

## 学位論文題名

太陽発電衛星送電アンテナ用キャビティ付  
スロットアンテナに関する研究

## 学位論文内容の要旨

本論文は、21世紀におけるクリーンエネルギー源のひとつとして有力な太陽発電衛星 SPS システムに関して、送電アンテナに適したキャビティ付スロットアンテナの設計法を数値解析ならびに実験を通して明らかにした研究成果をまとめたものである。終端短絡プローブ給電素子を適用することにより、従来困難であったキャビティ体積の大幅な低減を可能にしている。これにより、送電アンテナ素子の薄形化を実現し、SPS の軽量化、現実化に大きく寄与することが期待できる。

現在、温暖化、環境破壊等に対して、できるだけ早い対応が求められる状況となっている。また、化石燃料の枯渇が懸念される。このようなことから、太陽エネルギーを主とする再生可能エネルギーの利用が注目されている。太陽発電衛星は P. E. Glazer 博士によって提案された概念であり、人工衛星および地上設備から構成される大規模発電システムである。日本においては宇宙科学研究所を中心とした太陽発電衛星ワーキンググループにより、「ストローマンモデル SPS2000」と題された研究が進められてきた。

本論文においては、太陽発電衛星 SPS 送電アンテナの仕様を満足するアンテナ素子として、キャビティ付スロットアンテナを提案し、そのアンテナ設計法を確立する。素子の寸法は、輸送用ロケットの搭載能力やマイクロ波回路部あるいはビーム走査特性などにより制限される。特にアンテナ高さへの要求は、回路部分の寸法を考慮し、10分の1波長以下とされ、波長に比べかなり小さい。したがって、従来の実験的検討では、希望する周波数において十分な特性を実現するアンテナ素子の設計が困難である。

本論文では所望のキャビティ高さを実現できるアンテナ素子を提案し、素子パラメータの設計法を明らかにしている。提案した設計法を用い、キャビティ高さを40分の1波長程度まで薄形化したアンテナ素子の開発に成功した。今後、MMIC 化の進展により回路の小形化が実現された場合は、建設時の輸送コスト低減に一層大きく寄与するものである。さらに、大規模アレーの製造法を考慮したアンテナ構造についての提案を行っている。送電アンテナは大規模なフェーズドアレーアンテナであり、製作の容易性および十分な信頼性を有するアンテナ素子の開発は必要不可欠である。アンテナの設計および特性解析には時間領域解析手法を用いた。

従来、アンテナ等の電磁界解析は、周波数領域で行われている。しかし、周波数領域での解析は特定のモデルに限定され、また、キャビティ内部に設置された任意の給電モデルについて、入力インピーダンス等の評価が困難である。近年、大規模なメモリを必要とする計算が可能になり、電磁界解析

についても大規模シミュレーションによる電磁界の解明が注目を集めてきている。本論文では、キャビティ付スロットアンテナ素子の提案、薄形化および給電素子構造の単純化を実現するため、時間領域解析手法を適用し、キャビティ付スロットアンテナ設計に適した解析法を確立した。

以下、本論文の構成と概要を述べる。

第1章は序論であり、研究の背景と目的、検討課題および本論文の概要を述べた。

第2章において、マクスウェルの方程式に基づく時間領域解析(FDTD)法を詳細に解説した。

第3章において、FDTD法をキャビティ付スロットアンテナの解析に適用する際の問題点を明らかにし、その解決法について提案を行った。すなわち、時間領域データに対して時間窓を適用することである。時間窓を適用したときのパラメータ設定法について明らかにした。さらに、放射指向特性について評価・推定に必要な計算周期、実験結果との比較検討を行い、FDTD法を用いたキャビティ付スロットアンテナの解析法の有効性を明確にした。

第4章において、太陽発電衛星用送電アンテナ素子の仕様および寸法条件を満足するキャビティ付スロットアンテナを提案し、その設計手法を明確化した。給電素子として終端短絡プローブ給電素子および逆F給電素子を提案し、それぞれの給電素子を用いた場合の設計パラメータを明らかにした。

第5章において、キャビティ付スロットアンテナの解析に同軸線路モデルを導入することによって、ギャップ電圧モデルの場合と比較して飛躍的に少ない解析データで入力特性を推定可能であることを示した。さらに、同軸線路モデルおよび正弦波励振源を使用した絶対利得の評価法を確立した。

第6章において、素子間相互結合評価法について議論した。終端短絡プローブ給電キャビティ付スロットアンテナを、2素子または4素子配列したアレーアンテナの入力特性および放射指向特性評価法について検討した。FDTD法を用いた素子間相互結合の解析においては大きな解析空間を必要とする理由を数値解析により示した。一方、解析空間を大きくすることは大容量の記憶装置と長い計算時間を必要とすることから実用的ではない。少ない計算機メモリで正確な素子間相互結合の解析評価を実行するため、アンテナアレーのブロードサイド方向のみ解析空間を大きくし、それ以外の方向では解析モデル表面から解析空間境界までの距離は一定のセル数とする。このような解析空間を用いることにより、全方向に解析空間を拡大した場合と同様な結果が得られることを計算機シミュレーションにより示した。さらに、素子間相互結合を評価するために必要な解析空間の寸法について明確にした。

第7章において、送電アンテナ素子の薄形化を目的として検討を行った。送電アンテナ素子として、終端短絡プローブ給電キャビティ付スロットアンテナを使用する。このアンテナ素子は、キャビティ高さを低くした場合、キャビティ内部のプローブ位置、スロット幅および長さを適当に設定することにより、送電周波数2.45GHzにおいてインピーダンス整合を実現可能であることを示した。本章では、高さを12mm以下としたキャビティについて、インピーダンス整合を実現する設計法とアンテナパラメータを示した。さらに、アンテナ薄形化による特性変化について明らかにした。

