

200mA 級マイクロ波放電式イオンスラスタの性能評価

Performance Evaluation for 200 mA class Microwave Discharge Ion Thruster

○谷 義隆(東大)・神田 大樹・月崎 竜童・西山 和孝・國中 均 (宇宙航空研究開発機構)

○Yoshitaka Tani(The University of Tokyo)・Daiki Koda・Ryudo Tsukizaki・Kazutaka Nishiyama・Hitoshi Kuninaka (JAXA)

Abstract (概要)

The performance of the microwave discharge ion thruster $\mu 10$ with the redesigned discharge chamber was measured. The redesigned discharge chamber was changed the downstream magnet array from the original one. Using this, the maximum beam current has been achieved over 200mA. To investigate what caused this improvement, we measured the ion flux toward the wall inside the discharge chamber. Coupling the results and the global model of ECR ion thruster (modified Brophy model), it is suggested that the microwave power absorption rate is improved. As a result, by redesigning the magnet array, the power absorption rate has increased by approximately 30% compared with original discharge chamber.

記号の説明

- C_i : イオン生成コスト
- ϵ_p : 標準プラズマイオンエネルギーコスト
- α : マイクロ波吸収効率
- f_s : イオン引き出し効率
- C_0 : 流量に関わる定数
- \dot{m} : 推進剤流量
- η_c : 推進剤利用効率

1. 背景および目的

マイクロ波放電式イオンスラスタ $\mu 10$ は、日本の小惑星探査機「はやぶさ」において主推進機として搭載され、初めて宇宙実証が行われた。その最大の特徴は、従来用いられてきた直流放電型のイオンスラスタと異なり、プラズマの生成に電極を用いない無電極放電方式であるという点にある¹⁾。これによりシステムの簡素化や大気下の取扱性向上などの様々な利点がある。「はやぶさ」に搭載された $\mu 10$ の改良モデルが「はやぶさ 2」の主推進機として搭載され、現在も運用中である。²⁾

この $\mu 10$ を用いた将来ミッションとして、小惑星 Phaethon フライバイを目指す DESTINY+³⁾や、木星トロヤ群探査を目的としたソーラー電力セイル OKEANOS⁴⁾などが考案されている。これらのミッションへの適用には、従来と比べて更に

高効率・大推力化が求められている。

本研究では、 $\mu 10$ の放電室内部の磁場形状を変更することによって、200mA 級のビーム電流を達成した。⁵⁾今回はこの放電室を対象として内部プラズマ計測を行い、性能向上の原因に関して調査を行った。

2. 放電室設計

本研究で行った放電室の設計変更に関して述べる。ビーム電流向上のためには、(1) プラズマ密度を高め、推進剤利用効率を向上させる (2) 推進剤利用効率を維持したまま、現在より高い推進剤流量で動作させる、のどちらかが考えられる。しかしながら、方針 2 に関しては、マイクロ波放電の特性上カットオフによる影響を受けて、ある流量以上では推進剤利用効率が極端に低下してしまう現象が存在し、現状解決できていない。そこで、本研究では方針 1 に基づいた放電室設計を行った。図 1 に従来と新たに設計した放電室の比較を示す。図中赤色の線が ECR 共鳴領域である。この領域を横切る電子が共鳴加熱される。電子は磁力線に沿って運動し、壁面にぶつかった電子は損失すると考えられるので、図中黄色い領域がプラズマ生成領域であると考えられる。本研究では下流の磁化方向を変更することで、プラズマ生成領域を拡大した。従来型の放電室では磁石列の角度は中心軸に対して 45 度を向いているが、新たに設計した放電室では下流側の磁石列を軸方向に向くように変更した。これにより、体積比で約 17% のプラズマ生成領域拡大となる。

