンテナについて述べる。表1.1に、それぞれのアンテナの要点を示す。

4-1章「衛星搭載用コンタービームアンテナ」では、衛星搭載用コンタービームアンテナに関して、ファンビームを放射する2重曲面反射鏡を基本としたアンテナ構成について論じる。まず、i/V/U/S字といった形状のコンタービームが、2重曲面反射鏡アンテナで実現できることを明かにする。次に、国際通信衛星への応用を想定し、2重曲面反射鏡と一次元の一次放射器アレーとを組み合わせたアンテナシステムを提案する。そして、2重曲面反射鏡のビーム偏向特性を検討し、収束系鏡面と発散系鏡面との特質の差を明かにし、マルチビーム化に関する基礎資料を得る。

4-2章「LDR基地局用広角成形ビームアンテナ」では、LDR（端末系広帯域無線伝送方式）の多方向型システムの基地局用に開発した広いサービスエリアを最適な成形ビームで照射する広角成形ビームアンテナについて述べる。本アンテナにより合成される成形ビームは水平断面内では幅90°のファンビームパターンを、また垂直断面内では改良コセカント2乗パターンを有している。鏡面修整法として、放射電界レベルの高いビームノーズ部を形成する鏡面部分は幾何光学的に、また、レベルの低いビームスカート部を形成する部分は物理光学的に行うという、2つの鏡面修整の特長を巧みに使い分けた効率的で高精度な設計法を提案する。開発したアンテナの放射パターンはサービスエリア内を照射する部分にはリップルが無く、しかも、ビームの切れが鋭くサイドローブの低い優れた性能を示し、実用化に必要な条件を全て満足している。

4-3章「マルチビーム地球局用球面鏡アンテナ」では、主反射鏡に球面鏡を採用したマルチビーム地球局アンテナについて論じる。本アンテナは、球面の持つ回転対称性を最大限に活用しつつ、その欠点である球面収差とオフセット給電に起因する開口面電界分布の歪みを2枚の修整補助反射鏡の導入によって除去するものである。本アンテナ設計に有効な、修整オフセット複反射鏡アンテナに対する交差偏波最小条件を明かにし、さらにマルチビーム化で問題となる隣接ビーム分離角により制限される補助反射鏡系の大きさについて検討を加える。そして、テレポートなど都市部周辺への設置を目的として開発したKu帯6.5m4ビーム地球局アンテナについて述べる。

4-4章「マルチスポットビーム用多焦点アンテナ」では、次世代の国際通信衛星への応用を想定し、極めて多数のスポットビームを放射する双反射鏡形式多焦点アンテナについて述べる。静止衛星軌道から地表を望んだ視野内をくまなく高利得ビームで覆うために、6つの異なる方向に対応させた6つの焦点を有する多焦点アンテナを2枚の鏡面の幾何光学に基づく鏡面修整により設計している。最適化の目的関数には開口面写像の所望な写像からの誤差を用い、その誤差を開口面電界分布の振幅誤差と位相誤差に

表1.1 本研究で開発されたアンテナ

章	アンテナ種別	ビーム数 Nb	反射鏡面数	鏡面修整		開口径 (D/λ)	用途	到達レベル
				GO	PO			
(4-1)	衛星搭載用コンタービーム	1~10	1	○		25~100	衛星搭載	シミュレーション
(4-2)	LDR基地局用広角成形ビーム	1	1	○	○	約50	地上系基地局	実用化
(4-3)	マルチビーム地球局用球面鏡	4	1+2Nb	○		約250	中型地球局	実用化
(4-4)	マルチスポットビーム用多焦点	数百	2	○		約150	衛星搭載	試作実験
(4-5)	VSAT用低サイドローブ	1	2	○	○	約50	小型地球局	実用化

対応した成分に分離して波長をパラメータにした重み付けを行うことを提案する。この方法により、振幅誤差を劣化させることなく位相誤差（収差）を1/3~1/4程度に低減した前方給電型修整オフセットカセグレン形式の多焦点アンテナを試作し、モデル実験により設計の妥当性を確認している。

4-5章「VSAT用低サイドローブアンテナ」では、VSAT（超小型地球局）用に開発したKu帯1.2m修整オフセットグレゴリアンアンテナについて述べる。本アンテナでは物理光学的鏡面修整法により、従来、小形アンテナでは実現が困難であった高能率化と低サイドローブ化が達成されており、物理光学的鏡面修整の有効性が実証されている。

第5章は、結論であり、本研究の要点をまとめる。本研究により、

- (1) 鏡面修整理論の一般化とその過程における定理の発見と新しい鏡面系の発明、
  - (2) 小形アンテナの設計や低い放射レベルの制御に有効な鏡面修整法の提案、
  - (3) 各種通信用の高性能/高機能なアンテナの開発・実用化、
- の成果が得られている。最後に、鏡面修整技術を総括し、今後の課題について言及する。

## 第2章 幾何光学的鏡面修整理論

### 2-1 単反射鏡によるファンビームの合成

#### 2-1.1 まえがき

2-1章では、最も単純な反射鏡アンテナ、一つの点波源と一枚の反射鏡からなる単反射鏡アンテナを対象として、幾何光学近似に基づいた鏡面修整理論を展開する。ここでは、特に2次放射ビームがファン(扇形)ビームである場合を扱う。

反射鏡アンテナ用一次放射器として、一般的なホーンアンテナ等を想定すれば、反射鏡を給電するその主ビームの位相特性は球面波と同等と見なせるから、鏡面設計においては一次放射器がある電力指向性(一次放射器の軸からの角度を $\theta$ として、 $\cos\theta$ の冪乗などで近似することが多い)を持った点波源と見なして良い。点波源と修整反射鏡とにより与えられた指向性をもつ2次放射ビーム、即ち成形ビームを放射する課題は、幾何光学近似に基づくと一般的には Monge-Ampère 型偏微分方程式の境界値問題に定式化される<sup>[2-1.1]</sup>。

立体指向性が一平面内に拘束されたようなファンビームは、2重曲面反射鏡(doubly curved reflector)<sup>[2-1.2]~[2-1.9]</sup>と名付けられた修整反射鏡により実現できる。これは航空機探索用レーダとしてコセカント2乗パターンの指向性をもつアンテナの開発に端を発して考案された技術である。しかし、その設計理論は偏微分方程式としての扱いを検討して得られたものではなく、幾何学的な直観から編み出されたものであって、設計理論に曖昧さを含んでいた。このため、厳密な取り扱いの必要性が認識されている<sup>[2-1.10]</sup>。

#### 2-1.2 従来の問題点とその解決<sup>[2-1.11], [2-1.12]</sup>

##### 2-1.2.1 2重曲面反射鏡の曖昧さ

図2-1.1は、2重曲面反射鏡の概念を示したものであって、その鏡面はある「脊椎に相当する平面曲線」(以下、Spine 曲線)に沿って、「肋骨に相当する平面曲線」(以下、Rib 曲線=母線)が連続的に動いて作られる曲面として定義される。同図で、点波源の位置を原点に選び、Spine 曲線を含む平面がx-z平面となるように直交座標系(x,y,z)を選ぶ。Spine 曲線とRib 曲線の交点をPとし、線分OPと-z軸とのなす角を $\alpha$ 、反射光線がz軸となす角を $\psi$ とし、また光線の反射角の2倍を $\beta = \alpha + \psi$ とする。Spine 曲線は差し当たって未知であるがその微係数は連続であるとする。(Spine 曲線は

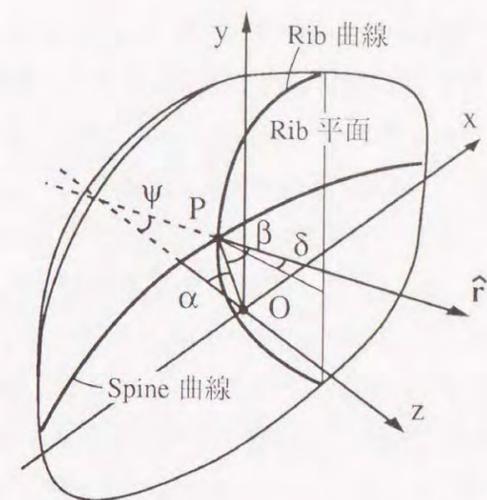


図2-1.1 2重曲面反射鏡の構成

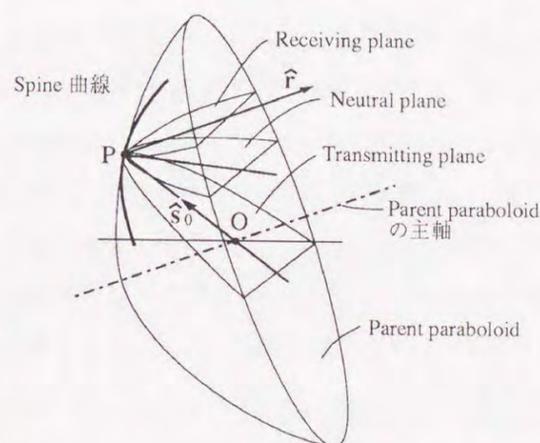


図2-1.2 Parent paraboloid

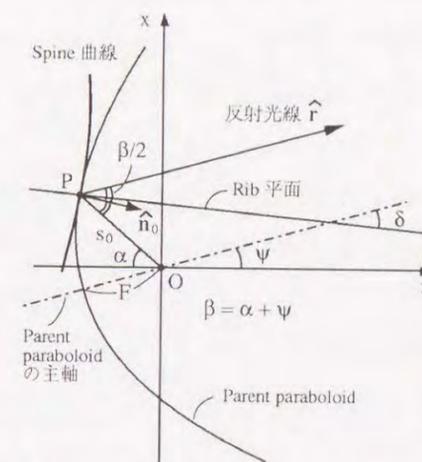


図2-1.3 Rib 平面の曖昧さ

後に、一次放射ビームと二次放射ビームとの電力の平衡条件から決定される。) )

さて、Rib 曲線は、原点 O からの入射光線がこのRib 曲線上で反射され、一定の方向 $\psi$ に揃う条件から決定できる。従来の説明は以下の通りである。図2-1.2で、焦点が原点 O に一致し、反射光線の方に主軸を持ち、かつ点 P を含む様な回転放物面(以下、この回転放物面を Parent paraboloid と呼ぶ)を考えると、Rib 曲線はこの Parent paraboloid 上の点 P を含む曲線でなければならない。なぜならば、Parent paraboloid 上の点は $\psi$ なる方向と原点 O について通路長一定の条件を満たす位相停留点の集合であるからである。ところが、図2-1.2に3つの平面を例として示したように、この説明に従うと、Rib 曲線を含む平面(以下、Rib 平面と呼ぶ)の選び方には図2-1.3で

示した角度  $\delta$  分の曖昧さが残る。図 2-1.2 で「Receiving plane」及び「Transmitting plane」とは、アンテナを受信及び送信動作で考えたときの、鏡面への入射光線群を含むような平面であって、それぞれ、 $\delta = 0$ 、及び、 $\delta = \beta$ 、に相当している。また、 $\delta = \beta/2$  とした「Neutral plane」は Spine 曲線の法平面である。

上記、曖昧さに関し、いずれの平面を Rib 平面に選んだら良いかの明確な指針が与えられていない。Brunner<sup>[2-1.8]</sup> は、この曖昧さを任意性と解釈し、図 2-1.2 に示した3つの平面について検討し、鏡面の大きさとの関係を述べている。これに対し、アンテナ工学ハンドブック<sup>[2-1.10]</sup> では、この曖昧さを任意性と解釈することに疑問を投げ掛けており、より厳密な取り扱いの必要性を喚起すると共に、従来の鏡面設計法では広い角度範囲をカバーする成形ビームアンテナが構成できないとの問題を指摘している。

### 2-1.2.2 問題点の明確化

従来の説明における Rib 曲線の構成に関わる曖昧さの本質は、求めるべき真の曲面と Parent paraboloid との接触を、その偏微係数（法線）まで含めて一致するものとしているかどうかにあると言える。なぜならば、通路長一定の条件から、単に Parent paraboloid とある平面との交線として Rib 曲線を構成した場合、2重曲面反射鏡と Parent paraboloid とは、Rib 曲線に沿った方向に関する偏微係数は必ず一致するが、Rib 曲線を横切る方向に関する偏微係数の一致する保証はないからである。（このことは、偏微分方程式の用語で言えば、可積分条件を満たしていないことに相当する。）従って、Rib 曲線を横切る方向に関する偏微係数が一致する条件を考えれば良い。

### 2-1.2.3 2重曲面反射鏡の表現式

ここで、厳密解の検討を行うために、2重曲面反射鏡を定式化する。鏡面上の位置ベクトルを記号  $\mathbf{X}$  で表すものとし、Spine 曲線上の点には添え字  $s$  を付し  $\mathbf{X}_s$  で表す。単位ベクトルには記号  $\hat{\cdot}$  を冠することにする。

Spine 曲線  $\{\mathbf{X}_s\}$  が、角度  $\alpha$  をパラメータとして、次の極座標表示

$$\mathbf{X}_s(\alpha) = s_0(\alpha) \hat{\mathbf{s}}_0(\alpha) \quad (2-1.1)$$

で表されているとする。但し、

$$\hat{\mathbf{s}}_0(\alpha) = \hat{\mathbf{x}} \sin \alpha - \hat{\mathbf{z}} \cos \alpha \quad (2-1.2)$$

である。角度  $\alpha$  に関する微分を  $'$  で表すとする、Spine 曲線の単位接線ベクトル  $\hat{\mathbf{t}}_0$  及び単位主法線ベクトル  $\hat{\mathbf{n}}_0$  は次式となる。

$$\hat{\mathbf{t}}_0 = \frac{\mathbf{X}'_s}{|\mathbf{X}'_s|} = \frac{s'_0 \hat{\mathbf{s}}_0 + s_0 \hat{\alpha}}{\Delta_0} \quad (2-1.3)$$

$$\hat{\mathbf{n}}_0 = \hat{\mathbf{t}}_0 \times \hat{\mathbf{y}} = \frac{-s_0 \hat{\mathbf{s}}_0 + s'_0 \hat{\alpha}}{\Delta_0} \quad (2-1.4)$$

但し、

$$\hat{\alpha} = \hat{\mathbf{s}}'_0 = \hat{\mathbf{x}} \cos \alpha + \hat{\mathbf{z}} \sin \alpha \quad (2-1.5)$$

$$\Delta_0^2 = s_0^2 + s_0'^2 \quad (2-1.6)$$

と置いている。反射光線の方向  $\hat{\mathbf{r}}$  はスネルの反射の法則から、

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{r}} &= \hat{\mathbf{s}}_0 - 2(\hat{\mathbf{n}}_0 \cdot \hat{\mathbf{s}}_0) \hat{\mathbf{n}}_0 \\ &= -\hat{\mathbf{s}}_0 \cos \beta + \hat{\alpha} \sin \beta \end{aligned} \quad (2-1.7)$$

但し、

$$\sin \beta = \frac{2 s_0 s'_0}{\Delta_0^2} \quad (2-1.8)$$

$$\cos \beta = \frac{s_0^2 - s_0'^2}{\Delta_0^2} \quad (2-1.9)$$

である。また、 $\hat{\mathbf{r}}$  と  $z$  軸のなす角を

$$\psi = \beta - \alpha \quad (2-1.10)$$

とする。

さて、Rib 曲線は、Parent paraboloid（回転放物面）と Rib 平面との交線であるから、一般に楕円となり、Rib 平面が Parent paraboloid の主軸を含む時（「Receiving plane」を選択した時）に限り放物線となる。（文献 [2-1.10] では、「Transmitting plane」を選択した時も放物線としているがこれは誤りである。）この楕円のパラメータ（放物線は離心率  $e = 1$  の楕円と考える）を図 2-1.4 により求める。図 2-1.4 で  $(\eta, \zeta)$  座標系は、 $(-x, z)$  座標系を  $\psi$  だけ回転移動したものであり、また  $(u, y)$  座標系は、Rib 平面内にとった直交座標系である。

以上の座標系を用いると、Parent paraboloid は、

$$\begin{aligned} z &= f_{pp}(x, y) \\ &= \zeta \cos \psi + \eta \sin \psi \end{aligned} \quad (2-1.11)$$

と書ける。ここで、

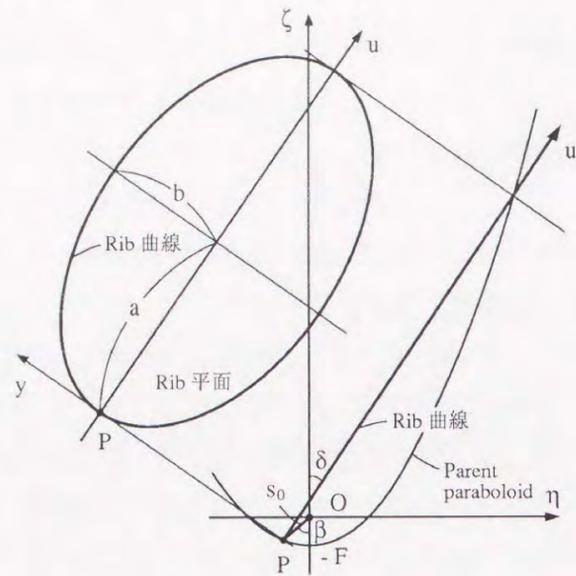


図2-1.4 Rib 曲線 (楕円) のパラメータ

$$\zeta = \frac{1}{4F}(\eta^2 + y^2) + F \quad (2-1.12)$$

であり、焦点距離 F は、

$$F = \frac{s_0(1 + \cos \beta)}{2} \quad (2-1.13)$$

である。

また、Rib 平面は Parent paraboloid の主軸とのなす角を  $\delta$  として、

$$\zeta = \eta \cot \delta - s_0(\cos \beta - \cot \delta \sin \beta) \quad (2-1.14)$$

である。従って、求める Rib 曲線 (楕円) の通径の半値  $\sigma$  及び離心率  $e$  は、図 2-1.4 に示した楕円の長径の半値  $a$  と短径の半値  $b$  とから、

$$\sigma \equiv \frac{b^2}{a} = s_0[\cos(\beta - \delta) + \cos \delta] \quad (2-1.15)$$

$$e \equiv \sqrt{1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2} = \cos \delta \quad (2-1.16)$$

となり、Rib 曲線の方程式として次式が得られる。

$$u = \begin{cases} \frac{\sigma}{\sin^2 \delta} \left[ 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{y}{\sigma} \sin \delta\right)^2} \right] & ; \delta \neq 0 \text{ (ellipse)} \\ \frac{y^2}{2\sigma} & ; \delta = 0 \text{ (parabola)} \end{cases} \quad (2-1.17)$$

以上より、式 (2-1.17) で表される  $u$  をパラメータとして、2重曲面反射鏡の鏡面を表す次式が得られる。

$$z = f_{DC}(\alpha, y) = -s_0 \cos \alpha + u \cos(\psi - \delta) \quad (2-1.18)$$

$$x = s_0 \sin \alpha + u \sin(\psi - \delta) \quad (2-1.19)$$

#### 2-1.2.4 曖昧性の除去

2-1.2.2 節での考察より、2重曲面反射鏡と Parent paraboloid とが、Rib 曲線に沿う方向での偏微係数が一致する条件を検討する。x についての偏微係数は、Parent paraboloid では、

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_{PP}}{\partial x} &= \frac{\frac{\partial f_{PP}}{\partial \eta} \cos \psi + \sin \psi}{\frac{\partial f_{PP}}{\partial \eta} \sin \psi - \cos \psi} \\ &= \frac{\sin \alpha - \sin \psi - \frac{u}{s_0} \sin \delta \cos \psi}{\cos \alpha + \cos \psi - \frac{u}{s_0} \sin \delta \sin \psi} \end{aligned} \quad (2-1.20)$$

となり、また 2重曲面反射鏡では、

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_{DC}}{\partial x} &= \frac{\frac{\partial f_{DC}}{\partial \alpha}}{\frac{\partial x}{\partial \alpha}} \\ &= \frac{s_0 \sin \alpha - s_0' \cos \alpha - u(\psi' - \delta') \sin(\psi - \delta) + u' \cos(\psi - \delta)}{s_0 \cos \alpha + s_0' \sin \alpha + u(\psi' - \delta') \cos(\psi - \delta) + u' \sin(\psi - \delta)} \end{aligned} \quad (2-1.21)$$

となる。そこで、両者が一致する条件

$$\Delta f_x \equiv \frac{\partial f_{DC}}{\partial x} - \frac{\partial f_{PP}}{\partial x} = 0 \quad (2-1.22)$$

を求めると次式となる。

$$\Delta f_x = \frac{1}{A} u \psi' \sin \delta \left( 1 + \frac{u}{s_0} \cos \delta \right) = 0 \quad (2-1.23)$$

但し、

$$A = \left[ s_0 \cos \alpha + s'_0 \sin \alpha + u (\psi' - \delta') \cos (\psi - \delta) + u' \sin (\psi - \delta) \right] \times \left[ \cos \alpha + \cos \psi - \frac{u}{s_0} \sin \delta \sin \psi \right] \quad (2-1.24)$$

である。

式(2-1.23)が成立するのは、(1)  $u=0$ , (2)  $\psi'=0$ , (3)  $\delta=0$  の3通りのいずれかの場合であるが、このうち(1)は  $y=0$  に等しく無意味であり、(2)は反射光線が一方に拘束される場合、即ち2重曲面そのものが回転放物面となってペンシルビームを放射する場合であり、これまた自明である。従って、残る(3)の条件が2重曲面反射鏡の設計に有意なものである。そして(3)  $\delta=0$  は、Rib 曲線を選択には自由度はなく、Rib 平面を「Receiving plane」に一致させる必要のあることを意味している。

以上より、 $\delta=0$ を式(2-1.17)～(2-1.19)に代入して、幾何光学的意味での厳密解が次式で表現される。

$$\mathbf{X}(\alpha, Y) = s_0 \left[ \hat{\mathbf{x}} \left( \sin \alpha + \frac{\sin \psi}{2(1 + \cos \beta)} Y^2 \right) + \hat{\mathbf{y}} Y + \hat{\mathbf{z}} \left( -\cos \alpha + \frac{\cos \psi}{2(1 + \cos \beta)} Y^2 \right) \right] \quad (2-1.25)$$

但し、

$$Y \equiv \frac{y}{s_0} \quad (2-1.26)$$

と置いている。また、

$$|\mathbf{X}| = s_0 \left[ 1 + \frac{1}{2(1 + \cos \beta)} Y^2 \right] \quad (2-1.27)$$

$$\hat{\mathbf{s}} \equiv \frac{\mathbf{X}}{|\mathbf{X}|} = \frac{1}{1 + \frac{1}{2(1 + \cos \beta)} Y^2} \times \left[ \hat{\mathbf{x}} \left( \sin \alpha + \frac{\sin \psi}{2(1 + \cos \beta)} Y^2 \right) + \hat{\mathbf{y}} Y + \hat{\mathbf{z}} \left( -\cos \alpha + \frac{\cos \psi}{2(1 + \cos \beta)} Y^2 \right) \right] \quad (2-1.28)$$

である。

### 2-1.3 Spine 曲線に関する方程式

#### 2-1.3.1 電力の平衡条件

Spine 曲線の自由度によりファンビームの放射パターンを成形することができる。即ち、与えられた一次放射ビームの電力パターンを、その主ビーム方向を  $\theta=0$  とする球座標  $(\theta, \phi)$  を用いて、 $P_1(\theta, \phi)$  で表し、また、ファンビームである2次放射ビームの所

望電力パターンを、角度  $\psi$  の関数として、 $P_2(\psi)$  で表すとき、光線束 (Ray tube) 内を運ばれる電力が変化しないという平衡条件より、Spine 曲線を支配する方程式を導くことができる。電力の平衡条件は、

$$P_1(\theta, \phi) d\omega = P_2(\psi) d\psi \quad (2-1.29)$$

と書ける。但し、 $P_1(\theta, \phi)$  及び  $P_2(\psi)$  は対象とする全領域で総合電力が1となるように正規化されているものとする。即ち、

$$1 = \int_{\Omega} \int P_1(\theta, \phi) d\omega = \int_{\psi_L}^{\psi_U} P_2(\psi) d\psi \quad (2-1.30)$$

である。但し、 $\Omega$  は一次放射器 (原点) から反射鏡全体を見込んだ立体角度領域全体、 $\psi_L$  及び  $\psi_U$  はファンビームの両端における角度  $\psi$  の値である。

式(2-1.29)において  $d\omega$  は図2-1.5に示されるように、反射鏡のエッジと Rib 曲線とで囲まれた立体角の微小変化分であり、Rib 曲線に微小の幅を持たせたストリップが囲む立体角素に相当する。式(2-1.29)自身には Spine 曲線は陽には表現されていないが、 $d\omega$  は Spine 曲線上の点  $P$  の座標と点  $P$  におけるその微係数とによって決定されるので結果的に、Spine 曲線に対する常微分方程式を与えている。この常微分方程式 (の初期値問題) を、Runge-Kutta 法等により数値的に解けば、Spine 曲線が求められ、結果として鏡面形状が式(2-1.25)により得られる。

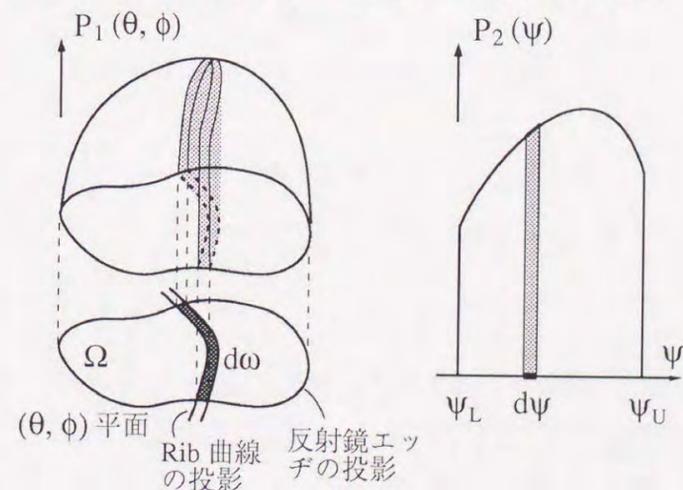


図2-1.5 一次放射空間と二次放射空間での電力の平衡

#### 2-1.3.2 Rib 曲線で張られる $d\omega$ の具体的表現

式(2-1.29)から Spine 曲線に関する常微分方程式が得られることをより具体的

に示す。一次放射器の軸を z 軸からの角度を  $\Theta$  とする球座標系を用いて  $(\Theta_0, \Phi_0)$  で表す。次にこの一次放射器の軸からの角度を  $\theta$  とする一次放射器に付随した局所的な球座標系をとり、一次放射器から  $(\theta, \phi)$  なる方向の単位ベクトル  $\hat{s}$  を考えると、

$$\begin{aligned} \hat{s} = & \hat{x} [\sin \theta \cos \phi - \{\sin \theta \cos (\phi - \Phi_0)(1 - \cos \Theta_0) - \cos \theta \sin \Theta_0\} \cos \Phi_0] \\ & + \hat{y} [\sin \theta \sin \phi - \{\sin \theta \cos (\phi - \Phi_0)(1 - \cos \Theta_0) - \cos \theta \sin \Theta_0\} \sin \Phi_0] \\ & + \hat{z} [\cos \theta \cos \Theta_0 - \sin \theta \sin \Theta_0 \cos (\phi - \Phi_0)] \end{aligned} \quad (2-1.31)$$

である。これより、 $\theta$  及び  $\phi$  を  $\hat{s}$  を用いて表すと、

$$\cos \theta = (\hat{s} \cdot \hat{x} \cos \Phi_0 + \hat{s} \cdot \hat{y} \sin \Phi_0) \sin \Theta_0 + \hat{s} \cdot \hat{z} \cos \Theta_0 \quad (2-1.32)$$

$$\tan (\phi - \Phi_0) = \frac{\hat{s} \cdot \hat{x} \sin \Phi_0 - \hat{s} \cdot \hat{y} \cos \Phi_0}{(\hat{s} \cdot \hat{x} \cos \Phi_0 + \hat{s} \cdot \hat{y} \sin \Phi_0) \cos \Theta_0 - \hat{s} \cdot \hat{z} \sin \Theta_0} \quad (2-1.33)$$

となる。ここで  $\hat{s}$  は 2 重反射鏡への入射ベクトルだから、式 (2-1.29) を代入すると、

$$\cos \theta = \frac{\left(-\cos \alpha + \frac{\cos \psi}{2(1 + \cos \beta)} Y^2\right) \cos \Theta_0 + \left[\left(\sin \alpha + \frac{\sin \psi}{2(1 + \cos \beta)} Y^2\right) \cos \Phi_0 + Y \sin \Phi_0\right] \sin \Theta_0}{1 + \frac{1}{2(1 + \cos \beta)} Y^2} \quad (2-1.34)$$

$$\tan (\phi - \Phi_0) = \frac{\left[\left(\sin \alpha + \frac{\sin \psi}{2(1 + \cos \beta)} Y^2\right) \sin \Phi_0 - Y \cos \Phi_0\right]}{\left[\left(\sin \alpha + \frac{\sin \psi}{2(1 + \cos \beta)} Y^2\right) \cos \Phi_0 + Y \sin \Phi_0\right] \cos \Theta_0 - \left[-\cos \alpha + \frac{\cos \psi}{2(1 + \cos \beta)} Y^2\right] \sin \Theta_0} \quad (2-1.35)$$

が得られる。これら 2 つの式を、 $Y$  に関する 2 次方程式とみて解を求め、 $Y$  を消去すれば、Rib 曲線の  $(\theta, \phi)$  空間での方程式

$$C(\theta, \phi) = 0 \quad (2-1.36)$$

が得られる。

特に  $\Theta_0 = \pi$  の場合を考えると、 $\theta$  及び  $\phi$  はそれぞれ一方が他方について解け、

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \frac{(1 + \cos \beta)(\cos \alpha - \cos \psi) - \sin \beta (\sin \alpha - \sin \psi) \tan^2 \phi}{2(1 + \cos \beta) + (\sin \alpha - \sin \psi)^2 \tan^2 \phi} \dots \\ & \dots \pm \frac{(\cos \alpha - \cos \psi) \sqrt{(1 + \cos \beta)[(1 + \cos \beta) - 2 \sin \alpha \sin \psi \tan^2 \phi]}}{2(1 + \cos \beta) + (\sin \alpha - \sin \psi)^2 \tan^2 \phi} \end{aligned} \quad (2-1.37)$$

$$\tan \phi = \pm \frac{\sqrt{2(1 + \cos \beta)(\cos \alpha - \cos \theta)(\cos \psi + \cos \theta)}}{\sin \beta + (\sin \alpha - \sin \psi) \cos \theta} \quad (2-1.38)$$

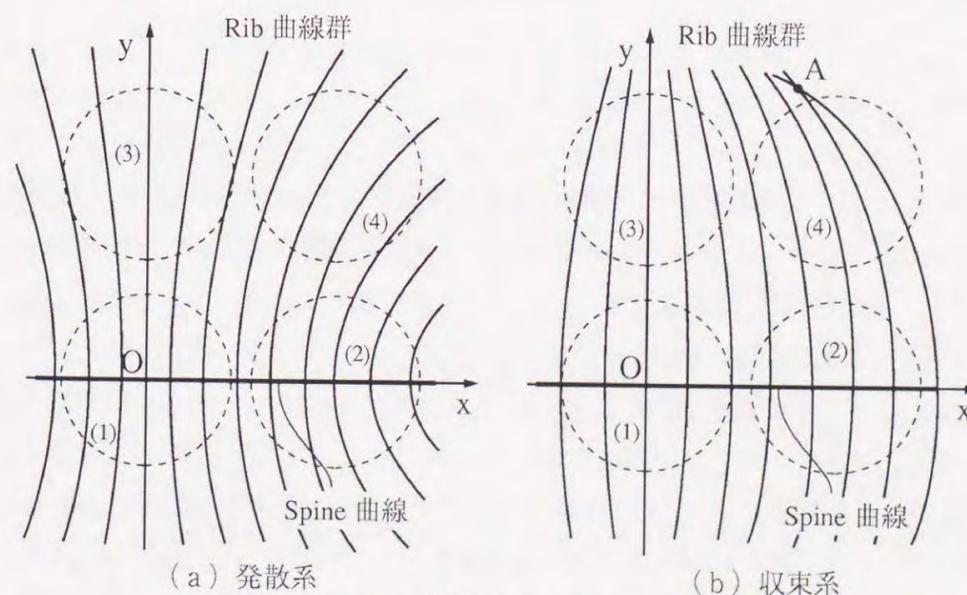
と表すことができる。

### 2-1.3.3 発散系鏡面と収束系鏡面

さて、2 重曲面反射鏡を設計する場合、光線の幾何的配置により、所謂双反射鏡系で言うところのカセグレン形式に相当する発散系鏡面と、グレゴリアン形式に相当する収束系鏡面の 2 種類を考えることができる。

図 2-1.6 は、それぞれの場合について、原点から Rib 曲線群を望んだ様子を模式的に示したものである。波線で示した閉曲線は、反射鏡のエッジを投影したもので、この閉曲線の内部が反射鏡の実領域である。同図では、4 つの中心光線 (光軸) の幾何的配置の例に対し、それぞれ反射鏡エッジを示している。(1) は中心光線が一直線上にある場合、(2) 及び (3) はそれぞれ中心光線を x-z 平面及び y-z 平面内でオフセットさせた場合、そして、(4) はより一般的にオフセットした場合 (対称面なし) である。Spine 曲線は、(1) 及び (2) の場合には、鏡面の中心断面曲線となるが、(3) 及び (4) の場合には、鏡面上には存在しない仮想的な曲線となる。

また、収束系鏡面の場合には、図 2-1.6 (b) 中に点 A で示したように、原点から見た Rib 曲線が互いに重なって (多価となって) しまい、滑らかな鏡面を構成できな



(a) 発散系 (b) 収束系  
図 2-1.6 Rib 曲線群と反射鏡エッジとの関係

くなる状況が発生しうるから点 A が反射鏡の実領域（波線で示した閉曲線の内側）に存在しないことを確認する必要がある。

2-1.4 シミュレーションによる検証

2次放射ビームに沿う角度方向に対する放射指向性が一様であるような最も基本的なファンビームを例として、鏡面設計のシミュレーションを行い、2-1.2節で得られた結論の検証を行う。ここでは、どのくらいまで広いビーム幅の偏平なファンビームが合成できるかに興味がある。

シミュレーションモデルは次の通りとする。一次放射器のモデルとして、その放射ビーム軸からの角度を  $\theta$  として  $\cos^{2n} \theta$  ( $n=16$ ) なる関数で表される電力指向性を有する点波源を仮定する。反射鏡のエッジは、原点 O を頂点とするフレア半角  $\theta_m (=32^\circ)$  の円錐面上にあるものとする（エッジ照射レベル約 -24 dB 相当）。また、ファンビームの幾何光学的なビーム幅を  $2\psi_m$  とし、指向性は一様であるとする。以上より、一次ビーム及び二次ビームの電力パターンはそれぞれ、

$$P_1(\theta, \phi) = \begin{cases} \frac{2n+1}{1-\cos^{2n+1}\theta_m} \cos^{2n}\theta & ; 0 \leq \theta \leq \theta_m \\ 0 & ; \theta > \theta_m \end{cases} \quad (2-1.39)$$

及び

$$P_2(\psi) = \begin{cases} \frac{1}{2\psi_m} & ; |\psi| \leq \psi_m \\ 0 & ; |\psi| > \psi_m \end{cases} \quad (2-1.40)$$

となる。尚、一次放射器のビーム軸は -z 軸方向を向いているものとする ( $\Theta_0 = \pi$ 、オフセットなし、図 2-1.6 で(1)に相当)。この時、電力の平衡条件、式 (2-1.29) は系の対称性を利用して、

$$\begin{aligned} \pm \frac{\psi}{\psi_m} &= \frac{1}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{1 - \cos^{2n+1}(\min[\theta(\phi), \theta_m])}{1 - \cos^{2n+1}\theta_m} d\phi \\ &= 1 - \frac{2}{\pi} \left[ \phi(\theta_m) - \frac{1}{1 - \cos^{2n+1}\theta_m} \int_0^{\phi(\theta_m)} \{1 - \cos^{2n+1}[\theta(\phi)]\} d\phi \right] \end{aligned} \quad (2-1.41)$$

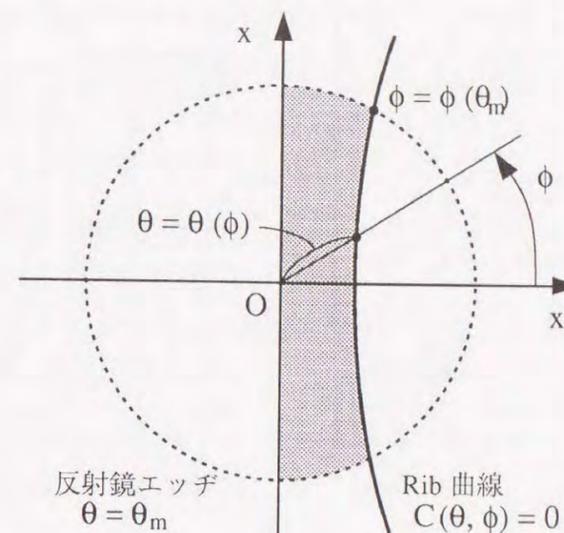


図 2-1.7 一次放射ビーム空間での積分領域

と表現できる。但し、 $\theta(\phi)$  及び  $\phi(\theta_m)$  は図 2-1.7 に示す通りであって、それぞれ式 (2-1.37) 及び (2-1.38) から求められる。尚、式 (2-1.41) 中の複号士は発散系と収束系の別に対応している。

図 2-1.8 及び図 2-1.9 は、それぞれ発散系及び収束系の鏡面について、 $2\psi_m = 90^\circ$  として設計したアンテナの、 $\psi$  面とこれに直交する面（以下  $\psi_\perp$  面）内の放射パターンを示したものである。パターンの計算は物理光学法を用いており、鏡面の大きさとして  $D_y/\lambda$  ( $D_y$  は y 軸方向の鏡面の大きさ、 $\lambda$  は波長) をパラメータとしている。図 2-1.8 及び図 2-1.9 から明らかなように、鏡面の発散系と収束系との違いによる放射特性の差異は殆ど見られない。利得及びビームの切れ (gain roll-off) は  $D_y/\lambda$  によってほぼ決定されている。また他に行った計算よりサイドローブレベルはエッジ照射レベルに主に依存することが明かとなっている。 $\psi$  面内の指向性は、広い角度範囲に渡って一様なレベルとなっておりリップルも僅かである。

ビーム幅がさらに大きいものを設計しようとする収束系鏡面では、反射鏡からの反射光線が大きく湾曲した自身の鏡面の反対側によりブロッキングされてしまいアンテナを構成できなくなってくる。これに対し、発散系鏡面では、ビーム幅が大きくなるにつれ x 軸方向の鏡面の大きさ  $D_x$  が大きくなるものの設計上に何ら不都合は生じない。

$2\psi_m = 180^\circ$  として設計した発散系鏡面によるアンテナの放射パターンを図 2-1.10 に示す。このように極めて広いビーム幅に対しても  $\psi$  面内で一様なリップルの殆どないパターンが得られており、良好なファンビームが形成できていることが分かる。

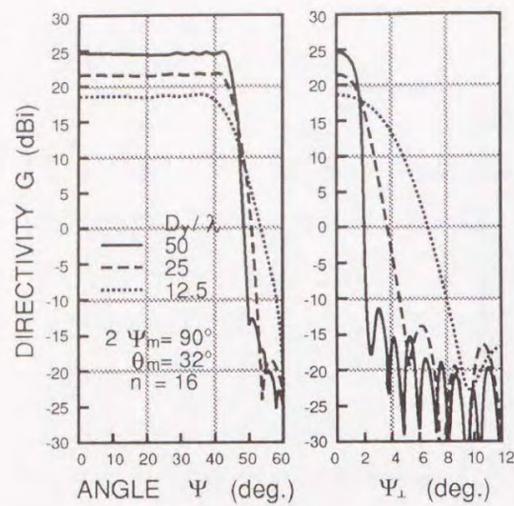


図2-1.8 発散系鏡面からのファンビームパターン

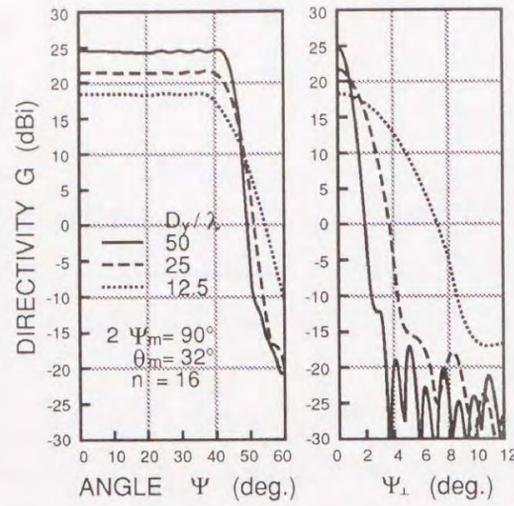


図2-1.9 収束系鏡面からのファンビームパターン

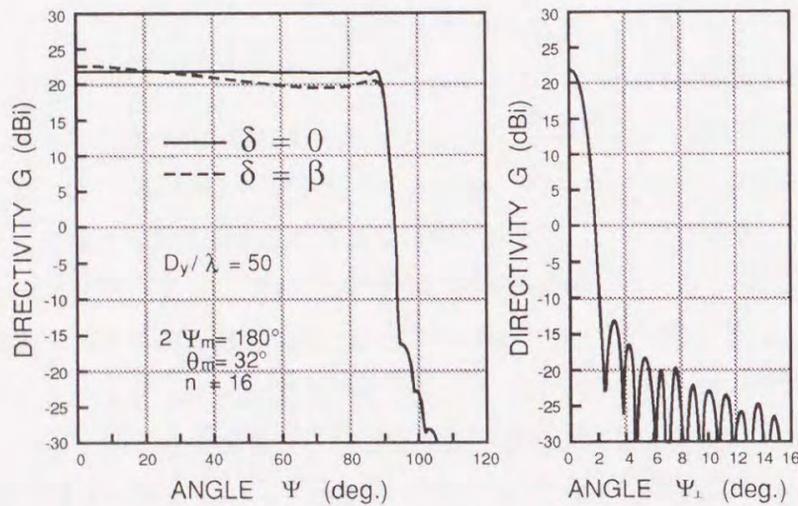


図2-1.10 極めて広角なファンビーム (180° ビーム幅) の合成

また、同図には、比較のために、 $\delta = \beta$ としてRib平面を「Transmitting plane」に一致させて鏡面を設計した場合の結果を波線で示した。厳密解 ( $\delta = 0$ 、図の実線) と比較して、パターンの一様性が劣っていることが明らかである。尚ここでは、オフセットでない場合について示したが、オフセット角が大きくなると、厳密な取り扱いをしない場合は二次放射ビームのピーク方向が  $\psi$  面内から偏移してしまうために、所望の放射パターンからの差が顕著になる。

2-1.5 偏微分方程式と解の一意性の証明

2-1.2節の結果、Rib曲線の曖昧さの問題は解決され、厳密解の存在が明らかとなった。しかし、そこでの式の展開は、数学的には完全なものではなく、厳密解が唯一無二であることの証明にはなっていない。なぜならば、2-1.2節では暗黙のうちにSpine曲線及びRib曲線を平面曲線に限定していたからである。そこでここでは、より一般的な定式化により厳密解の一意性を証明する。

求めるべき修整鏡面を直交座標系  $(x, y, z)$  を用いて

$$\mathbf{X} = (x, y, z) \tag{2-1.42}$$

$$z = z(x, y) \tag{2-1.43}$$

で表す。鏡面上の単位法線ベクトル  $\hat{\mathbf{n}}$  は、

$$\hat{\mathbf{n}} = \frac{(-p, -q, 1)}{\Delta} \tag{2-1.44}$$

但し、

$$p \equiv \frac{\partial z}{\partial x}, \quad q \equiv \frac{\partial z}{\partial y}, \quad \Delta \equiv 1 + p^2 + q^2 \tag{2-1.45}$$

である。原点  $O$  からの入射光線

$$\hat{\mathbf{s}} = \frac{\mathbf{X}}{|\mathbf{X}|} = \frac{(x, y, z)}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \tag{2-1.46}$$

は鏡面により次のスネルの反射の法則に従って反射され反射光線に変換される。

$$\hat{\mathbf{r}} = \hat{\mathbf{s}} - 2(\hat{\mathbf{n}} \cdot \hat{\mathbf{s}})\hat{\mathbf{n}} \tag{2-1.47}$$

さて、反射光線が  $(x, y)$  平面に平行な成分しか持たず、ファンビームを形成する条件は、

$$\hat{\mathbf{r}} \cdot \hat{\mathbf{z}} = \hat{\mathbf{s}} \cdot \hat{\mathbf{z}} - 2(\hat{\mathbf{n}} \cdot \hat{\mathbf{s}})(\hat{\mathbf{n}} \cdot \hat{\mathbf{z}}) = 0$$

となる。上式に、式(2-1.44)及び(2-1.46)を代入すると、

$$\hat{\mathbf{r}} \cdot \hat{\mathbf{z}} = \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \left[ z - 2 \frac{(z - xp - yq)}{\Delta^2} \right] = 0 \tag{2-1.48}$$

となるから、これを整理して

$$G(x, y, z, p, q) = z(p^2 + q^2 - 1) + 2(xp + yq) = 0 \tag{2-1.49}$$

なる1階の非線形偏微分方程式が得られる。

さて、式(2-1.35)は、Lagrange-Charpitの方法により完全解(完全積分)を得

ることができる [2-1.13], [2-1.14]。解は、

$$z^2 = a x + b y + (a^2 + b^2) \quad (2-1.50)$$

である。但し、上式において  $a$  及び  $b$  は任意定数である。一般解は、任意関数を含む形で表現される。この任意関数の自由度は、Spine 曲線の自由度に相当している。これにより、ファンビームを放射する修整鏡面の幾何光学的厳密解の存在とその一意性が数学的に証明できた。

2-1.6 カーブしたファンビームへの一般化 [2-1.15]

2-1.5 節の結論は、ファンビームに対する厳密解が唯一であることを明らかにするばかりではなく、その鏡面が式 (2-1.50) の形で与えられることを示した。ここで式 (2-1.50) が、回転放物面の形になっていることは大変重要なことである。

式 (2-1.50) で一般解を考察するために  $b$  を  $a$  の関数と考え

$$b = f(a) \quad (2-1.51)$$

と置くと、

$$z^2 = a x + f(a) y + a^2 + [f(a)]^2 \quad (2-1.52)$$

となり、この式を  $a$  について微分すると

$$x + f'(a) y + 2 a + 2 f(a) f'(a) = 0 \quad (2-1.53)$$

が得られる。 $a$  を補助パラメータと見なせば、式 (2-1.52) と式 (2-1.53) の一組の式が一般解を与える。

式 (2-1.52) は回転放物面の形であり、Parent paraboloid になっている。式 (2-1.53) は平面の形であり、Rib 平面になっている。そして両式から  $a$  を消去してえられるこれらの交線が、即ち Rib 曲線であり、微分方程式論における特性曲線に他ならない。そしてこの Rib 曲線は放物線であり、その主軸は Parent paraboloid の主軸と平行である。また、特性曲線を結びつけている任意関数  $f(a)$  が Spine 曲線である。

以上から、補助パラメータ  $a$  が変化して、Spine 曲線に沿って Parent paraboloid が動き、その包絡面が求めるべき積分曲面を与えていることが理解できる。従って、ここで補助パラメータ  $a$  を変化させるとき Parent paraboloid の主軸が、平面内から飛びだして偏移することを許せば、カーブしたファンビームを合成する鏡面が得られるものと考えられる。図 2-1.11 は、カーブしたファンビームを模式的に描いたものであり、アンテナを中心とする無限大球面上に描かれたビームフットプリント (Beam footprint) が大円上にない一般的なファンビームである。

カーブしたファンビームを考えた場合には、特性曲線である Rib 曲線がどのように表されるか、即ち平面曲線でなくなるか否か等を知る必要がある。今、Parent paraboloid を次式で表す。

$$S(\mathbf{X}, a) = |\mathbf{X}| - \mathbf{X} \cdot \hat{\mathbf{r}}(a) - 2 F(a) = 0 \quad (2-1.54)$$

ここで、 $\mathbf{X}$  は Parent paraboloid 上の点の位置ベクトル、 $a$  は Parent paraboloid の移動を表す補助パラメータ、また、 $\hat{\mathbf{r}}$  は Parent paraboloid からの反射光線方向を示す単位ベクトルであって Parent paraboloid の主軸と平行である。また、

$$F = s_0 \frac{1 - \hat{\mathbf{s}}_0 \cdot \hat{\mathbf{r}}}{2} \quad (2-1.55)$$

は Parent paraboloid の焦点距離である。但し、 $s_0$  及び  $\hat{\mathbf{s}}_0$  は式 (2-1.1) で与えられ Spine 曲線上の動点  $P$  を表現している。

求めるべき鏡面は、Parent paraboloid の包絡面であるから、その特性曲線である Rib 曲線の方程式は、式 (2-1.54) を  $a$  について微分し

$$-\hat{\mathbf{X}} \cdot \frac{d\hat{\mathbf{r}}}{da} - 2 \frac{dF}{da} = 0 \quad (2-1.56)$$

を得る。式 (2-1.56) はベクトル  $\mathbf{X}$  に関して線形であり、Rib 曲線が平面曲線であることを示している。また、 $\hat{\mathbf{r}}$  は単位ベクトルであるからその  $a$  についての微分ベクトルは常に  $\hat{\mathbf{r}}$  と直交している。即ち

$$\hat{\mathbf{r}} \cdot \frac{d\hat{\mathbf{r}}}{da} = 0 \quad (2-1.57)$$

が成立する。従って、Rib 平面は Parent paraboloid の主軸と平行であって Rib 曲線がやは

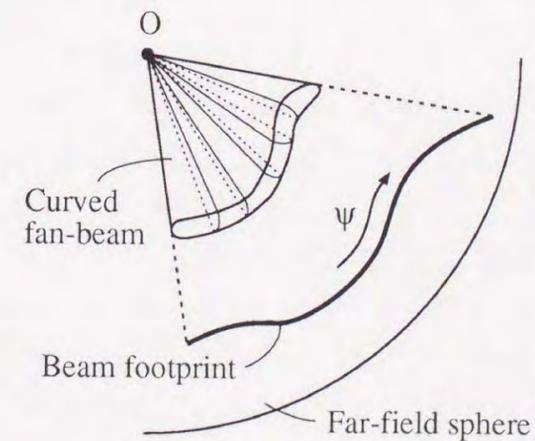


図 2-1.11 カーブしたファンビーム

り放物線であることが明かとなった。

以上の結果、対象とするファンビームが一平面内に沿うフラットなものであろうと、より一般的なカーブしたものであろうと、幾何光学的意味での厳密解が存在し、その特性曲線が放物線になるということが証明された。このことから、特性曲線が放物線であるから、その頂点が動いてできる曲線をSpine曲線と改めて定義すれば、このSpine曲線は、フラットなファンビームに対しては平面曲線となるが、カーブしたものに対しては、もはや平面曲線ではなく2重の曲率(曲率と捩率)をもった空間曲線でなければならぬことが理解できる。このとき、Rib平面とSpine曲線とは必ずしも直交しない。

カーブしたファンビームの具体的設計例を、第4章(4-1)で示す。

### 2-1.7 まとめ

本章では、点波源と一枚の反射鏡によりファンビームを合成するアンテナの設計法を幾何光学に基づいて検討した。その結果、

- (1) 幾何光学的意味での厳密解が一意に定まる、
- (2) 鏡面形状は一次放射ビームと二次放射ビームとの電力の平衡条件から導かれる常微分方程式を解くことによって得られる、
- (3) 発散系と収束系の2種類の鏡面構成の間に、放射特性上の本質的な差はない、が明かになった。また、従来の2重曲面反射鏡の設計の考え方を偏微分方程式論の立場から検討し、従来の理論を
- (4) カーブしたファンビームを含む一般的な設計理論に拡張した。

## 2-2 双反射鏡によるペンシルビームの合成

### 2-2.1 まえがき

2-1章ではファン(扇形)ビームを放射する単反射鏡アンテナを対象として幾何光学的鏡面修整理論を展開した。より一般的な成形ビームを放射する単反射鏡アンテナの問題は、序論で述べたように、ペンシル(棍棒状)ビームを放射する双反射鏡アンテナの問題と数学的には同一になる。即ち、双反射鏡アンテナにおいて、開口面電界分布にある拘束条件(例えば等位相)を付け加えた上で、任意の開口面電力分布を合成する問題と等価である。歴史的にもまた実用上からも、開口面電力分布の制御による高能率かつ低サイドローブなペンシルビームアンテナの設計はアンテナ工学における最も重要な課題の一つとなっている。そこで2-2章では幾何光学近似に基づいた鏡面修整理論をペンシルビームを放射する鏡面修整双反射鏡アンテナを対象として展開する。鏡面を定式化して得られる偏微分方程式の可積分条件を詳細に検討することにより重要な定理が導かれる。そして、オフセット系であっても、回転対称系の双反射鏡アンテナと同様に開口面電力密度分布を円形開口に整合したものに制御できることが明かとなり、鏡面設計の具体的手順が示される。また、交差偏波特性についても一般的表現が与えられる。

