

博士学位論文審査報告書

申請者氏名 ふりがな 内藤 皓貴 ないとう てるき  
学位の種類 博士（工学）  
論文題目 電離気体プラズマのアンテナ応用に  
関する理論構築と実験検証  
学籍番号 1868003  
学歴 平成15年4月 京都大学工学部電気電子工学科 入学  
平成19年3月 同上卒業  
平成19年4月 京都大学大学院工学研究科  
電子工学専攻修士課程 入学  
平成21年3月 同上修了  
平成30年4月 滋賀県立大学大学院工学研究科  
先端工学専攻博士後期課程 入学  
令和2年1月 同上修了見込

論文審査委員 (主査) 滋賀県立大学工学研究科 教授 酒井 道  
滋賀県立大学工学研究科 教授 奥村 進  
滋賀県立大学工学研究科 教授 作田 健



論文の内容の要旨

(論文審査の結果の要旨は概ね A4 版とし、2000 字程度)

本論文は、電離気体プラズマのアンテナ応用として、プラズマアンテナおよびプラズマクロージング（電磁波の散乱抑制）技術について、理論解析、数値解析および実験検証を行った研究（以下、本研究と呼称する）をとりまとめたものである。

まず、第1章で、研究の背景について説明している。本研究が対象とするプラズマアンテナおよびクロージング技術について、従来研究を俯瞰しながらその

特徴や課題について論じ、本研究の学術的意義と産業応用への可能性を明らかにするとともに、本研究の目的を示し、本研究全体の方向付けを行っている。

次に、第2章で、プラズマと電磁波の間に相互作用がないという条件のもと、他励式プラズマアンテナの放射特性を理論的かつ実験的に論じている。プラズマおよびアンテナ理論から導かれる解析式と FDTD (Finite Difference Time Domain) 法を用いた電磁界解析によって、放射特性とプラズマパラメータの関係を評価し、プラズマアンテナの放射特性が、電子の弾性衝突周波数とプラズマ断面の総電子数との比、および電磁波の周波数とプラズマ断面の総電子数との比の2つのパラメータで決まることを明らかにした。また、他励式プラズマアンテナを試作し、実験結果と理論解析結果との定量比較を行うことによって、以上の評価の妥当性が示されている。

第3章では、プラズマと電磁波の間に相互作用がある自励式プラズマアンテナについて、特に自励式で代表的に用いられる表面波励起プラズマアンテナの放射特性を理論的かつ実験的に論じている。プラズマと電磁波の相互作用を考慮するため、第2章で用いた FDTD 法にボルツマン方程式および拡散方程式を組み込み、放射特性とプラズマパラメータの関係を計算し、プラズマが放電管端部に未達の場合には入力電力は主にプラズマの体積増加に消費され電磁波の放射が少なく、一方、プラズマが放電管端部に到達した後は入力電力が電子密度および電磁波の放射増加につながり、プラズマがアンテナとして振舞うことを明らかにした。また、自励式プラズマアンテナを試作し、実験結果と理論解析結果との定量比較によって妥当性を示すとともに、金属アンテナとの比較によって、プラズマアンテナの長所と短所およびその活用法について述べている。

第4章では、表面波励起プラズマアンテナの動作原理、特に表面波プラズマの従来研究と第3章で得られた結果の相違点を解明することを目的に、表面波励起プラズマアンテナの放射特性の解析的な定式化に取り組んでいる。従来の表面波プラズマとの違いとして放電管の有限性に着目し、従来の表面波プラズマの理論を放電管が有限の場合に拡張することで数値計算の結果を再現することに成功した。また、定式化した解析式を用いて、表面波励起プラズマアンテナでは放電管端部にプラズマが到達することで後進波が発生し、その結果生じるプラズマの抵抗成分の減少とアンテナの放射抵抗の増加の相乗効果によってアンテナ利得が増加し、表面波プラズマがアンテナとして動作することを明らかにした。

第5章では、クローキング媒質としてのプラズマの有用性検証を目的に、特にそこに内在する電子と中性粒子との間の衝突性に着目して、クローキング技術の一つである散乱相殺へのプラズマの適用性を理論的かつ実験的に論じている。散乱理論に基づく理論解析では、散乱長のプラズマパラメータ（電子の弾性

衝突周波数、電子プラズマ周波数) 依存性を二次元表示することにより、Tonks-Dattner 共振と散乱相殺の関係を明らかにするとともに、衝突性プラズマでも散乱相殺が可能であることを示している。また、FDTD 法を用いた電磁界解析により、プラズマ中に誘起される電流による散乱相殺の発生、および散乱相殺の非共振性を明らかにするとともに、実験的に数値計算の結果が再現されること、および電磁波の散乱が最大 8 dB 抑制されることを実証した。

最後に、第 6 章では、本研究で得られた成果を総括するとともに、本研究が契機となって広がる学術領域と望まれる工学的進展について述べている。

## 論文の審査結果の要旨

(論文の審査結果の要旨は A4 版とし、1000 字程度)

本論文は、電離気体プラズマのアンテナ応用として、プラズマアンテナおよびプラズマクローキング（電磁波の散乱抑制）技術について、理論解析、数値解析および実験検証を行った研究をとりまとめたものである。

以下に、本論文で示された主な成果をまとめる。

- (1) 解析式および FDTD (Finite Difference Time Domain) 法による理論解析において、プラズマアンテナの動作原理およびプラズマパラメータと放射特性の関係を明らかにすることに成功した。放射特性は、電子の弾性衝突周波数とプラズマ断面の総電子数との比、および電磁波の周波数とプラズマ断面の総電子数との比の 2 つのパラメータで決まること、自励式プラズマアンテナではプラズマの放電管端部の到達とそれによる後進波の発生が重要であることを明らかにし、アンテナ設計における要点を示した。
- (2) プラズマアンテナを試作し、実験結果と数値計算結果とを定量的に比較することで、従来研究では十分になされていなかった数値計算の結果の妥当性検証および実験の理論的な裏付けを行うことに成功した。
- (3) プラズマの新しい応用として、クローキング媒質としてのプラズマの有用性を理論的、実験的に示した。散乱理論に基づく理論解析により、実用上取り扱いが容易な衝突性プラズマでも電磁波の散乱抑制が可能であることを示すとともに、FDTD 法により散乱抑制の非共振性がプラズマ内に誘起される電流によることを示した。また、実験的に電磁波散乱を最大 8 dB 抑制することにも成功した。

本論文に示された成果は、工学応用先の一例として、無線通信分野において RF (Radio Frequency) フロントエンドの重要な構成要素であるアンテナに関わり、用途や通信方式の多様化に伴って高まり続けるアンテナの小型化、多機能化、広帯域化へのニーズに対して有効と考えられる。また、クローキングに関する成果は、従来は人工的な非一様構造で実現されてきた ENZ (epsilon-near-zero) 型媒質を一様媒質で実現したものであり、メタマテリアル分野への新しい視点の提供という観点で学術的にも価値がある。そして、以上の研究業績は、工学研究科における課程修了による博士の学位授与に関する内規の運用方針に定める基準に関する要件を満たしている。

以上に基づいて、本論文は博士（工学）の学位論文として価値があるものと認める。また、令和元年 1 月 1 日の公聴会に引き続き実施した最終試験の結果、合格と判定した。