

2つの異なる断面形状を有する  
ビーム走査可能な反射鏡アンテナの  
構成と設計法に関する研究

2015年11月

瀧川 道生

# 目次

第1章	序論	1
1.1	研究の背景と目的	1
1.2	イメージングリフレクタアンテナの動作原理	5
1.3	本論文の構成	9
第2章	センターフィード形式のビーム走査可能な反射鏡アンテナ	11
2.1	まえがき	11
2.2	アンテナの構成と設計法	13
2.2.1	構成	13
2.2.2	設計法	20
2.3	試作アンテナの設計	23
2.4	試作アンテナの測定	36
2.5	むすび	40
第3章	非ビーム走査面を軸偏位形式としたビーム走査可能な反射鏡アンテナ	41
3.1	まえがき	41
3.2	アンテナの構成と設計法	43
3.2.1	構成	43
3.2.2	設計法	46
3.3	試作アンテナの設計	48
3.4	試作アンテナの測定	56
3.5	まとめ	61
第4章	楕円開口形状を有するビーム走査可能な反射鏡アンテナ	62
4.1	まえがき	62
4.2	アンテナの構成と設計法	64
4.3	試作アンテナの設計	67
4.4	試作アンテナの測定	74
4.5	まとめ	78
第5章	結論	79
	参考文献	82
	謝辞	84
	研究業績	86
	付録 A：第2章の鏡面形状の式の導出	91

# 第1章 序論

## 1.1 研究の背景と目的

リモートセンシングとは、遠隔から観測対象物に関する画像や物理的性質を取得することである。その中で、人工衛星に搭載した観測センサによって取得したデータから様々な分析を行う分野を衛星リモートセンシングという[1]。観測センサは、光の領域で観測する光学センサと、電波の領域で観測する電波センサの2種類に大別され、さらに観測対象物からの光や電波を観測する受動センサと、観測対象物に光や電波を照射して反射してきたものを観測する能動センサに分類される。電波センサでかつ能動センサのひとつとして、合成開口レーダ（SAR：Synthetic Aperture Radar）が知られている。光学センサに比べて、昼夜、天候によらず観測が可能な全天候型の特長を有する[2][3]。例えば、1年中雲に覆われている熱帯地域や、火山の噴火で噴煙が上空を覆う地域の観測などに適している。我が国ではSARを搭載した衛星として、1992年に打上げられた地球資源衛星[4]（ふよう1号, JERS-1: Japanese Earth Resources Satellite-1, 質量2t以上）、2006年、2014年に打ち上げられた陸域観測衛星シリーズ[5][6]（だいち1号, だいち2号, ALOS-1,2: Advanced Land Observing Satellite-1,2, 質量2t以上）などを開発し、運用を行っている。そして、その観測データは地球規模の様々な観測に広く利用されている。

世界各地で発生している自然災害の監視や、エネルギー資源の探索、森林の違法伐採に関する環境の監視など、衛星リモートセンシングに対する需要の増加により、観測データの高分解能化、複数偏波による多偏波化、観測回数の高頻度化、観測領域の広範囲化が求められている[7][8][9]。近年、このような要求に対して、複数の衛星を組み合わせた衛星連携システムの研究開発が活発化している[10]。複数の衛星を打ち上げるため、衛星1機のコストを

下げる必要がある。衛星の低コスト化に向けて、衛星の小型化、軽量化が要求される。そして搭載するアンテナについても、軽量化と低コスト化が望まれる。ここで小型衛星の定義であるが、我が国の宇宙基本計画[11]では1トン以下とされている。海外では100kg以下の超小型衛星の報告[12]もあるが、SARのアンテナに要求される高利得でかつビーム走査機能を有するアンテナの実現のためには、ある程度の大きさの衛星が必要と考えられる。そこで、本論文では衛星連携システムの例であるドイツのSAR-Lupe[13]（5機運用、約800kg/機）よりもやや小型の500kg級の衛星をターゲットとする。

ALOS-1,2に代表される大型衛星に搭載するSARのアンテナは、高機能なアクティブフェーズドアレーアンテナ（APAA：Active Phased Array Antenna）の適用例が多い。しかし、質量、コストの面で小型衛星への搭載は難しい。そこで、軽量材料の適用や、小型衛星への搭載を考慮した展開、収納が可能な反射鏡アンテナ方式が注目されている。海外においては、SAR-Lupe[13]、MAPSAR[14]、TECSAR[15]が、反射鏡アンテナ方式を採用している。反射鏡アンテナ方式を用いた場合の具体的な軽量化に関して、APAA方式のSARのアンテナと比較する。ドイツのTerraSAR-X[16]（約1.2t）のAPAAの大きさは4.8m×0.7mで201.6kgである。500kg級の小型衛星においては、燃料や他の機器の質量配分を考慮し、アンテナに配分可能な質量は100kg以下が想定される。衛星搭載用の反射鏡アンテナの多くは、線膨張係数が小さく、強度があり、かつ軽量の炭素繊維強化プラスチック（CFRP：Carbon Fiber Reinforced Plastics）が採用されている。CFRPで製造した場合の質量密度は約1kg/m<sup>2</sup>以下[17]と、とても軽量である。よって、同じ大きさの反射鏡アンテナを考えたとき、その質量はわずか3.4kgである。前述の質量密度のAPAAの半分の大きさの一次放射器（2.4m×0.35m）を搭載しても50.4kg、反射鏡と一次放射器の合計は53.8kgとなり、反射鏡アンテナを採用することで、少なくとも約4分の1の軽量化を見込むことが可能となる。また、アンテナを構成する部品点数の観点からも低コスト化が見込まれ、小型衛星には反射鏡アンテナ方式の適用が有効であると考えられる。

ビーム走査機能を有する反射鏡アンテナは、一次放射器の位置を変位させることによってビーム走査する変位給電方式と、一次放射器をアレーアンテ

ナとしたアレーフィード方式に大別される[18]. TECSAR は変位給電方式のセンターフィード形式の反射鏡アンテナである. 変位給電方式は, ビーム走査時のスピルオーバーの増加および収差の影響により放射特性が劣化する[19]. 一方, アレーフィード方式の一つとして, イメージングリフレクタアンテナ[20]が知られている. イメージングリフレクタアンテナは, 一次放射器の拡大器として動作する鏡面系を有し, ビーム走査特性に優れた反射鏡アンテナである. しかし, イメージングリフレクタアンテナは, 一般的にオフセット形式のため, アンテナの占有体積が大きく, 小型衛星への搭載に適していない. オフセット形式よりも占有体積が小さくなる形式は, センターフィード形式である[18]. MAPSAR[14]やTECSAR[15]もこの形式である. イメージングリフレクタアンテナをセンターフィード形式とした場合, 一次放射器が主反射鏡上に作る影領域が主反射鏡の大部分を覆うため, 開口能率が著しく劣化する. しかし, ビーム走査特性に優れたイメージングリフレクタアンテナをセンターフィード形式の反射鏡アンテナで実現することができれば, その効果は大きい. これまでに述べた内容について, 衛星搭載用の SAR のアンテナ方式の比較を表 1.1 に, ビーム走査可能な反射鏡アンテナ方式の比較を表 1.2 にまとめる.

以上より, 本研究の目的は, 小型衛星に搭載する SAR のアンテナとして, イメージングリフレクタアンテナの特長を生かした, ビーム走査特性に優れた新しいセンターフィード形式の反射鏡アンテナの構成と設計法を明らかにすることである.

表 1.1 衛星搭載用の SAR のアンテナ方式の比較

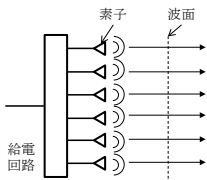
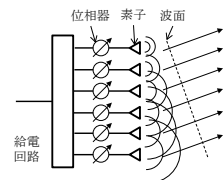
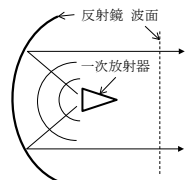
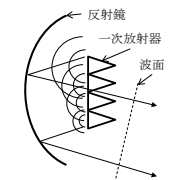
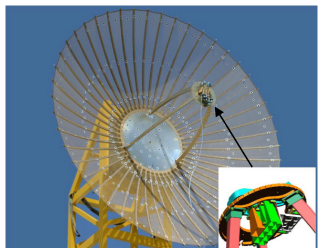
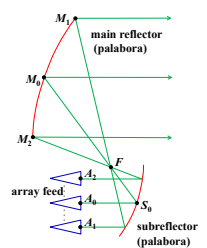
項目	アレーアンテナ	フェーズドアレーアンテナ	反射鏡アンテナ (単一フィード)	反射鏡アンテナ (複数フィード)
方式				
概要	小さい素子で大開口アンテナを構成	各素子の位相を制御	単一の一次放射器と鏡面系で構成	複数の一次放射器と鏡面系で構成
ビーム走査	<ul style="list-style-type: none"> <li>衛星の姿勢制御</li> <li>アンテナ駆動</li> </ul>	数十度可能	<ul style="list-style-type: none"> <li>衛星の姿勢制御</li> <li>アンテナ駆動</li> </ul>	数度程度可能 (ビーム走査時の利得低下大)
質量	フェーズドアレーアンテナより軽量	アクティブ系のため機器多数で質量大	簡易な構成で軽量	簡易な構成で軽量
適用例	ALOS-1	<ul style="list-style-type: none"> <li>ALOS-2</li> <li>TerraSAR-X</li> </ul>	SAR-Lupe	<ul style="list-style-type: none"> <li>TECSAR</li> <li>MAPSAR</li> </ul>

表 1.2 ビーム走査可能な反射鏡アンテナ方式の比較

項目	変位給電方式[15]	アレーフィード方式[20]
方式		
概要	一次放射器を複数配置し、それぞれに対応したビームを形成	一次放射器はアレーアンテナで構成し、位相制御でビームを形成
ビーム走査	<ul style="list-style-type: none"> <li>離散的なビーム走査</li> <li>ビーム走査時の特性劣化が大</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>連続的なビーム走査</li> <li>ビーム走査時の特性劣化が小</li> </ul>
適用例	TECSAR	無

## 1.2 イメージングリフレクタアンテナの動作原理

イメージングリフレクタアンテナの構成を図 1.1 に示す。\$A\_0\$ は給電アレー上の中心点、\$S\_0\$ は副反射鏡面上の中心点、\$F\$ は主反射鏡と副反射鏡の焦点である。鏡面系は焦点を共有し、鏡軸方向が逆向きの相似形パラボラ鏡面を主反射鏡および副反射鏡とする複反射鏡アンテナである。一次放射器は給電アレーで構成され、通常のフェーズドアレーアンテナと同様に全素子を励振して平面波を放射する。主反射鏡を介した二次パターンにおけるビーム走査は、給電アレーのビーム走査によって実現される。このとき、高い開口能率を実現するため、図 1.1 (b), 図 1.1 (c) に示したように、幾何光学的にはビーム走査に関わらず給電アレーから放射された光線が常に主反射鏡全体を照射するように、給電アレーと副反射鏡との距離 \$A\_0S\_0\$ を設定する。距離 \$A\_0S\_0\$ が適切でない場合の光線の様子を図 1.2, 図 1.3 に示す。なお、図 1.2, 図 1.3 中では、最適な給電アレーの位置を破線で示している。よって、給電アレーの設置位置が適切でない場合、ビーム走査角に伴って主反射鏡の照射領域が変動して、有効開口が減少するとともにスピルオーバーが生じ、開口能率が低下する様子がわかる。

給電アレーと副反射鏡との距離 \$A\_0S\_0\$ を適切に設定した場合のイメージングリフレクタアンテナの動作について考える。このとき、図 1.1 に示したように、給電アレー開口上の点 \$A\_i\$ (\$i=0,1,2\$) から放射された光線は、ビーム走査に関わらず、それぞれ、常に主反射鏡上の点 \$M\_i\$ (\$i=0,1,2\$) に到達する。すなわち図 1.4 に示したように給電アレーの像がアンテナ開口上に形成されることになる。給電アレー素子と開口上に形成される像との関係を、図 1.4 (b) に示した中心素子を例に説明する。アンテナ開口径 \$D\$ と給電アレー開口径 \$D\_f\$ とを用いて、倍率 \$m\$ を次式で定義する。

$$m = \frac{D}{D_f} \quad (1.1)$$

給電アレー上の中心点 \$A\_0\$ から放射された光線が主反射鏡上の中心点 \$M\_0\$ に到達することから、レンズの式より次の関係が得られる。

$$\frac{1}{FS_0} = \frac{1}{A_0S_0} + \frac{1}{FS_0 + FM_0} \quad (1.2)$$

ここで、主反射鏡と副反射鏡とは相似であることから、次の関係がある。

$$\frac{FM_0}{FS_0} = \frac{D}{D_f} = m \quad (1.3)$$

式 (1.3) を式 (1.2) に代入して、給電アレーと副反射鏡との距離  $A_0S_0$  は、次式で与えられる。

$$A_0S_0 = \frac{m+1}{m} \cdot FS_0 \quad (1.4)$$

一方、副反射鏡と主反射鏡との距離  $S_0M_0$  は式 (1.3) より次式で与えられる。

$$S_0M_0 = FS_0 + FM_0 = (m+1) \cdot FS_0 \quad (1.5)$$

給電アレー素子の開口上に形成される像の倍率は次式となる。

$$m = \frac{S_0M_0}{A_0S_0} \quad (1.6)$$

以上より、イメージングリフレクタアンテナは、給電アレーを  $m$  倍に拡大した直接放射アレーが主反射鏡の開口面上にあることと等価になる。したがって、給電アレーの像である直接放射アレーを、視野内にグレーティングローブが発生しない等の必要な条件を満足するように設計し、これを  $m$  分の 1 に縮小したものが、イメージングリフレクタアンテナの給電アレー（一次放射器）の素子間隔となる。このため、イメージングリフレクタアンテナの給電アレーの素子数は、原理的に直接放射アレーの素子数と等しくなる。表 1.3 にイメージングリフレクタアンテナの各パラメータと倍率の関係をまとめておく。

表 1.3 イメージングリフレクタアンテナの各パラメータと倍率の関係

	array feed	Image of array feed on main reflector
element diameter	$d_f$	$m \cdot d_f = d_{img}$
element space	$p_f$	$m \cdot p_f$
element number	$n$	$n$
array diameter	$D_f$	$m \cdot D_f$



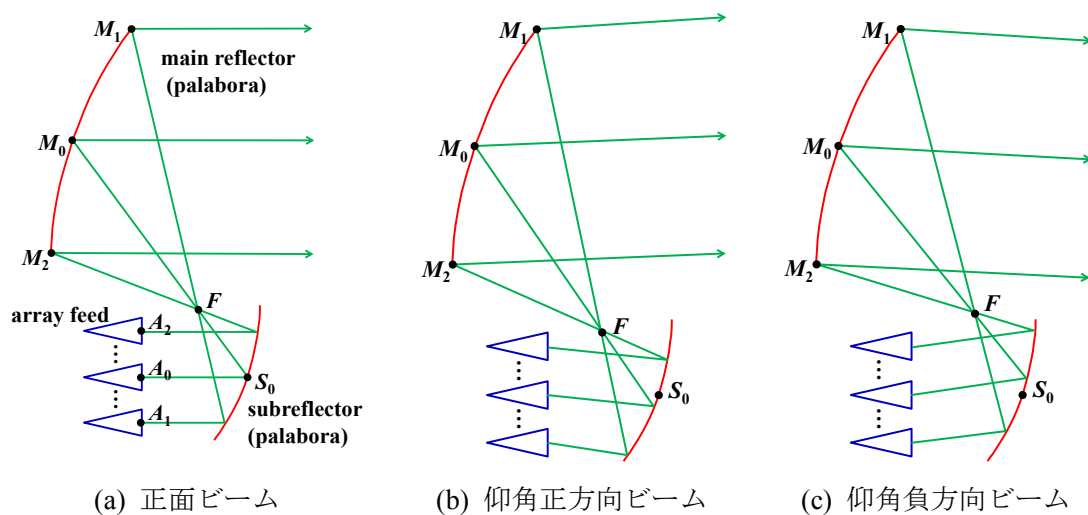


図 1.1 アンテナ構成とレイトレース (給電アレーと副反射鏡の距離が適切な場合)

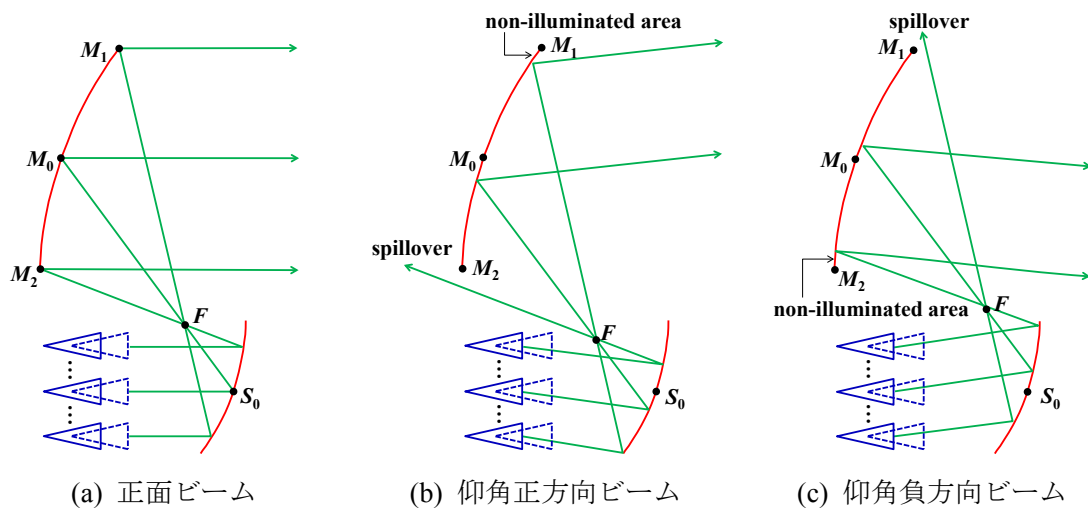


図 1.2 アンテナ構成とレイトレース (給電アレーと副反射鏡の距離が遠い場合)

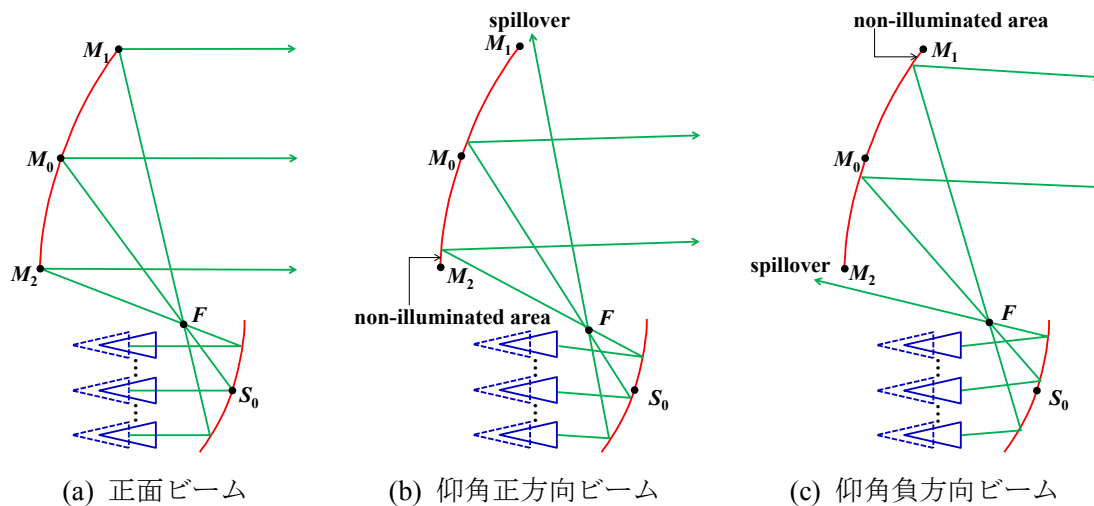


図 1.3 アンテナ構成とレイトレース (給電アレーと副反射鏡の距離が近い場合)

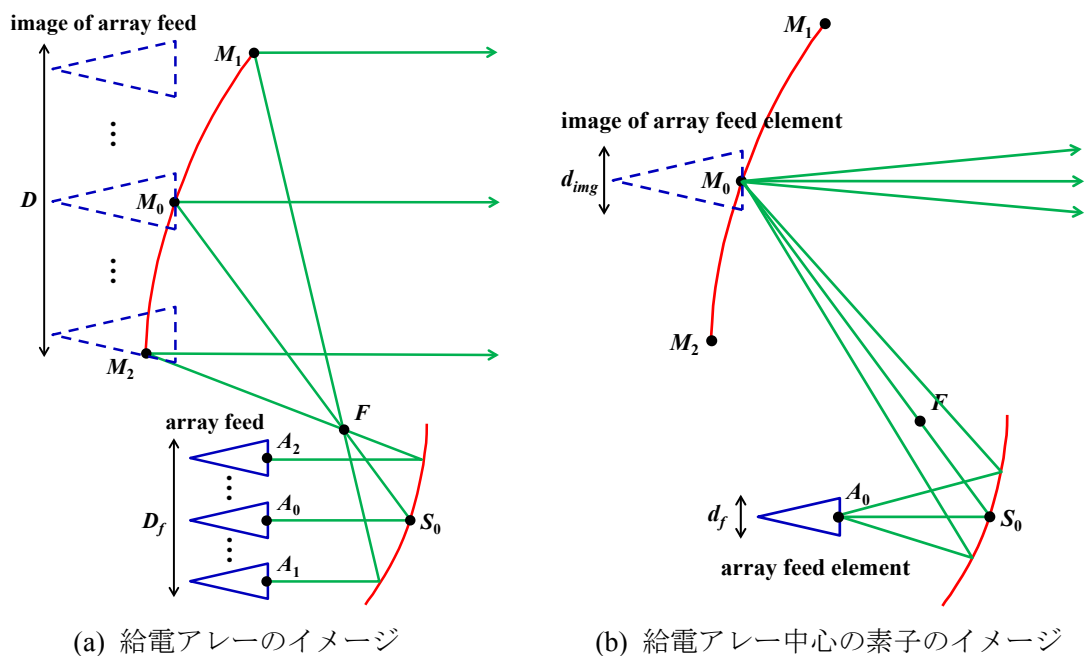


図 1.4 イメージングリフレクタアンテナの動作

## 1.3 本論文の構成

本論文は、小型衛星に搭載する新しい SAR のアンテナとして、2つの異なる断面形状で構成するビーム走査可能な反射鏡アンテナについて研究したものである。そして、ビーム走査特性に優れたイメージングリフレクタアンテナの特長を生かした新しいセンターフィード形式の反射鏡アンテナの構成と設計法を明らかにすることを目的とする。なお、本論文における反射鏡アンテナは、ビーム走査機能を一次元と限定とするが、衛星の姿勢制御や複数衛星による連携で補えばよいと考えられる。本論文は、全体で5章から構成されており、以下に各章の概要を述べる。

第1章では、本研究の背景および目的を示すとともに、本論文の構成について述べる。

第2章では、一次元にビーム走査可能なセンターフィード形式の反射鏡アンテナを提案し、基本特性を確認した結果について述べる。ビーム走査特性に優れた反射鏡アンテナの一つとしてイメージングリフレクタアンテナが知られている。一次放射器の位置を変化させてビーム走査する変位給電方式の反射鏡アンテナよりも、高い開口能率を有し、かつビーム走査時の利得低下が少ないことが特長である。しかし、従来のイメージングリフレクタアンテナはオフセット形式のため、占有体積が大きく、搭載リソースに限りがある小型衛星には適さない。そこで、ビーム走査面の形状をイメージングリフレクタアンテナ、これと直交する非ビーム走査面の形状をカセグレンアンテナとした構成を提案する。本アンテナの動作原理を述べるとともに、二重曲面反射鏡の理論[21][22]を応用した設計法を示す。この設計法を用いて設計した試作アンテナの設計結果および測定結果をもとに、本アンテナの基本動作を検証する。また、ビーム走査時の利得変化を従来の変位給電方式の反射鏡アンテナと比較し、本アンテナの構成および設計法の有効性を明らかにする。

第3章では、多重反射による放射特性の劣化を低減する一次元にビーム走査可能な反射鏡アンテナを提案する。第2章で述べたアンテナにおいて、一次放射器と副反射鏡の間での多重反射により、サイドローブの劣化や利得の周波数変動が確認された。そこで、非ビーム走査面の形状にリングフォーカ

スカセグレンアンテナを採用する。リングフォーカス形式の反射鏡アンテナ [23]は、副反射鏡を表現する 2 つの焦点の軸を傾けた鏡面構成であり、鏡面幾何光学的には一次放射器から放射された電波が副反射鏡で反射した後、一次放射器へ入射すること無く設計することが可能となる。第 2 章のアンテナとの比較のため、同サイズの試作アンテナの設計結果および測定結果をもとに、本アンテナの構成および設計法の有効性を明らかにする。

第 4 章では、実用的なアンテナの設計を目的とし、第 3 章の鏡面構成を適用した広域観測を実現する楕円開口形状を有する一次元にビーム走査可能な反射鏡アンテナの設計について述べる。一般的に SAR では、アンテナの 3dB ビーム幅内を撮像範囲[2]とすることが多い。広範囲の観測を実現するためには、所望の分解能を達成するアンテナ利得を確保する開口面積を有しつつ、衛星進行方向 (アジマス方向) の開口径よりもそれと直交する方向 (エレベーション方向) の開口径を小さくする。そのため、直交断面で開口径が異なるアンテナの設計が必要となる。第 3 章の設計法を用いて、直交断面内でビーム幅が 2 倍以上異なる楕円開口形状の試作アンテナを設計し、その設計および測定をもとに、本アンテナの構成および設計法の有効性を検証する。

第 5 章は結論であり、本論文で述べる 2 つの異なる断面形状を有するビーム走査特性に優れた新しいセンターフィード形式の反射鏡アンテナの構成と設計法に関する研究の結論と成果を総括して述べる。

## 第2章

# センターフィード形式のビーム走査可能な 反射鏡アンテナ

小型衛星に搭載する新しい SAR のアンテナとして、センターフィード形式のビーム走査可能な反射鏡アンテナを提案する。鏡面構成は、ビーム走査面の形状をイメージングリフレクタアンテナ[20]、これと直交する非ビーム走査面の形状をカセグレンアンテナとした複反射鏡アンテナであり、一次放射器は一次元フェーズドアレーアンテナで構成する。イメージングリフレクタアンテナは、一般的にオフセット形式であるが、これをセンターフィード形式とした場合、一次放射器のブロッキングが大きく、開口能率が著しく劣化する。提案する構成は、ビーム走査機能は一次元に限られるが、イメージングリフレクタアンテナの特長を有したまま、センターフィード形式の反射鏡アンテナを実現できる。これにより、変位給電方式のセンターフィード形式の反射鏡アンテナよりもビーム走査特性に優れた反射鏡アンテナを実現できると考えられる。本章では、変位給電方式のセンターフィード形式の反射鏡アンテナとの差異を示し、試作アンテナの設計と測定により本アンテナの構成および設計法の有効性を検証する。

## 2.1 まえがき

ビーム走査可能な反射鏡アンテナの一つの方式として、イメージングリフレクタアンテナが知られている。基本的なイメージングリフレクタアンテナの鏡面系は、焦点を共有し鏡軸方向が逆向きの相似形パラボラ鏡面を主反射鏡および副反射鏡とする複反射鏡アンテナである。一次放射器にはアレーア

ンテナ（給電アレー）を用い、通常のフェーズドアレーと同様に全素子を励振して平面波を放射する。主反射鏡を介した二次ビームの走査は、給電アレーのビーム走査によって実現される。このとき、高い開口能率を実現するため、幾何光学的にはビーム走査に関わらず給電アレーから放射された光線が常に主反射鏡全体を照射するように、給電アレーと副反射鏡との距離を設定することが必要となる。しかし、一般的なイメージングリフレクタアンテナは、オフセット形式のため、アンテナの占有体積が大きい。これを改善する形式として、センターフィード形式が考えられるが、一次放射器がほぼ全てブロッキングとなるため、開口能率が著しく劣化する。そのため、これまでセンターフィード形式のイメージングリフレクタアンテナに関する報告がないと考えられる。そこで、ビーム走査機能は一次元に限られるが、ブロッキングによる影響が低減されるようなセンターフィード形式の反射鏡アンテナを提案する。以降、まず本アンテナの構成を示し、次に鏡面形状の定式化および鏡面の設計法について述べ、最後に試作アンテナにより本アンテナの構成および設計法の有効性を示す。

## 2.2 アンテナの構成と設計法

### 2.2.1 構成

図 2.1 に、本アンテナの概略構成を示す。図 2.2 に、図 2.1 の直交断面内のアンテナ形状を示す。一次放射器は、一次元フェーズドアレーアンテナで構成される。図 2.2 (a) に示す一次放射器のアレーアンテナ配列面 ( $xz$  面: ビーム走査面, アンテナの垂直面と定義) 内はビーム走査可能で、主反射鏡全体を活用できるイメージングリフレクタアンテナとして動作する。図 2.2 (b) に示す  $xz$  面に直交する面 ( $yz$  面: 非ビーム走査面, アンテナの水平面と定義) 内はブロッキングが最小となるミニマムブロッキング条件を満足する複反射鏡アンテナとして動作する。本論文では、 $yz$  面の形状をカセグレンアンテナ形式として話を進めるが、グレゴリアンアンテナ形式としてもよい。

図 2.3 は、本アンテナと一般的なイメージングリフレクタアンテナをセンターフィード形式としたときの主反射鏡におけるブロッキング領域の比較を示したものである。イメージングリフレクタアンテナは、主反射鏡の焦点距離とイメージングリフレクタアンテナの倍率に応じた一次放射器と副反射鏡間の距離を決定することで、幾何光学的にはビーム走査に関わらず、常に主反射鏡全体を照射することができる。図 2.3 (a) に示すオフセット形式のイメージングリフレクタアンテナをそのままセンターフィード形式とした場合では、一次放射器は 2 次元フェーズドアレーアンテナで構成されるため、主反射鏡の大部分が一次放射器によるブロッキング領域となる。そのため、開口能率が著しく劣化する。一方、図 2.3 (b) に示す本アンテナは、ビーム走査面に一次元フェーズドアレーアンテナを用いてイメージングリフレクタアンテナとして動作させ、非ビーム走査面をカセグレンアンテナとして動作させることで、一次放射器によるブロッキング領域が改善されることが定性的に確認できる。このように、本アンテナは、イメージングリフレクタアンテナの特長を有しながら、センターフィード形式を実現することができる。