尚、2-1章と同様に、反射鏡を給電する一次放射器に一般的なホーンアンテナ等を想定し、その放射ビームの位相特性が球面波で近似できるものと仮定する。即ち、一次放射器をある電力指向性(一般に一次放射器の軸からの角度を $\theta$ として、 $\cos\theta$ の冪乗などで近似することが多い)を持った点波源と見なす。

### 2-2.2 双反射鏡系の幾何学<sup>[2-2.1], [2-2.2]</sup>

#### 2-2.2.1 座標系及び記号

図2-2.1に双反射鏡アンテナと座標系を示す。位置ベクトルを記号 $\mathbf{X}$ で表し、さらに主反射鏡上の点には添え字 $m$ を付し $\mathbf{X}_m$ で、また、副反射鏡上の点には添え字 $s$ を付し $\mathbf{X}_s$ で、それぞれ表す。一次放射器が置かれる焦点を $\mathbf{X}_f$ とする。全体座標系は放射ビーム方向を $z$ 軸に選んだ $(x, y, z)$ 直交座標系で表現し、座標系の原点を主反射鏡の中心点 $\mathbf{X}_{m0}$ に選ぶ。副反射鏡の中心点を $\mathbf{X}_{s0}$ とし、 $\mathbf{X}_f - \mathbf{X}_{s0} - \mathbf{X}_{m0} - (x=0, y=0, z=+\infty)$ を結ぶ折れ線を中心光線と定義する。そして中心光線が一直線上に重なる場合を「軸対称配置」、一平面上にある場合を「シングルオフセット配置」、また一平面上にないより一般的な場合を「ダブルオフセット配置」と呼ぶことにする。単位ベクトルには記号 $\hat{\phantom{x}}$ を冠する。

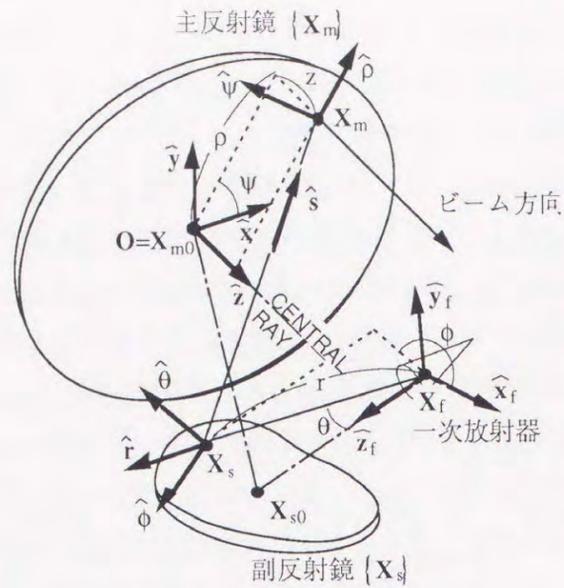


図2-2.1 双反射鏡アンテナと座標系

さて、主反射鏡  $\{X_m\}$  を、

$$\mathbf{X}_m = \rho \hat{\rho} + z \hat{z}, \quad (2-2.1)$$

$$z = z(\rho, \psi) \quad (2-2.2)$$

で表す。ここで  $(\rho, \psi)$  は、基底ベクトル

$$\begin{pmatrix} \hat{\rho} \\ \hat{\psi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \psi & \sin \psi \\ -\sin \psi & \cos \psi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \end{pmatrix} \quad (2-2.3)$$

を持つ円筒座標である。また、副反射鏡  $\{X_s\}$  は、

$$\mathbf{X}_s = r \hat{r} + \mathbf{X}_f, \quad (2-2.4)$$

$$r = r(\theta, \phi) \quad (2-2.5)$$

で表す。ここで  $(r, \theta, \phi)$  は、基底ベクトル

$$\begin{pmatrix} \hat{r} \\ \hat{\theta} \\ \hat{\phi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin \theta \cos \phi & \sin \theta \sin \phi & \cos \theta \\ \cos \theta \cos \phi & \cos \theta \sin \phi & -\sin \theta \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{x}_f \\ \hat{y}_f \\ \hat{z}_f \end{pmatrix} \quad (2-2.6)$$

を持つ球座標である。上式において  $(\hat{x}_f, \hat{y}_f, \hat{z}_f)$  は、焦点  $X_f$  を原点とし、 $(X_{s0} - X_f)$  方向を  $z_f$  軸とする局所的な直交座標系の基底ベクトルである。

以上の座標系を用い、開口面写像  $M_A$  を、

$$M_A : (\theta, \phi) \rightarrow (\rho, \psi) \quad (2-2.7)$$

で定義する。

また、 $X_s$  から  $X_m$  に向かう単位ベクトルを  $\hat{s}$  で表す。即ち、

$$\hat{s} \equiv \frac{\mathbf{X}_m - \mathbf{X}_s}{|\mathbf{X}_m - \mathbf{X}_s|} \equiv \frac{\mathbf{X}_m - \mathbf{X}_s}{s} \quad (2-2.8)$$

である。

### 2-2.2.2 反射の法則

主反射鏡上の点  $X_m$  における単位法線ベクトルを  $\hat{n}_m$  とすると、

$$\hat{n}_m = \frac{\frac{\partial \mathbf{X}_m}{\partial \rho} \times \frac{\partial \mathbf{X}_m}{\partial \psi}}{\left| \frac{\partial \mathbf{X}_m}{\partial \rho} \times \frac{\partial \mathbf{X}_m}{\partial \psi} \right|} \quad (2-2.9)$$

主反射鏡上におけるスネルの反射の法則

$$\hat{n}_m \times (\hat{z} - \hat{s}) = 0 \quad (2-2.10)$$

から

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{X}_m}{\partial \rho} \cdot (\hat{z} - \hat{s}) &= 0 \\ \frac{\partial \mathbf{X}_m}{\partial \psi} \cdot (\hat{z} - \hat{s}) &= 0 \end{aligned} \quad (2-2.11)$$

が得られ、式 (2-2.1) を代入すれば、スカラー表示で

$$\begin{aligned} \frac{\partial z}{\partial \rho} &= \frac{\hat{s} \cdot \hat{\rho}}{1 - \hat{z} \cdot \hat{s}} \\ \frac{\partial z}{\partial \psi} &= \frac{\hat{s} \cdot \hat{\psi}}{1 - \hat{z} \cdot \hat{s}} \rho \end{aligned} \quad (2-2.12)$$

または、ベクトル表示で

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{X}_m}{\partial \rho} &= \hat{\rho} + \hat{s} \times \hat{\psi} \\ \frac{\partial \mathbf{X}_m}{\partial \psi} &= \hat{\psi} + \hat{\rho} \times \hat{s} \rho \end{aligned} \quad (2-2.13)$$

となる。

同様に、副反射鏡上の点  $X_s$  における単位法線ベクトルを  $\hat{n}_s$  とすると、

$$\hat{\mathbf{n}}_s = \frac{\frac{\partial \mathbf{X}_s}{\partial \theta} \times \frac{\partial \mathbf{X}_s}{\partial \phi}}{\left| \frac{\partial \mathbf{X}_s}{\partial \theta} \times \frac{\partial \mathbf{X}_s}{\partial \phi} \right|} \quad (2-2.14)$$

副反射鏡上におけるスネルの反射の法則

$$\hat{\mathbf{n}}_s \times (\hat{\mathbf{s}} - \hat{\mathbf{r}}) = 0 \quad (2-2.15)$$

から

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{X}_s}{\partial \rho} \cdot (\hat{\mathbf{s}} - \hat{\mathbf{r}}) &= 0 \\ \frac{\partial \mathbf{X}_s}{\partial \psi} \cdot (\hat{\mathbf{s}} - \hat{\mathbf{r}}) &= 0 \end{aligned} \quad (2-2.16)$$

が得られ、式(2-2.4)を代入すれば、スカラー表示で

$$\begin{aligned} \frac{\partial r}{\partial \theta} &= \frac{\hat{\mathbf{s}} \cdot \hat{\boldsymbol{\theta}}}{1 - \hat{\mathbf{s}} \cdot \hat{\mathbf{r}}} r \\ \frac{\partial r}{\partial \phi} &= \frac{\hat{\mathbf{s}} \cdot \hat{\boldsymbol{\phi}}}{1 - \hat{\mathbf{s}} \cdot \hat{\mathbf{r}}} r \sin \theta \end{aligned} \quad (2-2.17)$$

または、ベクトル表示で

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{X}_s}{\partial \theta} &= \frac{\hat{\boldsymbol{\theta}} + \hat{\mathbf{s}} \times \hat{\boldsymbol{\phi}}}{1 - \hat{\mathbf{s}} \cdot \hat{\mathbf{r}}} r \\ \frac{\partial \mathbf{X}_s}{\partial \phi} &= \frac{\hat{\boldsymbol{\phi}} + \hat{\boldsymbol{\theta}} \times \hat{\mathbf{s}}}{1 - \hat{\mathbf{s}} \cdot \hat{\mathbf{r}}} r \sin \theta \end{aligned} \quad (2-2.18)$$

となる。

### 2-2.2.3 等位相条件

ペンシルビームを前提とすると開口面上における電磁界の位相分布は一様であり、幾何光学近似においては通路長 (path length) 一定の条件となり、

$$\begin{aligned} |\mathbf{X}_f - \mathbf{X}_s| + |\mathbf{X}_s - \mathbf{X}_m| - \mathbf{X}_m \cdot \hat{\mathbf{z}} &= r + s - z \\ &= K \text{ (const.)} \end{aligned} \quad (2-2.19)$$

と書ける。尚、ここでは簡単のためKを定数としたが、Kを $(\rho, \psi)$ の関数として与えれば、一般的な位相分布をもつビームを扱うことができ、また、 $(\theta, \phi)$ の関数として与えれば、一次放射器の位相特性を補正できる。上式に式(2-2.1)及び(2-2.4)を代入して整理すれば、

$$z' = \frac{(\mathbf{R} \cdot \hat{\mathbf{r}}) r - \frac{1}{2} (\mathbf{R} \cdot \mathbf{R})}{(\mathbf{R} \cdot \hat{\mathbf{z}}) + (1 - \hat{\mathbf{z}} \cdot \hat{\mathbf{r}}) r} \quad (2-2.20)$$

あるいは

$$r = \frac{(\mathbf{R} \cdot \hat{\mathbf{z}}) z' + \frac{1}{2} (\mathbf{R} \cdot \mathbf{R})}{(\mathbf{R} \cdot \hat{\mathbf{r}}) - (1 - \hat{\mathbf{z}} \cdot \hat{\mathbf{r}}) z'} \quad (2-2.21)$$

と表すことができる。但し、

$$z' \equiv z + K \quad (2-2.22)$$

と置いた。このように $z'$ 及び $\mathbf{R}$ を定義すると、以下、式の展開に都合よい。

式(2-2.20)、(2-2.21)より、主反射鏡 $z(\rho, \psi)$ あるいは副反射鏡 $r(\theta, \phi)$ の一方が与えられれば他方が直ちに得られるから、ここで、式(2-2.12)及び式(2-2.17)を $z$ と $r$ が分離した形に整理できる。式(2-2.19)より

$$s = z - r + K = z' - r \quad (2-2.23)$$

であるから、

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{s}} &= \frac{\rho \hat{\boldsymbol{\rho}} + z \hat{\mathbf{z}} - r \hat{\mathbf{r}} - \mathbf{X}_f}{z - r + K} \\ &= \frac{\mathbf{R} + z' \hat{\mathbf{z}} - r \hat{\mathbf{r}}}{z' - r} \end{aligned} \quad (2-2.24)$$

となり、これを式(2-2.12)及び式(2-2.17)に代入し、さらに式(2-2.20)及び式(2-2.21)を用いて、 $z$ 及び $r$ のいずれか一方のみを含む偏微分方程式の形に整理すると、

$$\begin{aligned} \frac{\partial z}{\partial \rho} &= \frac{\partial z'}{\partial \rho} = \frac{1}{T} (\mathbf{U} z' + \mathbf{V}) \cdot \hat{\boldsymbol{\rho}} \\ \frac{\partial z}{\partial \psi} &= \frac{\partial z'}{\partial \psi} = \frac{\rho}{T} (\mathbf{U} z' + \mathbf{V}) \cdot \hat{\boldsymbol{\psi}}, \end{aligned} \quad (2-2.25)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{U} &\equiv (\mathbf{R} \cdot \hat{\mathbf{z}}) \hat{\mathbf{r}} + (1 - \hat{\mathbf{z}} \cdot \hat{\mathbf{r}}) \mathbf{R} \\ \mathbf{V} &\equiv \frac{1}{2} (\mathbf{R} \cdot \mathbf{R}) \hat{\mathbf{r}} - (\mathbf{R} \cdot \hat{\mathbf{z}}) \mathbf{R} \end{aligned} \quad (2-2.26)$$

及び

$$\begin{aligned} \frac{\partial r}{\partial \theta} &= \frac{r}{T} (-\mathbf{W} r + \mathbf{Y}) \cdot \hat{\boldsymbol{\theta}} \\ \frac{\partial r}{\partial \phi} &= \frac{r \sin \theta}{T} (-\mathbf{W} r + \mathbf{Y}) \cdot \hat{\boldsymbol{\phi}}, \end{aligned} \quad (2-2.27)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{W} &\equiv (\mathbf{R} \cdot \hat{\mathbf{r}}) \hat{\mathbf{z}} + (1 - \hat{\mathbf{z}} \cdot \hat{\mathbf{r}}) \mathbf{R} \\ \mathbf{Y} &\equiv \frac{1}{2} (\mathbf{R} \cdot \mathbf{R}) \hat{\mathbf{z}} - (\mathbf{R} \cdot \hat{\mathbf{r}}) \mathbf{R} \end{aligned} \quad (2-2.28)$$

が得られる。但し、

$$\mathbf{T} \equiv (1 - \hat{\mathbf{z}} \cdot \hat{\mathbf{r}}) \frac{1}{2} (\mathbf{R} \cdot \mathbf{R}) + (\mathbf{R} \cdot \hat{\mathbf{z}}) (\mathbf{R} \cdot \hat{\mathbf{r}}) \quad (2-2.29)$$

である。

#### 2-2.2.4 可積分条件

式(2-2.13)及び式(2-2.18)で表される偏微分方程式が滑らかな曲面として解を持つための条件、即ち可積分条件(完全積分可能条件)は、それぞれ

$$\frac{\partial}{\partial \psi} \left( \frac{\partial \mathbf{X}_m}{\partial \rho} \right) = \frac{\partial}{\partial \rho} \left( \frac{\partial \mathbf{X}_m}{\partial \psi} \right) \quad (2-2.30)$$

及び

$$\frac{\partial}{\partial \phi} \left( \frac{\partial \mathbf{X}_s}{\partial \theta} \right) = \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{\partial \mathbf{X}_s}{\partial \phi} \right) \quad (2-2.31)$$

である。但し  $z$  と  $r$  は式(2-2.20)あるいは式(2-2.21)で表される1対1の関係で結ばれているため、これらは独立ではない。

まず式(2-2.30)を具体的に書き下す。式(2-2.13)を代入し、整理すると

$$\frac{\partial \hat{\mathbf{s}}}{\partial \psi} \cdot \frac{\partial \mathbf{X}_m}{\partial \rho} = \frac{\partial \hat{\mathbf{s}}}{\partial \rho} \cdot \frac{\partial \mathbf{X}_m}{\partial \psi} \quad (2-2.32)$$

となるが、ベクトル恒等式

$$\hat{\mathbf{a}} = \frac{\mathbf{A}}{|\mathbf{A}|} \rightarrow \frac{\partial \hat{\mathbf{a}}}{\partial t} = -\frac{1}{|\mathbf{A}|} \hat{\mathbf{a}} \times \left( \hat{\mathbf{a}} \times \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) \quad (2-2.33)$$

を利用して、 $\frac{\partial \hat{\mathbf{s}}}{\partial \rho}$  及び  $\frac{\partial \hat{\mathbf{s}}}{\partial \psi}$  を展開すると、

$$\left( \frac{\partial \mathbf{X}_m \times \hat{\mathbf{s}}}{\partial \rho} \right) \cdot \left( \frac{\partial \mathbf{X}_s \times \hat{\mathbf{s}}}{\partial \psi} \right) = \left( \frac{\partial \mathbf{X}_s \times \hat{\mathbf{s}}}{\partial \rho} \right) \cdot \left( \frac{\partial \mathbf{X}_m \times \hat{\mathbf{s}}}{\partial \psi} \right) \quad (2-2.34)$$

が得られる。全く同様に式(2-2.31)は、

$$\left( \frac{\partial \mathbf{X}_m \times \hat{\mathbf{s}}}{\partial \theta} \right) \cdot \left( \frac{\partial \mathbf{X}_s \times \hat{\mathbf{s}}}{\partial \phi} \right) = \left( \frac{\partial \mathbf{X}_s \times \hat{\mathbf{s}}}{\partial \theta} \right) \cdot \left( \frac{\partial \mathbf{X}_m \times \hat{\mathbf{s}}}{\partial \phi} \right) \quad (2-2.35)$$

となる。

今、開口面写像  $\mathbf{M}_A$  を表現する4つのパラメータ  $(\rho, \psi; \theta, \phi)$  の内で独立なパラメータを  $(\theta, \phi)$  に選び、

$$\rho = \rho(\theta, \phi), \quad \psi = \psi(\theta, \phi) \quad (2-2.36)$$

とすると、

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{X}_m}{\partial \theta} &= \frac{\partial \rho}{\partial \theta} \frac{\partial \mathbf{X}_m}{\partial \rho} + \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \frac{\partial \mathbf{X}_m}{\partial \psi} \\ \frac{\partial \mathbf{X}_m}{\partial \phi} &= \frac{\partial \rho}{\partial \phi} \frac{\partial \mathbf{X}_m}{\partial \rho} + \frac{\partial \psi}{\partial \phi} \frac{\partial \mathbf{X}_m}{\partial \psi} \end{aligned} \quad (2-2.37)$$

従って、これらを式(2-2.35)に代入して整理すれば、

$$\Lambda \left( \frac{\partial \rho}{\partial \theta} \sin \theta + \frac{\partial \psi}{\partial \phi} \rho \right) + \Gamma \left( \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \rho \sin \theta - \frac{\partial \rho}{\partial \phi} \right) = 0 \quad (2-2.38)$$

が導かれる。全く同様に独立なパラメータを  $(\rho, \psi)$  に選び式(2-2.34)を展開すると、

$$\Lambda \left( \frac{\partial \phi}{\partial \psi} \sin \theta + \frac{\partial \theta}{\partial \rho} \rho \right) + \Gamma \left( -\frac{\partial \phi}{\partial \rho} \rho \sin \theta + \frac{\partial \theta}{\partial \psi} \right) = 0 \quad (2-2.39)$$

となる。但し、

$$\frac{1}{s^2} \Lambda = (\hat{\rho} + \hat{\mathbf{s}} \times \hat{\psi}) \cdot (\hat{\theta} + \hat{\mathbf{s}} \times \hat{\phi}) - (\hat{\mathbf{s}} \cdot \hat{\rho}) (\hat{\mathbf{s}} \cdot \hat{\theta}) \quad (2-2.40)$$

$$\frac{1}{s^2} \Gamma = (\hat{\rho} + \hat{\mathbf{s}} \times \hat{\psi}) \cdot (\hat{\phi} + \hat{\theta} \times \hat{\mathbf{s}}) - (\hat{\mathbf{s}} \cdot \hat{\rho}) (\hat{\mathbf{s}} \cdot \hat{\phi}) \quad (2-2.41)$$

である。ここで上式に式(2-2.24)を代入し、さらに式(2-2.20)及び式(2-2.21)を用いて整理すると、変数  $z$  及び  $r$  を含まない形が得られる。結果のみを示せば、

$$\begin{aligned} \Lambda &= \frac{1}{2} (\mathbf{R} \cdot \mathbf{R}) [(\hat{\rho} \cdot \hat{\phi}) - (\hat{\psi} \cdot \hat{\theta})] \\ &\quad + [(\mathbf{R} \cdot \hat{\psi}) (\mathbf{R} \cdot \hat{\theta}) - (\mathbf{R} \cdot \hat{\rho}) (\mathbf{R} \cdot \hat{\phi})] \end{aligned} \quad (2-2.42)$$

$$\begin{aligned} \Gamma &= \frac{1}{2} (\mathbf{R} \cdot \mathbf{R}) [(\hat{\rho} \cdot \hat{\theta}) + (\hat{\psi} \cdot \hat{\phi})] \\ &\quad - [(\mathbf{R} \cdot \hat{\rho}) (\mathbf{R} \cdot \hat{\theta}) + (\mathbf{R} \cdot \hat{\psi}) (\mathbf{R} \cdot \hat{\phi})] \end{aligned} \quad (2-2.43)$$

となる。

式(2-2.38)及び式(2-2.39)は、可積分条件から導かれたものであるが、式(2-2.42)及び式(2-2.43)と併せて開口面写像  $\mathbf{M}_A$  を制限しており、双反射鏡アンテナでは、鏡面修整によっても一般には任意の開口面写像  $\mathbf{M}_A$  を実現することはできないことを意味している<sup>[2-2.4], [2-2.5]</sup>。

2-2.2.5 交差偏波消去条件<sup>[2-2.6]</sup>

さて、鏡面に  $\mathbf{e}$  なる偏波 (電界) ベクトルの電波が入射したときの、反射による偏波ベクトルの変換は、反射点における単位法線ベクトルを  $\hat{\mathbf{n}}$  とするとき、次式のように表せる。

$$\mathbf{P}(\mathbf{e}, \hat{\mathbf{n}}) = 2(\mathbf{e} \cdot \hat{\mathbf{n}}) \hat{\mathbf{n}} - \mathbf{e} \quad (2-2.44)$$

この  $\mathbf{P}$  を用いると、交差偏波消去条件は

$$\mathbf{P}(\hat{\rho}, \hat{\mathbf{n}}_m) \cdot \mathbf{P}(\hat{\theta}, \hat{\mathbf{n}}_s) = 1 \quad (2-2.45)$$

と表現することができる。ここで、スネルの反射法則が成立しているから、

$$\hat{\mathbf{n}}_m = \frac{\hat{\mathbf{z}} - \hat{\mathbf{s}}}{|\hat{\mathbf{z}} - \hat{\mathbf{s}}|} \quad (2-2.46)$$

$$\hat{\mathbf{n}}_s = \frac{\hat{\mathbf{s}} - \hat{\mathbf{r}}}{|\hat{\mathbf{s}} - \hat{\mathbf{r}}|} \quad (2-2.47)$$

と書くことができ、これらを式 (2-2.45) に代入して整理すると、双反射鏡アンテナにおける交差偏波消去条件の一般表現として

$$\Omega = 0 \quad (2-2.48)$$

が得られる。但し、

$$\frac{1}{s^2} \Omega = (1 - \hat{\mathbf{s}} \cdot \hat{\mathbf{z}})(\hat{\rho} \cdot \hat{\mathbf{r}})(\hat{\mathbf{s}} \cdot \hat{\theta}) + (1 - \hat{\mathbf{s}} \cdot \hat{\mathbf{r}})(\hat{\mathbf{z}} \cdot \hat{\theta})(\hat{\mathbf{s}} \cdot \hat{\rho}) - (1 - \hat{\mathbf{z}} \cdot \hat{\mathbf{r}})(\hat{\mathbf{s}} \cdot \hat{\rho})(\hat{\mathbf{s}} \cdot \hat{\theta}) - (1 - \hat{\rho} \cdot \hat{\theta})(\hat{\mathbf{s}} \cdot \hat{\mathbf{z}})(\hat{\mathbf{s}} \cdot \hat{\mathbf{r}}) \quad (2-2.49)$$

である。ここでこれまでと同様に上式に式 (2-2.24) を代入し、さらに式 (2-2.20) 及び式 (2-2.21) を用いて整理すると、

$$\begin{aligned} \Omega &= \frac{1}{2}(\mathbf{R} \cdot \mathbf{R})[(\hat{\rho} \cdot \hat{\theta}) + (\hat{\psi} \cdot \hat{\phi}) + (\hat{\mathbf{z}} \cdot \hat{\mathbf{r}}) - 1] \\ &\quad - [(\mathbf{R} \cdot \hat{\rho})(\mathbf{R} \cdot \hat{\theta}) + (\mathbf{R} \cdot \hat{\psi})(\mathbf{R} \cdot \hat{\phi}) + (\mathbf{R} \cdot \hat{\mathbf{z}})(\mathbf{R} \cdot \hat{\mathbf{r}})] \\ &= \Gamma - T \end{aligned} \quad (2-2.50)$$

となる。

2-2.3 回転対称な開口面写像<sup>[2-2.1] ~ [2-2.3]</sup>

2-2.2.4 節の結果、開口面分布に任意性のないことが明かとなったが、この結果は開口面電界分布のそれまでをも否定するものではない。電界強度は写像の関数行列式 (Jacobian) によって決定されるからである。これについては、2-2.5 節で検討する。ここでは、回転対称な開口面電界分布に対する十分条件として「回転対称な開口面

写像」を実現する双反射鏡系について検討する。開口面写像  $\mathbf{M}_A$  が回転対称であるとは、

$$\rho = \rho(\theta), \quad \psi = \psi(\phi) = \pm\phi + \psi_0 \quad (2-2.51)$$

(但し、 $\psi_0$  は定数) と表現できるから、式 (2-2.38) 及び式 (2-2.39) は

$$\Lambda \left( \frac{d\rho}{d\theta} \sin\theta + \frac{d\psi}{d\phi} \rho \right) = 0 \quad (2-2.52)$$

となる。そこで上式を満たす十分条件として、

$$\text{Case I} : \Lambda = 0 \quad (2-2.53)$$

$$\text{Case II} : \frac{d\rho}{d\theta} \sin\theta + \frac{d\psi}{d\phi} \rho = 0 \quad (2-2.54)$$

の2つの場合に分けることができる。

## (1) Case I

この場合には、鏡面上の至る所で  $\Lambda = 0$  が成立しなければならない。そこで、まず中心光線近傍に着目し、式 (2-2.42) で  $\theta, \rho \rightarrow 0$  なる極限を考えると、

$$(\hat{\mathbf{z}} \times \hat{\mathbf{z}}_f) \cdot \mathbf{X}_f = 0 \quad (2-2.55)$$

でなければならないことを導くことができる。即ち、ダブルオフセット配置は許されない。

式 (2-2.55) を満たす場合として、一次放射器の軸  $\hat{\mathbf{z}}_f$  がビーム方向  $\hat{\mathbf{z}}$  と一致する場合を考えると、式 (2-2.42) で

$$\hat{\mathbf{x}}_f = \hat{\mathbf{x}}, \quad \hat{\mathbf{y}}_f = \hat{\mathbf{y}}, \quad \hat{\mathbf{z}}_f = \hat{\mathbf{z}} \quad (2-2.56)$$

と置くことによって

$$\mathbf{X}_f \times \hat{\mathbf{z}} = 0 \quad (2-2.57)$$

かつ

$$\sin(\psi - \phi) = 0, \quad \therefore \psi = \phi + \begin{cases} 0 \\ \pi \end{cases} \quad (2-2.58)$$

が得られる。即ち、一次放射器の軸  $\hat{\mathbf{z}}_f$  がビーム方向  $\hat{\mathbf{z}}$  と一致する場合には回転対称なアンテナのみが式 (2-2.53) を満足する。このとき、 $\rho(\theta)$  は任意であり、2次元の鏡面修整に帰着する。

次に、シングルオフセット配置の場合には、 $\hat{\mathbf{z}}$  と  $\hat{\mathbf{z}}_f$  のなす角度を  $p$ 、但しその符号を、

$$\text{sgn}(p) = \text{sgn}((\hat{\mathbf{z}} \times \mathbf{X}_f) \cdot (\hat{\mathbf{z}} \times \hat{\mathbf{z}}_f)) \quad (2-2.59)$$

とすると、

$$\rho = |\rho_m| \tan \frac{\theta}{2} \quad (2-2.60)$$

$$\psi = \phi + \begin{cases} 0 \\ \pi \end{cases}, \quad \begin{cases} \rho_m > 0; \text{Cassegrainian} \\ \rho_m < 0; \text{Gregorian} \end{cases} \quad (2-2.61)$$

但し、

$$\rho_m = \mathbf{X}_f \cdot \hat{\mathbf{z}} + K - |\mathbf{X}_f \times \hat{\mathbf{z}}| \cot \frac{p}{2} \quad (2-2.62)$$

が得られる。即ち、シングルオフセット配置の場合には、中心光線を与えたとき、式(2-2.53)を満足する解が(カセグレンとグレゴリアンの別を含めて)唯一つ存在することが分かる。式(2-2.60)~(2-2.62)は、回転2次曲面からなるオフセットカセグレン/グレゴリアンアンテナの交差偏波消去条件<sup>[2-2.7]~[2-2.9]</sup>の別表現になっておりこのとき、式(2-2.48)も成立する。

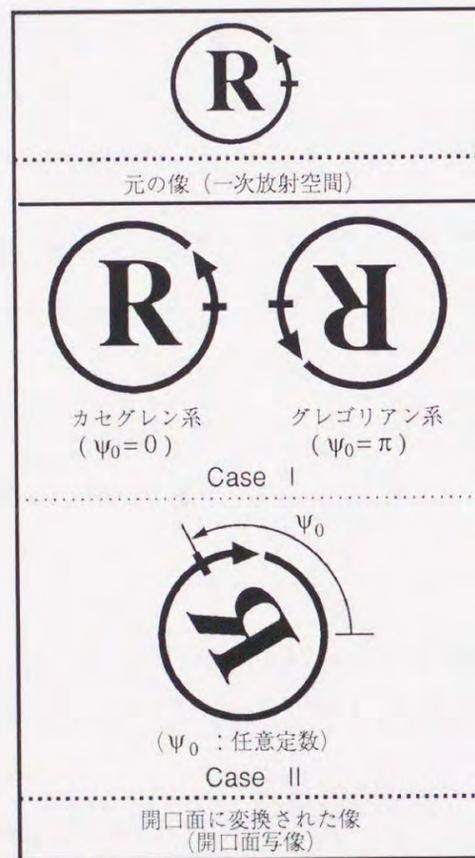


図2-2.2 回転対称な開口面写像

(2) Case II

この場合には、 $\rho_0 (>0)$  及び  $\psi_0$  を任意定数として、

$$\rho = \rho_0 \tan \frac{\theta}{2} \quad (2-2.63)$$

$$\psi = -\phi + \psi_0 \quad (2-2.64)$$

とが得られる。上式で、 $\phi$  の前の負号が、Case I との本質的な差を示している。即ち、図2-2.2に示されるように、開口面写像が2回の反射後、鏡像を与えるような性質を有している。これは、副反射鏡から主反射鏡の間の波面が凸面と凹面を組み合わせた鞍形面となることを意味しており、副反射鏡と主反射鏡の間に焦線が存在する。式(2-2.63)の形は等価パラボラにおける  $\rho$  と  $\theta$  との関係と同じであるが、係数  $\rho_0$  が任意である点にもう1つの特徴がある。Case II では、中心光線については何の制限もないことから、ダブルオフセット配置でも回転対称な開口面写像が実現できる。

2-2.4 新しい範疇の反射鏡系<sup>[2-2.1]~[2-2.3]</sup>

2-2.3節の結果、カセグレン系でもグレゴリアン系でもない双反射鏡系により、ダブルオフセット配置でも回転対称な開口面写像が実現できることが明かとなった。そこで、この新しい範疇の反射鏡系について、基礎的検討を加えておく。

2-2.4.1 鏡面形状

式(2-2.63)より、

$$\cos \theta = \frac{\rho_0^2 - \rho^2}{\rho_0^2 + \rho^2}, \quad \sin \theta = \frac{2\rho_0\rho}{\rho_0^2 + \rho^2} \quad (2-2.65)$$

となる。これを用いて  $\theta$  を、また、式(2-2.64)を用いて  $\phi$  を、それぞれ  $\rho$  及び  $\psi$  で表すと、主反射鏡  $z(\rho, \psi)$  に対する微分方程式(2-2.25)を整理することによって、 $\psi$  : 一定なる径にそっての鏡面形状が、次の線形常微分方程式で表される。

$$\frac{dz}{d\rho} = \frac{1}{P(\rho)} (Q_1(\rho)z + Q_2(\rho)) \quad (2-2.66)$$

ここで、 $P(\rho)$ 、 $Q_1(\rho)$  及び  $Q_2(\rho)$  は、それぞれ  $\rho$  に関して4次、3次及び4次の多項式となる。従って、 $z(\rho, \psi)$  は有理関数の積分によって解くことができ、

$$z(\rho, \psi) = \exp\left(\int \frac{Q_1(\rho)}{P(\rho)} d\rho\right) \left[ \int \frac{Q_2(\rho)}{P(\rho)} \exp\left(-\int \frac{Q_1(\rho)}{P(\rho)} d\rho\right) d\rho + I \right] \quad (2-2.67)$$

で与えられる。但し、I は積分定数で中心光線座標により決定される。

特に、軸対称配置 ( $\hat{z}_f = \hat{z}$  かつ  $\mathbf{X}_f \times \hat{z} = 0$ ) の場合には、解を解析的に求めることが可能であり、

$$z(\rho, \psi) = \frac{1}{2K'}\rho^2 - r_0 + \frac{r_0}{K'\rho_0} \sqrt{\rho^4 - 2K'\rho_0\rho^2 \cos(2\psi - \psi_0) + (K'\rho_0)^2} \quad (2-2.68)$$

となる。また、式 (2-2.21) より副反射鏡は、

$$r(\theta, \phi) = \frac{2K'r_0}{2r_0(1 - \cos \theta) + \sqrt{\rho_0^2(1 - \cos \theta)^2 - 2K'\rho_0 \sin \theta \cos(2\phi - \psi_0) + (K'(1 + \cos \theta))^2}} \quad (2-2.69)$$

となる。但し、

$$K' = K + \mathbf{X}_f \cdot \hat{z} \quad (2-2.70)$$

$$r_0 = |\mathbf{X}_{s0} - \mathbf{X}_f| = \frac{1}{2}(K - \mathbf{X}_f \cdot \hat{z}) \quad (2-2.71)$$

である。この時の両鏡面は  $\hat{z}$  軸に関して線対称であって、任意定数  $\psi_0$  は鏡面全体を  $\hat{z}$  軸回りに回転移動する角度分としての意味しか持たない。従って与えられた中心光線に対する鏡面形状の自由度としては実質的に  $\rho_0$  の任意性だけである。そして曲面系は  $\psi = \psi_0/2$  面内ではカセグレン系であり、 $\psi = (\psi_0 + \pi)/2$  で面内はグレゴリアン系である。結局、軸対称配置の中心光線の場合には、回転対称な系を与える従来のカセグレン/グレゴリアン系 (Case I) の方が自由度が高い ( $\rho(\theta)$  及び  $\psi_0 = 0, \pi$  の任意性) と言える。

これに対し、シングル及びダブルオフセット配置の場合には、鏡面形状の自由度として  $\rho_0$  及び  $\psi_0$  の2重の任意性がある。鏡面形状を具体的に求めるには、回転対称な鏡面修整アンテナと同様に、式 (2-2.66) を Runge-Kutta 法などにより中心光線の反射点を初期値として数値的に求めればよい。

図2-2.3にこの新しい双反射鏡系の例をワイヤーフレームモデルで示す。図2-2.3 (a) の軸対称配置のものは、 $x-z$  断面内でカセグレン系、 $y-z$  断面内でグレゴリアン系であり、また図2-2.3 (b) のシングルオフセット配置のものでは  $y-z$  断面内でカセグレン系となっている。

#### 2-2.4.2 偏波特性

2-2.2節で明かとなった交差偏波消去条件 ( $\Omega = 0$ , 式 (2-2.48)) は、2

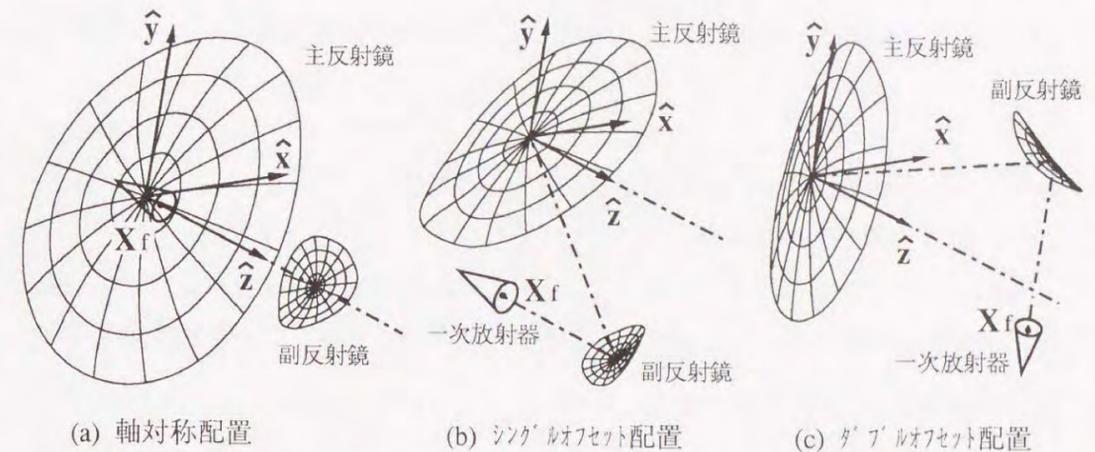


図2-2.3 Case II の双反射鏡アンテナ構成例

2-2.3節で検討した開口面写像が回転対称となる鏡面系でも必ずしも満足はされない。実際、ここで検討しているCase IIの新しい範疇の双反射鏡系では、交差偏波成分が発生している。

図2-2.4は、図2-2.3 (c) に示したダブルオフセットな双反射鏡系について、開口面上における偏波ベクトルの分布模様を表したものである。即ち、開口面中央で  $x$  偏波、 $y$  偏波となるような2つの直交偏波波源 (理想的なホイヘンスソース) を仮定し、偏波ベクトルの追跡によって得た開口面上の偏波方向を流線で表現したものである。(但し、ここでの流線の密度は電界強度を意味するものではない。) 図2-2.4より、Case IIの反射鏡系では、一般に開口面上に渡って交差偏波を完全に消去する

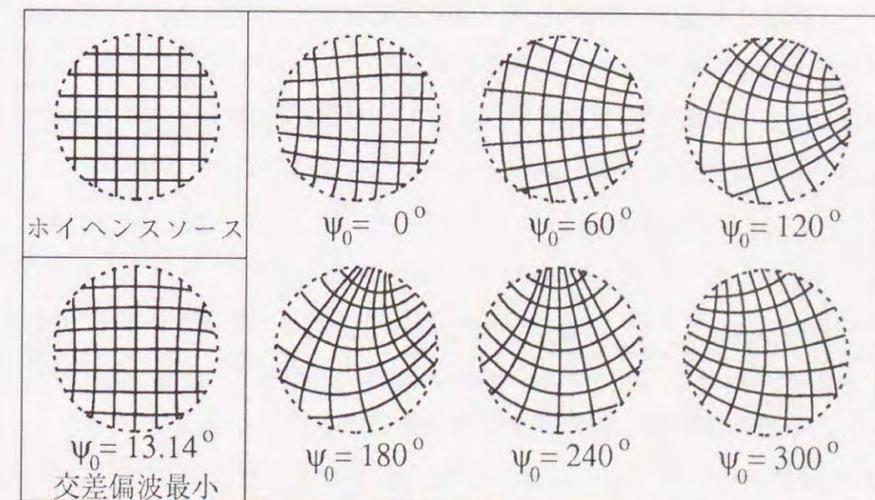


図2-2.4 Case II のダブルオフセットアンテナの開口面偏波模様

ことは出来ないものの、任意定数  $\psi_0$  の変化によって交差偏波成分を最小にできることが分かる。

2-2.5 鏡面修整による開口面電力密度分布の制御<sup>[2-2.10]</sup>

## 2-2.5.1 電力の平衡条件

一次放射ビームの電力パターンを  $P_1(\theta, \phi)$ 、開口面の電力密度分布を  $P_2(\rho, \psi)$  とすると、光線束 (Ray tube) 内を運ばれる電力は不変であるから、電力の平衡条件から、

$$\frac{P_1(\theta, \phi) \sin \theta}{P_2(\rho, \psi) \rho} = \frac{\partial(\rho, \psi)}{\partial(\theta, \phi)} = \left| \frac{\partial \rho}{\partial \theta} \frac{\partial \psi}{\partial \phi} - \frac{\partial \rho}{\partial \phi} \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \right| \quad (2-2.71)$$

が成立する。但し、 $P_1(\theta, \phi)$  及び  $P_2(\rho, \psi)$  は対応した全領域 (一次放射器から副反射鏡を見込む角度全体及び開口面全体) での積分値が等しいように正規化されているものとする。ここで  $\partial(\rho, \psi) / \partial(\theta, \phi)$  は関数行列式 (Jacobian) である。式 (2-2.71) と可積分条件式 (2-2.38) の1組の方程式は、開口面写像  $M_A$  ( $\rho(\theta, \phi)$  及び  $\psi(\theta, \phi)$ ) に関する連立偏微分方程式と見なすことができる。即ち、与えられた電力変換と可積分条件を同時に満足する開口面写像がこれら1組の偏微分方程式の解として得られる。従って、これを解いて  $\rho(\theta, \phi)$  及び  $\psi(\theta, \phi)$  を求め、さらに式 (2-2.27) を解いて  $r$  が、式 (2-2.20) により  $z$  を求めることができる。

ところで、以上の説明から明らかなように、式 (2-2.71) 及び (2-2.38) から得られる開口面写像には、偏波に関する拘束条件を満足する自由度は残されていない。即ち、2枚の反射鏡から構成される双反射鏡系の自由度としては、一般的には開口面の位相と電力を同時に制御する分しかない。

具体的に鏡面を求める手順をシングルオフセット双反射鏡アンテナを例に示す。解くべき連立方程式を変形して再掲すると

$$\frac{\partial \rho}{\partial \theta} \frac{\partial \psi}{\partial \phi} - \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \frac{\partial \rho}{\partial \phi} = \pm \frac{P_1(\theta, \phi) \sin \theta}{P_2(\rho, \psi) \rho} \quad (2-2.72)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial \theta} \Lambda \sin \theta + \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \Gamma \rho \sin \theta = \frac{\partial \rho}{\partial \phi} \Gamma - \frac{\partial \psi}{\partial \phi} \Lambda \rho \quad (2-2.73)$$

である。これを数値的に解くのに以下の方法を用いる。

変数  $\phi$  の区間  $(-\pi, \pi)$ 、あるいは対称性が利用できる場合は区間  $(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2})$  を  $N_\phi$  個に分割し、標本点番号  $k$  ( $k=0, 1, 2, \dots, N_\phi$ ) を付与する。そして、変数  $\phi$  に関する

る微係数を、例えば、中心差分により、

$$\frac{\partial \rho}{\partial \phi} \Big|_{\theta=\text{const.}, \phi=\phi_k} \cong \frac{\rho_{k+1} - \rho_{k-1}}{2 \Delta \phi} \Big|_{\theta=\text{const.}} \quad (2-2.74)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial \phi} \Big|_{\theta=\text{const.}, \phi=\phi_k} \cong \frac{\psi_{k+1} - \psi_{k-1}}{2 \Delta \phi} \Big|_{\theta=\text{const.}}$$

但し、

$$\Delta \phi \equiv \phi_{k+1} - \phi_k = \frac{\pi}{N_\phi} \quad (2-2.75)$$

で近似する。これらを式 (2-2.72) 及び (2-2.73) に代入すれば、次の  $2(N_\phi+1)$  組の方程式が得られる。

$$\frac{d\rho_k}{d\theta} \frac{\psi_{k+1} - \psi_{k-1}}{2 \Delta \phi} - \frac{d\psi_k}{d\theta} \frac{\rho_{k+1} - \rho_{k-1}}{2 \Delta \phi} = \pm \frac{P_1(\theta, \phi_k) \sin \theta}{P_2(\rho_k, \psi_k) \rho_k} \quad (2-2.76)$$

$$\frac{d\rho_k}{d\theta} \Lambda_k \sin \theta + \frac{d\psi_k}{d\theta} \Gamma_k \rho_k \sin \theta = \frac{\rho_{k+1} - \rho_{k-1}}{2 \Delta \phi} \Gamma_k - \frac{\psi_{k+1} - \psi_{k-1}}{2 \Delta \phi} \Lambda_k \rho_k \quad (2-2.77)$$

これは変数  $\theta$  に関する  $2(N_\phi+1)$  元の連立常微分方程式と見なせるから、Runge-Kutta 法を用いて数値解を求めることができる。但し、初期値 (極  $\theta=0$  における値) は次の通りとする。

$$\rho_k = 0, \frac{d\rho_k}{d\theta} = \sqrt{\frac{P_1(\theta=0)}{P_2(\rho=0)}} = \frac{|\rho_m|}{2}, \psi_k = \begin{cases} \pm \phi_k \\ \pi \pm \phi_k \end{cases}, \frac{d\psi_k}{d\theta} = 0 \quad (2-2.78)$$

ここで  $\rho_m$  は、同一の中心光線を持ちしかも交差偏波消去条件を満足した回転2次曲面系における開口面写像に対応した値で、式 (2-2.62) で与えられる定数である。即ち、鏡面系の中心光線近傍での形状が交差偏波消去条件を満足する回転2次曲面系にその第2次基本量まで一致するように予め中心光線を決定しておくのである。このことは、微分方程式を中心光線側から求根していくことと併せて鏡面設計上の注意点である。

(これに対し、回転対称系の場合には鏡面のエッジ側から求根しようが中心側から求根しようが実質的に同じ結果を与える。) また、式 (2-2.78) の  $\psi_k$  に関する複号は、カセグレン/グレゴリアン/Case II の2種類に対応している。

尚、最終的に必要なのは開口面写像 ( $\rho(\theta, \phi)$  及び  $\psi(\theta, \phi)$ ) よりも、鏡面そのもの ( $r(\theta, \phi)$  及び  $z(\rho, \psi)$ ) であるから、計算機プログラムを作成する場合には、連立微分方程式 (2-2.76) 及び (2-2.77) を求根する際に、同時に式 (2-2.27) を (連立させて) 解くのが効率的である。

2-2.5.2 数値計算例

ここでは、一次放射ビームの電力パターン $P_1(\theta, \phi)$ を

$$P_1(\theta, \phi) = P_1(\theta) = \cos^{2n}\theta, \quad (n = 40) \quad (2-2.79)$$

とし、開口面電力密度分布 $P_2(\rho, \psi) = P_2(\rho)$ を、一様分布あるいは Taylor 分布として修整オフセットグレゴリアンアンテナを設計した結果を示す。

まず、図2-2.5は、 $P_2(\rho)$ を一様分布とした場合に得られた鏡面系を示している。同図(a)には、焦点から発射された光線群が副反射鏡で反射される様子を破線で示しており、これが未修整のオフセットグレゴリアンアンテナと異なり、副反射鏡と主反射鏡との間で焦点を結んでいない様子が分かる。

得られた鏡面が正しく可積分条件を満足しているかは、鏡面上のある点を、異なった積分路に沿った数値積分により求め、それらの座標値の差を評価する方法により検証することができる<sup>[2-2.11]</sup>。表2-2.1は図2-2.5(b)に示した主反射鏡上の上端点Aのz座標値、及び、副反射鏡上の下端点Bのr座標値について、2つの積分路「1」並びに「2+2'」に沿って求めた結果の差を示したものである。同表には、比較のために、可積分条件を無視して、回転対称な開口面写像、即ち

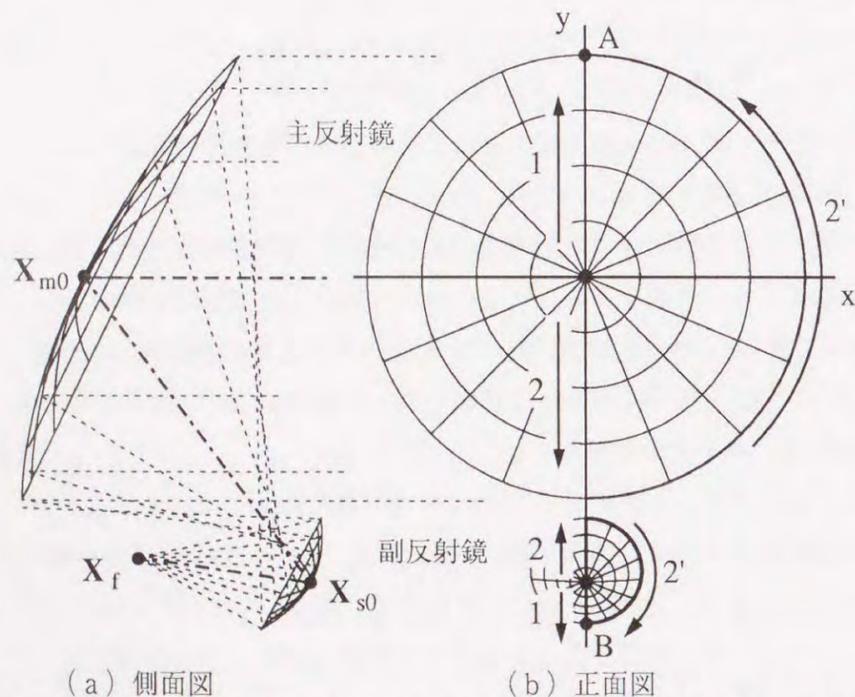


図2-2.5 修整オフセットグレゴリアンアンテナの鏡面系 (一様開口電力密度分布)

表2-2.1 解曲面の精度 (可積分条件の検証)

上段：可積分条件を満足  
下段：〃 を無視

座標値	開口面電界強度分布				
	一様分布	Taylor分布			
		-30 dB	-35 dB	-40 dB	-45 dB
Z	0.011 3.37	0.001 -0.83	0.006 -0.68	-0.014 -0.85	0.04 -1.04
r	0.013 5.38	0.008 -0.27	0.006 -0.83	0.006 -1.91	0.008 -3.34

(単位：mm 但し、D=3000mm)

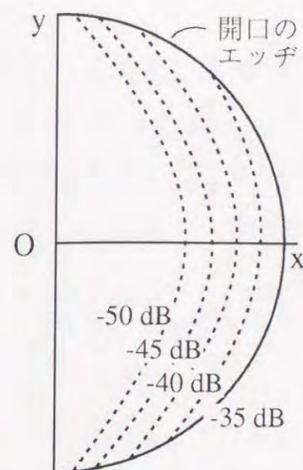


図2-2.6 開口面交差偏波レベル

$$\frac{\partial \rho}{\partial \phi} = \frac{\partial \psi}{\partial \theta} = 0, \quad \frac{d\rho}{d\theta} = \frac{\sin \theta}{\rho} \frac{P_1(\theta)}{P_2(\rho)}, \quad \frac{d\psi}{d\phi} = 1 \quad (2-2.80)$$

を仮定して、鏡面を求めた場合の結果も示してある。これより、可積分条件を付与した場合には、数値解の誤差が $10^{-5}D$  (D: 開口径) 以下と十分な精度が得られていることが分かる。誤差の要因としては、式(2-2.74)の微係数の差分による近似が主であると考えられる。これに対し、可積分条件を無視した場合には、誤差が $10^2$ 程度大きく、放射特性の劣化が問題となる。

図2-2.6は、図2-2.5に示した、開口面電力パターンが一様分布のアンテナ開口上の交差偏波レベルの等レベル線図であり、開口のエッジに近い領域ほど交差偏波レベルが大きくなることを示している。これには、2-2.5.1節において述べたように、得られた鏡面系が中心光線近傍では、回転2次曲面系の交差偏波消去条件を満足するように設計している効果が現われている。図2-2.6に示されている交差偏波レベルは全体的に見て十分低く、実際には、一次放射器の交差偏波特性あるいは幾何光学では無視している回折現象によって発生する交差偏波成分が支配的となるので幾何光学的な鏡面設計の立場からは問題となるものではない。

尚、幾何光学的鏡面修整により開口面電力密度分布を制御した双反射鏡アンテナの放射特性に関しては、アンテナ口径 $(D/\lambda)$ と実現可能な高能率・低サイドローブな性能との関係を含めて第3章で検討する。

## 2-2.6 まとめ

双反射鏡アンテナの開口面写像が満足すべき条件を可積分条件から陽に書き下した。その結果である式(2-2.34)及び(2-2.35)は、鏡面修整型を含む双反射鏡アンテナ一般に適用できるものであり、双反射鏡アンテナの設計に有用な基本的な条件式である。さらに、交差偏波消去条件をも鏡面修整型を含む一般形として導き、これまた開口面写像を拘束する条件となることを明かにした。

これら条件に具体的に検討を加え、開口面写像が回転対称となる反射鏡系を列挙し、従来の回転2次曲面系では(鏡面修整を施したとしても)ダブルオフセット配置が実現できないこと、シングルオフセット配置では、カセグレン/グレゴリアン系しか解がないことを示した。さらに、これらの形式とは別に、開口面写像が鏡像を与えるような新しい範疇の反射鏡系が存在し、ダブルオフセット配置でも回転対称な開口面写像が実現されることを明らかにし、その具体的な鏡面形状を示した。また、その偏波特性についても基礎的検討を加えた。

