

学位論文題名

# Circular Microstrip Patch Antennas with Slits for Rectenna Elements

(レクテナ素子として使用するスリット入円形マイクロストリップアンテナ)

## 学位論文内容の要旨

石油や石炭等の化石燃料の有限性,それに伴う資源枯渇の必然性が言われて久しい.このようなことから,石油に代わるエネルギー源を早急に確保する必要がある.さらに,1970年代の2度の石油危機を契機として,石油への依存から脱却し,安定した供給が可能な代替エネルギーの開発が急がれている.

宇宙太陽発電衛星は,1968年にピーター・グレーザー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システムである.静止衛星軌道に太陽電池の発電所を設け,太陽エネルギーにより宇宙で直接発電し,その電力をマイクロ波に変換して地球上に無線送電することによって地上の資源不足と環境汚染の2つを解決する地球にやさしいエネルギーを得るための1つの候補である.わが国においては,クリーンな代替エネルギーとしての太陽発電衛星に着目し,現実的に検討できるシステムの開発を目的として,文部省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って「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.これらエネルギー無線伝送における要素技術のひとつとして,高調波の再放射抑圧特性に優れ,高効率な RF-DC 変換を実現する受電アンテナの開発が必須である.

本研究においては,エネルギーの無線送電システムにおける受電アンテナについて検討を行い,従来提案されている受電アンテナ素子に比較して優れた高調波再放射抑圧特性と RF-DC 変換効率を実現する方法を新たに提案し,その有効性を示した.マイクロ波電力を受電し,直流電力を出力する受電アンテナはレクテナと呼ばれ,その高調波再放射抑圧特性から円形マイクロストリップアンテナ(以後, CMSA と略称)を用いることが提案されている. CMSA は高次の共振周波数が基本共振周波数の整数倍にならないことから,整流回路で発生する高調波成分の再放射を抑圧する特性を有している.しかしながら,高次モードによる共振の帯域幅が広いこと,その共振周波数が高調波周波数に近いことから,高調波周波数での再放射を完全に抑圧できない.このようなことから,アンテナ素子の形状を工夫し,アンテナの再放射抑圧特性を改善することを提案した.すなわち, CMSA のパッチ表面にスリットを入れる手法である.

スリットを入れることにより、高調波周波数付近に発生する高次モードのパッチ表面電流分布が乱される。その結果、高次モードの発生が抑圧されたり、電流経路が長くなることによって共振周波数が下がるので、高調波の再放射抑圧特性が改善される。

第1章では、本研究の背景であるエネルギー無線伝送、太陽発電衛星 SPS2000 および受電システムについてその基本概念を説明した。さらに、受電アンテナの諸元、アンテナ素子に対する要求について説明し、受電アンテナ素子として CMSA が優れている理由を明らかにした。

第2章では、本論文において使用する CMSA の内部電磁界分布について説明を行った。ここでは、誘電体内部の電磁界、CMSA で発生するモード分布などについて述べた。さらに、CMSA の基本特性である遠方電界、絶対利得、無負荷 Q および放射効率  $\eta$  についての理論的な取り扱いについて説明した。

第3章では、高調波再放射抑圧特性の改善を目的として、高次モードに着目したスリット入 CMSA について提案および設計のための基礎資料を新規に示した。すなわち、高次モードの電流強度極大値位置に沿ってスリットを入れた CMSA の設計法、スリットパラメータについて述べた。特に、3倍および5倍高調波周波数付近で発生する  $TM_{120}$ 、 $TM_{130}$  および  $TM_{430}$  モードの発生を抑圧または低い周波数へシフトさせるためのスリットを設計した。さらに、提案を行った設計に基づいて試作したスリット入 CMSA の入力特性および放射指向特性を示した。それら特性をスリットなし CMSA の特性と比較検討することによって、高調波再放射抑圧特性を改善することを明らかにした。

第4章では、基本モードに着目したスリット入 CMSA について設計法および高調波再放射抑圧特性を明らかにし、最適設計のための指針を示した。基本共振モードである  $TM_{110}$  モードについて電流分布を明らかにし、スリットの設計法を示した。さらに、提案を行った設計法に基づいて試作したスリット入 CMSA の特性評価を行った。スリットパラメータによる特性変化について明らかにすることによって、最適設計のための指針を示した。また、第3章で提案したスリット入 CMSA に比較して、パッチ半径の再設計を必要とせず、1組のスリットで良好な特性を実現できることを明らかにした。

第5章では、整流回路の構成について議論した。アンテナ出力端から整流回路側を見込んだインピーダンスは整流回路への入力電力に依存して変化する。これは、整流素子として使用するダイオードの非線形特性が原因である。このことから、整流回路に整合回路を組み込み、入力電力に応じた最適な整流回路の構成を提案した。低入力電力あるいは高入力電力用整合回路を設計し、高入力電力時に 69% の RF-DC 変換効率が得られることを確認した。