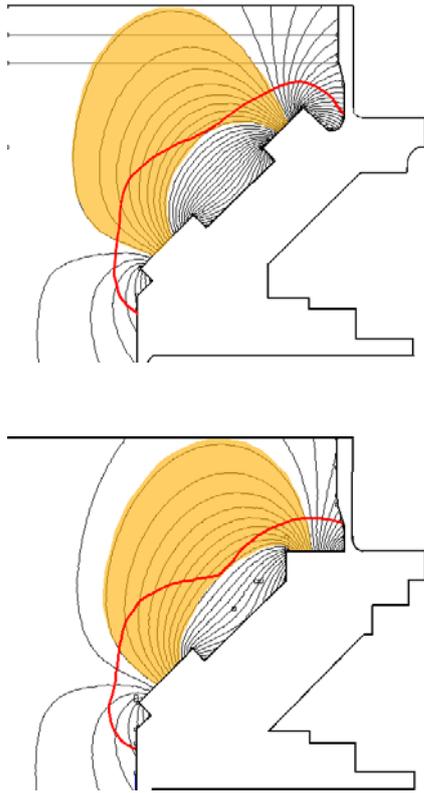


図1 放電室磁場形状の比較. 赤い部分 ECR 共鳴領域, 黄色い領域がプラズマ生成領域: (上) 従来型放電室; (下) 新設計放電室

3. 実験装置

2.1 マイクロ波放電式イオンスラスタ $\mu 10$

図2に本研究で用いたマイクロ波放電式イオンスラスタの概略図を示す。 $\mu 10$ は導波管, 放電室, グリッドから構成されている。マイクロ波は導波管底部に接続されたモノポールアンテナから導入されている。ガスはマスフローコントローラにより制御され, 導波管底部・放電室磁石間のどちらからも導入可能である。本実験では放電室にのみ導入した。電源系はグリッドに接続されており, グランド電位からバイアスされている。動作条件を表1に示す。いずれも「はやぶさ2」における動作条件に則っている。放電室長さがパラメータとなるが, 報告済みであるので割愛する。⁹⁾新型放電室については最適値であるノミナル+5mmの放電室長で実験を行っている。

表1 作動条件

グリッド直径, mm	105
マイクロ波周波数, GHz	4.25
マイクロ波電力, W	34
スクリーングリッド電圧, V	1500
アクセルグリッド電圧, V	-350
ガス流量範囲, sccm	1.0 - 3.0
推進剤ガス種	Xe

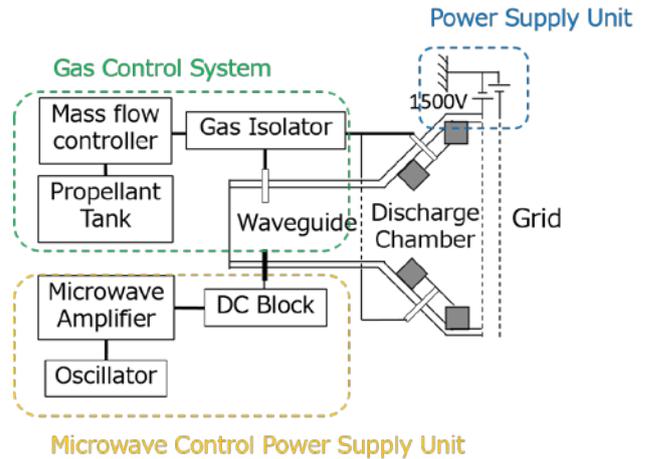


図2 マイクロ波放電式イオンスラスタ $\mu 10$ の概略図

2.2 内部プローブ測定

新型放電室に対して, 内部のプラズマ計測を行う。図3に用いたプローブを, 図4にプローブ設置位置, 図5にプローブ回路をそれぞれ示す。また, 表2にプローブ設置位置と用いたプローブの対応を示す。プローブは(1) 長方形形状のもの(2) 二等辺三角形形状のものを用いた。計測位置は放電室内部の壁面全てを網羅するように設置した。これらを用いて各面へのイオン流束を計測する。スクリーングリッドのリム部分 (Webbing) への流束は直接計測が困難であるため, プローブ2を用いてスクリーングリッド上流面の電流を計測し, そこからスクリーン電流 (排出イオン電流) を差し引くことで算出することとした。プローブは予備実験で計測が十分可能と確認された-60Vにバイアスされている。

