

## 審査の結果の要旨

氏名 森下 貴都

修士（工学）森下 貴都提出の論文は「マイクロ波放電式中和器の性能向上及びプラズマ計測 Performance Enhancements and Plasma Diagnostics of Microwave Discharge Cathode」と題する。本論文が取り扱う装置は、マイクロ波を用いた電子サイクロトロン共鳴にて電子を選択的に加熱し、中性粒子を衝突電離してプラズマを発生させ、電子を抽出しイオンビームを中和する。「はやぶさ」小惑星探査機では、電子電流135 mA、推力8 mNであったが、「はやぶさ2」では180 mA, 10 mNへと高出力化され、実用に供された。一方で「はやぶさ」での中和器劣化に示されるように中和器プラズマ物理の解明が課題である。本研究は、このイオンエンジンの適用範囲の拡大のために、中和器のさらなる高出力化を目標とする。そのための電子電流の増強及び、今後の性能向上の知見となる中和器内外のイオンの速度場および密度分布計測を目的としている。本論文は4章から成り、構成は以下となっている。

第1章では、序論として電気推進の一種であるイオンスラスタの基本原理・構成、これまでの実績と近い将来の課題を研究背景として説明し、本研究の研究目的と方針を明示し、最後に論文構成をまとめている。

第2章では、本中和器について2通りの電流値増加を行った。1つ目に、コイルによりノズル磁場を14 mTに弱めた場合に、37 Vの低電圧作動において電流値が180 mAから260 mAまで増加した。2つ目に、磁場ミラー比を増加する磁力線配位に変更し、また放電室内の磁場強度を増加した。ミラー比は2から8.3に約4倍増加した。これにより、37Vの低電圧作動において電流値は300 mAから560 mAに増加した。

第3章では、従来型及び第2章で性能向上したマイクロ波放電式中和器のプラズマ計測を行った。初めに内部を光学的に観測可能な可視化中和器を開発した。内部可視化中和器は「はやぶさ2」実機相当の中和器と比較して、7%以内の電圧値の誤差で電流電圧特性を模擬している。特に「はやぶさ2」の代表的な作動点である180 mA作動時には、2%以下の誤差であることが確認された。続いて、プルーム上をレーザ誘起蛍光（LIF）法で計測した。中心軸上のLIF計測結果と、先行研究にて静電プローブ法で求めた密度分布形状は、校正係数を用いて決定係数 $R^2=0.96$ で一致し、LIF計測の妥当性が示された。プルーム上のLIF計測は軸方向と半径方向で行われ、2次元の平均速度場が計算された。プルーム上では2つのピークを持つイオン速度分布関数（IVDF）が計測された。中心

軸上ではイオンはアノードから1200 m/s程度の速度で中和器に向かい、徐々に減速していくことがわかり、中心軸外では中和器からアノードに向かう。エミッシブプローブによる空間電位計測から中心軸上で電位の谷が計測され、ノズル近辺では中和器に行くにつれて電位が増加することが判明し、イオンの減速原因と考えられる。続いて、先に開発した内部可視化中和器の内部がLIF計測された。アンテナ直上では3つのピークを持つIVDFが計測され、ミラー磁場とアンテナの裏側では2つのピークが計測された。3つのピークはそれぞれ、中和器内部に-1300 ~ -1200 m/s程度で向かう成分A、速度が100 m/s程度の成分B、アノードに1400 ~ 1600 m/s向かう成分Cに分けられる。それぞれの存在比は、A : B : C = 50~55% : 10~15% : 30~35%である。これらのピーク速度と存在比はマイクロ波電力、キセノン流量、アノード電圧に関してパラメトリックに計測されたが、有意に変わらないことがわかった。そこで各成分の検証として、中和器内部をカーボン黒色塗装してレーザ反射を低減させてLIF計測を行った。その結果、黒色塗装による性能劣化の影響は見られたものの、相対的に成分Cが増加しており、成分Cはレーザ反射による成分Aの鏡像ではないことが示された。続いて、イオンの振動と計測された多峰性IVDFの関係性について調査した。アノード電流振動と、電磁界放射スペクトル計測により、プルームから180 kHzを基本波とする、各々3・4次までの高調波が計測された。このアノード電流振動計測結果をイオン振動モデルに適用したところ、計測された多峰性IVDFに決定係数 $R^2=0.82$ で整合した。最後に、第2章で性能向上した2つの中和器についてLIF計測を行った。ノズル磁場を弱めたモデル、ミラー比と磁場強度を増加したモデル共にプルーム上で2倍の密度増加を確認した。またミラー比と磁場強度を増加したモデルでは内部において40%の密度増加したことが示された。高密度プラズマが性能向上に寄与したと考えられる。

第4章は結論であり、本論文の研究成果をまとめている。

以上要するに、本研究では、小惑星探査機「はやぶさ」および「はやぶさ2」において採用されたマイクロ波放電型イオンスラスト $\mu 10$ の最大推力向上を目的として、中和器電圧を低く維持しつつの電流増加と、従来型および改良版中和器の速度場・密度場計測を行い、新旧中和器の違いを明らかにしており、改良版中和器の宇宙応用性やこれを用いる宇宙ミッションの応用範囲拡大が期待されるだけでなく、プラズマ源の可視化手法及び内部計測には汎用性や波及効果が認められ、航空宇宙工学分野、特に電気推進分野に貢献するところが大きい。

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。