

外 92-5

早稲田大学大学院理工学研究科

博士論文概要

論文題目

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

申請者

野本 真一

Shinichi Nomoto

平成 4 年 4 月

理 1586 (1856)

本論文は、無線通信分野におけるマイクロ波帯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、鏡面修整による指向性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った課題を扱っている。

アンテナの指向性の制御は、高利得化による通信回線の大容量化、低サイドローブ化や低交差偏波化による周波数の再利用、マルチビーム化による設備利用率の向上、更には、特殊な成形ビームの合成による新しい通信サービスの開拓などを可能とする無線通信の発展に欠くことのできない要素技術であって、ある種の衛星通信などではシステムの成否を決定するキーテクノロジーになっている。マイクロ波帯高利得アンテナとして広く用いられている反射鏡アンテナの放射指向性は、鏡面を僅かに変形することによって大きく変化するので、鏡面修整により、低サイドローブ特性やマルチビーム化に不可欠な良好なビーム偏向特性、更には、通信衛星あるいは地上系基地局などに求められる特殊な成形ビーム指向性等を具備した、より優れたアンテナを提供することができる。このため古くから活発な研究が行なわれ、問題が2次元となるペンシルビームを放射する回転対称な双反射鏡アンテナに対しては鏡面修整理論が確立され、衛星通信用地球局アンテナを始めとし各方面で大きな成果を挙げている。しかし、3次元問題として扱わなければならないオフセットアンテナや成形ビームの合成等については、解の存在についての疑問・曖昧さが残されたままであり個々の具体例に対し近似解法が次々と提案されるという混迷の状態が続いていた。また、従来の鏡面修整理論は幾何光学近似に基づいているため、反射鏡口径対波長比が小さくなると誤差が生じ、高性能な小形アンテナを設計できないという欠点があった。このため、一般的な鏡面修整理論の確立とその有効性に対する詳細な検討が望まれていた。

本研究の目的は、与えられた放射指向性を実現する修整反射鏡アンテナの一般的設計技術を確立し、各種無線通信システムに最適なアンテナを提供すると共に、高性能で高機能な新しい通信用アンテナシステムの提案を通じ、無線通信の発展に寄与することにある。本論文は5章から成り立っており、各章を要約すると以下ようになる。

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。また本論文の構成と目的を述べる。

第2章『幾何光学的鏡面修整理論』では幾何光学(GO)近似に基づき「(2-1章)単反射鏡によるファンビームの合成」と「(2-2章)双反射鏡によるペンシルビームの合成」に関する鏡面修整理論を3次元問題に一般化して展開している。ファンビームの合成問題については、従来の解釈であった曖昧性を解決し厳密解の唯一性を証明した。また、フラットなファンビームに関する鏡面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。一方、ペンシルビームの

合成問題については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、偏微分方程式を連立常微分方程式に帰着させ、回転対称系と同等の手順によってオフセット修整双反射鏡アンテナを設計する手法を開発した。また、回転対称な開口面写像を持つ双反射鏡系を全て列挙し、従来のカセグレン/グレゴリアン系とは全く異質で、ダブルオフセット配置でも開口面写像の回転対称性が保存される新しい範疇の鏡面系が存在することを明かにした。更に、双反射鏡系の交差偏波消去条件を修整反射鏡を含む形に一般化した。

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ている。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理論のオフセット反射鏡系への適用を提案した。そして、各鏡面修整法の有効性を反射鏡口径対波長比をパラメータとして定量的に検討した。その結果、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修整の限界を更に約2dB改善できることを明かにし、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』では、上記鏡面修整理論に基づいて設計・開発した5つの通信用アンテナについて述べている。

「(4-1章)衛星搭載用コンタービームアンテナ」では、ファンビームを放射する2重曲面反射鏡を基本としたコンタービームアンテナの構成について検討した。まず、 $i/V/U/S$ 字といった形状のコンタービームアンテナの鏡面設計法を確立した。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した。そして、ファンビーム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てマルチビーム化に関する基礎資料を得た。

「(4-2章)LDR基地局用広角成形ビームアンテナ」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た。開口径約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次元的に高度に成形されたビームを放射する。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効率的

で高精度な組み合わせ法を開発した。実測により確認した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た。

「(4-3章) マルチビーム地球局用球面鏡アンテナ」では、主反射鏡に円形の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した。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、更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た。そして、テレポートなど都市部周辺への設置に適したKu帯6.5m4ビーム地球局アンテナを開発し、この種のマルチビームアンテナとして世界に先駆けて実用化した。本アンテナは4つのビーム全てがシングルビームアンテナに匹敵する効率を達成しており、しかも優れた低サイドローブ特性・低交差偏波特性を実現している。

「(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適用を目指し、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収差の無いビームを放射する6焦点アンテナを構成するのに、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るが、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、波長をパラメータにした重み付けを行うことを提案した。そして、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た。

「(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た。物理光学的鏡面修整法により設計された本アンテナは、コンパクトな構造でありながら高能率で、しかもCCIRの勧告よりも約10dB優れた極めて低いサイドローブ特性を有している。このためVSATアンテナとしてだけでなく、その耐干渉特性を生かして、大電力送信が必要でかつ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実用に供されている。

第5章は以上の章の結論であって、本研究で得られた成果を、鏡面修整理論の一般化とその過程における定理の証明と新しい鏡面系の発明、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、各種通信用の高性能/高機能なアンテナの開発・実用化、に集約している。また、各鏡面修整法の特徴を比較して鏡面修整技術を総括し今後の展望を述べる。