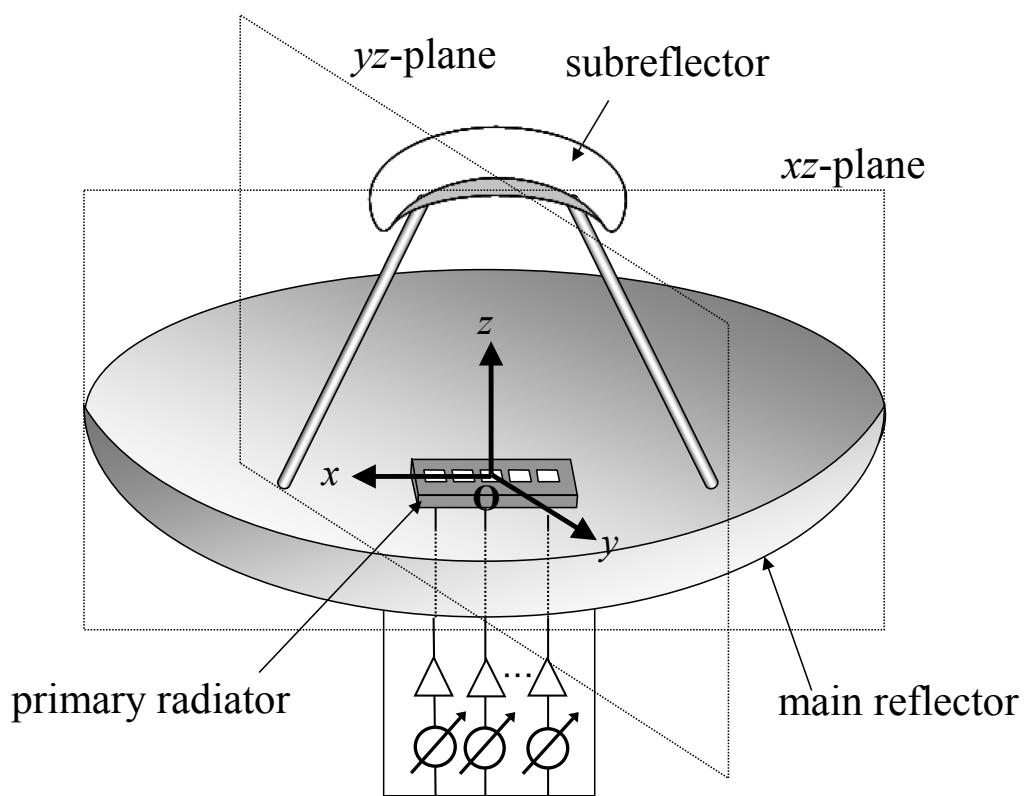


図 2.1 本アンテナの概略構成



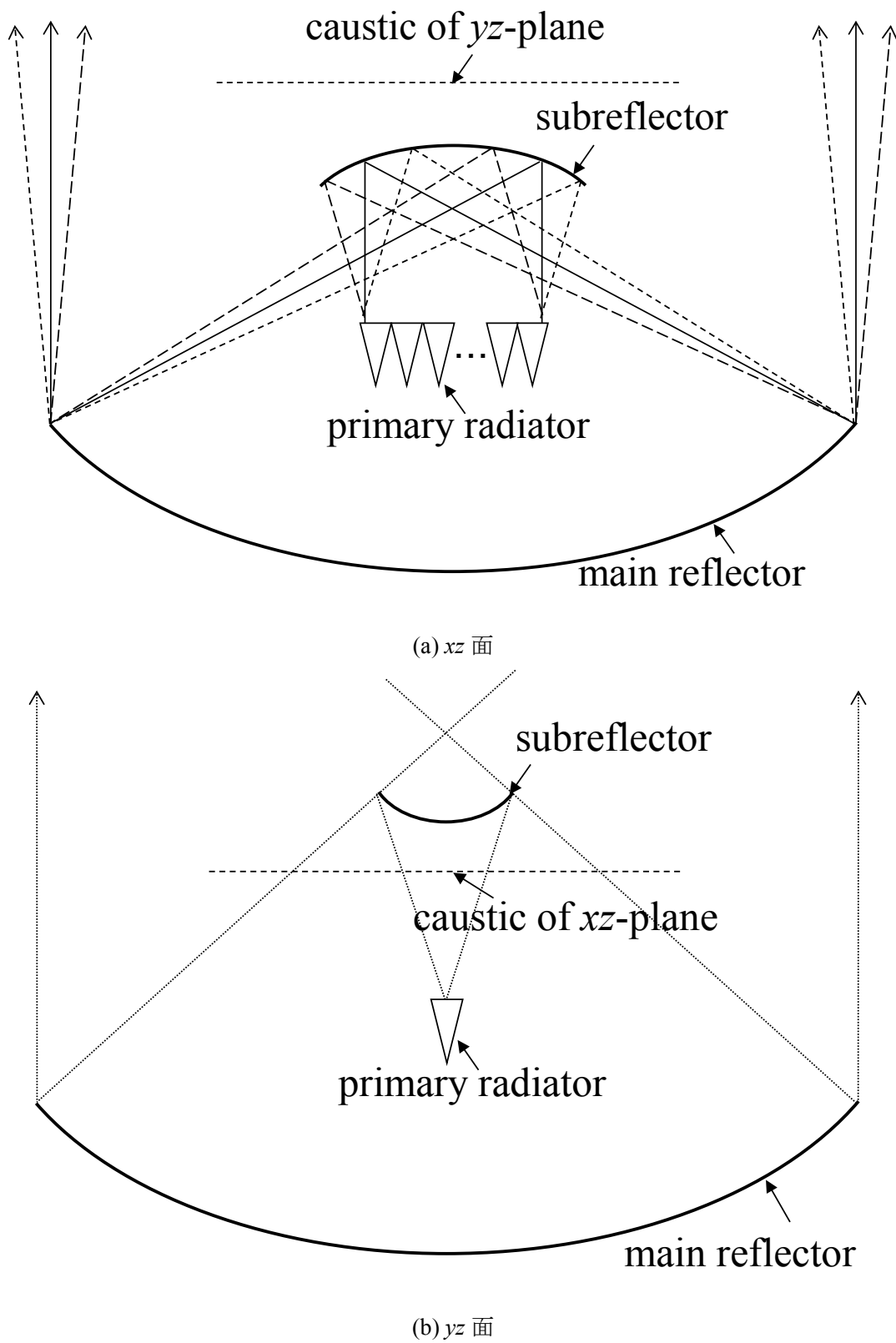


図 2.2 本アンテナの直交断面形状

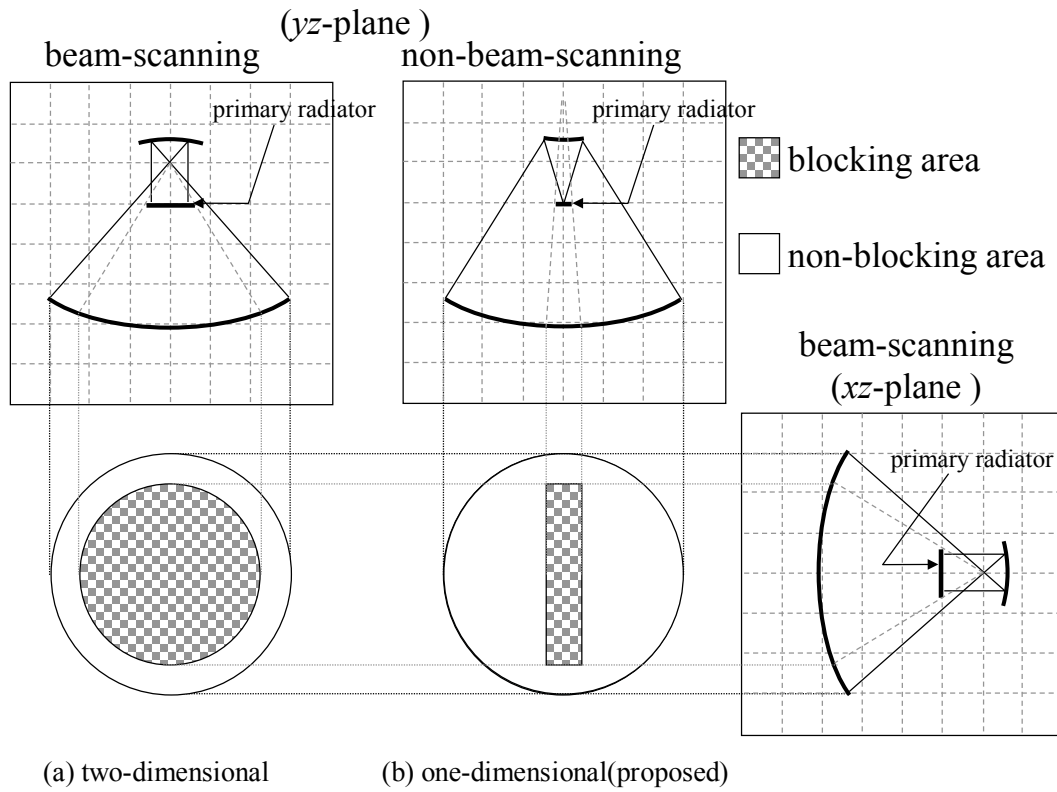


図 2.3 主反射鏡上のブロッキング領域の比較

図 2.4 と図 2.5 に、円筒波を放射する線状波源で仮定した一次放射器の中心を原点  $\mathbf{O}$  とする直交座標系  $(x, y, z)$  における副反射鏡と主反射鏡の座標系を示す. 一次放射器である給電アレーの配列面は  $xz$  面であり, この面内にビーム走査機能を有する. 本アンテナの鏡面形状を表すために, 幾何光学的手法を適用する. 副反射鏡は図 2.4 に示すように, 肋骨曲線に相当する  $yz$  面内の双曲線を, 脊椎曲線に相当する  $xz$  面の放物線に沿って動かすことで形成される二重曲面反射鏡[21][22]として設計する. 主反射鏡は図 2.5 に示すように, 光路長一定の法則を満足する条件で設計する. すなわち,  $xz$  面はイメージングリフレクタアンテナ,  $yz$  面はカセグレンアンテナと, 2 つの異なる断面形状を有するアンテナである.

まず, 副反射鏡の形状の決定方法について示す.  $yz$  面内の二次曲線は一般的に式 (2.1) で表すことができる[24].

$$r(\phi) = \frac{\delta p a (\bar{\epsilon}^2 - 1)}{1 + \bar{\epsilon} \cos \phi} \quad (2.1)$$

ここで、 $\bar{e} = \delta p e$  であり、 $\delta$  は 1 のとき凹面鏡、-1 のとき凸面鏡を表し、 $p$  は 1 のとき回転双曲面鏡、-1 のとき回転楕円面鏡を表す。前述の通り、非ビーム走査面をカセグレン形式とするため、 $\delta = -1$ 、 $p = 1$  である。さらに、 $e$  は副反射鏡の離心率、 $a$  は副反射鏡定数である。xz 面内の放物線は、式 (2.2) で与えられる。

$$z_f = -\frac{x_f^2}{4f} + r(\phi = 0) \quad (2.2)$$

$f$  は放物線の焦点距離、 $x_f$  は線状波源上の任意の点を表す  $x$  座標である。式 (2.1)、式 (2.2) より、副反射鏡上の点の位置ベクトル  $\mathbf{r}_s$  は、式(2.3)で表される。

$$\mathbf{r}_s = \left( x_f, r(\phi) \sin \phi, r(\phi) \cos \phi - \frac{x_f^2}{4f} \right) \quad (2.3)$$

副反射鏡上の点  $\mathbf{r}_s(x_f, \phi)$  における単位法線ベクトル  $\mathbf{n}_s$  は、式 (2.4) となる。

$$\mathbf{n}_s = \frac{\frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial x_f} \times \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial \phi}}{\left| \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial x_f} \times \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial \phi} \right|} \quad (2.4)$$

次に、主反射鏡の形状の決定方法について示す。 $\mathbf{e}_r$  は線状波源上の任意の点  $x_f$  から、同じ  $x_f$  の位置にある副反射鏡上の標本点へ至る方向の単位ベクトルであり、 $\mathbf{e}_s$  は副反射鏡上の標本点から主反射鏡上の標本点へ至る方向の単位ベクトルである。 $\mathbf{e}_s$  は反射の法則を満たすように、 $\mathbf{e}_r$  と式(2.4)に示した副反射鏡上の各点における  $\mathbf{n}_s$  を用いて、式 (2.5) で表される。

$$\mathbf{e}_s = \mathbf{e}_r - 2(\mathbf{n}_s \cdot \mathbf{e}_r) \mathbf{n}_s \quad (2.5)$$

よって、主反射鏡上の点  $\mathbf{r}_m(x_f, \phi)$  は、式 (2.6) で表される。

$$\mathbf{r}_m = \mathbf{r}_s + s \mathbf{e}_s \quad (2.6)$$

$s$  は副反射鏡上の標本点から主反射鏡上の標本点までの長さである。線状波源から等位相面までの光路長を  $L$  とすると、式 (2.7) で表される。なお、 $s$  を求めるためには  $L$  が既知である必要がある。 $L$  は線状波源の中心から副反

射鏡上の中心までの距離と、副反射鏡上の中心から主反射鏡上の中心までの距離と、主反射鏡上の中心から線状波源の中心までの距離を加算したものと  
する。

$$s = \frac{L - r + \mathbf{r}_s \cdot \mathbf{k}_B}{1 - \mathbf{e}_s \cdot \mathbf{k}_B} \quad (2.7)$$

ここで、 $\mathbf{k}_B$  は鏡軸方向の単位ベクトルであり、ここでは  $z$  軸方向に一致する。  
よって、式 (2.6) に式 (2.7) を代入することによって、主反射鏡上の標本点  
を求めることができる。ここまでに示した式については、付録 A に詳細な導  
出過程を示す。

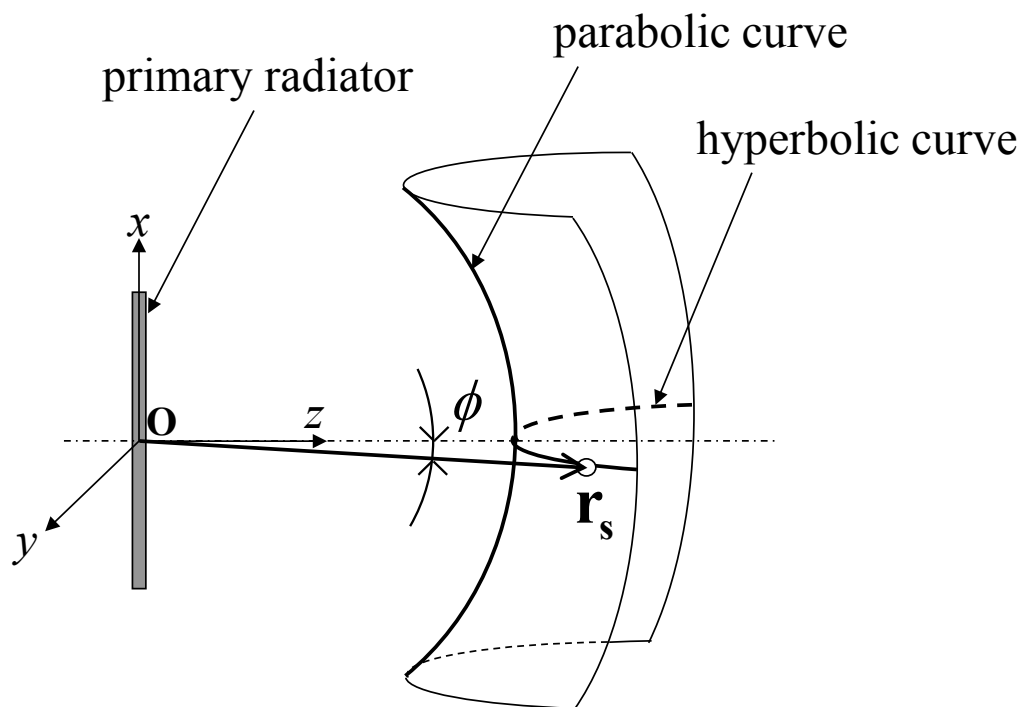


図 2.4 副反射鏡を表現する座標系

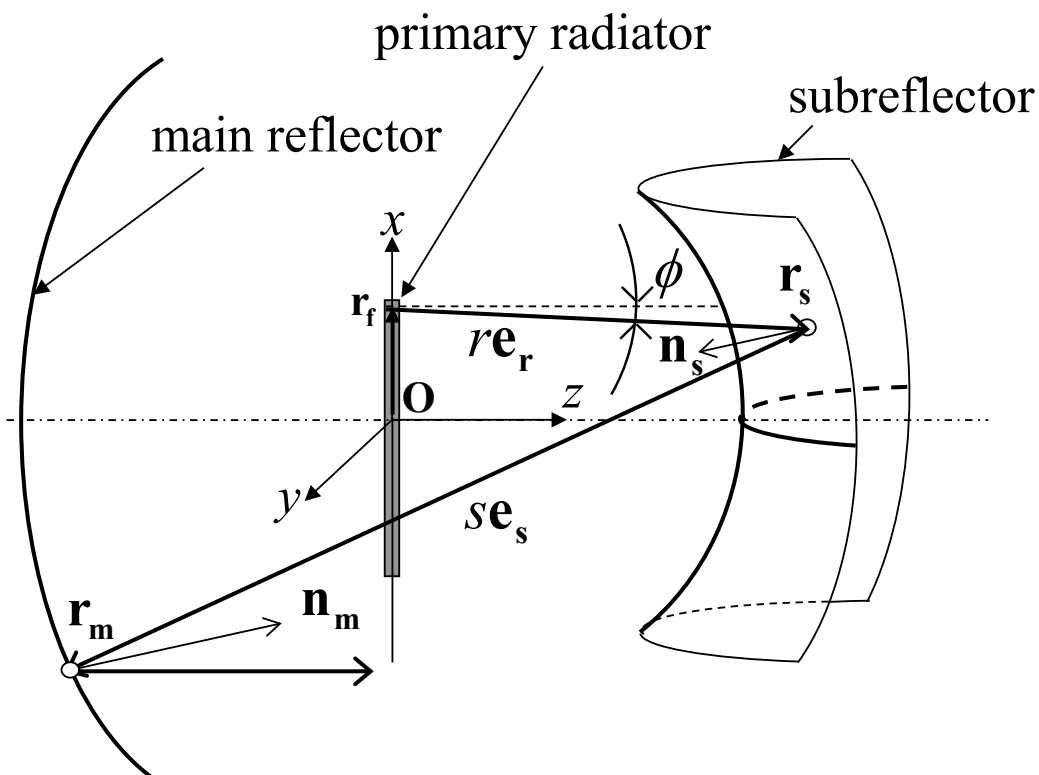


図 2.5 主反射鏡を表現する座標系

## 2.2.2 設計法

図 2.6 に、 $xz$  面（ビーム走査面）の鏡面パラメータを示す。ビーム走査面の設計パラメータは、主反射鏡径： $D_{M1}$ 、主反射鏡見込み角： $\theta_M$ 、主反射鏡によるビーム走査角： $\theta_m$ 、イメージングリフレクタアンテナの倍率： $m$  とする。主反射鏡径： $D_{M1}$  と主反射鏡見込み角： $\theta_M$  を与えることにより、主反射鏡焦点距離  $F_M$  は式 (2.8) で求められる。

$$F_M = \frac{D_{M1}}{4 \tan\left(\frac{\theta_M}{2}\right)} \quad (2.8)$$

イメージングリフレクタアンテナは、主反射鏡と副反射鏡が相似であることから、イメージングリフレクタアンテナの倍率： $m$  を用いて式 (2.9)、式 (2.10)、式 (2.11) の関係がある。

$$F_S = \frac{F_M}{m} \quad (2.9)$$

$$D_{M1} = m D_{f1} \quad (2.10)$$

$$\theta_m = \frac{\theta_f}{m} \quad (2.11)$$

ここで、 $F_S$  は副反射鏡の焦点距離、 $D_{f1}$  は一次放射器の大きさ、 $\theta_f$  は一次放射器によるビーム走査角である。さらに、イメージングリフレクタアンテナの定義より、一次放射器と副反射鏡の頂点との距離： $F_A$  は式 (2.12) となる。

$$F_A = \frac{F_S(m+1)}{m} \quad (2.12)$$

よって、ビーム走査面における副反射鏡径： $D_{S1}$  は、式 (2.13) で求めることができる。

$$D_{S1} = D_{f1} + 2F_A \tan \theta_f \quad (2.13)$$

図 2.7 に  $yz$  面（非ビーム走査面）の鏡面パラメータを示す。副反射鏡見込み角： $\theta_1$  と主反射鏡見込み角： $\theta_2$  を与えることにより、 $\bar{e}$  は式 (2.14) で求まる。

$$\bar{e} = \frac{\tan\left(\frac{\theta_1}{2}\right)\tan\left(\frac{180-\theta_2}{2}\right)+1}{\tan\left(\frac{\theta_1}{2}\right)\tan\left(\frac{180-\theta_2}{2}\right)-1} \quad (2.14)$$

副反射鏡定数： $a$  は、ビーム走査面で決定した一次放射器と副反射鏡の頂点との距離： $F_A$ を用いて式 (2.15) で求まる。

$$a = \frac{F_A}{1-\bar{e}} \quad (2.15)$$

副反射鏡の頂点と主反射鏡の焦点との距離： $F_B$  は、副反射鏡定数： $a$  と  $\bar{e}$  を用いて式 (2.16) で求まる。

$$F_B = -a(\bar{e}+1) \quad (2.16)$$

主反射鏡径： $D_{M2}$  は式 (2.17) で求まる。

$$D_{M2} = 4(F_A+F_B)\tan\left(\frac{\theta_2}{2}\right) \quad (2.17)$$

副反射鏡径： $D_{S2}$  は副反射鏡定数： $a$  と  $\bar{e}$  と副反射鏡見込み角： $\theta_1$  を用いて式 (2.18) で求まる。

$$D_{S2} = \frac{-2a(\bar{e}^2-1)\sin\theta_1}{1+\bar{e}\cos\theta_1} \quad (2.18)$$

最後に、非ビーム走査面におけるミニマムブロッキング条件を考える。副反射鏡径： $D_{S2}$  と、主反射鏡焦点から一次放射器の外形を通して主反射鏡にできる一次放射器の影： $D_b$  との関係が、式 (2.19) となるように一次放射器の物理形状の大きさ： $D_{f2}$  を決定する。

$$D_{S2} \geq D_b \quad (2.19)$$

よって、一次放射器の物理形状の大きさ： $D_{f2}$  の条件は、非ビーム走査面での主反射鏡焦点から、主反射鏡上の副反射鏡径： $D_{S2}$  の範囲を見込む角度： $\theta_b$  を用いて式 (2.20) となる。

$$D_{f2} \leq 2(F_A+F_B)\tan\theta_b \quad (2.20)$$

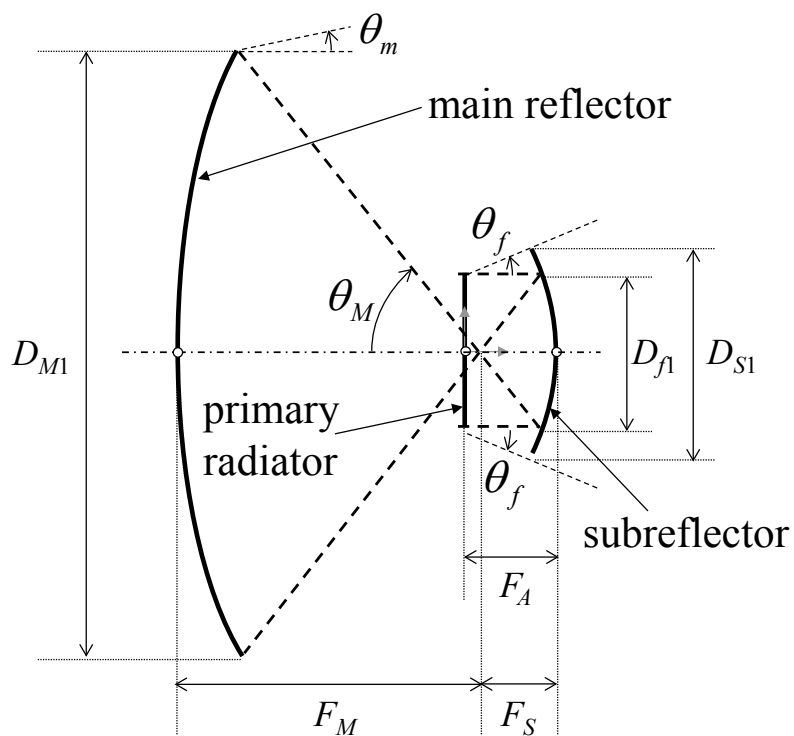


図 2.6 垂直面 (xz 面) の鏡面パラメータ

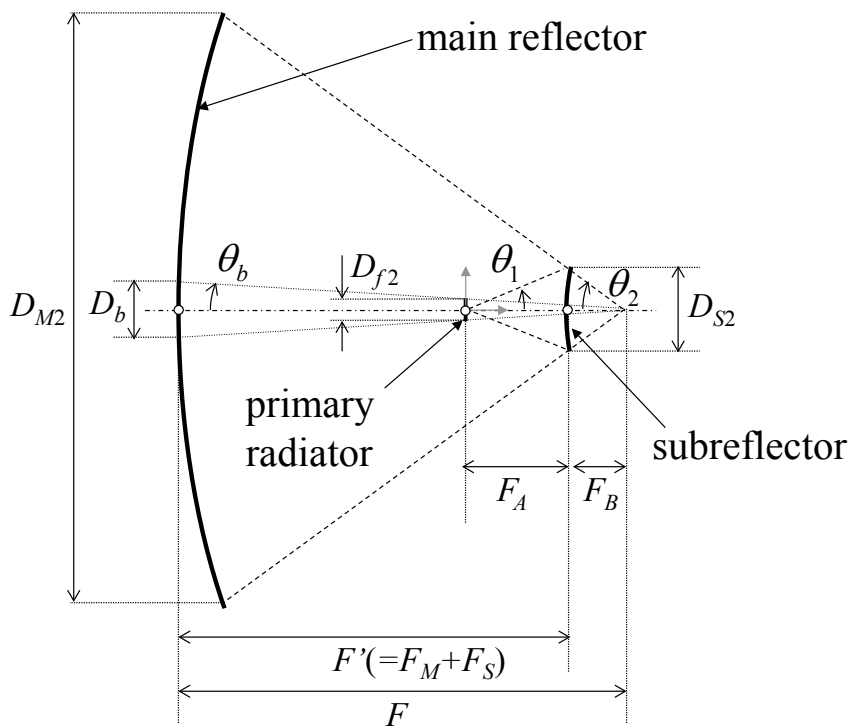


図 2.7 水平面 (yz 面) の鏡面パラメータ



## 2.3 試作アンテナの設計

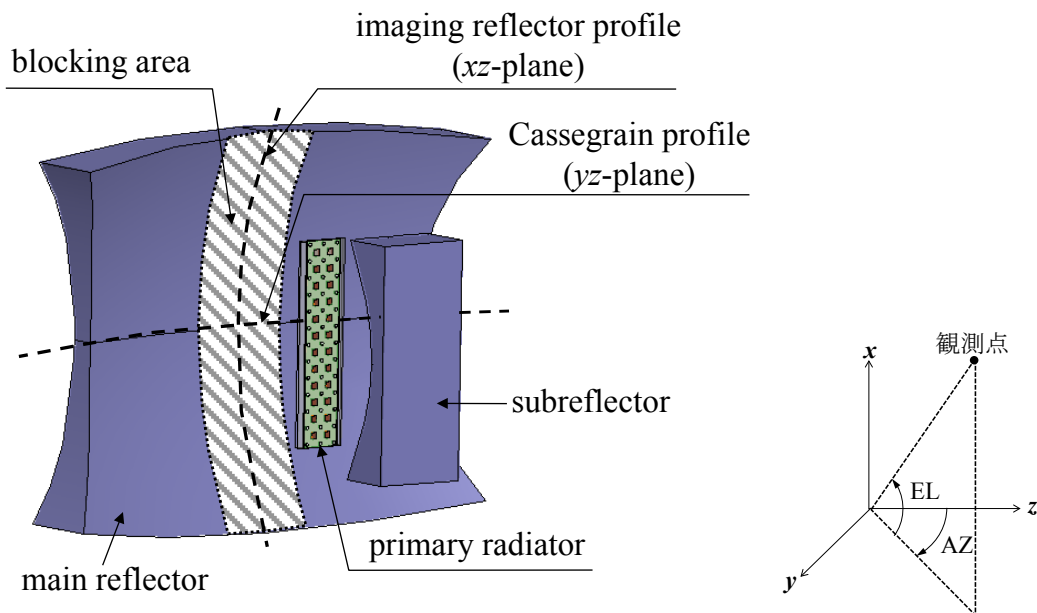
本アンテナの基本動作を検証するために、前節の設計法に従い、試作アンテナを設計する。表 2.1 に、試作アンテナの設計諸元を示す。設計周波数は 9.6GHz とし、イメージングリフレクタアンテナ形式であるビーム走査面 ( $xz$  面)、カセグレンアンテナ形式である非ビーム走査面 ( $yz$  面) の主反射鏡の開口径はともに  $DM_1=DM_2=600\text{mm}$  とした。また、イメージングリフレクタアンテナの倍率は 2、ビーム走査角度は 2.5 度とした。実用的な搭載用アンテナでは、通常  $100\lambda$  程度の開口径が必要となることが多いが、ここでは基本動作の確認を目的とし、測定設備の都合も考慮し、実用的な大きさよりも小さい寸法で設計した。

表 2.1 試作アンテナの設計パラメータ

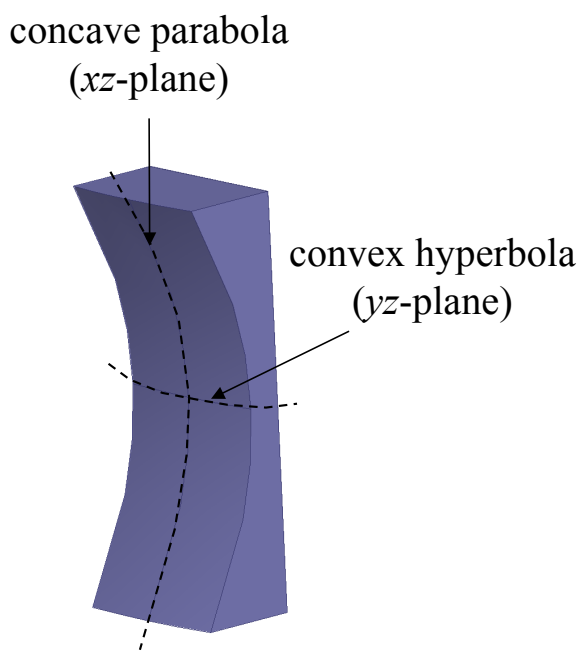
<b>Beam-scanning cross section</b>	
Main reflector size : $D_{M1}$	600 mm
Main reflector subtended semi-angle : $\theta_M$	$55^\circ$
Beam-scanning angle : $\theta_m$	$\pm 2.5^\circ$
Magnification of the imaging reflector : $m$	2
Subreflector size : $D_{S1}$	360mm
<b>Non-beam-scanning cross section</b>	
Main reflector size : $D_{M2}$	600 mm
Subreflector subtended semi-angle : $\theta_1$	$18^\circ$
Subreflector size : $D_{S2}$	143mm

図 2.8 に試作アンテナの概略図を、図 2.9 にその断面図を示す。図 2.8 (a) に示すように、主反射鏡の外形は四隅に頂点を持つ四角形に近い形状である。副反射鏡は、 $xz$  面が凹形状、 $yz$  面が凸形状と、馬鞍のような形状である。主反射鏡の外形が一般的な反射鏡アンテナで想像する円形状ではない理由は、副反射鏡を二重曲面反射鏡としているため、副反射鏡自体も円形ではなく、副反射鏡の形状から反射の法則と光路長一定の法則により幾何光学的に主反射鏡の形状を決めたためである。また、主反射鏡上のブロッキング領域は、副反射鏡から主反射鏡に向かう光線が一次放射器によって遮蔽されるために

生じる。ブロッキング領域の  $yz$  方向の幅は、副反射鏡の  $yz$  方向の幅と等しい。このとき、主反射鏡の開口領域とブロッキング領域の比は 77%となる。図 2.3 に示した 2 次元ビーム走査のイメージングリフレクタアンテナでは、主反射鏡上のほとんどがブロッキング領域となり、その比率は非常に小さくなる。なお、ビーム走査角度が増加しても、このブロッキング領域は変化しない。一次放射器については、式 (2.10) の一次放射器の大きさ  $D_{f1}$  となるようなアレーアンテナを用意した。ここでは、12 素子×2 列のアレーアンテナとした。図 2.10 に、設計した 24 素子アレーアンテナの概略図と最大放射方向を 0 度としたときの放射パターン特性を示す。素子アンテナは、無給電素子付きの正方形パッチアンテナであるが、特別にこの素子アンテナである必要はなく、円筒波を放射する線状波源で仮定した一次放射器として採用した。なお、無給電素子の目的は素子アンテナの効率を高くするためである[27]。図 2.8 に示した試作アンテナの基本特性について検証する。一次放射器の偏波は、垂直偏波 ( $xz$  面方向の偏波) である。計算は、有限要素法で解析した一次放射器の近傍電磁界を波源とし、各鏡面については物理光学近似法を用いた。

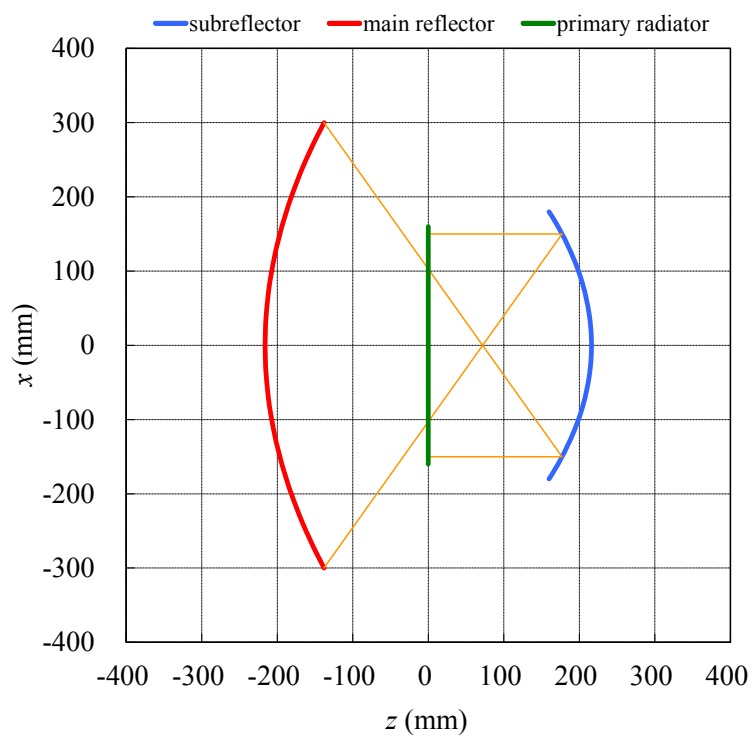


(a) 試作アンテナ全体図

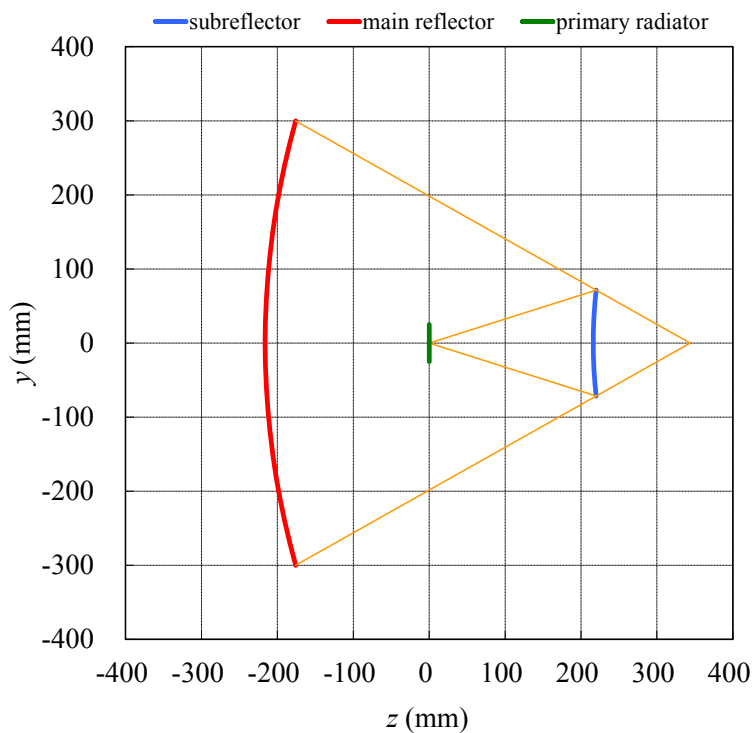


(b) 副反射鏡の拡大図

図 2.8 試作アンテナの概略図

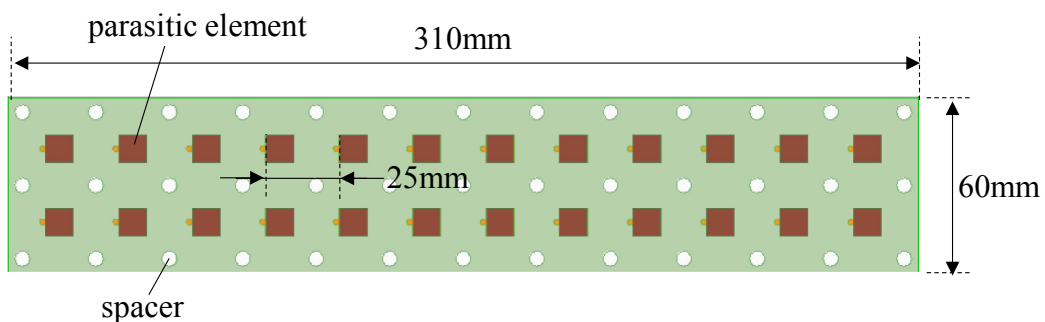


(a)  $xz$  面

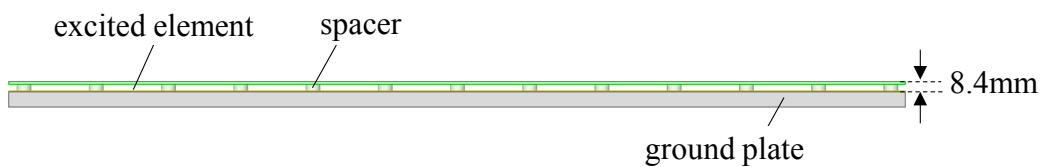


(b)  $yz$  面

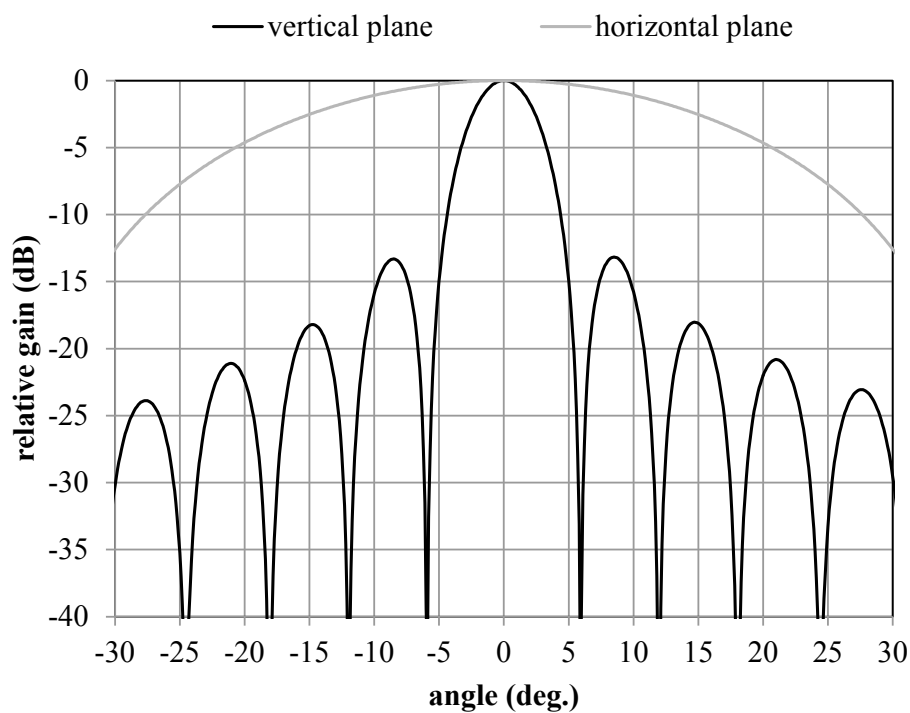
図 2.9 試作アンテナの直交断面図



(a) 上面図



(b) 側面図



(c) 放射パターン

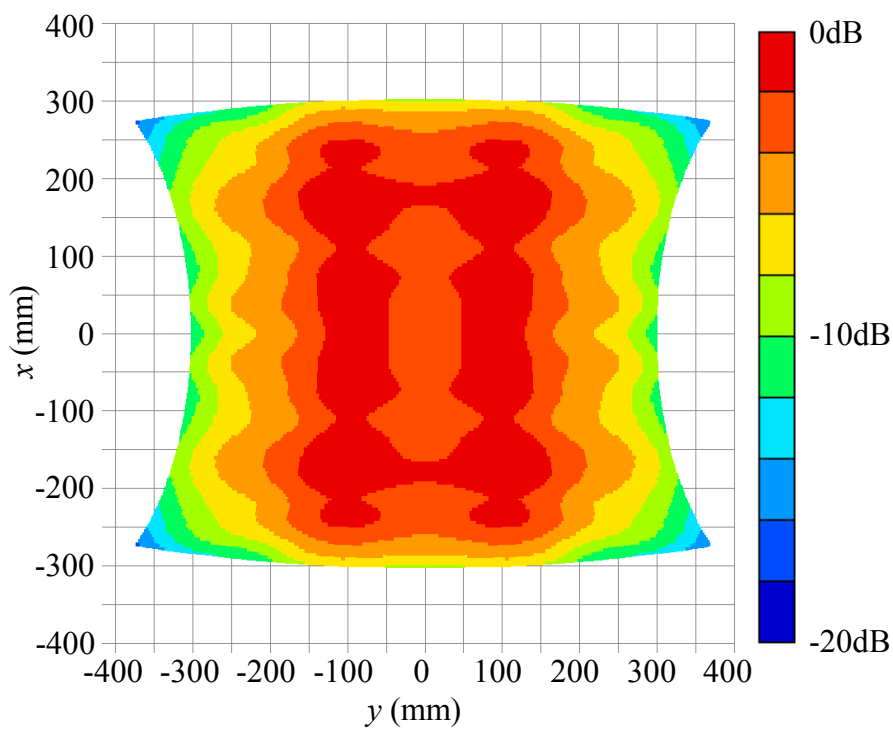
図 2.10 2×12 素子アレーアンテナ

まず、所望の開口分布が得られるか検証する。開口分布とは、鏡面上の電流分布を鏡軸に垂直な平面に投影したものである。振幅分布は、投影する平面と鏡面とで面素の比を考慮し、位相分布は、投影する平面と鏡面上の点との距離の分を考慮している。幾何学的に投影するため、鏡軸の位置はどこでもよい。なお、ここでの投影面は、 $xy$ 面である。図 2.11 に、主反射鏡における開口振幅分布を示す。開口振幅分布はビーム走査角度によらず、主反射鏡全体をほぼ一様に照射していることがわかる。図 2.12 に、主反射鏡における開口位相分布を示す。図 2.12 (a) より、ビーム走査角度 0 度では、一次放射器の各素子の位相を同相としているため、主反射鏡全体にほぼ一様な位相分布が得られていることがわかる。図 2.12 (b) より、ビーム走査角度 -2.5 度では、一次放射器の各素子の位相を +5 度方向に共相となるような位相を設定しており、ビーム走査面 ( $x$  軸) に所望のビーム走査角度 -2.5 度に対応した位相分布が得られている。また、非ビーム走査面 ( $y$  軸) については、一次放射器の隣り合う 2 素子の位相は同相としているため、ほぼ一様な位相分布が得られていることがわかる。これにより、ビーム走査機能を有する開口分布が得られていることが確認できた。