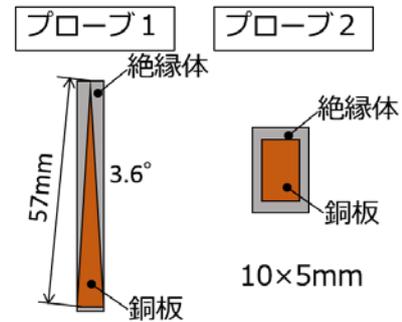


図3 計測用プローブ

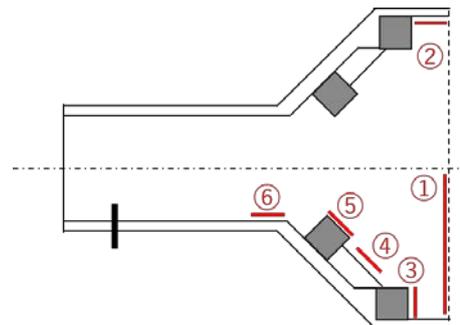


図4 プローブ設置位置

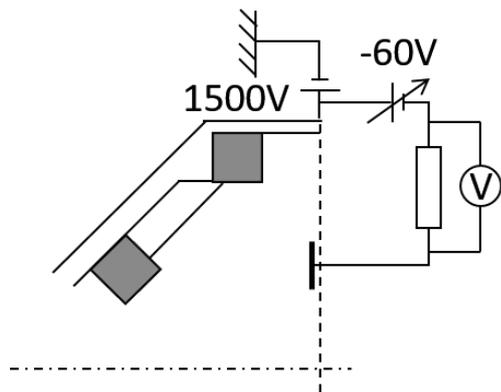


図5 プローブバイアス回路

表2 プローブ設置位置とプローブの対応

番号	名前	説明	プローブ
①	Screen Grid	スクリーング リッド上流面	プローブ1
②	Side Wall	グリッド支持 リング側面	
③	Downstream Magnet	下流磁石表面	
④	Spacer	磁石間スペー サー表面	プローブ2
⑤	Upstream Magnet	上流磁石表面	
⑥	End Wall	導波管接合部	

4. 実験結果

4.1 性能特性

図6に流量-電流特性のグラフを、図7に推進剤利用効率-イオン生成コストのグラフをそれぞれ示す。比較のために、「はやぶさ」および「はやぶさ2」のデータを載せてある。最大性能として2.7sccmで204mAのビーム電流を達成した。最高性能点では、イオン生成コストは167W/A程度となった。