次に、開口面写像は回転対称とはならないが、開口面電力密度分布を円形開口に整合した一様分布あるいはTaylor分布のような回転対称な分布に制御することは可能であることを示した。そして、具体的な鏡面設計法として偏微分方程式を連立常微分方程式の初期値問題の形に近似させる方法を示し、その有効性を数値計算により検証した。これにより、鏡面修整型オフセット双反射鏡アンテナが回転対称系とほぼ同等の手順により設計可能となった。

尚、ここではペンシルビームを放射するアンテナの設計を前提として、開口面電界の位相分布を一様(同相)にするものとして説明した。しかし式(2-2.19)における通路長 $K$ を定数ではなく、開口面座標 $(\rho, \psi)$ の関数とするだけでこれまでの議論に不都合は生じないから、任意の位相分布に制御する場合も全く同等の扱いが可能である。

## 第3章 物理光学的鏡面修整理論

## 3.1 まえがき

デジタル通信技術の発達や通信用マイクロ波装置の高性能化に併せ、アンテナの小形化に対する要求も高まってきている。対向(point-to-point)型通信においては、回線設計上必要なアンテナ利得と想定される開口能率(通常反射鏡アンテナでは60~70%)とからアンテナの口径がほぼ決められる。そこで、衛星放送受信専用アンテナなどシステムによっては、開口能率をいかに100%に近づけ、物理的なアンテナの大きさを小さくするかが課題になる。一方、干渉波が存在する環境下での使用を前提としたアンテナ、あるいは、送信を行うアンテナでは、基本的に低サイドローブ化による干渉量の低減が重要な技術課題である。従って、一般には、高能率でかつ可能な限り低サイドローブな小口径アンテナの開発がアンテナ設計者に与えられた課題である。

反射鏡アンテナの指向性の合成に有効な鏡面修整は、第2章で述べたように、通常幾何光学(Geometrical Optics, GO)近似<sup>[3.1]</sup>に基づいている。幾何光学は、波数 $k$ ( $2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$ :波長) $\rightarrow\infty$ における漸近表現であり、反射鏡からの散乱電磁界としては、いわゆる鏡面上の反射点からの反射波成分のみを、扱っており、幾何光学的回折理論(Geometrical Theory of Diffraction, GTD)<sup>[3.2], [3.3]</sup>で言うところの鏡面エッジからの回折波成分を無視したものである。従って、幾何光学的な鏡面修整法を $D/\lambda$ ( $D$ :反射鏡口径)の小さいアンテナに適用する場合には、回折現象により発生する誤差が問題となってくる。鏡面修整型の双反射鏡アンテナでは、(口径の小さい)副反射鏡放射パターンの誤差により開口面電界強度分布が所望分布とずれ、アンテナ放射特性を劣化させる要因となる<sup>[3.4]</sup>。特に低サイドローブ化を目的としたオフセット形式のアンテナではこの誤差にオフセットによる非対称な成分が重畳される。従って、鏡面修整型小形アンテナにより、放射指向性を低いレベルまで制御するには、反射鏡の大きさとの関係を含めて、回折現象がアンテナ性能、特にサイドローブ特性に及ぼす影響を検討し、設計に反映させることが必要である。

本章では、ペンシルビームを放射する小口径のオフセット双反射鏡アンテナについて、まず幾何光学的鏡面修整を施した場合の問題点を明らかにする。次に、小口径アンテナの設計に適した物理光学的鏡面修整法を提案しその有効性について検討を加える。そして、鏡面修整により達成できる高能率・低サイドローブ特性の限界について明らかにする。

なお、ここではオフセット双反射鏡アンテナとして、グレゴリアン形式を対象として議論を進めるが、その内容はカセグレン形式にも適用可能である。また、開口形状とし

では、最も基本的な円形を想定している。

3.2 幾何光学的鏡面修整法の限界 [3.5], [3.6]

第2章2-2.5節で述べた幾何光学的鏡面修整（以下、GO修整）法により開口面電力密度分布を制御した修整オフセットグレゴリアンアンテナ（図3.1）を設計し、その特性を計算機シミュレーション評価することによって、GO修整を施した場合に反射鏡の大きさが放射特性に及ぼす影響について検討する。シミュレーションでは、一次放射ビームの電力パターン $P_1(\theta, \phi)$ を

$$P_1(\theta, \phi) = P_1(\theta) = \cos^{2n}\theta, \quad (n = 40) \quad (3.1)$$

で近似している。また、副反射鏡の口径  $d$  と主反射鏡の口径  $D$  との比を

$$d/D = 0.25 \quad (3.2)$$

で一定としている。

図3.2は、所望の開口面電力密度分布  $P_2(\rho, \psi) = P_2(\rho)$  を一様分布とした場合の、開口面電界分布を副反射鏡の大きさ  $d$  をパラメータとして示している。同図には比較のために、一次放射ビームの電力パターンを鋭くし（式(3.1)で  $n = 80$ ）、副反射鏡エッジレベルを約-20dBから約-40dBに下げた場合の結果を破線で示した。図3.2より副反射鏡口径  $d/\lambda$  が小さいほど一様分布からのずれが大きく、かつその広がり

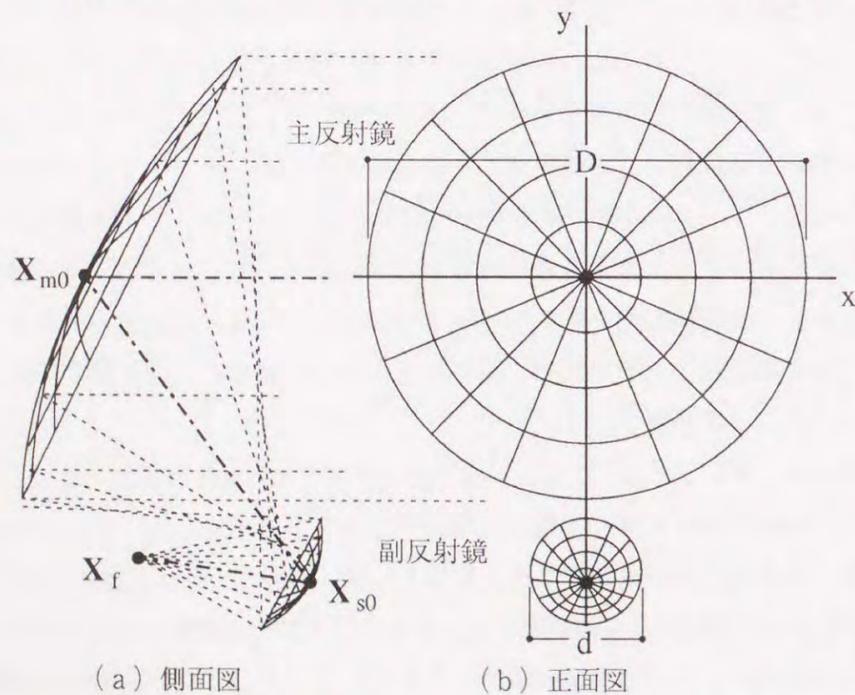


図3.1 GO修整オフセットグレゴリアンアンテナ

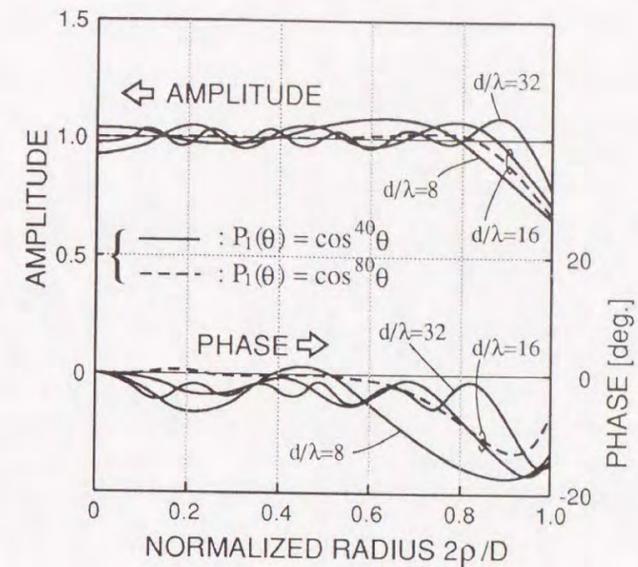


図3.2 GO修整アンテナの開口面電界分布

面中央部まで及んでいることが分かる。開口端部の近傍では、振幅誤差には  $d/\lambda$  の違いが現われているのに対し、位相誤差にはそれがなく副反射鏡エッジレベルの違いのみが現われている。また振幅・位相ともに  $d/\lambda$  の大きさで定まる特徴的な空間周波数のリップル成分が見られる。副反射鏡エッジレベルを下げ回折波成分を抑えた場合（破線）にはリップル成分が低減され、所望分布に近い滑らかな開口面分布が得られている。しかしながら、一次放射器（ホーンアンテナ等）のパターンを鋭くすることは、その開口を大きくしなければならず、-40dBのような極めて低い副反射鏡エッジレベルを実現することは困難である。

次に、低サイドローブ特性を要求した場合、開口面電界分布の所望分布からのずれが放射パターンに及ぼす影響を検討する。所望の開口面電力密度分布  $P_2(\rho, \psi) = P_2(\rho)$  として（円形開口）Taylor分布 [3.7] を仮定しGO修整を施したアンテナの水平面内及び垂直面内の放射パターンを  $d/\lambda$  をパラメータとして評価した結果をそれぞれ図3.3及び図3.4に示す。同図には、開口面電界分布を幾何光学的に求めた場合に得られる放射パターンを“GO”で示した。これらから、次のことが分かる。

- (1)  $d/\lambda$  が小さいほど“GO”からのずれが大きい
- (2) 回折現象により開口面分布に位相誤差が生じる結果、パターンの零点 (null) が埋ったり、垂直面内のサイドローブが非対称になる。
- (3) (1) 及び (2) は、所望の開口面電力密度分布として低サイドローブなパターンを与える分布を用いて修整されたアンテナになる程著しい。

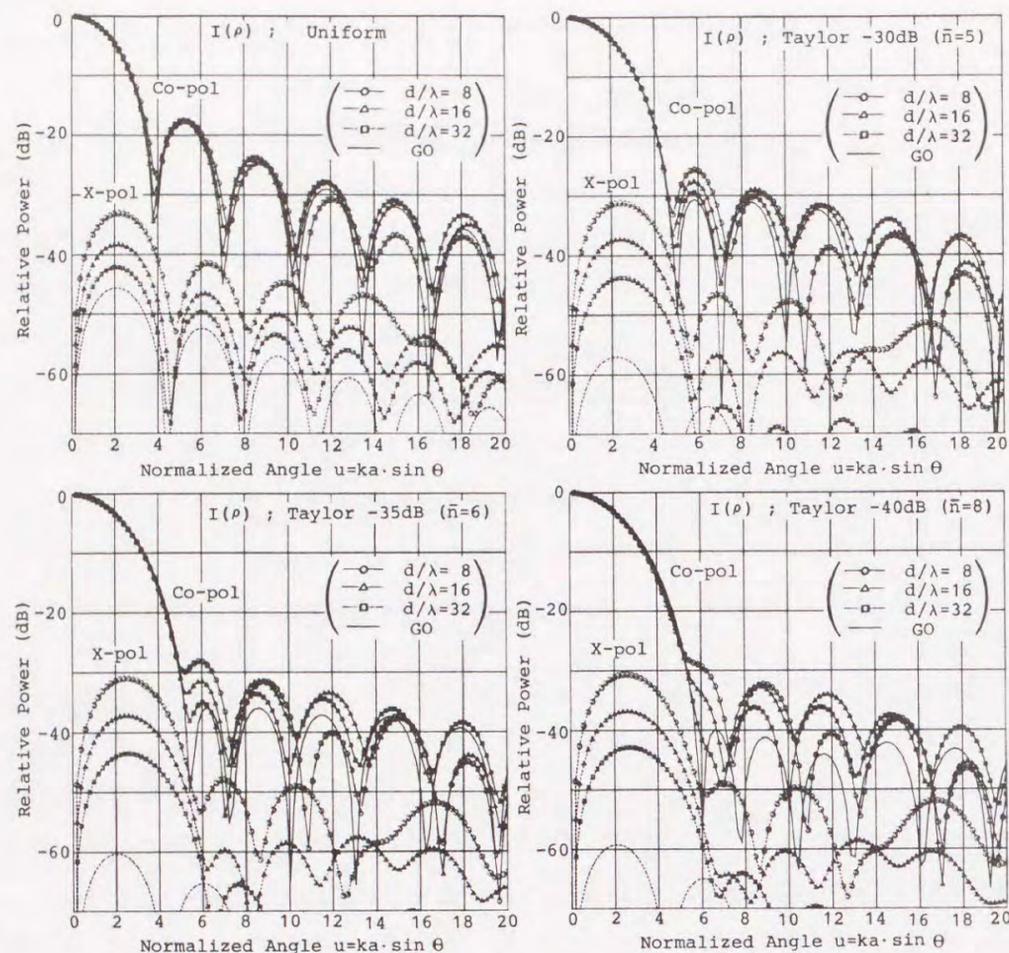


図3.3 GO鏡面修整アンテナの水平面内近軸パターン

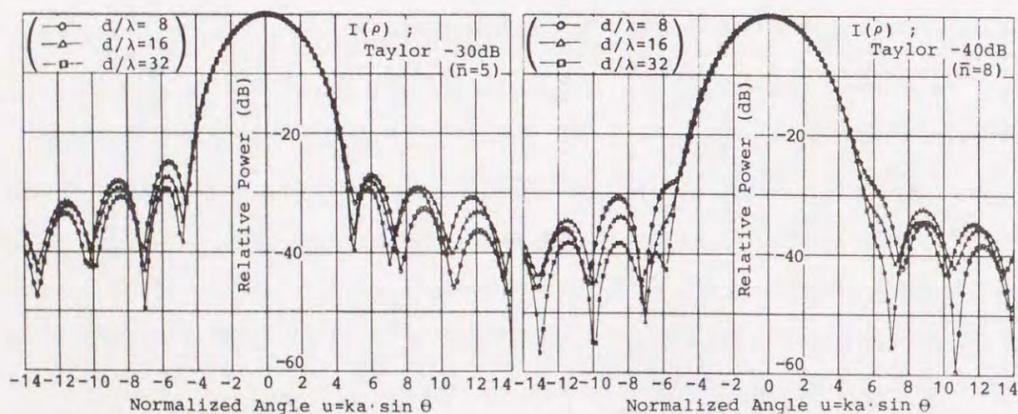


図3.4 GO鏡面修整アンテナの垂直面内近軸パターン

(4)  $d/\lambda$  が大きいほど交差偏波ピークレベルが低い。

(5) 所望の開口面電力密度分布の違いによる交差偏波特性の差は比較的小さい。

このうち、項目(5)は、第2章2-2.5で述べたように、幾何光学的意味の交差偏波成分が小さく、回折現象によって発生するものが支配的であることを示している。

次に、図3.5は、所望の開口面電力密度分布として与えたTaylor分布のもつサイドローブレベルとシミュレーション評価によって得られたサイドローブレベルとの関係を表したものである。図中の1つの $d/\lambda$ 値に対する3本の曲線は、水平及び垂直(上・下)方向の観測面内に於ける最大サイドローブレベルを表している。非対称な位相誤差のため、垂直面内も最大サイドローブレベルに帯の幅で示される量のアンバランスが発生することを示している。この図から所望の開口面電力密度分布にTaylor分布を用いて、高能率かつ低サイドローブな双反射鏡アンテナをGO修整法により設計する場合に見込むべきマージンを読み取ることができる。また、より低いサイドローブレベルをもつTaylor分布を用いてGO修整するほど上記アンバランスが増大し、しかも達成可能な最大サイドローブレベルの低下が鈍化して、ついには飽和する傾向が見られる。ここでの検討結果からは、 $d/\lambda=8, 16$ 及び $32$ に対してそれぞれサイドローブレベル約 $-31, -33$ 及び $-35\text{dB}$ が実現可能な限界となっている。

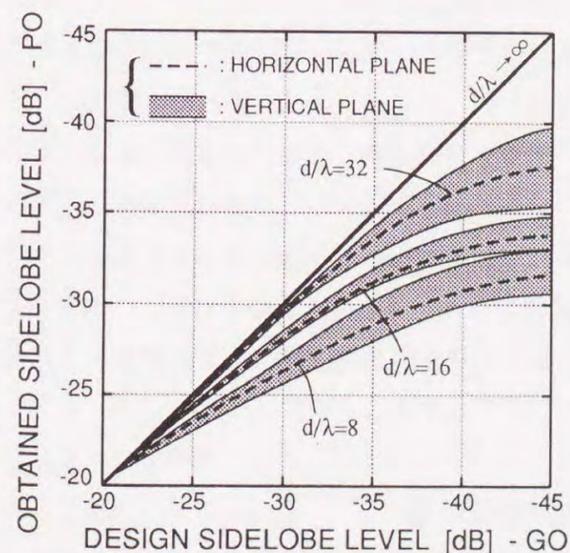


図3.5 回折現象による最大サイドローブレベルの幾何光学的設計値からの劣化

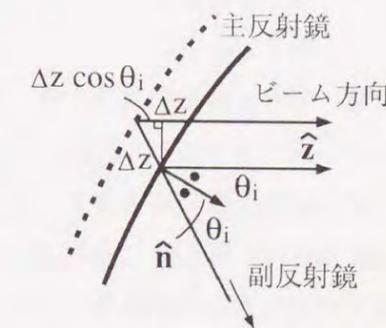


図3.6 主反射鏡のz方向への変位

3.3 物理光学的鏡面修整法<sup>[3.6], [3.8]</sup>

## 3.3.1 鏡面の最適化

次に、幾何光学的鏡面修整法の欠点である小形アンテナに対しても有効な鏡面設計理論として物理光学的鏡面修整法（以下、PO修整法）<sup>[3.9]</sup>について検討する。幾何光学近似で無視している回折現象を扱う理論としてはGTDや物理光学（Physical Optics, PO）近似に基づき鏡面上の電流を仮定する電流分布法などが反射鏡アンテナの解析等に用いられている。このうちGTDは計算に要する時間は短いものの、任意形状の散乱体を前提するとなると鏡面（及びエッジ）における曲面（及び曲線）の第2基本量を算出する必要があり、しかも、Caustic領域における界の発散や一次放射器が点波源と見なせない場合の取り扱いなどに不都合が生じる。これに対しPOでは鏡面全体に渡っての電流積分が必要であり、計算時間の点では不利であるものの、任意の鏡面形状を第1基本量のみで算出で何ら問題なく取り扱うことができる。そこでここでPOの利用を前提に効率的な修整法を提案する。

具体的な鏡面設計の考え方は以下の通りである。

- (1) オフセット系の場合には3次元問題であるから、求めるべき鏡面  $f(x,y)$  を

$$f(x,y) = f_0(x,y) + \sum_{m,n} C_{mn} w_{mn}(x,y) \quad (3.3)$$

のように、展開表示しておき、その係数  $C_{mn}$  を最適化することによって鏡面修整を施す。ここで、 $f_0(x,y)$  は初期曲面であり、 $w_{mn}(x,y)$  は適当な展開関数系である。

- (2) 最適化の目的関数には、例えば、POにより評価した開口面電界分布と所望の開口面分布との誤差を用いる。

ここで、双反射鏡によるペンシルビームの合成を前提とした鏡面修整であれば、主反射鏡の役割は、開口面の位相分布を一様にするることであるから、Green<sup>[3.10]</sup>の考え方をオフセット双反射鏡に適用することができる。即ち、展開表示して直接最適化する鏡面は副反射鏡のみにし、主反射鏡は次の方法で決定する。

- (3) 副反射鏡からの散乱界をPOにより評価し、これによる開口面分布の位相誤差が零となるように主反射鏡の鏡面を修整する。

主反射鏡の修整では、まず修整前の開口面位相誤差 ( $\Delta\phi$ [rad]) を求め、主反射鏡を  $z$  方向に変位したことによる通路長の増加分がこれを相殺するための条件から、必要な変位量  $\Delta z$  の良い近似値を図3.6を用いて求める。

$$\Delta\phi + \frac{2\pi}{\lambda} \Delta z [1 + \cos(2\theta_i)] = 0 \quad (3.4)$$

$$1 + \cos(2\theta_i) = 2 \cos^2\theta_i = 2 (\hat{\mathbf{n}} \cdot \hat{\mathbf{z}})^2 = \frac{2}{\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2 + 1} \quad (3.5)$$

$$\therefore \Delta z = -\frac{\lambda}{4\pi} \frac{\Delta\phi}{\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2 + 1} \quad (3.6)$$

ここで、 $\theta_i$  は鏡面への入射角、 $\hat{\mathbf{n}}$  及び  $\hat{\mathbf{z}}$  はそれぞれ主反射鏡鏡面の単位法線ベクトル及びビーム放射方向の単位ベクトルである。

尚、GO修整法と比較するとPO修整法では、一次放射器を点波源と見なせない場合でもなんら困難を生じないから、オフセットした副反射鏡を一次放射器のニヤフィールドに配置し、広帯域化を目指す設計を行う場合にも十分適用可能である。

## 3.3.2 数値計算例

PO修整を施したアンテナの近軸放射パターンの一例 ( $d/\lambda=16$ 、所望の開口面電力密度分布  $P_2(\rho)$ : Taylor-40dB、副反射鏡の展開項数  $N_s=8$ ) を図3.7に示す。PO修整法を適用した場合には、開口面分布の位相誤差が消去されているため、主ローブの切込みが鋭く高利得となり、パターンのヌル点が明瞭となって、垂直面内でもサイドローブが対称に現われている。また、低サイドローブ化に関するPO修整法のGO修整法に対する優位性は主ローブに近い角度領域ほど顕著である。これに対し、主ローブから離れたサイドローブになるほど両者の差が縮まり、逆に、 $d/\lambda \rightarrow \infty$ に相当する場合の放射パターンとの差が増大していることが分かる。これは、図3.2に示されたように、開口面分布には  $d/\lambda$  の大きさで定まる比較的高い空間周波数のリップル成分が存在しており、所望分布として与えた低いサイドローブレベル (-40dB) のTaylor分布の性質との相乗効果から、主ローブからやや離れたサイドローブにこのリップル成分が影響を及ぼすためと考えられる。PO修整法を適用した場合でも、このリップル状の振幅誤差成分の残留（但し位相誤差は除去できる）はある程度避けられない。そのため、広い角度範囲にわたって更に低いサイドローブを達成するためには、これを考慮した上で所望分布をあらかじめ補正するなどの手続きが必要となろう。（これが困難である場合には、もはや開口面に着目するのではなく3.3.4節で述べるような遠方放射パターンを評価

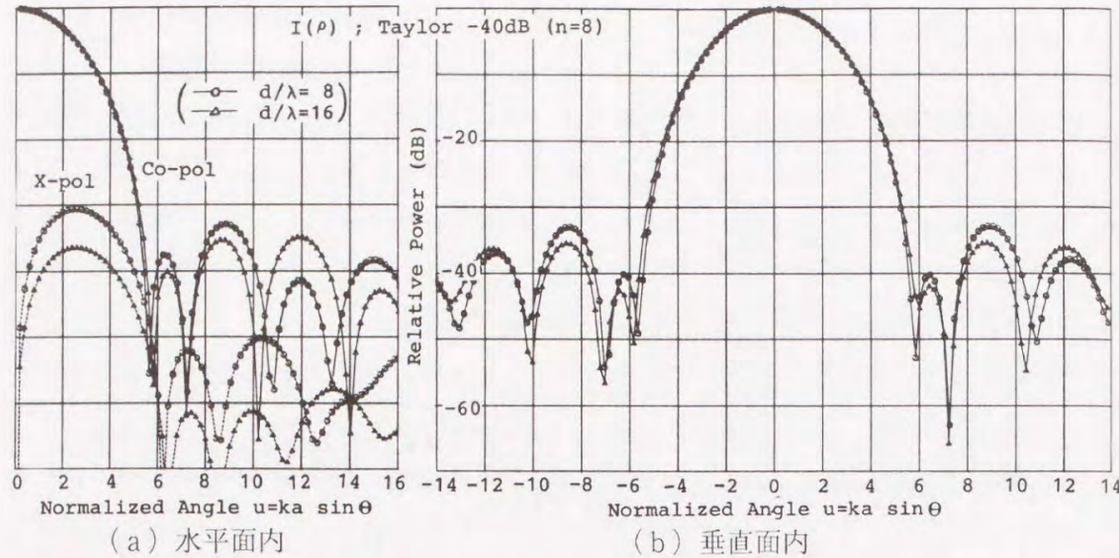


図3.7 PO修整アンテナの近軸放射パターン

する方法が考えられる。) 尚、PO修整法を適用したアンテナでは、垂直面内のパターンにおいてもサイドローブが対称に現われていることが確かめられており、このことは前述の手法(3)が位相誤差の消去に極めて効果的であることを示している。

### 3.3.3 鏡面修整の有効領域の検討

ここでは、高能率・低サイドローブ化の立場から、オフセット双反射鏡に対する2つの鏡面修整法の適用可能性について検討し、反射鏡の大きさとの関係を含めてそれらの有効な領域を明らかにする。

図3.8は、アンテナの開口能率と最大サイドローブレベルとの関係を示したものである。図中の1点鎖線は反射鏡からのスピルオーバー損はないものとし、開口面分布による能率低下分のみを考慮した場合の理論限界曲線であり、これに近いものほど高性能なものといえる。×印はTaylor分布をもつアンテナの開口能率とその最大サイドローブレベルの関係を示している。また、破線は回転2次曲面を鏡面にもつ未修整アンテナの性能(スピルオーバー損を含む)を求めたものであり、開口能率は80%強で頭打ちとなっている。GO修整を施したアンテナの性能は白抜き記号で、またPO修整(Ns=8)を施したアンテナは黒塗りの記号で、それぞれ示した。同図は、鏡面修整による高性能化の効果が高能率でより大きいことを示している。鏡面修整の有効な領域(開口能率75%付近)ではGO、修整アンテナは未修整アンテナと比べて、同じ能率に対し最大サイドローブレベルで約3dB優れており、また、PO修整はGO修整の限界をさらに約

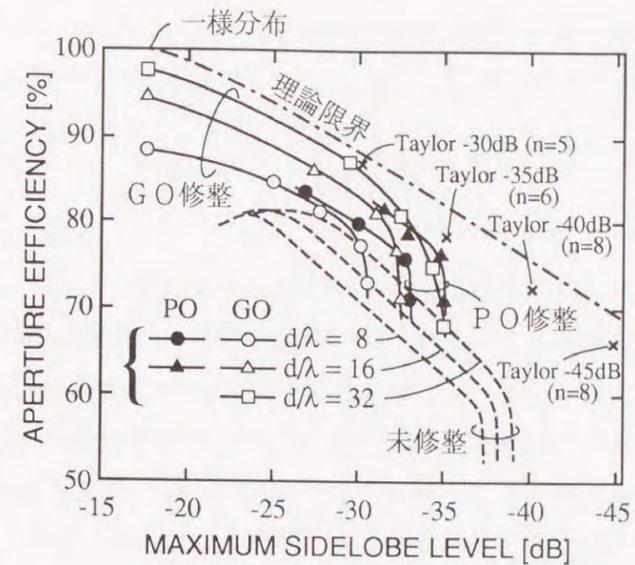


図3.8 開口能率と最大サイドローブレベルとの関係

2dB改善していることが分かる。

### 3.3.4 遠方放射パターンの直接最適化

以上の計算例では、開口面電界分布として、Taylor分布を用いたが、さらに低いサイドローブ特性を要求される場合には、回折現象により所望の放射パターンからのずれを見越した上で、これを補正するような適切な開口面電界分布を用いることが考えられる。しかし、これを一般的に扱うのは困難である。

GO修整法では、双反射鏡系によりペンシルビームの高能率・低サイドローブ化を図るには、Taylor分布に代表されるような、既知の開口面電界強度分布を経由して指向性合成を行うという、所謂間接的な指向性合成を行わざるを得ない。これに対し、PO修整法では、「設計=解析」であるから、鏡面の最適化の過程で遠方放射パターンを直接評価し、指向性合成を行うことが可能である。この手法によれば、遠方放射界を求める計算が加わるため、計算時間が増えるという欠点があるものの、指向性を直接最適化するため、反射鏡アンテナの総合的な意味での指向性合成(pattern synthesis)を行っていると考えることができる。

実際、アンテナの低サイドローブ化を例にとると、実用的観点からは、1つ1つのサイドローブの微細構造まで制御する必然性はなく、サイドローブの包絡線(envelope)を最小化することが必要である。また通常は、ある面内(例えば、地上系無線通信網との干渉を問題とする場合には水平面内、あるいは、隣接衛星との干渉を問題とする場合

には軌道面内)のサイドローブ特性を特に低減されることが要求される。

このように直接的な指向性の最適化を行ってアンテナを設計した具体例は、第4章4-2及び4-5で示す。

### 3.4 まとめ

本章では、オフセット双反射鏡アンテナの鏡面修整法について、従来の幾何光学的修整法の性質と問題点を明らかにし、小口径反射鏡に対しても有効な物理光学的修整法を提案した。そして計算機シミュレーションにより、これら二つの鏡面修整法の適用可能領域、即ち、実現可能な開口能率と最大サイドローブレベルとの関係を、副反射鏡の大きさをパラメータとして検討した。そして、鏡面修整の特に有効な領域(開口能率75%付近)ではGO修整アンテナは未修整アンテナと比べて、同じ能率に対し最大サイドローブレベルで約3dB優れており、また、PO修整はGO修整の限界をさらに約2dB改善できることを明かにした。

## 第4章 各種通信用アンテナの開発

### 4-1 衛星搭載用コンタービームアンテナ

#### 4-1.1 まえがき

衛星打ち上げロケットの大型化に伴い、通信衛星用アンテナも大きいものが搭載可能となってきた。衛星搭載用アンテナの高性能化(高利得化やマルチビーム化)は地球局アンテナの小形化や、周波数の有効利用に極めて有効である。インテルサット衛星のような国際通信を担う通信衛星では、地球全体を照射するグローバル(global)ビーム用のホーンアンテナとは別に、それぞれの大洋(大西洋、インド洋及び太平洋)上の静止衛星軌道位置から大陸を効率良く照射し、しかも周波数の繰り返し利用を可能とするビーム弁別度に優れた半球(hemi-sphere)ビーム並びにゾーン(zone)ビームを合成する反射鏡型マルチ/コンタービーム(contoured-beam)アンテナを搭載している<sup>[4-1.1]</sup>。これはオフセットパラボラ反射鏡と約150素子の小口径ホーンアンテナからなるアレイで構成され、各ホーンアンテナへの励振振幅・位相を制御することによりコンタービームを合成するもので、アレイを給電するための複雑なビーム合成回路(beam forming network)を必要とするため、重量及び給電損失の点からは好ましいものではない。また、素子数が多いことから素子間相互結合を含めたビーム合成回路の調整が極めて複雑で要求されたビーム弁別度を達成するには試作実験の反復が避けられず、アンテナ製造工程の短縮を妨げる要因となっている。

ここでは、パラボラ反射鏡の代わりに、鏡面修整された反射鏡を用いたアンテナ構成とすることにより給電素子数を大幅に少なくしたコンタービームアンテナについて検討する。まず、第2章の成果を活用し、2重曲面反射鏡を用いたファンビームを變形することにより、様々なビーム照射域形状(beam footprint、以下BFP)に整合したコンタービームアンテナが合成できることを示す。そして次に、これらコンタービームを素ビームとするアンテナ構成を提案し、基本的なビーム偏向特性を明かにすると共に、インテルサット衛星への適用可能性をシミュレーションにより検討する。

#### 4-1.2 ファンビームを一般化して得られるコンタービーム

ファンビームはその幾何光学的BFPが線状となるビームと考えることができる。従来の2重曲面反射鏡アンテナではこの幾何光学的BFPが直線の場合に限られていた。ここではこの直線を折れ線や曲線に一般化することで様々なコンタービームを合成する。

4-1.2.1 i字形コンタービームの合成<sup>[4-1.2]</sup>

ファンビームアンテナを2重曲面反射鏡により設計する場合、例えばコセカント2乗パターンのような振幅分布を与えてBFPに沿った断面内の放射パターンを任意に成形することができる。しかし、この振幅分布の制御では連続したBFPに沿ってのパターンは成形できても、深い谷(零点)によって分離された「島」を持つi字形形成ビームを合成するのは困難である。これは幾何光学的にBFP上のある方向に対する振幅を零としても有限の大きさの反射鏡では遠方放射界は零にはならないためであり、しかも不連続なBFPから得られる鏡面上には稜線(wedge)が生じて部分鏡面に分割されてしまい、結果として幾何光学とのずれがより顕著に現われ島を孤立させる深い谷を形成することができない。

そこで、零点を形成する方法として、BFPを折返す手法を提案する。即ち、折返されたBFP上のある一方向に着目すると光路長の異なる複数の反射光束が加わることになるから、零点を形成すべき方向に対し鏡面の離れた2つの部分からの寄与を逆相で加えれば零点を形成できるものと考えられる。この原理を用いれば、双(複)ローブビームなど多様な成形ビームが合成可能である。

一次波源に $\cos^2 \theta$  ( $n=16$ )の電力パターンをもつホイヘンスソースを仮定し、反射鏡のエッジをフレア半角一定( $\theta_m=30^\circ$ )上にとり(エッジ照射レベル約-20dB)、図4-1.1(a)に示した折返し部分付きのBFPを用いて設計を行った。図4-1.1(b)はBFPに沿う面内の鏡面断面と1次波源からの光線が反射される模様を示している。同図でb点からの反射光線Bとd点からの反射光線Dは同一方向に対応している。そして鏡面は発散系鏡面(a~c:反射波波面が凸)と収束系鏡面(c~d:反射波波面が凹)とが滑らかに接合されている。図4-1.2は得られたアンテナの放射パター

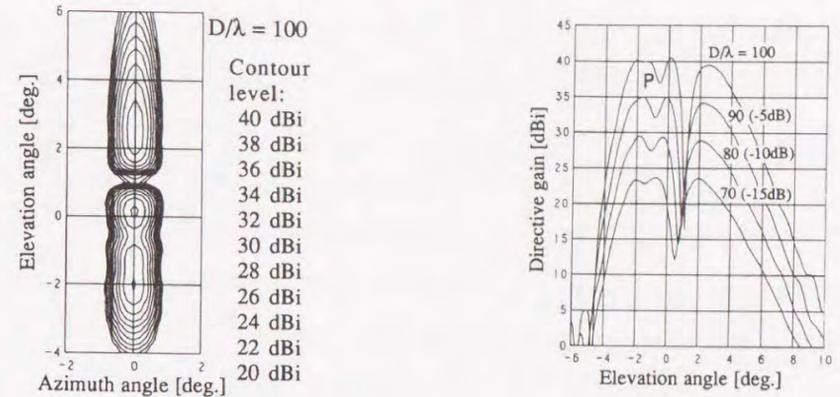
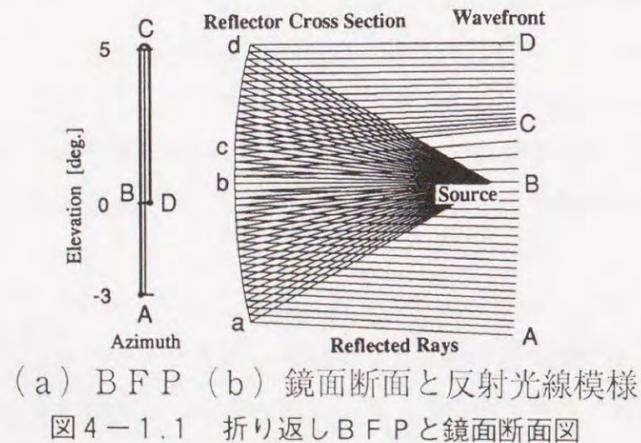


図4-1.2 i字形コンタービーム 図4-1.3 放射パターンの周波数特性

等レベル線図を物理光学法( $D/\lambda=100$ ,  $D$ :開口径,  $\lambda$ :波長)より求めた結果であり、深い谷によって分離された「島」をもつi字形ビームが形成されている。

ここで提案した手法は光路長の差を位相差として積極的に利用しているので、放射パターンは本質的に周波数依存性を有している。BFPに沿う断面内の放射パターンを示したのが図4-1.3である。零点の位置が周波数変化とともに移動している様子が分かる。また、幾何光学的にはフラットである部分(点P)にもリップルが生じているが、このリップルの発生原理はペンシルビームに対するサイドローブに類似しており、その大きさは鏡面のエッジ照射レベルにも依存する。

4-1.2.2 V字形コンタービームの合成<sup>[4-1.3]</sup>

ファンビームを斜めに折り曲げることによってV字形コンタービームが合成できる。図4-1.4はファンビームの拘束される方向を角度空間上に線分状のBFPとして示したもので、V字形C'は直線Cをその中点Oで直線と角度 $\theta_0$ なす軸B-B'に関して折り返したものである。そこでまず、 $\psi \geq 0$ 及び $\psi < 0$ の各々のBFPに沿ったファンビームを合成する2枚の2重曲面反射鏡を求め、次にこれらを適当な境界で接続すれば、V字形コンタービーム用反射鏡が得られる。系がA-A'に関して対称であれば、片側( $\psi \geq 0$ )について求めた鏡面とこれの鏡像とを対称面で接続すればよい。第2章で示したように、2重曲面反射鏡を構成するSpine曲線に関する常微分方程式は、一次放射ビームと2次放射ビームとの電力の平衡条件から得られる。V字形コンタービームに対しては、電力の平衡条件は図4-1.5を用いて求めることができる。

一次波源に $\cos^2 \theta$  ( $n=16$ )の電力パターンをもつホイヘンスソースを仮定し、反射鏡

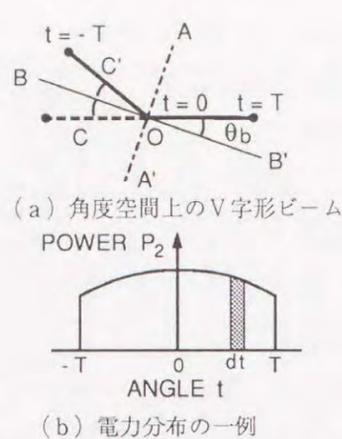


図4-1.4 V字形コンタービームの合成

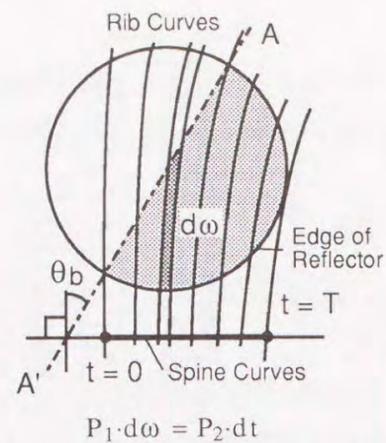


図4-1.5 Rib曲線群と鏡面エッジ

のエッジをフレア半角一定 ( $\theta_m=32^\circ$ ) 上にとり (エッジ照射レベル約-23dB)、 $\theta_b=45^\circ$  として設計を行った。図4-1.6は得られたアンテナの放射パターン等レベル線図を物理光学法 ( $D/\lambda=150$ ,  $D$ : 開口径,  $\lambda$ : 波長) より求めた結果であり、例示したビームカバレッジである日本本土を効率良く照射するV字形コンタービームが形成されている。

但し、ここで検討した設計法によれば、V字形の折れ線に対応して、鏡面の法線が一部不連続となり鏡面に「すじ (稜線, wedge)」ができる。このことは鏡面を分割して利用していることを意味しており、開口径の小さなアンテナでは十分な利得傾斜 (gain roll-off) が実現できないという欠点を有している。

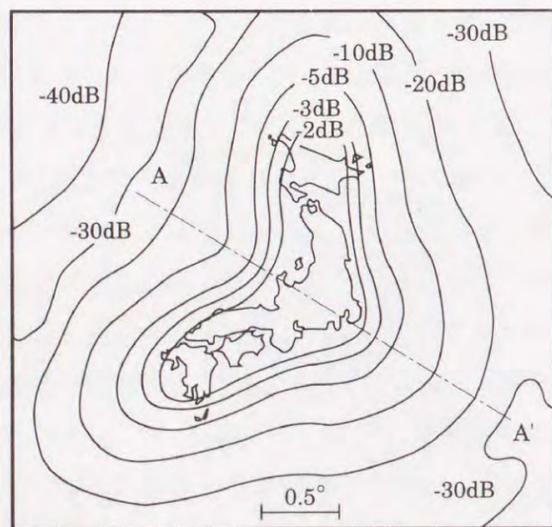


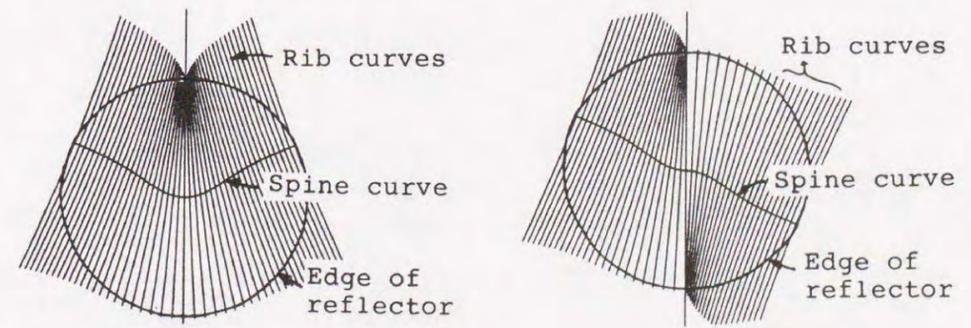
図4-1.6 V字形コンタービーム設計例

4-1.2.3 U/S字形コンタービームの合成 [4-1.4], [4-1.5]

第2章2-1.6節の結果から、カーブしたファンビームもフラットなファンビームと同様の手順にて2重曲面反射鏡により合成できることが理論的に示された。ここでは、カーブしたファンビームの基本形としてそのBFPが緩やかにカーブしU字形あるいはS字形となったコンタービームアンテナの設計例を示す。

一次波源に  $\cos^{2n} \theta$  ( $n=16$ ) の電力パターンをもつホイヘンスソースを仮定し、反射鏡のエッジをフレア半角一定 ( $\theta_m=30^\circ$ ) 上にとり (エッジ照射レベル約-20dB)、鏡面設計を行った。図4-1.7は得られた2重曲面反射鏡をSpine曲線及びRib曲線の集合で表したものである。Spine曲線は平面曲線ではなく、空間曲線となっている。ここでは対称給電の設計結果を示しているが、オフセット給電形式の場合でも全く同等の手順で鏡面が得られる。図4-1.8及び図4-1.9は得られたアンテナの放射パターン等レベル線図を物理光学法 ( $D/\lambda=25$ ,  $D$ : 開口径,  $\lambda$ : 波長) より求めた結果であり、U/S字形コンタービームが形成されている。

このU/S字形コンタービームを合成する鏡面は、前項のV字形コンタービームと異なり、(BFPが滑らかなので) 鏡面は至る所滑らかである。しかし、カーブしたBFPの曲率が大きくなったり、あるいは、オフセット角が大きくなるなど、パラメータによっては、解曲面が多価となる部分が鏡面エッジの内側に生じてしまい滑らかな一枚の鏡面では構成できない場合があり得る。この問題はフラットなファンビームに対しても、収束系鏡面の場合に限りあり得るものであったが、カーブしたファンビームでは発散系鏡面でも起こり得るものであり、設計パラメータの選び方が限定される。



(a) U字形コンタービーム (b) S字形コンタービーム

図4-1.7 U/S字形コンタービーム用鏡面正面図

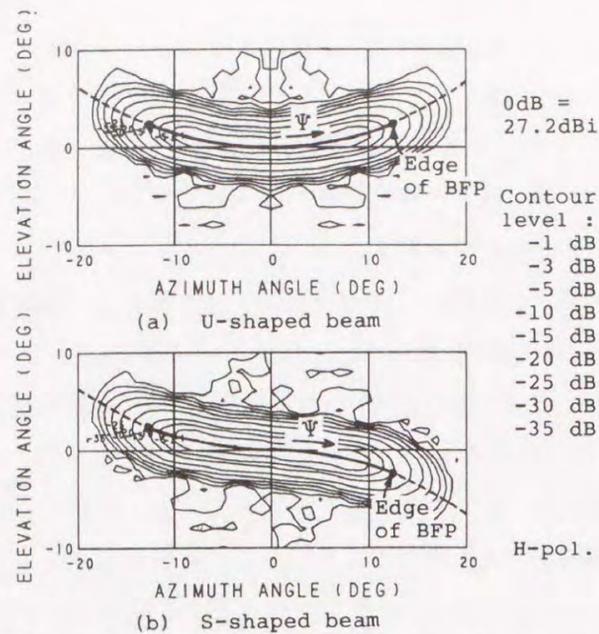


図4-1.8 U/S字形コンタービーム

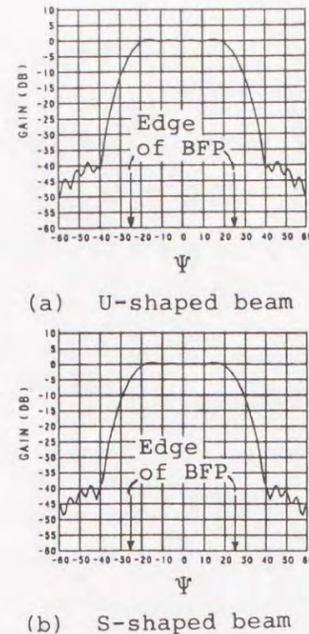


図4-1.9 ビームノイズパターン

4-1.3 ファンビームを素ビームとするマルチ/コンタービームアンテナ

4-1.3.1 ファンビームの一次元アレイ化 [4-1.8]

先に述べたように、インテルサット衛星のヘミ/ゾーンアンテナではパラボラ反射鏡に約150素子のアレイ給電部を組み合わせることによって計6本のコンタービームを合成している。ここでは、ペンシルビームではなく、ファンビームを素ビームとするビ

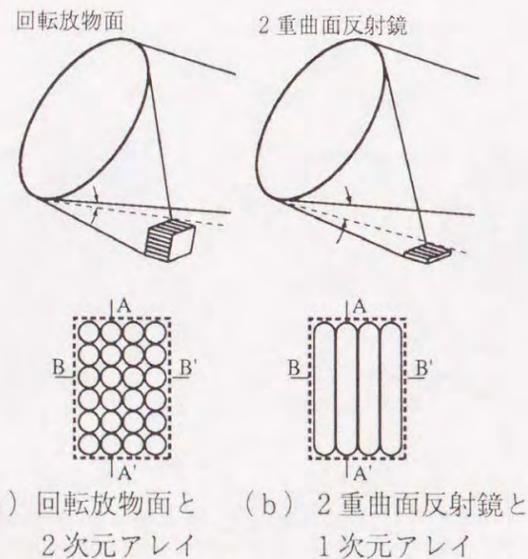


図4-1.10 ファンビーム利用による給電部アレイの一次元化

ーム構成を提案する。 [4-1.6], [4-1.7]

最も単純化されたモデルとしてビームカバレッジ形状が矩形である場合を想定すると、図4-1.10に模式図を示すように、パラボラ反射鏡を用いたペンシルビームを素ビームとする2次元アレイ構成の給電部を、ファンビームを素ビームとする1次元アレイ構成の給電部に簡素化することが可能となる。これにより、給電部やビーム合成回路の軽量化や損失の低減が図れる。また、図4-1.10からも分かるように、給電部の小形化により反射鏡開口に対するブロッキング条件が緩和されるので、オフセット角を小さくした鏡面配置が可能となり交差偏波特性の点でも有利となる。

4-1.3.2 ファンビームのビーム偏向特性 [4-1.8]

このようなファンビームを素ビームにもつ2重曲面反射鏡アンテナを用いてマルチ/コンタービームアンテナを構成する場合、素ビームのビーム偏向特性が優れていることが望ましいが、2重曲面反射鏡アンテナのビーム偏向特性はこれまで詳しく検討された例が無い。そこでまず、2重曲面反射鏡を変位給電した場合のビーム偏向特性を計算機シミュレーションによって検討する。

ここでは、一次波源に $\cos^{2n} \theta$  ( $n=8$ )の電力パターンをもつホイヘンスソースを仮定し、反射鏡のエッジをフレア半角一定 ( $\theta_m=30^\circ$ ) 上にとり (エッジ照射レベル約-10dB)、幾何光学的BFPの幅が $|2\Psi_m|=8^\circ$ である様な鏡面設計を行い、これを変位給電した場合の放射パターンを物理光学法 ( $D/\lambda=50$ ,  $D$ : 開口径,  $\lambda$ : 波長) により求めた。図4-1.11は収束系 ( $\Psi_m=-4^\circ$ ) と発散系 ( $\Psi_m=+4^\circ$ ) のそれぞれの鏡面系について、一次放射器の変位量を $d=10n\lambda/3$  ( $n=0, 1, \dots$ ,

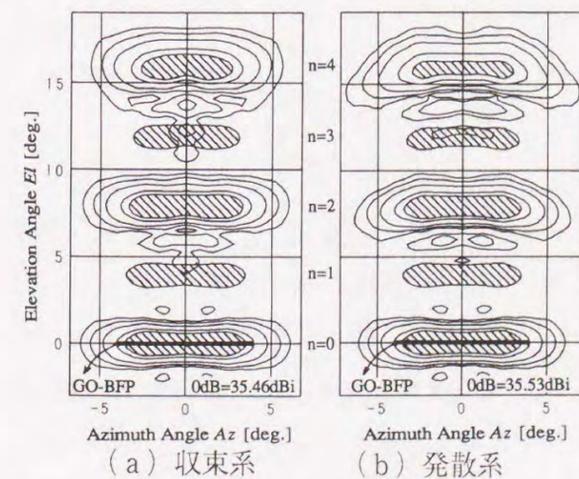


図4-1.11 偏向ビームパターン

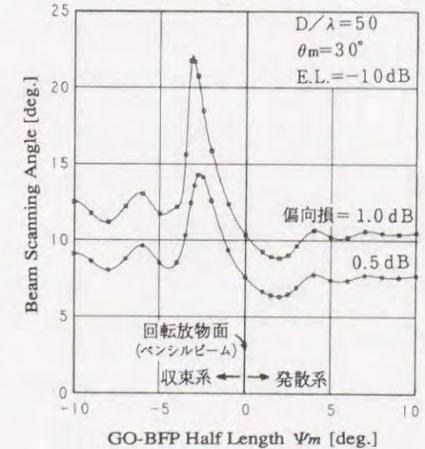


図4-1.12  $\Psi_m$ と偏向損失の関係

4) と変化させた時の放射パターンの等レベル線を重ねて描いたのもである。同図で斜線を施した領域は、無偏向ビーム (on-focal beam、 $n=0$  の場合) のボアサイト (AZ=EL=0) 方向の利得を基準として  $-3$  dB 以上の指向性利得を有する角度範囲を示している。無偏向ビームの放射パターンは収束系と発散系との間に殆ど差が認められないのに対し、ビーム偏向量が大きくなるにつれて両者の間に明確な差が現われている。即ち、発散系鏡面ではビーム偏向角が増加しても斜線部の BFP に平行な角度幅はほぼ一定であり、BFP に垂直な角度幅が減少する傾向が見られる。これに対し、収束系鏡面ではビーム偏向角が増加すると斜線部の BFP に平行な角度幅が減少し (ペンシルビームに近づき)、ビーム偏向によるピーク利得の低下は発散系鏡面よりも少ない。一方、ビーム弁別度を決定するサイドローブの拡がりの点を比較すると、発散系鏡面の方が優れている様子が分かる。

図4-1.12は、BFP幅に対応した  $\Psi_m$  をパラメータとして、AZ=0面内のピーク利得に対し与えられた偏向損 (1.0 dB 及び 0.5 dB) を許容した場合の最大ビーム偏向角度をプロットしたものである。同図で  $\Psi_m=0$  は、ペンシルビームを放射するパラボラ反射鏡に相当する。この図において、収束系鏡面で  $\Psi_m=-2.5^\circ$  付近にピークが見られるがこれは、この鏡面系では変位給電した場合に発生する収差が、ファンビームをペンシルビームに近づける効果を有しており、指向性利得が低下しない特別な場合に相当しているためである。これに対し、発散系鏡面はパラボラ反射鏡と同等のビーム偏向特性を有していることが明かとなった。

#### 4-1.4 国際通信衛星搭載用マルチビームアンテナの検討

ここでは、アンテナ構成の基本的有効性を示すため、インテルサットなどの国際通信衛星に望まれるマルチ/コンタービームの単純なモデル<sup>[4-1.9]</sup>を設定し、計算シミュレーションにより放射特性の評価を行う。

図4-1.13はフラットなファンビームを合成するオフセット2重曲面反射鏡アンテナの鏡面と一次放射器アレイの位置を示している。この反射鏡アンテナの基準 (無偏向) ビームは図4-1.14に示されている。9個の一次放射器を励振した場合のそれぞれの素ビームのコンターは図4-1.15の様になり、静止衛星軌道から見た視直径約  $17^\circ$  の地球全体を南北に延びたファンビームで覆っている。これら9つの一次放射器を比較的単純なビーム合成回路により同時に励振し、素ビームを合成してできるコンタービームの例を図4-1.16に示す。この例では、西半球を照射するヘミビームを #1~#5までの、また、東半球を照射するヘミビームを #7~#9までの、一次放射