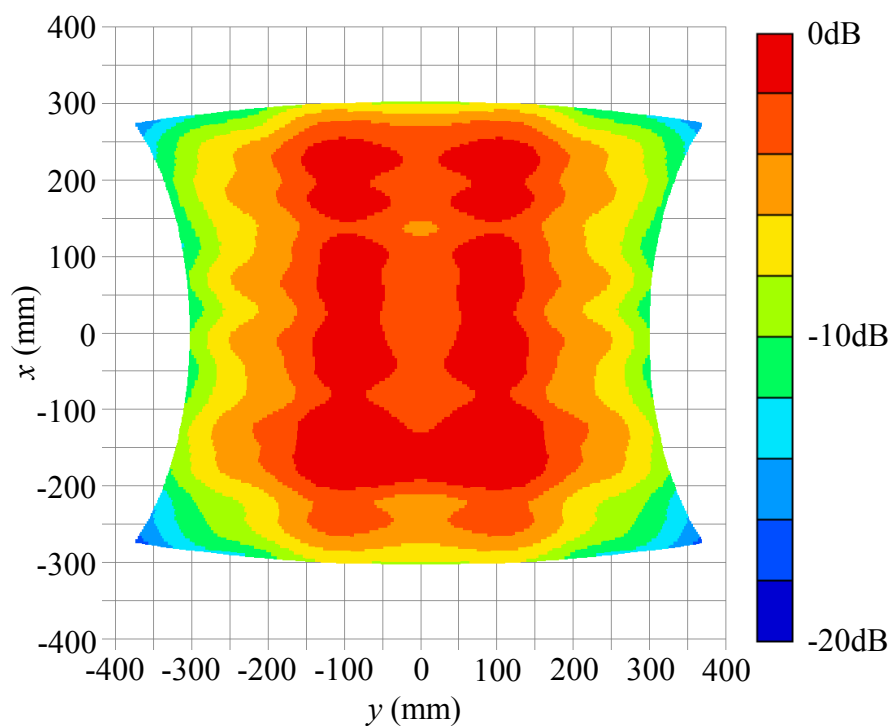
次に、放射パターンについて検証する。図 2.13 に、主反射鏡上の電流分布から計算した放射パターンの計算値を示す。図 2.13 より、所望のビーム走査機能が得られていることが分かる。図 2.14 に、一次放射器の放射パターンと副反射鏡の電流分布から計算した放射パターンを合成した放射パターンを示す。さらに、図 2.15 には、図 2.13 と図 2.14 に示す放射パターンを合成した本アンテナの放射パターンを示す。図 2.15 (b) のエレベーション (図の縦軸) +5 度方向 (点線の領域) にレベルの大きいサイドローブが見られる。ビーム走査角 -2.5 度を得るためには、イメージングリフレクタアンテナの倍率が 2 であるため、一次放射器のビーム走査を +5 度とする。試作アンテナの設計諸元では、副反射鏡が小さく、かつ、一次放射器の水平面方向のビーム幅が広い。そのため、副反射鏡の裏に電波が回り込むことによる回折成分であると考えられる。図 2.14 の放射パターンで確認しても、水平面方向の放射パターンのピーク間隔は、副反射鏡の  $yz$  面の寸法 (143mm) で決まるグレーティングローブ間隔 ( $\pm 12.1$  度) に対応していることから、回折によるものと考

えることが妥当である。図 2.15 に示す放射パターンは、ビーム走査角 0 度の利得は 32.6dBi であり、開口能率は 50%であった。

最後に、本アンテナの有効性を検証するために、変位給電方式アンテナとのビーム走査時の放射パターン特性について比較した。変位給電方式アンテナは、焦点近傍に複数の一次放射器を配置したものである。一次放射器の変位量によって、鏡軸から傾いた方向にビームが放射される。ここでは、比較のために、試作アンテナと同様の条件として、開口径を  $20\lambda$ 、ビーム走査角度を  $-2.5$  度とした。変位給電方式アンテナの鏡面諸元は、試作アンテナの  $yz$  面の形状を鏡軸周りに回転させた軸対称カセグレンアンテナである。ビーム走査角 0 度の時は、一次放射器を副反射鏡の焦点に配置し、ビーム走査角  $-2.5$  度の時は、副反射鏡の焦点から  $1.7\lambda$  だけ並進移動させた位置に一次放射器を配置した。図 2.16 に、両者の放射パターンの計算値を示す。図 2.16 (a) に示す変位給電方式アンテナでは、ビーム走査時の利得変化は  $-3.4\text{dB}$  であり、放射パターン形状の変化も大きい。一方、図 2.16 (b) に示す本アンテナは、ビーム走査前後での利得変化は  $-0.8\text{dB}$  と小さく、放射パターンの形状に大きな変化は見られない。これにより、本アンテナの方がビーム走査時の利得変化が少ないことが確認でき、本アンテナの構成と設計法の有効性を検証できた。なお、本アンテナは一次放射器をフェーズドアレーで構成できるため、連続的にビーム走査することができるため、実用的な観点から所望の領域の観測が可能となり、有効的であると考えられる。



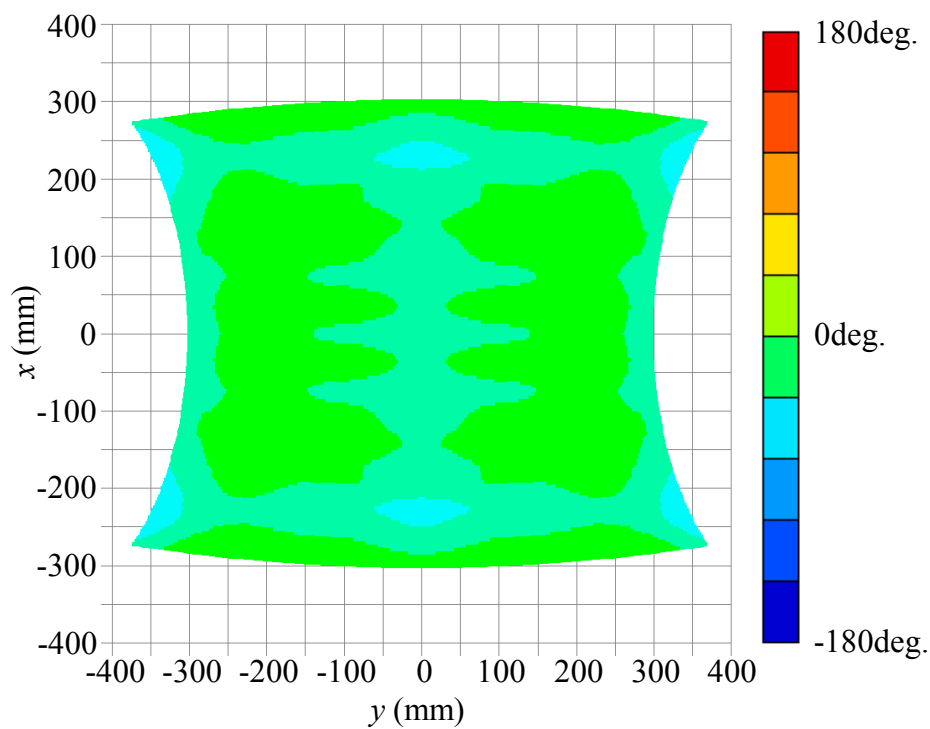
(a) ビーム走査角 :  $0^\circ$



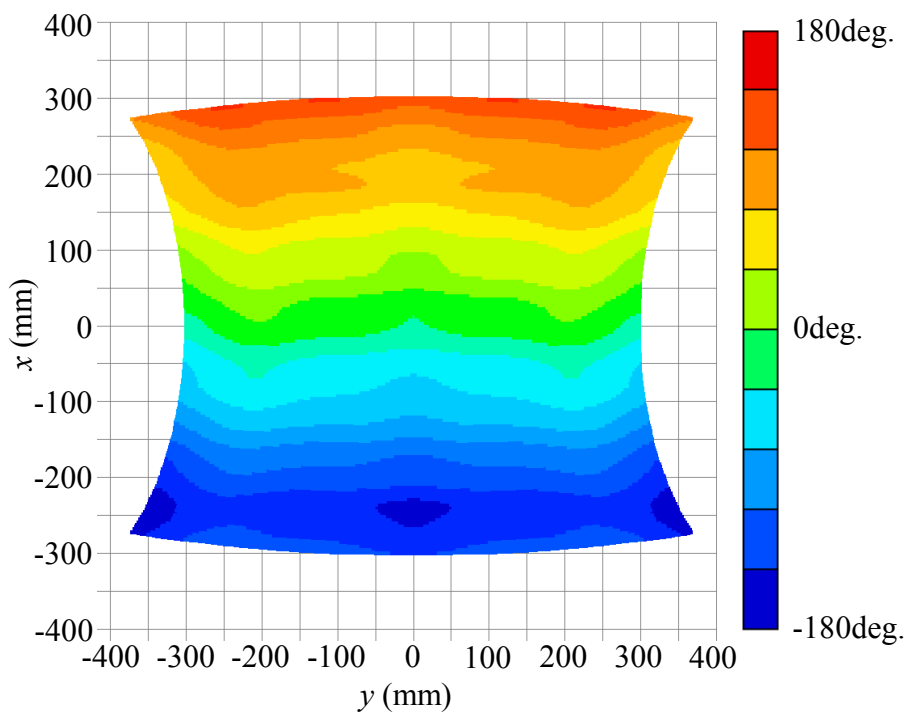
(b) ビーム走査角 :  $-2.5^\circ$

図 2.11 主反射鏡の開口振幅分布の計算値



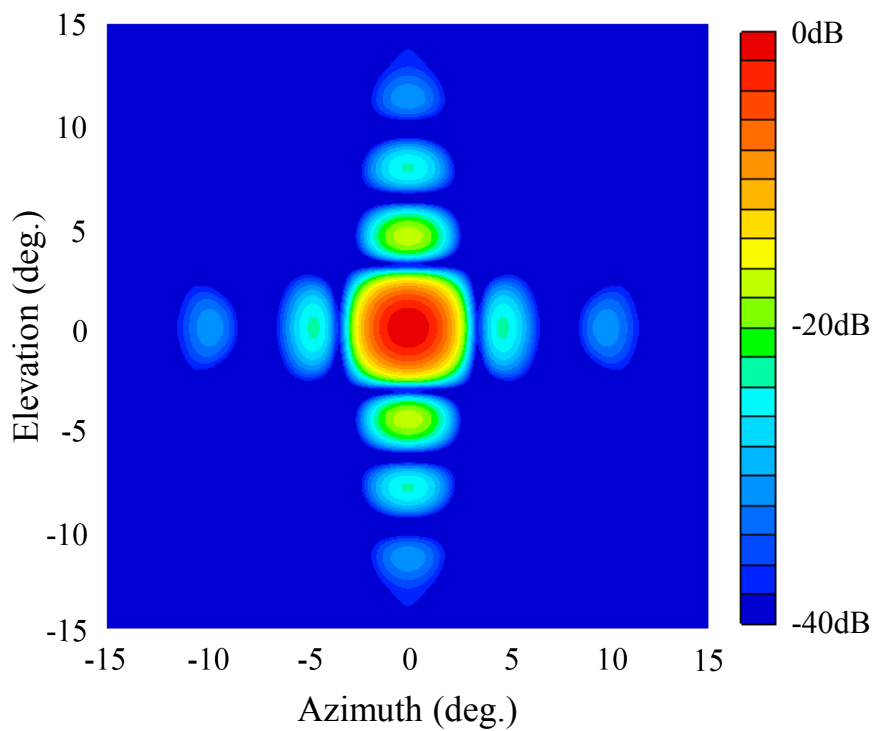


(a) ビーム走査角 :  $0^\circ$

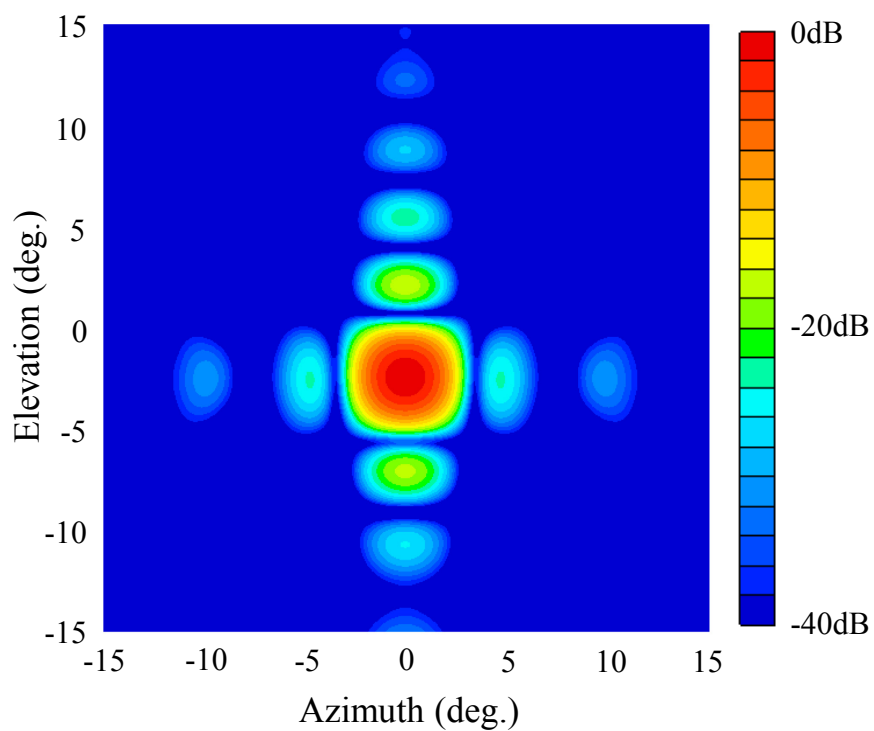


(b) ビーム走査角 :  $-2.5^\circ$

図 2.12 主反射鏡の開口位相分布の計算値

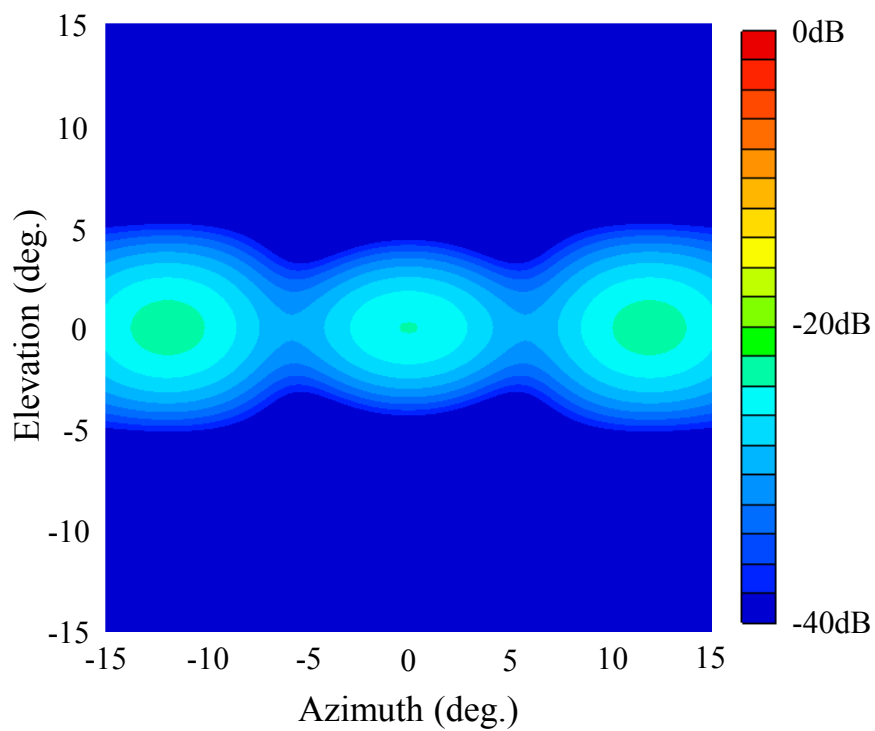


(a) ビーム走査角 :  $0^\circ$

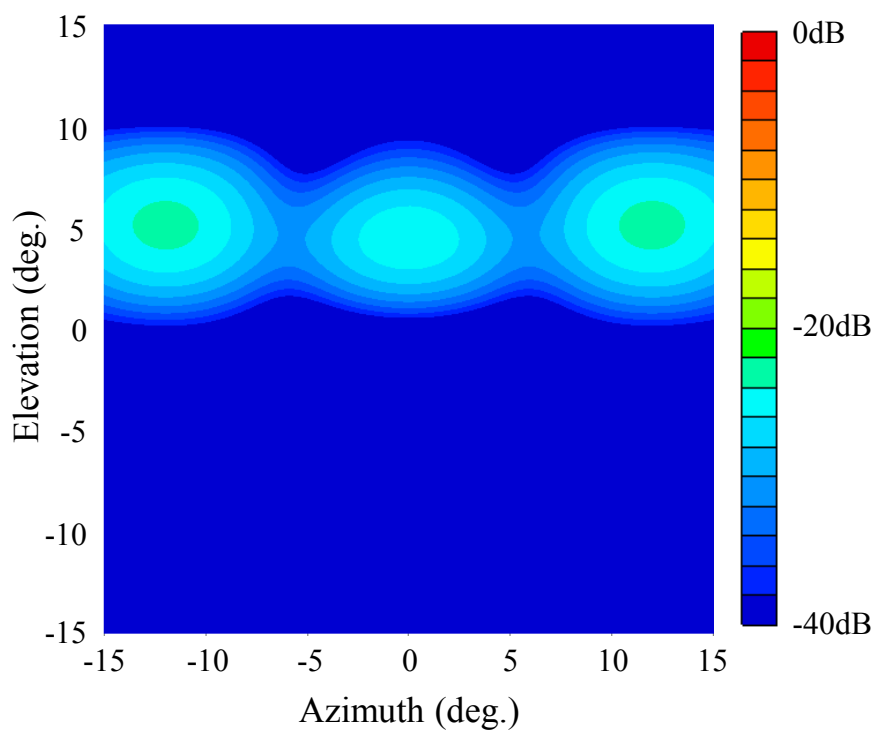


(b) ビーム走査角 :  $-2.5^\circ$

図 2.13 主反射鏡のみの2次元放射パターン計算値

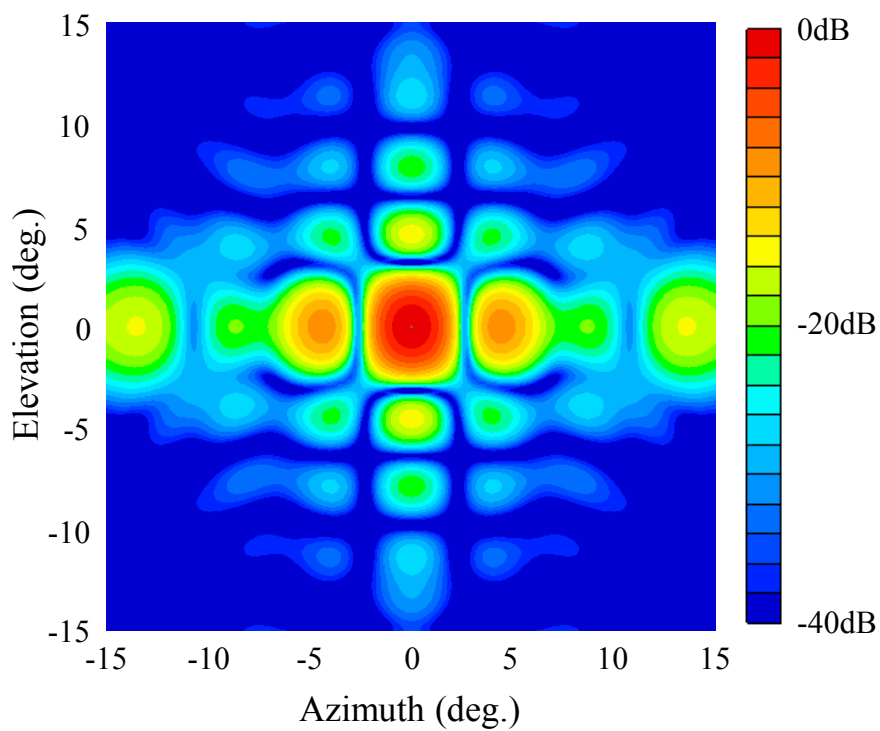


(a) ビーム走査角 :  $0^\circ$

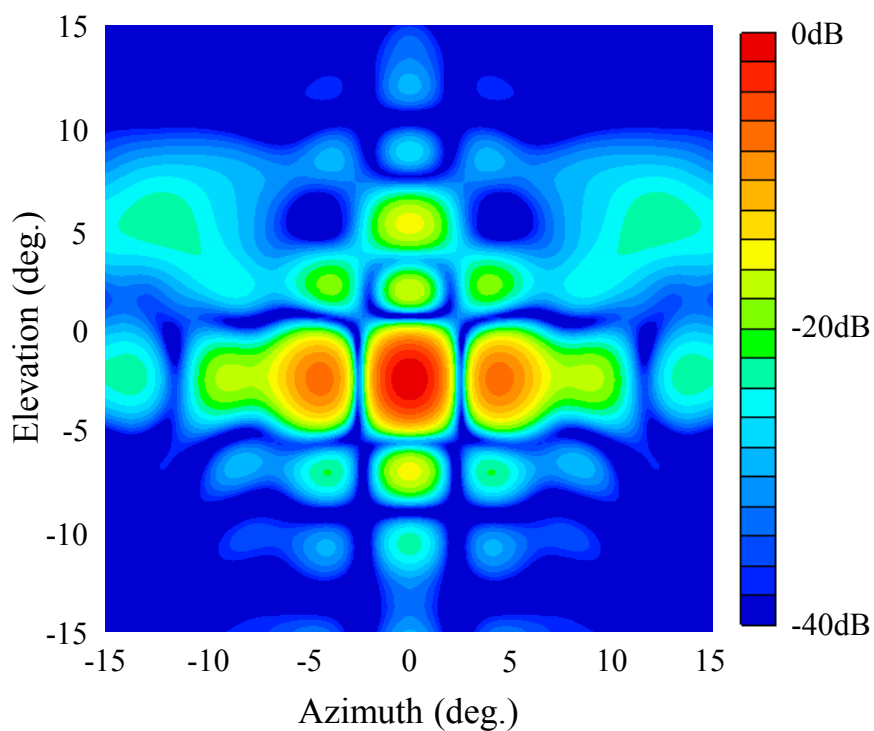


(b) ビーム走査角 :  $-2.5^\circ$

図 2.14 一次放射器と副反射鏡の2次元放射パターン計算値

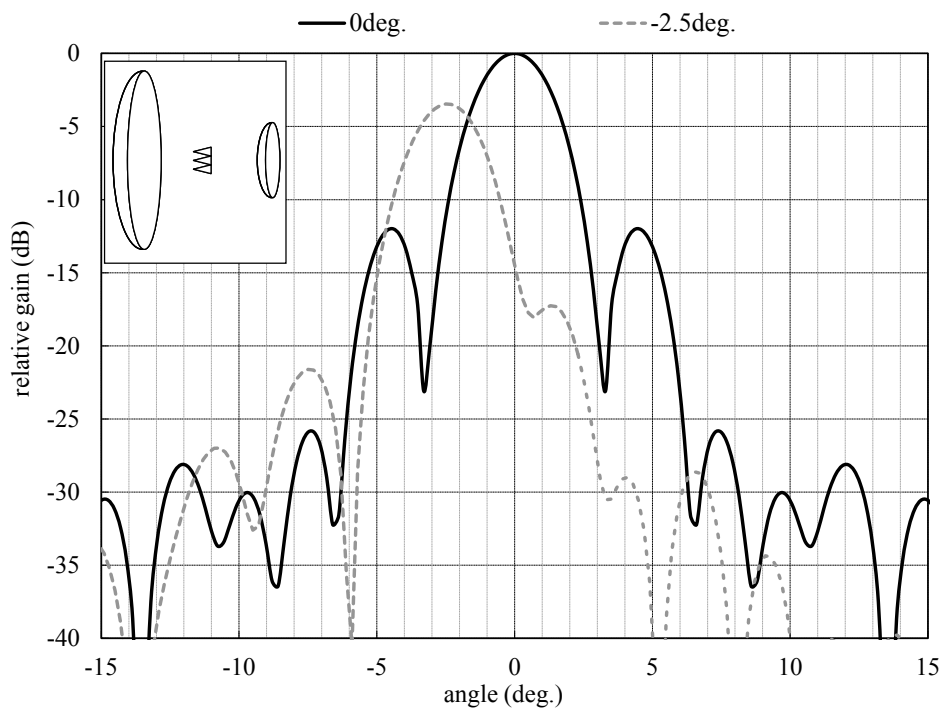


(a) ビーム走査角 :  $0^\circ$

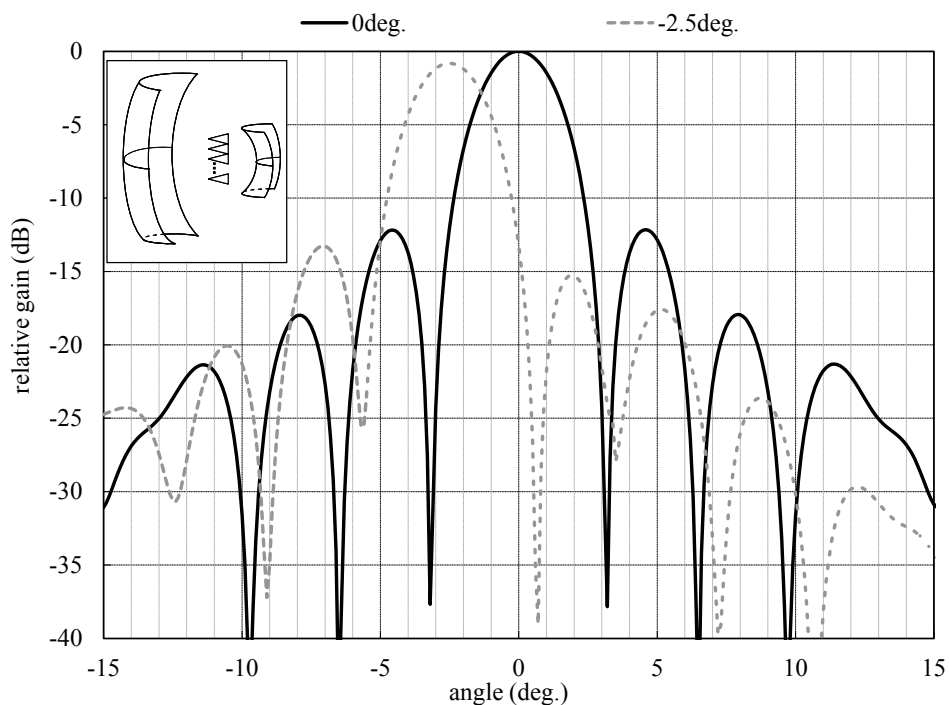


(b) ビーム走査角 :  $-2.5^\circ$

図 2.15 一次放射器と副反射鏡と主反射鏡の2次元放射パターン計算値



(a) 変位給電方式



(b) 提案方式

図 2.16 各方式によるビーム走査特性の比較

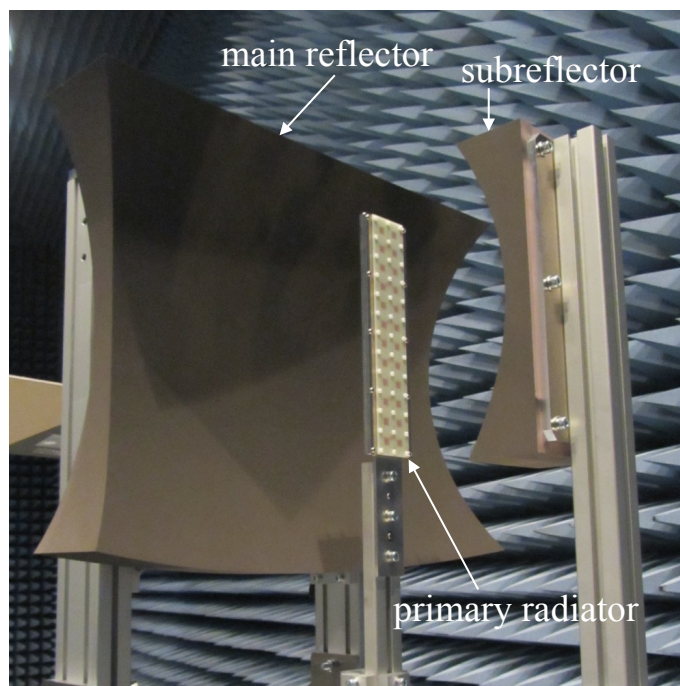
## 2.4 試作アンテナの測定

本アンテナのビーム走査特性に関する基本動作を確認することを目的に、試作アンテナを製作し、放射パターンを測定した結果について示す。図 2.17 に、試作アンテナの写真を示す。主反射鏡、副反射鏡ともに、安価で加工が容易な人工木材で製作し、表面に導電性塗料（材料は、ポリウレタン樹脂を主成分としてニッケルを金属として混合した材料）を塗布している。また、図中の一次放射器と副反射鏡を支持する金属柱には、吸収体を装荷して測定した。一次放射器は、図 2.10 に示した 24 素子アレーアンテナを試作した。測定は、コンパクトアンテナテストレンジにて、放射パターン特性を測定した。ここでの目的は本アンテナの基本動作の確認であるため、一次放射器に給電回路を用意していない。各素子の入力端子に測定コネクタを繋ぎかえて、各素子の主反射鏡を介した二次パターンを一つずつ測定し、ビーム方向が共相となる位相を設定し、測定データを計算機上で合成して評価した。なお、ある素子を測定しているときは、他の素子の入力端子を  $50\Omega$  で終端している。放射パターンの測定周波数は  $9.6\text{GHz}$  である。

