

論文の内容の要旨

氏名：瀧川 道生

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：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

リモートセンシングは、遠隔から観測することで、観測対象物に関する物理的性質を取得するための技術である。その中でも、人工衛星に搭載した観測センサによって取得した観測データから様々な解析を行う分野を衛星リモートセンシングという。観測センサは大きく分けて、光の領域を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種類がある。電波センサとして、合成開口レーダ（SAR：Synthetic Aperture Radar）が知られている。光学センサと比べて、昼夜、天候によらず観測が可能な全天候型の特長がある。

世界各地で発生している自然災害の監視や、新たな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。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。この場合、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ような取り組みが必要になってくる。低コストの衛星の実現に向けては、小型ロケットの利用、衛星自体の小型、軽量化が必要である。小型衛星の定義であるが、我が国の宇宙基本計画では、1トン以下とされている。海外では100kg以下の超小型な観測衛星の報告もあるが、SARに必要な高利得で、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、ある程度の衛星の大きさが必要である。そこで、本論文においては、複数連携システムの例であるドイツのSAR-Lupe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のSARのアンテナは、高機能なアクティブフェーズドアレイアンテナ（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、軽量材料や展開構造による小型化が可能な反射鏡アンテナが有効であると考えられる。反射鏡アンテナ方式のSARアンテナの代表例としては、前述のSAR-LupeやMAPSAR、TECSARに搭載されている。

ビーム走査機能を実現する反射鏡アンテナの方式は、一次放射器の位置を変位させることによってビームを走査する変位給電方式と、一次放射器をアレイアンテナとしたアレイフィード方式に大別される。TECSARは、変位給電方式のセンターフィード形式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ビーム走査時の放射パターン特性が劣化する。アレイ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する特長があり、ビーム走査特性に優れたアンテナである。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不向きと考えられる。オフセット形式よりも占有体積が少なくなる形式はセンターフィード形式である。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が主反射鏡の大部分を覆ってしまうため、効率が著しく劣化する課題がある。しかし、イメージングリフレクタアンテナの高いビーム走査機能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。

本研究の目的は、小型観測衛星に搭載する新しいSAR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検討することである。本論文は、その研究成果をまとめたものであり、全体で5章から構成されている。

第1章は序論であり、小型観測衛星に適した新しい反射鏡アンテナを開発することを研究対象とした背景および目的を述べている。

第2章では、一次元に電子ビーム走査が可能なセンターフィード形式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ている。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、測定した。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値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用性を実証した。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、多重反射による性能の劣化を低減する新しい一次元に電子ビーム走査が可能な反射鏡アンテナを提案している。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利得や利得の低下、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、幾何学的に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が無いように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、製作し、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、より実用的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電子ビーム走査が可能な反射鏡アンテナの設計について述べている。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ため、広範囲の観測を実現するためには、必要な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ような設計を行った。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の試作アンテナを設計、製作し、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、本論文におけるアンテナの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で、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、広域観測が可能な反射鏡アンテナ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小型観測衛星に適した新しい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要約した。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ながら、新たに提案したセンターフィード形式の反射鏡アンテナの構成により、小型観測衛星に搭載可能で、かつビーム走査特性に優れたこれまでにないSAR用の反射鏡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SARの性能、機能に匹敵するセンサを搭載した小型観測衛星による安全、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。