

1W級マイクロ波放電式イオンスラスタのイオン引き出し性能向上に関する実験的研究

Experimental Study on Improvement of Ion Optics Performance of 1W-Class

Microwave Discharge Ion Thruster

学生証番号 47186079 氏名 内藤 裕貴

(指導教員 小泉 宏之 准教授)

Key Words : Ion thruster, Acceleration grid, Ion optics, microwave discharge

1. 序論

近年、100 kg以下の超小型衛星及び、CubeSatの打ち上げ数が増加しており、この傾向は今後も続くことが予測されている[1]。開発コストが低く、開発期間も短くなることから、人材育成をはじめ、新規技術の実証などに活用される例が多い。より高難度なミッションをするため、高比推力であるイオンスラスタを小型化し、超小型衛星へ搭載する動きがある。1 W級イオンスラスタであるMIPS (Miniature Ion Propulsion System)は50-kg級の超小型衛星「ほどよし4号」や「PROCYON」へ搭載され、宇宙での作動実証に成功した[2]。このMIPSをさらに小型化する方法として、推進剤を従来のキセノンから水にした水イオンスラスタが提案されており、地上での作動実証及びスラスタスタンドによる推力実測が行われた[3]。

水イオンスラスタは現状推進剤利用効率が3 %程度と、大きく改善の余地がある。プラズマ生成部の改善として、富田らはプラズマ密度向上を目的に放電室高さ及びマイクロ波周波数を変更して傾向を調査した。一方、イオン加速部においては実験的に形状最適化が図られた例はない。マイクロ波放電式イオンスラスタでは、プラズマ密度が低いため空間電化制限電流までイオン電流密度が到達していない。またプラズマ密度の不均一性が無視できない点で、従来主流であった直流放電式イオンスラスタと異なる。

本研究ではキセノン及び水を推進剤とした場合のグリッドシステム形状が性能に与える影響を実験により調査し、穴径及び厚み分布を考慮した最適形状の提案をする。また、質量分析によるプラズマ組成の同定を行い、それを考慮したアクセルグリッド形状の設計指針を探る。

2. 実験装置及び実験方法

本研究では直径20 mmである1 W級マイクロ波放電式

イオンスラスタを用いた。イオンスラスタの作動には推進剤、マイクロ波そして電力の供給が必要であり、その概要を図1に示す。

本実験ではまずキセノンを推進剤とした場合のグリッド形状を表1の通りに変更した。従来型の形状は厚み0.4 mm、孔径0.4 mmに対し、穴径及び厚みを変更した形状を複数用意した。

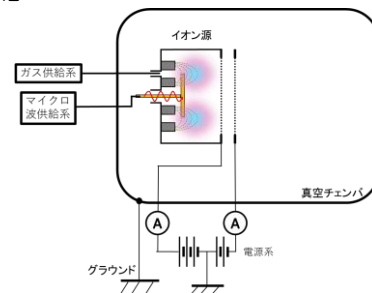


図1：実験系概要図

表 1 グリッド形状

名称	孔径 / mm	厚み / mm
d0.4t0.4	0.4	0.4
d0.3t0.3	0.3	0.3
d0.3t0.15-0.25	0.3	0.15 - 0.25
d0.3t0.15	0.3	0.15
d0.2t0.3	0.2	0.3

3. 実験結果及び考察

図2に、グリッド形状を変更した時の推進剤利用効率の流量依存性を示す。高流量領域ではグリッド形状によらず一意の推進剤利用効率を取ることがわかる。これは、ある電力に対して、中性粒子密度がある値より大きいとき、プラズマ密度が飽和していることを意味する。本実験はマイクロ波投入電力1.5 Wと、低電力作動を行っているため、中性粒子密度に対して電力が低いことで、飽和状態に達していると考えられる。一方で低流量側ではグリッド形状ごとにプラズマ維持可能領域が異なることがわかる。従来型であるd0.4t0.4と