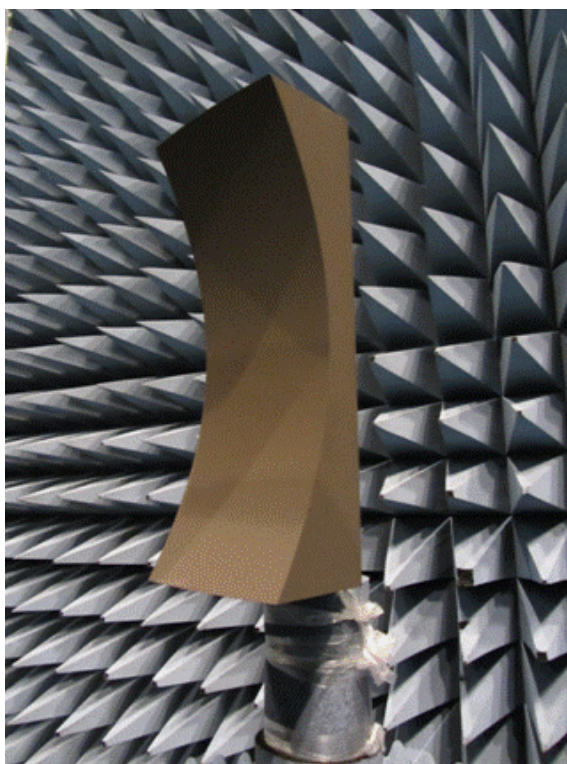
図 2.18 に、放射パターン測定結果と計算値の比較を示す。図 2.18 (a) は、垂直面 ( $xz$  面：ビーム走査面) におけるビーム走査角  $0$  度と  $-2.5$  度の比較である。垂直面において、所望のビーム方向へのビーム走査機能が確認でき、イメージングリフレクタアンテナの特性が得られている。ビーム走査角  $0$  度の利得の測定値は  $32.4\text{dBi}$ 、開口能率は約  $48\%$  であった。試作アンテナに使用した導電性塗料は導電率が  $4000\text{S/m}$  であり、導体損失は  $0.14\text{dB}$  である。設計値と測定値の差は、 $0.2\text{dB}$  であり、測定値は妥当と考えられる。測定値におけるビーム走査時の利得変化は  $0.8\text{dB}$  であり、計算値の利得低下量と一致していることを確認した。図 2.18 (b) は、水平面 ( $yz$  面：非ビーム走査面) におけるビーム走査角  $0$  度の比較である。開口径に対応したビーム幅が得られ、ヌル点も一致しており、水平面については、カセグレンアンテナの特性が得られていることを確認できた。なお、 $\pm 10$  度以降の低いレベルにおいて測定値と計算値に差異が生じているが、計算値には一次放射器や副反射鏡を支持する柱や土台となるプレートなどを考慮していないためと考えられる。

ここで、図 2.16 (b) と図 2.18 に示した計算値は、図 2.15 に示す計算値と異なる。測定後に詳細に比較をした結果、測定値との差異が大きいことが判明した。ビーム走査角 0 度のときの正面方向の利得の周波数特性に着目すると、大きなリップルが生じていた。そのリップルの周波数間隔から、一次放射器と副反射鏡の間での多重反射が原因と考えられる。この多重反射の影響を物理光学法での計算に反映するため、一次放射器の位置に、一次放射器の寸法の金属平板を配置した。金属平板の散乱パターンと副反射鏡で散乱するパターンを計算した。その結果を図 2.15 の計算値に加算して、図 2.16 (b) と図 2.18 の計算値としている。

以上より、測定値は計算値と良好に一致する結果が得られ、本アンテナの基本動作を確認でき、本アンテナの構成と設計法の有効性を実証した。



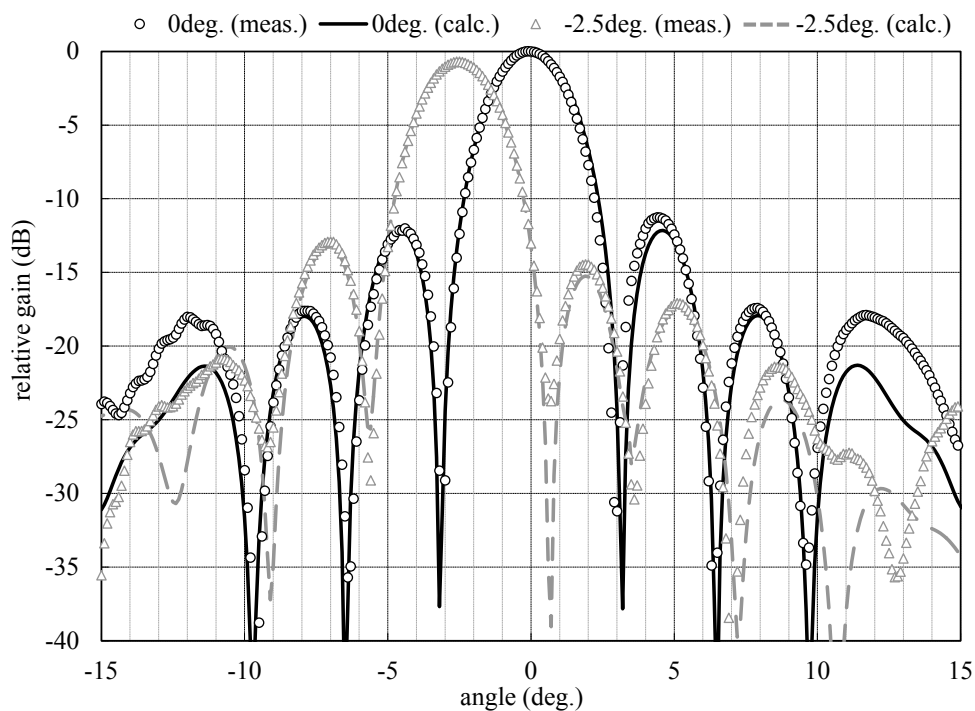
(a) 全体図



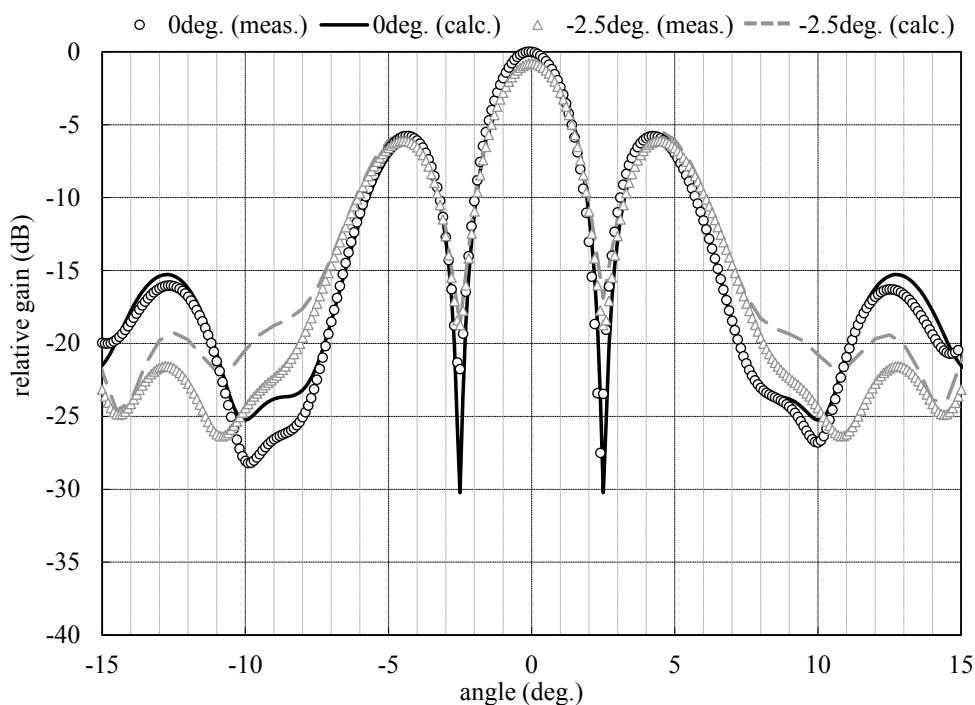
(b) 副反射鏡拡大図

図 2.17 試作アンテナの写真





(a) 垂直面 (xz 面)



(b) 水平面 (yz 面)

図 2.18 放射パターンの計算値と測定値の比較

## 2.5 むすび

本章では、センターフィード形式の反射鏡アンテナで、ビーム走査機能を一次元に限定した新しい反射鏡アンテナを提案した。本アンテナの鏡面構成は、ビーム走査面がビーム走査可能でかつビーム走査に関わらず主反射鏡全体を活用できるイメージングリフレクタアンテナ、非ビーム走査面がブロッキングを最小とするカセグレンアンテナである。このような鏡面を実現する方法として、副反射鏡を二重曲面反射鏡とする条件で構成し、主反射鏡は光路長一定の条件で構成する幾何光学的手法を適用した。試作アンテナを設計し、本アンテナの基本動作の検証を行い、所望のビーム走査機能を確認した。さらに、ビーム走査時の利得変化を変位給電方式の反射鏡アンテナと比較した結果、本アンテナの方が 2.6dB 高くなることを確認した。最後に、試作アンテナを測定した結果、計算値と測定値は良好に一致することを確認した。以上より、本アンテナの構成および設計法の有効性を実証した。また、本章で述べた設計法は直交断面で異なるパターンを有する反射鏡アンテナ、例えば航空管制に使用されるようなコセカント 2 乗ビームの設計にも適用可能であり、実用性は高いと考えられる。

## 第3章

# 非ビーム走査面を軸偏位形式としたビーム走査可能な反射鏡アンテナ

一次放射器と副反射鏡の間で生じる多重反射による放射特性の劣化を低減する次元にビーム走査可能な反射鏡アンテナを提案する。本アンテナは、ビーム走査面の形状をイメージングリフレクタアンテナ[20]、それと直交する非ビーム走査面の形状をリングフォーカスカセグレンアンテナ[23]としたことが特長である。本章では、非ビーム走査面の形状が異なる第2章のアンテナと比較するため、同サイズのアンテナの設計と測定により、本アンテナの構成および設計法の有効性を検証する。

### 3.1 まえがき

第2章では、小型衛星に搭載する新しい SAR のアンテナとして次元にビーム走査可能なセンターフィード形式の反射鏡アンテナの構成と設計法について述べた。しかし、一次放射器と副反射鏡の間での多重反射により、サイドローブの劣化や利得の周波数変動が生じる課題があった。

この課題を解決する方法について考える。一つは、頂点整合板[25]を用いる方法、もう一つは、リングフォーカス反射鏡アンテナの適用[23]である。頂点整合板は、反射鏡から一次放射器への反射波を抑圧するための構造である。設計中心周波数に関する多重反射の位相関係を打ち消すように設計されるため、周波数特性が悪い。また、設計した鏡面に装荷するため、頂点整合板の大きさによっては、放射パターン特性が劣化する可能性もある。一方、リングフォーカス反射鏡アンテナは、副反射鏡を表現する2つの焦点の軸を

傾けた鏡面構成となる。よって、鏡面幾何光学的には一次放射器から放射された電波が副反射鏡で反射した後、一次放射器へ入射すること無く設計することが可能であり、周波数特性についても期待できる。

そこで、多重反射による放射特性の劣化を低減する次元にビーム走査可能な反射鏡アンテナを提案する。本アンテナは、アレー配列面内は幾何光学的にはビーム走査に関わらず、一次放射器から放射された電波が常に主反射鏡全体を照射することができるイメージングリフレクタアンテナであり、これと直交する面内をリングフォーカスカセグレンアンテナで構成されるアンテナである。これにより、第2章のアンテナのビーム走査機能を残したまま、多重反射の問題を解決し、開口能率の改善が期待できる。鏡面形状の設計には、第2章のアンテナと同様に、二重曲面反射鏡の理論による幾何光学的手法を適用する。そして、第2章のアンテナと同サイズの試作アンテナを設計し、測定を行い、本アンテナの構成と設計法の有効性について検証する。

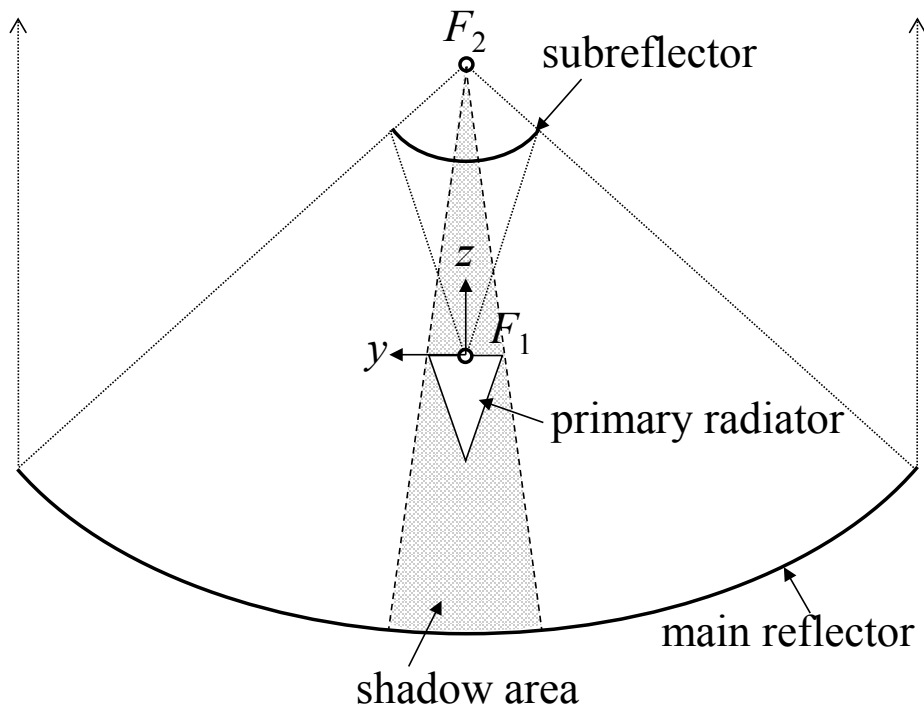
## 3.2 アンテナの構成と設計法

### 3.2.1 構成

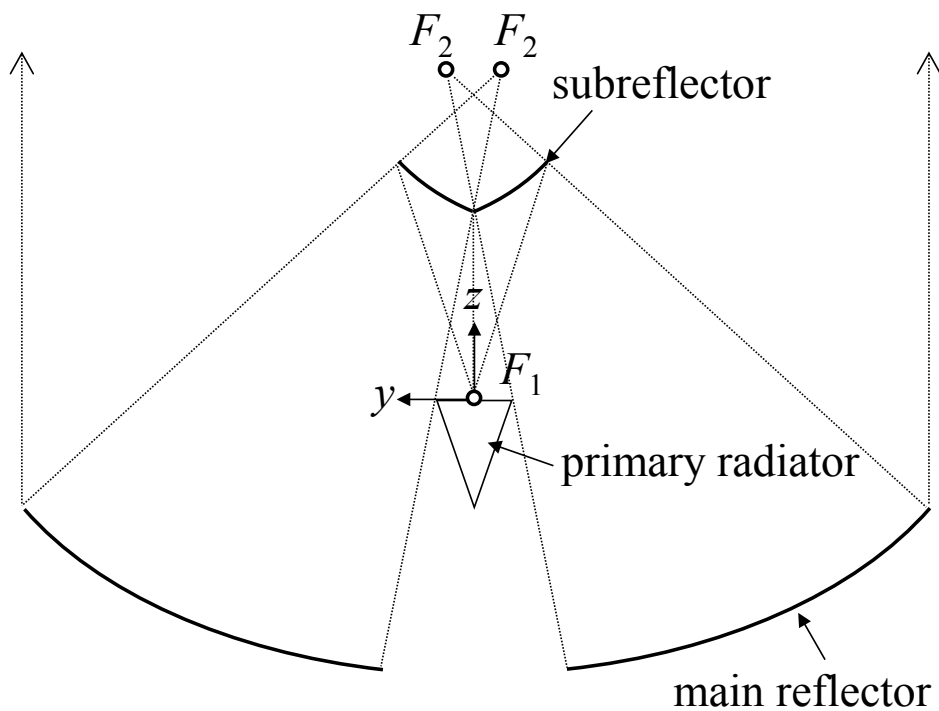
本アンテナは、一次元フェーズドアレーアンテナを一次放射器としたセンターフィード形式の複反射鏡アンテナである。アンテナの鏡軸方向を  $z$  軸とする。 $xz$  面（アンテナの垂直面と定義）内は、副反射鏡と主反射鏡が相似の放物線で表現されるイメージングリフレクタアンテナ、 $yz$  面（アンテナの水平面と定義）内は、副反射鏡が双曲線、主反射鏡が放物線で表現されるカセグレンアンテナの形状を有している。ビーム走査は1次元に限られるが、オフセット形式のイメージングリフレクタアンテナにおける優れたビーム走査特性を、センターフィード形式で実現することができる。

図 3.1 に、第 2 章のアンテナと本アンテナの  $yz$  面の構成の比較を示す。図 3.1 (a) の第 2 章のアンテナの  $yz$  面は、軸対称カセグレンアンテナである。一次放射器原点  $F_1$  と焦点  $F_2$  を結ぶベクトルは、鏡軸と一致している。副反射鏡は、それらを焦点とする双曲線で表現される。主反射鏡は、焦点  $F_2$  とした放物線で表現される。この構成の場合、電波が一次放射器から副反射鏡を介して主反射鏡に照射されるときに、一次放射器がブロッキングとなる。そのため、一次放射器と副反射鏡の間で多重反射が発生する。また、一次放射器のブロッキングにより、幾何光学的に電波が照射されない影領域が主反射鏡上に形成される。これにより開口能率が低下する。

本アンテナでは、 $yz$  面を図 3.1 (b) に示すリングフォーカスカセグレンアンテナの構成とする。副反射鏡は、同様に  $F_1$  と焦点  $F_2$  を焦点とする双曲線で表現される。主反射鏡は、副反射鏡の後側にある焦点  $F_2$  を通り、鏡軸と平行な線を軸とする放物線で表現される。図 3.1 (a) と異なるところは、焦点  $F_1$  と焦点  $F_2$  を結ぶベクトルが、鏡軸に対して傾きを持っている、すなわち、一次放射器の軸と鏡軸が平行なオフセットカセグレンアンテナを、一次放射器の軸を中心として回転させた形状となる。これにより、幾何光学的には図 3.1 (b) に示すように、副反射鏡から主反射鏡に向かう光線が、一次放射器へ入射しないように設計することが可能となる。



(a) 第2章のアンテナ



(b) 第3章のアンテナ

図 3.1  $yz$  面におけるアンテナ形状の比較

鏡面形状の決定方法について簡単に述べる．図 3.2 に，円筒波を放射する線状波源で仮定した一次放射器の中心を原点  $\mathbf{O}$  とする直交座標系における一次放射器と副反射鏡を示す．肋骨曲線に相当する  $yz$  面内のリングフォーカスカセグレンアンテナの副反射鏡形状を，脊椎曲線に相当する  $xz$  面内の放物線に沿って形成される二重曲面反射鏡によって表すことができる．肋骨曲線となる  $yz$  面内の形状は式 (3.1) によって定義される．式 (3.1) は，リングフォーカス形式のアンテナを定義する一般式[24]であり， $\bar{e} = \delta p e$  であり， $\delta = 1$  は凹面鏡， $\delta = -1$  は凸面鏡， $p = 1$  は双曲線， $p = -1$  は楕円曲線を表現するパラメータである．さらに， $e$  は離心率， $a$  は副反射鏡定数， $\alpha$  は原点  $\mathbf{O}$  ( $F_1$ ) と焦点  $F_2$  を通る直線と  $z$  軸に沿った鏡軸とのなす角度である．第2章のアンテナはカセグレンアンテナであり，比較の観点から， $\delta = -1$ ， $p = 1$  とする．また，主反射鏡は一次放射器から副反射鏡を介した光路長一定の法則を満足する条件で決定する．

$$r(\phi) = \frac{\delta p a (\bar{e}^2 - 1)}{1 + \bar{e} \cos(\phi - \alpha)} \quad (3.1)$$

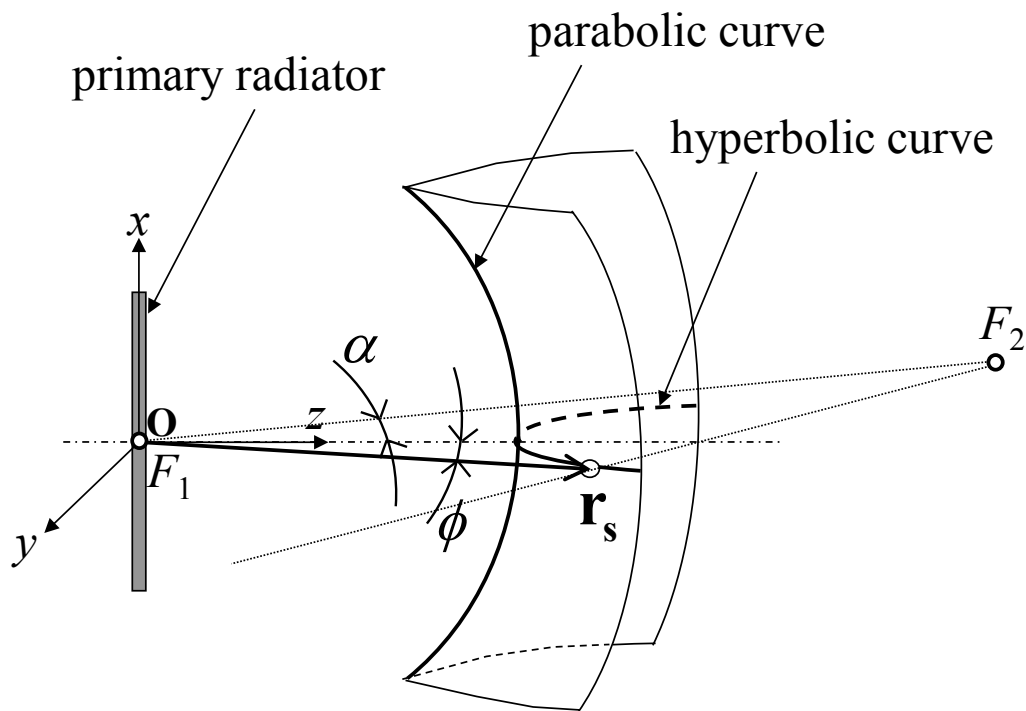


図 3.2 副反射鏡を表現する座標系

### 3.2.2 設計法

鏡面の設計法については、初めにイメージングリフレクタアンテナとなる  $xz$  面を設計し、次にリングフォーカスカセグレンアンテナとなる  $yz$  面を設計する。 $xz$  面の設計法は、第2章の設計を参考にすることし、ここでは  $yz$  面の設計法について述べる。

図3.3に、 $yz$  面の鏡面パラメータを示す。 $yz$  面内の副反射鏡見込み角： $\theta_0$ 、主反射鏡焦点： $F_2$ と主反射鏡上端を通る直線と鏡軸とのなす角： $\theta_2$ を与えることで、離心率  $e$  は式 (3.2) によって決まる。

$$e = -\frac{\sin\left(\frac{\theta_0 + \theta_2}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\theta_0 + \theta_2}{2} - \alpha\right)} \quad (3.2)$$

副反射鏡定数： $a$  は、 $xz$  面の設計で決まる  $F_A$  を用いて、式 (3.3) によって決まる。

$$a = \frac{F_A(1 - e \cos(-\alpha))}{1 - e^2} \quad (3.3)$$

主反射鏡焦点： $F_2$ と主反射鏡下端を通る直線と回転軸とのなす角： $\theta_1$  は、式 (3.4) によって決まる。

$$\theta_1 = \pi - \alpha - 2 \tan^{-1} \left( -\left(\frac{e+1}{e-1}\right) \frac{1}{\tan\left(\frac{-\alpha}{2}\right)} \right) \quad (3.4)$$

主反射鏡焦点： $F_2$ と副反射鏡下端との距離： $R_2$  は、式 (3.5) によって決まる。

$$R_2 = \frac{a(e^2 - 1)}{1 + e \cos(\theta_1 + \alpha)} \quad (3.5)$$

よって、主反射鏡の焦点距離： $F$  と、主反射鏡径： $D_{M2}$  は、それぞれ式 (3.6) と式 (3.7) によって決まる。

$$F = R_2 \cos \theta_1 + F' \quad (3.6)$$

$$D_{M2} = 4F \tan\left(\frac{\theta_2}{2}\right) + 4ae \sin \alpha \quad (3.7)$$

最後に、副反射鏡径： $D_{S2}$  と、主反射鏡の影領域： $D_m$  は、それぞれ式 (3.8)



と式 (3.9) によって決まる. なお, 式 (3.8) と式 (3.9) の関係は, 開口能率の高能率化の観点から式 (3.10) のように  $D_{in}$  は  $D_{S2}$  より若干大きくして決定することが望ましい.

$$D_{S2} = \frac{-2a(e^2 - 1)\sin\theta_0}{1 - e\cos(\theta_0 - \alpha)} \quad (3.8)$$

$$D_{in} = 2(F_s + F_M)\tan\theta_1 \quad (3.9)$$

$$D_{in} \geq D_{S2} \quad (3.10)$$

以上により, 本アンテナについても, 二重曲面反射鏡の理論に基づいて設計することができる.

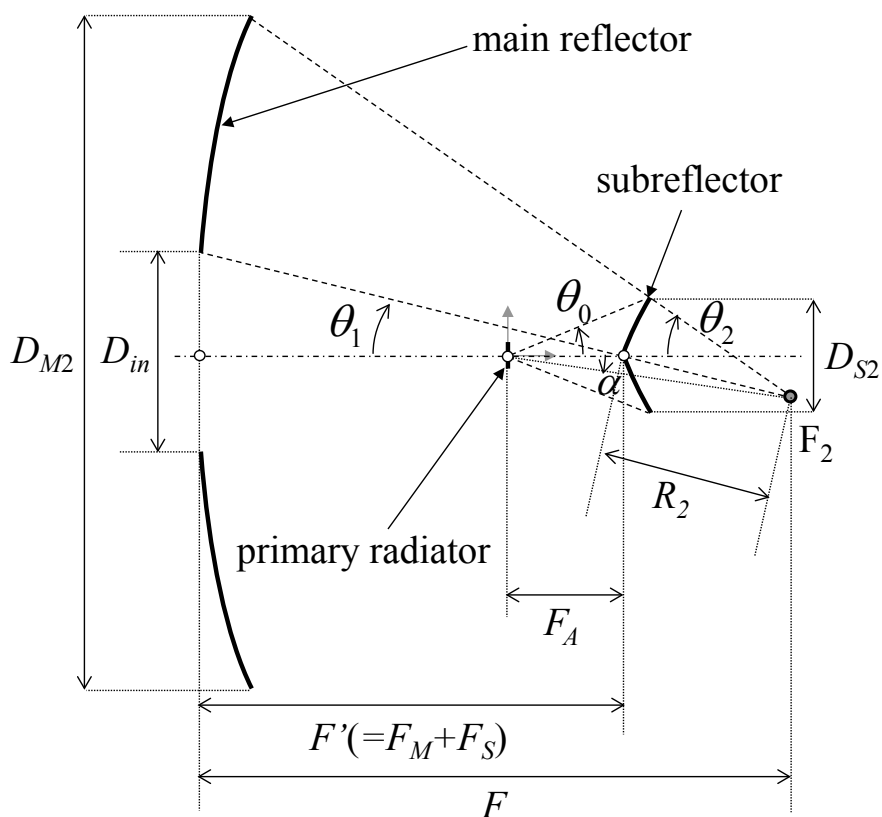
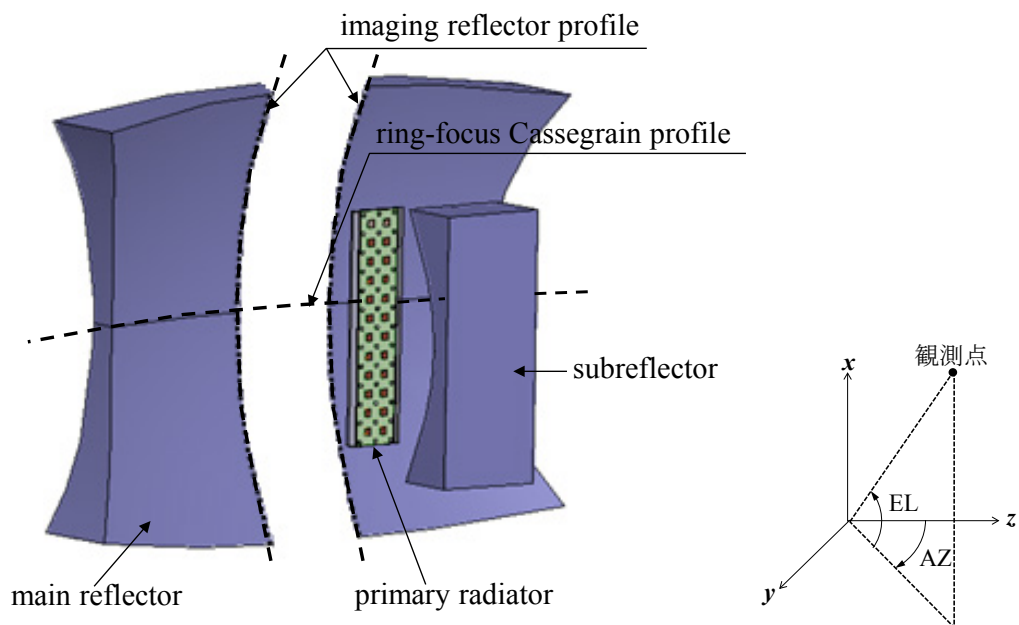


図 3.3 yz 面の鏡面パラメータ

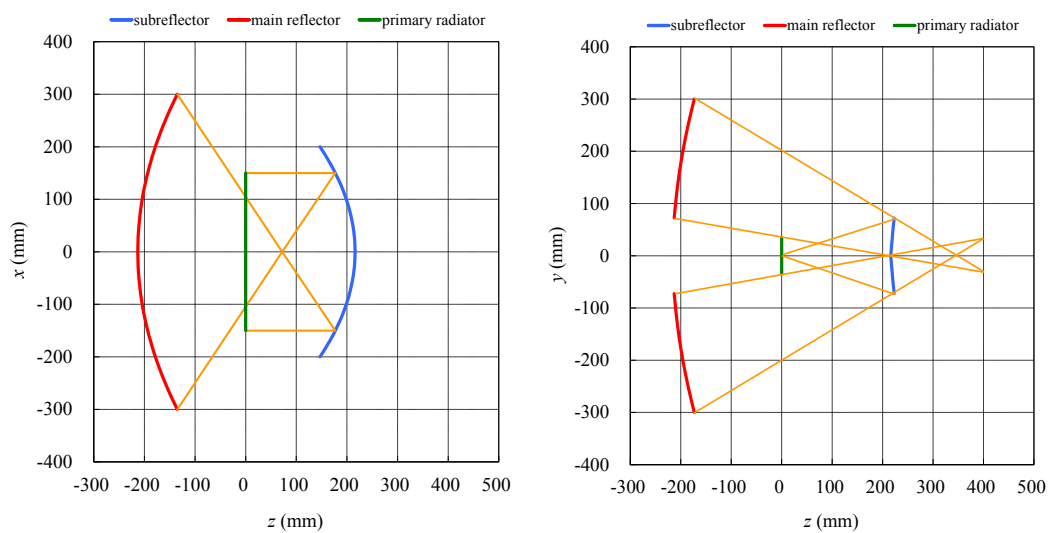
### 3.3 試作アンテナの設計

第2章のアンテナの諸元は、ビーム走査面である  $xz$  面内の中心断面の大きさと、 $yz$  面内の中心断面の大きさはそれぞれ  $600\text{mm}$ 、イメージングリフレクタアンテナの倍率は2、ビーム走査角度は $\pm 2.5$ 度を走査するように設計されていた。本アンテナの有効性を示すために、第2章のアンテナと同サイズの鏡面を設計する。まず、 $xz$ 面の設計については、第2章のアンテナのパラメータを用いることで、一次放射器と、副反射鏡、主反射鏡の位置関係は同一となる。次に  $yz$  面については、式 (3.10) の条件を満足するように、 $\alpha$  を $-4.5$ 度に設定して、水平面を設計した。図 3.4 に、設計したアンテナの概観図と各断面図を示す。第2章のアンテナと異なり、本アンテナは、主反射鏡の中央部には鏡面が存在していない。これは、 $yz$ 面はリングフォーカスカセグレンアンテナであり、一次放射器が主反射鏡に作る影の部分には、幾何光学的に電波が照射されないように設計されているためである。図 3.5 に、副反射形状の第2章のアンテナとの比較を示す。明らかに形状が違うことがわかる。図 3.5 (b) に示す本アンテナでは、 $xz$ 面に沿って鏡面に筋が入っており、 $yz$ 面がリングフォーカスカセグレンアンテナで設計されていることが確認できる。この試作アンテナを用いて、本アンテナの有効性を計算にて検証していく。一次放射器は、第2章のアンテナと同様、 $2 \times 12$ 素子の無給電素子つき正方形パッチアレーアンテナを用いた。設計周波数は  $9.6\text{GHz}$  であり、一次放射器の偏波は、垂直偏波 ( $xz$ 面方向の偏波) である。

図 3.6 と図 3.7 には、ビーム走査角が  $0$  度、 $-2.5$  度としたときの、第2章のアンテナと本アンテナにおける主反射鏡上の開口振幅分布の比較を示す。図 3.4 (a) に示したように、主反射鏡の中央部に鏡面は無い設計であるが、本アンテナの効果を確認するために、図中の点線部に曲面を装荷している。図 3.6 (b)、図 3.7 (b) に示す通り、本アンテナでは、点線部内の振幅が第2章のアンテナに対して約  $10\text{dB}$  低減されていることがわかる。これは、 $yz$ 面がリングフォーカスカセグレンアンテナで設計した効果と考えられる。