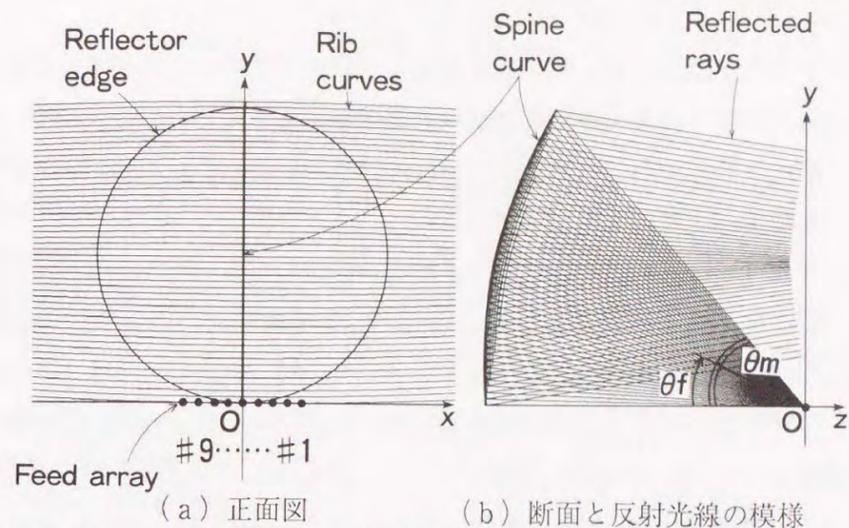


図4-1.13 ファンビームを合成するオフセット2重曲面反射鏡

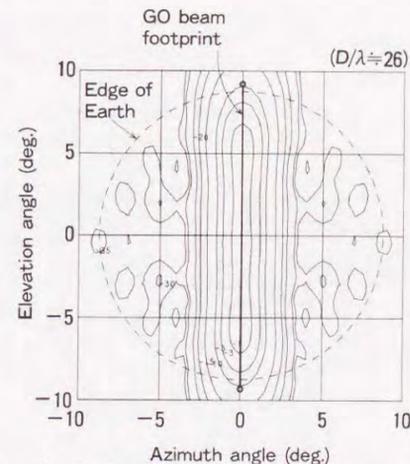


図4-1.14 基準ビームパターン

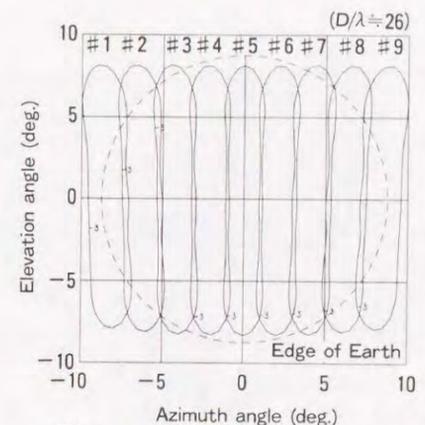
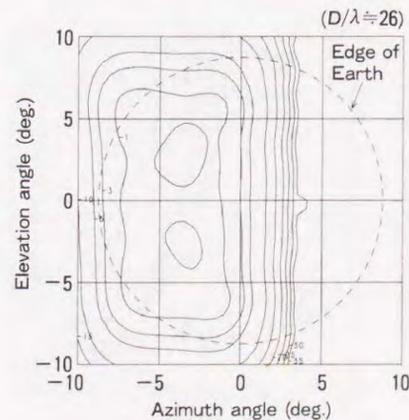
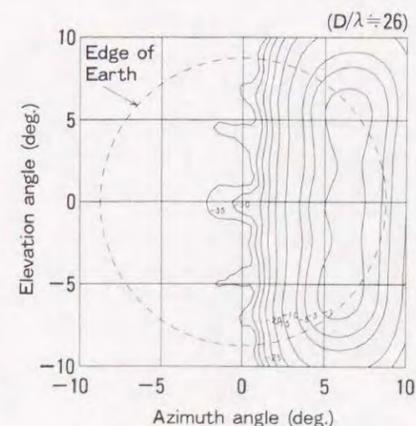


図4-1.15 素ビームのコンター



(a) 西ヘミビーム



(b) 東ヘミビーム

図4-1.16 ヘミ (半球) ビームの合成

器を等振幅等位相で励振することにより合成している。このような単純な励振分布でありながら、周波数有効利用に必要なビーム弁別度が達成されているのは、ファンビームがBFPに垂直な方向で鋭い利得傾斜 (gain roll-off) を有している利点を利用したアンテナ構成となっているためである。

要求されるカバレッジが、単純な矩形ではない場合も、カーブしたファンビームを用いることである程度まで同様なアンテナ構成が可能である。この例を図4-1.17に示す。また、インテルサット衛星は、ヘミビームの他にこれと重なるものより狭いカバレッジを照射するゾーンビームを有しており、ヘミビームと直交偏波利用により周波数共用を実現している。この4つのゾーンビームのカバレッジは大洋毎に微妙にその形を変えている (静止衛星軌道上でのビーム再成形: on-board re-configurability)。図4-1.18は、ヘミビームと同様な手法にて、ゾーンビームの設計を行った1つの検討例を示している。

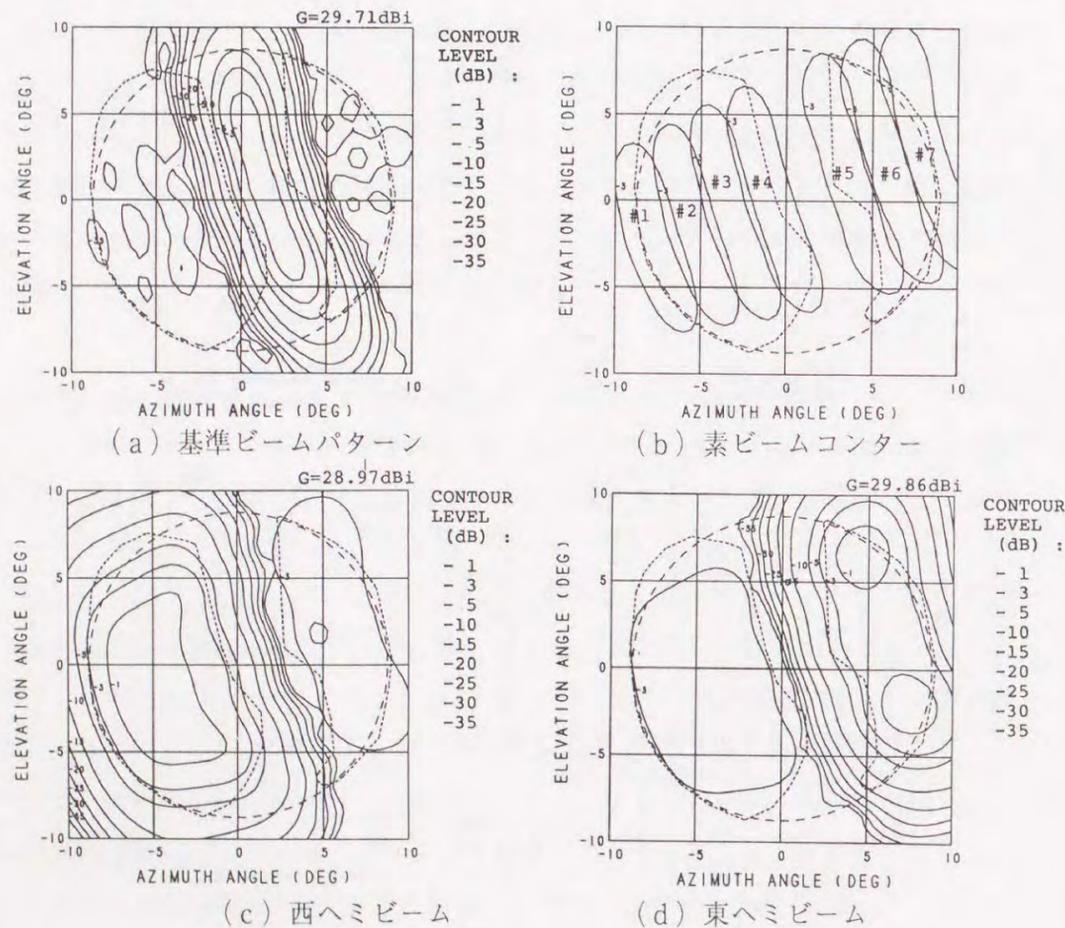


図4-1.17 より高度なヘミ (半球) ビームの合成例

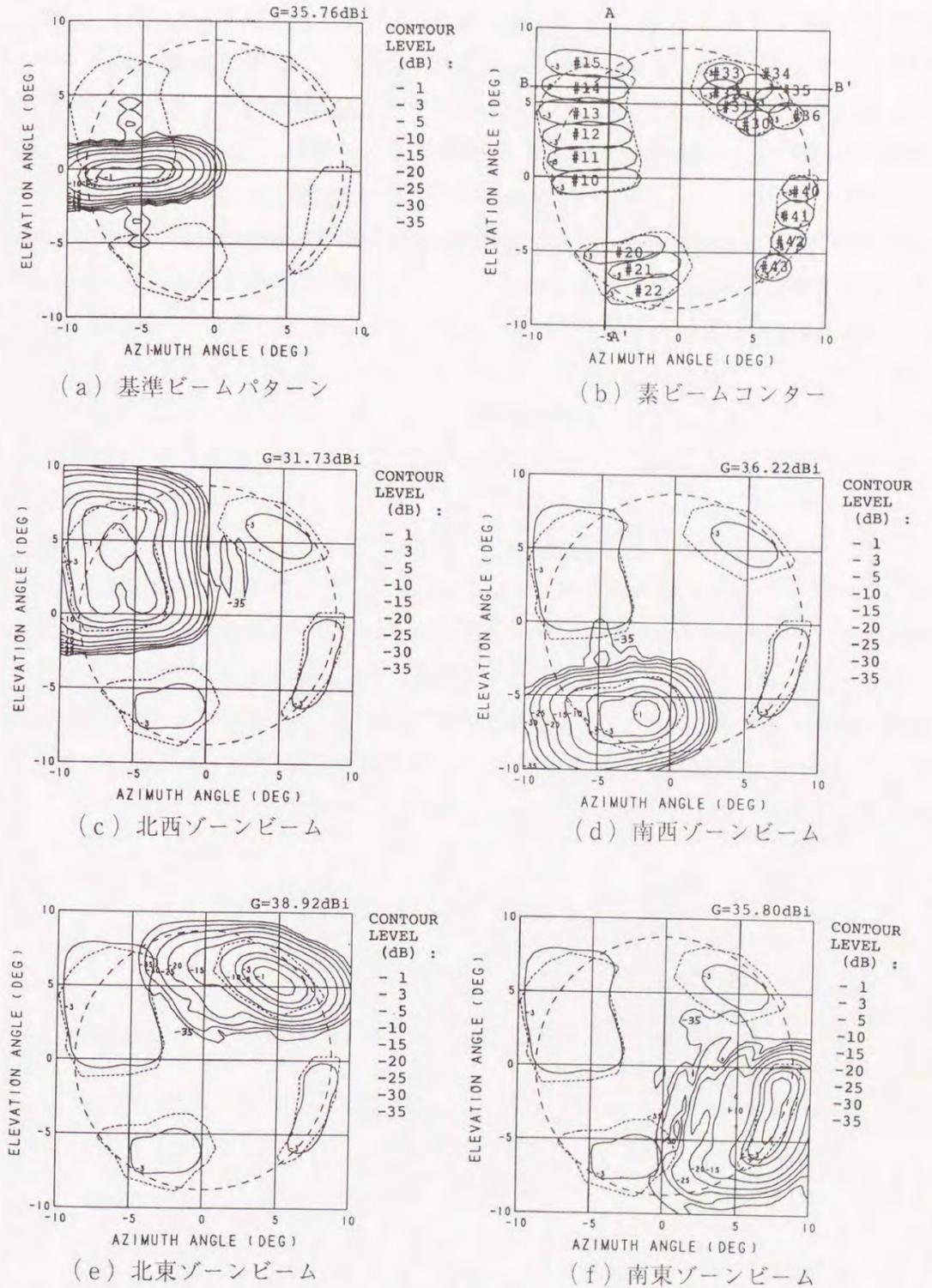


図4-1.18 ゾーンビームの合成例

4-1.5 まとめ

ファンビームを基本とし、これから様々なビームフットプリント (BFP) を有するコンタービームが合成できることを明かにした。具体的には、幾何光学的BFPがi/V/U/S字形となるようなコンタービームアンテナの鏡面設計例を示した。次に、これらのファンビームを素ビームとして、簡単なアレイ給電により、より広いカバレッジを対象としたコンタービームアンテナを構成することを提案した。そして、ファンビームを放射する2重曲面反射鏡の変位給電時のビーム偏向特性を明かにし、モデル計算によりその有効性を示した。

4-2 LDR基地局用広角成形ビームアンテナ

4-2.1 まえがき

本章では、従来「加入者無線」と呼ばれていた「端末系広帯域無線伝送方式 (Local Distribution Radio System: LDR)」の多方向型 (point-to-multipoint) システム用の基地局アンテナとして開発した広角成形マルチビームアンテナについて述べる。この端末系通信システムは1.5 Mbps など大容量伝送のためのデジタル方式を想定しており、図4-2.1に示すようにTDM/TDMA (時分割多重/時分割多元接続) により、1つの基地局で広いサービスエリアに散在する多くの子局と同時に通信する。従って、基地局用アンテナとしては放射ビームが特殊な形状に成形された成形ビームアンテナが必要になる。即ち、垂直面内では子局までの距離差を補償するようなコセカント2乗ビーム、また、水平面内では一様なファン (扇形) ビームの指向性を有する成形ビームアンテナが求められる。

この様な成形ビームを放射するアンテナとして従来提案されているものの一つに、フレア形小反射板を付加した一次元スロットアレイアンテナがある<sup>[4-2.1]</sup>。このアンテナは交差偏波特性に優れているという長を有しているが、水平面内のビームの切れを良くしサイドローブ特性を向上させることはかなり困難で、また原理的に垂直・水平偏波の共用アンテナは構成できないなどの欠点がある。一方、反射鏡アンテナで構成するものとしては、幾何光学的鏡面設計に基づくアンテナが幾つか検討されている<sup>[4-2.2]~[4-2.4]</sup>。文献[4-2.2]では、E面とH面のビーム幅が異なる一次放射器と、放

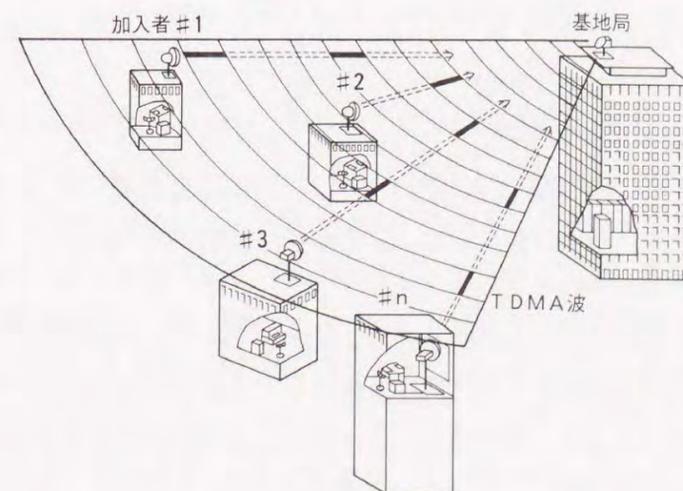


図4-2.1 LDR多方向型システム

物線を僅かに修整した曲線を垂直断面にもつ円筒状の鏡面を組み合わせアンテナを構成している。円筒曲面を用いて水平面内の放射レベルを一様に近づけようとする、鏡面エッジ照射レベルを高くする必要があるため、スピルオーバー損が大きくなり、また、不要散乱波が問題となる。文献[4-2.3]では、複数の部分曲面(4つのトーラス曲面と2つの回転放物面)を複合した曲面を用いているが、ビーム内のリップル成分を抑え、また、サイドローブを下げるには、部分曲面の数をより多くする必要がある。文献[4-2.4]では、中心断面曲線を幾何光学的電力の条件から求め、次にこれを初期条件として鏡面上の反射光線の仰角方向余弦のみの条件から曲面を決定する方法を用いている。しかし、中心断面曲線を2次元問題の解で近似しており、また鏡面周辺部からの反射光線の方向が所定の方向と一致していないため、レベルの高いビームノーズの水平面内パターンさえ試行関数からずれてしまっている。さらに、一次放射器のパターンとは無関係に鏡面の周縁形状が尖った形状に決まってしまう、エッジ照射レベルを全周に渡って制御することが本質的に困難である。

そこで、高度に成形されたビームを放射する21GHz帯LDR基地局用反射鏡アンテナを実現するのに以下の手順を提案する<sup>[4-2.5]~[4-2.8]</sup>。即ち、まず高利得(>20dBi)なビームノーズ部を放射する鏡面を第2章の成果に基づいて2重曲面反射鏡(doubly curved reflector)を応用して設計する。次に得られた鏡面の一部に第3章で提案した物理光学的鏡面修整法を適用し、直接遠方放射パターンを最適化することによって、低利得(~0dBi)なビームスカート部を形成する。開発したアンテナでは、極めて高度に成形された放射ビームが全周波数帯域・両直交偏波において得られており、本アンテナ設計法の妥当性、有効性を示している。

#### 4-2.2 アンテナ設計の指針

##### 4-2.2.1 基本的要求条件

21GHz帯LDR無線局の割当て周波数は、低群(子局→基地局)が21.20~21.85GHz、高群(基地局→子局)が21.85~22.50GHzであり、また水平(H)/垂直(V)の直線偏波を用いる。

多方向型システムでは、1つの基地局に4面のアンテナを設置し全方向の子局へのサービス提供を基本とする。そのため基地局用アンテナとしては放射ビームが特殊な形状に成形された成形ビームアンテナが必要になる。システムから要求されるアンテナの条件は以下の通りである。

- (1) 方位角方向幅90°の扇形状の範囲をカバーする。また、周波数の再利用の観

点から幅90°の扇形状範囲外への放射レベル(サイドローブ)を極力低減する。

- (2) 最大サービス距離の子局からごく近傍の子局までをほぼ平等にカバーする。遠方の子局(水平方向)に対しては利得を可能なかぎり高くする一方、近傍の子局(仰角の小さな方向)に対しては利得を下げる成形ビームとする。

- (3) サービスカバレッジ内にヌルやディップ(利得の落ち込み)のないこと。

さらに、実用的観点から、

- (4) 雨滴、着雪等によって放射パターンが影響され回線断とならないこと。

- (5) アンテナの設置や無線装置の保守が容易であること。

また、偏波については、

- (6) 垂直・水平の両偏波で使用するが、ビーム内での直交偏波再利用は行わないものとしている。

##### 4-2.2.2 目標ビームパターン

基地局アンテナ設置高を100~200m(例えばKDD新宿ビルの場合約175m)と想定し、1つの基地局について4基のアンテナで360°をカバーするシステム設計に対応し、アンテナのビームカバレッジを方位角幅90°、仰角方向0°~-35°(最小サービスエリア半径:150m~300mに相当)とする。

基地局アンテナの指向性利得は、最大サービスエリア半径や子局のアンテナ直径、回線稼働率を決定する重要な特性であり、可能な限り高いことが望ましい。そのためには、放射パターンが、

- (1) 方位角方向には均一な扇形ビームであること、

(2) 仰角方向には伝搬損失を考慮したコセカント2乗的なビームであること、が必要である。

さて、アンテナを単反射鏡と1つの一次放射器とで構成するものとし、反射鏡径を約800mm(大きさ:  $D \cong 800\text{mm} \cong 58\lambda$ ,  $\lambda$ ; 波長)とした。通常のペンシルビームアンテナでは、開口径を大きくすればピーク利得が高くなるが、成形ビームアンテナの利得は第1義的にはそのビーム形状で規定されてしまう。方位角方向において利得のロールオフ(gain roll-off)特性を鋭くし、隣接サービスエリアへの不要放射を抑える条件、リップルの少ない成形ビームを得るためエッジレベルを低くする条件、及び鏡面修整の効果が十分得られる条件からは、 $D/\lambda$ が大きいほど好ましい。ここでは、アンテナ全体の容積(設置の容易さ)とのトレードオフの結果、開口径を決定した。

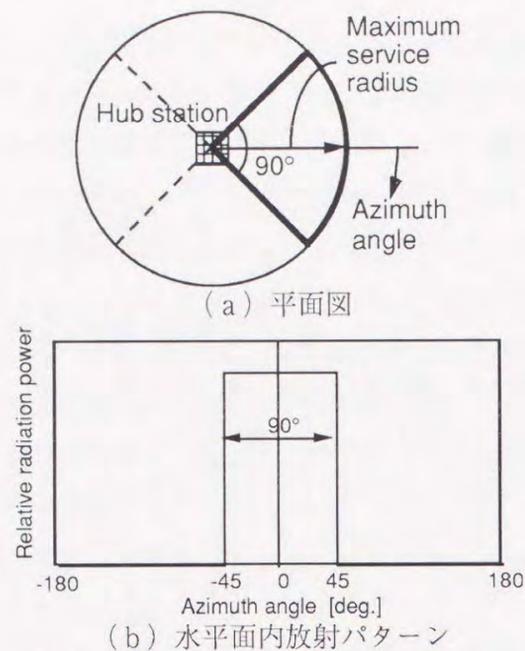


図4-2.2 水平面内の理想パターン

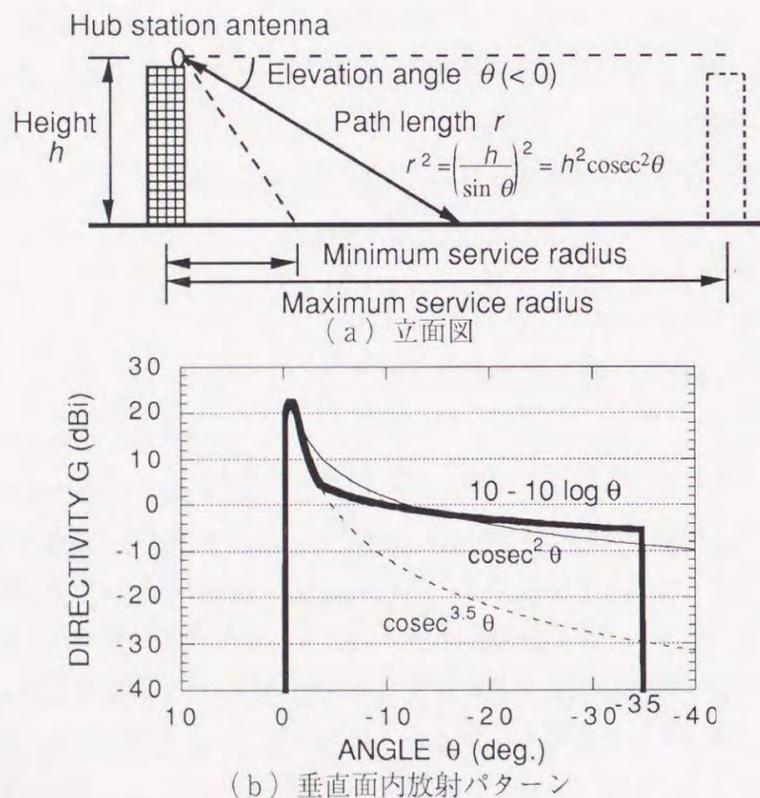


図4-2.3 垂直面内の理想パターン

(注) 全放射電力の約65%がカバレッジ内のビーム形成に寄与するとしてビームノーズの指向性利得をパターン積分から求めると、実線のパターンでは23.3dBi, 点線のパターンでは23.5dBiとなる。

仰角方向について図4-2.3に示す目標パターンを設定する。垂直面内の3dBビーム幅は、反射鏡の垂直方向の大きさ及びそのエッジ照射レベルではほぼ決まり、 $70\lambda/D \approx 1.2^\circ$ 程度となる。ビームノーズの方向は、最大サービスエリア半径約4~8kmに対応して、その-3dB低下方向が仰角 $-1.3^\circ$ となるように $-0.7^\circ$ 方向とした。この場合、仰角 $0^\circ$ 方向のレベルはピークから-3dB程度の低下であり、基地局アンテナ(地上高100~200m)と同等の高さにある子局アンテナに対しても、十分なレベルで照射できる。

ビームノーズの指向性利得は、垂直面内のビーム幅が $1.2^\circ$ で方位角方向のそれが $90^\circ$ であることから23~24dBiとなる。仰角パターンは、自由空間損失のみを考えるとコセカント2乗パターンが最適となる。21GHz帯での降雨減衰による伝搬損失を考えるとさらに急峻な利得傾斜(例えばコセカント3.5乗<sup>[4-2.4]</sup>)があっても良い。この場合図4-2.3(b)から分かる様に、カバレッジ内の最低利得は-20~-30dBiとなる。ところがこのような低いレベルまで精度良く成形しようとする、端部からの回折波を抑えるために反射鏡のエッジレベルを極端に低くしなければならず、開口能率が著しく低下する。しかもこのような低いレベルは、鏡面もしくはレドームへの雨滴の付着や周辺構造体からの不要散乱波の僅かな変化などに大きく影響されやすい。全帯域に渡って、カバレッジ内にヌルやディップを生じさせないためには、上記の要因の影響を受けない安定したレベルの確保が必要である。一方、ビームスカート部の利得を低く設定してもビームノーズの利得上昇は極めて僅かである。逆に、この極めて低いレベルの部分に仮に0dBi程度まで高く設計したとしても、元々20dBi以上あるビームノーズの利

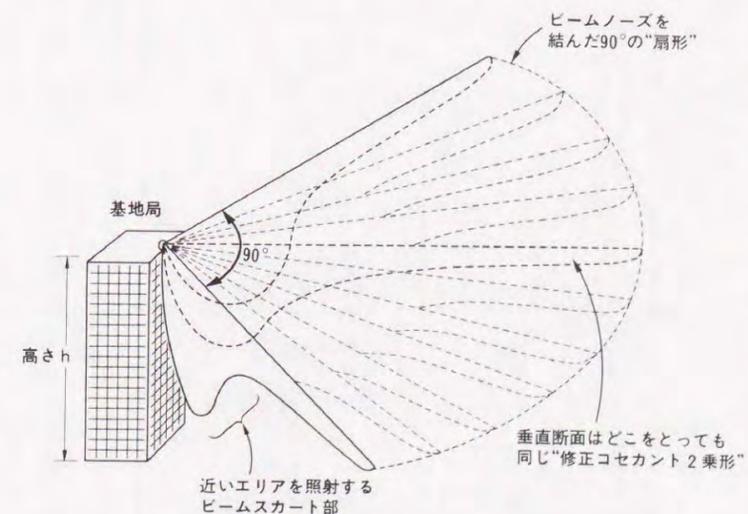


図4-2.4 三次元ビームパターン

得低下は0.2 dB程度でありさほど問題とならない。以上の理由から、図4-2.3 (b)の太線に示される目標パターンは、仰角 $0.7^\circ$ で高い利得を有するビームノーズ部と仰角約 $-5^\circ$ から $-35^\circ$ までの範囲を $+5$  dBiから $-5$  dBi程度の利得で照射するビームスカート部とから構成されている。

以上より、三次元的な目標放射パターンは図4-2.4に示すように、図4-2.3の仰角方向パターンが方位角方向 $\pm 45^\circ$ にわたって扇形状になったものである。

#### 4-2.2.3 鏡面形式

基地局用アンテナとしての実用性を重視し、以下のような考え方に従ってアンテナの基本構成を決定した。

ビームスカート部の低いレベルまでの成形を考慮して、給電ホーンなどによるブロッキングのないオフセット給電方式とする。また、エッジ回折によるビームスカート部のリップル(通常のアンテナのサイドローブに相当する)を押さえるため、鏡面の周縁を一次放射器の位相中心点から見込む角が一定となる位置に定義し、鏡面エッジレベルを一定にした。

給電位置の上下、及び反射鏡断面形状とから、図4-2.5に示す様に、鏡面形式は垂直断面形状(3通り)と水平断面形状(2通り)の組み合わせとして6通りの形式が考え得る。水平断面形状の違い(発散系・収束系の別)による放射パターン特性上の優劣は、2-1章で検討したように、殆ど見られない。(但し、4-1章で検討したように、一次放射器を変位した場合のビーム偏向特性については、差異が現われる。)

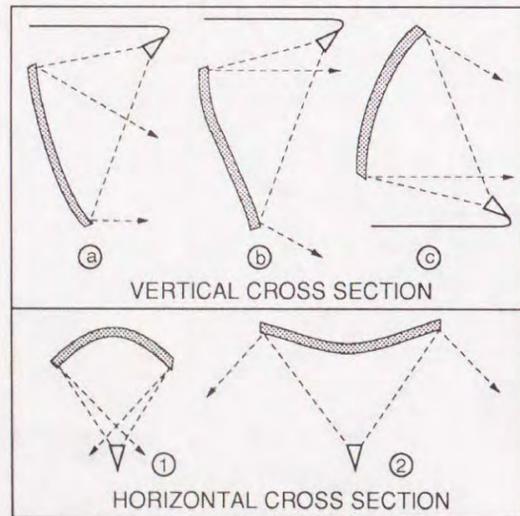


図4-2.5 鏡面形式の選択肢

保守・運用上の観点からは無線装置を鏡面の下部または背面部に設置するのが好ましく、鏡面の下部に無線装置を設置する場合(図4-2.5 (c))に給電導波管の長さが最も短くなり、給電損失の点から有利である。一方、本アンテナでは $-5$  dBi程度の低いレベルまでビーム形状を成形する必要がある。このような低いレベルに対しては、鏡面や一次放射器に雨滴等が付着するとその影響が大きく、ヌル点が生じたりする可能性が高い。鏡面及び一次放射器の開口部に付着する雨滴及び積雪対策としては、ブローヤヒータ等による能動的対策とレドーム装着による対策が考えられる。さらにレドームの形式としては、平面レドーム(薄膜ソフトレドーム)と半球状レドーム(ハードレドーム)の2種類が考えられる。能動的対策は、放射特性への影響が無い点は好ましいが、保守・運用上問題がある。21 GHz帯においては、反射損が少なくかつ十分な強度を有するハードレドームを実現することは材料的にかなり難しいと考えられる。平面レドームは、保守・運用上有利であるが、本アンテナは $90^\circ$ に及ぶ特殊なビーム形状をしている

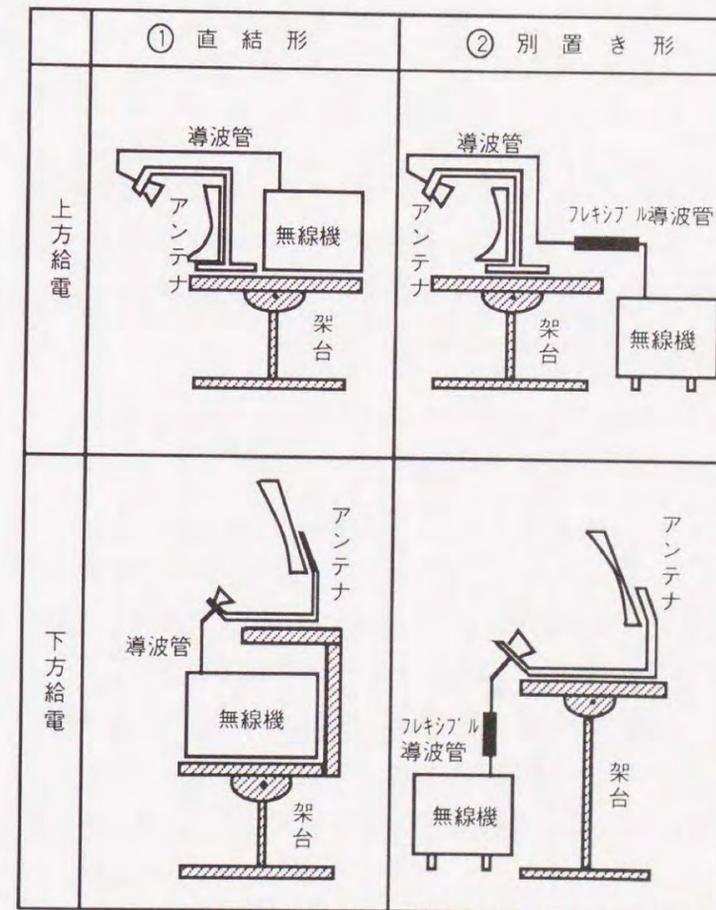


図4-2.6 無線装置の接続

ため、鏡面からの光線が平面レドームに対して斜めに入射し、成形ビーム形状を乱す可能性が高い。また、図4-2.5(c)の場合、コンパクトな構造で平板レドームを鉛直よりオーバーハングさせて装着することが困難となる。図4-2.5(2)の場合も平板レドームを使用することは構造的に困難である。レドーム材料と構造を慎重に検討し、平面レドームを円筒形の金属シュラウドで支持する構造を採用することとし、レドーム面積を最も小さくできる図4-2.5(a)と(1)の組み合わせの鏡面形式を採用した。

無線装置とアンテナとの接続形態としては、図4-2.6の構成案を検討した。保守性の観点からは無線装置が低い位置にあるのが好ましいが、接続導波管の損失の点からは直結形の方が有利であるため無線装置をアンテナ背面に置くこととした。

#### 4-2.3 一次放射器

水平及び垂直偏波に対して、同等の成形ビームを放射するには一次放射器の特性に、E面及びH面のビーム幅の一致度に優れたものが要求される。そこで、コルゲート円錐ホーン<sup>[4-2.9], [4-2.10]</sup>を採用、設計した。その開口径(内径)は42mmであり、フレア半角は8°である。

図4-2.7に周波数21.85 GHzにおける放射パターンの実測値を示す。優れたビームの回転対称性を有している。本アンテナでは、-5 dBi程度の低いレベルまでビーム成形する必要あるため、エッジ回折波による寄与をそれより低く押さえる必要がある。そのため、エッジレベルは少なくとも-5 dBi程度以下にする必要がある。本アンテナでは、

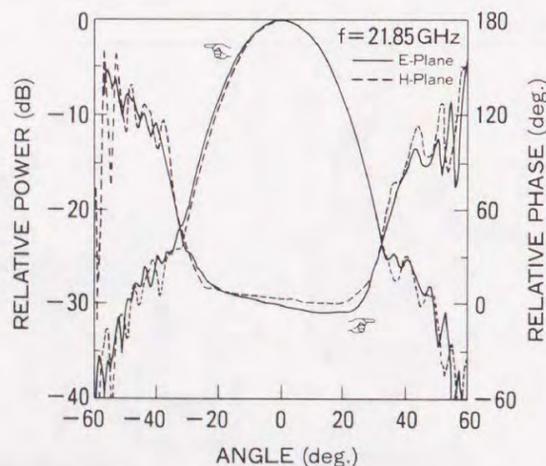


図4-2.7 一次放射器(コルゲート円錐ホーン)の実測放射パターン

反射鏡面の周縁を一次放射器の位相中心(開口から7mm内側)から見込んだ開き半角が一定( $\theta_m = 32^\circ$ )の位置に定義する(給電ホーンから反射鏡エッジを見込むと円形に見える。)ことにより、鏡面エッジ照射レベルを約-24 dB(約-5 dBi)と十分低くかつ一様に抑えている。

次節に述べる鏡面設計では、この一次放射器の電力放射パターンを

$$P_1(\theta, \phi) = P_1(\theta) = \frac{2n+1}{1 - \cos^{2n+1}\theta} \cos^{2n}\theta \quad ; \quad 0 \leq \theta \leq \theta_m \quad (4-2.1)$$

(但し、 $n=16$ )で近似している。また、反射鏡を見込む角度範囲内では位相特性が平坦であることから、点波源と見なしてよい。

#### 4-2.4 鏡面設計

本成形ビーム反射鏡アンテナでは、その反射鏡の主要な部分は、利得の高い一次元的なファン(扇形)ビームノーズ部(仰角 $-0.7^\circ$ 方向への $90^\circ$ 幅ファンビーム)の形成に寄与している。従って、幾何光学的鏡面修整理論に基づく2重曲面反射鏡の設計法(2-1章)が適用できる。また、レベルの低いビームスカート部は、回折現象を考慮した物理光学的鏡面修整法(第3章)に基づき形成するのが妥当である。特にビームスカート部については、遠方放射パターンを直接評価しながら鏡面を最適化する。

##### 4-2.4.1 ビームノーズ部

本節では点波源から出た光線が鏡面で反射され、その反射光線が仰角一定(EI)の方向に拘束される様な、オフセット修整型鏡面(オフセット角 $\theta_f$ )を設計する。このようなファンビームを2重曲面反射鏡と呼ばれる修整鏡面により合成する方法については第2章で詳しく検討した。EI=0の時は、反射光線が一平面内に拘束される場合(フラットなファンビーム)に相当し、Spine曲線は平面曲線である。これに対し、EIが0でない場合には、反射光線が平面内から僅かに反り出るため、カーブしたファンビームに相当し、Spine曲線は空間曲線となる。しかしながら、本アンテナの目標指向性ではEI $=-0.7^\circ$ であって0からの偏りが僅かであるため、Spine曲線を平面曲線で近似し、Rib曲線(放物線)の主軸のみを平面内からずらしてやるだけで十分である。(本アンテナの設計時点では、2-1章で示した厳密解の表現がフラットなファンビームについてのみ得られており、カーブしたファンビームに対する理論が検討中であったため、このような近似解を用いたものとなっている。)

この近似解の曲面について、水平面をx-z平面にとった図4-2.8の座標系を用いて

説明する。原点Oに点波源(給電ホーン)を置く。反射鏡面を背骨に相当するSpine曲線に沿って肋骨(母線)に相当するRib曲線が並んでいるように考える。Spine曲線は、x-z平面上に存在する平面曲線で、ホーンからのエネルギーを90°の範囲に均等に反射させる条件から決定される。Rib曲線は放物線である。焦点が原点Oにあり水平方向方位角Az、垂直方向仰角El=-0.7°に主軸を持ち、かつ点Pを含む回転放物面(Parent paraboloid)とx-z平面に垂直でAz方向に平行な平面との交点の集合としてRib曲線が定義される。

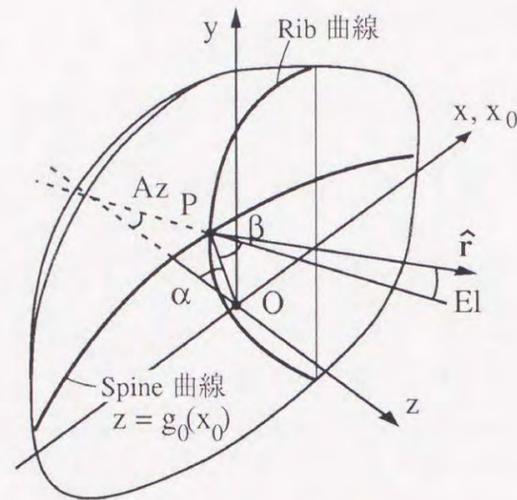


図4-2.8 2重曲面反射鏡 (El ≈ 0)

以下式を用いて鏡面設計を具体的に説明する。求める鏡面は次式で書き表される。

$$\zeta = -F + \frac{s_0^2}{4F} \sin^2 \beta + \frac{\mu^2}{4F} \quad (4-2.2)$$

$$\eta = s_0 \sin \beta \quad (4-2.3)$$

ここで、点Pに原点をもつ(η, μ, ζ)座標系と(x, y, z)座標系との関係をそれぞれの基底ベクトルを用いて行列で示すと、反射光線方向の方位角をAz、仰角をElとして、

$$\begin{bmatrix} \hat{\eta} \\ \hat{\mu} \\ \hat{\zeta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos Az & 0 & -\sin Az \\ -\sin Az \cdot \cos El & \cos El & -\cos Az \cdot \sin El \\ \sin Az \cdot \sin El & \sin El & \cos Az \cdot \cos El \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \\ \hat{z} \end{bmatrix} \quad (4-2.4)$$

であり、また、

$$s_0 = \overline{OP} = \sqrt{x_0^2 + g_0^2} \quad (4-2.5)$$

$$F = \frac{s_0(1 + \cos \beta)}{2} \quad (4-2.6)$$

$$\beta = \alpha + Az \quad (4-2.7)$$

$$\cos Az = \frac{2x_0 g_0' - [1 - (g_0')^2] g_0}{s_0 \Delta_0^2} \quad (4-2.8)$$

$$\sin Az = \frac{2g_0 g_0' + [1 - (g_0')^2] x_0}{s_0 \Delta_0^2} \quad (4-2.9)$$

$$\cos \alpha = -\frac{g_0}{s_0} \quad (4-2.10)$$

$$\sin \alpha = \frac{x_0}{s_0} \quad (4-2.11)$$

$$\Delta_0^2 = 1 + g_0'^2 \quad (4-2.12)$$

$$g_0' = \frac{dg_0(x_0)}{dx_0} \quad (4-2.13)$$

である。但し、 $z = g_0(x_0)$ はx-z平面上の平面曲線(Spine曲線)を表している。

Spine曲線は、具体的には入射及び反射光線群の電力の平衡条件から決定され、次の $g_0(x_0)$ についての1階の常微分方程式で与えられる。

$$\iint_{\omega(x_0, g_0, g_0')} P_1 d\omega = \int^{Az(x_0, g_0, g_0')} P_2 dAz \quad (4-2.14)$$

但し、 $\omega$ は鏡面の周縁とRib曲線とに囲まれた立体角である。また、二次パターンは一樣、即ち、

$$P_2(Az) = \frac{1}{2Az_m} ; |Az| \leq Az_m \quad (4-2.15)$$

である。ここで $Az_m$ は方位角面内のビーム幅を与える定数である。さらに、Elが0に近いことから、式(4-2.14)を次式で近似する。

$$1 - \frac{1}{\pi} \{ \phi_+(\theta_m) - \phi_-(\theta_m) \} + \frac{Az}{Az_m} + \frac{1}{1 - \cos^{2n+1}\theta_m} \int_{\phi_-(\theta_m)}^{\phi_+(\theta_m)} \{ 1 - \cos^{2n+1}\theta(\phi) \} d\phi = 0 \quad (4-2.16)$$

但し、 $\theta(\phi)$ 及び $\phi(\theta_m)$ は、式(2-1.34)及び式(2-1.35)で $\psi = Az$ と置いて得られる。式(4-2.16)をRunge-Kutta法を用いて、数値的に解くことによって扇形ビームアンテナが設計できる。設計に用いた各パラメータの値は以下の通りである。尚、方位角方向±45°の範囲でカバレッジ利得を確保するため、幾何光学的ビーム幅(2・Az<sub>m</sub>)は90°より大きく設計する。Az<sub>m</sub>を45°~50°の範囲で変化させて検討

した結果、 $Az_m = 48^\circ$  とした。

オフセット角： $\theta_f = 24^\circ$

開口半角： $\theta_m = 32^\circ$

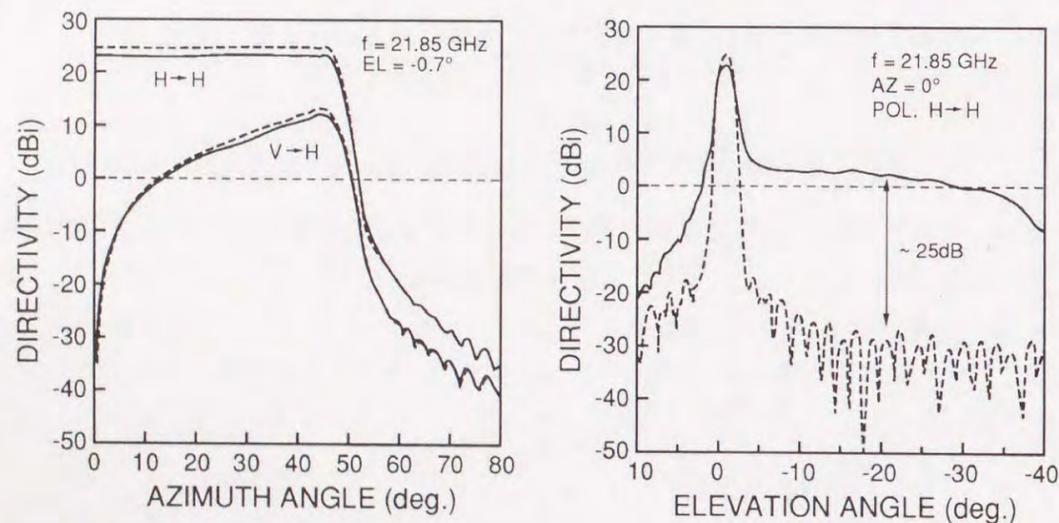
フィード電力パターン： $\cos^3 \theta$

扇形ビーム幅： $Az_m = 48^\circ$

反射鏡幅： $W = 670 \text{ mm}$

反射鏡高さ： $H = 800 \text{ mm}$

次に、設計した鏡面の放射パターンを物理光学法で求めた計算結果を図4-2.9に破線で示す。図4-2.9(a)は仰角 $-0.7^\circ$ における水平面内パターンで、 $\pm 45^\circ$ の範囲にわたってリップルの無いビームノーズが形成されていること、その外側では急峻にパターンが切れていることが分る。図4-2.9(b)はエレベーションパターンである。エッジレベルを低く設計したため、サイドローブレベルは $-20 \text{ dBi}$ から $-30 \text{ dBi}$ 程度と極めて低くなっていることが分る。このサイドローブパターンは次に述べるビームスカート部のパターンリップルとして悪影響を及ぼすが、本アンテナでは、目標とするビームスカート部のレベルに比べサイドローブが約 $-25 \text{ dB}$ 以上低いいため、良好なビームスカート部が形成できる。



(a) 水平面内放射パターン

(b) 垂直面内放射パターン

図4-2.9 放射パターンの計算値

図中の破線は4-2.4.2節で示したビームノーズ部のみを形成した反射鏡に対するもの、実線はさらに4-2.4.3節で示すビームスカート部も形成した後の反射鏡に対するもの。

#### 4-2.4.2 ビームスカート部

前節で設計された鏡面の側部分を鏡面修整することによって、ビームスカート部を形成する。鏡面修整は第4章で述べた物理光学的鏡面修整法で行い、遠方放射パターンを直接評価して目的関数を最適化する。これは反射鏡面を有限個の未定係数を含む関数で展開表示しておき、遠方放射パターンを物理光学法で計算し、所望のパターンに可能な限り近づくように未定係数を適当な初期値より逐次更新して求めていく最適化手法である。具体的方法を以下に述べる。

鏡面を修整項  $f_c(x, y)$  を付加した次の形で表す。

$$z(x, y) = f(x, y) + f_c(x, y) \quad (4-2.17)$$

$$f_c(x, y) = \begin{cases} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N C_{mn} x^{2(m-1)} (y - y_0)^{n+1} & ; y \geq y_0 \\ 0 & ; y \leq y_0 \end{cases} \quad (4-2.18)$$

ここで、 $f(x, y)$  は4-2.4.1節で得られた鏡面であり、また  $y_0$  は定数である。

さらに、修整項の係数  $C_{mn}$  に次式の条件を付加した。

$$\frac{\partial f(0, y_m)}{\partial y} + \sum_{n=1}^N C_{1n} (n+1) (y_m - y_0)^n = \tan \frac{\theta_m - \theta_f - \theta_L}{2} \quad (4-2.19)$$

ここで  $y_m$  は、修整前の鏡面の中心断面上端の  $y$  座標である。式(4-2.19)は、鏡面上端で反射された光線が近似的に仰角一定 ( $\theta_L$ ) の方向に拘束されるための条件を意味している。この条件の付加により、最適化変数の次元は  $N_{opt} = M \times N - 1$  となる。

遠方放射パターンを評価する標本点 ( $Az, El$ ) は、次の通りの等間隔のメッシュ上を選んだ。

$$Az = \Delta Az \times p \quad ; p=0, 1, \dots, N_p \quad (4-2.20)$$

$$El = \Delta El \times q + \theta_{BN} \quad ; q=0, 1, \dots, N_q \quad (4-2.21)$$

但し、 $\theta_{BN}$  はビームノーズの仰角 ( $-0.7^\circ$ ) である

次に最適化の目的関数を次の様に定義する。

$$A = \min_{p, q} \{ |E(Az, El)| - B \cdot \log |El| \} \quad (4-2.21)$$

ここで、 $|E(Az, El)| [\text{dBi}]$  は、物理光学法により求めた遠方放射レベルであり、これを  $B \cdot \log |El| [\text{deg}]$  で表される傾斜で規格化している。こうして得られた放射レベルの、着目した角度領域内の最小値  $A$  を最大とするように  $C_{mn}$  を最適化する。尚、物理光学法を用いた放射パターン計算 (鏡面上での鏡面電流の2重積分を含む) にあた

っては、 $C_{mn}$ に依らない部分からの放射界を予め求めて保存しておき、これに修整部分からの寄与を加える等の工夫を施し、設計の高速化を図った。

4-2.4.1節で示したパラメータに加え、次のパラメータを用いて反射鏡面の最適化を行った。

$$y_0 = 150 \text{ mm}, \theta_L = -40^\circ, B = 10,$$

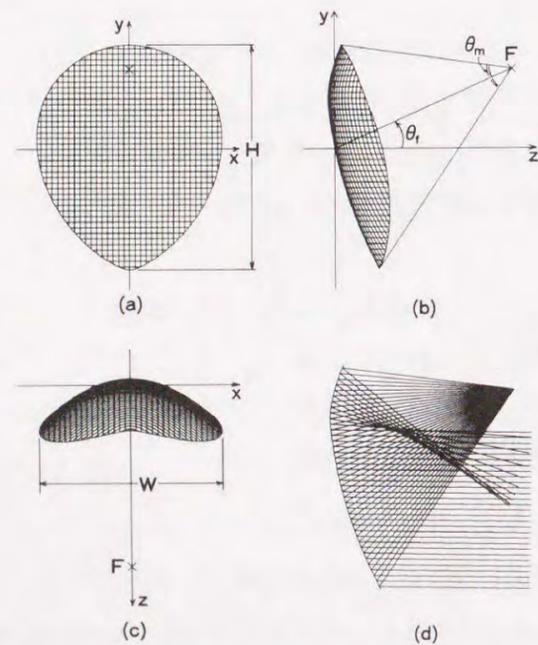
$$M = 2, N = 4, N_{\text{opt}} = 7$$

$$N_p = 3, \Delta Az = 15^\circ$$

$$N_q = 34, \Delta El = -1^\circ$$

尚、設計周波数を中心周波数21.85 GHzとし、偏波による差が少ないことから水平偏波パターンのみを評価して設計を行った。また、修整した鏡面部分の割合は面積比で約20%である。

最適化の結果得られた鏡面の形状を図4-2.10に示す。また鏡面修整を施した後の放射パターンの計算値を図4-2.9の実線で示す。鏡面修整によりビームスカート部が所定の形状に形成されていることが分る。前述の通り修整前のサイドローブが十分低く抑えられているため、リップルの極めて少ない良好なスカート部が達成されている。また、鏡面修整後も高利得のビームノーズ部の形状は変化せず、リップルも生じていない。



((a)正面図, (b)側面図, (c)平面図, (d)光線の反射の様)

図4-2.10 鏡面形状

#### 4-2.5 21GHz帯LDR基地局用アンテナ

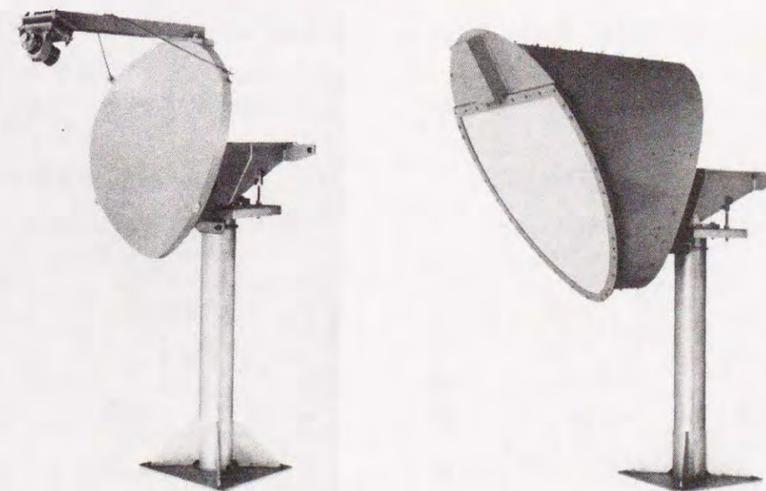
以下、21GHz帯LDR多方向型システムの基地局用に開発された広角成形ビームアンテナの性能について述べる。

##### 4-2.5.1 諸元

図4-2.11に本アンテナの概観を、また表4-2.1に主要諸元をそれぞれ示す。鏡面開口は約800mm×670mmである。図4-2.11(a)から分かる様に鏡面は滑らかで素直な形状を有している。ほぼ円筒状のシュラウドは、その内壁と鏡面の縁の間に約75mmの隙間(クリアランス)を有するように取り付けられており、内側には電波吸収体が装着されている。また平面状レドームはガラス繊維強化テフロン製(0.45mm厚)で鉛直から30°傾斜し、雨や雪の付着し難い構造になっている。送受信装置は、鏡面の背面側に設置され矩形導波管により一次放射器と接続される。