比較して、グリッドのコンダクタンスが小さいものでは、

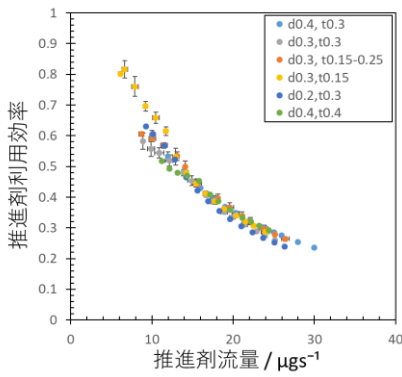


図2：ビーム直撃低減後の推進剤利用効率の流量依存性

より低流量で作動点をとることができ、その結果高推進剤利用効率を得ている。最も作動範囲が広く、推進剤利用効率が高いグリッドはd0.3t0.15であったが、グリッド厚みにおいては他のグリッドより薄く、コンダクタンスの観点だけでは説明ができない。この結果は、アクセルグリッド厚みがプラズマ生成領域に影響を与えていることを示唆している。プラズマ発光の観察より、低流量側で発光領域が広がる様子が確認されている。

図3に、水プラズマにおける質量分析により測定されたイオン流束比を、各イオン種がプラズマを離脱するボーム速度がシステムボーム速度に一致する仮定のもとイオン密度比に換算した結果を示す。比較としてプラズマの分布を無視し、エネルギーのつり合い及びイオンの生成損失のバランスから計算されるイオン密度比を示す。定性的に良い一致を示している。実験では水素の測定データは信頼性が低いが、グローバルモデルにより求められた水素の存在比を仮定することで流量に対する推力補正係数を推定することができる。図4に推力補正係数の流量依存性を示す。主に水素の存在比が寄与している。図4はある一つのグリッド形状における依存性を示しているため、グリッド形状改善の指針として、グリッドコンダクタンスを小さくすることで、中性粒子密度を高める設計にすることが推力係数の向上につながる事がわかる。

4. 結論

本研究では1 W級マイクロ波放電式のイオン引き出し性能向上を目的に、実験的なグリッド形状変更及びプラズマの質量分析を行った。本研究によりえた知見を以下に示す。

- ・グリッドコンダクタンスの低下は、低流量作動領域の拡大につながり、低流量側で推進剤利用効率の向上が可能となる。

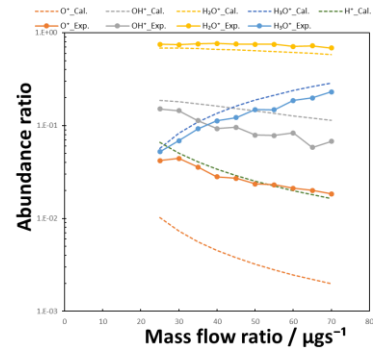


図3:水イオンスラストにおける生成プラズマの質量分析結果とグローバルモデルによる計算値の比較

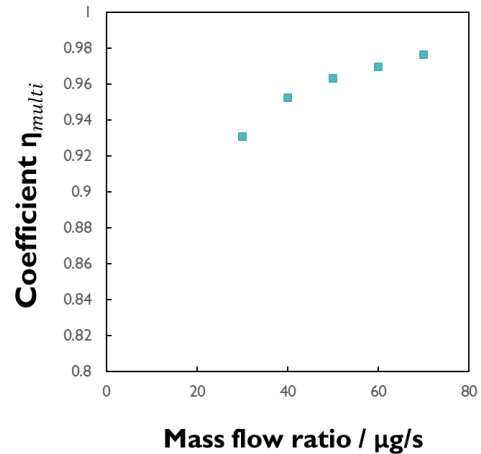


図4: 解離による推力補正係数の流量依存性

- ・水プラズマの質量分析結果はグローバルモデルと良い一致を示した。グローバルモデルにおける水素の存在比を仮定すると、グリッドはコンダクタンスを小さくし、中性粒子密度を上げることが推力補正係数向上の観点では有利に働くことを示唆する。

また、グリッド厚みがプラズマ生成領域と相互作用を及ぼす可能性が示唆され、実験的に80%の推進剤利用効率を達成した。

参考文献

- [1] T. Villela, et al., "Towards the Thousandth CubeSat: A Statistical Overview," International Journal of Aerospace Engineering, Vol.2019, Article ID 5063145.
- [2] Funase, R., Koizumi, H., et al., "50kg-Class Deep Space Exploration Technology Demonstration Micro-pacecraft PROCYON," 28th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, 2014.
- [3] Y. Nakagawa, H. Koizumi, H. Kawahara, and K. Komurasaki, "Performance characterization of a miniature microwave discharge ion thruster operated with water," Acta Astronautica, Vol.157, pp.294-299, 2019.