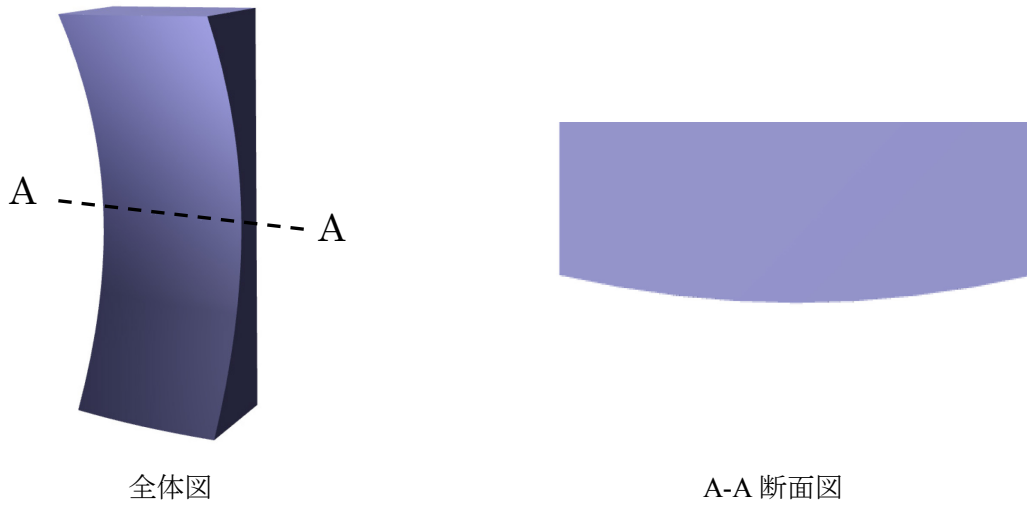
(a) 試作アンテナ全体図



(b)  $xz$  面

(c)  $yz$  面

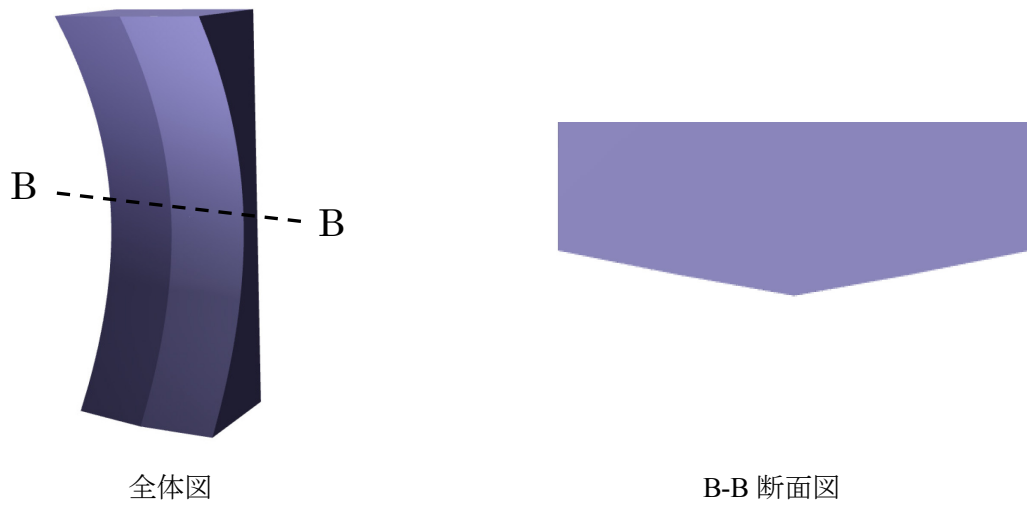
図 3.4 試作アンテナの概略図



全体図

A-A 断面図

(a) 第2章のアンテナ



全体図

B-B 断面図

(b) 第3章のアンテナ

図 3.5 副反射鏡アンテナ形状の比較

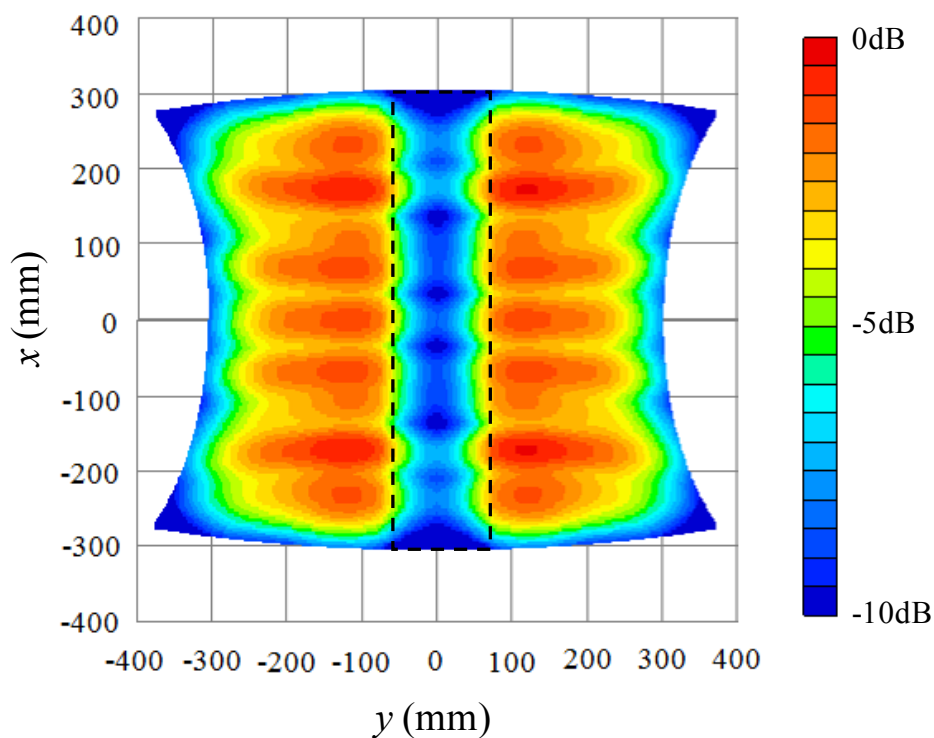
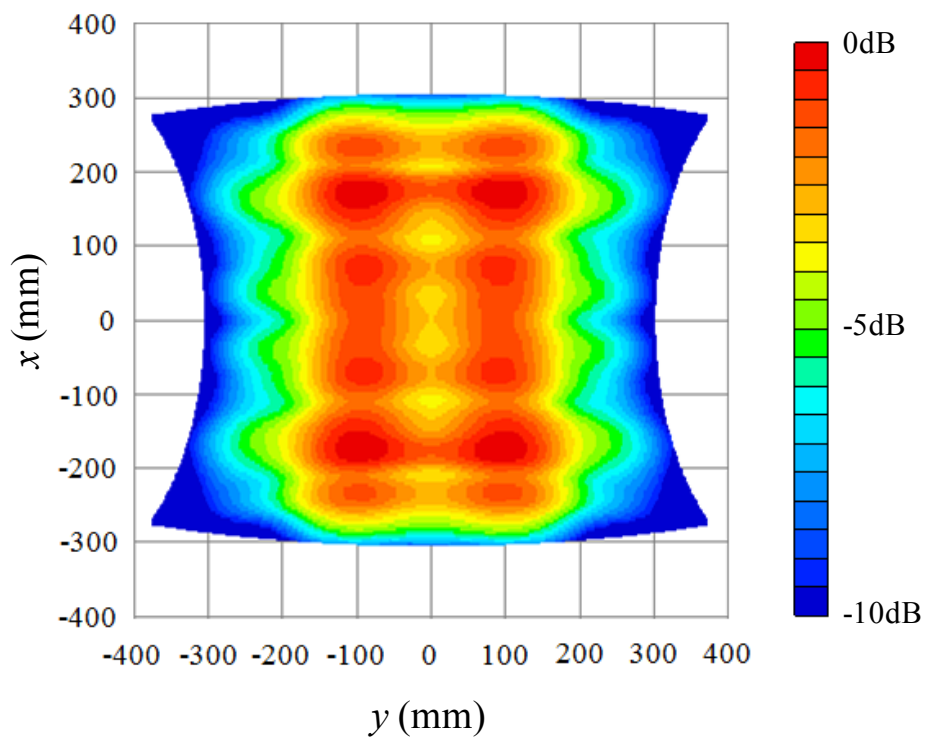


図 3.6 主反射鏡の開口振幅分布の比較  
(ビーム走査角  $0^\circ$ )

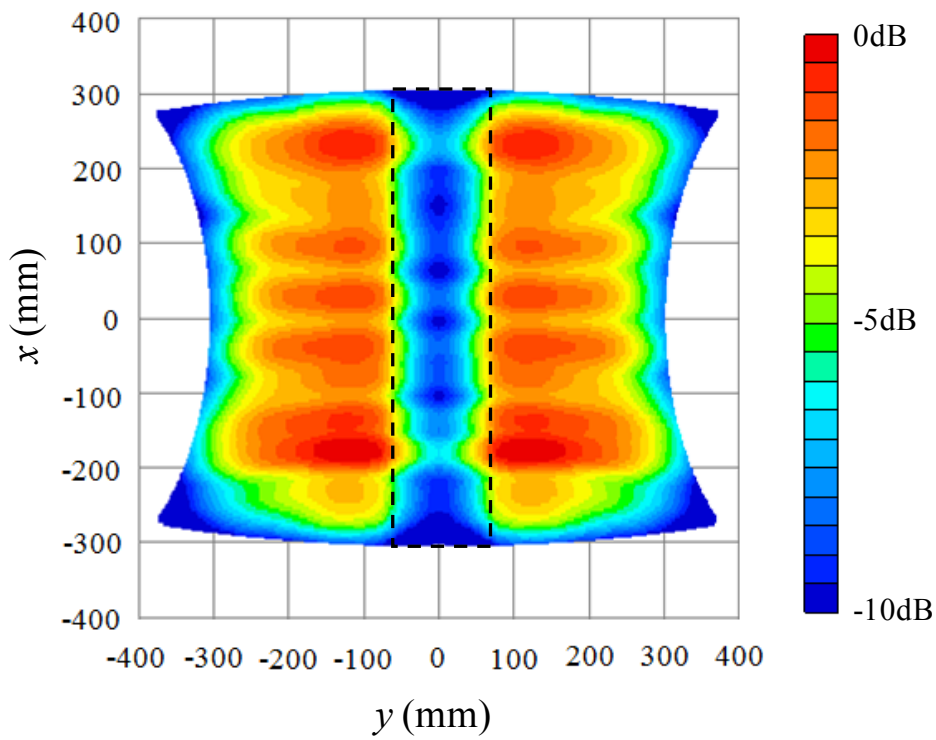
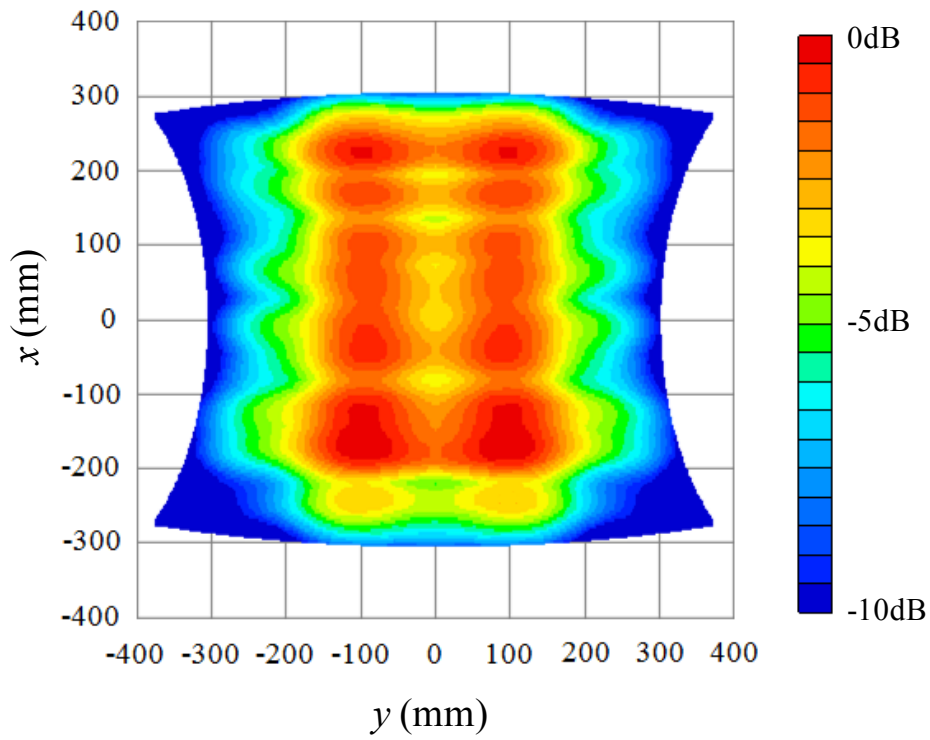


図 3.7 主反射鏡の開口振幅分布の比較  
(ビーム走査角 $-2.5^\circ$ )

図 3.8 は、ビーム走査角 0 度のときに、第 2 章のアンテナと本アンテナの利得の周波数特性 (9.3 GHz から 9.9GHz の帯域) を比較したものを示す。なお、図 3.8 中の実線は第 2 章のアンテナ、点線が本アンテナの周波数特性である。第 2 章のアンテナでは、多重反射により、最大 2dBp-p の大きなリップルが確認できる。一次放射器と副反射鏡間の往復距離は 432mm (216mm×2) である。図 3.8 に示す第 2 章のアンテナのリップルの周波数間隔は 0.35GHz であり、距離に換算すると約 430mm とほぼ一致することがわかる。本アンテナの設計でもこの位置関係は同一である。本アンテナでは、リップルが最大 0.9dBp-p まで低減されていることが確認できる。リップルが完全に消えていない理由は、副反射鏡の大きさが波長に比べて十分ではなく、使用した一次放射器の yz 面のビーム幅が広いため、副反射鏡のエッジレベルが十分低下していない。そのため、副反射鏡エッジで散乱した波が一次放射器に戻ってきているものと考えられる。さらに、図 3.8 において、第 2 章のアンテナよりも本アンテナの方が、全体的に利得が増加していることがわかる。設計中心周波数である 9.6GHz で見てみると、第 2 章のアンテナでは 32.6dBi、本アンテナでは 33.0dBi と 0.4dB の増加を確認した。損失の内訳を確認すると、第 2 章のアンテナに比べて、本アンテナは、振幅分布による損失が 1.2dB 改善、スピルオーバーによる損失が 0.8dB 劣化であった。リングフォーカスカセグレンアンテナを採用したことにより、効率的に主反射鏡に副反射鏡からの電波が照射されたと考えられる。

最後に、本アンテナでもビーム走査機能が損なわれていないか確認する。図 3.9 に、ビーム走査角 0 度と、ビーム走査角 -2.5 度のときの 2 次元放射パターン特性を示す。本アンテナにおいても、設定したビーム走査角度にビーム走査が行われていることが確認できる。

以上より、第 2 章のアンテナで課題であった多重反射を低減するために、yz 面をリングフォーカスカセグレンアンテナとした本アンテナの構成と設計法の有効性を計算にて検証することができた。

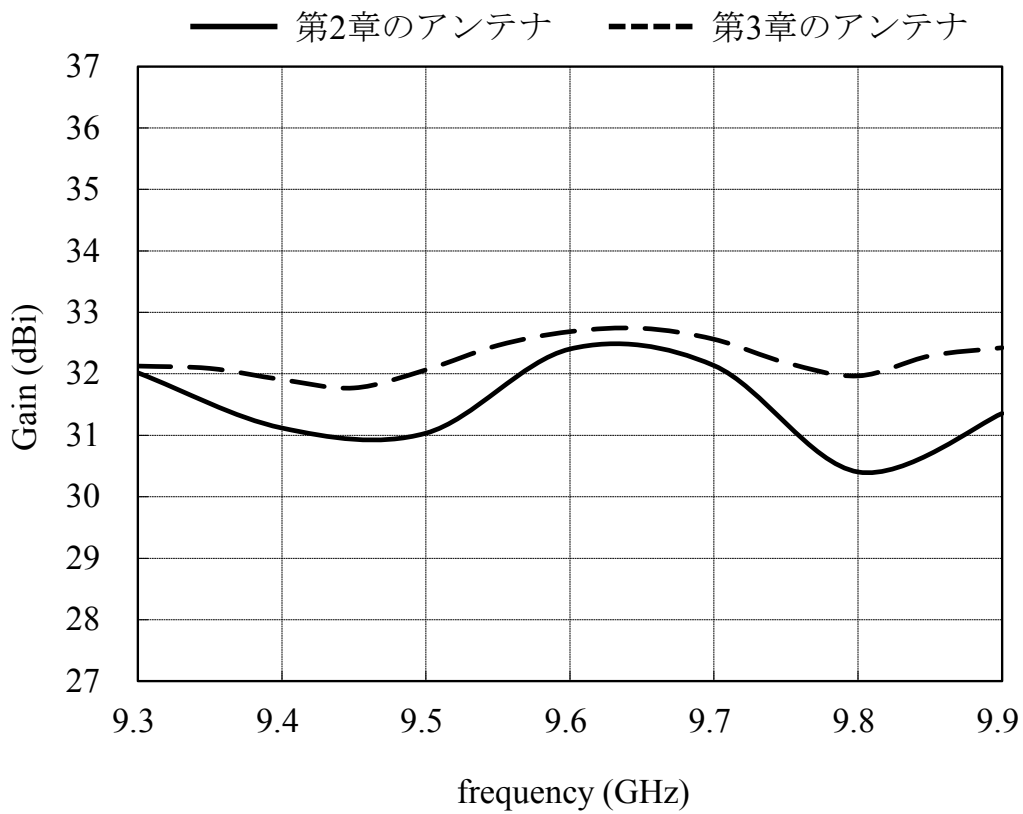
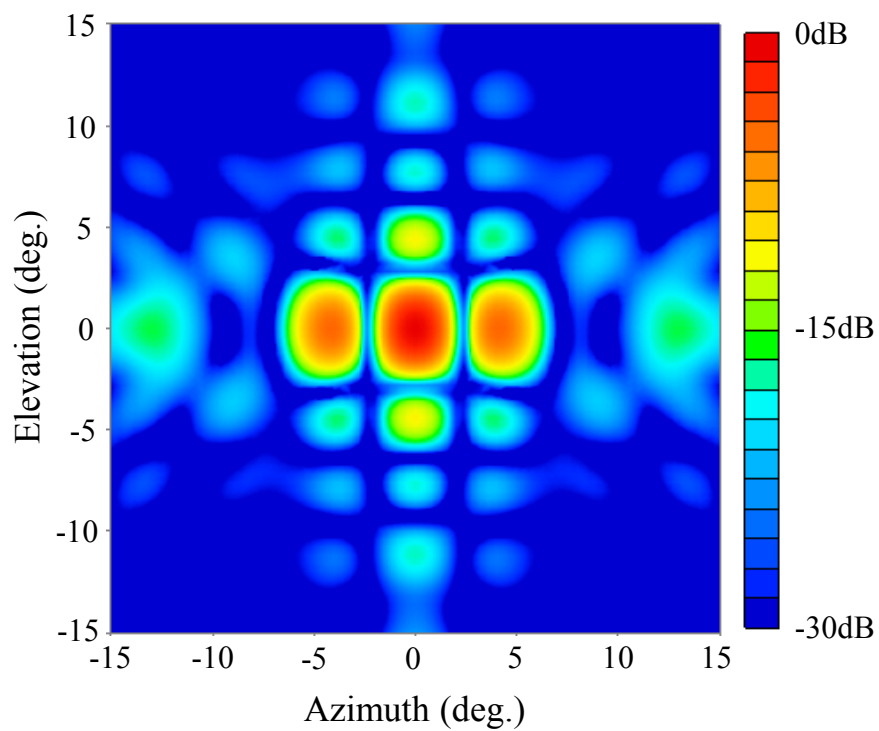
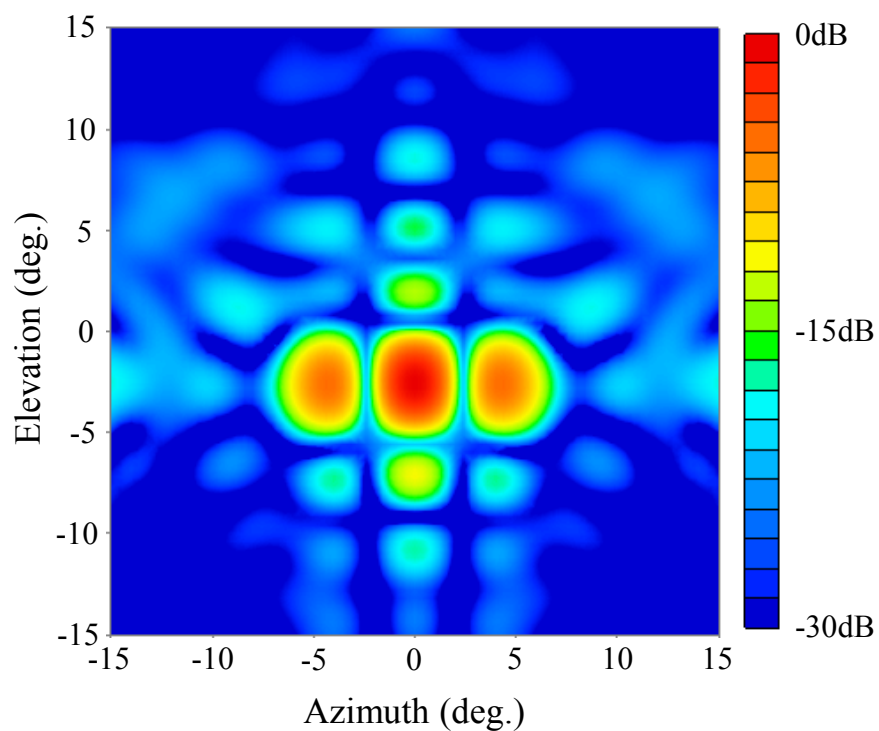


図 3.8 正面方向利得の周波数特性の比較





(a) ビーム走査角 :  $0^\circ$



(b) ビーム走査角 :  $-2.5^\circ$

図 3.9 ビーム走査時の2次元放射パターン計算値

### 3.4 試作アンテナの測定

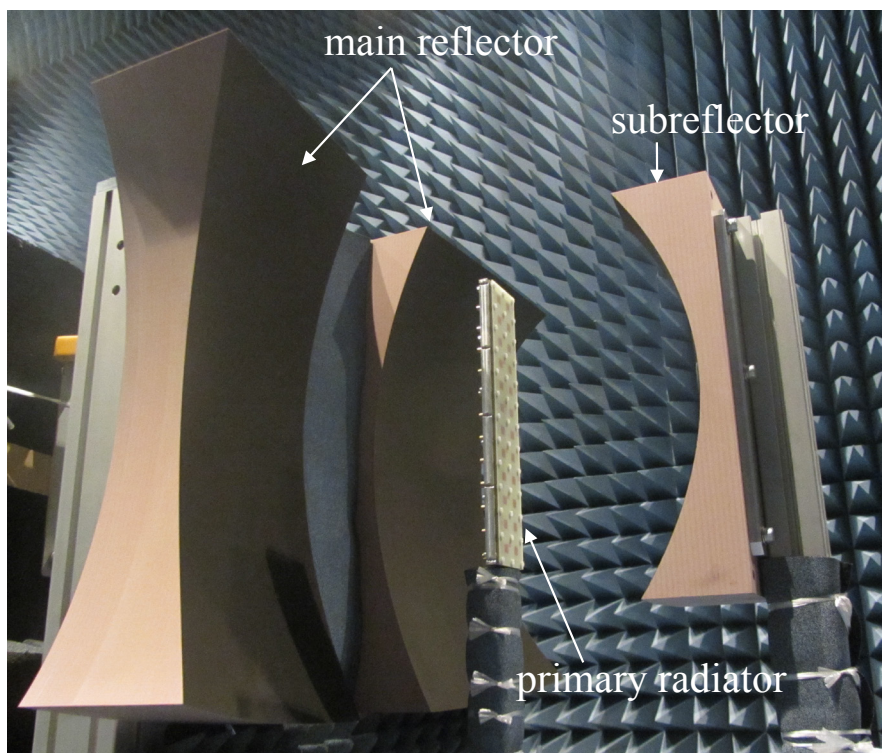
一次放射器と副反射鏡の間で生じる多重反射による放射特性の劣化の低減効果を確認することを目的に、試作アンテナを製作し、利得の周波数特性と放射パターンを測定した結果について示す。図 3.10 は、試作アンテナの写真である。第 2 章のアンテナと同様に、主反射鏡と副反射鏡は人工木材で製作し、その表面に導電性塗料を塗布している。また、一次放射器も、第 2 章のアンテナの測定で用いた 24 素子アレーアンテナを使用した。測定では、コンパクトアンテナテストレンジにより、利得の周波数特性と、放射パターン特性を測定した。アレーアンテナに給電回路を用意していないため、各素子の入力端子に測定コネクタをつなぎ替えて、各素子の二次パターンを一つずつ測定した。その結果をもとに、ビーム方向に共相となるように位相を設定して測定データを計算機上で合成することとした。また、図 3.10 (a) に示すように、ジグの都合上、主反射鏡の間に金属板が存在するため、測定時には、吸収体を装荷して測定した。放射パターンの測定周波数は 9.6GHz とし、利得の周波数特性は図 3.8 と同様に 9.3 GHz から 9.9GHz の範囲で測定した。

図 3.11 は、ビーム走査角 0 度のときの利得の周波数特性を、測定値と計算値で比較したものである。測定値と計算値は良好に一致していることが確認でき、本アンテナでは、第 2 章のアンテナで生じていた多重反射が低減されていることを確認できた。測定値は計算値に比べて帯域内で 0.2dB ほど低下しているが、これは、鏡面の塗装に使用した導電性塗料（ポリウレタン樹脂を主成分としてニッケルを金属として混合した材料）による損失（導電率：4000S/m, 導体損：0.14dB）であり、結果は妥当といえる。

図 3.12 は、ビーム走査角 0 度と -2.5 度のときの垂直面、水平面での放射パターン特性を、測定値と計算値で比較したものである。測定値と計算値は良好に一致しており、所望のビーム方向にビームを走査できることが確認できた。ビーム走査角 0 度の正面方向の利得は 32.8dBi（能率 52%）であり、第 2 章のアンテナの 32.4dBi（能率 48%）より改善した結果を得られており、yz 面にリングフォーカスカセグレンアンテナを採用したことで、第 2 章のアンテナではブロッキング領域に照射されていた成分が、効率的に副反射鏡から

の電波が主反射鏡に照射され、計算値同様に利得も改善する効果を確認できた。

以上より、計算値は測定値と良好に一致する結果が得られ、一次放射器と副反射鏡の間で生じる多重反射による放射特性の劣化の低減効果を確認でき、本アンテナの構成と設計法の有効性を実証した。



(a) 全体図



(b) 副反射鏡拡大図

図 3.10 試作アンテナの写真

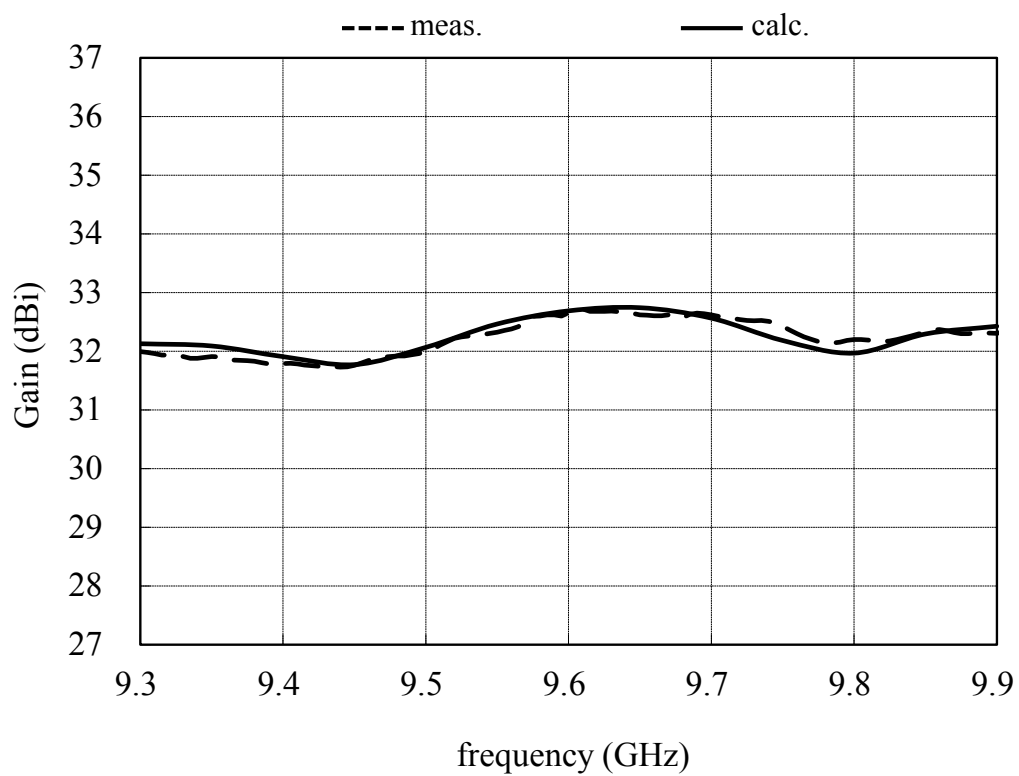
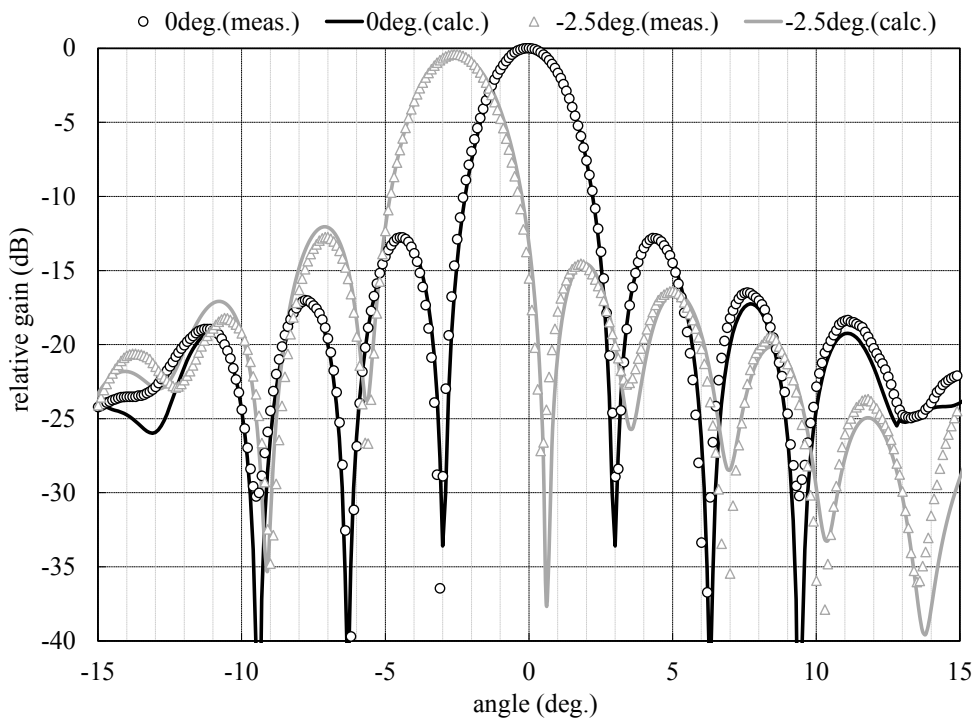
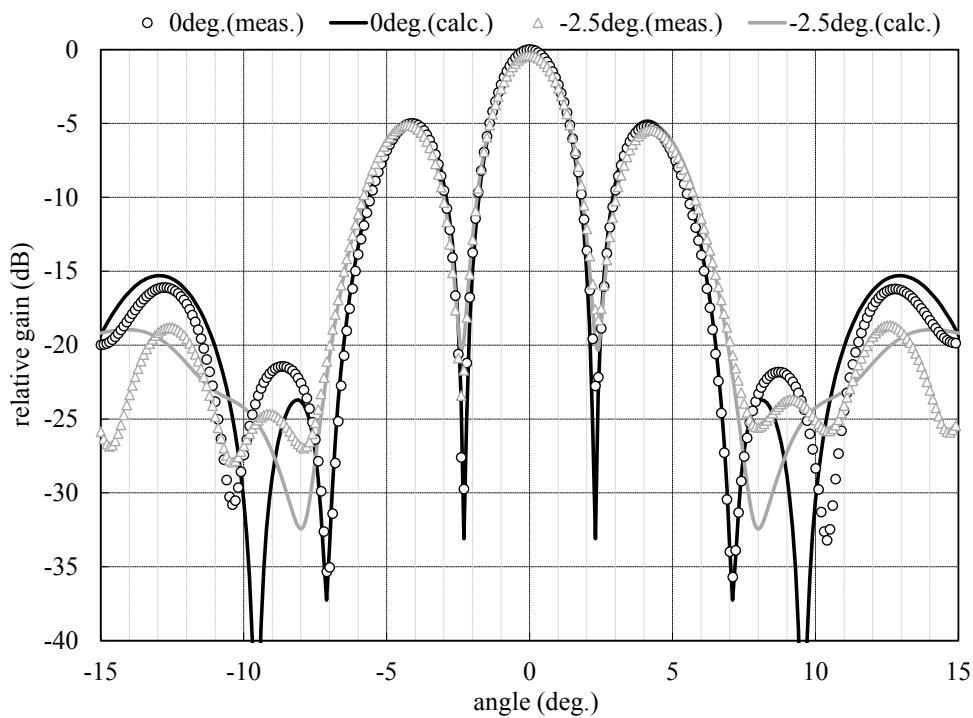


図 3.11 正面方向利得の周波数特性の計算値と測定値の比較



(a) 垂直面 (xz 面)



(b) 水平面 (yz 面)

図 3.12 放射パターンの計算値と測定値の比較

### 3.5 まとめ

本章では、多重反射による放射特性の劣化を低減する一次元にビーム走査可能な反射鏡アンテナを提案した。第2章のアンテナにおいて生じていた一次放射器と副反射鏡間の多重反射を低減するため、 $yz$ 面の反射鏡形状をリングフォーカスカセグレンアンテナとした。鏡面形状の決定方法とリングフォーカスカセグレンアンテナの設計法を示し、第2章のアンテナと同サイズのアンテナを設計し、測定した。測定結果より、利得の周波数特性の平坦度は、第2章のアンテナでは  $2\text{dBp-p}$  のところ、本アンテナでは、 $0.9\text{dBp-p}$  と  $1.1\text{dB}$  の改善効果を確認した。また、利得を設計中心周波数  $9.6\text{GHz}$  において第2章のアンテナと比べると  $0.4\text{dB}$  の増加を確認した。ともに、 $yz$ 面にリングフォーカスカセグレンアンテナを採用したことにより、多重反射を軽減するとともに、効率的に副反射鏡からの電波が主反射鏡に照射され、開口分布が改善したことによる効果であると考えられる。以上より、本アンテナの構成および設計法の有効性を実証した。

## 第4章

# 楕円開口形状を有するビーム走査可能な反射鏡アンテナ

広域観測[9]を実現する楕円開口形状を有する一次元にビーム走査可能な反射鏡アンテナを提案する. 本アンテナの構成は, 第3章のアンテナと同様, 衛星進行方向 (アジマス方向) の面内の形状がリングフォーカスカセグレンアンテナ[23], それと直交する方向 (エレベーション方向) の面内の形状がイメージングリフレクタアンテナ[20]である. 広域観測のためには, エレベーション方向の開口径を小さく, アジマス方向の開口径を大きくした楕円開口の反射鏡アンテナが必要である. 本章では, 第3章で示した設計法を用いて, 直交断面内でビーム幅が2倍以上異なる楕円開口形状のアンテナの設計と測定により, 本アンテナの構成および設計法の有効性を検証する.

### 4.1 まえがき

第2章では, 小型衛星に搭載する新しい SAR のアンテナとして, 一次元フェーズドアレイアンテナを一次放射器としたセンターフィード形式の反射鏡アンテナについて述べた. ビーム走査機能は一次元に限られるが, 変位給電方式マルチフィード形式の反射鏡アンテナに比べて, ビーム走査時の利得低下を小さくできるとともに, 連続的なビーム走査が可能となる特長を有する. また第3章では, 第2章で示したアンテナで生じた一次放射器と副反射鏡の間の多重反射による放射特性の劣化を低減するため, 非ビーム走査面の鏡面形状をリングフォーカスカセグレンアンテナとしたビーム走査可能な反射鏡アンテナについて述べた.