##### 4-2.5.2 放射特性

試作アンテナの測定は、レドーム(及びシュラウド)を装着した場合と、装着しない場合とについて行った。シュラウド内に貼る吸収体の位置と量についても変化させた。絶対利得の測定は標準利得ホーンアンテナとの比較法を用いた。ビームノーズの方向は設計値に等しく、方位角によらず仰角-0.7°方向である。表4-2.2に方位角0°におけるビームノーズの利得を示す。全周波数帯域にわたり、レドームを付加したこと



(a) レドームをはずした状態 (b) レドーム装着状態

図4-2.11 LDR基地局用アンテナ

表4-2.1 広角成形ビームアンテナの主要諸元

アンテナ形式	オフセット給電単反射鏡形式
周波数	21.2 GHz ~ 22.5 GHz
ビームカバレッジ	方位角幅90°、俯角0° ~ 35°
全高	1750 mm
全幅	900 mm (ポールマウントを含む)
奥行	1350 mm
オフセット角	24° (上方より給電)
鏡面開口	801.5 mm (H) × 669.8 mm (W)
鏡面深さ	Dz = 220.4 mm
開口半角	32°
給電点距離	OF = 700 mm
鏡面精度	0.03 mm r.m.s.
一次放射器形式	コルゲート円錐ホーン
開口内径	42 mm
フレア半角	8°
全長	149.4 mm
位相中心	開口から7 mm
コルゲート定数	p = 2.4 mm, t = 0.65 mm, d = 3.6 mm
エッジ照射レベル	約 -24 dB (約 -5 dBi)

表4-2.2 ビームノーズの利得 (単位 dBi)

周波数 [GHz]	偏波	実測値		計算値 レドーム無
		レドーム有	レドーム無	
21.20	H	23.2	22.9	23.01
	V	23.4	23.2	23.00
21.85	H	23.4	23.1	23.28
	V	23.3	23.1	23.27
22.50	H	24.0	23.7	23.57
	V	23.7	23.5	23.43

による利得低下は、0.3 dB 程度とかなり小さいことが確かめられた。また、測定精度の範囲内で計算値とも極めて良い一致を見ている。

図4-2.1.2は、ビームノーズにおける方位角方向パターンである。ビームノーズでは、幅90°に渡ってリップルのない極めてフラットで良好な指向性が得られている。また、メインビームの切れが鋭く、十分な低サイドローブ特性を示している。これらの特徴は、定量的にも計算値(図4-2.9(a))と良く一致している。シュラウドを装着しない場合には、一次放射器からのスピルオーバーにより、方位角±150°を中心にやや高いレベルのサイドローブが見られる。シュラウド装着時には広角サイドローブレベルが-25dBi以下に抑圧され、F/B(前方レベル対後方レベル)比は約50dBを達成している。回転対称性に優れたコルゲート円錐ホーンを一次放射器に用いた結果、水平偏波と垂直偏波との間でほとんど差がないものとなっている。

図4-2.1.3は、仰角方向パターンである。レドームを装着しない場合のパターンを計算値(図4-2.9(b))と比較すると、低いレベルまで極めて良く一致していることが明らかである。レドーム装着時にはリップルに多少の変化が見られるが、その差は3dBp-p以下で小さい。

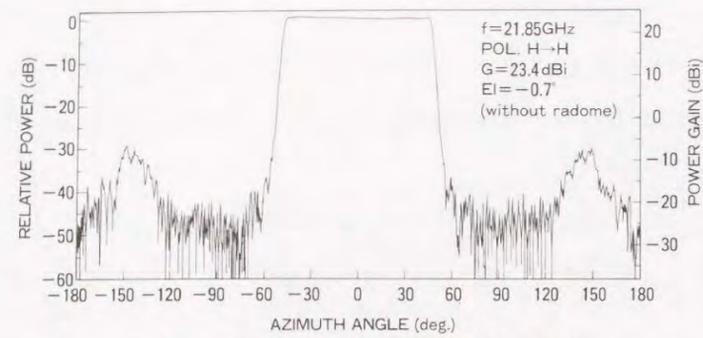
図4-2.1.4は、主偏波の2次元パターンを示したものである。本アンテナが円形に近い反射鏡から、細長い矩形形状に成形された優れたビームを放射していることを示している。

図4-2.1.5は、交差偏波の2次元パターンである。ここで交差偏波の定義は、(Az, EI)座標系の直交する2つの基底ベクトル方向に従っている。交差偏波のピークは、方位角±45° 仰角-0.7°方向にあって、そのレベルは-10dB程度とやや高い。この値は計算結果(図4-2.9(a))とも良く一致しており、オフセット鏡面に入射した光線が上記斜め方向へ反射する場合の偏波ベクトルの回転量(約15°)に対応している。(即ち、回折現象によるものではなく、幾何光学的反射波によるもの。) システム設計によっては近接サービスエリアへのオーバーリーチ(干渉)として、上記交差偏波成分の寄与が問題となる場合も考え得るが、同一サービスエリア内に限って議論するならば、子局アンテナの偏波面調整により、交差偏波識別度(XPD)を大きく改善することが可能であり問題にはならない。

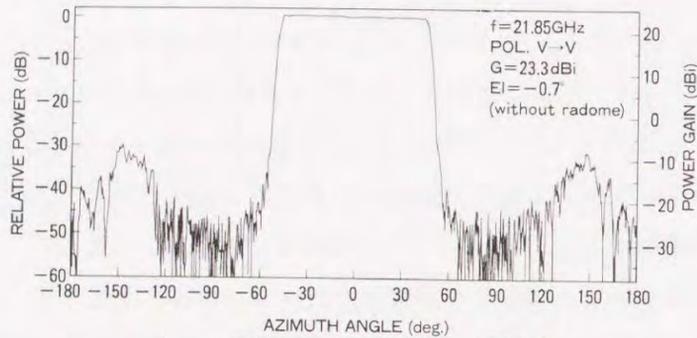
#### 4-2.5.3 降雨対策

雨滴付着時のパターン劣化を検討するために、園芸用噴霧器を用いてレドームに人工的に水滴を付着させた場合のパターン測定を行った。レドーム全面に水滴が十分付着するように撒水器のノズルをレドーム前方に傾けて設定し、パターン測定中にも十分な水量(700ml/min.)を供給し続けた。この水量をレドームの実面積で除して、単純に降水量に換算すると約80mm/hとなる。しかも、レドームは雨等の付着を避けるため鉛直より30°オーバハンクしているため、現実の降雨時に雨滴が付着する場合よりも遙かに厳しい状況と考えられる。尚、レドームの諸元を表4-2.3に示す。

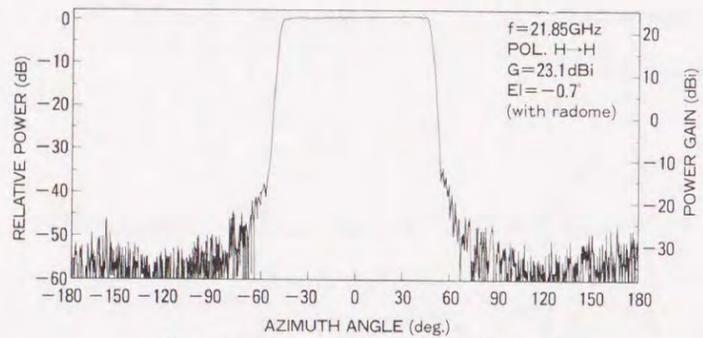
レドームの表面に人工的に水滴を付着させた場合の測定結果を図4-2.1.6及び図4-2.1.7に示す。ビームノーズ部にも若干のリップルが生じており、またビームスカート部に細かい周期のレベル変化が見られる。しかし、ビームカバレッジ内(仰角-35°まで)では必要なレベルをなお保持しており、本アンテナが十分実用に供し得ることが明らかである。



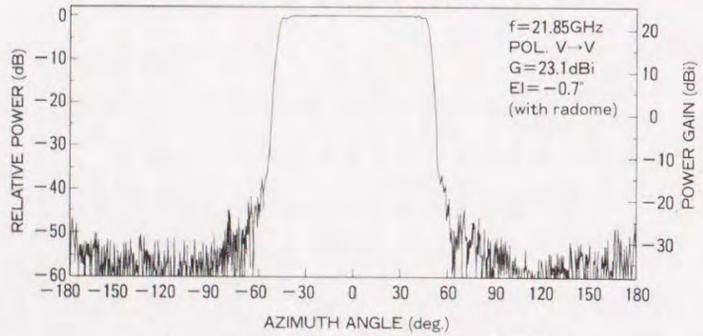
(a-1) レドーム無, H偏波



(a-2) レドーム無, V偏波

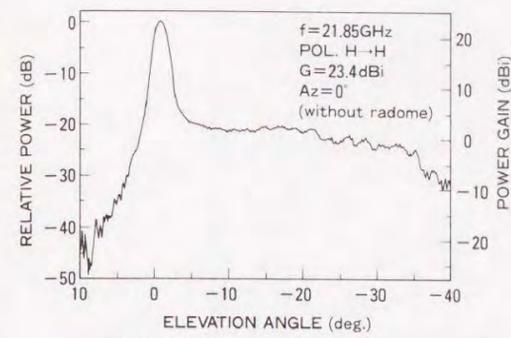


(b-1) レドーム有, H偏波

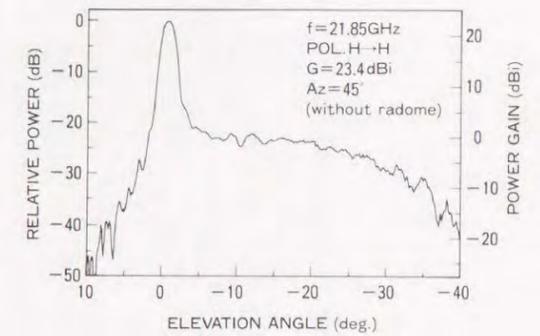


(b-2) レドーム有, V偏波

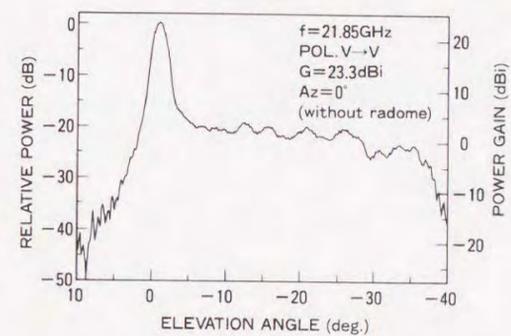
図4-2.12 水平面内パターン (ビームノーズ)



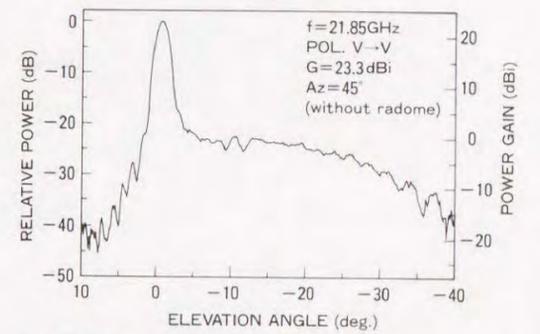
(a-1-1) レドーム無, H偏波, Az=0°



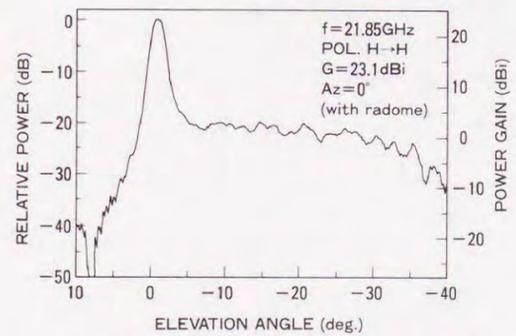
(a-1-2) レドーム無, H偏波, Az=45°



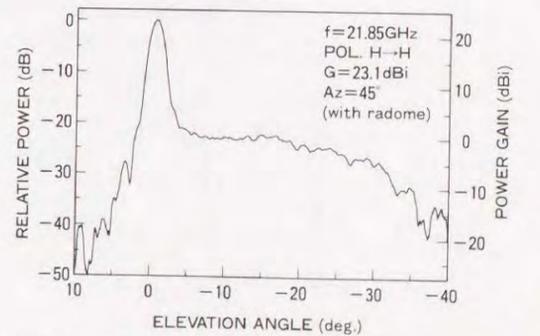
(a-2-1) レドーム無, V偏波, Az=0°



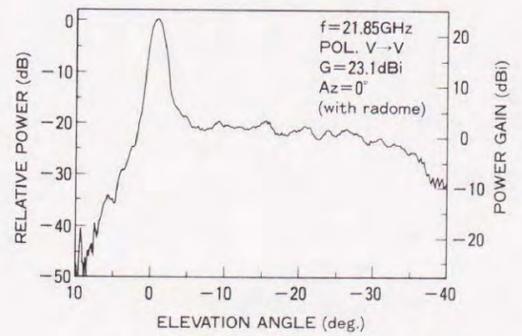
(a-2-2) レドーム無, V偏波, Az=45°



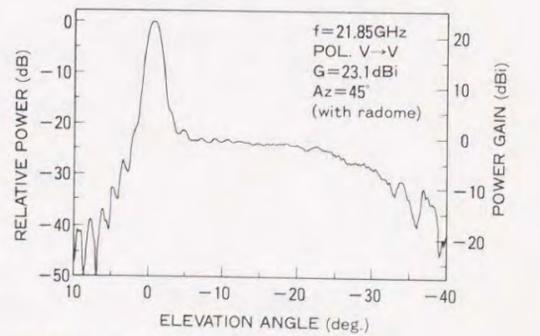
(b-1-1) レドーム有, H偏波, Az=0°



(b-1-2) レドーム有, H偏波, Az=45°

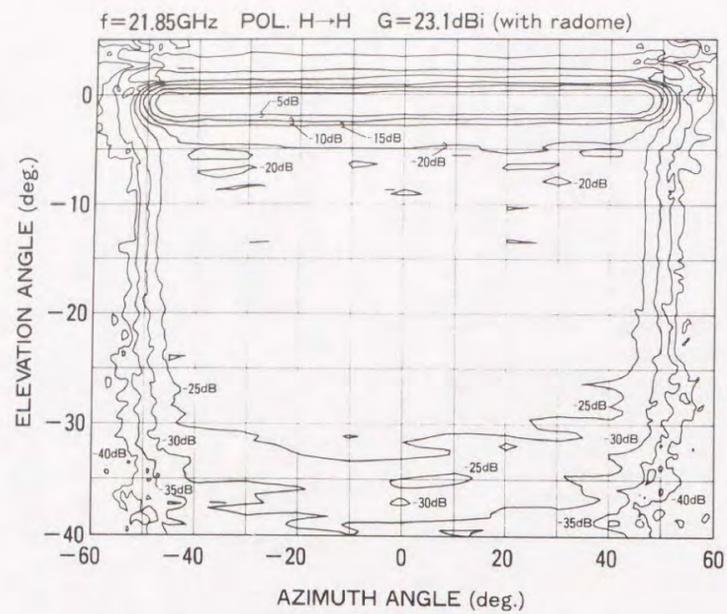


(b-2-1) レドーム有, V偏波, Az=0°

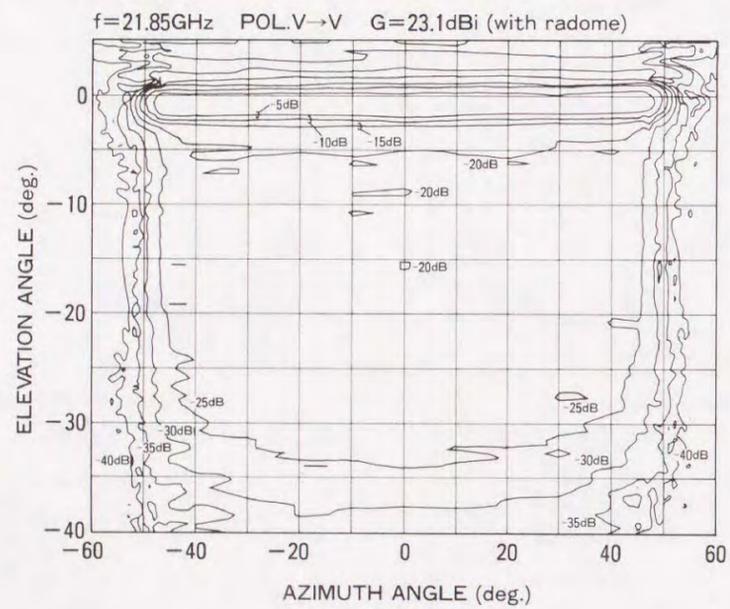


(b-2-2) レドーム有, V偏波, Az=45°

図4-2.13 垂直面内パターン

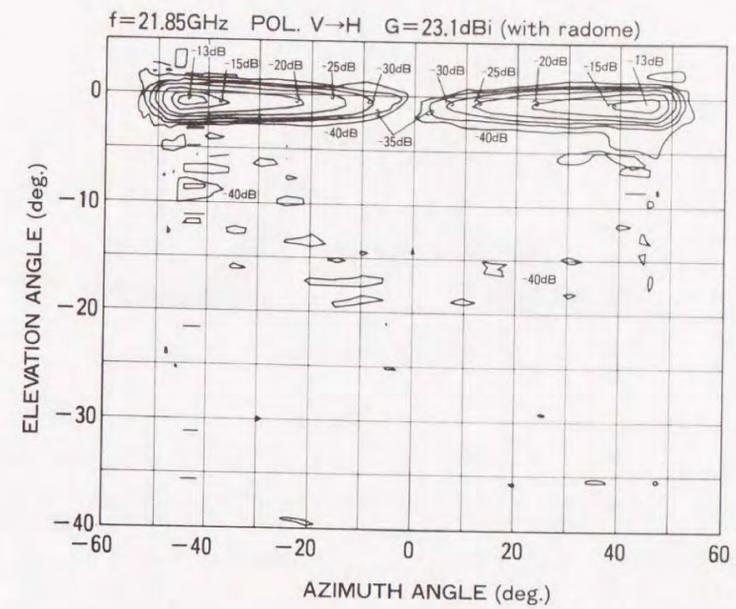


(a) H偏波

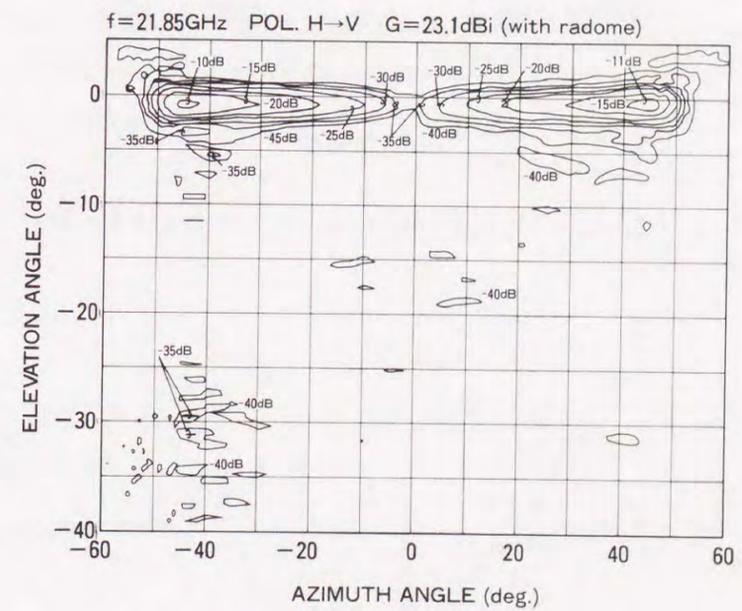


(b) V偏波

図4-2.14 等レベル線パターン (レドーム有、主偏波)

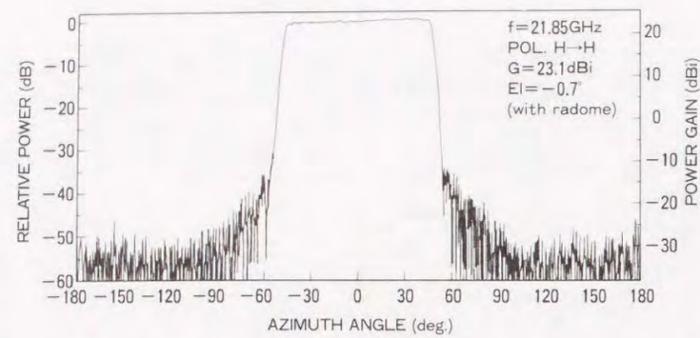


(a) V→H偏波

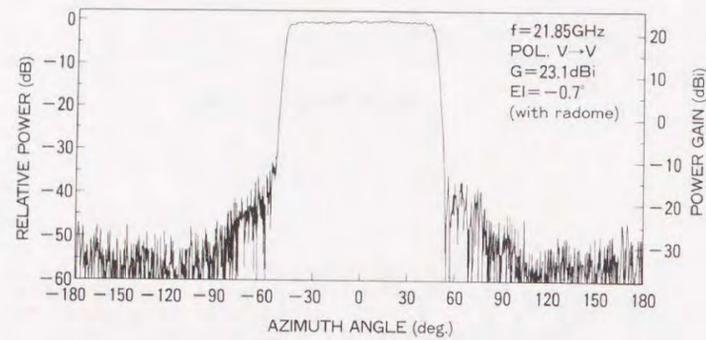


(b) H→V偏波

図4-2.15 等レベル線パターン (レドーム有、交差偏波)

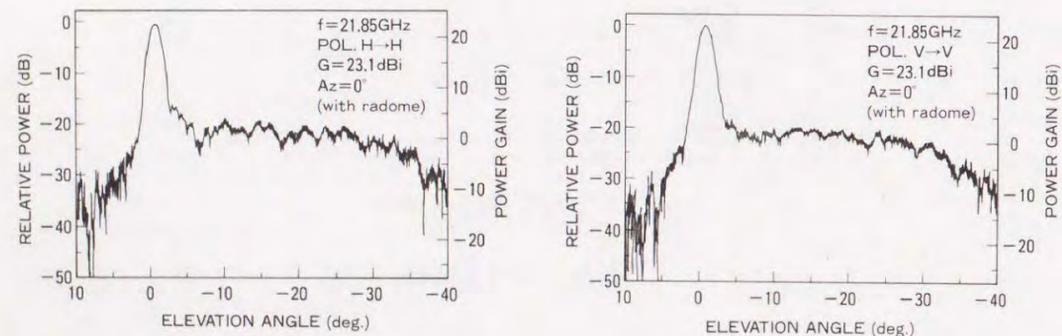


(a) H偏波

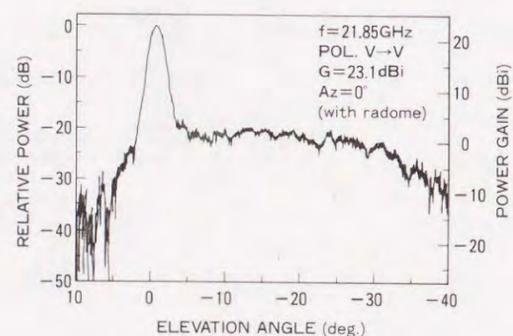


(b) V偏波

図4-2.16 レドームに水滴が付着した場合の水平面内パターン



(a) H偏波



(b) V偏波

図4-2.17 レドームに水滴が付着した場合の垂直面内パターン

表4-2.3 レドームの諸元

商品名	Raydel P-26
メーカー	凸版印刷
材質	ガラス強化繊維テフロン
比誘電率	2.8
誘電正接	$1.0 \times 10^{-3}$
厚さ	0.46 mm ~ 0.56 mm
引張り強度	66.7 kgf/cm
引き裂き強度	10 kg

4-2.6 まとめ

方位角方向の幅 $90^\circ$ に渡って一様レベルのパターンをもち、また仰角方向でコセカント2乗ビームを改良した特殊パターンをもつ様な、2次元角度空間上で高度に成形されたビームを放射するオフセット単反射鏡アンテナを開発した。その設計手法は、レベルの高いビームノーズ部の成形を幾何光学的に行い、レベルの低いビームスカート部の成形を物理光学的に行うという高精度でかつ効率の良い方法である。試作アンテナの放射特性の実測結果は極めて良好であり、アンテナ設計法の妥当性・有効性を立証した。さらに、実用上の観点から降雨に対する対策やより低価格なアンテナ製作の観点からの検討を進め、21GHz帯端末系広帯域無線伝送方式の多方向型システム基地局用アンテナとして実用化に必要な条件を全て満足するアンテナを提供した。

### 4-3 マルチビーム地球局用球面鏡アンテナ

#### 4-3.1 まえがき

衛星通信が発展し、静止衛星軌道上に高密度で通信衛星ならぶようになると、1つのアンテナを共有し複数の通信衛星と同時にアクセス可能なマルチビーム地球局を実現しようとする動きが活発になってくる。マルチビーム地球局は、アンテナを共有することによって設置に必要な面積(土地代)の減少はもちろんのこと、融雪装置等を含めた保守管理業務の一元化、並びに通信設備の冗長構成の効率化など、総合的な意味での経済性を著しく向上させるものである。

このような観点から地球局への適用を目指したマルチビーム反射鏡アンテナに関する研究開発は古くから行われてきており、パラボリックトーラス鏡面を採用したトーラスアンテナ<sup>[4-3.1]</sup>などが提案されている。球面やトーラス(環状)面を反射鏡面に用いると、一次放射器を鏡面の回転対称軸に関して回転移動させることによって、鏡面を動かすことなくとも鏡面との幾何的相対位置関係を一定に保ったままビームを偏向させることができる(ビーム走査アンテナ)。従って、複数の一次放射器を配列することによってマルチビーム化が実現できる。しかし、球面やトーラス面では、パラボラのような焦点を持たずに球面収差があるため、通常の一次放射器を使用することは出来ない。原理的には一枚の収差補正鏡を介した双反射鏡構成とすることにより、球面収差を補正することが可能である。しかし、一般に球面鏡やトーラス面鏡の球面収差を補正するのに必要な補助反射鏡は大きくなり、しかもマルチビーム化には、これら副反射鏡(および一次放射器)をビームの数だけ配置することになるから対称給電形式とした場合には開口面のブロッキングが非常に大きなものとなってしまい現実的でない。一方、これを避けようとオフセット給電形式とすると系の非対称性により開口面写像が大きく歪むため、能率やサイドローブ特性、交差偏波特性の著しい劣化が避けられない。

これに対し、2枚の補正鏡を用いて3枚構成にしたオフセット球面鏡アンテナでは、球面収差をなくするだけでなく、オフセット化による開口面写像の歪みを軽減し、しかも実質的に所望の開口面電界分布を実現可能である<sup>[4-3.2], [4-3.3]</sup>。2つの補助反射鏡の曲面形状は、幾何光学的鏡面修整理論に基づき、最適化の手法を用いて決定することができる。ここでは、この球面鏡アンテナについて、特に都市部(テレポート)に設置される中型地球局(口径: 5 m程度)用マルチビームアンテナとして実用化の観点から、給電系を傾斜させることによる実効開口能率の改善、交差偏波最小条件の利用、並びに、与えられた隣接ビーム分離角を実現するのに問題となる補助反射鏡の大きさの検

討を加える。この結果、この種のアンテナとしては世界初のKu帯5.5 m 4ビーム地球局アンテナの商用化に成功した。

#### 4-3.2 基本構成

まず、シングルビーム用オフセット球面鏡アンテナの鏡面設計法<sup>[4-3.2]</sup>を説明する。

図4-3.1に3枚構成オフセット球面鏡アンテナの鏡面配置を示す。ここで、主反射鏡は曲率半径Rの球面の一部であり、一次放射器(ホーンアンテナ)、補助反射鏡及び副反射鏡からなる給電部は、主反射鏡開口をブロッキングしないようにオフセットしている。

副反射鏡および補助反射鏡の曲面形状は、幾何光学的鏡面修整理論に基づき、以下の条件から決定される。

- (1) 一次放射器から開口面までの通路長一定(球面収差の消去)
- (2) 開口面写像の所望の写像からの誤差が最小

主反射鏡曲率半径Rおよび中心光線の配置を決定すると、上記条件(1)によって副反射鏡および補助反射鏡の2枚のうち独立なものは1つになる。(2-2章で示したように、通路長一定条件で拘束された2枚の反射鏡の自由度は1枚のそれと等価である。)そこで、独立な鏡面を補助反射鏡に選び、その曲面形状を適当な展開関数と展開係数とを用いて表現しておき、上記条件(2)より最小化の目的関数を開口面写像の誤差で定義し、適当な値を初期値として展開係数を最適化する。

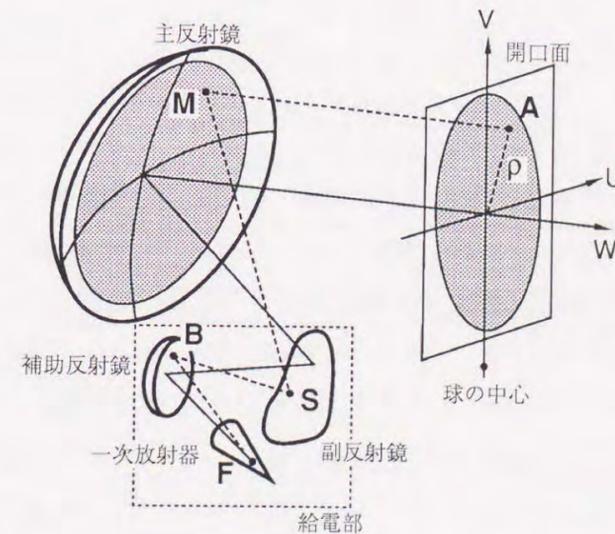


図4-3.1 オフセット球面鏡アンテナの構成

4-3.3 鏡面設計

Ku帯5.5m4ビーム地球局アンテナを例にとり球面鏡アンテナの具体的設計法を示す。

4-3.3.1 交差偏波最小条件<sup>[4-3.4]</sup>

図4-3.2に鏡面系の断面図と中心光線を示す。中心光線の幾何については、主反射鏡中心点と副反射鏡中心点との距離をパラメータとした上で、反射鏡曲面を中心光線近傍において回転2次曲面で漸近表現した場合に、それら3枚の回転2次曲面系が交差偏波消去条件<sup>[4-3.5]</sup>を満足するように決定した。即ち、図4-3.2で、各鏡面をその中心光線反射点近傍において回転2次曲面系( $\Sigma_1, \Sigma_2, \Sigma_3$ )で近似する。 $I_k$ および $i_k$  ( $k=1,2,3$ )は各鏡面上での中心光線の反射点とその反射角度であり、 $F_0$ は一次波源点である。鏡面( $\Sigma_1, \Sigma_2, \Sigma_3$ )系の交差偏波消去条件は $I'_1 F_0 I_1$ が一直線となることに等しく、次式で表される。

$$(\sigma_{01} + \sigma_{11}) \tan(i_1) = \sigma_{01} \tan(i_1 + i'_1) \quad (4-3.1)$$

但し、 $\sigma_{jk} = \overline{F_j I_k}$  ( $j=0,1,2; k=1,2,3$ )である。ここで、球面(半径R)を近似した放物面 $\Sigma_3$ の焦点 $F_2$ は

$$\sigma_{23} = R \cos(i_3) / 2 \quad (4-3.2)$$

より決定できる。また2つの楕円 $\Sigma_1, \Sigma_2$ の共焦点 $F_1$ は、波源からの光線の向き $\theta$ と主反射鏡円形開口面(口径 $D = 2\rho_m$ )上でのその光線位置 $\rho$ との写像 $\rho(\theta)$ を与える等価パラボラの焦点距離 $f_e$ を用いて関係式

$$f_e = \sigma_{01} (\sigma_{12} / \sigma_{11}) (\sigma_{23} / \sigma_{22}) \quad (4-3.3)$$

より比 $\sigma_{12} / \sigma_{11}$ の値を得て、決定することができる。

図4-3.3は、R、 $\sigma_{22} + \sigma_{23}$ 、 $\sigma_{11} + \sigma_{12}$ 、 $\sigma_{01}$ 、 $2i_3$ 、および、 $2i_2$ が予め与えられた時、 $2i_1$ を変化させて反射鏡系を設計し、ホイヘンス波源(電力パターン： $\cos^{2n}\theta$ 、 $n=79.8$ )で励振した場合の主偏波に対する交差偏波最大レベルを物理光学法を用いてシミュレーション解析しプロットしたものである。実線(Case1)は、写像 $\rho(\theta)$ が与えられた焦点距離 $f_e$ の等価パラボラに等しい場合であり、破線(Case2)は主反射鏡開口面電界分布が $1 - (\rho / \rho_m)^{10}$ に比例するように高能率修整した場合である。Case1では、式(4-3.1)で与えられる最適角度の計算値(↓印)とシミュレーションで得られた交差偏波最小角度とのずれは約 $2^\circ$ と僅かであった。一方、Case2では、等価焦点距離 $f_e$ が定数ではなく $\theta$ の関数となるため、最適角度の計算値は図4-3.3に←→印で示した範囲(幅約 $8^\circ$ )を与えることになる。シミュレーション結果の交差偏波最小角度はその範囲に入っている。

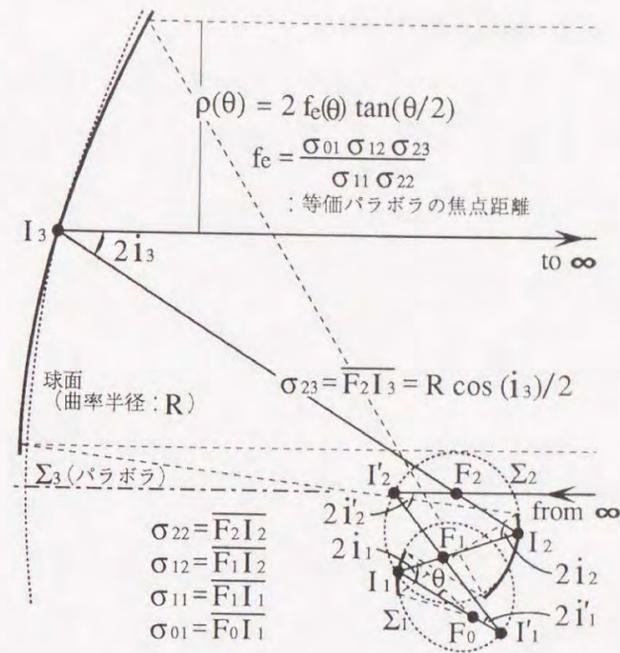


図4-3.2 鏡面系断面図と中心光線

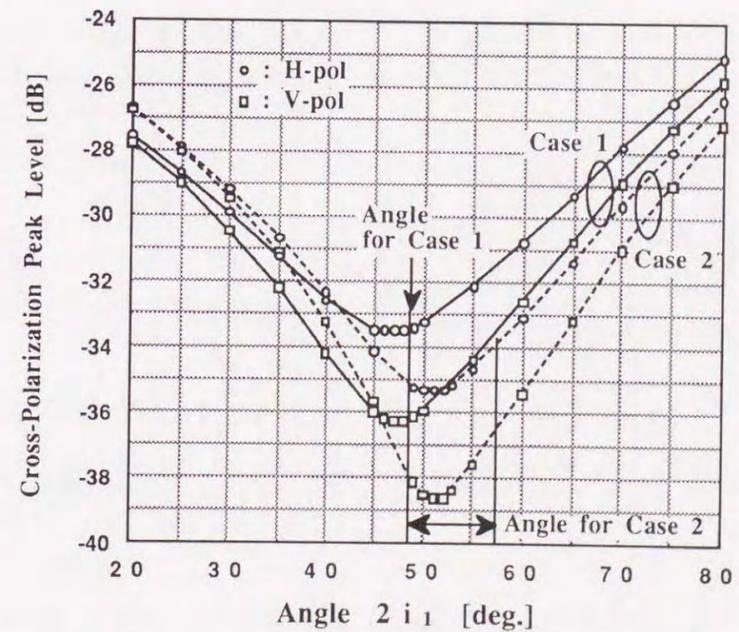


図4-3.3 交差偏波ピークレベルの変化

( $R = 12800\text{mm}$ ,  $\sigma_{22} + \sigma_{23} = 7090\text{mm}$ ,  $\sigma_{11} + \sigma_{12} = 1600\text{mm}$ ,  $\sigma_{01} = 1100\text{mm}$ ,  $2i_3 = 32^\circ$ ,  $2i_2 = 52^\circ$ ,  $D = 2\rho_m = 5500\text{mm}$ ,  $\theta_m = 13^\circ$ , 周波数12.5GHz)

4-3.3.2 反射鏡の展開表現

最適化を図る補助反射鏡は次のように表現した。まず中心(垂直)断面曲線を垂直断面内の2次元問題に対する常微分方程式の解で与え、この面内では鏡面形状を変化させないように3次元に拡張表現する。つまり

$$r(\theta, \phi) = r_0(\theta, \phi) + r_c(\theta, \phi) \quad (4-3.4)$$

とすると、初期項  $r_0(\theta, \phi)$  は

$$\frac{1}{r_0(\theta, \phi)} = \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{g^+(\theta)} + \frac{1}{g^-(\theta)} + \left( \frac{1}{g^+(\theta)} - \frac{1}{g^-(\theta)} \right) \sin \phi \right] \quad (4-3.5)$$

但し、

$$g^\pm(\theta, \phi) \equiv r_0\left(\theta, \phi \pm \frac{\pi}{2}\right) \quad (4-3.6)$$

は常微分方程式を求めて得られた垂直断面曲線とする。また修整項  $r_c(\theta, \phi)$  を

$$\frac{1}{r_c(\theta, \phi)} = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} C_{mn} \sin^{m+2n}\theta \sin^m\phi \cos^{2n}\phi \quad (4-3.7)$$

としている。このように、補助反射鏡曲面を極座標系を用いてフーリエ展開表示するとき、長さ  $(r)$  そのものではなく長さの逆数  $(1/r)$  を展開する方が、最適化を実行した場合に解の振る舞い(収束)が素直であることが経験的に明かとなっている。(これは、回転2次曲面の極座標表現からの類推で直感的に見い出されたものである。)

4-3.3.3 開口面電力密度分布

所望の開口面写像については、一次放射器の電力放射パターンを

$$P_1(\theta) = P_{01} \cos^{2q}\theta \quad (4-3.8)$$

で近似し、高能率化のために次の開口面電力密度分布

$$P_2(\rho) = P_{02} \left[ 1 - \left( \frac{\rho}{\rho_m} \right)^2 \right]^2 \quad (4-3.9)$$

を所望の分布とし、レイトレースで得られた実際の分布との差を評価しこれを最小化の目的関数とする。

4-3.3.4 マルチビーム化と給電系の斜交配置 [4-3.6], [4-3.7]

トーラス(環状面)反射鏡によりマルチビームアンテナを構成した場合には、共有するトーラス反射鏡を照射する場所がビームによって異なるため、視野(field-of-view)の両端にあるビームの分離角が大きくなると個々のビームについての能率が次第に低下する。これに対し、同じ環状面であっても球面の場合にはより高い対称性を有しており対

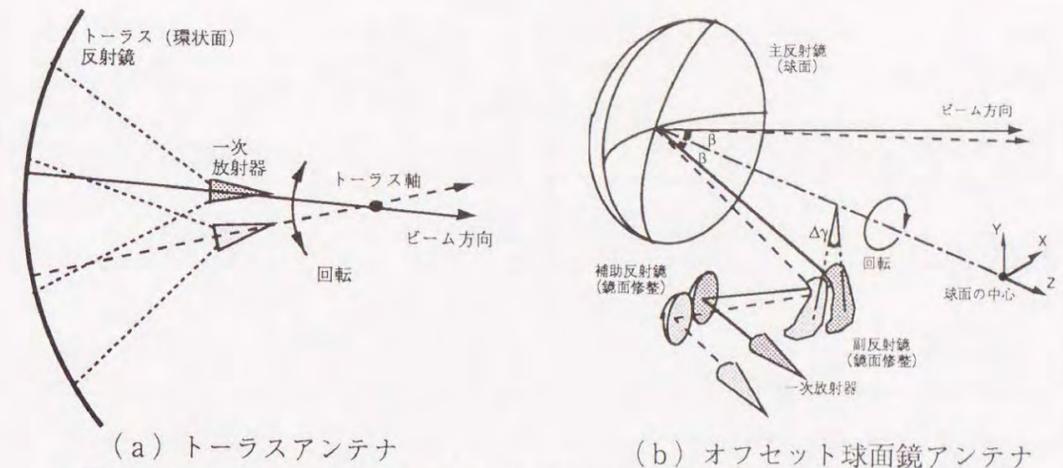


図4-3.4 トーラスアンテナとオフセット球面鏡アンテナの原理的相違

称軸の選択が自由であるため、これを反射鏡の中心を通る軸に選ぶことにより効率を著しく向上することができる。図4-3.4はこれを模式的に示したものであり、オフセット( $\beta \neq 0$ )球面鏡アンテナで給電系を斜めに( $\Delta\gamma \neq 0$ )配置させれば、円錐面に添っての走査(conical scan)がシングルビームに対する反射鏡部分に何ら余分な面積を付け足すことなしに行えるという特長を有している。

一方、図4-3.4(b)からも分かるように、オフセット球面鏡アンテナでは隣接ビームに対応する副反射鏡及び補助反射鏡がぶつかることなく斜交配置できる最小の間隔から隣接ビーム分離角の最小値が決定される。鏡面修整の立場からは副反射鏡及び補助反射鏡をなるべく大きくしてそのエッチ照射レベルを低く抑えたいから、この制限はアンテナ性能とのトレードオフにより決定される。一般にはアンテナ開口径が大きく放射ビーム幅が狭いアンテナほど隣接ビーム分離角を小さく構成できる。

4-3.4 Ku帯6.5mマルチビーム地球局アンテナ [4-3.7]

以下、国内通信衛星系へのアクセスを目的とし、大阪テレポート内に建設されたKu帯4ビーム地球局アンテナについて述べる。

4-3.4.1 諸元

表4-3.1に本アンテナに対する要求条件を、また、表4-3.2にアンテナの仕様を示す。図4-3.5は地球局アンテナの概観であり、図4-3.6に構成を示す。

地球局は北緯34.63°、東経135.41°の大阪テレポート内に設置され、静止衛星軌道に4°間隔で並ぶ4つの通信衛星、JCSAT-1(150°E)、JCSAT-2(154°E)、Superbird-A(158°E)、及び、Superbird-B(162°E)に同時にアクセスすることを条件に設計・製作さ

表4-3.1 アンテナの要求条件

FREQUENCY RANGE	(Rx) 12.25~12.75 GHz (Tx) 14.00~14.50 GHz
POLARIZATION	ORTHOGONAL LINEAR
NUMBER OF BEAMS	FOUR BEAMS
BEAM SEPARATION	4.5° NOMINAL (4° - INTERVALS ON G. S. O.)
BEAM STEERING RANGE	±1.0° (±0.2° TRACKING)
SATELLITE POINTING	STEP-TRACK (OPTIONAL)
POWER GAIN	> 54.9 dBi @12.50GHz > 56.0 dBi @14.25GHz
NEAR-AXIS SIDELobe	< 29 - 25 log θ dBi
ANTENNA NOISE TEMP.	< 58 K @12.50GHz (EL=40°, CLEAR SKY)
V. S. W. R.	< 1.3 : 1
Tx/Rx ISOLATION	> 85 dB
X. P. D.	> 35 dB ON AXIS
TEMPERATURE RANGE	0~50° C
WIND LOADING	> 20 m/s OPERATIONAL > 60 m/s SURVIVAL

表4-3.2 アンテナ仕様値

APERTURE DIAMETER	5.5 m (EFFECTIVE)
BEAM WIDTH	(Rx) 0.28° @12.50GHz (Tx) 0.25° @14.25GHz
ANTENNA TYPE	OFFSET-FED SPHERICAL REFLECTOR ANTENNA
MAIN REFLECTOR:	
TYPE	FIXED SPHERICAL SURFACE
SIZE	6.5 m
PANEL CONSTRUCTION	12 SECTOR PANELS
SURFACE ACCURACY	< 0.3 mm (R. M. S.)
MOUNT CONFIGURATION	POLE MOUNT WITH EL/X-EL
FEED ASSEMBLY:	
TYPE	OFFSET DUAL SHAPED REFLECTOR SYSTEM
SURFACE ACCURACY	< 0.2 mm (R. M. S.)
PRIMARY RADIATOR	CORRUGATED CONICAL HORN
STEERING CAPABILITY	±100 mm (INDEPENDENTLY ALONG 2 ORTHOGONAL AXES)

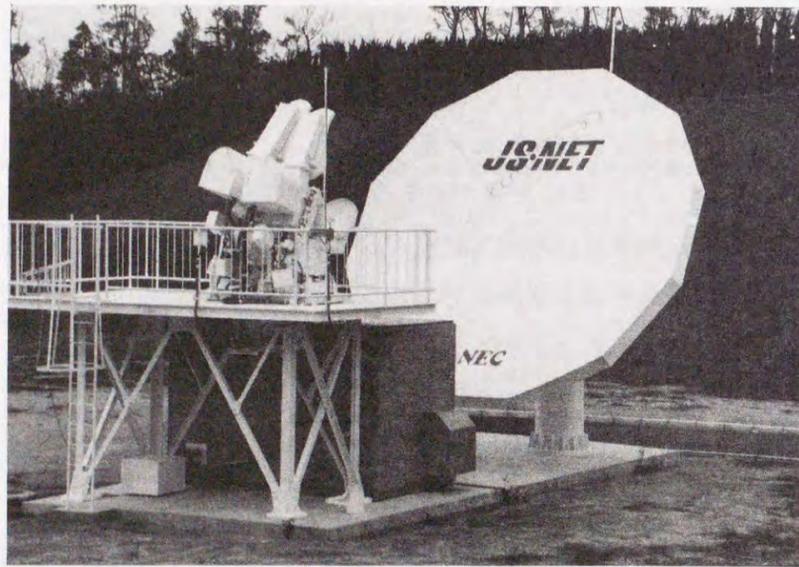


図4-3.5 大阪テレポート内のマルチビーム地球局 (給電部が2式実装された状態)

れている。(但し、図4-3.5の建設時点ではSuperbird-A及び-B衛星が打ち上げ予定段階であるため4つの給電部のうち2つのみが実装されている。)

主反射鏡は直径6.5mのほぼ円形な形状であり、その鏡面は12枚の扇形パネルをセンターハブに取付けた構造で、曲率半径12.8mの球面鏡を構成している。完全に対称な主反射鏡はその製造、組立及び検査が非対称な鏡面に比較して容易であることは

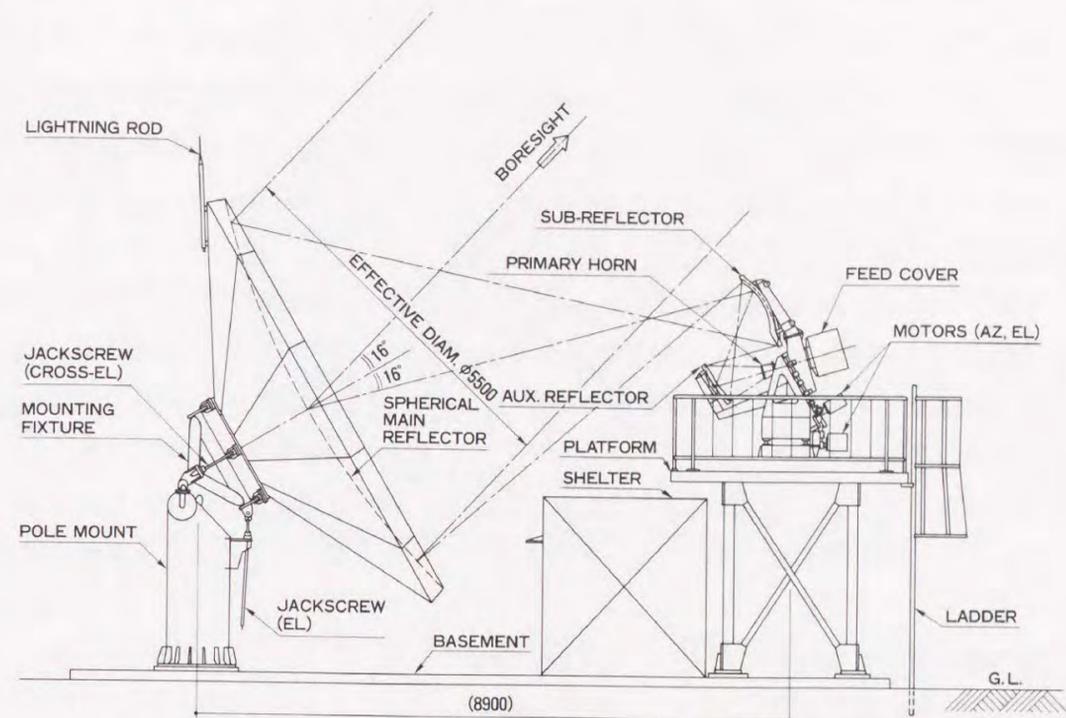


図4-3.6 オフセット球面鏡アンテナの側面図

言うまでもない。主反射鏡の支持は、ポールマウント形式であり、建設時の方向調整用にEL/Cross-ELの2軸が可動となっているが運用中は完全に静止している。

図4-3.7及び図4-3.8に示される給電部は一次放射器(コルゲート円錐ホーン)と2枚の鏡面修整型反射鏡(補助反射鏡及び副反射鏡)から構成され、その全体が2つ

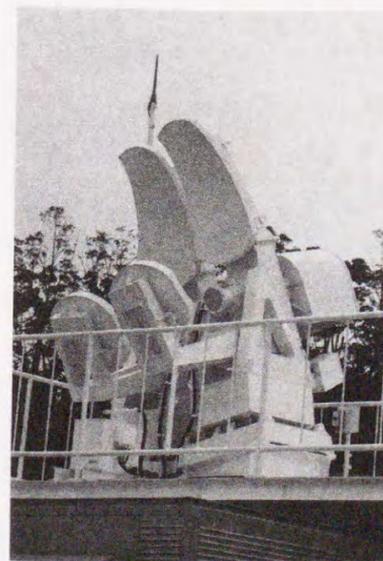
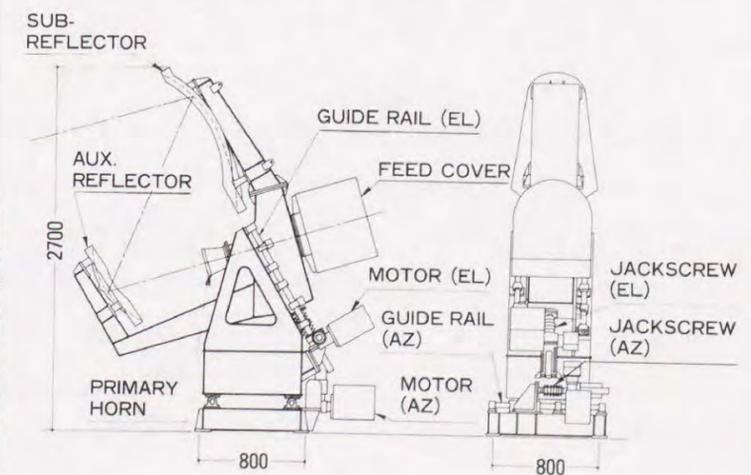


図4-3.7 給電部の実装状態



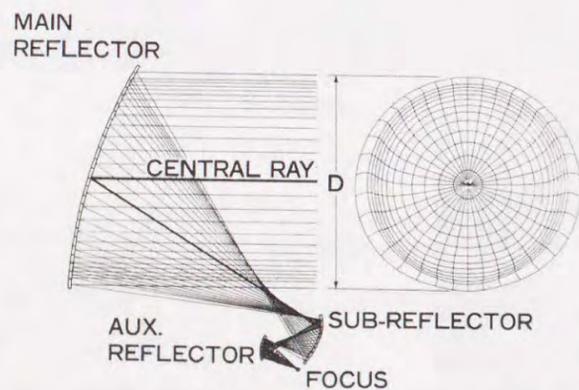
(a) 側面図 (b) 背面図

図4-3.8 給電部の構成図

の互いに直交した軸に沿って平行移動することによって方位角及び仰角についてそれぞれ $\pm 0.2^\circ$ までの範囲の衛星追尾 (tracking) を実現している。このように最も大きく、自重並びに風圧荷重の大きい主反射鏡を固定したまま、比較的小さな給電部の駆動のみで運用できるため、全体駆動型の従来アンテナに比較して、駆動装置の大幅な簡素化が達成されている。

フィードカバー内には直交偏分波器 (ortho-mode transducer: OMT) 及び受信用の低雑音増幅器 (low noise amplifier: LNA) が実装されており、送信用の高出力増幅器 (high power amplifier: HPA) や他の通信装置は共通のシェルタ内に配備されている。このように複数の衛星通信リンク (ビーム) に対する送受信装置を共通のシェルタ内に隣接して設置されているため、機器障害時用の冗長 (back-up) 設備の配置を1対1から例えばN (ビーム数) 対1の構成にすることが容易であるため運用及び保守に係わる費用を削減できる。

