

審査の結果の要旨

氏名 月崎 竜童

本博士論文「Plasma Diagnostics of the Microwave Ion Thruster Utilizing Optical Fiber Probes」(光ファイバ探針によるマイクロ波放電式イオンスラスタの内部現象解明)では、空間分解能のある新しいプラズマ診断法を発案・実証することに成功した。従前のプラズマ診断法であるラングミュアプローブは金属電極のため、交流電場を著しく乱すので、マイクロ波やRFにより生成されたプラズマへは適用不可であった。これに対し、今回開発した手法は、プローブ全体が絶縁体/誘電体にて構成されており、係る問題を解決することができる。本手法をマイクロ波放電式イオンスラスタ $\mu 10$ へ応用し、内部プラズマの計測を実施した。本装置は小惑星探査機「はやぶさ」の主推進として活躍し、世界で初めて電気推進による地球~小惑星間往復航行を成功させた機種である。本論文は全6章から成り、構成は以下となっている。

第1章では、電気推進機技術の発展の歴史的経緯を述べる。1990年代から2012年までの衛星・深宇宙探査機への実用例を上げながら、各種イオンスラスタを対比させ、イオンスラスタ $\mu 10$ の今後の展開について説明している。続けて本研究の位置づけを行い、研究目的を明示している。

第2章では、マイクロ波放電式イオンスラスタの作動原理を詳細に述べるとともに、本研究に使われた地上実験の設備、各種光学機器、電源装置などを図表とともにまとめる。

第3章では、光ファイバを活用したプラズマ診断について述べられている。1) 受光測定、2) レーザ吸収分光測定、3) Electro-Optic 素子 (EO素子) を用いたマイクロ波電場測定との3部構成となっている。光ファイバを活用した計測法は、A) プラズマ源内部に挿入しても、誘電体のためマイクロ波電磁場に対し低擾乱、B) 石英製絶縁体のため、イオンビーム噴射下の高電位/高温状態のプラズマへの近接性が良好、C) 微細な直径の光ファイバをグリッド孔から挿入可能で、スラスタを非破壊で内部計測可能、D) ファイバを空間掃引することでアーベル変換無しに空間分布を直接計測、といった優れた特徴を有す。実験では初めに光ファイバをスラスタ内部に挿入し、反射マイクロ波電力とビーム電流において擾乱が十分小さいことを証明した。次に、ファイバを介してフォトディテクタにてキセノンプラズマの発光強度分布を取得し、推力の限界点付近で導波管内部に強い発光の存在を確認した。続いて、フォトディテクタを分光器に代えて、内部のプラズマ発光種を特定した。ここでも空間分布を取得すると共に、後述するレーザ吸収分光法で用いる励起温度を、局所熱平衡を仮定して算出した。次にレーザ吸収分光法と光ファイバを合わせて、イオンスラスタ内部中心軸上の励起中性粒子密度空間分布測定を行った。ここでは

波長 823.16nm (XeI) にて準安定中性粒子密度分布測定を行い、本手法の有用性を実証した。続いて基底と共鳴遷移線を有する波長 828.01nm (XeI) の励起中性粒子の測定を行い、導波管のマイクロ波定在波の腹の位置における励起中性粒子の密度ピークを特定した。本章の最後に、EO素子を用いマイクロ波電場測定を挙げる。光ファイバの先端にEO素子をつけ、入射されたレーザがマイクロ波電場強度に応じて偏光面を変えて反射させることで、偏光面位相差からマイクロ波電界強度が測定可能となる。ここでも、導波管のマイクロ波定在波の腹の位置にマイクロ波の異常電場が、推力限界点以降において確認された。

第4章では、第3章で確認された、導波管におけるプラズマ発光・励起中性粒子・異常電場の各ピークがなぜ引き起こされたのか理論的に解析するために、テスト粒子法による電子軌道解析を行った。本計算では、中性粒子との運動量交換衝突を考慮しながら、放電室内の磁場強度を有限要素法FEMM、電子軌道を4次ルンゲクッタにて解析した。放電室内部の内周磁石から漏れる磁力線によって、ECR領域で加速された電子が、導波管内部に誘導されていることを明らかにした。この電子が導波管内部で滞留して、第3章で確認された現象に結びついていると結論づけている。

第5章では、第3章におけるプラズマ診断結果と第4章における数値計算結果を受けて、イオンスラストの性能向上について実験的に実証した。イオン加速機構であるスクリーン/アクセルグリッドの設計変更、推進剤導入方法の変更、スクリーングリッドと放電室との絶縁を行った。推進剤の投入方法を、導波管投入から放電室投入に変更することで、推力限界の原因となっていた導波管における電子密度の上昇の抑制を狙った。下流側の放電室投入では推進剤利用効率が下がるので、導波管と放電室間で1:2の比で流量分配すると、比推力3000秒以上で推力は最大化されることが分かった。3つの設計変更により、イオンスラスト $\mu 10$ は従来の推力8mN/比推力3200秒から、推力11mN/比推力3060秒まで向上した。

第6章では、本研究の結論を述べている。本研究にて開発した光ファイバ探針法は、マイクロ波やRF放電プラズマに汎用的に適用でき、極めて一般性と応用性があると主張している。次に、光ファイバを用いた、受光測定・レーザ吸収分光測定・EO素子によるマイクロ波電界強度測定の3手法をマイクロ波放電式イオンスラスト $\mu 10$ に適用し、得られた実験的成果と数値解析から、推力限界が導波管内部における電子密度の上昇によって引き起こされていると結論づけている。さらにマイクロ波イオンスラストを性能向上させるための設計指針について箇条書きにて述べている。

以上を要約すると、本研究はマイクロ波プラズマに最適で汎用性のある探針法を確立するとともに、これを用いてマイクロ波放電式イオンエンジンの性能向上に寄与したものであり、プラズマ工学および宇宙工学への貢献が大きい。よって、本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。