突発的な自然災害の状況把握については, 一度に広範囲の観測ができれば, 迅速な対応を取ることができる. 第2章, 第3章で示したアンテナは, 衛星



のアジマス方向とエレベーション方向のアンテナの開口径は同一である。一般的に SAR ではアンテナの 3dB ビーム幅内を撮像範囲とすることが多い。広範囲の観測を実現するためには、所望の分解能を達成するアンテナ利得を確保する開口面積を有しつつ、アジマス方向の開口径よりもエレベーション方向の開口径を小さくする。これにより、ビーム幅が広くなり、撮像範囲を広げることが可能となる。すなわち、広域観測に向けては、直交断面で開口径が異なる反射鏡アンテナの実現が必要である。

そこで、楕円開口形状を有するセンターフィード形式の一次元ビーム走査可能なフェーズドアレイ給電反射鏡アンテナを提案する。本アンテナは第3章で述べたアンテナの設計法を適用することで設計が可能である。そこで、直交断面内でビーム幅が2倍以上異なる楕円開口寸法 (1600mm×600mm) における試作アンテナの設計と測定により、本アンテナの構成および設計法の有効性を検証する。

## 4.2 アンテナの構成と設計法

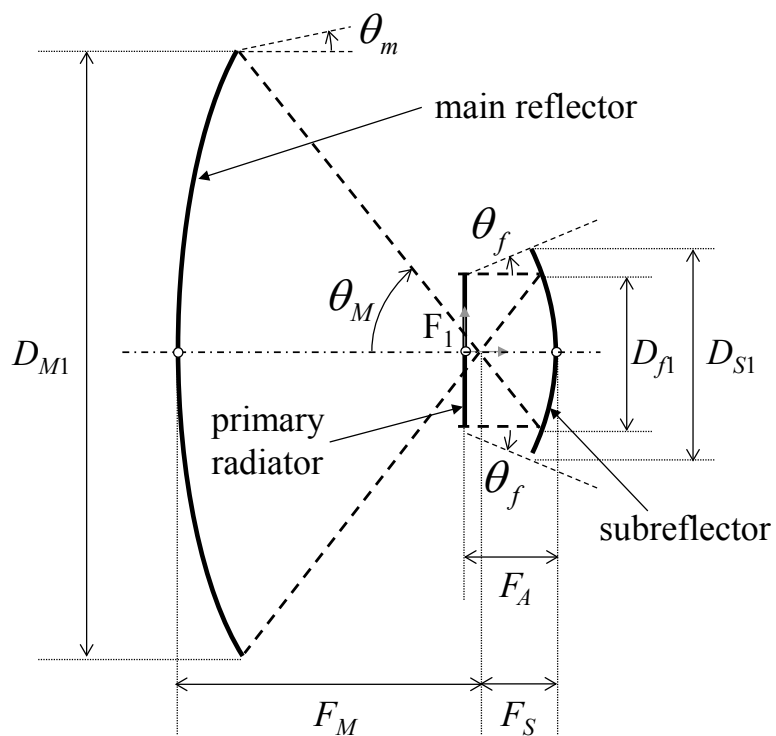
提案するアンテナの構成について述べる．図 4.1 に，本アンテナの直交断面形状を示す．一次元フェーズドアレーアンテナを一次放射器としたセンターフィード形式の複反射鏡アンテナであり，直交断面の開口径 ( $D_{M1} < D_{M2}$ ) が異なる．アンテナの鏡軸方向を  $z$  軸とする．衛星のアジマス方向である  $yz$  面（アンテナの水平面と定義）内は，副反射鏡が焦点  $F_1$  と焦点  $F_2$  を焦点とする双曲線で，主反射鏡は，副反射鏡の後側にある焦点  $F_2$  を通り，鏡軸と平行な線を軸とする放物線で表現されるリングフォーカスカセグレンアンテナである．衛星のエレベーション方向は， $xz$  面（アンテナの垂直面と定義）である． $xz$  面内は，副反射鏡と主反射鏡が相似の放物線で表現されるイメージングリフレクタアンテナである．

鏡面形状の決定方法について簡単に述べる．図 4.2 に，円筒波を放射する線状波源で仮定した一次放射器の中心を原点  $\mathbf{O}$  とする直交座標系を示す．肋骨曲線に相当する式 (4.1) で定義される  $yz$  面内のリングフォーカスカセグレンアンテナの副反射鏡形状を，脊椎曲線に相当する式 (4.2) で定義される  $xz$  面内の放物線に沿って形成される二重曲面反射鏡によって表す．式 (4.1) と式 (4.2) によって，副反射鏡上の点  $\mathbf{P}$  が求められる． $x_f$  は線状波源上の任意の点を表す  $x$  座標である． $\bar{e} = \delta p e$  であり， $\delta$  は 1 のとき凹面鏡，-1 のとき凸面鏡を表し， $p$  は 1 のとき回転双曲面鏡，-1 のとき回転楕円面鏡を表す．さらに， $e$  は離心率， $a$  は副反射鏡定数， $\alpha$  は原点  $\mathbf{O}$  ( $F_1$ ) と焦点  $F_2$  を通る直線と  $z$  軸に沿った鏡軸とのなす角度である．本アンテナでは， $\delta = -1$ ， $p = 1$  である．主反射鏡上の点  $\mathbf{Q}$  は一次放射器から副反射鏡を介した光路長一定の法則を満足する条件で決定する．

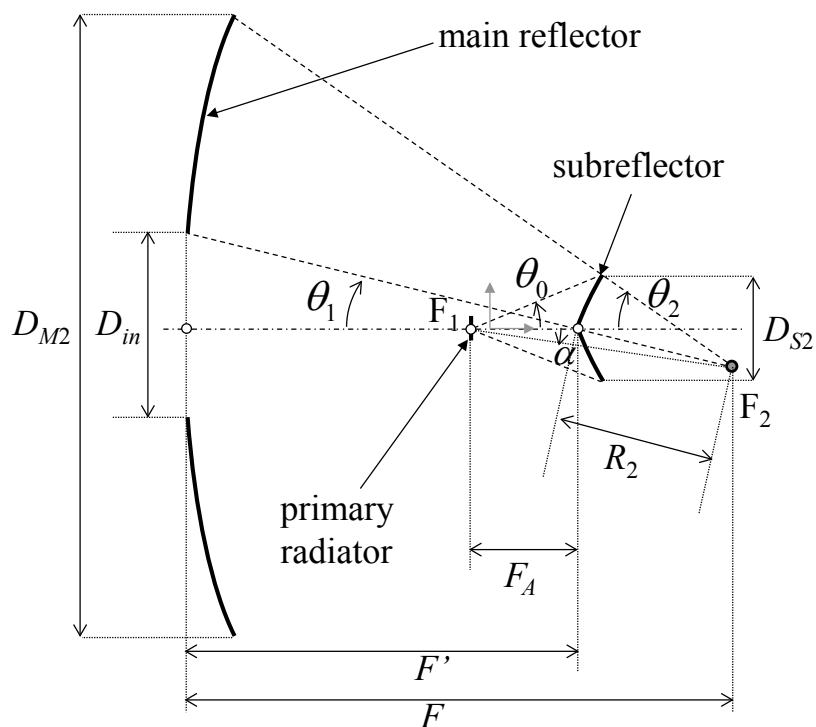
鏡面の設計法は，初めにイメージングリフレクタアンテナである  $xz$  面を設計し，次にリングフォーカスカセグレンアンテナである  $yz$  面を設計する．詳細な設計法については，第 3 章の設計法を参考とする．

$$r(\phi) = \frac{\delta p a (\bar{e}^2 - 1)}{1 + \bar{e} \cos(\phi - \alpha)} \quad (4.1)$$

$$z_f = -\frac{x_f^2}{4f} + r(\phi = 0) \quad (4.2)$$



(a)  $xz$  面 (エレベーション方向)



(b)  $yz$  面 (アジマス方向)

図 4.1 提案するアンテナの断面構成

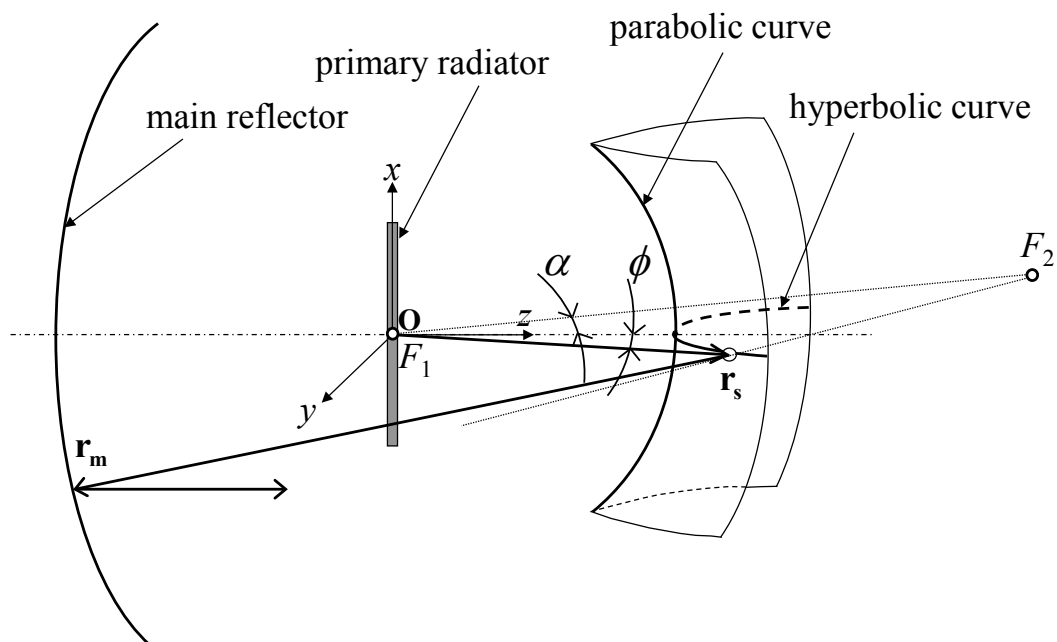


図 4.2 提案するアンテナの全体構成と座標系

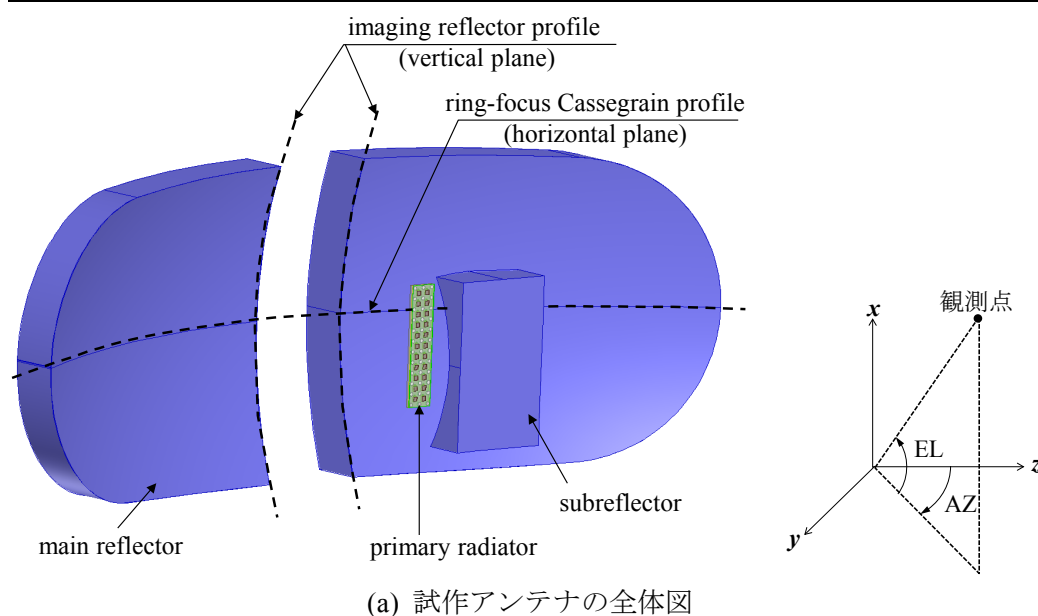
### 4.3 試作アンテナの設計

表 4.1 に、試作アンテナの諸元を示す。直交する面内のビーム幅が 2 倍以上になるように、ビーム走査面である  $xz$  面内の開口径は 600mm,  $yz$  面内の開口径は 1600mm とした。 $xz$  面内の開口径は第 2 章および第 3 章のアンテナと同じである。第 2 章および第 3 章で示したアンテナよりも広い角度にビーム走査したときの特性を確認するために、ビーム走査角度は  $\pm 5$  度として設計した。そして、ビーム走査角度の拡大に伴い、副反射鏡の大きさを小さくするために、ここではイメージングリフレクタアンテナの倍率は 3 とした。

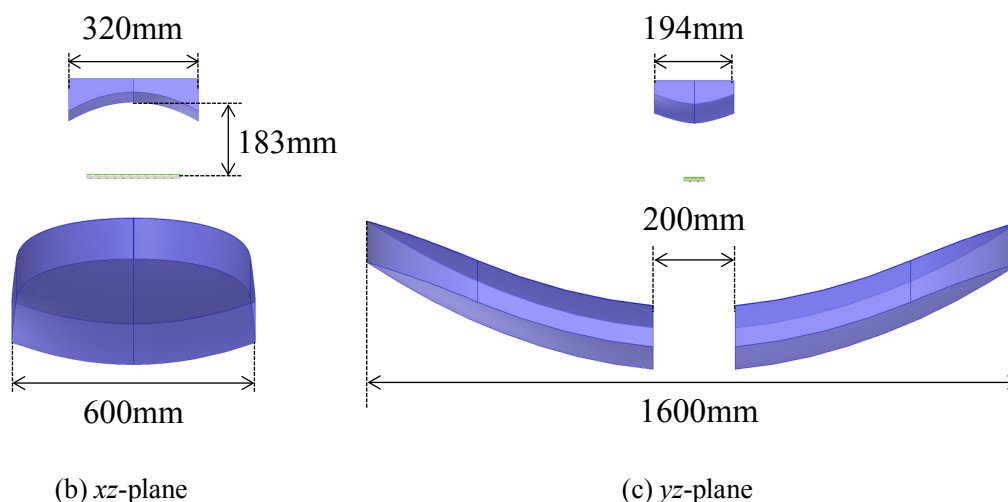
図 4.3 に、試作アンテナの鳥瞰図と各側面から見た図を示す。第 3 章と同様に、 $yz$  面内のアンテナ形式がリングフォーカスカセグレンアンテナであり、 $xz$  面内のアンテナ形式がイメージングリフレクタアンテナである。一次放射器が主反射鏡に作る影の部分には、幾何光学的に電波が照射されないように設計しているため、主反射鏡の中央部には鏡面が存在していない。このように左右の主反射鏡が分割されていることから、ロケットのフェアリングに沿って、観音開きのように折りたたむ展開、収納構成が考えられる。この構成ならば、一軸展開機構を適用することが可能となり、一般的な傘型の展開機構に比べて、信頼性が向上する。ここで、第 3 章の設計法に従うと、主反射鏡の外形形状は四隅に頂点を持つ長方形のような形となる。しかし、前述のようにロケットへの搭載性を考えた場合、長方形形状ではフェアリングへの干渉が懸念されるため、ここでは四隅の頂点をトリミングする形で外形形状を楕円形状とした。後に示す開口分布から見てもわかる通り、四隅の振幅分布が低いため、長方形形状でも楕円形状でも性能に有意差はない。図 4.4 には、使用する一次放射器の諸元と最大放射方向を 0 度としたときの放射パターン特性を示す。2×11 素子の無給電素子つき正方形パッチアレーアンテナである。第 2 章と第 3 章のアレーアンテナと素子間隔が異なるが、これは第 2 章の式 (2.10) の一次放射器の大きさ  $D_{f1}$  を満足する大きさに調整した結果である。以降、本アンテナの特性について計算で検証していく。設計周波数は 9.6GHz であり、一次放射器の偏波は、垂直偏波 ( $xz$  面方向の偏波) である。

表 4.1 試作アンテナの設計パラメータ

Beam-scanning cross section	
Main reflector size : $D_{M1}$	600 mm
Main reflector subtended semi-angle : $\theta_M$	$40^\circ$
Beam-scanning angle : $\theta_m$	$\pm 5^\circ$
Magnification of the imaging reflector : $m$	3
Subreflector size : $D_{S1}$	320mm
Non-beam-scanning cross section	
Main reflector size : $D_{M2}$	1600 mm
Subreflector subtended semi-angle : $\theta_0$	$25^\circ$
Subreflector size : $D_{S2}$	194mm



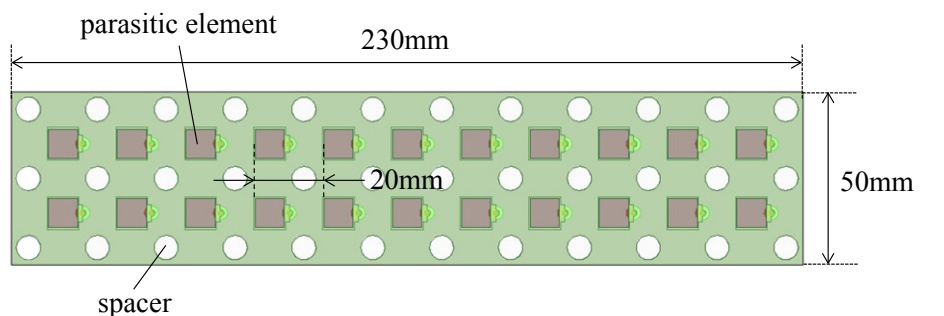
(a) 試作アンテナの全体図



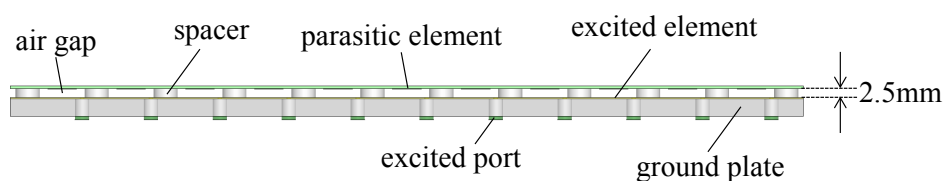
(b) xz-plane

(c) yz-plane

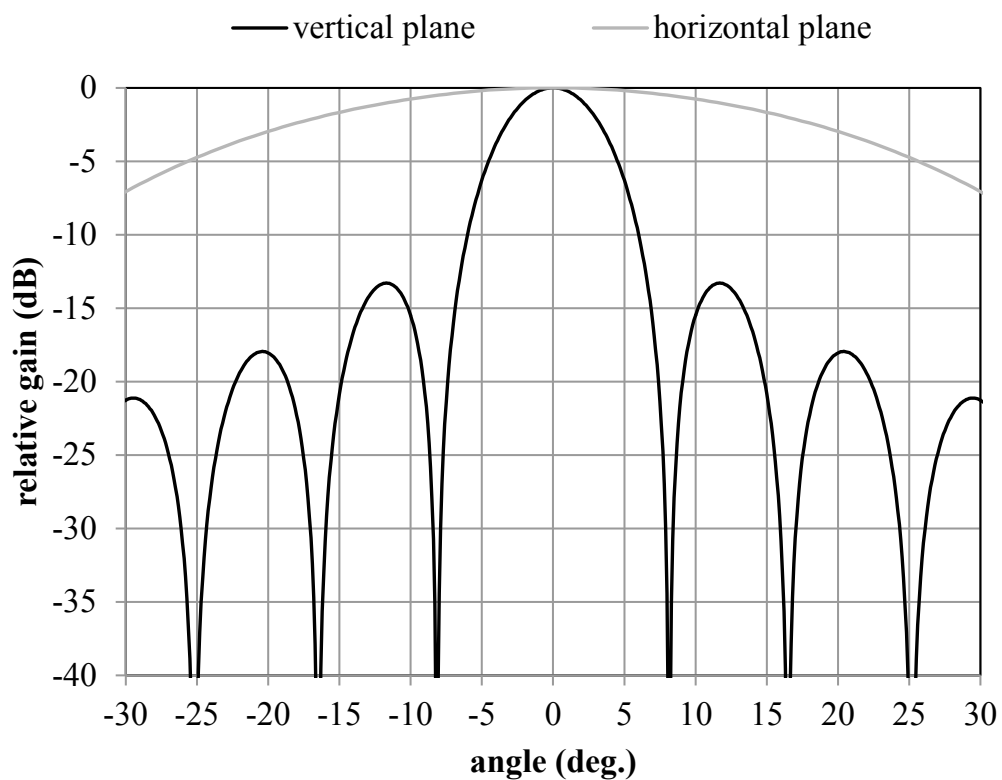
図 4.3 試作アンテナの概略図



(a) 上面図



(b) 側面図

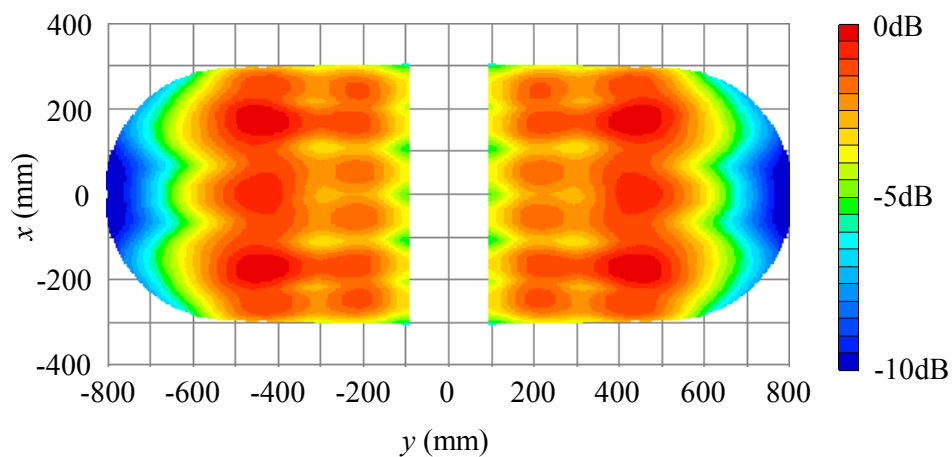


(c) 放射パターン

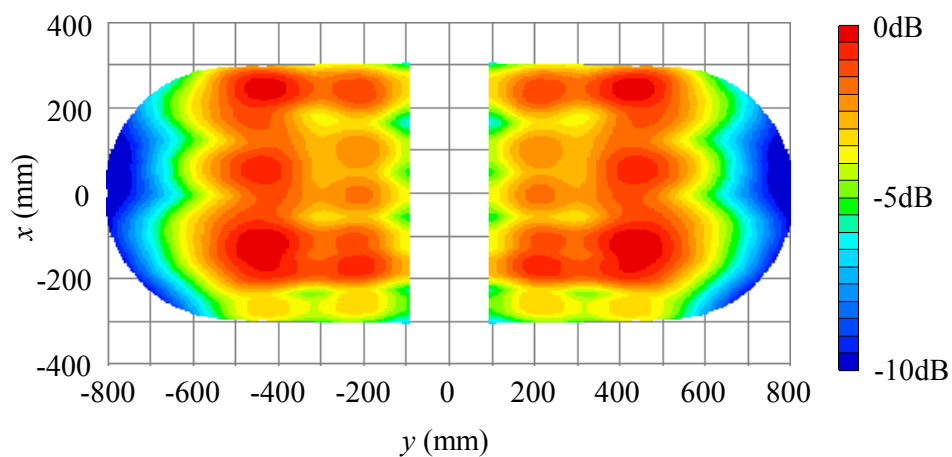
図 4.4 2×11 素子アレーアンテナ

図 4.5 に、ビーム走査角が 0 度、-2.5 度、-5 度としたときの主反射鏡上の開口振幅分布を示す。図 4.6、図 4.7、図 4.8 は、それぞれビーム走査角が 0 度、-2.5 度、-5 度としたときの 2 次元放射パターン特性である。設定したビーム走査角度にビーム走査が行われており、ビーム形状はほとんど変化していないことが確認できる。イメージングリフレクタアンテナの倍率は 3 であり、-2.5 度、-5 度のビーム走査角を得るためには、一次放射器のビーム走査角をそれぞれ+7.5 度、+15 度に設定している。各ビーム走査方向のピーク利得は、ビーム走査角 0 度で 37.9dBi (能率 57%)、ビーム走査角-2.5 度で 37.8dBi (能率 56%)、ビーム走査角-5 度で 37.6dBi (能率 54%) である。ビーム走査角によらず利得の低下量が少ないことがわかる。次に、本アンテナの特長である直交面内の異なるビーム幅特性について検証する。垂直面／水平面のビーム幅は、ビーム走査角 0 度で (垂直面：2.82° / 水平面：1.05°)、ビーム走査角-2.5 度で (垂直面：2.79° / 水平面：1.03°)、ビーム走査角-5 度 (垂直面：2.73° / 水平面：1.0°) である。開口径と波長から求められる一般的な簡易式[26]で求められるビーム幅に対応する値が得られていることが確認できる。以上より、本アンテナの設計法およびビーム幅に関する有効性を検証することができた。

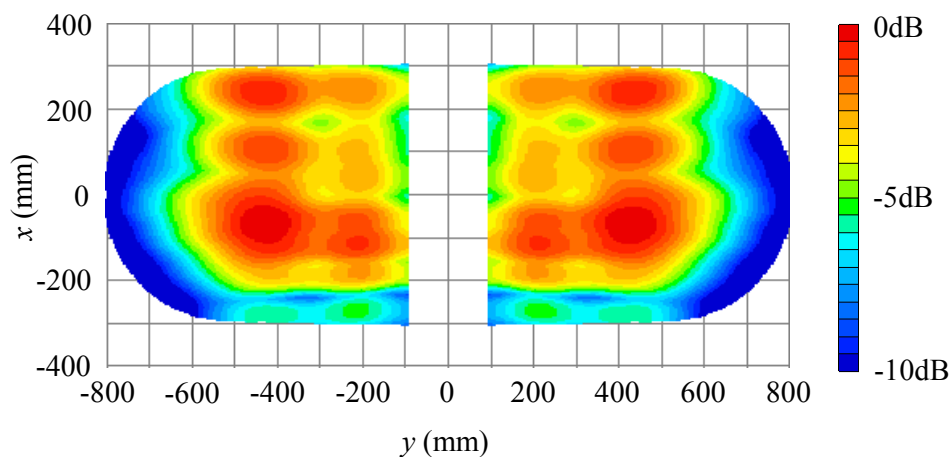




(a) ビーム走査角  $0^\circ$



(b) ビーム走査角  $-2.5^\circ$



(c) ビーム走査角  $-5.0^\circ$

図 4.5 主反射鏡の開口振幅分布

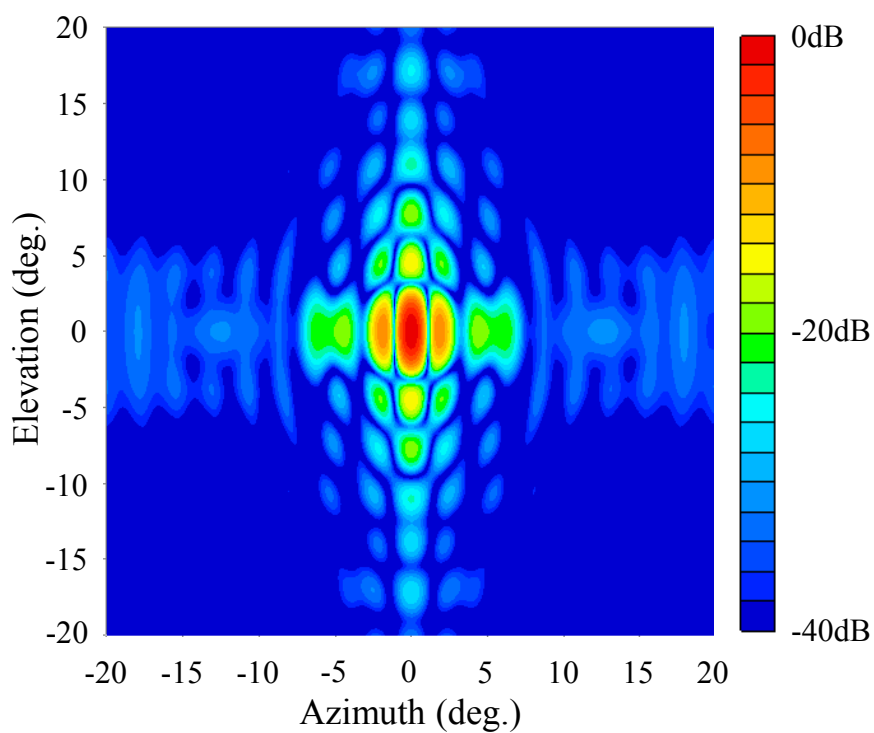


図 4.6 2次元放射パターン計算値 (ビーム走査角 0°)

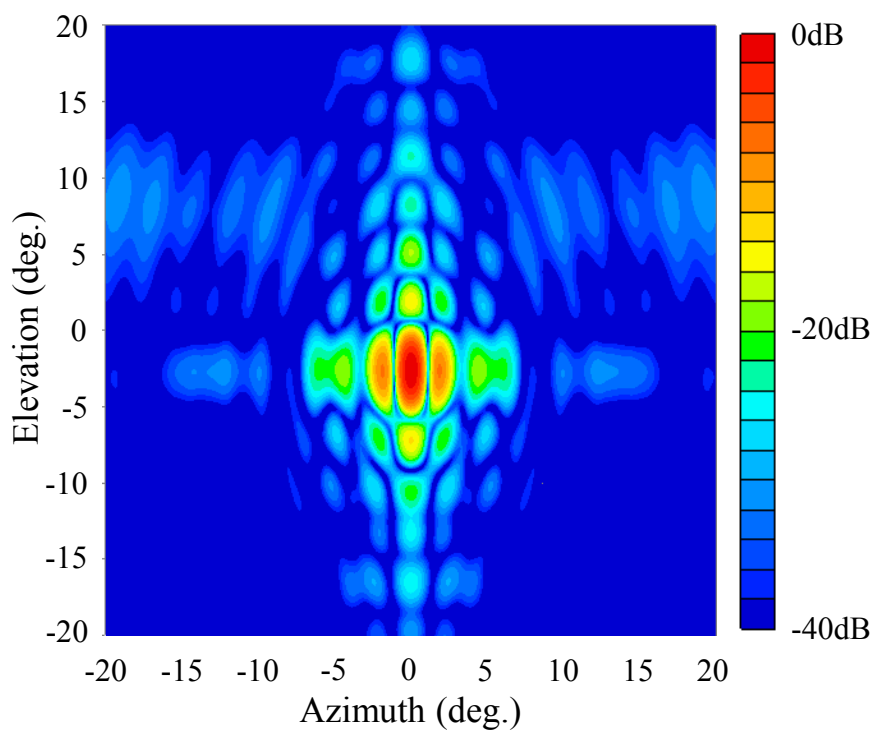


図 4.7 2次元放射パターン計算値 (ビーム走査角 -2.5°)

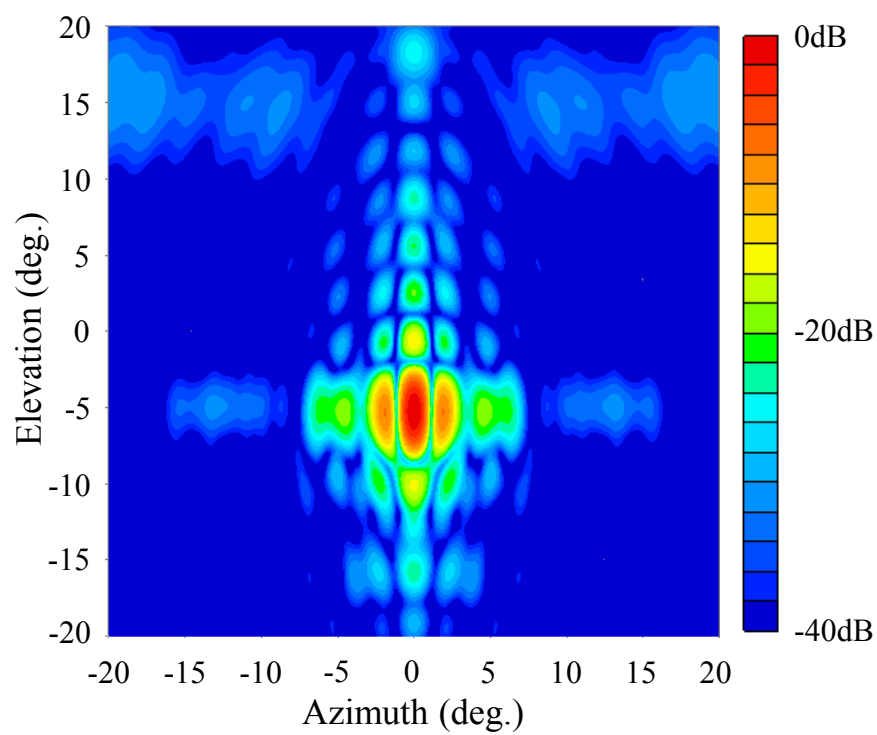


図 4.8 2次元放射パターン計算値 (ビーム走査角  $-5.0^\circ$ )

## 4.4 試作アンテナの測定

直交断面内で異なるビーム幅が得られるかどうかを確認することを目的に、試作アンテナを製作し、放射パターンを測定した結果について示す。図 4.9 は、試作アンテナの写真である。これまでと同様、主反射鏡と副反射鏡は、安価な人工木材で製作し、その表面に導電性塗料（ポリウレタン樹脂を主成分としてニッケルを金属として混合した材料、導電率は 4000S/m.）を塗布した。一次放射器は、図 4.4 に示した無給電素子つき正方形パッチアンテナを素子アンテナとした 22 素子パッチアレーアンテナを試作して使用した。測定は、コンパクトアンテナテストレンジにて、放射パターン特性を測定した。本アンテナには、アレーアンテナに給電回路を用意していないため、各素子の入力端子に測定コネクタをつなぎ替えて、各素子の二次パターンを一つずつ測定した。そして、各ビーム方向に共相となるような位相を設定し、各素子の測定データを計算機上で合成して評価した。また、図 4.9 では、主反射鏡の間に金属板が見えているが、測定時には、吸収体を装荷して測定した。放射パターンの測定周波数は 9.6GHz である。

図 4.10, 図 4.11, 図 4.12 は、それぞれビーム走査角 0 度, -2.5 度, -5 度の際の垂直面および水平面の放射パターン特性を、測定値と計算値で比較したものである。図中の水平面の放射パターン特性は、垂直面のピーク利得方向におけるカット面パターンである。測定値と計算値は良好に一致しており、所望のビーム方向にビームを走査できることが確認できた。9.6GHz における各ビーム走査方向のピーク利得は、ビーム走査角 0 度で 37.7dBi (能率 55%), ビーム走査角-2.5 度で 37.6dBi (能率 53%), ビーム走査角-5 度で 37.3dBi (能率 50%) であった。測定値は計算値に比べて約 0.2dB から 0.3dB 低下している。鏡面の塗装に使用した導電性塗料による損失 0.14dB と、測定ジグによる影響および測定誤差が 0.1dB 程度考えられるため、結果は妥当と考えられる。垂直面/水平面のビーム幅は、ビーム走査角 0 度で (垂直面: 2.8° / 水平面: 1.06°), ビーム走査角-2.5 度で (垂直面: 2.8° / 水平面: 1.04°), ビーム走査角-5 度 (垂直面: 2.75° / 水平面: 1.02°) と測定値と計算値は、良好に一致することを確認した。