給電部の2枚の反射鏡は最適化による鏡面修整の結果として、特殊な鏡面形状を持っているが、特に副反射鏡についてはその周囲形状も奇妙なものとなっている。これは球面鏡をオフセット給電するために非対称な球面収差を除去するためには垂直面内の大きさが大きくなるためであり、これに対し、水平面内の大きさは先に述べた最小ビーム分離角の制約から隣り合う反射鏡とがぶつかることの無いように小さくしなければならない結果である。図4-3.9にはこれら2枚の反射鏡により球面収差が除去され、しかも(b)に示すように開口面写像 (電力密度分布) がほぼ回転対称なものに制御されている様子を示した。同図(a)では、球面収差による焦点の著しいボケが垂直方向に延びた副反射鏡と補助反射鏡とにより一次放射器に整合するように制御されている様子が分かる。



(a) 垂直断面図 (b) 開口面写像  
図4-3.9 レイトレース模様

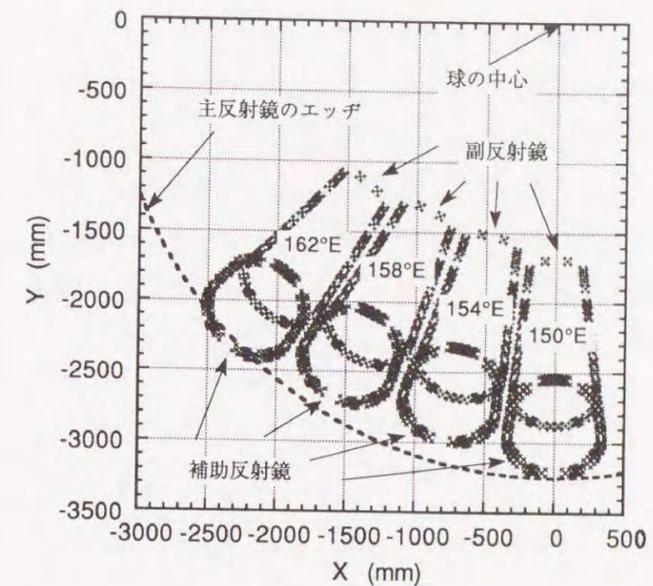


図4-3.10 給電部のクリアランス

#### 4-3.4.2 給電部の斜交配置

図4-3.10は球の中心から4つの給電部の副反射鏡及び補助反射鏡のエッジを見た図であり、副反射鏡及び補助反射鏡は側面を剃り落とした形状となっている。同図で各反射鏡のエッジ上の標本点は5つの小さな十字 (+) で描かれており、これらは基準位置及びAZ/EL方向にそれぞれ $\pm 0.2^\circ$ ビーム走査した場合の位置を表している。これより、要求されたビーム走査を行った場合でも隣り合う反射鏡同士がぶつかりあわない (クリアランス) ことが確認できる。

さて、図4-3.10からも給電部の相対位置関係が斜交 (tilt) している様子が描かれているが、給電部の斜交角度 ( $\Delta\gamma$ ) の効果を検討する。図4-3.11の太い実線は地球局の設置される大阪テレポートから静止衛星軌道を見たときのその弧を (AZ, EL) 角度空間上に描いたものであり、破線は主反射鏡のオフセット半角を  $\beta = 16^\circ$  としたときの、コニカル走査によるビーム走査方向の軌跡を  $150^\circ$  Eの衛星方向を基準位置に選び示している。同図で●が給電部の斜交角度の刻み幅を  $\Delta\gamma = 13^\circ$  とした場合のビーム方向を示しており、そこから衛星方向◇までずれているものについては通常のトラス走査を併用する。図4-3.10より、単にトラス走査の量を小さくするのであれば、 $\Delta\gamma$  としてももう少し大きな値 (例えば  $\Delta\gamma = 17^\circ$ ) が好ましいことになるが、この場合  $162^\circ$  Eの衛星用の給電部は  $3 \times 17 = 51^\circ$  も傾ける必要があり、給電部の支持・駆動系の機構設計上からは好ましいものでなくなる。また、隣り合う副反

射鏡との物理的干渉条件もより厳しくなり、副反射鏡をさらに削り落とすことによる電気性能に与える影響が問題となってくる。一方、 $\Delta\gamma = 13^\circ$  とした場合の主反射鏡利用効率（開口能率）の改善効果を示したのが図4-3.12である。同図より、(a)に示したコニカル走査を用いずトラス走査のみ（斜交角度 $\Delta\gamma = 0^\circ$ に相当）とした場合に比較して、コニカル走査を利用することにより主反射鏡利用効率が著しく、しかも実質上十分なまでに改善されていることが明かである。尚、同図(b)では、設計上のビーム開口直径5.5mに対し、実際的主反射鏡直径は6.5mとしている。

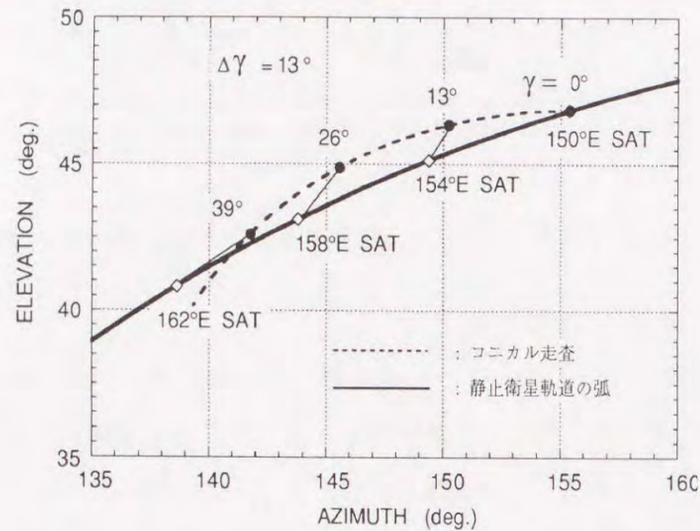
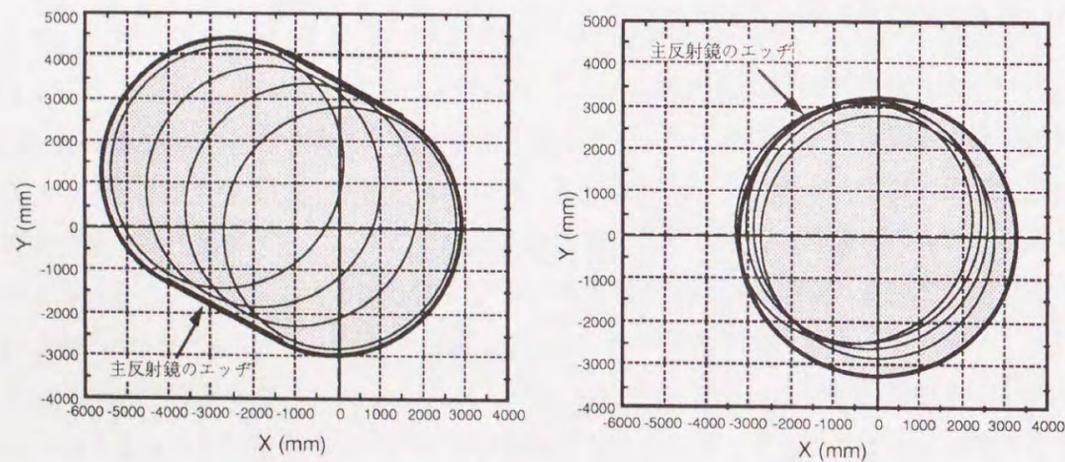


図4-3.11 給電部の斜交配置によるコニカル走査



(a) 従来の走査

(b) 斜交配置による走査

図4-3.12 主反射鏡の照射領域の重なり具合

図4-3.13は4つの衛星方向に対するそれぞれのビームの指向性利得の計算値をプロットしたものである。以下、放射特性の計算は全て、一次放射器であるコルゲート円錐ホーンの放射電界については開口面電界法を用い、3枚の反射鏡からの放射電界については物理光学近似に基づく電流分布法を用いるという精度の高い方法を用いている。コルゲート円錐ホーンを利用しているため、偏波の違いによる放射特性の差は極く僅かであった。図4-3.13によれば、最大の利得は $154^\circ$  Eの衛星方向で、また、最低の利得は $162^\circ$  Eの衛星方向でそれぞれ得られており、その差は0.3 dB程度である。また、この指向性利得をビーム放射方向に投影した主反射鏡面積（長径6.5m、

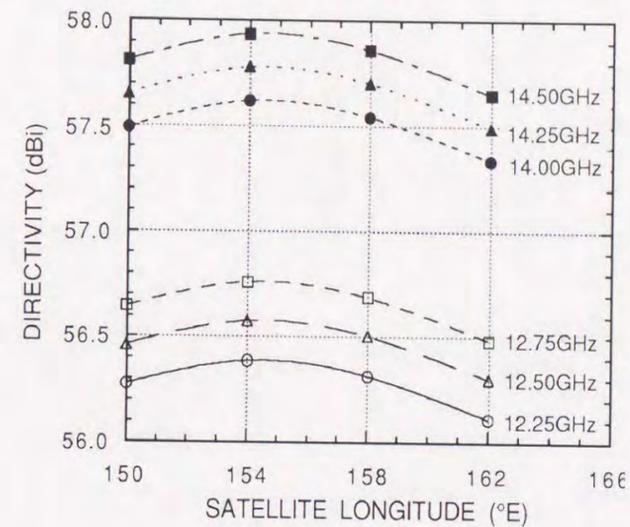


図4-3.13 4つの衛星方向に対する指向性利得

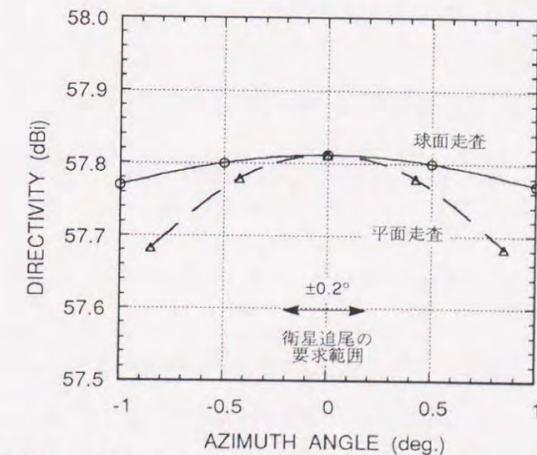


図4-3.14 水平面内のビーム偏向特性 (f = 14.5 GHz, AZ面内)

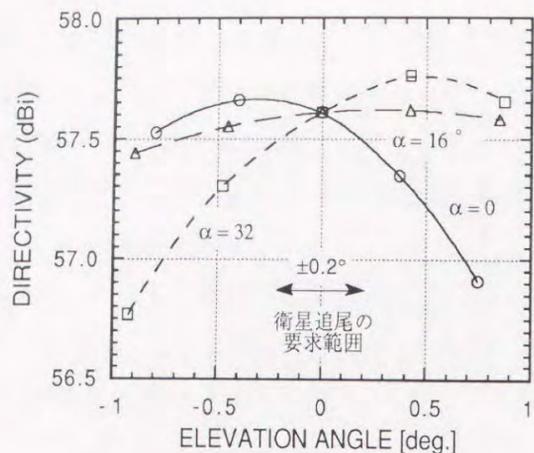


図4-3.15 垂直内でのビーム偏向特性 (f = 14.25 GHz, EL面内)

短径  $\cos 16^\circ \times 6.5$  mの楕円の面積にほぼ等しい) に対する開口能率に換算すると、60~65%に達しており、シングルビームアンテナに比べても遜色のない高能率が実現できている。

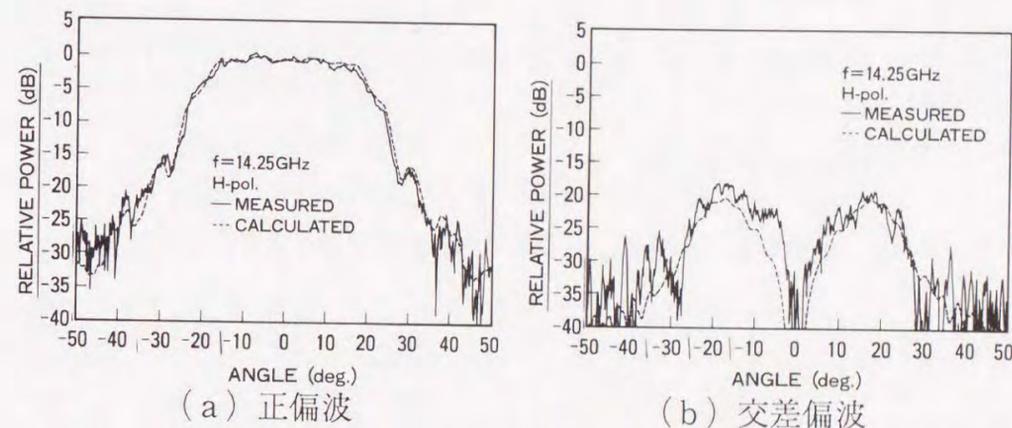
次に、衛星追尾に係わるビーム走査についての検討を加える。要求として与えられている追尾角度範囲はAZ及びEL共に $\pm 0.2^\circ$ 以内であり、給電部の動く量としては $\pm 100$  mm程度となる。これは球の半径12.8 mに比較して十分に小さいので、衛星追尾に関しては球の中心に関する回転移動(球面走査)を一つの平面内の平行移動(平面走査)で近似しても問題ないものと考えられる。図4-3.14は $150^\circ$  E衛星方向のビームについて、AZ方向のビーム偏向特性を示したものである。これより $\pm 0.2^\circ$ 以内のビーム走査については平面走査で近似しても全く問題の無いことが明かである。また、図4-3.15はEL方向のビーム偏向特性を示したものである。走査する平面の法線方向とビーム軸とのなす角度 $\alpha$ をパラメータとして検討した結果、 $\alpha \cong \beta$  ( $\beta$ は主反射鏡のオフセット半角)とするとEL方向のビーム偏向特性が上下方向でバランスすることが分かった。そこで本アンテナでは、 $\alpha = \beta = 16^\circ$ としている。

#### 4-3.4.3 放射特性

限定駆動型アンテナの放射パターンを設置形態そのまま測定するのは困難である。全天駆動型アンテナのように疑似衛星設備(collimation)を用いることができないからである。しかも、本球面鏡アンテナでは、主反射鏡と給電部とが6 m以上離れた場所にそれぞれ別の支持構造体によって支えられるため、工場内等の測定サイトにおいて測定

することも現実的でない。そこで本アンテナ開発に際しては、まず高い精度の期待できる計算値と、限られた範囲の測定データとを比較することにより設計の有効性を実証するのが有効である。

給電部単体の放射特性を送受信点間距離約1 kmの測定サイトにて実測し、計算値と比較した結果を図4-3.16及び図4-3.17に示す。実測値は低いレベルまで計算値と極めて良く一致している。



(a) 正偏波 (b) 交差偏波

図4-3.16 給電部単体の水平面内放射パターン

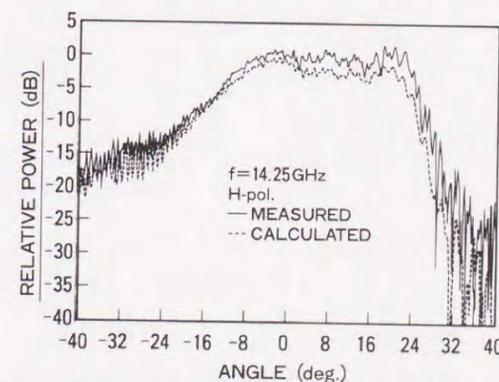
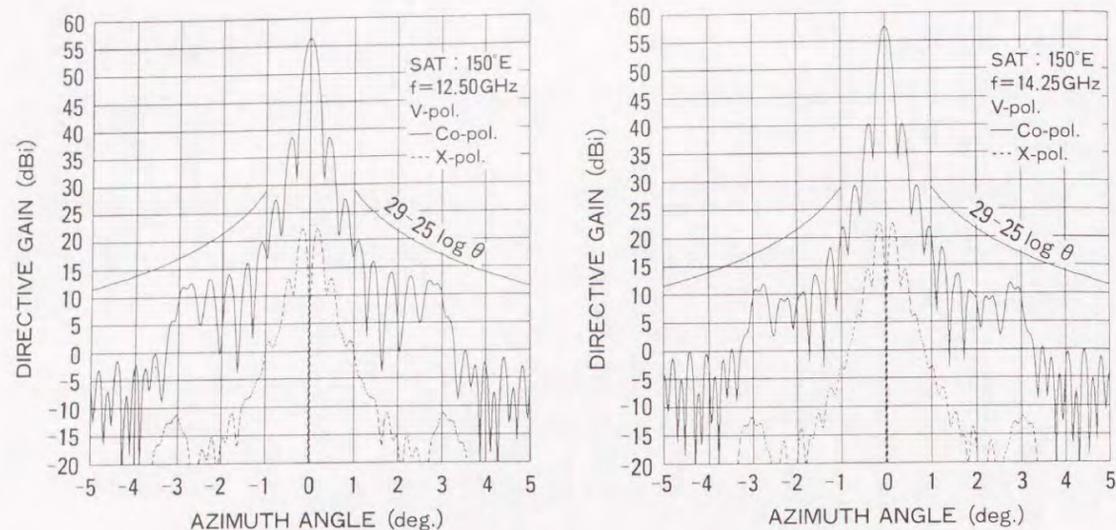
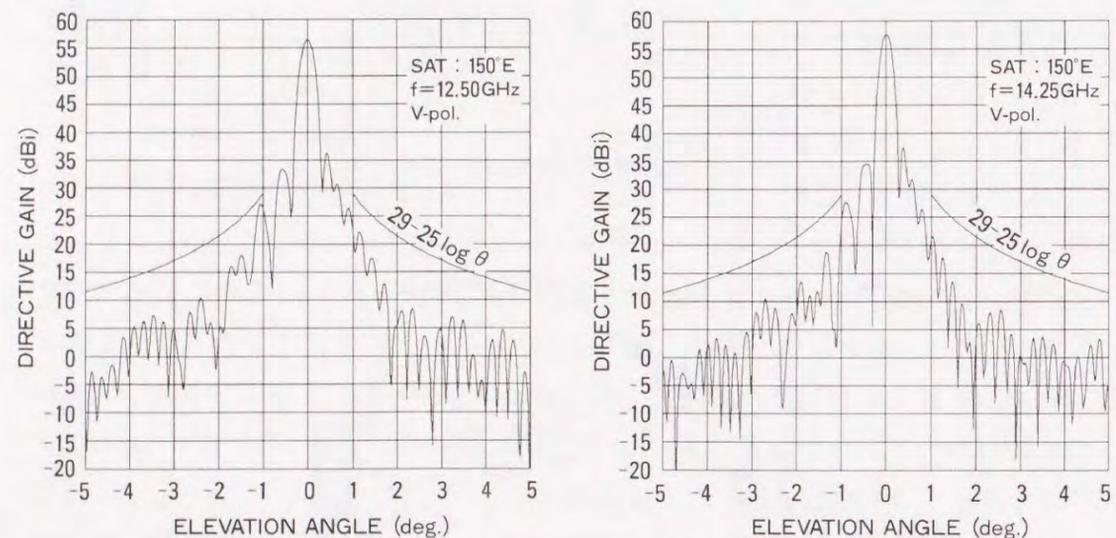


図4-3.17 給電部単体の垂直面内放射パターン(正偏波)

次に、 $150^\circ$  E衛星向き(基準)ビームの水平面内及び垂直面内の計算パターンを図4-3.18及び図4-3.19に示す。近軸サイドローブ包絡線は $29 - 25 \log \theta$  (dBi)以下であり、また、隣接衛星(静止衛星軌道上の経度で分離角 $4^\circ$ , 地球局から見た分離角で約 $4.5^\circ$ )方向へのサイドローブはそれよりもさらに10 dB以上低く抑えられている。

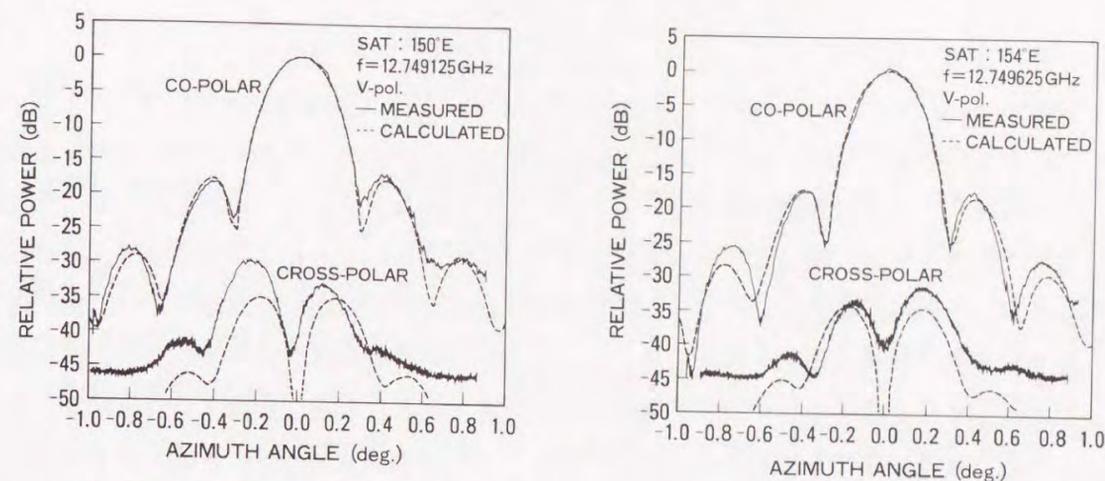


(a) 受信周波数帯 (b) 送信周波数帯  
図4-3.18 基準ビームの水平面内近軸放射パターン計算値



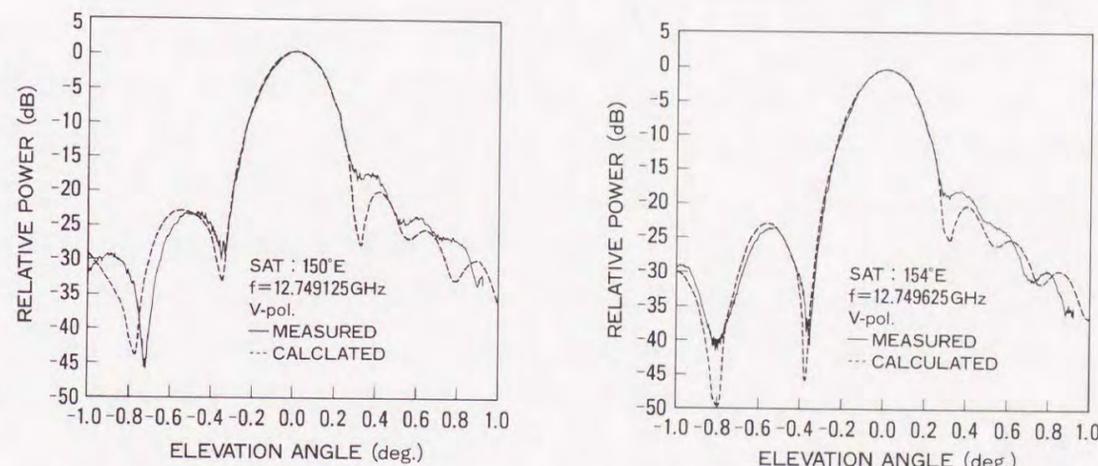
(a) 受信周波数帯 (b) 送信周波数帯  
図4-3.19 基準ビームの垂直面内近軸放射パターン計算値

図4-3.20及び図4-3.21はそれぞれ水平面内及び垂直面内の近軸放射パターンを実測値と計算値を比較して示している。これら放射パターンの実測値は、150° E及び154° EにあるJCSAT-1及びJCSAT-2衛星から送信されているビーコン波を給電部を動かしながら受信して取得したもので、給電部の変位量(長さ)をビーム方向の角度に換算してプロットしている。従って、実測値は厳密にはビーム偏向パターンを表したものであるが、この測定範囲(±1°)内ではビーム偏向パターンは、放射指向



(a) 150° E衛星向ビーム (b) 154° E衛星向ビーム

図4-3.20 水平面内近軸放射パターン実測値



(a) 150° E衛星向ビーム (b) 154° E衛星向ビーム

図4-3.21 垂直面内近軸放射パターン実測値

パターンと見なせることを計算により確認している。(実際、図4-3.20及び図4-3.21に破線で描かれている計算値は放射指向パターンである。) 雑音温度約150 Kの低雑音増幅器を使用し帯域幅を300 kHz程度にまで絞って検波した結果、ダイナミックレンジは約47 dBを確保しており、交差偏波パターンも取得できた。実測値はいずれも計算値に良く一致しており、アンテナ設計並びに製作の妥当性、有効性を立証している。尚、隣接衛星からのビーコン波を受信することによって約4.5°離れたサイドロープレベルの測定を試みたが、結果は雑音レベル(ダイナミックレンジ)以下であり、低サイドローブ特性が達成されていることを裏付けている。

4-3.5 まとめ

オフセット球面鏡アンテナにより高性能なKu帯4ビーム地球局アンテナを実現した。このアンテナは反射鏡エッジが対称で鏡面の曲率半径が一定の大きな主反射鏡を地上に固定設置し、主反射鏡開口をブロックしないようなオフセット配置された複数の給電部によりそれぞれ独立なペンシルビームを合成するものである。給電部には、球面収差の消去と開口面電力密度分布の制御並びに交差偏波特性の向上のために2枚の鏡面修整された反射鏡系が用いられており、このアンテナの実現にはこれら2枚の反射鏡の鏡面設計がキー技術となっている。球面の対称性を如何無く活用し給電系の斜交配置によるコニカル走査を巧みに利用することにより、高性能なシングルビームアンテナに遜色のない性能を有するマルチビームアンテナが実現できた。

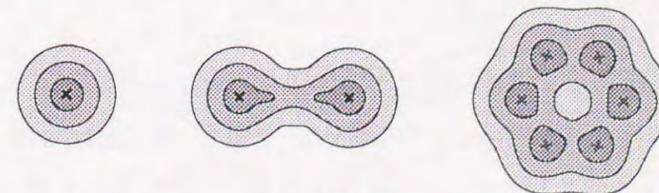
本マルチビーム地球局アンテナは、その第1号の商用機が大阪テレポートにおいて実用されており、各地のテレポート計画に反映されるものと期待されている。

4-4 マルチスポットビーム用多焦点アンテナ

4-4.1 まえがき

近年衛星通信需要の増加に伴って、衛星搭載用アンテナも益々性能の高いものが要求されるようになってきており、なかでも高性能マルチスポットビームアンテナの実現は、限られた周波数の有効利用な地球局の小形化などの効果が極めて大きいため、実用化を目指した研究開発が各方面で活発に行われている。マルチスポットビームアンテナをパラボラ反射鏡をクラスタ（一次放射器アレイ）で構成する場合には、焦点から偏移させて給電するビームに対しては、開口面における位相誤差（収差）による放射特性の劣化が問題となる。従って、偏移給電時にも放射特性の劣化の小さい鏡面系を設計することがマルチビームアンテナの開発の重要な技術課題の1つになっている。

回転2次曲面系で構成されたオフセットカセグレンアンテナに関しては、与えられた鏡面系に対し最適な偏移給電位置を求める方法<sup>[4-4.1]</sup>や、ビーム偏向特性に優れた鏡面配置についての研究<sup>[4-4.2]</sup>等がなされている。一方、鏡面修整アンテナとしては、収差を低減したアンテナ<sup>[4-4.3]</sup>や2つのビーム方向について収差が全く無い双焦点アンテナ<sup>[4-4.4]</sup>が考案されている。双焦点アンテナでは、その2つのビーム方向を含む面内においてビーム偏向特性の優れていることが明かとなっている。さらに、この双焦点アンテナの考え方を発展させ、複数ビーム方向に対して収差の無い多焦点アンテナを構成できれば広い視野（field-of-view）をカバーするマルチビームアンテナに適用できると考えられる。図4-4.1はパラボラアンテナ、双焦点アンテナ、及び、多焦点アンテナの2次元角度空間におけるビーム偏向特性（ビーム偏向角と利得との関係）を模式的に比較して示したものである。実際には、鏡面の自由度の制限から限られた鏡面の数で収差の全く無い焦点を多数形成することはできない。しかし、収差を最小化することによって実質的に多焦点とみなせる鏡面系を得たならば、マルチビームアンテナとして有効であると考えられる<sup>[4-4.5]</sup>。



(a) 単焦点 (b) 双焦点 (c) 多焦点

図4-4.1 多焦点化によるビーム偏向特性の改善

そこでここでは、多焦点アンテナの鏡面設計法について検討し、位相分布のみならず振幅分布をも考慮して鏡面を最適化する方法を提案し、これに基づき設計されたアンテナの一構成例とその放射特性を示す。

4-4.2 基礎的考察<sup>[4-4.6]</sup>

波長に比べて開口径の十分大きいマルチビームアンテナの*i*番目ビーム ( $i=1, 2, \dots, N_b$   $N_b$ ; ビーム総数) の放射電界  $E_{pi}$  は開口面電界分布  $E_{ai}$  を用いて、近似的に次式で表すことができる。

$$E_{pi} = \int_{S_i} E_{ai} \exp[j(\Phi_i + \delta_i)] ds \quad (4-4.1)$$

ここで  $S_i$  は *i* 番目ビームに対応した開口面であって、ここでは、*i* 番目ビーム方向に垂直な平面上に主反射鏡を射影したものとす。また、 $\Phi_i$  は観測方向に関する位相差、 $\delta_i$  は開口面位相誤差である。

一般に、双反射鏡形式のマルチビームアンテナにおいて、給電点が焦点位置からずれた場合、給電点からでた電波は開口面上で位相誤差を生じる。さらに、給電点からでた電波を幾何光学的に見た場合、光線は必ずしも主反射鏡全体を照射せず、また一部は主反射鏡の周囲から漏れる(スピルオーバー)。これらは開口面電界振幅分布に大きく影響を及ぼし、放射特性を劣化させる要因になる。

開口面電界及び位相誤差はアンテナ鏡面構成によって決定され、独立には制御できない。即ち一方を良くすれば他方は一般に悪くなる。ちなみに双反射鏡形式の多焦点アンテナにおいて、主・副両反射鏡の形状及び給電点の位置を、 $N_b$  個のビーム方向に対する開口面上での位相誤差が最小となるように最適化した場合、位相誤差は十分に小さくなりえるが主反射鏡からのスピルオーバーが大きくなり、アンテナ放射特性としては結果的に最適なものとは言えないものとなる。

従って、より高性能なマルチビームアンテナを構成するに当たっては、 $N_b$  個の所望ビーム方向に対する開口面上で、電界の位相分布並びに振幅分布を互いに勘案しつつ最適なものを選ぶ必要がある。

図4-4.2はオフセット双反射鏡形式のマルチビームアンテナの概念図であり、同図では*i*番目のビーム(ビーム方向  $\Pi_i$ ) について給電点から波面上の点までの幾何光学的に追跡(レイトレース)して得た光線を併せて示している。即ち、波面上の標本点  $X_{Aij}$  は給電点  $X_{Fi}$  から中心光線より開き半角  $\theta_{ij}$  をもつ *j* 番目の光線を、副反射鏡

面上の反射点  $X_{Sij}$ 、主反射鏡面上の反射点  $X_{Mij}$  の順にスネルの反射の法則に従って追跡し、通路長  $K_i$

$$K_i = |X_{Fi} - X_{Sij}| + |X_{Sij} - X_{Mij}| + |X_{Mij} - X_{Aij}| \quad (4-4.2)$$

が一定となる条件から求めたものである。

図4-4.3は、上記波面上の写像  $\{X_{Aij}\}$  (実線) とビーム方向に垂直な開口面上に与えた所望の写像  $\{X_{Dij}\}$  (破線) とが一般には一致しない様子を示したものである。同図では、所望の写像  $\{X_{Dij}\}$  は一定の開き角  $\theta_{ij}$  に対する写像が同心円に描か

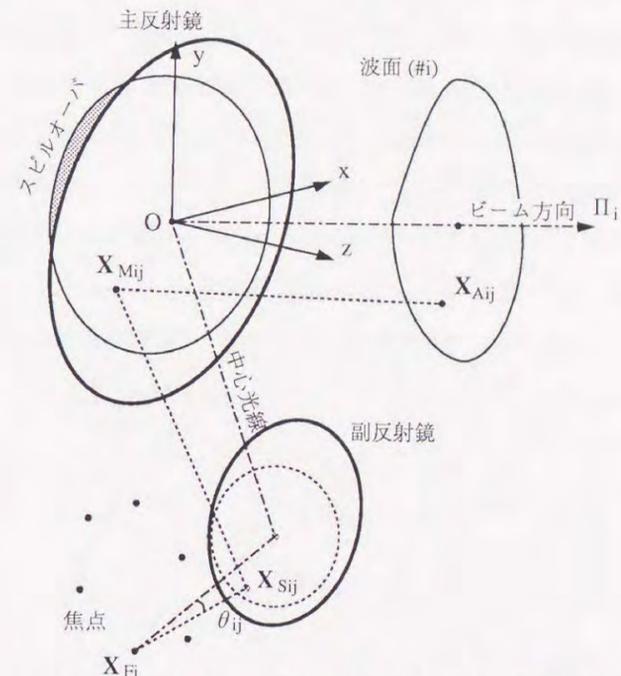


図4-4.2 マルチビーム双反射鏡アンテナ(後方給電型)

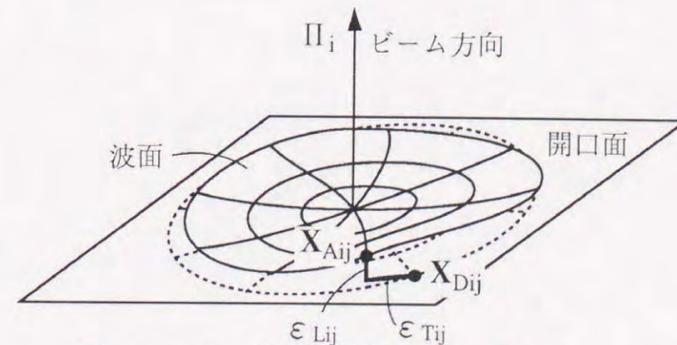


図4-4.3 開口面写像と  $\epsilon_{Lij}$  及び  $\epsilon_{Tij}$

れており、開口面写像が回転対称な理想的な場合を表している。

いま図4-4.3において、j番目の標本点に着目すると、点 $X_{Aij}$ と点 $X_{Dij}$ の差 $\epsilon_{ij}$ は、ビーム方向に添う成分 $\epsilon_{Lij}$ とこれに垂直な成分 $\epsilon_{Tij}$ とに分離して次式の様に表すことができる。

$$\epsilon_{ij} = X_{Aij} - X_{Dij} = \epsilon_{Lij} \Pi_i + \epsilon_{Tij} \Pi'_i \quad (4-4.3)$$

但し、 $\Pi'_i$ は $\Pi_i$ に垂直な単位ベクトルである。 $\epsilon_{Lij}$ は式(4-4.1)の位相誤差 $\delta_i$ に対応しており、また $\epsilon_{Tij}$ は主反射鏡からのスピルオーバーや開口面電界強度分布の非対称な歪みの量に対応している。 $\epsilon_{Tij}$ は正確には写像の位置誤差であるが、以下では、簡単のため振幅誤差と呼ぶことにする。但し、通常、所望の写像 $\{X_{Dij}\}$ は回転対称であり、反射鏡系によって生じるビーム方向 $\Pi_i$ 軸まわりの回転量については、放射特性の劣化には直接は結びつかないため、振幅誤差を評価する段階で予めこの回転量に関する成分を取り除いておく必要がある。

以上の考察から、高性能な多焦点アンテナは、 $\epsilon_{Lij}$ 及び $\epsilon_{Tij}$ の小さい鏡面系によって実現される。しかし、振幅誤差及び位相誤差の両方を零にすることはできず、残留誤差 $\epsilon_{Lij}$ 及び $\epsilon_{Tij}$ は仮に同じ量であってもアンテナ放射特性に及ぼす影響は異なる。

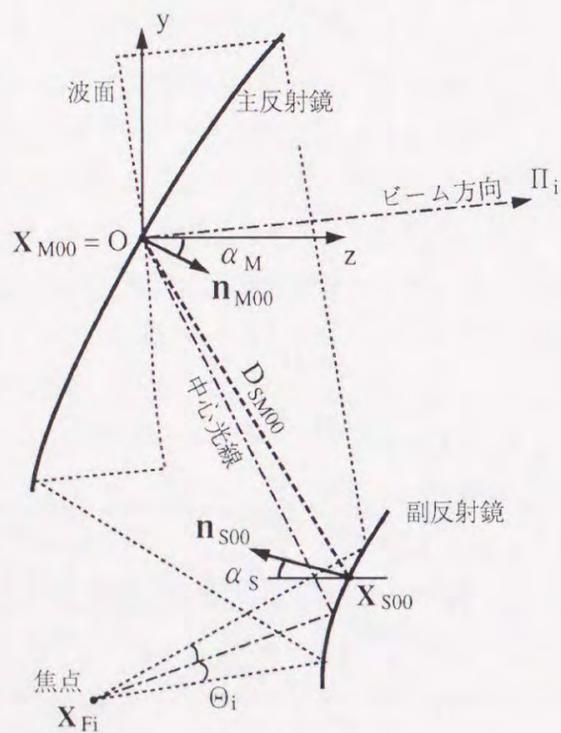


図4-4.4 双反射鏡アンテナ断面と座標系

そこで、 $\epsilon_{Lij}$ あるいは $|\epsilon_{ij}|$ を最小化するのではなく、振幅誤差 $\epsilon_{Tij}$ と位相誤差 $\epsilon_{Lij}$ の関数としての適切な目的関数を定義する必要がある。

#### 4-4.3 鏡面設計法<sup>[4-4.6]~[4-4.8]</sup>

ここでは前節の考えに基づくアンテナ設計法を具体的に示す。

図4-4.4はアンテナの断面図と座標系を示している。ここではシングルオフセット配置の鏡面系を考え、y-z面に関し対称であるものとする。従って、主・副反射鏡の中心点及びそれらの鏡面点における法線ベクトルはy-z面内に存在する。また、中心点における法線ベクトルが基準方向zとなす角の2倍、 $2\alpha_M$ 及び $2\alpha_S$ 、をそれぞれ主反射鏡及び副反射鏡のオフセット角と定義する。また主・副反射鏡の中心点間距離を $D_{SM0}$ とする。図4-4.5のように一次放射器の軸がz軸の正側を向いている場合を後方給電形式 (rear-fed type)、これに対し図4-4.5のように一次放射器の軸がz軸の負側を向いている場合を前方給電形式 (front-fed type)と呼ぶ。

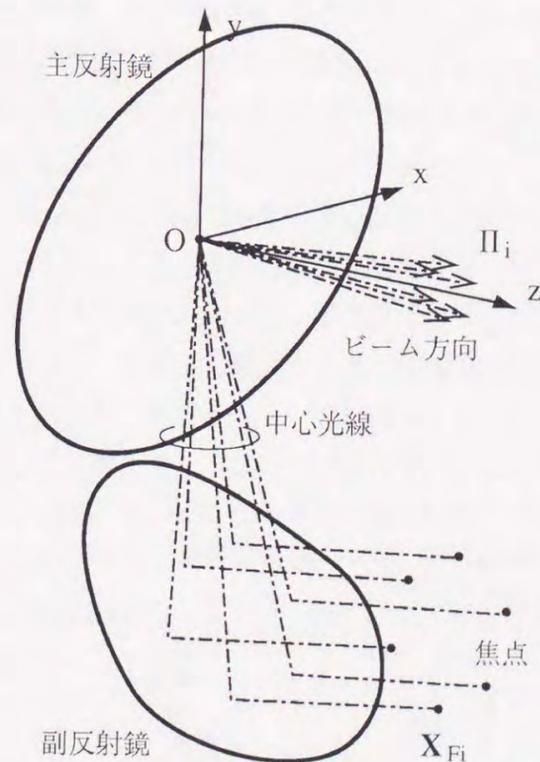


図4-4.5 前方給電型マルチビーム双反射鏡アンテナ

最適化の変数は主・副両反射鏡の鏡面形状であり、鏡面を有限個の変数で表現するには色々な手法が考えられる。ここでは初期曲面  $z_0$  に修正項  $z_c$  が付加されたもので表現する。

$$z = z(\rho, \psi) = z_0(\rho, \psi) + z_c(\rho, \psi) \quad (4-4.4)$$

具体的には主反射鏡では初期曲面を回転放物面（パラボラ）とし、修正項を次のような展開関数を用いて表現する。

$$z_c(\rho, \psi) = \sum_{m=1}^{N_\psi} \sum_{n=1}^{N_\rho} C_{Mmn} \rho^{n+1} \begin{cases} \cos(m-1)\psi \\ \sin(m-1)\psi \end{cases}, \begin{cases} m; \text{odd} \\ m; \text{even} \end{cases} \quad (4-4.5)$$

ここで  $\{C_{Mmn}\}$  は最適化の変数となる展開係数（未知数）であり、 $(\rho, \psi)$  は円筒座標系である。上式では主反射鏡中心点 ( $\rho=0$ ) における修正項  $z_c$  の値は、微係数まで含めて零であるので、中心点の座標及び中心点における法線は不変となっている。また、副反射鏡は、初期曲面を中心点を通りその法線をとするような平面（または主反射鏡との組み合わせでカセグレン反射鏡系を構成するような回転双曲面）とし、修正項については、主反射鏡と同様、式 (4-4.5) に類似した形とする。但し座標系は副反射鏡中心点を原点とし、その法線方向を  $z$  軸とする局所的なものを用いる。

さて、各ビームに対する最適な給電点  $X_{Fi}$  は、それ自身も最適化の対象となるものである。ここでは、幾何光学に基づく検討であることから、これを次のように決定するのが妥当である。即ち、 $i$  番目のビームに関しその中心光線について受信モードでのレイトレースを行い、開口面からの通路長が  $K_i$  となる点を給電点とする。（このように給電点位置を与えると、中心光線は必ず開口面の中央に写像され、最適化の過程で主反射鏡照射領域が大きく位置ずれをおこすのを未然に防ぐことになる。）従って、給電点  $X_{Fi}$  は、主・副反射鏡間距離  $D_{SM0}$ 、副反射鏡面形状  $\{C_{Smn}\}$ 、通路長  $K_i$  に依存して変化する。

表4-4.1 双反射鏡形式多焦点アンテナの設計パラメータ

$N_b$	焦点数
$\Pi_i$	ビーム放射方向ベクトル ( $i=1, 2, \dots, N_b$ )
$K_i$	焦点から開口面までの行路長 ( $i=1, 2, \dots, N_b$ )
$\alpha_M$	主反射鏡オフセット角 (半値)
$\alpha_S$	副反射鏡オフセット角 (半値)
$D_{SM0}$	主・副反射鏡中心点間距離
$C_{Mmn}$	主反射鏡展開係数 ( $m=1, 2, \dots, N_{M\psi}$ ; $n=1, 2, \dots, N_{M\rho}$ )
$C_{Smn}$	副反射鏡展開係数 ( $m=1, 2, \dots, N_{S\psi}$ ; $n=1, 2, \dots, N_{S\rho}$ )

以上述べたアンテナ鏡面系を記述するパラメータをまとめると表4-4.1のようになる。これらのパラメータを与えると鏡面系が定まる。なお、図4-4.2に示されるように開口面写像の評価に当たって給電点から送信モードでレイトレースする光線の範囲を、中心光線からの開き半角  $\theta_i$  で表す。この  $\theta_i$  の値は、使用する一次放射器（例えばホーンアンテナ）の諸元（ビーム幅やサイズ）から決められるものである。一般に、衛星搭載用マルチ/成形ビーム反射鏡アンテナの一次放射器には、複数の小口径ホーンを密に配置して構成されたクラスタアレイが用いられ、ホーンの口径はアレイの励振係数と共に、サービスエリア内での利得や利得偏差、ビーム弁別度などのアンテナ放射特性を決定する重要なパラメータの1つである。例えば、サービスエリア内での利得偏差を小さく抑えるには、隣接する素ビーム間のクロスオーバーレベルを高く維持する必要がある。小さな口径のホーンを用いて隣合う給電ホーンの配置間隔を小さくしなければならない。（小さな口径のホーンを用いると、1つの給電ホーンで励振したときのエッジ照射レベルは高くなり、スピルオーバー成分が増加し、またサイドローブレベルが上昇することになるため、これを改善するために結果としてクラスタ給電が必要になる。）通常、隣接素ビーム間のクロスオーバーレベルとエッジ照射レベルとはほぼ一致する。

最小化の目的関数は前節での基本的考え方を踏まえ、まず、各標本点での誤差  $\epsilon_{ij}$  を位相誤差  $\epsilon_{Lij}$  及び振幅誤差  $\epsilon_{Tij}$  の荷重和として次式で定義した。

$$\epsilon_{ij} = \epsilon_{Lij} + w \epsilon_{Tij} \quad (4-4.6)$$

ここで重み  $w$  の選び方としては、例えば、開口面上に位相誤差のみがある場合の利得低下量と主反射鏡の照射領域がずれることによる利得低下量とが等しくなるとの比などを目安に決定すればよい。この場合、 $w$  は開口径対波長比 ( $D/\lambda$ ) に依存する。つぎにビーム毎の誤差の代表値としては、各標本点における誤差の実効値 (r.m.s. 値) をとり、そして、鏡面系全体としての代表値としては各ビームに対する誤差の最大値 (最悪値) をとる。つまり多焦点アンテナとしての最適化の目的関数  $\epsilon$  は、

$$\epsilon = \max_i \left[ \text{rms} \left[ \epsilon_{ij} \right] \right] \quad (4-4.7)$$

で定義される。

鏡面系の最適化の過程では、表4-4.1に列挙した全てのパラメータを変数に選ぶことができる。

#### 4-4.4 シミュレーション結果 [4-4.6] ~ [4-4.8]

次に、将来のインテルサット衛星への搭載を想定したマルチスポットビームアンテナの基礎検討結果を示す。目標としては、静止衛星軌道位置から見た地球（視直径で約1

7°) を、ビーム幅0.5° 程度のスポットビーム (利得約50 dBi) で面的に覆い尽くすことのできるマルチビームアンテナを双反射鏡アンテナで実現しようとするものである。

焦点の数とこれに対応したビーム方向は、図4-4.6に示すように静止軌道から地球をみた輪郭の円にはほぼ内接する六角形の頂点とする。これは、衛星から地表までの伝搬路長差から衛星の直下点よりも (衛星仰角の低くなる) 周辺部の方向に対する利得を高くした方が地球局の受信レベルが均等に近くなるからである。(自由空間伝搬損失による分だけで約1.3 dB程度の差。現実のシステム設計上では降雨減衰マージンの差などがさらに加わる。) 焦点の数としては6個としているが、鏡面系の対称性からそのうち独立なものは3個である。

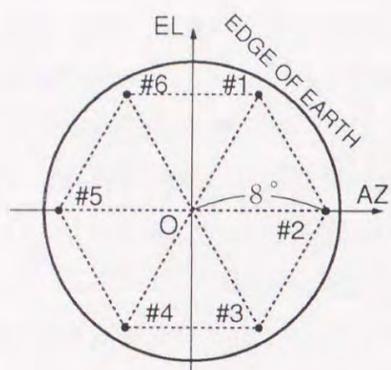


図4-4.6 静止衛星搭載アンテナを想定した6つの焦点

表4-4.2 基礎検討に用いたパラメータ

$N_b$	6 (対称性より独立なのは3つ)
$\Pi_i$	$(Az, El) = (4^\circ, 4\sqrt{3}^\circ)^{i=1}, (8^\circ, 0^\circ)^{i=2},$ $(4^\circ, -4\sqrt{3}^\circ)^{i=3}, (-4^\circ, -4\sqrt{3}^\circ)^{i=4},$ $(-8^\circ, 0^\circ)^{i=5}, (-4^\circ, 4\sqrt{3}^\circ)^{i=6}$
$\alpha_M$	40°
$\alpha_S$	130°
$\Theta_i$	20° ( $i=1, 2, \dots, N_b$ )
$w$	$10^{-4}$
$N_{M\psi}$	7
$N_{Mp}$	3
$N_{S\psi}$	7
$N_{Sp}$	3

表4-4.2は基礎検討に用いた設計パラメータをまとめたものである。ここでは鏡面配置を決定するオフセット角を固定とし、鏡面系の配置としては図4-4.5に示される前方給電型とした。目的関数の定義式(4-4.6)の重みwについて、ここでは $10^{-4}$ としている。この値は、ビーム幅0.5°を実現する開口径対波長比として $D/\lambda = 140$ を想定し、振幅誤差による利得低下と位相誤差によるそれとが同等程度となるような重みづけをした結果であり図4-4.7から読み取ることができる。表4-4.3は表4-4.2に基づいて最適化を行った場合の残留誤差結果を示すものである。ここで、比較のために、重みwを零として、位相誤差のみに着目した従来の考え方に基づく結果をCase Iで示した。さらに鏡面修整をせずに、単に給電点位置のみを最適化した場合の結果として、副反射鏡が平面の場合、及び双曲面の場合をそれぞれCase II及び

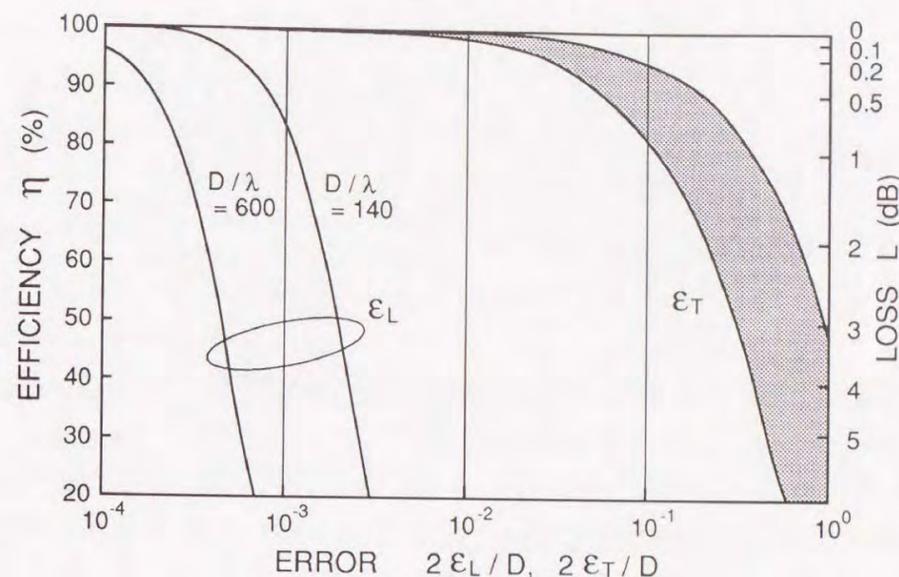


図4-4.7  $\epsilon_L$ と $\epsilon_T$ の利得低下に及ぼす影響の違い

Case IIIで示した。Case IIは本手法における初期曲面系である。表4-4.3より、本手法による結果は、振幅誤差に関しては最適化の前 (Case II) に比較してやや大きくなっているものの、位相誤差は $1/6 \sim 1/7$ 程度に減少しており、かつカセグレン系の場合 (Case III) と比較しても約 $1/2$ に減少している。また、振幅誤差を全く評価しないで位相誤差のみに着目した場合 (Case I) は、位相誤差については確かにより小さくなるものの、振幅誤差が約 $0.3D$  ( $D$ は開口径) と極端に大きくなってしまふことが分かる。この場合に得られる#1ビームの開口面写像を本手法による結果と比較したのが

表4-4.3 最適化による残留誤差の低減

構成	鏡面修整	ビーム番号	位相誤差 $\epsilon_L/D$	振幅誤差 $\epsilon_T/D$	写像の回転角
本手法	あり ( $w=10^{-4}$ )	#1, 6	$0.79 \times 10^{-3}$	0.062	-2.35°
		#2, 5	$0.58 \times 10^{-3}$	0.076	-5.92°
		#3, 4	$0.60 \times 10^{-3}$	0.085	-3.94°
Case I	あり ( $w=0$ )	#1, 6	$0.34 \times 10^{-3}$	0.318	-8.48°
		#2, 5	$0.21 \times 10^{-3}$	0.297	-22.4°
		#3, 4	$0.16 \times 10^{-3}$	0.326	-18.2°
Case II	なし 主: 放物面 副: 平面	#1, 6	$4.70 \times 10^{-3}$	0.066	-0.11°
		#2, 5	$4.40 \times 10^{-3}$	0.055	-0.19°
		#3, 4	$3.55 \times 10^{-3}$	0.054	-0.07°
Case III	なし 主: 放物面 副: 双曲面	#1, 6	$1.44 \times 10^{-3}$	0.055	-2.59°
		#2, 5	$1.29 \times 10^{-3}$	0.052	-6.17°
		#3, 4	$1.27 \times 10^{-3}$	0.078	-3.95°

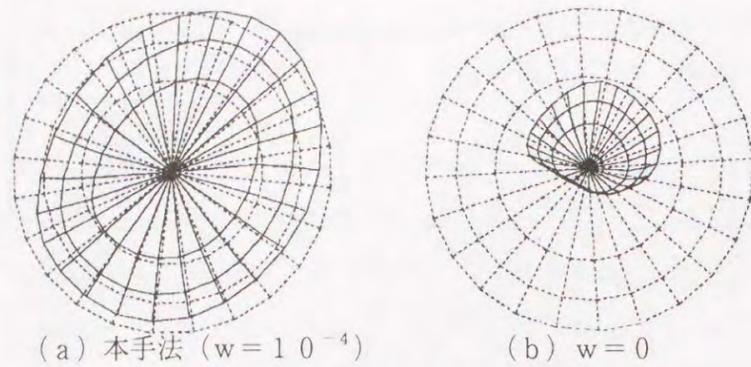


図4-4.8 得られた開口面写像

図4-4.8であり、Case Iでは所望の開口面写像から大きく歪んでおり、さらに詳細にみると像が一部折り重なっており、アンテナの開口面分布として不適当なものとなっていることが分かる。

次に、鏡面の基本配置として前方給電型の場合と、後方給電型の場合とを比較検討した結果を表4-4.4に示す。ここでは、表4-4.3の結果を考慮し、最適化の初期曲面としては副反射鏡に平面ではなく、双曲面を用いている。結果は、本手法による鏡面修整の結果、何れの鏡面配置でも振幅誤差を大きく増加させることなく位相誤差を1/3~1/4に減少させることができることを示している。また、前方給電型と後方給電型とは、本質的に前方給電の方が誤差がかなり小さくマルチビーム化に適していること、そしてその差は鏡面修整を施しても明らかに存在すること、鏡面修整した後方給電型が鏡面修整を施す前の前方給電型と位相誤差の点で同等であること、が分かった。鏡面修整の結果、得られた残留位相誤差をビーム幅0.5°のスポットビームを実現するD/λ=140のアンテナにあてはめると、後方給電型が約λ/5(利得低下で約8dB)、前方給電型が約λ/20(利得低下で約0.5dB)となり、後者であればビーム幅0.5°からのマルチスポットビームアンテナが構成できることが明かとなった。

表4-4.4 後方給電型と前方給電型の比較

構成	ビーム番号	位相誤差 (修整前→後) ε L/D	振幅誤差 (修整前→後) ε T/D
後方給電	#1,6	4.13×10 <sup>-3</sup> → 1.60×10 <sup>-3</sup>	0.239 → 0.201
	#2,5	3.55×10 <sup>-3</sup> → 1.60×10 <sup>-3</sup>	0.230 → 0.208
	#3,4	4.13×10 <sup>-3</sup> → 1.60×10 <sup>-3</sup>	0.195 → 0.208
前方給電	#1,6	1.56×10 <sup>-3</sup> → 0.39×10 <sup>-3</sup>	0.066 → 0.066
	#2,5	1.56×10 <sup>-3</sup> → 0.38×10 <sup>-3</sup>	0.090 → 0.061
	#3,4	1.56×10 <sup>-3</sup> → 0.39×10 <sup>-3</sup>	0.096 → 0.070

(w = 10<sup>-4</sup>)

4-4.5 試作アンテナとその放射特性 [4-4.9], [4-4.10]

4-4.5.1 アンテナ諸元

前節の結果を受けて、ビーム幅0.5°のマルチスポットビームアンテナ試作機の設計を行った。試作機は5.2GHzを用いて評価実験することを前提に開口径800mmのスケールモデルとした。これは現在、インテルサット衛星系で使用されているCバンド(6/4GHz帯)に対してはほぼ10倍、Kuバンド(14/11GHz帯)に対してはほぼ4倍の周波数である。

ここでの設計は、基本的には前節と同じ手法であるが、クラスタ給電化への適応性から6つの焦点は1つの平面上に位置するように拘束を付与すると共に、鏡面のオフセット

表4-4.5 試作アンテナの鏡面系の諸元

主反射鏡 :	
開口径	800mm
周囲形状	楕円形
鏡面寸法	800mm×1074mm
オフセット角	42°
鏡面精度	0.015mm (r.m.s.)
副反射鏡 :	
周囲形状	卵形
鏡面寸法	800mm×1000mm
オフセット角	40°
鏡面精度	0.020mm (r.m.s.)