第6章は結論であり、本研究で得られた主な知見と成果をまとめた。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 伊 藤 精 彦  
副 査 教 授 小 柴 正 則  
副 査 教 授 小 川 恭 孝  
副 査 教 授 宮 永 喜 一  
副 査 教 授 大 宮 学

学 位 論 文 題 名

## Circular Microstrip Patch Antennas with Slits for Rectenna Elements

(レクテナ素子として使用するスリット入円形マイクロストリップアンテナ)

石油や石炭等の化石燃料の有限性、それに伴う資源枯渇の必然性が言われて久しい。このようなことから、石油に代わるエネルギー源を早急に確保する必要がある。さらに、1970年代の2度の石油危機を契機として、石油への依存から脱却し、安定した供給が可能な代替エネルギーの開発が急がれている。

宇宙太陽発電衛星は、1968年にピーター・グレーザー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システムである。静止衛星軌道に太陽電池の発電所を設け、太陽エネルギーにより宇宙で直接発電し、その電力をマイクロ波に変換して地球上に無線送電する。太陽発電衛星は地上の資源不足と環境汚染の2つを解決する地球にやさしいエネルギーを得るための1つの候補である。わが国においては、クリーンな代替エネルギーとしての太陽発電衛星に着目し、現実的に検討できるシステムの開発を目的として、文部省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って「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。これらエネルギー無線伝送における要素技術のひとつとして、高調波再放射抑圧特性に優れ、高効率なRF-DC変換を実現する受電アンテナの開発が必須である。

マイクロ波電力を受電し、直流電力を出力する受電アンテナはレクテナと呼ばれ、その高調波再放射抑圧特性から円形マイクロストリップアンテナ(以後、CMSAと略称)を用いることが提案されている。CMSAは高次の共振周波数が基本共振周波数の整数倍にならないことから、それ自体が整流回路で発生する高調波成分の再放射を抑圧する特性を有している。しかしながら、高次モードによる共振帯域幅が広いこと、その共振周波数が高調波周波数に近いことから、高調波周波数での再放射を完全に抑圧できていない。一方、CMSAのパッチ表面にスリットを入れることにより、高調波周波数付近に発生する高次モードの

パッチ表面電流分布は乱され、高次モードの発生が抑圧されたり、共振周波数が下がることにより、高調波の再放射抑圧特性が改善される。本論文はこの高調波再放射抑圧機能を有するスリット入 CMSA の最適設計法および高調波再放射抑圧特性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 6 章までの全 6 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伝送、太陽発電衛星 SPS2000 および受電システムについて説明している。さらに、受電アンテナの諸元、アンテナ素子に対する要求について説明し、受電アンテナ素子として CMSA が優れている理由を明らかにしている。

第 2 章では、本論文において検討する CMSA について説明を行っている。内部電磁界、モード分布、放射指向特性・絶対利得、無負荷  $Q$  および放射効率  $\eta$  についての理論的な取り扱いを説明している。

第 3 章では、高調波再放射抑圧特性の改善を目的として、高次モードに着目したスリット入 CMSA について提案および設計のための基礎資料を新規に示している。すなわち、高次モードの電流強度極大値位置に沿ってスリットを入れた CMSA の設計法、スリットパラメータについて述べている。特に、3 倍および 5 倍高調波周波数付近で発生する  $TM_{120}$ 、 $TM_{130}$  および  $TM_{430}$  モードの発生を抑圧または低い周波数へシフトさせるためのスリットを設計している。さらに、提案を行った設計に基づいて試作したスリット入 CMSA の入力特性および放射指向特性を示している。それら特性を CMSA の特性と比較検討することによって、高調波再放射抑圧特性が改善されることを明らかにしている。

第 4 章では、基本モードに着目したスリット入 CMSA について設計法および高調波再放射抑圧特性を明らかにし、最適設計のための指針を示している。基本共振モードである  $TM_{110}$  モードについて電流分布を明らかにし、スリットの設計法を示している。さらに、提案を行った設計法に基づいて試作したスリット入 CMSA の特性評価を行っている。スリットパラメータによる特性変化について明らかにすることによって、最適設計のための指針を示している。また、本設計法では第 3 章で提案したスリット入 CMSA と比較して、パッチ半径の再設計を必要とせず、1 組のスリットで良好な特性を実現できることを明らかにしている。

第 5 章では、整流回路の構成について議論している。アンテナ出力端から整流回路側を見込んだインピーダンスは整流回路への入力電力に依存して変化する。これは、整流素子として使用するダイオードの非線形特性が原因である。このことから、整流回路に整合回路を組込み、入力電力に応じた最適な整流回路の構成を提案している。低入力電力あるいは高入力電力用整合回路を設計し、高入力電力時に 69% の RF-DC 変換効率を得られることを確認している。

第 6 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受電アンテナとしてスリット入 CMSA を提案し、スリット入 CMSA の最適設計法および高調波再放射抑圧特性に関する有益な新知見を得ており、アンテナ工学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。