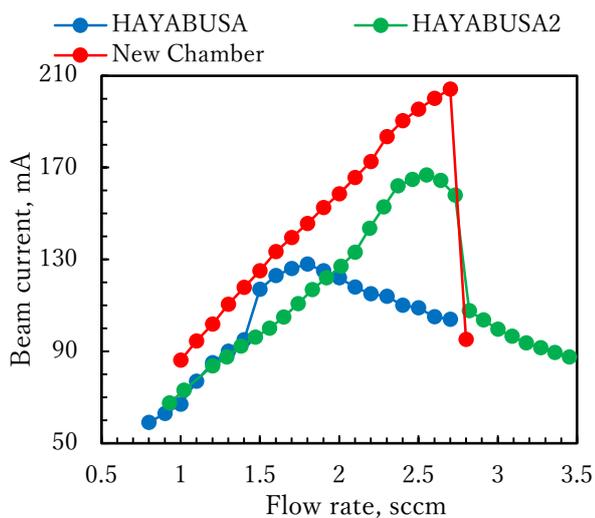


図6 推進剤流量対ビーム電流

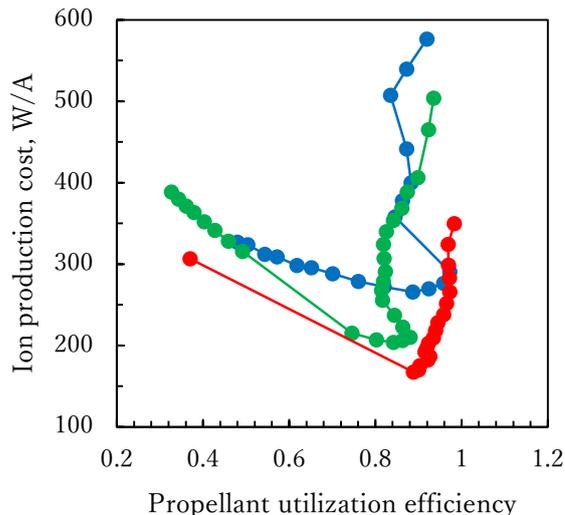


図7 推進剤利用効率対イオン生成コスト

4.2 内部プローブ測定

図8に放電室内部プローブ測定結果を示す。また、この結果を全電流値で規格化したものを図9に示している。図9のうち、Screen Currentの割合がイオン引き出し効率にあたる。低流量では磁石への損失が大きく、イオン引き出し効率は比較的小さい。ピーク性能付近では生成イオンのおよそ40%が引き出されていることがわかる。

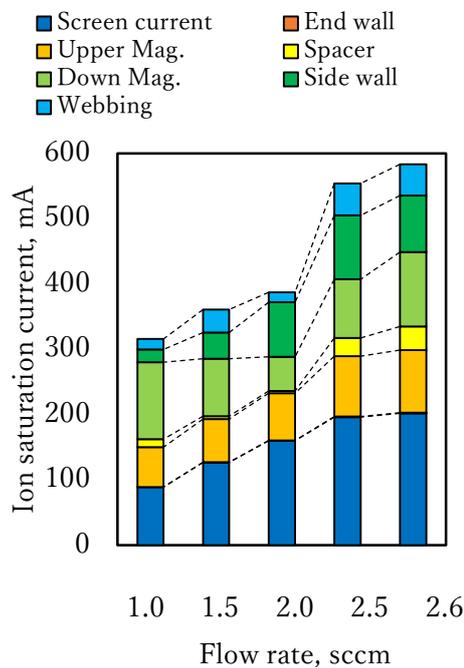


図8 壁面イオン電流分布

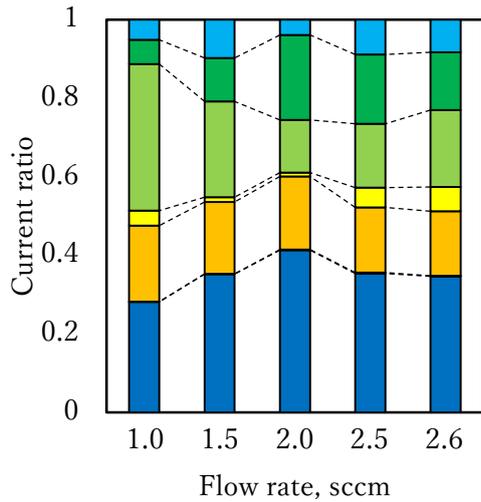


図9 規格化壁面イオン電流分布

5. 考 察

図10に過去に「はやぶさ2」モードで計測された規格化イオン電流分布を示す。⁶⁾スクリーングリッド厚さが今回の実験と異なるため、Webbingの電流割合が多くなっている。しかしながら、どちらもイオン引き出し効率は40%程度で同一であることが読み取れる。マイクロ波放電式イオンスラスタの変形Brophyモデル⁶⁾によると、イオン生成コストと推進剤利用効率の関係は次のように表される。

$$C_i = \frac{\epsilon_p}{\alpha f_s [1 - \exp(-C_0 m (1 - \eta_U))]} \quad (1)$$

