

令和元年8月28日

博士論文内容の要旨

専攻名 先端工学専攻

氏名 内藤 皓貴

1. 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

2. 論文要旨 (和文2,000文字程度)

本研究では、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に取り組んだ。第1の目的は、プラズマアンテナの実用化に向けて、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。第2の目的は、実験検証を行い、理論解析の結果と定量的に比較検証することで、理論の妥当性および実験の理論的裏付けを行う。第3の目的は、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、実験的に示すことである。

第1章では、本研究の背景、目的および本論文の構成について説明する。プラズマアンテナおよびプラズマクローキングについて、歴史的経緯も踏まえながら従来研究および技術的特徴についてまとめ、本研究の背景および必要性を明らかにし、本研究の方向付けを行った。

第2章では、他励式として直流グロー放電を適用したUHF帯モノポールアンテナの放射特性について論じる。プラズマと電磁波の間に相互作用がないという仮定のもと、アンテナ理論から得られる解析式と有限差分時間領域 (Finite Difference Time Domain, FDTD) 法を用いた電磁界解析を用いて、放射特性とプラズマパラメータの関係を求めた。プラズマアンテナでは、電子の弾性衝突周波数 ν_m とプラズマ断面の総電子数 N_e との比 ν_m/N_e によってアンテナの内部損失および電気長が決まり、電磁波の周波数 ω とプラズマ断面の総電子数 N_e との比 ω/N_e によって、アンテナの動作周波数が決まることを明らかにした。また、実験結果との定量比較を通じて理論解析の妥当性を確認した。

第3章では、自励式として表面波プラズマを適用したマイクロ波帯モノポー

ルアンテナの放射特性について論ずる。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Boltzmann方程式および拡散方程式を導入し、プラズマと電磁波の相互作用がある場合の放射特性とプラズマパラメータの関係を計算した。表面波励起プラズマアンテナでは、入力電力の一部がプラズマ生成に消費され、残りが空間に電磁波として放射される。解析の結果、プラズマが放電管端部に到達するまで、入力電力のほとんどがプラズマの体積増加に消費されて電磁波はほとんど放射されず、プラズマが放電管端部に到達した後は、入力電力は電子密度増加に寄与し、電子密度の増加に伴い電磁波の放射が増加することを明らかにした。また、放射特性のプラズマパラメータ依存性が第2章の他励式プラズマアンテナと同様である。実験によって放射特性を評価し、数値計算の結果と一致することを確認した。一方、数値計算によって、臨界密度を大幅に超える電子密度や、入力電力に依存して軸方向の電子密度分布が大幅に変化することなど、表面波プラズマの従来研究と異なる結果が得られた。

第4章では、第3章で得られた表面波プラズマの従来研究と異なる結果の原因を明らかにするため、表面波プラズマおよびアンテナの理論に基づき、表面波励起プラズマアンテナの放射特性を解析的に定式化する。表面波励起プラズマアンテナの放電管が有限長であることに着目し、半無限長の表面波プラズマの理論を有限の場合に拡張した。解析式から得られた結果は数値計算と良く一致し、放電管が有限の場合では、進行波と後進波の干渉が重要であることを明らかにした。電子密度は、表面波生成条件および放電管端部の境界条件によって、臨界密度よりきわめて高く維持され、軸上の電子密度分布は進行波と後進波のバランスに従って大きく変化する。

第5章では、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の検証を目的に、電磁波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、実験的に検証する。理論解析では、 $v_m/\omega - \omega_{pe}/\omega$ 平面上への二次元表示により、Tonks-Dattner共振と散乱相殺の関係を明らかにした。また、数値計算によって、散乱相殺は $v_m/\omega > 1$ の衝突性プラズマでも生じること、プラズマ中に誘起された電流で金属円柱の散乱が相殺されることを確認した。プラズマで覆われた金属円柱の散乱特性を電磁波の透過率および反射率から実験的に評価し、数値計算と定量的に一致する結果を得た。

最後に、第6章では、本研究で得られた以上の成果について総括するとともに、今後に残された課題について述べる。