第8章において、ポスト側壁構成キャビティ付スロットアンテナを提案した。キャビティ付スロットアンテナでは素子およびアレーアンテナの製作時、キャビティ上下二枚の導体板と側面の導体板との完全な接続が必要となり、大規模アレーアンテナの製作には複雑かつ高精度な製作が必須である。そこで、容易なアレーアンテナ製作を実現するため、キャビティ側壁をポストにより近似する。側壁を細径ポストで構成する利点は次のとおりである。すなわち、(1) 電気的な接続はポストの両端で保証するため製作が容易、(2) 十分な機械的強度を保ちつつ軽量化可能である。アンテナ素子の構造を明らかにし、側壁を構成するポスト間隔と入力特性の関係について検討した。さらに、アンテナ素子

単体およびアレーアンテナの設計法を明らかにした。

第9章において、8章までの本研究成果の全体を要約した。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 野 島 俊 雄  
副 査 教 授 宮 永 喜 一  
副 査 教 授 小 柴 正 則  
副 査 教 授 小 川 恭 孝  
副 査 助 教 授 山 本 学  
副 査 名 誉 教 授 伊 藤 精 彦 (苫小牧工業高等専門学校校長)

## 学位論文題名

# 太陽発電衛星送電アンテナ用キャビティ付 スロットアンテナに関する研究

近年、高速・大容量計算機の発達により大規模なシミュレーションが可能になり、電磁界解析についても大規模シミュレーションによる電磁界の解明が注目を集めてきている。電磁界はマクスウェルの方程式により記述される。このことから、マクスウェルの方程式を時間領域において直接解くことにより電磁界現象を推定することができる。

多機能アンテナ素子としてキャビティ付スロットアンテナの実験的な検討が行われている。素子の小形化および給電素子構造の単純化を実現するためには、アンテナ素子に関する電磁界現象を明確にする必要がある。本論文では、時間領域解析法をキャビティ付スロットアンテナに適用することにより、要求される寸法条件と特性を満足する放射素子の設計を行うことを目的として研究を行っている。太陽発電衛星送電アンテナ素子として、キャビティ付スロットアンテナ素子を提案し、設計法を確立するとともに、時間領域における解析手法の開発について検討した成果をまとめたものであり、第1章から第9章までの全9章で構成されている。

第1章では、本研究の背景であるエネルギー無線送電、太陽発電衛星SPS2000および送電システムについて説明している。さらに、送電アンテナの諸元、アンテナ素子に対する要求事項について説明し、送電アンテナ素子としてキャビティ付スロットアンテナが優れている理由を明らかにしている。

第2章では、マクスウェルの方程式に基づく時間領域解析法について詳細に解説を行い、時間領域差分法(FDTD法)を使用する場合の基本的な事項として、セ

ル寸法，時間ステップ間隔，入射電磁界の定義，吸収境界条件，ワイヤの定式化，入力インピーダンス，構造の対称性の利用および放射指向特性の評価法について説明している。

第3章では，FDTD法をキャビティ付スロットアンテナの解析に適用する際の問題点を明らかにし，その解決法について提案している。すなわち，時間領域データに対して時間窓を適用することである。さらに，放射指向特性について評価・推定に必要な計算周期，実験結果との比較検討を行い，FDTD解析法を用いたキャビティ付スロットアンテナの設計法を明らかにしている。

第4章では，太陽発電衛星用送電アンテナ素子の仕様および寸法条件を満足するキャビティ付スロットアンテナを提案し，その設計手法を明確化している。給電素子として終端短絡プローブ給電素子および逆F給電素子を提案し，給電素子の設計パラメータを明らかにしている。

第5章では，キャビティ付スロットアンテナのFDTD解析に同軸給電モデルを導入することによって，ギャップ電圧モデルの場合と比較して少ない解析データで入力特性を推定可能であることを明らかにしている。さらに，同軸線路モデルと正弦波励振源を使用した絶対利得評価法について提案している。

第6章では，FDTD法を用いた素子間相互結合評価法について議論している。FDTD法を用いた素子間相互結合の解析においては大きな解析空間としなければならない理由を数値解析的に示し，少ない計算機メモリで正確な素子間相互結合の解析評価を実行するための解析空間設定法を提案している。解析結果を実験結果と比較することにより，提案を行った解析法の有効性を示している。

第7章では，送電アンテナ素子の薄形化について検討している。送電アンテナ素子として，終端短絡プローブ給電キャビティ付スロットアンテナを使用し，キャビティ高さを低くした場合でも，キャビティ内部のプローブ位置，スロット幅および長さを適当に設定することによって，送電周波数 2.45 GHz においてインピーダンス整合を実現可能であることを明らかにしている。高さを 12 mm 以下としたキャビティについて，インピーダンス整合を実現する設計法とアンテナパラメータを示し，解析結果と実験結果との比較検討を行い，設計法の有効性を示している。さらに，薄形化による特性変化について明らかにしている。

第8章では，容易なアレーアンテナ製作を実現するため，キャビティ側壁をポストにより近似する，ポスト側壁構成キャビティ付スロットアンテナを提案している。アンテナ素子の構造を明らかにし，側壁を構成するポスト間隔と入力特性の関係について検討している。さらに，アンテナ素子単体およびアレーアンテナの設計法を明らかにしている。

第9章は結論であり，本論文の成果を要約している。

これを要するに，著者は，本論文において，マイクロ波エネルギー伝送送電アンテナとして，キャビティ付スロットアンテナを提案し，アンテナの特性評価法に関する有益な新見を得たものであり，アンテナ工学の分野に貢献するところ大なるものがある。よって著者は，北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。