ここで、 ϵ_p は放電形態で決まる定数、 C_0 は流量に依存する定数である。今回の結果では、ピーク電流を取る流量がほぼ同一であることから、 C_i は α と f_s によって増減すると考えられる。ところが、図10より引き出し効率はほとんど同じであるため、性能向上は α が向上したことが原因と考えられる。式(1)をピーク流量付近でフィッティングした結果を図11に示す。この結果から、マイクロ波吸収効率を推定すると、新型放電室では51%程度のマイクロ波吸収が行われていると考えられる。

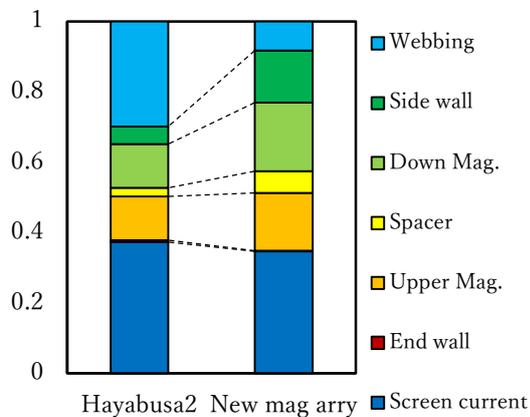


図10 はやぶさ2モデルとの比較

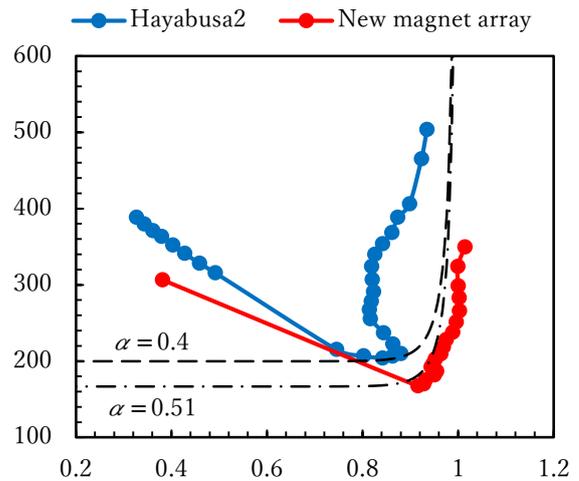


図11 マイクロ波吸収効率の試算

5. 結 論

新型放電室に対して内部イオン電流分布をプローブにより計測した。その結果、イオン引き出し効率は従来モデルと比較して大きく変化していないことが判明した。これよりマイクロ波吸収効率が増加したことにより性能向上がなされたと考えられる。その値を変形Brophyモデルから推定すると、従来モデルでは40%程度の吸収効率であったものが、新型放電では51%程度まで向上したと考えられる。

謝 辞

本研究は日本学術振興会特別研究員奨励費 16J08096 の助成を受けたものである。ここに謝意を示す。

参 考 文 献

- 1) 國中均: 無電極マイクロ波放電式イオンスラスタの研究・開発, 日本航空宇宙学会誌, Vol.46, No.530(1998), pp.174-180.
- 2) 西山和孝, 細田聡史, 月崎竜童, 國中均: 小惑星探査機はやぶさ2イオンエンジンの運用状況, 平成29年度宇宙輸送シンポジウム, STEP-2016-058, 2017
- 3) 西山和孝, 豊田裕之, 川勝康弘, 荒井朋子, 船瀬龍, DESTINY+所内準備チーム: 深宇宙探査技術実証機DESTINY+, 第61回宇宙科学技術連合講演会, 1S15, 2017
- 4) 中条俊大, 森治, 他: ソーラー電力セイルによる木星トロヤ群探査ミッションおよび探査機システムに関する検討, 第61回宇宙科学技術連合講演会, 2G17, 2017
- 5) 谷義隆, 西山和孝, 國中均: 10cm級マイクロ波放電式イオンエンジンの性能向上に関する研究, 第61回宇宙科学技術連合講演会, 2E19, 2017
- 6) 碓井美由紀, 國中均: マイクロ波放電式イオン源における0次元モデルと内部解析, 第51回宇宙科学技術連合講演会, 1E07, 2007