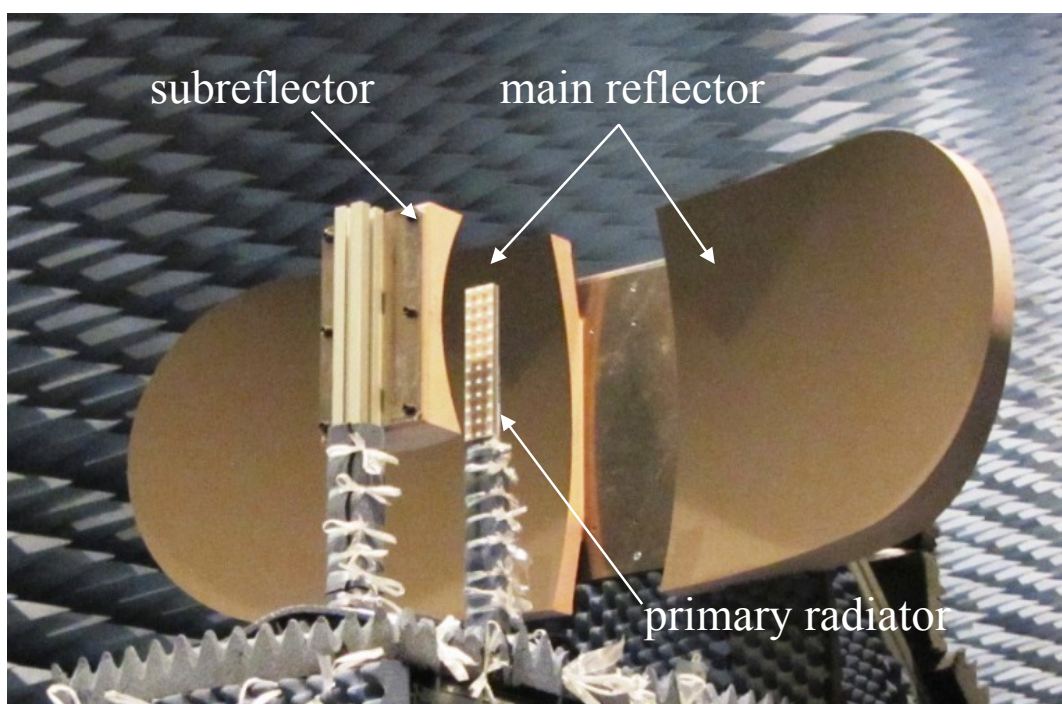


図 4.9 試作アンテナの写真

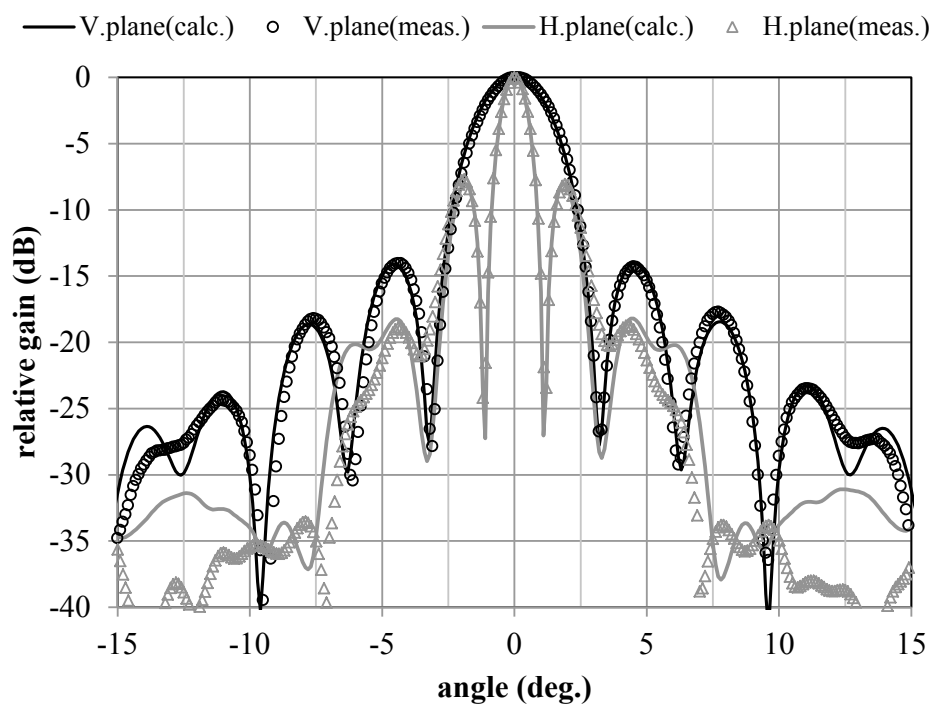


図 4.10 放射パターンの計算値と測定値の比較 (ビーム走査角 0°)

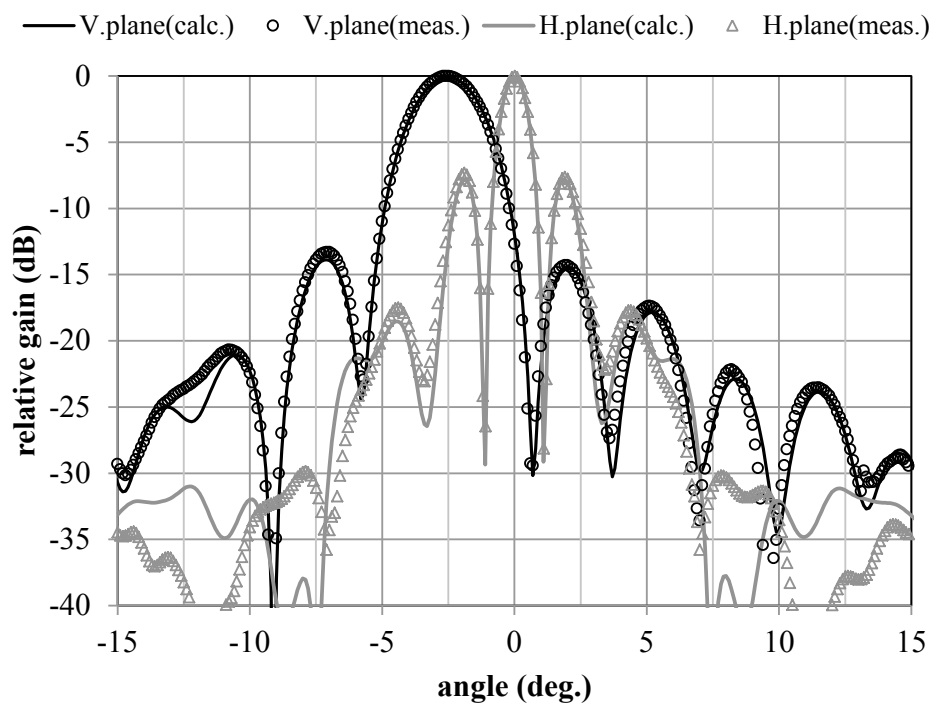


図 4.11 放射パターンの計算値と測定値の比較 (ビーム走査角 -2.5°)

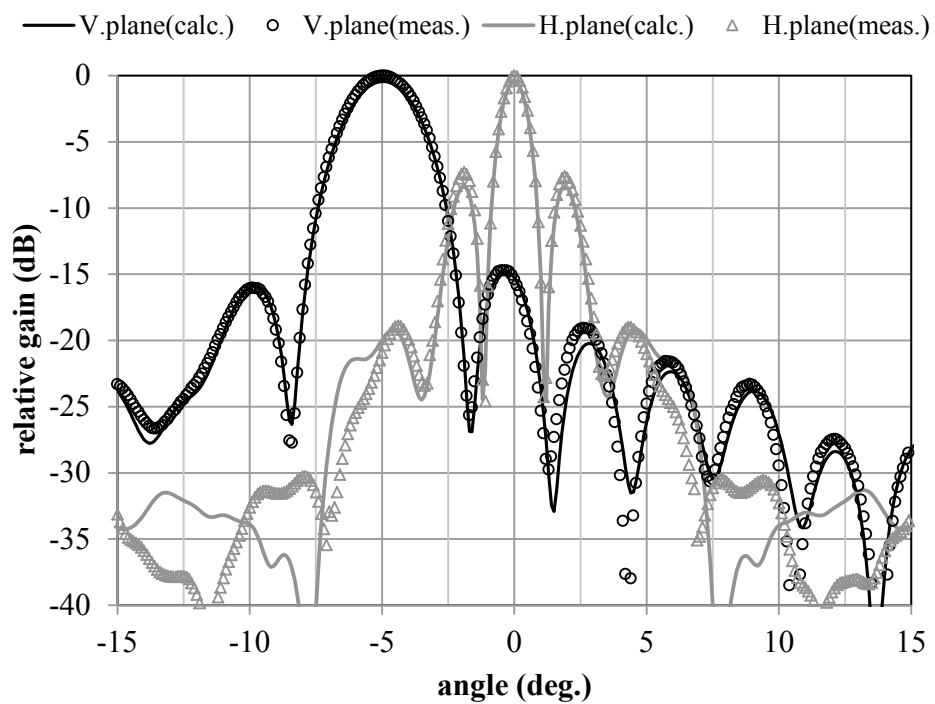


図 4.12 放射パターンの計算値と測定値の比較 (ビーム走査角  $-5.0^\circ$ )

## 4.5 まとめ

本章では、小型衛星に搭載する新しい SAR のアンテナとして、広域観測を目的とした楕円開口形状を有する一次元にビーム走査可能な反射鏡アンテナを提案した。第3章のアンテナ設計を応用し、直交断面のビーム幅が2倍以上異なる  $1600\text{mm} \times 600\text{mm}$  の楕円開口反射鏡アンテナを設計、測定した。その結果、開口能率は50%以上を達成し、設計値どおりの直交断面内で異なるビーム幅が得られることを確認した。ここで、分解能を考慮しない条件下で広域観測の有効性を確認するために、観測衛星における一般的な対地高度約  $500\text{km}$  で、地表面への入射角を  $20$  度の条件で、アンテナの  $3\text{dB}$  ビーム幅から換算できる観測幅を比較してみる。今回設計した楕円開口径  $1600\text{mm} \times 600\text{mm}$  と同一開口面積となる円形開口径  $980\text{mm}$  では、楕円開口の場合の観測幅は約  $28\text{km}$ 、円形開口の場合は  $17\text{km}$  となる。よって、楕円開口の方が円形開口に比べて  $10\text{km}$  以上も広域観測を実現できる可能性がある。そして、本アンテナはビーム走査機能を備えているため、さらなる観測幅の拡大が期待できる。第3章のアンテナの応用設計により、広域観測が可能な反射鏡アンテナの実現性を検証し、本論文における2つの異なる断面形状を有するビーム走査可能な反射鏡アンテナの構成および設計法は、異なる断面寸法においても適用可能であることを確認した。



## 第5章

### 結論

本論文は、小型衛星に搭載する新しい SAR のアンテナとして、2つの異なる断面形状を有するビーム走査可能な反射鏡アンテナの構成と設計法に関する研究をまとめたものである。以下に各章で得られた成果を総括する。

第1章は序論であり、小型衛星に搭載するビーム走査特性に優れた新しいセンターフィード形式の反射鏡アンテナを研究対象とした背景および目的を述べた。

第2章では、一次元にビーム走査可能なセンターフィード形式の新しい反射鏡アンテナを提案した。本アンテナは、直交する2つの断面形状が異なる。ビーム走査面はイメージングリフレクタアンテナ（放物線）、非ビーム走査面は軸対称カセグレンアンテナ（双曲線）と2つの異なる二次曲線で構成される。このような反射鏡アンテナを実現するために、幾何光学的手法である二重曲面反射鏡の理論を応用した設計法を示した。その設計法をもとに、直交断面の開口径 600mm の試作アンテナを設計、製作した。ビーム走査角 0 度における開口能率は約 48%、ビーム走査時の利得変化は 0.8dB と計算結果と測定結果は良好に一致することを確認した。さらに、ビーム走査時の利得を同サイズの開口径を有する変位給電方式の反射鏡アンテナと比べると、本アンテナの方が、2.6dB 高くなることを計算結果により確認し、本アンテナ構成と設計法の有効性を実証した。また、本章で述べた設計法は、直交断面で異なるパターンを有する反射鏡アンテナ、例えば航空管制に使用されるようなコセカント 2 乗ビームの設計にも適用可能であり、実用性は高いと考えられる。

第3章では、多重反射による放射特性の劣化を低減する一次元にビーム走

査可能な反射鏡アンテナを提案した。これは、第2章で述べたアンテナにおいて、一次放射器と副反射鏡の間での多重反射により、サイドローブの劣化や利得の周波数変動が確認されたためである。そこで、非ビーム走査断面の形状を、副反射鏡を表現する2つの焦点の軸を傾けた鏡面構成であり、幾何光学的には一次放射器から放射された電波が副反射鏡で反射した後、一次放射器へ入射すること無く設計することが可能なリングフォーカスカセグレンアンテナとした。設計法については二重曲面反射鏡理論を用いて、第2章の式を改良した。第2章のアンテナと同サイズの試作アンテナを設計、測定した。その結果、利得の周波数特性の平坦度は、第2章のアンテナでは2dBp-pであったが、本アンテナでは、0.9dBp-pと1.1dBの改善効果を確認した。また、利得については、設計中心周波数において第2章のアンテナと比べて0.4dBの増加を確認した。これらは非ビーム走査断面の形状にリングフォーカスカセグレンアンテナを採用したことにより、多重反射を軽減するとともに、効率的に副反射鏡からの電波が主反射鏡に照射され、開口分布が改善したことによる効果であると考えられる。これにより、本アンテナの構成と設計法の有効性について実証した。

第4章では、実用的なアンテナの設計を目的とし、広域観測を実現する楕円開口形状を有する一次元にビーム走査可能な反射鏡アンテナを提案した。一般的にSARではアンテナの3dBビーム幅内を撮像範囲とすることが多い。広範囲の観測を実現するために、所望の分解能を達成するアンテナ利得を確保する開口面積を有しつつ、アジマス方向の開口径よりもエレベーション方向の開口径を小さくする。第3章のアンテナの設計法を応用し、直交断面内でビーム幅が2倍以上異なる楕円開口径1600mm×600mmの試作アンテナ設計、測定した。その結果、開口能率は50%以上を達成し、直交面内で異なるビーム幅が得られることを確認した。よって、第3章で示した設計法が異なる断面寸法においても適用可能であり、本アンテナの構成と設計法の有効性を実証した。さらに、分解能を考慮しない条件下で広域観測の有効性を確認するために、観測衛星における一般的な対地高度約500km、地表面への入射角を20度の条件で、アンテナの3dBビーム幅から換算できる観測幅を比較した。試作した楕円開口径1600mm×600mmと同一開口面積となる円形開口

径 980mm において，楕円開口の場合の観測幅は約 28km，円形開口の場合は 17km であり，楕円開口とした場合の方が 10km 以上も広域観測を実現することが可能と言える．本アンテナではビーム走査機能が備わっており，更なる観測幅の拡大が期待できる．これにより，本アンテナにおける広域観測の実現性を示すことができた．

第5章は結論であり，本論文で述べてきた2つの異なる断面形状を有するビーム走査可能な反射鏡アンテナの構成と設計法に関する研究の成果を総括した．本研究により，従来のイメージングリフレクタアンテナの特長を生かした新しいセンターフィード形式の反射鏡アンテナの構成と設計法が明らかになり，ビーム走査特性に優れたこれまでにない SAR のアンテナの実現が可能となった．小型，軽量化されつつも，従来の大型衛星の性能，機能に匹敵する観測センサを搭載した小型衛星による安全，安心な社会を実現する観測システムの更なる発展が期待できる．

## 参考文献

- [1] 古濱洋治, 岡本謙一, 増子治信, “人工衛星によるマイクロ波リモートセンシング,” 電子情報通信学会, 1986 年.
- [2] 大内 和夫, “リモートセンシングのための合成開口レーダの基礎,” 東京電機大学出版局, 2004 年.
- [3] J. C. Curlander, R. N. McDonough, “Synthetic Aperture Radar Systems and Signal Processing,” John Wiley & Sons, Inc., 1991.
- [4] Y. Nemoto et al., “Japanese Earth Resources Satellite-1 Synthetic Aperture Radar,” Proceedings of the IEEE, VOL. 79, NO. 6, JUNE 1991.
- [5] A. Rosenqvist et al., “ALOS PALSAR: A pathfinder mission for global-scale monitoring of the environment,” Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on 45.11 (2007): 3307-3316.
- [6] M. Shimada, T. Tadono, A. Rosenqvist, “Advanced Land Observing Satellite (ALOS) and monitoring global environmental change,” Proceedings of the IEEE 98.5 (2010): 780-799.
- [7] J. Wilson, “Remote sensing technologies and global markets,” MARKET RESEARCH REPORT, IAS022B, December, 2010.
- [8] “Global satellite-based earth observation 2nd edition,” NORTHERN SKY RESEARCH, LLC, October, 2009.
- [9] 中村聖平, 辻雅夫, 中野陽介, “合成開口レーダ (SAR) の最新技術の動向,” 三菱電機技報, vol.86, 2014 年.
- [10] S. Sandau, H. P. Roser, A. Valezuela (Eds.), “Small Satellites for Earth Observation, Selected Contributions,” Springer, 2008.
- [11] 内閣府, “宇宙基本計画,” 2009 年制定.
- [12] H. Saito, J.T.S. Sumantyo, P.R. Akbar, T. Ohtani, K. Nishijo, J. Hirokawa, M. Ando, “Synthetic aperture radar compatible with 100kg class piggy-back satellite,” Asia-Pacific Region Synthetic Aperture Radar Conference, No.Tu2.R1.4, Tsukuba, 2013.
- [13] Koebel, David, Carsten Tobehn, Boris Penné, “OHB platforms for constellation satellites,” The 5th IAA Symposium on Small Satellites for Earth Observation. Berlin: Germany Aerospace Center, 2005.

- [14] R. Schröder, J. Puls, I. Hajnsek, F. Jochim, J-L. Bueso-Bello, L. Datashvili, H. Baier, M. M. Quintino da Silva, W. R. Paradella, "THE MAPSAR MISSION: OBJECTIVES, DESIGN AND STATUS," EUSAR 2006 - 6th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Dresden, Germany, May. 2006.
- [15] Y. Sharay, U. Naftaly, "TECSAR - Performances, Design and Status," Radar, Sonar and Navigation, IEE Proceedings, vol.153, Issue.2, pp. 117-121, Apr. 2006.
- [16] M. Stangl, R. Werninghaus, R. Zahn, "The TerraSAR-X Active Phased Array Antenna," IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology, 2003. pp. 70-75, 14-17 Oct. 2003.
- [17] M. Djobadze, J. Kibler, "Solid Membrane Isogrid Stiffened Ka-band Reflectors," International Conference on Antenna Technologies, 2005. pp. 621-628, 23-24 Feb. 2005.
- [18] 進士 昌明, 安達三郎, "マルチビームアンテナ," 信学誌, vol. 60, no. 5, pp. 544-551, 1977年5月.
- [19] 電子情報通信学会編, "アンテナ工学ハンドブック (第2版)," オーム社, 2008年.
- [20] C. Dragone, M. J. Gans, "Imaging Reflector Arrangements to Form a Scanning Beam Using a Small Array," Bell System Technical Journal, vol.58, no.2, pp. 501-515, Feb. 1979.
- [21] 野本真一, "2重曲面反射鏡理論の一般化による曲率を有する扇形ビームの合成," 信学論(B), vol. J86-B, no. 9, pp. 1886-1894, 2003年9月.
- [22] A. Brukner, "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.
- [23] C.Granet, "A Simple Procedure for the Design of Classical Displaced-Axis Dual-Reflector Antennas Using a Set of Geometric Parameters," IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 41, No. 6, December 1999, pp. 64-72.
- [24] T. Kitsuregawa, "Advanced Technology in Satellite Communication Antennas Electrical and Mechanical Design," Artech House, London, 1990.
- [25] S.Silver (Ed.), "Microwave Antenna Theory and Design," McGraw-Hill, 1949.
- [26] T.Milligan, "Modern Antenna Design," John Wiley & Sons, 2005.
- [27] R.Q.Lee, K.F.Lee, J.Bobinchak, "Characteristics of a two-layer electromagnetically coupled rectangular patch antenna," IET Journals & Magazines, Electronics letters, Vol.23, Issue.20, pp.1070-1072, 1987.

## 謝辞

本論文をまとめるに際し、終始御懇切なる御指導、御鞭撻を賜りました、日本大学理工学部教授 三枝健二博士、ならびに有益な御討論、御助言を頂きました、日本大学理工学部教授 山崎恆樹博士、日本大学生産工学部教授 坂口浩一博士に衷心より感謝の意を表します。

また、日本大学在学中にアンテナ研究者として必要な知識と技術の御教示を賜りました、元日本大学理工学部教授 長谷部望博士に篤く感謝致します。

本研究を進める契機を与えていただき、反射鏡アンテナの基礎を御教示いただいた、新居浜工業高等専門学校教授 内藤出博士(元三菱電機株式会社)に謹んで感謝の意を表します。

本研究の機会を与えていただくとともに、本研究の遂行および論文作成に対して多大なご指導ならびにご鞭撻を賜りました、三菱総合研究所常務執行役員 千葉勇博士(元三菱電機株式会社)、広島工業大学工学部教授 小西善彦博士(元三菱電機株式会社)、三菱電機株式会社情報技術総合研究所アンテナ技術部部長 宮下裕章博士、開口面アンテナグループマネージャー 稲沢良夫博士、給電回路グループマネージャー 米田尚史博士、電子システム技術部統合システムグループマネージャー 高橋徹博士、EMC 技術センターセンター長 大橋英征氏、無線通信技術部部長 岡村敦博士、本社開発業務部国際標準化・産学官連携推進グループ 若山俊夫博士、本社電子システム事業本部統合防衛宇宙システム部システム技術第二課課長 諏訪啓氏に深く感謝いたします。

本論文の作成に当たり、温かいご指導および叱咤激励を賜りました元金沢工業大学工学部教授 片木孝至博士(元三菱電機株式会社)、三菱電機株式会社情報技術総合研究所アンテナ技術部 西岡泰弘博士、田中泰博士、橋本貴博氏、戸村崇博士、大島毅氏、山口聡博士、渡辺光氏、柳崇氏、コミュニケーション・ネットワーク製作所無線通信システム部 西本研悟博士、本社電子システム事業本部 千葉英利博士、鎌倉製作所宇宙システム部 西野有博士、

宇宙技術部 山本伸一博士，通信機製作所技術部アナログ技術第二課課長水野友宏氏，インフラ情報システム部気象・航空統括プロジェクトグループ縫村修次氏，電子情報システム部海洋監視システムグループ 小柳智之氏に感謝いたします。

また，三菱電機株式会社鎌倉製作所在籍中に，アンテナに関する有益なご討論，ご助言をいただきました，元鎌倉製作所宇宙システム部 小林右治氏，佐藤正人氏，鎌倉製作所主管技師長 大嶺裕幸博士，宇宙総合システム部 野口龍宏氏，宇宙技術部 鈴木龍彦氏，住吉秀夫氏，平池太郎氏，谷口将一氏，防衛技術部 西圭介氏，西澤一史博士，小泉敏治氏，佐藤明臣氏，斎藤雅之氏，浦田育彦氏，一般社団法人日本航空宇宙工業会技術部部長 大和昌夫氏，菱電湘南エレクトロニクス株式会社電機事業部 柿崎健一氏に感謝致します。

本研究は，以上の方々の他，数多くの方々の御指導，御協力のもとに達成できたものであります。ここに，謹んで御礼申し上げます。

最後に，本研究をまとめるに当たり，日々暖かく見守ってくれた両親と家族に感謝します。

## 研究業績

### 論文

- (1) 三ツ木真一, 瀧川道生, 尾崎浩二, 鈴木敦, 坂口聡, 野川真理子, 長谷部望, “密巻き小型ヘリカルアンテナ,” 信学論 B, vol. J87-B, No.4, pp.524-534, 2004年4月.
- (2) M.Takikawa, I.Naito, K.Suwa, Y.Inasawa, Y. Konishi, “One-Dimensional Electronic Beam-Scanning Center-Fed Imaging Reflector Antenna,” IEICE TRANS. ELECTRON, vol. E97-C, no. 1, pp. 17–25, Jan. 2014.
- (3) M.Takikawa, Y.Inasawa, H.Miyashita, I.Naito, “Novel Phased Array-Fed Dual-Reflector Antenna with Different Orthogonal Cross-Section by Imaging Reflector Antenna and Ring-Focus Cassegrain Antenna,” IEICE TRANS. ELECTRON, vol. E98-C, no. 1, pp. 8–15, Jan. 2015.
- (4) M.Takikawa, Y.Inasawa, H.Miyashita, I.Naito, “Novel Beam-Scanning Center-Fed Imaging Reflector Antenna with Elliptical Aperture for Wide Area Observation,” IEICE TRANS. ELECTRON, vol. E99-C, no. 9, Sep. 2016. ( to be published ).

### 国際会議

- (1) H.Ohmine, M.Takikawa, T.Takahashi, Y.Ohkawa, “Ka-band Dual Gridded Antenna with Improved Intercostal Design , ”2008 International Symposium on Antennas and Propagation(ISAP), Oct. 2008.
- (2) M.Takikawa, K.Nishizawa, H.Ohashi, H.Miyashita, Y.Konishi, I.Chiba, “A Novel Disk Type Support Structure Installed in a Quadrifilar Helical Antenna for Satellite, ” 2011 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation(AP-S/URSI), pp.2991-2994, July. 2011.
- (3) M.Takikawa, Y.Inasawa, Y.Konishi, “A novel compact center-fed reflector antenna with one-dimensional beam scanning function,” 2012 International Symposium on Antenna and Propagation(ISAP), pp.1277-1280, Nov. 2012.
- (4) M.Takikawa, Y.Inasawa, Y.Konishi, “One-dimensional beam scanning reflector antenna for small satellite applications , ” 2012 Antennas and Propagation in Wireless Communications(APWC), pp.159-162, Sep. 2012.
- (5) M.Takikawa, Y.Inasawa, H.Miyashita, T.Katagi, “Initial Reflector Design Method for



Shaped Reflector Antennas using Laguerre-Gaussian Beam Modes,” 2014 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation(AP-S/URSI), pp.1642-1643, July. 2014.

(6) M.Gocho, **M.Takikawa**, A.Ozaki, “Performance Evaluation of Adapting Many-Core Processors to the Optimization of a Shaped Reflector Antenna,” 2nd International Symposium on Computing and Networking (CANDAR 2014), pp.315-321, Dec. 2014.

## 国内研究会

(1) 大嶺裕幸, **瀧川道生**, 高橋徹, 大川義幸, “改良型インターコストル構造を用いた偏波共用デュアルグリッドアンテナ,” 電子情報通信学会アンテナ・伝播研究会, A・P2008-47, 2008年7月.

(2) 西澤一史, **瀧川道生**, 大橋英征, 宮下裕章, 小西善彦, “広角放射特性を有する4線巻き巻き戻しヘリカルアンテナとその最適支持構造,” 電子情報通信学会アンテナ・伝播研究会, A・P2009-22, 2009年5月.

(3) **瀧川道生**, 稲沢良夫, 米田尚史, 小西善彦, “一次元ビーム走査可能なセンターフィード形式反射鏡アンテナ,” 電子情報通信学会アンテナ・伝播研究会, A・P2012-11, 2012年5月.

(4) 後町将人, **瀧川道生**, 高橋勝己, 尾崎敦夫, 佐藤裕幸, “グラフィックス用プロセッサによる反射鏡アンテナ最適化の高速化,” 電子情報通信学会宇宙・航行エレクトロニクス研究会, SANE2012-163, 2013年2月.

(5) **瀧川道生**, 稲沢良夫, 宮下裕章, 片木孝至, “基本ビームモードを用いた成形ビームアンテナの初期鏡面設計法,” 電気学会電磁界理論研究会(光電波ワークショップ), EMT-13-075, 2013年7月.

(6) **瀧川道生**, 本間幸洋, 佐々木拓郎, 稲沢良夫, 宮下裕章, “反射鏡を用いた大規模マイクロ波加熱炉に関する検討,” 第8回日本電磁波エネルギー応用学会シンポジウム, 2B13, 2014年11月.

(7) **瀧川道生**, 稲沢良夫, 宮下裕章, “1次放射器の平面近傍界測定値を用いた反射鏡アンテナの放射特性解析,” 電子情報通信学会アンテナ・伝播研究会, A・P2015-51, 2015年7月.

## 全国大会発表

(1) **瀧川道生**, 長澤幸二, 長谷部望, “素子間結合を考慮したアレイアンテナの設計法(その5): 素子数・間隔を変えたユニフォームアレイ, テーラー副ローブ抑圧,” 2001年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-1-136, 2001年9月.

(2) 長澤幸二, 飯田真也, **瀧川道生**, 長谷部望, “素子間結合を考慮したアレイアンテナの設計法(その6): ウッドワード・ローソン法による扇形および方形パターンの発生,”

- 2001年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-1-137, 2001年9月.
- (3) 長澤幸二, 木藤了治, 中澤博和, 瀧川道生, 長谷部望, “指向性合成による長方形パターン発生の一設計法,” 2002年電子情報通信学会総合大会, B-1-216, 2002年3月.
- (4) 瀧川道生, 長澤幸二, 長谷部望, “素子間結合を考慮した12素子ブロードサイドアレイの実験,” 2002年電子情報通信学会総合大会, B-1-217, 2002年3月.
- (5) 瀧川道生, 吉田修司, 長澤幸二, 長谷部望, “指向性合成アレイアンテナの一励振法,” 2003年電子情報通信学会総合大会, B-1-182, 2003年3月.
- (6) 尾崎浩二, 瀧川道生, 長谷部望, “密巻き小型ヘリカルアンテナ: IE3Dを用いた数値解析,” 2003年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-1-93, 2003年9月.
- (7) 野川真理子, 尾崎浩二, 瀧川道生, 井上大地, 長谷部望, “密巻き小型ヘリカルアンテナのケース高変化による利得,” 2003年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-1-94, 2003年9月.
- (8) 瀧川道生, 尾崎浩二, 長谷部望, “密巻き小型ヘリカルアンテナの入力インピーダンスに関する考察,” 2003年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-1-95, 2003年9月.
- (9) 鈴木敦, 瀧川道生, 尾崎浩二, 野川真理子, 長谷部望, “小型送信機に取りつけたアンテナのリターンロス測定,” 2003年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-1-245, 2003年9月.
- (10) 坂口聡, 長谷部望, 瀧川道生, 鈴木敦, 尾崎浩二, 野川真理子, 川井大地, “導体励振型小型アンテナ,” 2004年電子情報通信学会総合大会, B-1-51, 2004年3月.
- (11) 長澤幸二, 松井拓, 瀧川道生, 長谷部望, “素子間結合を考慮したアレイアンテナの設計: 素子間隔  $0.25\lambda$  のエンドファイアアレイの場合,” 2004年電子情報通信学会総合大会, B-1-82, 2004年3月.
- (12) 野川真理子, 尾崎浩二, 瀧川道生, 長谷部望, “小型送信機実装の密巻き小型ヘリカルアンテナケース高依存性 (その2),” 2004年電子情報通信学会総合大会, B-1-99, 2004年3月.
- (13) 鈴木敦, 瀧川道生, 長谷部望, “小型通信機実装密巻き小型ヘリカルアンテナの反射特性測定 (その2),” 2004年電子情報通信学会総合大会, B-1-100, 2004年3月.
- (14) 瀧川道生, 尾崎浩二, 長谷部望, “密巻き小型ヘリカルアンテナのケーブル長依存性,” 2004年電子情報通信学会総合大会, B-1-101, 2004年3月.
- (15) 尾崎浩二, 瀧川道生, 野川真理子, 長谷部望, “小型送信機に装着したモノポールアンテナのケース高依存性,” 2004年電子情報通信学会総合大会, B-1-127, 2004年3月.
- (16) 瀧川道生, 大嶺裕幸, 高橋徹, 大川義幸, “改良型インターコストル構造を用いた偏波共用デュアルグリッドアンテナ,” 2008年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-1-168, 2008年9月.
- (17) 西澤一史, 瀧川道生, 大橋英征, 宮下裕章, 小西善彦, “4線巻きヘリカルアンテナ支持構造の最適化,” 2008年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-1-121, 2008年9月.
- (18) 西澤一史, 瀧川道生, 大橋英征, 宮下裕章, 小西善彦, “広角放射特性を有する4

線巻き巻き戻しヘリカルアンテナ,” 2009年電子情報通信学会総合大会, B-1-102, 2009年3月.

(19) 大嶺裕幸, 瀧川道生, 片木孝至, “Ka帯送受信共用デュアルグリッドアンテナの検討,” 2009年電子情報通信学会総合大会, B-1-57, 2009年3月.

(20) 瀧川道生, 大嶺裕幸, 内藤出, “バックローブレベルを低減した衛星搭載用小開口ホーン,” 2010年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-3-18, 2010年9月.

(21) 瀧川道生, 稲沢良夫, 内藤出, “一次元に電子ビーム走査するセンターフィールド反射鏡アンテナの基本構成,” 2011年電子情報通信学会総合大会, B-1-126, 2011年3月.

(22) 瀧川道生, 稲沢良夫, 米田尚史, 小西善彦, “一次元に電子ビーム走査するセンターフィールド反射鏡アンテナの基本動作,” 2011年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-1-65, 2011年9月.

(23) 瀧川道生, 稲沢良夫, 米田尚史, 小西善彦, “一次元に電子ビーム走査するセンターフィールド反射鏡アンテナの放射パターン測定,” 2012年電子情報通信学会総合大会, B-1-131, 2012年3月.

(24) 瀧川道生, 稲沢良夫, 小西善彦, “SPSシステム設計におけるフレネル領域のビーム伝送特性の解析法,” 2012年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-1-41, 2012年9月.

(25) 後町将人, 瀧川道生, 高橋勝己, 尾崎敦夫, “GPUによる反射鏡アンテナ設計の高速化,” 2012年電子情報通信学会ソサイエティ大会, CS-4-4, 2012年9月.

(26) 瀧川道生, 本間幸洋, 佐々木拓郎, 稲沢良夫, 小西善彦, “マイクロ波製鉄システムへのマイクロ波伝送技術の応用に関する一検討,” 2013年電子情報通信学会総合大会, B-1-13, 2013年3月.

(27) 瀧川道生, 稲沢良夫, 宮下裕章, 片木孝至, “鏡面修整成形ビームアンテナ設計への基本ビームモードの適用,” 2013年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-1-104, 2013年9月.

(28) 後町将人, 瀧川道生, 高橋勝己, 尾崎敦夫, “反射鏡アンテナ最適化に対する並列処理方式の検討,” 2013年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-2-41, 2013年9月.

(29) 瀧川道生, 野口龍宏, 稲沢良夫, 宮下裕章, “衛星搭載用マイクロ波放射計の高温校正源の放射率の解析,” 2014年電子情報通信学会総合大会, B-1-80, 2014年3月.

(30) 瀧川道生, 稲沢良夫, 宮下裕章, 片木孝至, “矩形開口反射鏡アンテナに対する最適エッジレベルの検討,” 平成26年電気学会基礎・材料・共通部門大会, 20-A-p-1, 2014年8月.

(31) 瀧川道生, 稲沢良夫, 宮下裕章, 片木孝至, “ビームモードを用いた成形ビームアンテナの初期鏡面設計法に関する検討,” 2014年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-1-67, 2014年9月.