(試験周波数: 5.2GHz)

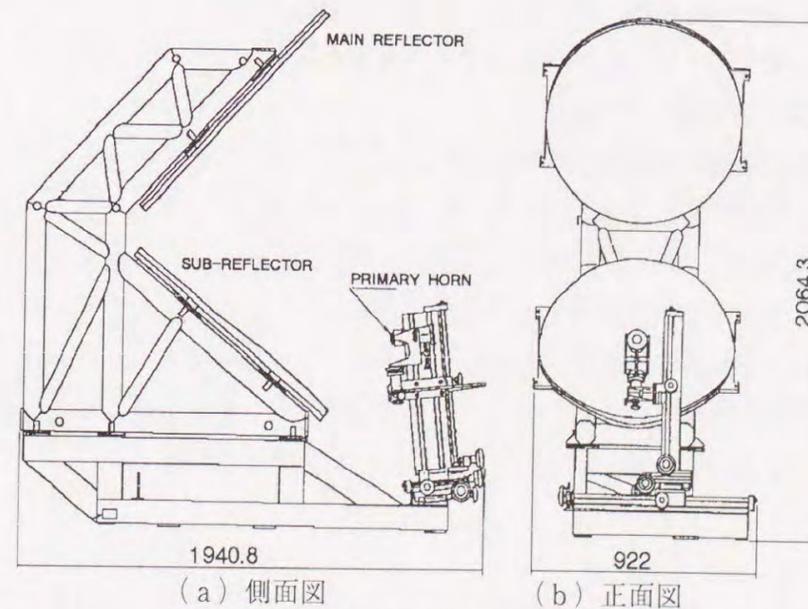


図4-4.9 試作アンテナの構成

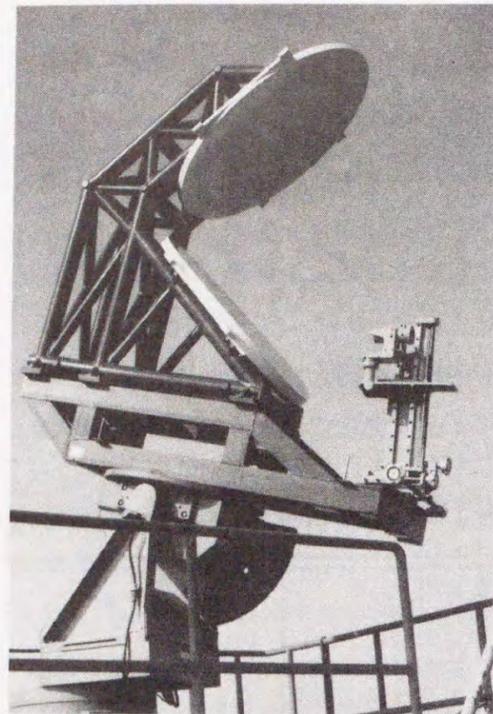


図4-4.10 試作アンテナ

ト角  $\alpha_M$  及び  $\alpha_S$  についてはブロッキングを生じさせない範囲で変化させ、目的関数の最小化を図った。最適化の結果得られた鏡面系及び試作機の諸元を表4-4.5に示す。また、試作アンテナの鏡面寸法を図4-4.9にまた外観を図4-4.10に示す。

#### 4-4.5.2 評価用一次放射器

次に試作した鏡面系の性能を明らかにするために、単一の給電ホーンをその軸を垂直に保ったまま焦点面(平面)内で偏位させ、放射特性を評価した。給電ホーンとしては、表4-4.6に示すように、素ビームの形成に適切な隣接素ビーム間クロスオーバーレベルが約-3 dBとなる小口径のものほかに、クラスタ給電を模擬したやや口径の大きいもの、合わせて3種類を用意して評価した。ホーンの形式としては、鏡面系で発生する交差偏波成分の評価を行う目的から、ホーン単体として交差偏波特性に優れたコルゲート円錐ホーンを設計・製作した。

#### 4-4.5.3 ビーム偏向角

図4-4.11は、ビーム偏向角度とそれに必要な給電ホーンの偏位量との関係(給

表4-4.6 一次放射器(コルゲート円錐ホーン)の諸元

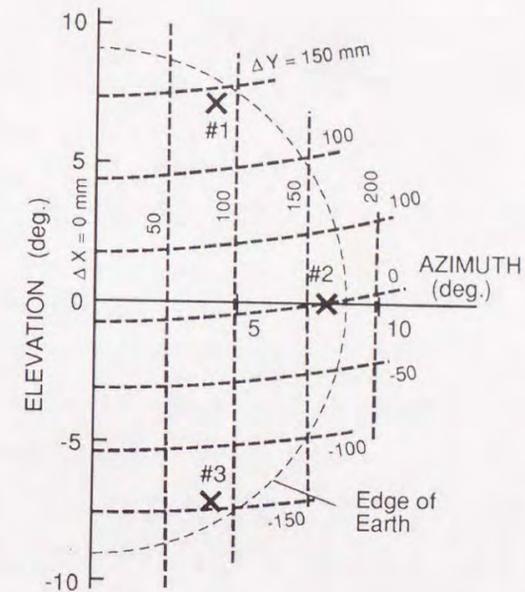
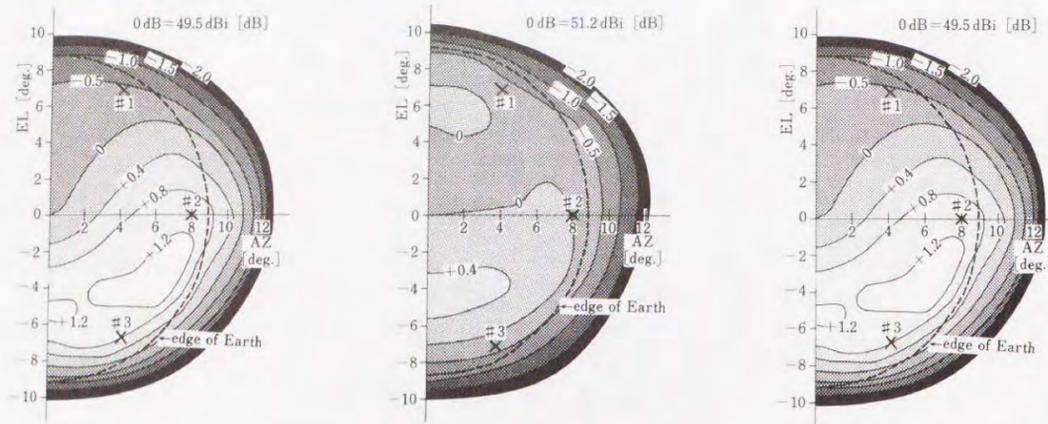


図4-4.11 給電点位置のビーム偏向角度空間への写像

電ホーン位置とビーム放射角度との写像)とをプロットしたものである。オフセットアンテナでは一般に、構造の非対称性によりこの写像が歪み、等間隔配置のクラスタアレーに対しビームクロスオーバーレベルあるいはビーム幅の不揃いといった不都合が生じる可能性がある。しかし図4-4.12で分かるとおり本試作機ではその歪みが通常のオフセットアンテナのそれに比較してかなり改善されている。これは、前方給電型のもつ性質に加え、鏡面修整の際に、6つの焦点に対応したビーム方向と給電点位置とを正六角形の頂点上に拘束した効果である。

#### 4-4.5.4 利得

次に図4-4.12は、アンテナ正面方向(+z軸方向)の利得を基準(0 dB)として、ビームをサービスエリア内に2次元(面的)に偏向させた場合のピーク利得の実



(a)ホーンA (小口径) (b)ホーンB (中口径) (c)ホーンC (大口径)

図4-4.12 ビーム偏向特性

測値を、表4-4.7に示される3種のホーンについて等レベル線図で示したものである。アンテナ正面方向での絶対利得(及び開口能率)についても図中に示した。いずれの場合においても、鏡面修整による多焦点化の結果、等レベル線がサービスエリア周辺部での利得低下を補償するように、多峰状あるいは円環状に成形されている。サービスエリア内における利得偏差はピークピーク値で、給電ホーンA、B及びCを用いた場合に対し、それぞれ2.4 dB、1.6 dB及び1.4 dBであり、ビーム幅(0.5°)の36倍にもおよぶ大きなビーム偏向に拘わらず小さな値になっている。

ここで、評価に用いた給電ホーンの開口径が小さいほど、下向き(EL<0)ビームと上向きビーム(EL>0)との利得偏差が大きく現われているが、これは、主反射鏡エッジ照射レベルが高いほど、ビーム放射方向に垂直な開口面に投影した主反射鏡開口面積の仰角(EL)の違いによる差が陽に現われてくるからである。ちなみに、EL=-8°方向からみた主反射鏡開口面積は、EL=+8°方向からみたそれよりも約1 dBほど大きい。本試作機的设计に当たっては、この投影された実効開口面積のビーム方向による変化量を考慮していないが、これを鏡面設計の段階で補正係数として反映させることも十分可能であった。しかし、クラスタ給電によって整った放射パターンを合成するのに必要な素ビームとしては、高利得であると共に低サイドローブであることも重要な要件であり、口径の大きいホーンB及びCを用いて評価した結果を見るかぎり、本試作アンテナでは、ビームの上下方向の違いによる利得差は問題とならないレベルであると結論できる。

4-4.5.5 放射パターン

図4-4.13及び図4-4.14は、水平面内及び垂直面内でビームを変位させた場合の近軸放射パターンの変化の様子をそれぞれ示したものである。ここで測定に用いた一次放射器は開口径の小さいホーンAである。これらの図よりビーム偏向角が大きくなるにつれ、鏡面エッジ照射レベルの増加とコマ収差の増大のために、主ビームに関してアンテナ正面方向(AZ=EL=0)側にある第一サイドローブが次第に高くなること分かる。このサイドローブは使用ホーンの開口が大きいほどエッジ照射レベルが減少するので、低減される。尚、図4-4.13及び図4-4.14に示される破線は、試作アンテナの鏡面系を最良近似(best-fit)する回転2次曲面系からなる未修整の前方給電型オフセットカセグレンアンテナのピーク利得の包絡線を計算により求めた結果を示している。図4-4.13より、試作アンテナにおけるピーク利得はビーム#2方向(焦

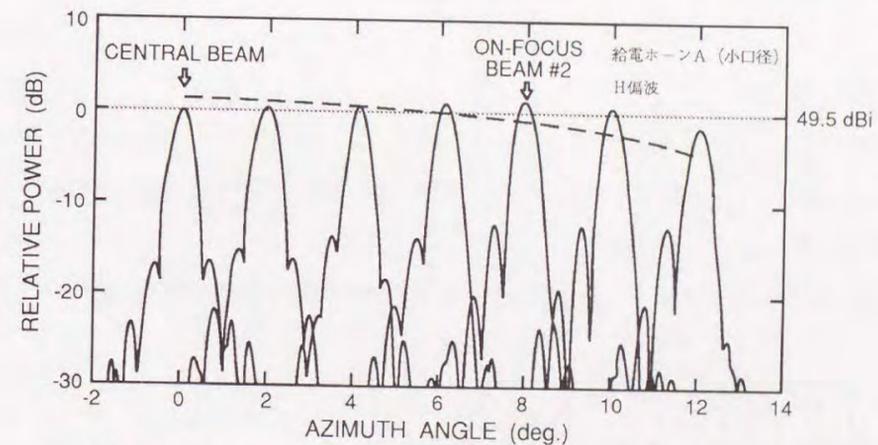


図4-4.13 ビーム偏向による水平面内パターンの変化

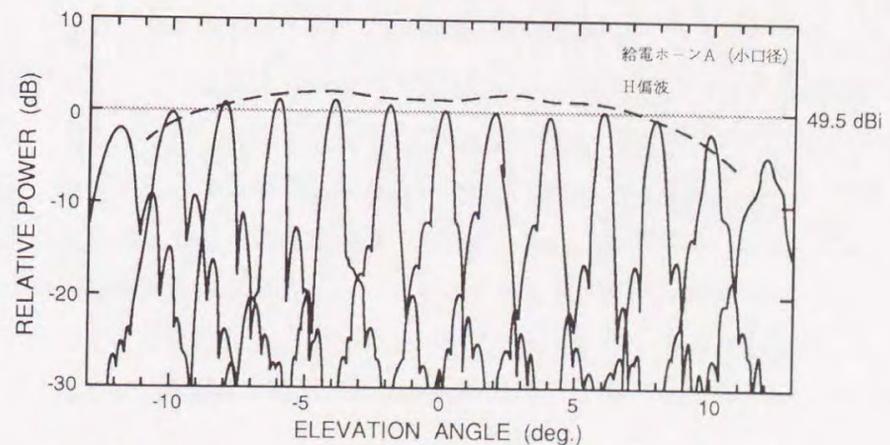


図4-4.14 ビーム偏向による垂直面内パターンの変化

点位置)で最高となっていることが分かる。これに対し図4-4.14に示される様に、垂直面内には焦点を配置していないため、この面内での利得は水平面内に比べると利得が低い。何れにせよ、多焦点化により、AZ面内及びEL面内の両方で、利得偏差が低減されていることが明かである。

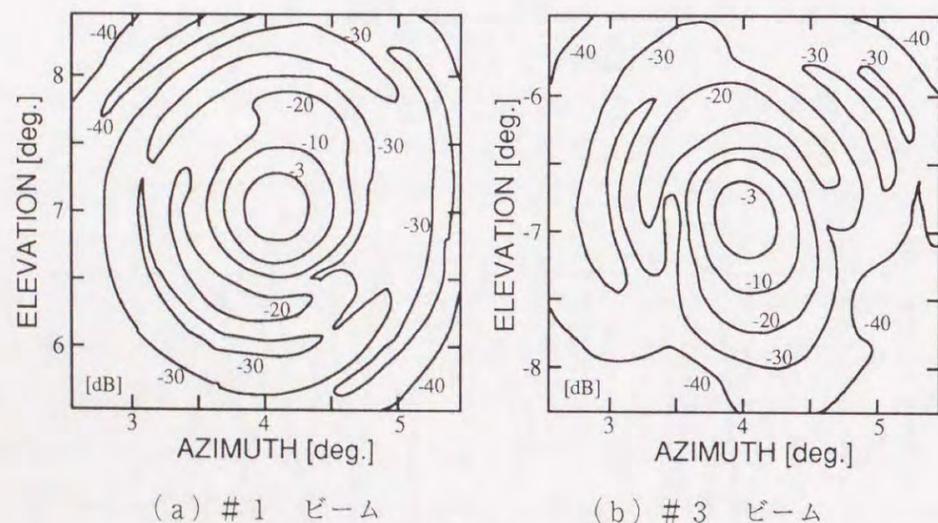
図4-4.15は、斜め方向ビーム(#1及び#3)の近軸放射パターンを等レベル線図で描いたもので、特定方向にやや高いサイドローブの生じていることが分かる。しかし、ビーム弁別度の目安となる-30 dBの等レベル線の拡がり、ビーム中心から半径約「3×ビーム半値幅」の範囲以内にある。

図4-4.16には、主ビーム方向をAZ=0, 6, 8, 10°と偏向させた場合の交差偏波レベルを示している。交差偏波レベルは偏向角の増加につれて、次第に高くなっているが、そのピークレベルはアンテナ視野内で-30 dB以下と良好な値となっている。ビームを他の面内で偏向してもほぼ同様の性能が得られている。

#### 4-4.6 まとめ

4-4章では、衛星搭載用マルチスポットビームアンテナへの適用を想定して、2次元的に広がった、ビーム幅に比較して広い視野内に多数のビームを放射することのできる双反射鏡型多焦点アンテナについて検討した。

所望の開口面写像とレイトレースによって得られる実際の開口面写像との誤差を、振



(a) #1 ビーム (b) #3 ビーム

図4-4.15 斜め方向ビームの等レベル線図

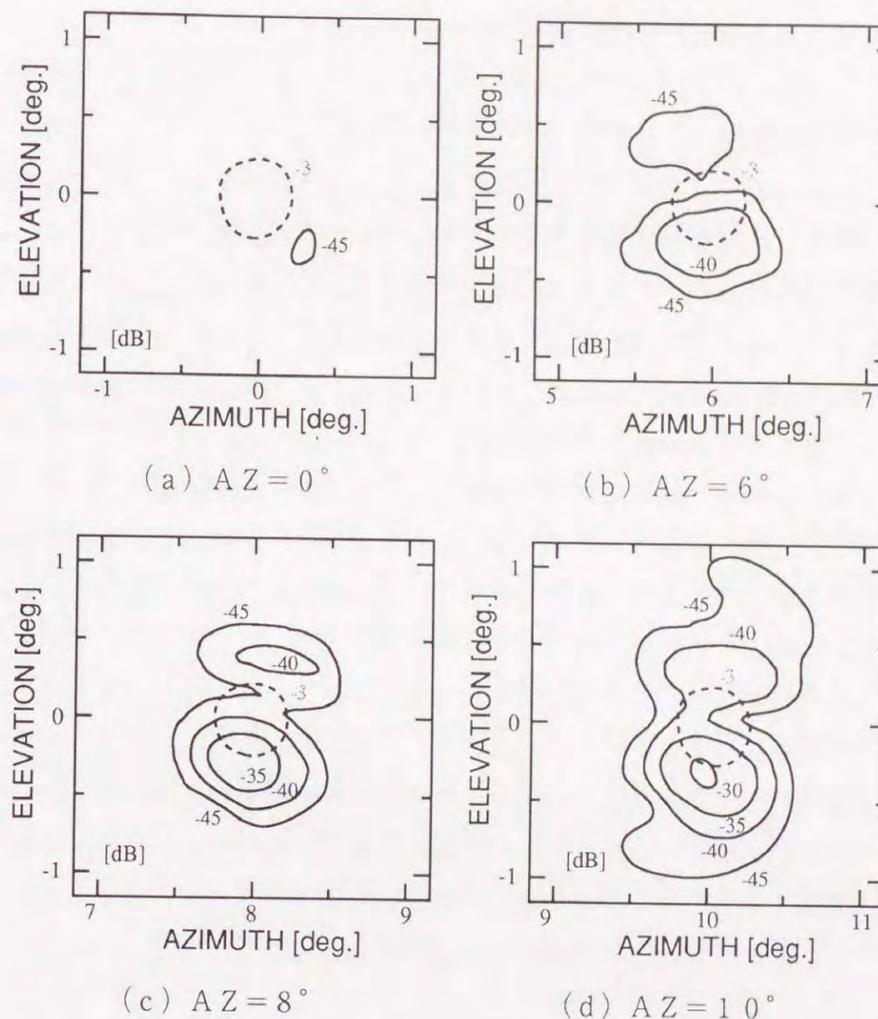


図4-4.16 ビーム偏向による交差偏波レベルの変化

幅と位相の2つの成分に一旦分離し、開口径対波長比で決まる重み付けを付けた両者の荷重和を評価し、これを最小化の目的関数として鏡面系を最適設計する基本的考え方を提案した。そして、この考え方に基づいて鏡面設計及び放射特性のシミュレーション計算を行い、鏡面修整により振幅誤差を劣化させることなく、複数のビーム方向で収差を低減した多焦点アンテナが構成できることを示した。

次に、開口径約140λ(波長)、ビーム幅約0.5°のスポットビームを放射する6焦点アンテナを試作した。アンテナは、視直径約18°(36ビーム幅)の円形状視野内を2 dB程度の小さい利得偏差で照射することができることを示し、鏡面設計の妥当性を明かした。

### 4-5 VSAT用低サイドローブアンテナ

#### 4-5.1 まえがき

マイクロ波回路技術及びデジタル衛星通信技術の進歩により、通信衛星の大型化・高出力化と併せ、地球局の小型化・低廉化が図られている。図4-5.1に示すように、大型地球局（国境地球局：アンテナ口径20～30m）から中型地球局（都市地球局：同5～10m）、そして小型地球局（個別地球局：同3～5m）へとといった変遷は、VSAT（Very Small Aperture Terminal：アンテナ口径2m以下）と呼ばれる超小型地球局によって、よりユーザに密接した衛星通信網へと進展しつつある。

VSATシステムは、地球局の設置場所に対する制約を大幅に緩和し、また、地球局の無人運用や市内加入者線のバイパス等により通信コストを低減するものである。これにより衛星通信のもつ広域性・同報性、更には回線設定の迅速性・柔軟性を十分に享受することができるようになり、高品質できめ細かなビジネス衛星通信システムを経済的に構築することができる。このことから、VSATシステムは旺盛で多様化を増していく今後の通信需要に対するサービスメニューとしてその発展が期待されている<sup>[4-5.1]</sup>。

高品質で信頼性の高いVSAT衛星通信サービスを提供するためには、高性能な小形アンテナ、即ち、小口径でありながら高利得（高能率）かつ低サイドローブなアンテナの開発が不可欠である。アンテナの小形・低廉化によりVSATシステムの普及・発展が促され、これによってVSAT局数が増加するため、個々のアンテナの性能としては、

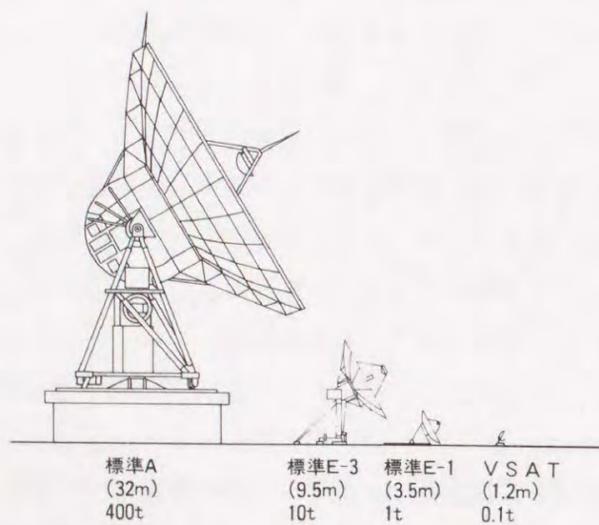


図4-5.1 地球局アンテナの小形化

単に高能率であるのみならず、自システムあるいは他の無線システムへの干渉を最小限に抑える必要があることから、低サイドローブでなければならない。「小形」「高能率」「低サイドローブ」という3つの相反する要求に対し、最適なアンテナ設計技術が必要となっている。

そこで、ここでは高性能なVSATアンテナの提供を目的とし、特に小口径反射鏡アンテナの低サイドローブ化について鏡面設計の立場から検討を加え、この検討に基づき開発した1.2m修整オフセットグレゴリアンアンテナについて述べる。

#### 4-5.2 基礎的検討

##### 4-5.2.1 単反射鏡と双反射鏡の比較<sup>[4-5.2]</sup>

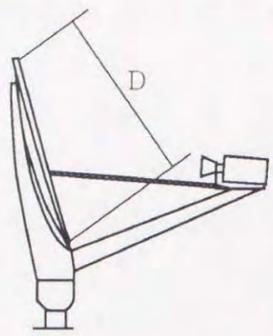
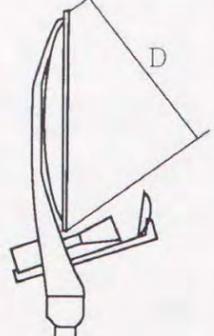
表4-5.1は、反射鏡アンテナの低サイドローブ化技術をまとめたものである。このうちオフセット形式は、給電系（一次放射器やこれに接続される給電回路、ビーム導波路、あるいは副反射鏡）及びその支持構造体が反射鏡開口面を遮蔽する（ブロッキング）のを避けたものであり、低サイドローブ化及び高能率化に本質的な効果を有している。但し、オフセット形式では鏡面が非回転対称であり回転対称形式に比べて製造コストの点で一般に不利であるが、衛星放送受信用オフセットパラボラアンテナの普及例を見るように口径の小さいものについては量産効果と併せ、低廉化が進んでいる。

次にオフセット形式の中で、単反射鏡（パラボラ）型と双反射鏡（グレゴリアン）型についてそれぞれの特徴を比較し、まとめたものが表4-5.2である。構成部品の多い双反射鏡型は基本的には製造コストを代償として高性能化を達成するものであると言える。しかし、送信機出力が大きい場合、単反射鏡型では重い送受信装置を長いアームで支持しなければならないため、支持構造体のコストは双反射鏡型のそれよりも高くなる。また、双反射鏡型では折り返し構造となってアンテナがコンパクトな形態となるため、設置場所（土地）費用や工事費用までも考慮すると、単反射鏡型より高価であるとは必ずしも言えない。

表4-5.1 反射鏡アンテナの低サイドローブ化技術

要素	作用	その他の効果	
オフセット形式	ブロッキングの回避	高能率化	
コルゲートホーン	スピルオーバーの低減	広帯域化、低交差偏波化	
双反射鏡	後方給電	スピルオーバーの低減	
	コヤフィールド給電	スピルオーバーの低減	送受信装置支持が好都合 広帯域化
	鏡面修整	開口面電界分布の制御	高能率化
	交差偏波消去系	非対称鏡面の相殺	低交差偏波化

表4-5.2 オフセットパラボラとオフセットグレゴリアンの比較

項目	オフセットパラボラ	オフセットグレゴリアン
概観 (側面図)		
部品点数	少	多 (副反射鏡が必要)
部品点数	小	大 (ニヤフィールド 給電の場合)
一次放射器	大きくできない (交差偏波等の性能が劣化)	大きくできる (交差偏波除去条件適用可)
送受信装置 の位置	アンテナ前方 (後方に設置する場合には給電回路が必要)	アンテナ下後方 (支持構造や太陽熱を避けられる点で有利)
鏡面修整技術	適用不可	適用可能
開口能率	60~70% (高周波ほど低い)	70~75% (広帯域)
サイドローブ	高周波ほど低い	広帯域に渡って低い
コスト/重量	小	やや大
その他	一次放射器からの電波のスピルオーバーにより広角サイドローブがやや高い	オフセット角を大きくするとコンパクトな構造となる。鏡面に雨や雪が付着し難い。

一方、低サイドローブ化の観点からは、双反射鏡アンテナでは鏡面が増えたことによる設計の自由度を活かして鏡面修整技術の適用が可能となる点が多い。これにより、能率を低下させることなく低サイドローブ化が可能となる。

4-5.2.2 物理光学的鏡面修整の検証 [4-5.3]

小口径反射鏡アンテナにおける幾何光学的鏡面修整の問題点とこれを更に改善する物理光学的鏡面修整の優位性については第3章で明かにした。ここでは、物理光学的鏡面修整のV S A Tアンテナ設計に対する有効性をモデルアンテナの試作により確認する。

図4-5.2は開口径30cmの試作アンテナであり、設計周波数52GHzにおいて開口径対波長比 ( $D/\lambda$ ) は52である。副反射鏡の大きさは  $10.2\lambda \times 11.3\lambda$  であり、一次放射器 (開口径  $3.3\lambda$  のコルゲート円錐ホーン [4-5.4], [4-5.5]) のニヤフィールドに置かれている。鏡面系は物理光学的鏡面修整法により設計されており、所望の開口面電界分布をTaylor -40dB ( $n=8$ ) [4-5.6] とした。

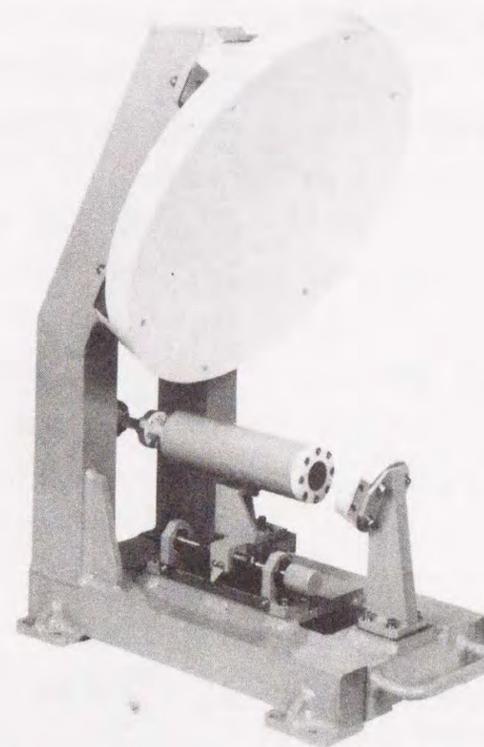
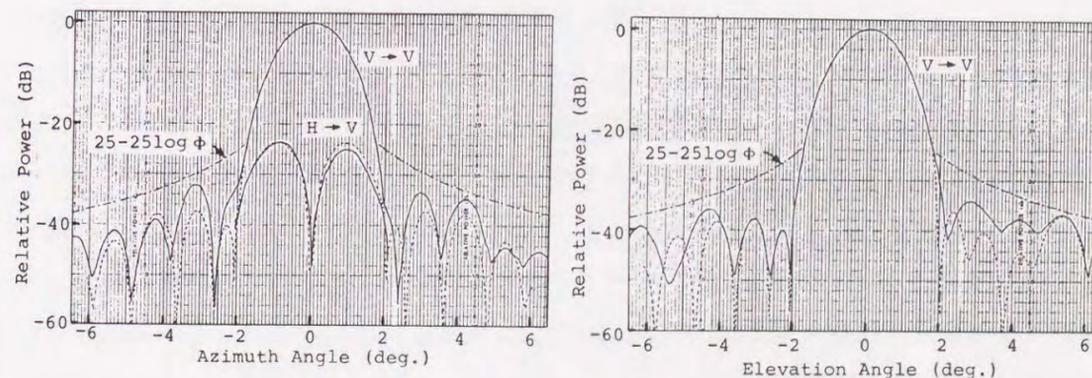


図4-5.2 スケールモデルアンテナ (開口径30cm, 周波数52GHz)



(a) 水平面内 (b) 水直面内

図4-5.3 モデルアンテナの近軸放射パターン

図4-5.3は試作アンテナの近軸放射パターンの実測値及び計算値を比較して示している。指向性利得の計算値は42.6 dBiである。物理光学的鏡面修整の効果により、水平面内のみならず、垂直面内でも極めて低いサイドローブ特性が実現されている。尚、

本試作アンテナでは一次放射器の軸とアンテナ主ビーム軸とを平行にした構成としており、未修整オフセットグレゴリアンアンテナに対する交差偏波除去条件<sup>[4-5.7]</sup>を満たしていないため、交差偏波成分がやや高くなっているが、これら2つの軸の関係を適切に選ぶことによって交差偏波特性の改善が可能である。

4-5.3 Ku帯1.2m修整オフセットグレゴリアンアンテナ<sup>[4-5.2], [4-5.8]~[4-5.14]</sup>

4-5.3.1 アンテナ設計

4-5.2節での基礎検討結果を踏まえて、Ku帯VSAT用アンテナとして有効開口径1.2mの鏡面修整型オフセットグレゴリアンアンテナを開発した。使用周波数帯域は、受信帯が10.95~12.2GHz、送信が14.0~14.5GHzであり、1.2mの開口径は開口径対波長比 $D/\lambda$ で約4.4~5.8と従来の固定衛星通信地球局用アンテナに比べてかなり小さい。

設計の具体的目標は以下のとおりである。

- (1) 開口能率は全周波数帯に渡って70%以上を満足し、その条件化で近軸サイドローブ包絡線ができるだけ低いこと。
- (2) 交差偏波レベルは3dBビーム幅内で-27dB以下であること。
- (3) コンパクトな構造で反射鏡面には雪が付着しにくいこと。

この中で、項目(1)に関しては、特に実際のVSAT局への適用を考慮し、総合的な観点からの最適設計を目指した。即ち、第1には、鏡面の最適化の仮定で開口面電界分布を評価するのではなく遠方放射パターンを直接評価し、指向性合成を行うこととする。これは1つ1つのサイドローブの微細構造まで制御する必然性はなく、サイドローブの包絡線(envelope)を最小化することが肝要なためである。また第2には、低サイドローブ化を図る角度範囲として、図4-5.4に示すように、水平面から $\pm 45^\circ$ 傾いた面で囲まれる領域の主ローブから $10^\circ$ までの範囲におけるサイドローブレベルに着目してそのエンベロープ係数を最小化の対象とした。これは、日欧米の主要な都市部から静止衛星を望んだときの軌道傾斜角が $\pm 45^\circ$ 以内になっていることを考慮したことによる。このように、垂直面内のサイドローブ特性を多少なりとも犠牲にすることによって、隣接する衛星への干渉を可能な限り抑え、より現実的な意味での高能率・低サイドローブ化を追及している。このように放射パターンとして回転対称でないものを積極的に利用しようとする考え方は、楕円開口の採用により実現する方法があるが、ここでは円形開口のまま遠方放射界を直接最適化する直接法に基づく鏡面修整により実現させている。

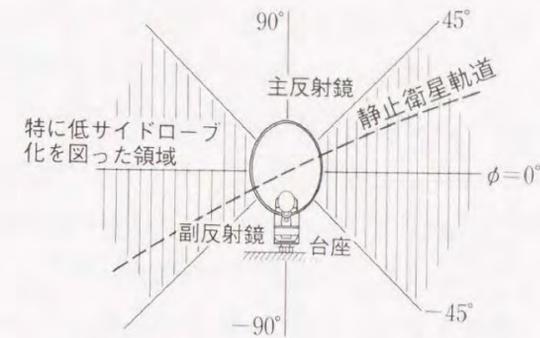


図4-5.4 特に低サイドローブ化を図る領域

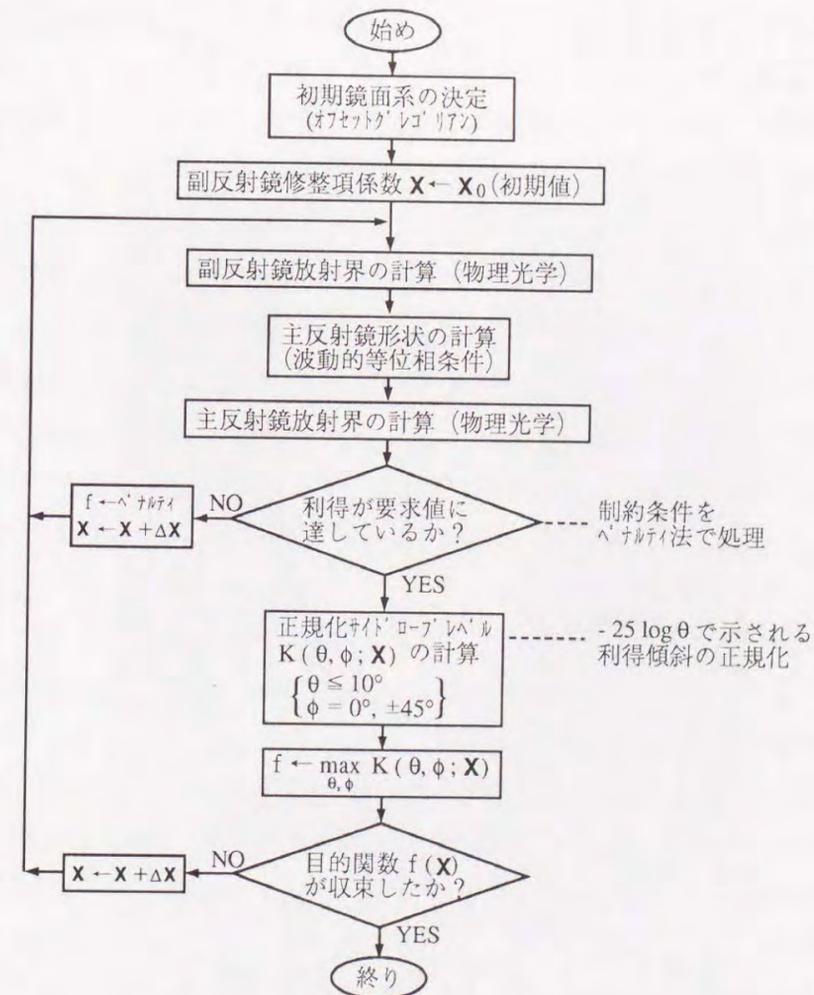


図4-5.5 鏡面設計のフローチャート

図4-5.5は設計のフローチャートを示しており、11.7GHzの1周波数でのみ最適化している。従って、11.7GHzにおいて開口面の位相分布は物理光学の意味において完全に一様分布となっている。最低利得に対する拘束条件は開口能率に換算して75%とし、これを満足しない場合にはペナルティ法<sup>[4-5.15]</sup>により処理した。最低利得を満足した場合は、前述の角度範囲内のサイドローブレベルを物理光学により求め、これを慣例により「 $K-25 \log \theta$ 」(Kは定数)なるエンベロープ関数で規格化し、その定数Kを最小化の目的関数とした。最適化の手法としてはランダム探索法の一つであるシンプレックス法<sup>[4-5.16]</sup>を用いた。

副反射鏡の展開係数の項数を19として最適化した結果、サイドローブエンベロープ関数の定数として $K=22.4$ が得られた。また、物理光学的鏡面修整の結果得られた主反射鏡鏡面を詳細に検討したところ、これに最も近い(best-fit)回転放物面との偏差が最大で約6mm程度である。

#### 4-5.3.2 アンテナ構成

図4-5.6に4-5.3.1節で述べた方法で設計された鏡面系を有する1.2m修整オフセットグレゴリアンアンテナの構造を示す。オフセットパラボラに比べ、非常にコンパクトである。主反射鏡が垂直に立った姿勢でのビーム方向は仰角約 $36^\circ$ であり、鏡面に雨や雪が付着しにくい構造となっている。実用機の開発にあたり、鏡面を次の3つの材料・製法により試作した。

- (1) アルミニウム板のプレス成形<sup>[4-5.14]</sup>
- (2) ウレタン材をコアにし、ファイバ布を樹脂注入(resin injection)製法で成形したFRP (fiber reinforced plastic)<sup>[4-5.12]</sup>
- (3) アルミハニカムをコアとしたFRPサンドイッチ構造<sup>[4-5.13]</sup>

このうち、(2)及び(3)については鏡面成形後に導電性塗料を塗布することによって電波の反射層を形成している。

上記、鏡面はそれぞれに長所・短所を有しており、一概に優劣をつけることはできないが、結果的にはどれもが鏡面精度 $0.3\text{mm}$ (rms値)以下という目標値を達成し、電気性能上も問題のないことが明かとなった。図4-5.7にアンテナの概観を示す。

一次放射器には、広帯域に渡って交差偏波特性の優れたコルゲート円錐ホーンを採用しており、その開口径(内径)は $120\text{mm}$ である。

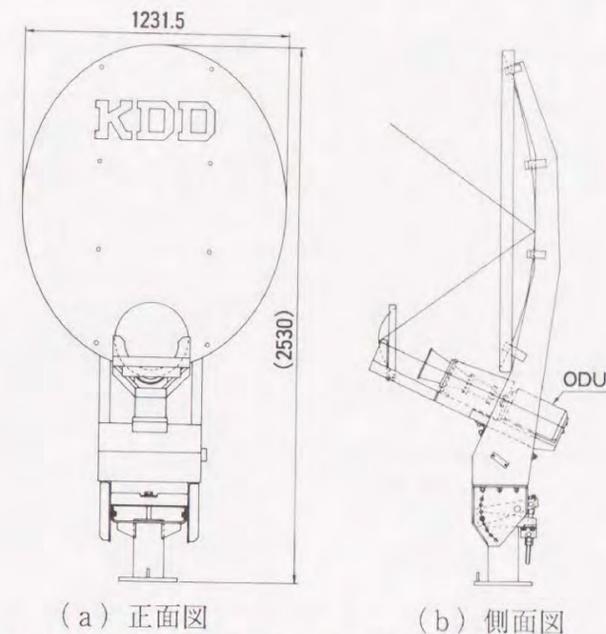


図4-5.6 1.2m修整オフセットグレゴリアンアンテナの構造



図4-5.7 1.2m修整オフセットグレゴリアンアンテナ

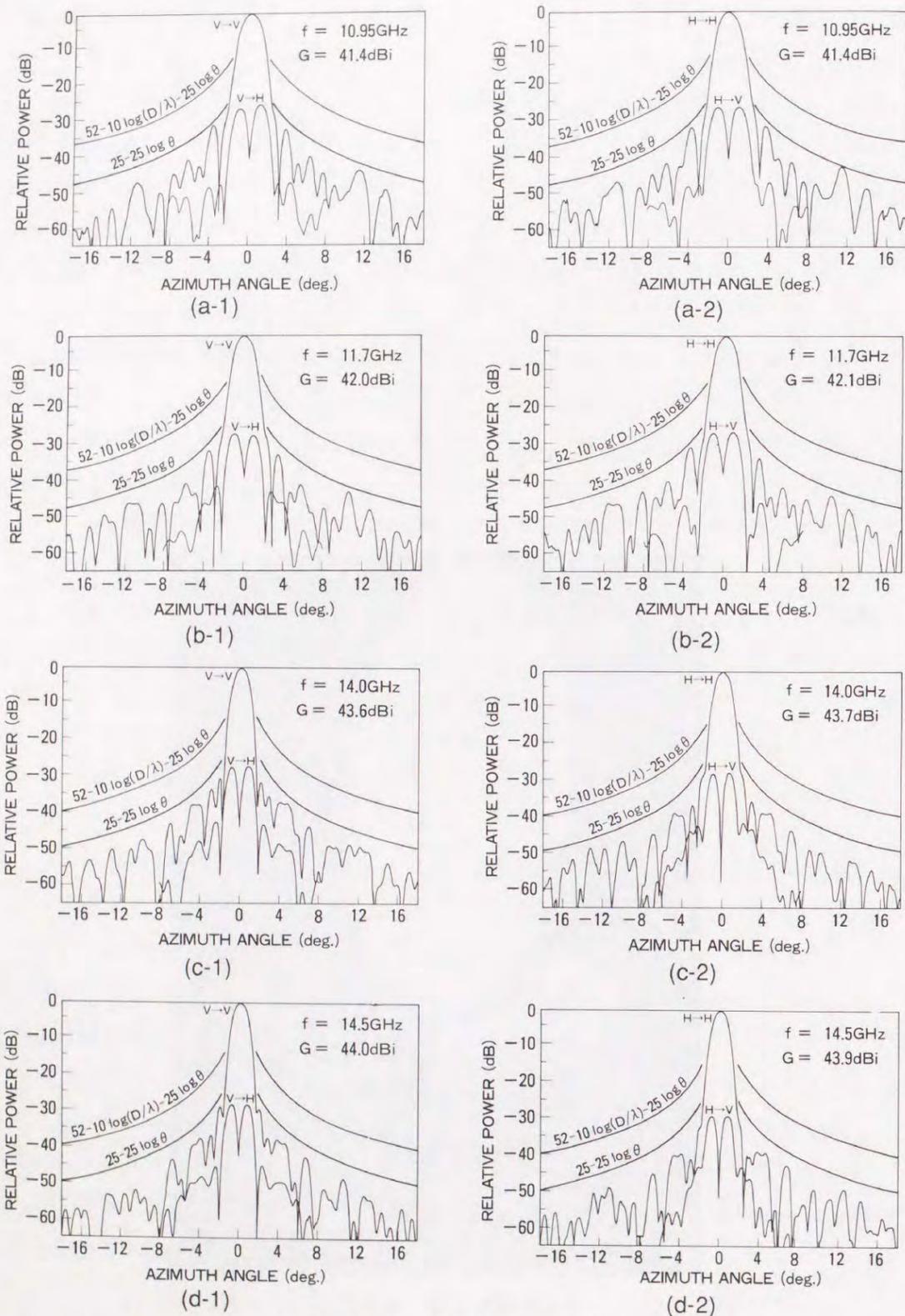
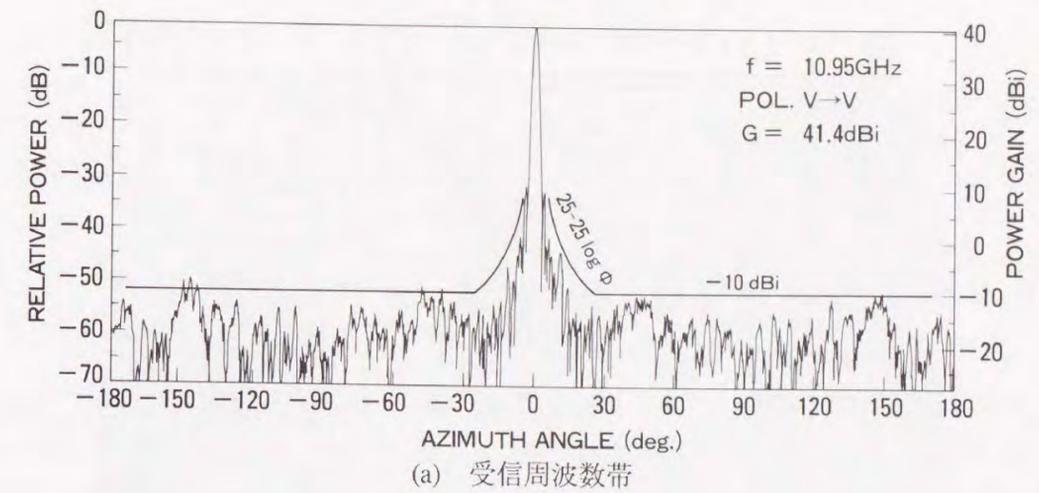
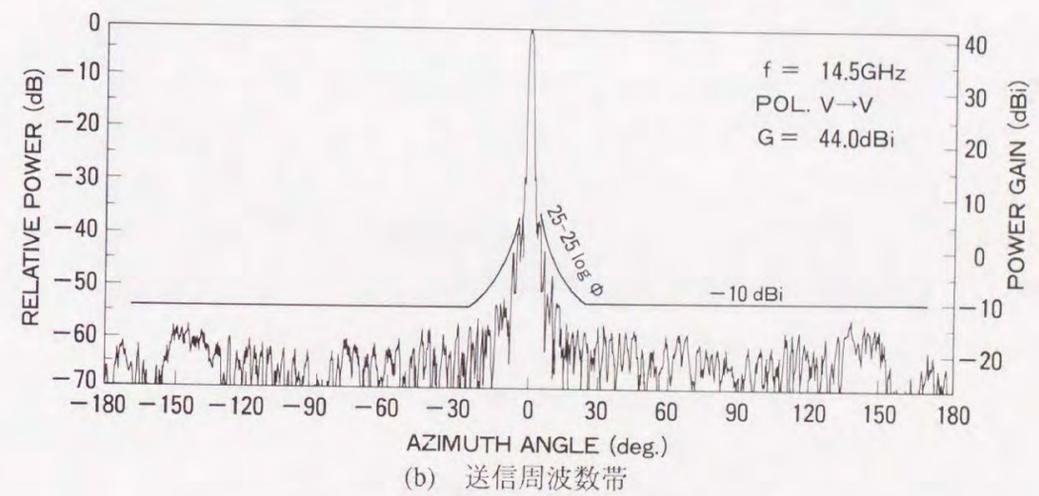


図4-5.8 近軸放射パターン



(a) 受信周波数帯



(b) 送信周波数帯

図4-5.9 広角放射パターン

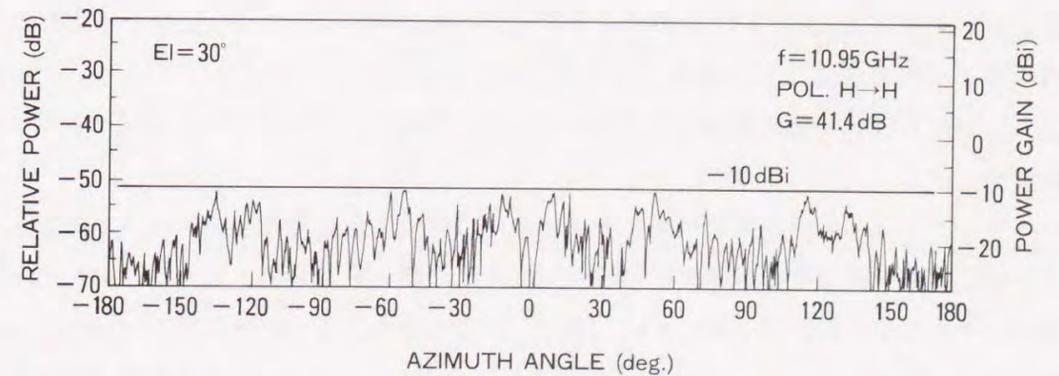


図4-5.10 地上干渉面内放射パターン

表4-5.3 1.2m修整オフセットグレゴリアンアンテナの利得

測定周波数	利 得		開口能率		
	垂直偏波	水平偏波	垂直偏波	水平偏波	
受信	10.95 GHz	41.4 dBi	41.4 dBi	72.9 %	72.9 %
	11.70 GHz	42.0 dBi	42.1 dBi	73.3 %	75.0 %
送信	14.00 GHz	43.6 dBi	43.7 dBi	74.0 %	75.7 %
	14.50 GHz	44.0 dBi	43.9 dBi	75.7 %	73.9 %

4-5.3.3 放射特性

表4-5.3に本アンテナの利得の実測値を、また図4-5.8に近軸放射パターンの実測値をそれぞれ示す。一次放射器にコルゲート円錐ホーンを使用しているため、鏡面設計を1周波数・片偏波で行ったにも拘わらず、送受信の全帯域・両直交偏波に対して、開口能率72%以上、近軸サイドローブエンベロップ $25 - 25 \log \theta$  [dBi]以下という、極めて優れた性能を満足した。この近軸サイドローブ特性はC C I R勧告値<sup>[4-5.17]</sup>よりも約10dB低い。さらに本アンテナは、図4-5.9に示すように広角サイドローブ特性も良好である。図4-5.10は、衛星仰角を30°とした時の地上干渉面内の広角指向性の実測結果の一例であって、良好な特性を示していることから地上マイクロ波通信網との周波数共用が可能である。

