

審査の結果の要旨

氏名 谷 義隆

修士（工学）谷 義隆提出の論文は「マイクロ波放電型イオンスラスタの磁場形状と推進性能に関する実験的研究 Experimental Investigation of the Effect of Magnetic Field Geometry on the Microwave Discharge Ion Thruster Performance」と題し、マイクロ波放電型イオンスラスタの磁場形状変更による推進性能向上の提案と実験的検証を行なった。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イオンを発生させ、これを加速噴射して推力とする。従前技術の直流放電では、電子のみならずイオンまで加熱する結果、電力損失のみならずスパッタリングによる電極損耗をもきたし、イオンエンジンの省電力化・長寿命化・高信頼化の妨げとなっていた。「はやぶさ」小惑星探査機では、イオン電流135 mA・推力8 mNであったが、「はやぶさ2」では推進剤であるキセノンガスの放電室への投入方法を変更することで170 mA・10 mNへと高出力化され、実用に供された。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、さらなる高出力化を目標としている。耐久試験など地上における開発知見や宇宙実績を最大限に有効利用するために、主要諸元（イオン源直径、静電加速グリッド、マイクロ波周波数、マイクロ波電力、導波管形状、作動領域など）を温存して、イオン源のみの改造を研究の範囲とする。本論文は8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、マイクロ波放電型イオンスラスタの原理と性能評価のための各種パラメータとして推力・比推力・推進剤利用効率・イオン生成コスト・電力効率・推進効率・推力電力比を示すとともに、直流放電型イオンスラスタ向けに提唱されている0次元のエネルギー・粒子分配モデルについて紹介している。

第3章では、本研究で使われた実験装置（マイクロ波系、ガス制御系、高圧電源系、真空系）や、イオン源の新型放電室の設計について述べている。磁力線配位とビーム電流密度分布の関係を解析した結果、磁力線がグリッドに接する箇所に最大電流密度を生じることが分かった。そこで、磁力線配位を工夫して、高電流密度領域をイオン源の外周部に移動させて総ビーム電流を増強できる可能性に期待する新設計とした。

第4章では、新型放電室の性能評価に関して推力係数とビームフラットネスパラメータを実験的に取得した。イオン源を試作し多価イオン計測やビーム発散角の計測の結果、従来の2割増しに近い200 mAのビーム電流・約12 mNの推力が比推力を低下させることなく達成できたことが確認された。

第5章では、新型放電室の内部診断として、放電室内壁面上のイオン電流分布をガードリング付きの平板プローブにより計測し、イオン引き出し効率 f_s を決定した。

第6章では、直流放電型で提唱された0次元モデル（2章）をマイクロ波放電型イオンスラスタへ拡張し、放電電力を可変とした際の性能特性からマイクロ波吸収効率を見積もっている。マイクロ波放電式イオン源の物理現象を表す半実験式「修正Brophyモデル」に照らすと、マイクロ波電力が電子加熱に寄与する率 α と、生成されたイオンが静電加速グリッドに供給される率 f_s の改善が出力向上に重要であることが予見される。各種パラメータ計測を実施し、 α と f_s を定量化した結果、 f_s は低下したもののそれを上回るほど α が改善して総ビーム電流増強に寄与したことを明らかにした。

第7章では、実験結果を元に放電室内部の磁場形状に着目して、イオン引き出し効率とマイクロ波吸収効率との関係を考察している。この中で、磁場形状のみからこれらの効率を簡易的に見積もる方法を提唱した。

第8章では、本研究の成果をまとめ、新型放電室の推進性能向上の原因は、マイクロ波のエネルギーが従来よりも効率よく電子に吸収されるようになったことによるプラズマ生成量の増加にあると結論づけた。

以上を要約すると、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タ $\mu 10$ の最大推力向上を目的として、宇宙実証実績を損なわない規模の放電室形状・磁場形状の変更により2割の推力増強を実現し、性能改善要因を明らかにした。これらの成果は、宇宙輸送工学において、個別特定のスラスタの宇宙応用性やそれら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、電子サイクロトロン共鳴放電を利用する大小さまざまなスラスタに共通するプラズマ生成や推進性能向上に関する一つの設計指針を示しており、汎用性や波及効果が認められる。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。