(32) 小柳智之, 山本伸一, 瀧川道生, 稲沢良夫, 宮下裕章, “バックファイア給電反射鏡アンテナのサイドローブ低減に関する一検討,” 2014年電子情報通信学会ソサイエ

ティ大会, B-1-58, 2014年9月.

(33) 戸村崇, 瀧川道生, 稲沢良夫, 宮下裕章, “球面波展開による複反射鏡アンテナの解析高速化検討,” 2015年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-1-45, 2015年9月.

(34) 瀧川道生, 戸村崇, 稲沢良夫, 宮下裕章, “一次元に電子ビーム走査するセンターフィールド反射鏡アンテナの近傍界測定,” 2015年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-1-44, 2015年9月.

## 5. 著書

(1) Sudhakar Rao, Lotfollah Shafai, Satish K. Sharma editors, “Handbook of Reflector Antennas and Feed Systems VOLUME III,” Artech House, London. (-Chapter3 Reflector antennas for Terrestrial Communications-).

## 付録 A : 第 2 章の鏡面形状の式の導出

第 2 章で示したアンテナの鏡面座標および面素ベクトルの式の導出について示す。一部、第 2 章の内容と重複するが、ここではより詳細に示す。

### (1) 副反射鏡

図 A.1 に副反射鏡形状を決定するための座標系を示す。一次放射器は、線状波源とし、円筒波を放射すると仮定する。このとき、 $yz$  平面内の二次曲線を  $xz$  平面内（ビーム走査面）の放物線に沿って動かして形成される二重曲面反射鏡を考える。

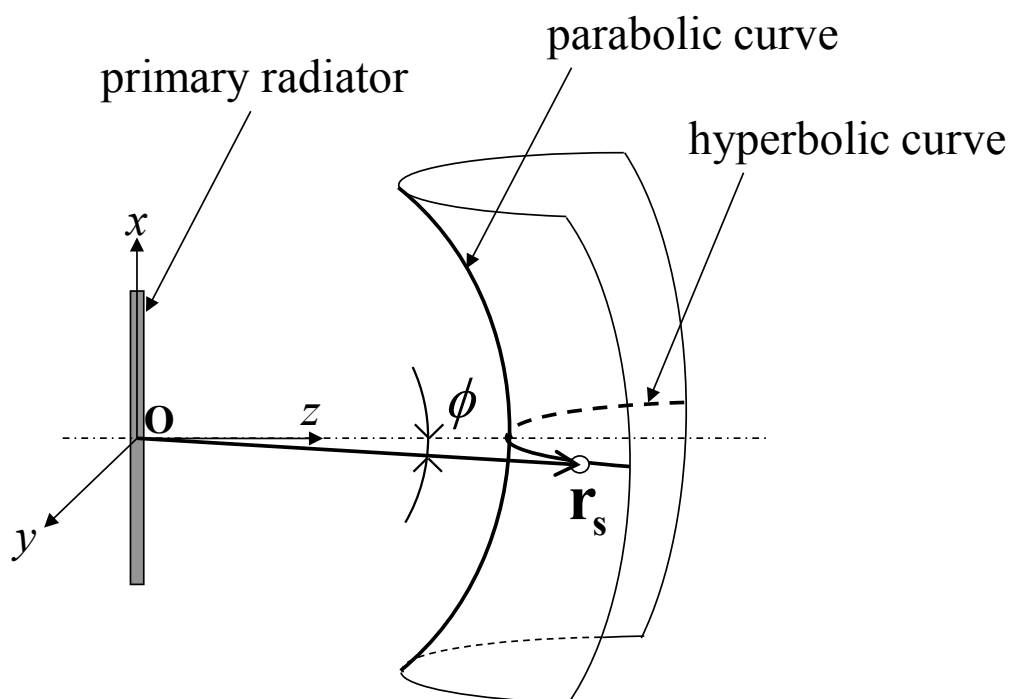


図 A.1 副反射鏡形状を表現する座標系

$yz$  平面内の二次曲線は、式 (A.1) で表される.

$$r(\phi) = \frac{\delta pa(\bar{e}^2 - 1)}{1 + \bar{e} \cos \phi} \quad (\text{A.1})$$

$$\delta = \begin{cases} 1: \text{焦点から見て凹面} \\ -1: \text{焦点から見て凸面} \end{cases}$$

$$p = \begin{cases} 1: \text{回転双曲面} \\ -1: \text{回転楕円面} \end{cases}$$

$$\bar{e} = \delta pe$$

ここで、 $e$  は副反射鏡の離心率、 $a$  は副反射鏡定数である.

$xz$  平面内の放物線を、式 (A.2) とする.

$$Z_f = -\frac{x_f^2}{4f} + r(\phi = 0) \quad (\text{A.2})$$

ここで、 $f$  は放物線の焦点距離、 $x_f$  は線状波源上の任意の点を表す  $x$  座標である. 式 (A.1), 式 (A.2) より、副反射鏡上の点  $\mathbf{r}_s$  は、式 (A.3) で表すことができる.

$$\mathbf{r}_s(x_f, \phi) = \mathbf{i}_f x_s + \mathbf{j}_f y_s + \mathbf{k}_f z_s \quad (\text{A.3})$$

$$x_s = x_f$$

$$y_s = r(\phi) \sin \phi$$

$$z_s = r(\phi) \cos \phi - \Delta z$$

$$= r(\phi) \cos \phi - (Z_f|_{x_f=0} - Z_f|_{x_f=x_f})$$

$$= r(\phi) \cos \phi - \frac{x_f^2}{4f}$$

$\mathbf{i}_f, \mathbf{j}_f, \mathbf{k}_f$ : 直交座標系の単位ベクトル

式 (A.3) より、副反射鏡上の点  $\mathbf{r}_s$  における法線ベクトル  $\mathbf{N}_s$  は、式 (A.4) となる.

$$\mathbf{N}_s = \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial x_f} \times \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial \phi} \quad (\text{A.4})$$

式 (A.4) の右辺の各成分について求めていく．式 (A.3) を  $x_f$  および  $\phi$  でそれぞれ偏微分することによって，式 (A.4) の右辺の各成分は，式 (A.5)，式 (A.6)，式 (A.7) によって求めることができ，これらの外積を取ることで，法線ベクトル  $\mathbf{N}_s$  を求めることができる．

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial x_f} &= \mathbf{i}_f \frac{\partial(x_s)}{\partial x_f} + \mathbf{j}_f \frac{\partial(y_s)}{\partial x_f} + \mathbf{k}_f \frac{\partial(z_s)}{\partial x_f} \\
 &= \mathbf{i}_f \frac{\partial(x_f)}{\partial x_f} + \mathbf{j}_f \frac{\partial(r(\phi) \sin \phi)}{\partial x_f} + \mathbf{k}_f \frac{\partial(r(\phi) \cos \phi - \frac{x_f^2}{4f})}{\partial x_f} \\
 &= \mathbf{i}_f + \mathbf{j}_f 0 + \mathbf{k}_f \left(-\frac{x_f}{2f}\right)
 \end{aligned} \tag{A.5}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial \phi} &= \mathbf{i}_f \frac{\partial(x_s)}{\partial \phi} + \mathbf{j}_f \frac{\partial(y_s)}{\partial \phi} + \mathbf{k}_f \frac{\partial(z_s)}{\partial \phi} \\
 &= \mathbf{i}_f \frac{\partial(x_f)}{\partial \phi} + \mathbf{j}_f \frac{\partial(r(\phi) \sin \phi)}{\partial \phi} + \mathbf{k}_f \frac{\partial(r(\phi) \cos \phi - \frac{x_f^2}{4f})}{\partial \phi} \\
 &= \mathbf{i}_f 0 + \mathbf{j}_f \left(\frac{\partial(r(\phi))}{\partial \phi} \sin \phi + r(\phi) \cos \phi\right) + \mathbf{k}_f \left(\frac{\partial(r(\phi))}{\partial \phi} \cos \phi - r(\phi) \sin \phi\right)
 \end{aligned} \tag{A.6}$$

$$\begin{aligned}
 r(\phi) &= \frac{\delta p a (\bar{e}^2 - 1)}{1 + \bar{e} \cos \phi} \\
 r(\phi)(1 + \bar{e} \cos \phi) &= \delta p a (\bar{e}^2 - 1) \\
 r(\phi) + r(\phi) \bar{e} \cos \phi &= \delta p a (\bar{e}^2 - 1) \\
 \frac{\partial(r(\phi))}{\partial \phi} + \frac{\partial(r(\phi))}{\partial \phi} \bar{e} \cos \phi - r(\phi) \bar{e} \sin \phi &= \frac{\partial(\delta p a (\bar{e}^2 - 1))}{\partial \phi} \\
 \frac{\partial(r(\phi))}{\partial \phi} (1 + \bar{e} \cos \phi) - r(\phi) \bar{e} \sin \phi &= 0 \\
 \frac{\partial(r(\phi))}{\partial \phi} (1 + \bar{e} \cos \phi) &= r(\phi) \bar{e} \sin \phi \\
 \therefore \frac{\partial(r(\phi))}{\partial \phi} &= \frac{r(\phi) \bar{e} \sin \phi}{(1 + \bar{e} \cos \phi)}
 \end{aligned} \tag{A.7}$$

## (2) 主反射鏡

図 A.2 に主反射鏡形状を決定するための座標系を示す.

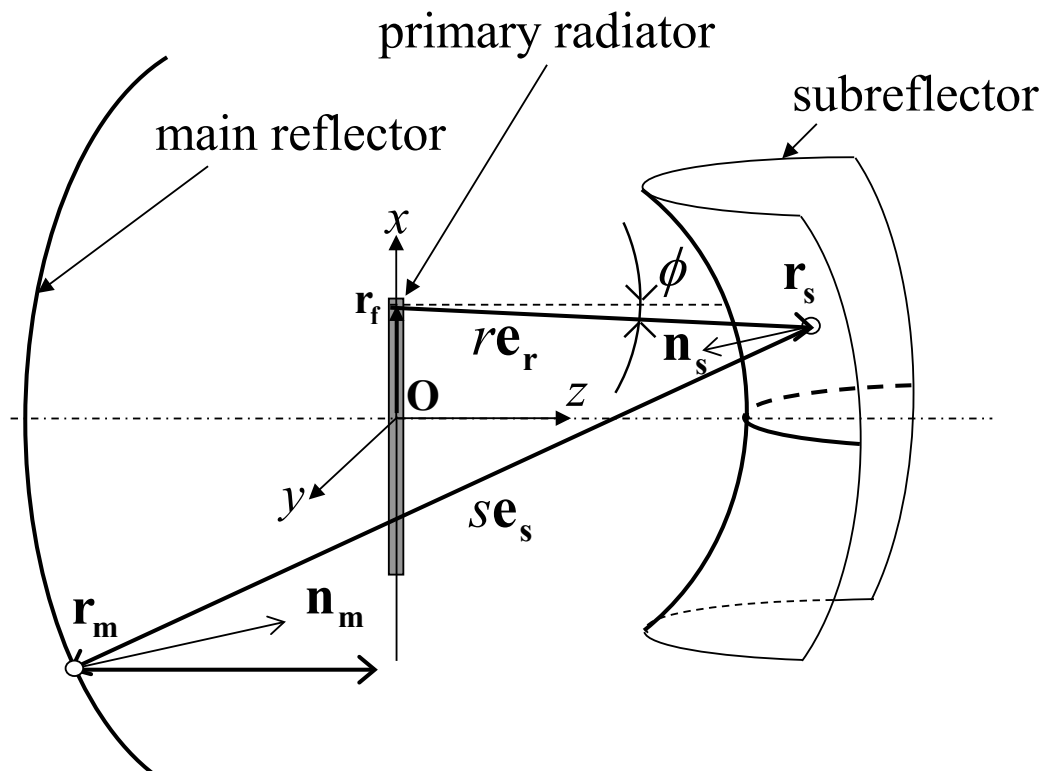


図 A.2 主反射鏡形状を表現する座標系

式 (A.4) に示した副反射鏡上の点  $r_s$  における法線ベクトル  $\mathbf{N}_s$  から, 単位法線ベクトル  $\mathbf{n}_s$  は, 式 (A.8) で定義される.

$$\mathbf{n}_s = \frac{\mathbf{N}_s}{|\mathbf{N}_s|} \quad (\text{A.8})$$

ここで,  $\mathbf{e}_s$  は副反射鏡上の標本点から主反射鏡上の標本点へ至る方向の単位ベクトル,  $\mathbf{e}_r$  は線状波源上の任意の点  $x_f$  から同じ  $x_f$  の位置にある副反射鏡上の標本点へ至る方向の単位ベクトルである. スネルの法則より, 式 (A.9) の関係を導くことができる.

$$\mathbf{e}_s = \mathbf{e}_r - 2(\mathbf{n}_s \cdot \mathbf{e}_r)\mathbf{n}_s \quad (\text{A.9})$$



また、原点から線状波源の任意の位置を示す位置ベクトルを  $\mathbf{r}_f$  とし、副反射鏡までの距離を  $r$  とすれば、式 (A.10) の関係がある。

$$r\mathbf{e}_r = \mathbf{r}_s - \mathbf{r}_f \quad (\text{A.10})$$

$$\mathbf{e}_r = \frac{\mathbf{r}_s - \mathbf{r}_f}{|\mathbf{r}_s - \mathbf{r}_f|}, \quad \mathbf{r}_f = \mathbf{i}_f x_f$$

副反射鏡までの距離  $r$  については、式 (A.11) で求めることができる。

$$\begin{aligned} (r\mathbf{e}_r) \cdot (r\mathbf{e}_r) &= (\mathbf{r}_s - \mathbf{r}_f) \cdot (\mathbf{r}_s - \mathbf{r}_f) \\ r^2 &= \mathbf{r}_s \cdot \mathbf{r}_s - 2\mathbf{r}_s \cdot \mathbf{r}_f + \mathbf{r}_f \cdot \mathbf{r}_f \\ \therefore r &= \sqrt{\mathbf{r}_s \cdot \mathbf{r}_s - 2\mathbf{r}_s \cdot \mathbf{r}_f + \mathbf{r}_f \cdot \mathbf{r}_f} \end{aligned} \quad (\text{A.11})$$

式 (A.3), (A.8) より、主反射鏡上の点  $\mathbf{r}_m$  は、式 (A.12) で表される。

$$\mathbf{r}_m(x_f, \phi) = \mathbf{r}_s + s\mathbf{e}_s \quad (\text{A.12})$$

線状波源から等位相面までの光路長を  $L$  とすると、式 (A.13) となる。式 (A.13) では、原点を通過して  $\mathbf{k}_B$  と垂直な平面としている。 $\mathbf{k}_B$  は、鏡軸単位ベクトルであり、その方向は、 $\mathbf{k}_B = \mathbf{i}0 + \mathbf{j}0 + \mathbf{k}$  である。 $s$  は副反射鏡上の標本点から主反射鏡上の標本点までの長さである。ここで、 $s$  を求めるためには  $L$  が既知である必要がある。 $L$  は、線状波源の中心から副反射鏡上の中心までの距離と、副反射鏡上の中心から主反射鏡上の中心までの距離と、主反射鏡上の中心から線状波源の中心までの距離を加算したものとする。

$$\begin{aligned} L &= |\mathbf{r}_s - \mathbf{r}_f| + s + (-\mathbf{r}_m \cdot \mathbf{k}_B) \\ &= r + s - (\mathbf{r}_s + s\mathbf{e}_s) \cdot \mathbf{k}_B \\ &= s(1 - \mathbf{e}_s \cdot \mathbf{k}_B) + r - \mathbf{r}_s \cdot \mathbf{k}_B \\ \therefore s &= \frac{L - r + \mathbf{r}_s \cdot \mathbf{k}_B}{1 - \mathbf{e}_s \cdot \mathbf{k}_B} \end{aligned} \quad (\text{A.13})$$

式 (A.12) より, 主反射鏡上の点  $\mathbf{r}_m$  における法線ベクトル  $\mathbf{N}_m$  は,

$$\mathbf{N}_m = \frac{\partial \mathbf{r}_m}{\partial x_f} \times \frac{\partial \mathbf{r}_m}{\partial \phi} \quad (\text{A.14})$$

となり, 式 (A.14) の右辺の各成分は, 式 (A.15), 式 (A.16) となる.

$$\frac{\partial \mathbf{r}_m}{\partial x_f} = \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial x_f} + \frac{\partial s}{\partial x_f} \mathbf{e}_s + s \frac{\partial \mathbf{e}_s}{\partial x_f} \quad (\text{A.15})$$

$$\frac{\partial \mathbf{r}_m}{\partial \phi} = \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial \phi} + \frac{\partial s}{\partial \phi} \mathbf{e}_s + s \frac{\partial \mathbf{e}_s}{\partial \phi} \quad (\text{A.16})$$

以降, 式 (A.15), 式 (A.16) を求めるために詳細な式を示していく.

これまでに,  $\partial \mathbf{r}_s / \partial x_f$  と  $\partial \mathbf{r}_s / \partial \phi$  は, 式 (A.5), 式 (A.6), 式 (A.7) にて求めている. よって,  $\partial s / \partial x_f, \partial s / \partial \phi$  と  $\partial \mathbf{e}_s / \partial x_f, \partial \mathbf{e}_s / \partial \phi$  がわかればよい.  $\partial s / \partial x_f, \partial s / \partial \phi$  を求める. 式 (A.13) を式 (A.17) に変形する.

$$s - s \mathbf{e}_s \cdot \mathbf{k}_B = L - r + \mathbf{r}_s \cdot \mathbf{k}_B \quad (\text{A.17})$$

式 (A.17) を  $x_f$  および  $\phi$  でそれぞれ偏微分すると, 式 (A.18), 式 (A.19) となり,  $\partial s / \partial x_f, \partial s / \partial \phi$  は, 式 (A.20), 式 (A.21) となる.

$$\frac{\partial s}{\partial x_f} - \frac{\partial s}{\partial x_f} \mathbf{e}_s \cdot \mathbf{k}_B - s \frac{\partial \mathbf{e}_s}{\partial x_f} \cdot \mathbf{k}_B - s \mathbf{e}_s \cdot \frac{\partial \mathbf{k}_B}{\partial x_f} = \frac{\partial L}{\partial x_f} - \frac{\partial r}{\partial x_f} + \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial x_f} \cdot \mathbf{k}_B + \mathbf{r}_s \cdot \frac{\partial \mathbf{k}_B}{\partial x_f} \quad (\text{A.18})$$

$$\frac{\partial s}{\partial \phi} - \frac{\partial s}{\partial \phi} \mathbf{e}_s \cdot \mathbf{k}_B - s \frac{\partial \mathbf{e}_s}{\partial \phi} \cdot \mathbf{k}_B - s \mathbf{e}_s \cdot \frac{\partial \mathbf{k}_B}{\partial \phi} = \frac{\partial L}{\partial \phi} - \frac{\partial r}{\partial \phi} + \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial \phi} \cdot \mathbf{k}_B + \mathbf{r}_s \cdot \frac{\partial \mathbf{k}_B}{\partial \phi} \quad (\text{A.19})$$

$$\frac{\partial s}{\partial x_f} = \frac{-\frac{\partial r}{\partial x_f} + \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial x_f} \cdot \mathbf{k}_B + s \frac{\partial \mathbf{e}_s}{\partial x_f} \cdot \mathbf{k}_B}{(1 - \mathbf{e}_s \cdot \mathbf{k}_B)} \quad (\text{A.20})$$

$$\frac{\partial s}{\partial \phi} = \frac{-\frac{\partial r}{\partial \phi} + \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial \phi} \cdot \mathbf{k}_B + s \frac{\partial \mathbf{e}_s}{\partial \phi} \cdot \mathbf{k}_B}{(1 - \mathbf{e}_s \cdot \mathbf{k}_B)} \quad (\text{A.21})$$

$\partial \mathbf{e}_s / \partial x_f, \partial \mathbf{e}_s / \partial \phi$  を求める. 式 (A.9) を  $x_f$  および  $\phi$  でそれぞれ偏微分すると, 式 (A.22), 式 (A.23) となる.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{e}_s}{\partial x_f} &= \frac{\partial \mathbf{e}_r}{\partial x_f} - 2 \left( \frac{\partial (\mathbf{n}_s \cdot \mathbf{e}_r)}{\partial x_f} \mathbf{n}_s + (\mathbf{n}_s \cdot \mathbf{e}_r) \frac{\partial \mathbf{n}_s}{\partial x_f} \right) \\ &= \frac{\partial \mathbf{e}_r}{\partial x_f} - 2 \left( \frac{\partial \mathbf{n}_s}{\partial x_f} \cdot \mathbf{e}_r + \mathbf{n}_s \cdot \frac{\partial \mathbf{e}_r}{\partial x_f} \right) \mathbf{n}_s - 2 (\mathbf{n}_s \cdot \mathbf{e}_r) \frac{\partial \mathbf{n}_s}{\partial x_f} \end{aligned} \quad (\text{A.22})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{e}_s}{\partial \phi} &= \frac{\partial \mathbf{e}_r}{\partial \phi} - 2 \left( \frac{\partial (\mathbf{n}_s \cdot \mathbf{e}_r)}{\partial \phi} \mathbf{n}_s + (\mathbf{n}_s \cdot \mathbf{e}_r) \frac{\partial \mathbf{n}_s}{\partial \phi} \right) \\ &= \frac{\partial \mathbf{e}_r}{\partial \phi} - 2 \left( \frac{\partial \mathbf{n}_s}{\partial \phi} \cdot \mathbf{e}_r + \mathbf{n}_s \cdot \frac{\partial \mathbf{e}_r}{\partial \phi} \right) \mathbf{n}_s - 2 (\mathbf{n}_s \cdot \mathbf{e}_r) \frac{\partial \mathbf{n}_s}{\partial \phi} \end{aligned} \quad (\text{A.23})$$

ここで,  $\partial \mathbf{e}_r / \partial x_f, \partial \mathbf{e}_r / \partial \phi$  と  $\partial \mathbf{n}_s / \partial x_f, \partial \mathbf{n}_s / \partial \phi$  について求める必要がある. 式 (A.10) より,  $\partial \mathbf{e}_r / \partial x_f, \partial \mathbf{e}_r / \partial \phi$  について求める. 式 (A.10) を  $x_f$  および  $\phi$  でそれぞれ偏微分すると, 式 (A.24), 式 (A.25) となる.

$$\begin{aligned} \frac{\partial r}{\partial x_f} \mathbf{e}_r + r \frac{\partial \mathbf{e}_r}{\partial x_f} &= \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial x_f} - \frac{\partial \mathbf{r}_f}{\partial x_f} \\ r \frac{\partial \mathbf{e}_r}{\partial x_f} &= \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial x_f} - \frac{\partial \mathbf{r}_f}{\partial x_f} - \frac{\partial r}{\partial x_f} \mathbf{e}_r \\ \therefore \frac{\partial \mathbf{e}_r}{\partial x_f} &= \frac{1}{r} \left( \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial x_f} - \frac{\partial \mathbf{r}_f}{\partial x_f} - \frac{\partial r}{\partial x_f} \mathbf{e}_r \right) \end{aligned} \quad (\text{A.24})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial r}{\partial \phi} \mathbf{e}_r + r \frac{\partial \mathbf{e}_r}{\partial \phi} &= \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial \phi} - \frac{\partial \mathbf{r}_f}{\partial \phi} \\ r \frac{\partial \mathbf{e}_r}{\partial \phi} &= \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial \phi} - \frac{\partial \mathbf{r}_f}{\partial \phi} - \frac{\partial r}{\partial \phi} \mathbf{e}_r \\ \therefore \frac{\partial \mathbf{e}_r}{\partial \phi} &= \frac{1}{r} \left( \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial \phi} - \frac{\partial \mathbf{r}_f}{\partial \phi} - \frac{\partial r}{\partial \phi} \mathbf{e}_r \right) \end{aligned} \quad (\text{A.25})$$

式 (A.24), 式 (A.25) より, さらに,  $r$ ,  $\mathbf{e}_r$ ,  $\partial r/\partial x_f, \partial r/\partial \phi$  を求める必要がある. 式 (A.11) を  $x_f$  および  $\phi$  でそれぞれ偏微分すると, 式 (A.26), 式 (A.27) となる.

$$\begin{aligned}
 2r \frac{\partial r}{\partial x_f} &= 2 \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial x_f} \cdot \mathbf{r}_s - 2 \left( \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial x_f} \cdot \mathbf{r}_f + \mathbf{r}_s \cdot \frac{\partial \mathbf{r}_f}{\partial x_f} \right) + 2 \frac{\partial \mathbf{r}_f}{\partial x_f} \cdot \mathbf{r}_f \\
 \therefore \frac{\partial r}{\partial x_f} &= \frac{1}{r} \left( \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial x_f} \cdot \mathbf{r}_s - \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial x_f} \cdot \mathbf{r}_f - \mathbf{r}_s \cdot \frac{\partial \mathbf{r}_f}{\partial x_f} + \frac{\partial \mathbf{r}_f}{\partial x_f} \cdot \mathbf{r}_f \right)
 \end{aligned} \tag{A.26}$$

$$\begin{aligned}
 2r \frac{\partial r}{\partial \phi} &= 2 \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial \phi} \cdot \mathbf{r}_s - 2 \left( \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial \phi} \cdot \mathbf{r}_f + \mathbf{r}_s \cdot \frac{\partial \mathbf{r}_f}{\partial \phi} \right) + 2 \frac{\partial \mathbf{r}_f}{\partial \phi} \cdot \mathbf{r}_f \\
 \therefore \frac{\partial r}{\partial \phi} &= \frac{1}{r} \left( \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial \phi} \cdot \mathbf{r}_s - \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial \phi} \cdot \mathbf{r}_f - \mathbf{r}_s \cdot \frac{\partial \mathbf{r}_f}{\partial \phi} + \frac{\partial \mathbf{r}_f}{\partial \phi} \cdot \mathbf{r}_f \right)
 \end{aligned} \tag{A.27}$$

$\partial \mathbf{n}_s/\partial x_f, \partial \mathbf{n}_s/\partial \phi$  については, 式 (A.4) を式 (A.28) と定義し,  $x_f$  および  $\phi$  でそれぞれ偏微分すると, 式 (A.29), 式 (A.30) となる.

$$\mathbf{N}_s = \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial x_f} \times \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial \phi} \equiv N_s \mathbf{n}_s \tag{A.28}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial N_s}{\partial x_f} \mathbf{n}_s + N_s \frac{\partial \mathbf{n}_s}{\partial x_f} &= \frac{\partial^2 \mathbf{r}_s}{\partial x_f^2} \times \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial \phi} + \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial x_f} \times \frac{\partial^2 \mathbf{r}_s}{\partial \phi \partial x_f} \\
 N_s \frac{\partial \mathbf{n}_s}{\partial x_f} &= \frac{\partial^2 \mathbf{r}_s}{\partial x_f^2} \times \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial \phi} + \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial x_f} \times \frac{\partial^2 \mathbf{r}_s}{\partial \phi \partial x_f} - \frac{\partial N_s}{\partial x_f} \mathbf{n}_s
 \end{aligned} \tag{A.29}$$

$$\therefore \frac{\partial \mathbf{n}_s}{\partial x_f} = \frac{1}{N_s} \left( \frac{\partial^2 \mathbf{r}_s}{\partial x_f^2} \times \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial \phi} + \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial x_f} \times \frac{\partial^2 \mathbf{r}_s}{\partial \phi \partial x_f} - \frac{\partial N_s}{\partial x_f} \mathbf{n}_s \right)$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial N_s}{\partial \phi} \mathbf{n}_s + N_s \frac{\partial \mathbf{n}_s}{\partial \phi} &= \frac{\partial^2 \mathbf{r}_s}{\partial x_f \partial \phi} \times \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial \phi} + \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial x_f} \times \frac{\partial^2 \mathbf{r}_s}{\partial \phi^2} \\
 N_s \frac{\partial \mathbf{n}_s}{\partial \phi} &= \frac{\partial^2 \mathbf{r}_s}{\partial x_f \partial \phi} \times \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial \phi} + \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial x_f} \times \frac{\partial^2 \mathbf{r}_s}{\partial \phi^2} - \frac{\partial N_s}{\partial \phi} \mathbf{n}_s
 \end{aligned} \tag{A.30}$$

$$\therefore \frac{\partial \mathbf{n}_s}{\partial \phi} = \frac{1}{N_s} \left( \frac{\partial^2 \mathbf{r}_s}{\partial x_f \partial \phi} \times \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial \phi} + \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial x_f} \times \frac{\partial^2 \mathbf{r}_s}{\partial \phi^2} - \frac{\partial N_s}{\partial \phi} \mathbf{n}_s \right)$$

式 (A.29), 式 (A.30) より,  $\partial N_s / \partial x_f, \partial N_s / \partial \phi$  を求める. 式 (A.28) を式 (A.31) のように変形し, 式 (A.31) を  $x_f$  および  $\phi$  でそれぞれ偏微分すると, 式 (A.32), 式 (A.33) となる.

$$\begin{aligned} N_s^2 &= (N_s \mathbf{n}_s) \cdot (N_s \mathbf{n}_s) \\ &= \left( \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial x_f} \times \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial \phi} \right) \cdot \left( \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial x_f} \times \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial \phi} \right) \end{aligned} \quad (\text{A.31})$$

$$\begin{aligned} 2N_s \frac{\partial N_s}{\partial x_f} &= 2 \frac{\partial \left( \left( \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial x_f} \times \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial \phi} \right) \right)}{\partial x_f} \cdot \left( \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial x_f} \times \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial \phi} \right) \\ \therefore \frac{\partial N_s}{\partial x_f} &= \frac{1}{N_s} \left( \frac{\partial^2 \mathbf{r}_s}{\partial x_f^2} \times \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial \phi} + \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial x_f} \times \frac{\partial^2 \mathbf{r}_s}{\partial \phi \partial x_f} \right) \cdot \mathbf{N}_s \end{aligned} \quad (\text{A.32})$$

$$\begin{aligned} 2N_s \frac{\partial N_s}{\partial \phi} &= 2 \frac{\partial \left( \left( \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial x_f} \times \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial \phi} \right) \right)}{\partial \phi} \cdot \left( \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial x_f} \times \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial \phi} \right) \\ \therefore \frac{\partial N_s}{\partial \phi} &= \frac{1}{N_s} \left( \frac{\partial^2 \mathbf{r}_s}{\partial x_f \partial \phi} \times \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial \phi} + \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial x_f} \times \frac{\partial^2 \mathbf{r}_s}{\partial \phi^2} \right) \cdot \mathbf{N}_s \end{aligned} \quad (\text{A.33})$$

最後に,  $\partial^2 \mathbf{r}_s / \partial x_f^2, \partial^2 \mathbf{r}_s / \partial x_f \partial \phi$  と,  $\partial^2 \mathbf{r}_s / \partial \phi^2$  について求める. 式 (A.5) を  $x_f$  および  $\phi$  でそれぞれ偏微分すると,  $\partial^2 \mathbf{r}_s / \partial x_f^2, \partial^2 \mathbf{r}_s / \partial x_f \partial \phi$  は, 式 (A.34), 式 (A.35) となる.

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \mathbf{r}_s}{\partial x_f^2} &= \frac{\partial}{\partial x_f} \left( \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial x_f} \right) \\ &= \frac{\partial}{\partial x_f} \left( \mathbf{i}_f + \mathbf{k}_f \left( -\frac{x_f}{2f} \right) \right) \\ &= \mathbf{k}_f \left( -\frac{1}{2f} \right) \end{aligned} \quad (\text{A.34})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \mathbf{r}_s}{\partial x_f \partial \phi} &= \frac{\partial}{\partial x_f} \left( \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial \phi} \right) = \frac{\partial}{\partial \phi} \left( \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial x_f} \right) \\ &= 0 \end{aligned} \quad (\text{A.35})$$

$\partial^2 \mathbf{r}_s / \partial \phi^2$  については、式 (A.6) を  $\phi$  で偏微分すると、式 (A.36) となる。

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial^2 \mathbf{r}_s}{\partial \phi^2} &= \frac{\partial}{\partial \phi} \left( \mathbf{j}_r \left( \frac{\partial(r(\phi))}{\partial \phi} \sin \phi + r(\phi) \cos \phi \right) + \mathbf{k}_r \left( \frac{\partial(r(\phi))}{\partial \phi} \cos \phi - r(\phi) \sin \phi \right) \right) \\
 &= \mathbf{j}_r \left( \frac{\partial^2(r(\phi))}{\partial \phi^2} \sin \phi + \frac{\partial(r(\phi))}{\partial \phi} \cos \phi + \frac{\partial(r(\phi))}{\partial \phi} \cos \phi - r(\phi) \sin \phi \right) \\
 &\quad + \mathbf{k}_r \left( \frac{\partial^2(r(\phi))}{\partial \phi^2} \cos \phi - \frac{\partial(r(\phi))}{\partial \phi} \sin \phi - \frac{\partial(r(\phi))}{\partial \phi} \sin \phi - r(\phi) \cos \phi \right) \quad (\text{A.36}) \\
 &= \mathbf{j}_r \left( \frac{\partial^2(r(\phi))}{\partial \phi^2} \sin \phi + 2 \frac{\partial(r(\phi))}{\partial \phi} \cos \phi - r(\phi) \sin \phi \right) \\
 &\quad + \mathbf{k}_r \left( \frac{\partial^2(r(\phi))}{\partial \phi^2} \cos \phi - 2 \frac{\partial(r(\phi))}{\partial \phi} \sin \phi - r(\phi) \cos \phi \right)
 \end{aligned}$$

式 (A.36) について、式 (A.6) において、 $\partial^2(r(\phi)) / \partial \phi^2$  を求める必要がある。

式 (A.7) を  $\phi$  で偏微分すると、式 (A.37) となる。

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial}{\partial \phi} \left( \frac{\partial(r(\phi))}{\partial \phi} + \frac{\partial(r(\phi))}{\partial \phi} \bar{e} \cos \phi - r(\phi) \bar{e} \sin \phi \right) &= 0 \\
 \frac{\partial^2(r(\phi))}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2(r(\phi))}{\partial \phi^2} \bar{e} \cos \phi - \frac{\partial(r(\phi))}{\partial \phi} \bar{e} \sin \phi \\
 \quad - \frac{\partial(r(\phi))}{\partial \phi} \bar{e} \sin \phi - r(\phi) \bar{e} \cos \phi &= 0 \quad (\text{A.37}) \\
 \frac{\partial^2(r(\phi))}{\partial \phi^2} (1 + \bar{e} \cos \phi) &= 2 \frac{\partial(r(\phi))}{\partial \phi} \bar{e} \sin \phi + r(\phi) \bar{e} \cos \phi \\
 \therefore \frac{\partial^2(r(\phi))}{\partial \phi^2} &= \frac{2 \frac{\partial(r(\phi))}{\partial \phi} \bar{e} \sin \phi + r(\phi) \bar{e} \cos \phi}{(1 + \bar{e} \cos \phi)}
 \end{aligned}$$

以上により、式 (A.15) , 式 (A.16) を求めるための全ての式が導出できたので、法線ベクトル  $\mathbf{N}_m$  を求めることができる。