4-5.4 まとめ

V S A Tに適用することを目的として、小口径反射鏡アンテナの低サイドローブ化に対する検討を行い、物理光学的鏡面修整の有効性をモデルアンテナにより検証した。次にその結果を踏まえ、直接遠方放射パターンのサイドローブエンベロップを最小化することにより、特に水平面から±45°面までの近軸サイドローブ特性に優れた1.2m修整オフセットグレゴリアンアンテナを開発した。アンテナは設計の妥当性、有効性及び信頼性を示すと共に、 $D/\lambda$ が50程度と小さくとも極めて低サイドローブ(25-25 log  $\theta$  [dBi]以下)でかつ高能率(72%以上)な特性が広帯域に渡って実現できることを実証した。

本アンテナは、複数の国内アンテナメーカーへの技術提供を通じて商品化されており、V S A Tシステムの今後の発展に寄与するものと期待されている。また、その小形・軽量と低サイドローブ特性とを生かし、図4-5.8に示すような小型S N G (satellite news gathering: 衛星を介したニュース取材) 車載局用のアンテナとしても多数実用に供されている。



図4-5.11 S N G小型車載局  
(アンテナは可倒式で走行時には格納される。)

## 第5章 結 論

## 5.1 本研究の要点

本論文は、反射鏡アンテナの高性能化技術の柱とも言える鏡面修整技術に関して行った一連の研究結果をまとめたもので、鏡面修整によるビーム合成問題に理論的検討を加えて従来技術の問題点を解決すると共に、その成果を活用して高性能・高機能な各種通信アンテナを設計・開発した。各章の要点は次の通りである。

## 第2章 幾何光学的 (GO) 鏡面修整理論

## (2-1 単反射鏡によるファンビームの合成)

単反射鏡によるファンビームの合成問題に関し、2重曲面反射鏡の設計理論における従来の解釈であった曖昧性を解決し厳密解の唯一性を明かにした。また、フラットなファンビームに関する設計理論をカーブしたファンビームを含むものに一般化した。

## (2-2 双反射鏡によるペンシルビームの合成)

双反射鏡による高能率・低サイドローブなペンシルビームの合成問題に関しては、まず、解曲面の可積分条件を具体的に書き下すことによって開口面写像に対する拘束条件を演繹的に導き、実現可能な開口面電界分布に関する知見を得た。そしてオフセット系アンテナの鏡面修整問題に係わる偏微分方程式を連立常微分方程式に帰着させ、回転対称系アンテナと同等な手順によって鏡面設計ができるようにした。また、回転対称な開口面写像を持つカセグレン系やグレゴリアン系とは全く異質の新しい範疇の鏡面系が存在することを明かにした。さらに、双反射鏡系の交差偏波消去条件を修整反射鏡を含むものに一般化した。

## 第3章 物理光学的 (PO) 鏡面修整理論

幾何光学近似が成立しない領域、即ち、反射鏡口径が波長に比較して十分大きいと見なせない小形アンテナに適した新しい鏡面修整理論として、電波の波動的性質 (回折現象) を考慮した物理光学的鏡面修整理論について検討した。GO鏡面修整の限界を明かにすると共に、PO鏡面修整による改善効果を反射鏡口径対波長比をパラメータとして定量的に示した。

また、開口面電界分布を合成するのではなく、遠方放射電界を直接最適化する手法を提案した。

## 第4章 各種通信用アンテナの開発

上記鏡面修整理論の研究成果に基づき、設計・開発した各種通信用アンテナについて述べた。

## (4-1 衛星搭載用コンタービームアンテナ)

ファンビームを放射する2重曲面反射鏡を基本としたアンテナ構成について計算機シミュレーションにより検討を加えた。まず、2重曲面反射鏡アンテナの考え方を拡張し、 $i/V/U/S$ 字といった形状のコンタービームが実現できることを示した。次に、2重曲面反射鏡と一次元の一次放射器アレイとを組み合わせたアンテナシステムを提案した。そして、2重曲面反射鏡の変位給電時のビーム偏向特性を検討し、収束系鏡面と発散系鏡面との特質の差を明かにした。さらに、国際通信衛星への応用を想定しマルチコンタービームアンテナの具体的検討例を示した。

## (4-2 LDR基地局用広角成形ビームアンテナ)

LDR (端末系広帯域無線伝送方式) の多方向型システムの基地局用に開発した広いサービスエリアを最適な成形ビームで照射する広角成形ビームアンテナについて述べた。本アンテナは水平断面内では幅 $90^\circ$ のファンビームパターンを、また垂直断面内では改良コセカント2乗パターンを有している。鏡面修整法として、放射電界レベルの高いビームノーズ部を形成する鏡面部分は幾何光学的に、また、レベルの低いビームスカート部を形成する部分は物理光学的にと、2つの鏡面修整の特長を巧みに使い分け、効率的で高精度な設計法を開発した。アンテナの実測放射パターンはサービスエリア内を照射する部分にはリップルが無く、しかも、ビームの切れが鋭くサイドローブの低い優れた性能を示した。

## (4-3 マルチビーム地球局用球面鏡アンテナ)

主反射鏡に球面鏡を採用したマルチビーム地球局アンテナについて述べた。球面の持つ回転対称性を最大限に活用しつつ、その欠点である球面収差とオフセット給電時に生じる開口面電界分布の歪みを2枚の修整補助反射鏡の導入によって除去した。交差偏波特性の改善、及び、マルチビーム化で問題となる隣接ビーム分離角により制限される補助反射鏡系の大きさについて検討を加えた。そして、テレポートなど都市部周辺への設置を目的として高性能なKu帯6.5m4ビーム地球局アンテナを開発した。

## (4-4 マルチスポットビーム用多焦点アンテナ)

次世代の国際通信衛星への応用を想定し、極めて多数のスポットビームを放射する双反射鏡形式多焦点アンテナを提案した。静止衛星軌道から地表を望んだ視野内の6つの異なった方向に対応させた6焦点アンテナを構成するために、幾何光学に基づいて2枚

の鏡面を最適設計した。最適化の目的関数には開口面写像の所望な写像からの誤差を用い、その誤差を開口面電界分布の振幅誤差と位相誤差に対応した成分に分離して波長をパラメータにした重み付けを行った。これにより、振幅誤差を劣化させることなく位相誤差（収差）を $1/3 \sim 1/4$ 程度に低減した前方給電型修整オフセットカセグレン形式の多焦点アンテナを試作し、モデル実験により設計の妥当性を確認した。

#### (4-5 V S A T用低サイドローブアンテナ)

V S A T（超小型地球局）用に開発したKu帯1.2m修整オフセットグレゴリアンアンテナについて述べた。本アンテナは物理光学的鏡面修整法により、従来、小形アンテナでは実現が困難であった高能率化と低サイドローブ化が達成されており、物理光学的鏡面修整の有効性が実証されている。

以上のように、本研究により、

- (1) 幾何光学的鏡面修整理論における定理の発見と新しい鏡面系の発明、
- (2) 小形アンテナの設計や低い放射レベルの制御に有効な鏡面修整法の提案、
- (3) 各種通信用の高性能/高機能なアンテナの開発、

の成果が得られた。また、開発されたアンテナのうち、L D R基地局用広角成形ビームアンテナは三菱電機株式会社への技術提供を通じて国際電信電話株式会社（K D D）の21GHz帯の多方向型システム用基地局アンテナとして、マルチビーム地球局用球面鏡アンテナは日本電気株式会社（N E C）への技術提供を通じてその第1号機が日本サテライトネットワーク株式会社（J S N E T）の大阪テレポート内地球局アンテナとして、また、V S A T用低サイドローブアンテナは日本電気株式会社（N E C）・株式会社東芝・富士通株式会社・三菱電機株式会社への技術提供を通じて商品化され、それぞれ実用に供されている。

## 5.2 鏡面修整技術の総括

ここで、幾何光学的及び物理光学的鏡面修整法のそれぞれの特徴をまとめることによって、鏡面修整技術の全体像を明かにして総括とする。

まず幾何光学的鏡面修整法の特徴をまとめれば、以下の通りである。

- (G 1) 微分方程式を解くことで鏡面が得られるため、決定論的（straight forward）に鏡面設計が行える。
- (G 2) 設計の効率は $D/\lambda$ に無関係で、 $D/\lambda$ が大きいほど結果の精度が高い。
- (G 3) ペンシルビームについては、遠方界パターンを直接合成することができず、開

口面電界分布を介して間接的に設計せざるを得ない。

これに対し、物理光学的鏡面修整法の特徴をまとめれば、以下の通りである。

- (P 1) 設計がすなわち解析になっており、極めて精確に放射パターンを評価することができるため、サイドローブなど放射レベルの低い部分を制御することが可能である。
- (P 2) 最適化の目的関数の定義を変形することにより、様々な拘束条件を付加したり、多周波数にわたっての最適化や特定方向の放射レベルの重み付けなど、きめ細かな設計目標に応じることができる。
- (P 3) 最適化アルゴリズムの出発点として必ず初期値が必要であり、この初期値は反射鏡曲面の展開関数系の選択とともに、設計の効率及び結果を大きく左右する。
- (P 4) 物理光学により放射界を評価するには反射鏡全面に渡っての積分演算を繰り返す必要があるため、その計算量は $D/\lambda$ （ $D$ :反射鏡口径、 $\lambda$ :波長）の2乗に比例して増加する。さらに、最適化アルゴリズム中での反復とあいまって、鏡面設計には幾何光学的鏡面修整法に比較して桁違いに長い時間を要する。

物理光学的鏡面修整法は僅かな鏡面形状の変化によるアンテナ遠方放射パターンそのものを計算し、所望とする放射パターンとの違いを比較し、その都度その差が小さくなるように鏡面の形状を修正するようないわば総合的なアンテナ放射特性の最適化による合成法である。そこでコンピュータの飛躍的な高速化により計算時間の点が解決されたあかつきには、あたかも万能的技術になるかのように思える。しかし、物理光学的鏡面修整は、アンテナ設計者からみればブラックボックスとしての存在であり、その結果を直観的に吟味し妥当性を確認することが困難なものである。また、項目（P 4）のように、初期値がその最終結果を左右する。この意味からもその初期値を与える幾何光学的鏡面修整技術の重要性は深まることはあっても、決して軽視されるべきものではない。

いずれにせよ物理光学的鏡面修整法は、コンピュータ技術の飛躍的な進歩があって初めて現実となったものであり、まだ産声をあげたばかりに過ぎない。しかし、その潜在的能力は本研究によっても十分示されており、時代の流れは最適化による遠方放射界の直接合成<sup>[5.1]~[5.4]</sup>に向かっている。今後ともコンピュータ技術の発展やアンテナに対する様々な要求性能の多様化と歩調を合わせ、鏡面修整技術はより完成度の高いものに洗練され、反射鏡アンテナ設計の中心的役割を果たしていくものと考えられる。

## 5.3 今後の課題

鏡面修整技術についての一連の研究により、反射鏡アンテナ設計に係わる課題の多く

は解決された感がある。そこで、未解決の基本的課題として次の2点に触れ、結びとしたい。

- (1) 反射鏡が反射鏡として動作するのに必要な電氣的大きさ
- (2) 遠方電力パターンから近傍界位相情報の構築 (phase retrieval) <sup>[5.5]</sup>

このうち、項目(1)は、反射鏡の拡張にも深く係わる課題である。幾何光学的回折理論 (geometrical theory of diffraction: GTD) の教えによれば反射鏡のエッチ照射レベルが (その微係数も含めて) 十分に低ければ、波長に比較してかなり小さな反射鏡でもその回折波成分は小さく幾何光学近似が成立するはずである。(エッチ照射レベルを下げ回折波成分を低減するために反射鏡を幾何光学的境界よりも拡張して用いることは鏡面設計の常套手段ともなっている。) そこで回折波成分が反射波成分よりも十分に低く抑えられていると仮定した上で、この反射波成分を鏡面の曲率の変化によって制御するには、波長に比較してどの程度の大きさの鏡面が必要なのかと言う点に疑問が生じる。例えば、楕円鏡を用いその焦点に絞られたビームウエスト (beam waist) 近傍に反射鏡を置いたとき、この反射鏡の曲率の細かな変化により反射波のパターンが制御できるか否かを考えてみれば良い。

項目(2)は、逆問題 (反射界の情報から反射体を構築する) の古典的課題であるが、これを単反射鏡によるコンタービームの合成に利用する立場で考えてみるとさらに興味深い。本論文の第2章で明かにしたように、幾何光学的ビームフットプリントが線状である場合には与えられた振幅分布に対し、鏡面 (即ち位相分布) の厳密解が唯一つに定まった。ビームフットプリントが線状であるというのは、面的に拡がった一般の場合が縮退したものと考えることができる。従ってこの縮退が解けた一般の場合にも位相分布が決定論的に求められる公算が高いと考えられる。ペンシルビームを合成する回転放物面の包絡面としてファンビームを合成する2重曲面が得られた事実を振り返れば、ファンビームを合成する2重曲面の包絡面として2変数で表されるより一般的な成形ビームを合成する修整曲面が得られるように思われる。現在はどのようなビームフットプリント形状ならば有限の大きさの連続的な位相分布で実現できるかの指針すら明確になっていない。何れにせよ、位相情報が構築できれば、成形ビームに対する鏡面設計が終わったことと等価であるから、詳細な検討が望まれるところである。

## 謝 辞

本論文をまとめるに際し、御懇切なる御指導、御鞭撻を賜った早稲田大学理工学部教授高畑文雄博士に謹んで感謝の意を表します。また終始懇切なる御教示を賜った同大学理工学部教授堀内和夫博士並びに加藤勇博士に、衷心より謝意を表します。同大学香西寛名誉教授には、筆者の在学中より常に温かい励ましをもって御導き頂きました。深甚なる謝意を表します。

東京工業大学工学部教授後藤尚久博士並びに同大学工学部助教授安藤真博士には、本研究の早い段階より深い御理解を賜り、折に触れて適切な御指導、御助言を賜りました。ここに厚く御礼申し上げます。

本研究は筆者が国際電信電話株式会社 (KDD) 研究所において行った反射鏡アンテナに関する一連の研究成果をまとめたものであり、この間本研究の機会を与えて下さり、またその遂行を温かく見守り頂いた研究所歴代所長鍛冶弘博士、野坂邦史博士、村谷拓郎博士、小室圭五氏、小野欽司博士に深く感謝致します。また、研究の過程におきまして、小川明博士 (現名古屋大学教授)、平田康夫博士 (現事業開発本部審議役)、山田松一博士 (現研究所主幹研究員) には、深い御理解と適切な御指導を頂き、心より感謝致します。

研究所次長高橋行俊博士並びに伊藤泰彦博士には、本論文の取りまとめに御尽力頂き、さらに終止懇切なる御指導、御鞭撻を賜りました。ここに厚く御礼申し上げます。また、無線応用グループリーダー塩川孝泰博士には、直属の上司として本研究に格段の御理解を下さり多大なる御指導と御助言を頂きましたことを深く感謝致します。

本研究の多くは主幹研究員水口芳彦博士あるいは主任研究員渡辺文夫博士と連名で行ったものであり、両博士の卓越した見通しに裏付けされた御指導、御助言、叱咤激励に対しては感謝の言葉が見つからないほどです。ここに謹んで御礼を申し上げる次第です。また、唐沢好男博士、南園健一氏、松戸孝氏、神谷嘉明氏、岩井誠人氏他無線応用グループ諸氏には研究遂行にあたり様々な形で御協力を頂いたことを深謝致します。

最後に、本研究で開発されたアンテナの製作・試験に際し、多大なる御協力を願った、株式会社東芝、日本電気株式会社、富士通株式会社、三菱電機株式会社他アンテナ製造会社の関係各位に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

第1章

- [1.1] P. J. B. Clarricoats and G. T. Poulton: "High-efficiency microwave reflector antennas - A review," *Proc. IEEE*, vol. 65, no. 10, pp. 1470-1504, Oct. 1977. あるいは、P. J. B. Clarricoats: "Some recent advances in microwave reflector antennas," *Proc. IEE*, vol. 126, no. 1, pp. 9-25, Jan. 1979.
- [1.2] W. V. T. Rusch: "The current state of the reflector antenna art," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-32, no. 4, pp. 313-329, Apr. 1984.
- [1.3] S. Silver: "Double-curvature surfaces for beam shaping with point-source feeds," *Report No. 691*, Radiation Laboratory, MIT, 15 June 1945. あるいは、A. S. Dunbar: "Calculation of doubly curved reflectors for shaped beams," *Proc. IRE*, vol. 36, pp. 1289-1296, Oct. 1948.
- [1.4] 例えば、G. A. Deschamps: "Ray techniques in electromagnetics," *Proc. IEEE*, vol. 60, pp. 1022-1035, Sept. 1972.
- [1.5] K. S. Kelleher and G. Hyde: "Reflector antennas," in '*Antenna engineering handbook 2nd edition*' edited by R. C. Johnson and H. Jasik, ch. 2, sec. 17, pp.14-16, McGraw-Hill, New York, 1984.
- [1.6] P. W. Hannan: "Microwave antennas derived from the Cassegrain telescope," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-9, pp. 140-153, Mar. 1961.
- [1.7] K. A. Green: "Modified Cassegrain antenna for arbitrary aperture illumination," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-11, pp. 589-590, Sept. 1963.
- [1.8] V. Galindo: "Design of dual-reflector antennas with arbitrary phase and amplitude distributions," presented at *PTGAP International Symp.*, pp. 91-95, Boulder, CO, July 1963. あるいは、V. Galindo: "Design of dual-reflector antennas with arbitrary phase and amplitude distributions," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-12, pp. 403-408, July 1964.
- [1.9] W. F. Williams: "High efficiency antenna reflector," *Microwave Journal*, vol. 8, pp.79-82, July 1965.
- [1.10] 後藤尚久, 渡辺文夫: "与えられたサイドローブレベルを持つカセグレンアンテナの最大開口能率", *信学論B*, vol. J61-B, no. 5, pp. 321-326, May 1978.
- [1.11] S. Silver: *Microwave Antenna Theory and Design*, McGraw-Hill, New York, 1949.

- [1.12] R. C. Hansen: *Microwave Scanning Antennas, Volume I - Apertures*, Academic Press, 1964.
- [1.13] 宇田 宏: "オフセットパラボラアンテナに関する研究", *電波研究所季報*, vol. 8, no. 35, pp. 129-182, Mar. 1962.
- [1.14] 田中宏和, 水沢丕雄: "オフセット複反射鏡アンテナにおける交さ偏波の消去", *信学論B*, vol. J58-B, no. 12, pp. 643-650, Dec. 1975.
- [1.15] Y. Mizugutch, M. Akagawa and H. Yokoi: "Offset dual reflector antenna," presented at *1976 IEEE AP-S International Symp.*, pp. 2-5, Amherst, MA, Oct. 1976.
- [1.16] 水口芳彦, 赤川正孝, 横井 寛: "オフセットグレゴリアンアンテナ", *信学論B*, vol. J61-B, no. 3, pp. 166-173, Mar. 1978.
- [1.17] C. Dragone: "Offset multireflector antennas with perfect pattern symmetry and polarization discrimination", *B.S.T.J.*, vol. 57, no. 7, pp.2663-2685, Sept. 1978.
- [1.18] B. Ye. Kinber: "On two-reflector antennas," *Radio Eng. Electorn. Phys.*, vol. 6, pp.914-920, June 1962.
- [1.19] 水口芳彦, 横井 寛: "オフセット形双反射鏡アンテナの曲面について", *信学論B*, vol. J58-B, no. 2, pp. 94-95, Feb. 1975.
- [1.20] 水沢丕雄, 田中宏和: "鏡面修整オフセットカセグレンアンテナ", *信学技報* no. A·P74-37, Aug. 1974.
- [1.21] M. Mizusawa, S. Urasaki and H. Tanaka: "An offset shaped-reflector Cassegrain antenna," presented at *1977 IEEE AP-S International Symp.*, pp.444-447, Stanford, CA, June 1977.
- [1.22] S. von Hoerner: "Minimum-noise maximum-gain telescopes and relaxation method for shaped asymmetric surfaces", *IEEE Trans. Antennas & Propag.*, vol. 26, no. 3, pp.464-471, May 1978.
- [1.23] V. Galindo-Israel, R. Mittra and A. G. Cha: "Aperture amplitude and phase control of offset dual-reflector," *IEEE Trans. Antennas & Propag.*, vol. AP-27, no. 2, pp. 154-164, Mar. 1979.
- [1.24] J. J. Lee, L. I. Parad and R. S. Chu: "A shaped offset-fed dual-reflector antenna," *IEEE Trans. Antennas & Propag.*, vol. AP-27, no. 2, pp. 165-171, Mar. 1979.
- [1.25] T. Takano, E. Ogawa, S. Betsudan and S. Sato: "High efficiency and low sidelobe design for a large aperture offset reflector antenna," *IEEE Trans. Antennas & Propag.*, vol. AP-28, no. 4, July 1980.

- [1.26] R. Mittra, F. Hyjazie and V. Galindo-Israel: "Synthesis of offset dual reflector antennas transforming a given feed illumination pattern into a specified aperture distribution," *IEEE Trans. Antennas & Propag.*, vol. AP-30, no. 2, Mar. 1982.
- [1.27] F. Brickell and B. S. Westcott: "Comments on the synthesis of dual offset reflector systems," *Electron. Lett.*, vol. 20, no. 13, pp. 558-559.
- [1.28] V. Galindo-Israel, W. A. Imbriale and R. Mittra: "On the theory of the synthesis of single and dual offset shaped reflector antennas," *IEEE Trans. Antennas & Propag.*, vol. AP-35, no. 8, pp. 887-896, Mar. 1982.
- [1.29] F. Brickell, L. Marder and B. S. Westcott: "The geometrical optics design of reflectors using complex coordinates," *J. Phys. A: Math. Gen.*, vol. 10, no. 2, pp. 245-260, 1977.
- [1.30] B. S. Westcott: *Shaped Reflector Antenna Design*, Letchworth, Hertfordshire, England, Research Studies Press, 1983.
- [1.31] B. S. Westcott, F. A. Stevens and F. Brickell: "GO synthesis of offset dual reflectors," *IEE Proc.*, vol. 128, pt. H, no. 1, pp. 11-18, Feb. 1981.
- [1.32] P-S. Kildal: "Synthesis of multireflector antennas by kinematic and dynamic ray tracing," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-38, no. 10, pp. 1587-1599, Oct. 1990.
- [1.33] 水沢丕雄: "鏡面修整カセグレンアンテナの放射特性に及ぼす副反射鏡放射パターンの効果", *信学論B*, vol. J52-B, no. 2, pp. 78-85, Feb. 1969.
- [1.34] 例えば、S. Silver: *Microwave Antenna Theory and Design*, Sec. 5.7, New York, McGraw-Hill, 1949.
- [1.35] J. B. Keller: "Geometrical theory of diffraction," *J. Opt. Soc. of America*, vol. 52, no.2, pp. 116-130, Feb. 1962.
- [1.36] B. Daveau: "Synthèse et optimisation de réflecteurs de forme spéciale pour antennes," *Rev. Tech. Thomson-CSF*, vol. 2, no.1, pp. 37-55, 1970.

## 第2章

(2-1)

- [2-1.1] J. S. Schruben: "Formulation of a reflector-design problem for a lighting fixture," *J. Opt. Soc. of America*, vol. 62, no.12, pp. 1498-1501, Dec. 1972.
- [2-1.2] S. Silver: "Double-curvature surfaces for beam shaping with point-source feeds,"

*RL(Radiation Laboratory) Report*, no.691, 15 June 1945.

- [2-1.3] L. C. Van Atta and T. J. Keary: "Shaped-beam antennas," in '*Microwave antenna theory and design*' edited by S. Silver, ch. 13, sec. 13.8, pp.502-509, McGraw-Hill, New York, 1949.
- [2-1.4] A. S. Dunbar: "Calculation of doubly curved reflector for shaped beams," *Proc. IRE*, vol. 36, pp.1289-1296, Oct. 1948.
- [2-1.5] P. Laasonen: "Determining the reflector surface of a radar antenna with point source feed," *IRE Trans. Antennas & Propag.*, vol. AP-3, no. 4, pp. 180-184, Oct. 1955.
- [2-1.6] L. Thourel: "Calcul et construction des réflecteurs à double courbure," *Onde Elec.*, vol. 35, no. 345, pp. 1153-1163, Dec. 1955.
- [2-1.7] R. Mauz: "Antennen berechnung mit Hilfe der geometrischen Optik," *Telefunken-Zeitung*, vol. 34, no. 131, pp. 51-57, Mar. 1961.
- [2-1.8] A. Brunner: "Possibilities of dimensioning doubly curved reflectors for azimuth-search radar antennas," *IEEE Trans. Antennas & Propag.*, vol. AP-19, no. 1, pp.52-57, Jan. 1971.
- [2-1.9] M. Mizusawa, S. Betsudan, S. Urasaki and M. Imori: "A dual doubly curved reflector antenna having good circular polarization characteristics," *IEEE Trans. Antennas & Propag.*, vol. AP-26, no. 3, pp.455-458, May 1978.
- [2-1.10] K. S. Kelleher and G. Hyde: "Reflector antennas," in '*Antenna engineering handbook 2nd edition*' edited by R. C. Johnson and H. Jasik, ch. 2, sec. 17, pp.14-16, McGraw-Hill, New York, 1984.
- [2-1.11] 野本真一, 渡辺文夫: "成形ビーム用反射鏡アンテナの鏡面決定問題について", *昭63信学春全大*, A・P88-23, June 1988.
- [2-1.12] 野本真一, 渡辺文夫: "2重曲面反射鏡に対する厳密解の存在および一意性定理", *信学技報*, no. A・P88-23, June 1988.
- [2-1.13] 例えば、寺澤寛一: *自然科学者のための数学概論 (増訂版)*, ch. 8, pp. 320-367, 1954. (特にp.367, 第8章問題8.(6)を見よ)
- [2-1.14] A. Bondignes: "Complément à l'étude des antennes à double courbure," *Ann. Radioelec.*, vol. 12, no. 50, pp. 330-336, Oct. 1957.
- [2-1.15] S. Nomoto: "Exact GO synthesis of arbitrarily curved fan-beams using doubly curved reflectors," *IEEE Trans. Antennas & Propag.*, (投稿中).

(2-2)

- [2-2.1] 野本真一, 水口芳彦: “双反射鏡アンテナにおける開口面写像の回転対称条件—ダブルオフセット配置を許容する新しい鏡面系—”, *信学論B-II*, vol. J75-B-II, no. 7, pp. 464-471, July 1992.
- [2-2.2] 野本真一, 水口芳彦: “回転対称な開口面分布を有するダブルオフセット双反射鏡アンテナとその放射特性—理論的検討—”, *信学技報*, no. A·P85-16, June 1985.
- [2-2.3] 野本真一, 水口芳彦: “回転対称な開口面分布を有するダブルオフセット双反射鏡アンテナ”, *昭60信学総全大*, no. 685, June 1985.
- [2-2.4] B. Ye. Kinber: "On two-reflector antennas," *Radio Eng. Electron. Phys.*, vol. 6, pp.914-920, June 1962.
- [2-2.5] 水口芳彦, 横井 寛: “オフセット形双反射鏡アンテナの曲面について”, *信学論B*, vol. J58-B, no. 2, pp. 94-95, Feb. 1975.
- [2-2.6] 野本真一, 水口芳彦: “一般的なオフセット双反射鏡アンテナにおける交さ偏波消去条件と開口面写像の関係”, *1992信学春全大*, no. B-70, Mar. 1992.
- [2-2.7] 田中宏和, 水沢丕雄: “オフセット複反射鏡アンテナにおける交さ偏波の消去”, *信学論B*, vol. J58-B, no. 12, pp. 643-650, Dec. 1975.
- [2-2.8] Y. Mizugutch, M. Akagawa and H. Yokoi: "Offset dual reflector antenna," presented at *1976 IEEE AP-S International Symp.*, pp. 2-5, Amherst, MA, Oct. 1976.
- [2-2.9] C. Dragone: "Offset multireflector antennas with perfect pattern symmetry and polarization discrimination", *B.S.T.J.*, vol. 57, no. 7, pp.2663-2685, Sept. 1978.
- [2-2.10] 野本真一, 水口芳彦: “オフセット双反射鏡アンテナの鏡面修整について”, *信学技報*, no. A·P86-24, May 1986.
- [2-2.11] V. Galindo-Israel, R. Mitra and A. G. Cha: "Aperture amplitude and phase control of offset dual-reflectors," *IEEE Trans. Antennas & Propag.*, vol. AP-27, no. 2, pp. 154-164, Mar. 1979.

### 第3章

- [3.1] 例えば、G. A. Deschamps: "Ray techniques in electromagnetics," *Proc. IEEE*, vol. 60, pp. 1022-1035, Sept. 1972.
- [3.2] J. B. Keller: "Geometrical theory of diffraction," *J. Opt. Soc. of America*, vol. 52, no.2, pp. 116-130, Feb. 1962.
- [3.3] 例えば、G. L. James: *Geometrical theory of diffraction for electromagnetic waves*, IEE

- electromagnetic waves series 1, Peter Peregrinus, Stevenage, Herts., England, 1976.
- [3.4] 水沢丕雄: “鏡面修整カセグレンアンテナの放射特性に及ぼす副反射鏡放射パターンの効果”, *信学論B*, vol. J52-B, no. 2, pp. 78-85, Feb. 1969.
- [3.5] 野本真一, 水口芳彦: “オフセット双反射鏡アンテナの鏡面修整について”, *信学技報*, no. A·P86-24, May 1986.
- [3.6] 野本真一, 渡辺文夫: “小口径オフセット反射鏡アンテナの鏡面修整法”, *信学論B*, vol. J71-B, no. 11, pp. 1338-1344, Nov. 1988.
- [3.7] T. T. Taylor: "Design of circular apertures for narrow beamwidth and low sidelobes," *IRE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-8, pp. 17-22, Jan. 1960.
- [3.8] 野本真一, 水口芳彦, 渡辺文夫, 山田松一: “超小形地球局アンテナの低サイドローブ化について”, *昭61信学光電波部門全大*, no. S3-2, Aug. 1986.
- [3.9] B. Daveau: "Synthèse et optimisation de réflecteurs de forme spéciale pour antennes," *Rev. Tech. Thomson-CSF*, vol. 2, no.1, pp. 37-55, 1970. あるいは、P. J. B. Clarricoats and G. T. Poulton: "High-efficiency microwave reflector antennas - A review," *Proc. IEEE*, vol. 65, no. 10, pp. 1470-1504, Oct. 1977.
- [3.10] K. A. Green: "Modified Cassegrain antenna for arbitrary aperture illumination," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-11, pp. 589-590, Sept. 1963.

### 第4章

#### (4-1)

- [4-1.1] 例えば、G. Schennum, L. Ersoy, J. Joos, F. Dietrich, and H. Viskum: "The INTELSAT VII antenna farm," *AIAA 13th Communication Satellite Systems Conference*, AIAA-90-0791-CP, part 1, pp. 120-125, March 1990.
- [4-1.2] 野本真一, 水口芳彦: “i字形成形ビームアンテナの鏡面設計法”, *1990信学秋全大*, no. B-111, Aug. 1990.
- [4-1.3] 野本真一, 渡辺文夫: “V字形成形ビームアンテナの鏡面設計法”, *昭63信学秋全大*, no. B-59, Aug. 1988.
- [4-1.4] 野本真一: “U/S字形成形ビーム用反射鏡アンテナ”, *1989信学春全大*, no. B-106, Mar. 1989.
- [4-1.5] S. Nomoto: "Exact GO synthesis of arbitrarily curved fan-beams using doubly curved reflectors," *IEEE Trans. Antennas & Propag.*, (投稿中).
- [4-1.6] 野本真一, 渡辺文夫, 水口芳彦: “扇形素ビームを有するマルチ/成形ビーム

反射鏡アンテナ” , 1989信学春全大, no. B-107, Mar. 1989.

[4-1.7] S. Nomoto, F. Watanabe, Y. Mizuguchi, and T. Shiokawa: "Multiple contoured-beam synthesis using a doubly curved reflector and a one-dimensional feed array," *Proc. ISAP'89*, vol. 4, no. 4B4-2, pp. 953-956, Aug. 1989.

[4-1.8] 野本真一, 水口芳彦: “扇形ビーム反射鏡アンテナのビーム偏向特性” , 1990信学春全大, no. B-67, Mar. 1990.

[4-1.9] "Development of shaped reflector antenna technology for contoured-beam applications," *Request for Proposal*, no. INTEL 784, INTELSAT, 1988.

(4-2)

[4-2.1] H. Seki and M. Kusano: "A wide-angle high-XPD node antenna for local distribution radio system", *Proc. ISAP '85*, vol. II, no. 114-6, pp.421-424, Aug. 1988.

[4-2.2] G.F. Koch and H. Thielen: "Transmitting antenna with cosecant-shaped vertical pattern for the 12-GHz television system," *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-22, no. 9, pp.1391-1393, Sep. 1974.

[4-2.3] 佐藤郁郎, 長沢宏和, 東田陳重, 草野光裕: “複合トーラス鏡面を用いた扇形ビームアンテナの放射特性” , 昭58信学総全大, no. 768, p.3-103, Apr. 1983.

[4-2.4] 山田 隆, 鹿子嶋憲一, 伊丹裕司: “扇形/コセカント2乗ビームアンテナの設計と特性” , 信学論B, vol. J67-B, no. 12, pp.1454-1461, Dec. 1984.

[4-2.5] 野本真一, 渡辺文夫: “21GHz帯LDR基地局用成形ビームアンテナ” , 信学論B-II, vol. J72-B-II, no. 4, pp. 150-161, Apr. 1989.

[4-2.6] 野本真一, 渡辺文夫: “21GHz帯LDR基地局用成形ビームアンテナ” , 昭63信学秋全大, no. B-63, Aug. 1988.

[4-2.7] 野本真一, 渡辺文夫: “端末系広帯域無線基地局用成形ビームアンテナ” , 信学技報, no. A-P88-42, July 1988.

[4-2.8] S. Nomoto and F. Watanabe: "A highly shaped beam antenna for LDR hub stations," *Denshi Tokyo*, no. 22, pp.91-94, Dec. 1990.

[4-2.9] P. J. B. Clarricoats and A. D. Olver: *Corrugated horns for microwave antennas*, IEE electromagnetic waves series 18, Peter Peregrinus, Stevenage, Herts., England, 1984.

[4-2.10] 武田文雄: “コルゲート円形導波管形円すいホーンに関する研究” (学位論文) , 大阪大学, Aug. 1976.

(4-3)

[4-3.1] G. Hyde, R. W. Kreutel, and L. V. Smith: "The Unattended Earth Terminal

Multiple-Beam Torus Antenna," *Comsat Technical Review.*, vol. 4, no. 2, Fall 1974. あるいは、R. Kreutel: "A Multiple-Beam Torus Reflector Antenna for 20/30-GHz Satellite Communications Systems," *AIAA 6th Communication Satellite Systems Conference*, no. AIAA-76-302, April 1976.

[4-3.2] F. Watanabe and Y. Mizuguchi: "An Offset Spherical Tri-Reflector Antenna," *Trans. IECE*, vol. E66, no. 2, pp. 108-115, February 1983.

[4-3.3] F. Watanabe, Y. Mizuguchi, and M. Yamada: "A Beam-Steerable Antenna with an Offset Spherical Reflector for Earth Station," *AIAA 10th Communication Satellite Systems Conference*, AIAA-84-0672, pp. 117-124, March 1984.

[4-3.4] 野本真一, 渡辺文夫, 水口芳彦: “鏡面修整オフセット複反射鏡アンテナの交さ偏波最小条件” , 1991信学春全大, no. B-85, Mar. 1991.

[4-3.5] C. Dragone: "Offset multireflector antennas with perfect pattern symmetry and polarization discrimination", *B.S.T.J.*, vol. 57, no. 7, pp.2663-2685, Sept. 1978.

[4-3.6] 渡辺文夫, 水口芳彦, 山田松一: “マルチビームオフセット球面鏡アンテナ-給電系の斜交配置構成による-” , 信学論B, vol. J69-B, no. 11, pp.1393-1399, Nov. 1986.

[4-3.7] S. Nomoto, F. Watanabe, Y. Mizuguchi, A. Abe, T. Ino, and S. Ohno: "A Ku-band 4-beam earth station antenna with a 6.5-m fixed spherical reflector," *AIAA 14th Communication Satellite Systems Conference*, AIAA-92-1903, pp. 702-710, Mar. 1992.

(4-4)

[4-4.1] V. Krichevsky and D. F. DiFonzo: "Optimum Feed locus for beam scanning in the symmetry plane of offset Cassegrainian antennas: Two-dimensional case," *COMSAT Technical Review*, vol. 11, no. 1, pp. 131-157, 1981.

[4-4.2] C. Dragon: "First-order correction of aberrations in Cassegrainian and Gregorian antenna," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-31, no. 5, pp. 764-774, Sept. 1983.

[4-4.3] 本間嘉弘, 片木孝至, 水沢丕雄, 熊沢弘之: “回転対称な複反射鏡マルチビームアンテナ” , 信学論B, vol. J64-B, no. 7, pp. 690-697, July 1981.

[4-4.4] 水口芳彦, 渡辺文夫: “オフセット双焦点アンテナ” , 信学論B, vol. J66-B, no. 1, pp. 71-78, Jan. 1983.

[4-4.5] 水口芳彦, 渡辺文夫: “双反射鏡形マルチビームアンテナの鏡面設計法” , 昭

57信学部門全大, no. 68, 1982.

- [4-4.6] 水口芳彦, 渡辺文夫, 野本真一: “マルチビーム用多焦点アンテナの鏡面設計法”, *信学技報*, no. A·P84-28, June 1984.
- [4-4.7] 野本真一, 水口芳彦: “多焦点アンテナの最適設計法”, *昭59信学光電波部門全大*, no. 92, Aug. 1984.
- [4-4.8] Y. Mizuguchi, S. Nomoto, F. Watanabe, and M. Yamada: "A multi-focal reflector antenna for multi-beam application," *Proc. ISAP'85*, vol. 2, no. 111-1, pp. 345-348, Aug. 1985.
- [4-4.9] 野本真一, 水口芳彦: “多焦点アンテナの放射特性”, *信学技報*, no. A·P 85-85, Dec. 1985.
- [4-4.10] S. Nomoto, Y. Mizuguchi, F. Watanabe, and M. Yamada: "Offset multi-focal reflector antenna," presented at *1986 IEEE AP-S International Symp.*, vol. 2, pp. 267-270, Philadelphia, PA, June 1986.
- (4-5)
- [4-5.1] 例えば、更田博昭, 正村達郎: “衛星通信サービスの新しい可能性”, *信学誌* vol. 72, no. 1, pp.63-72, Jan. 1989.
- [4-5.2] 野本真一, 渡辺文夫, 塩川孝泰: “高性能小形地球局アンテナ”, *国際通信の研究*, no. 143, pp.19-28, Jan. 1990.
- [4-5.3] 野本真一, 水口芳彦, 渡辺文夫, 山田松一: “超小形地球局アンテナの低サイドロープ化について”, *昭61信学光電波部門全大*, no. S3-2, Aug. 1986.
- [4-5.4] P. J. B. Clarricoats and A. D. Olver: *Corrugated horns for microwave antennas*, IEE electromagnetic waves series 18, Peter Peregrinus, Stevenage, Herts., England, 1984.
- [4-5.5] 武田文雄: “コルゲート円形導波管形円すいホーンに関する研究” (学位論文), 大阪大学, Aug. 1976.
- [4-5.6] T. T. Taylor: "Design of circular apertures for narrow beamwidth and low sidelobes," *IRE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-8, pp. 17-22, Jan. 1960.
- [4-5.7] 水口芳彦, 赤川正孝, 横井 寛: “オフセットグレゴリアンアンテナ”, *信学論B*, vol. J61-B, no. 3, pp. 166-173, Mar. 1978.
- [4-5.8] 野本真一, 渡辺文夫: “小口径オフセット反射鏡アンテナの鏡面修整法”, *信学論B*, vol. J71-B, no. 11, pp. 1338-1344, Nov. 1988.
- [4-5.9] 野本真一, 渡辺文夫: “Ku帯超小形地球局アンテナ - 1.2 m修整オフセットグレゴリアンアンテナの鏡面設計 -”, *信学技報*, no. A·P87-84, Oct.

1987.

- [4-5.10] 野本真一, 渡辺文夫: “Ku帯1.2 m修整オフセットグレゴリアンアンテナ”, *昭63信学春全大*, no. SB-1-1, Mar. 1988.
- [4-5.11] F. Watanabe, S. Nomoto and T. Shiokawa: "A Low Sidelobe Shaped Offset Gregorian Antenna for 14/11 GHz Band VSAT," *Proc. ISAP'89*, vol. 3, no. 3C1-4, pp. 679-682, Aug. 1989.
- [4-5.12] 渡辺文夫, 野本真一, 宮野憲明, 近藤治人: “Ku帯1.2 m修整オフセットグレゴリアンアンテナ”, *昭63信学秋全大*, no. B-67, Aug. 1988.
- [4-5.13] 渡辺文夫, 野本真一, 福井 寛, 緒方史明, 三国雅明: “Ku帯1.2 m修整オフセットグレゴリアンアンテナ”, *昭63信学秋全大*, no. B-68, Aug. 1988.
- [4-5.14] 渡辺文夫, 野本真一, 小助川和夫, 白石 彰: “Ku帯超小形地球局アンテナ”, *昭63信学秋全大*, no. B-69, Aug. 1988.
- [4-5.15] D. M. Himmelblau: *Applied nonlinear programming*, chap.7, McGraw-Hill, New York, 1972.
- [4-5.16] *ibid.*, chap.4.
- [4-5.17] *Recommendation 580-1*, CCIR SG-4, 1986.

## 第5章

- [5.1] M. Mehler, S. Tun and N. Adatia: "Direct GO synthesis of shaped beam reflector antennas", *IEE Proc.*, vol. 133, pt. H, no. 3, pp.213-220, June 1986.
- [5.2] W. J. Hall and P. C. Wilcockson: "Shaped reflector antenna design using optimisation techniques", presented at *International colloquium on shaped beam satellite antennas*, IEE Digest no. 1987/95, London, Nov. 1987.
- [5.3] S. J. Stirland: "Shaped reflectors: Optimisation technique and examples", presented at *International colloquium on shaped beam satellite antennas*, IEE Digest no. 1987/95, London, Nov. 1987.
- [5.4] J. Bergmann, R. C. Brown, P. J. B. Clarricoats, and H. Zhou: "Synthesis of shaped-beam reflector antenna patterns", *IEE Proc.*, vol. 135, pt. H, no. 1, pp.48-53, Feb. 1988.
- [5.5] 例えば、J. R. Fienup: "Phase retrieval algorithms: A comparison", *Appl. Opt.*, vol. 21, pp.2758-2769, 1982.

研究業績

(○は論文のうち筆者の主業績であって本論文を構成しているもの)

種別	題名	発表年月	発表・発行 掲載誌名	連名者
1. 論文	○ A multi-focal reflector antenna for multi-beam application	1985年 9月	Proc. ISAP'85, vol. 2, no. 111-1, pp.345-348	Y. Mizuguchi F. Watanabe M. Yamada
	○ On-board experiments on L-band multipath fading and its reduction by use of the polarization shaping method	1986年 2月	Trans. IECE, vol. E69, no. 2, pp. 124-131	Y. Karasawa M. Yasunaga T. Shiokawa
	○ Offset multi-focal reflector antenna	1986年 6月	Proc. 1986 IEEE AP-S, vol. 2, pp.267-270	Y. Mizuguchi F. Watanabe Y. Yamada
	○ 小口径オフセット双反射鏡アンテナの鏡面修整法	1988年11月	電子情報通信学会論文誌 (B), vol. J71-B, no.11, pp.1338-1344	渡辺 文夫
	○ Shaped reflector design for small-size offset dual reflector antennas	1988年12月	1988 Piero Fanti International Prize	F. Watanabe
	○ 21GHz帯LDR基地局用成形ビームアンテナ	1989年 4月	電子情報通信学会論文誌 (B-II), vol. J72-B-II, no.4, pp.150-161	渡辺 文夫
	○ A low sidelobe shaped offset Gregorian antenna for 14/11GHz band VSATs	1989年 9月	Proc. ISAP'89, vol. 3, no. 3C1-4, pp.679-682	F. Watanabe T. Shiokawa
	○ Multiple contoured-beam synthesis using a doubly curved reflector and a one-dimensional feed array	1989年 9月	Proc. ISAP'89, vol. 4, no. 4B4-2, pp.953-956	F. Watanabe Y. Mizuguchi T. Shiokawa
	○ 高性能小形地球局アンテナ	1990年 1月	国際通信の研究, no. 143, pp. 19-28	渡辺 文夫 塩川 孝泰
	○ Application of direct far-field pattern synthesis to satellite communications antennas	1990年 9月	Proc. ITS'90, pp.285-292	なし
○ A Ku-band 4-beam earth station antenna with a 6.5m fixed spherical reflector	1992年 3月	14th AIAA Int'l Comm. Satellite Systems Conf., no.AIAA-92-1903, pp. 702-710	F. Watanabe Y. Mizuguchi A. Abe T. Ino S. Ohno	

研究業績

(○は論文のうち筆者の主業績であって本論文を構成しているもの)

種類別	題名	発表 発行年月	発表・発行 掲載誌名	連名者
	○ 双反射鏡アンテナにおける開口面写像の回転対称条件—ダブルオフセット配置を許容する新しい鏡面系—	1992年 7月	電子情報通信学会論文誌 (B-II), vol. J75-B-II, no. 7, pp.464-471	水口 芳彦
	○ An offset toroidal tri-reflector system for multi-beam antenna applications	1992年 9月	Proc. ISAP'92, vol. 2, no. 2A2-2, pp.317-320	Y. Mizuguchi
	Experiments on a beam-steerable leaky waveguide antenna	1992年 9月	Proc. ISAP'92, vol. 2, no. 2A2-2, pp.317-320	Y. Kamiya H. Iwai T. Shiokawa
2. 講演	マルチビーム用多焦点アンテナの鏡面設計法	1984年 6月	信学技報, A・P 84-28, pp. 15-20	水口 芳彦 渡辺 文夫
	移動衛星通信用球面配列アンテナ	1984年 6月	信学技報, A・P 84-30, pp. 29-35	塩川 孝泰 渡辺 文夫
	多焦点アンテナの最適設計法	1984年 9月	昭和59年度信学会光・電波部門全大, no. 92	水口 芳彦
	海面反射フェーディング軽減方式の海洋実験報告 (II)	1984年11月	信学技報, A・P 84-85, pp. 7-14	唐沢 好男 塩川 孝泰
	航空衛星通信用アンテナシステムに関する一検討	1985年 2月	信学技報, A・P 84-123, pp. 1-6	安永 正幸 唐沢 好男 塩川 孝泰 山田 松一
	海事衛星通信における海面反射フェーディング	1985年 3月	第293回 URSI-F 小委員会資料	安永 正幸 唐沢 好男 塩川 孝泰 山田 松一
	デジタル船舶局システムの衛星通信実験—海面反射フェーディング軽減効果—	1985年 3月	昭和59年度信学会通信部門全大, no. 705	塩川 孝泰 結城 浩徳 唐沢 好男 樫木 勸四郎
	海面反射フェーディング軽減方式の海洋実験報告 (III)	1985年 4月	信学技報, A・P 85-1, pp. 1-6	唐沢 好男 安永 正幸 塩川 孝泰

研究業績

種類別	題名	発表 発行年月	発表・発行 掲載誌名	連名者
	回転対称な開口面分布を有するダブルオフセット双反射鏡アンテナとその放射特性—理論的検討—	1985年 6月	信学技報, A・P 85-16, pp. 25-30	水口 芳彦
	航空衛星通信用アンテナシステムに関する検討—フェーディング軽減対策	1985年 9月	昭和60年度信学会総全大, no. S5-18	塩川 孝泰 安永 正幸 唐沢 好男 山田 松一
	回転対称な開口面分布を有するダブルオフセット双反射鏡アンテナ	1985年 9月	昭和60年度信学会総全大, no. 685	水口 芳彦
	多焦点アンテナの放射特性	1985年12月	信学技報, A・P 85-85, pp. 1-6	水口 芳彦
	オフセット双反射鏡アンテナの鏡面修整について	1986年 5月	信学技報, A・P 86-24, pp. 23-30	水口 芳彦
	超小形地球局アンテナの低サイドローブ化について	1986年 9月	昭和61年度信学会光・電波部門全大, no. S3-2	水口 芳彦 渡辺 文夫 山田 松一
	クラスタホーン給電マルチビーム反射鏡アンテナの励振係数の一決定法	1987年 3月	昭和62年信学会総全大, no. 640	渡辺 文夫 岩崎 学
	Ku帯超小形地球局アンテナ—1.2m修整オフセットグレゴリアンアンテナの鏡面設計—	1987年10月	信学技報, A・P 87-84, pp. 23-30	渡辺 文夫
	成形ビーム用反射鏡アンテナの鏡面決定問題について	1988年 3月	昭和63年信学会春全大, no. B-32	渡辺 文夫
	Ku帯1.2m修整オフセットグレゴリアンアンテナ	1988年 3月	昭和63年信学会春全大, no. SB-1-1	渡辺 文夫
	2重曲面反射鏡に対する厳密解の存在および一意性定理	1988年 6月	信学技報, A・P 88-23, pp. 93-99	渡辺 文夫
	端末系広帯域無線基地局用成形ビームアンテナ	1988年 7月	信学技報, A・P 88-42, pp. 57-64	渡辺 文夫

研究業績

種類別	題名	発表年月	発表・発行 掲載誌名	連名者
	V字形成形ビームアンテナの鏡面設計法	1988年 9月	昭和63年信学会秋全大, no. B-59	渡辺 文夫
	21GHz帯LDR基地局用成形ビームアンテナ	1988年 9月	昭和63年信学会秋全大, no. B-63	渡辺 文夫
	Ku帯1.2m修整オフセットグレゴリアンアンテナ	1988年 9月	昭和63年信学会秋全大, no. B-67	渡辺 文夫 宮野 憲明 近藤 治人
	Ku帯1.2m修整オフセットグレゴリアンアンテナ	1988年 9月	昭和63年信学会秋全大, no. B-68	渡辺 文夫 福井 覚 緒方 史明 三国 雅明
	Ku帯超小形地球局アンテナ	1988年 9月	昭和63年信学会秋全大, no. B-69	渡辺 文夫 小助川和夫 白石 彰
	U/S字形成形ビーム用反射鏡アンテナ	1989年 3月	1989年信学会春全大, no. B-106	なし
	扇形素ビームを有するマルチ/成形ビーム反射鏡アンテナ	1989年 3月	1989年信学会春全大, no. B-107	渡辺 文夫 水口 芳彦
	5GHz帯オフセットグレゴリアン・アンテナ	1989年 3月	1989年信学会春全大, no. B-110	岡田, 渡辺 村上, 中山 渡辺 文夫
	斜め開口をもつ円すいホーンアンテナのGTD解析	1989年 6月	信学技報, A・P 89-21, pp. 7-14	なし
	非対称ホーンで給電されたオフセットパラボラアンテナの交さ偏波特性に関する一検討	1989年 9月	1989年信学会秋全大, no. B-67	なし
	扇形ビーム反射鏡アンテナのビーム偏向特性	1990年 3月	1990年信学会春全大, no. B-67	水口 芳彦
	i字形成形ビームアンテナの鏡面設計法	1990年 3月	1990年信学会春全大, no. B-111	水口 芳彦

研究業績

種類別	題名	発表年月	発表・発行 掲載誌名	連名者
	開口面アンテナの新しい設計技術	1990年12月	国際衛星通信時代, vol. 22, pp. 49-65	塩川 孝泰
	A highly shaped beam antenna for LDR hub stations	1991年 2月	Denshi Tokyo, no. 22, pp. 91-94	渡辺 文夫
	鏡面修整オフセット複反射鏡アンテナの交さ偏波最小条件	1991年 3月	1991年信学会春全大, no. B-85	水口 芳彦
	オフセット3枚トーラス反射鏡マルチビームアンテナの提案	1991年 9月	1991年信学会秋大, no. B-27	水口 芳彦
	ビームチルト角可変機能を有する漏れ波型平面アンテナの試作	1991年10月	信学技報, A・P 91-91, pp. 33-38	岩井 誠人 神谷 嘉明
	波長に比べて大きい物体による前方散乱波の評価について	1992年 3月	1992年信学会春全大, no. B-12	水口 芳彦 神谷 嘉明
	一般的なオフセット双反射鏡アンテナにおける交さ偏波消去条件と開口面写像の関係	1992年 3月	1992年信学会春全大, no. B-70	水口 芳彦
3. 著書	なし			
4. 特許	国内出願 19件 外国出願 10件			

