

マイクロ波放電型イオンスラスタの放電室形状と性能の関係

Effect of Discharge Chamber Geometry on the ECR Ion Thruster Performance

○谷 義隆¹・月崎竜童²・山下裕介¹・西山 和孝²・國中 均²

○Yoshitaka Tani¹・Ryudo Tsukizaki²・Yusuke Yamashita¹・Kazutaka Nishiyama²・Hitoshi Kuninaka²

Abstract

The performance of the redesigned discharge chamber of the $\mu 10$ was measured, and 207mA ion beam current has been achieved. By $E \times B$ probe measurement and Faraday probe measurement, the thrust efficiency has not been changed from the original one. However, the ion extraction fraction, f_s , has been decreased. In this paper, we measured the ion fraction ratio in the discharge chamber on three types discharge chamber length. It was shown that the ion extraction fraction was decreased as the discharge chamber length was extended. From this result, we concluded that increase in the ion loss area considering the ion Larmor radius inside the discharge chamber caused the decrease in the ion extraction fraction..

1. 背景および目的

宇宙用電気推進機は、科学推進機に代わる人工衛星・探査機のための推進機として近年ますます研究・開発が進められている。電気推進機の一つであるイオンエンジンは、高い比推力と長寿命性から、主に静止衛星の軌道制御や深宇宙探査機などに用いられている。その実用例として、NASAの探査機 DAWN や、ESAの水星探査機 BepiColombo、ボーイング社の静止衛星バス Boeing-702などが挙げられる。日本でも、現在運用中の小惑星探査機 Hayabusa2 にマイクロ波放電型イオンエンジン $\mu 10$ が搭載されており、小惑星までの往復のための主推進機として用いられている。将来計画では小惑星 Phaethon フライバイを目指す探査機 DESTINY⁺や木星トロヤ群探査のためのソーラー電力セイル探査機 OKEANOS に同型のイオンエンジンの採用が予定されている^{1),2)}。

$\mu 10$ は「はやぶさ」において累計4万時間の宇宙運用実績を有しており、長寿命・高信頼性を有する。また、ホローカソードを用いないため、取扱性やシステムの簡素化などで直流放電式に対する利点が存在する。一方、その推力は直流放電式のスラスタと比較すると十数%低い。前述の将来ミッションへの適用では現在から20%の性能向上、イオンビーム電流値換算で204mA程度の推力が目標とされており大推力化は必須である。

本研究ではこの課題に対して、新たな放電室を設計することでビーム電流向上を達成した。この性能変化に関して各種プラズマ診断を行い、性能変化の原因を調査して、磁場形状と性能の関係性を調査した。

2. 新型放電室

2.1. 新型放電室設計

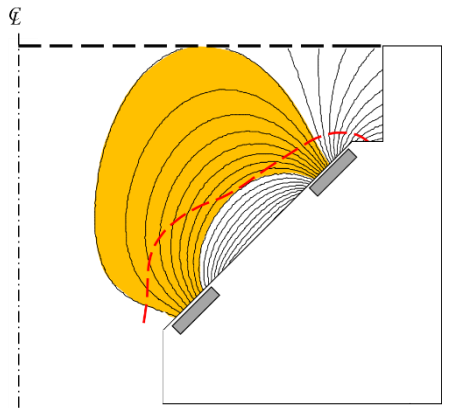
本研究で用いた新型放電室に関して述べる。単位時間あたりに生成するイオン電流は次式で与えられる。

$$I_p = en_n n_e K_{iz} \tilde{V}$$

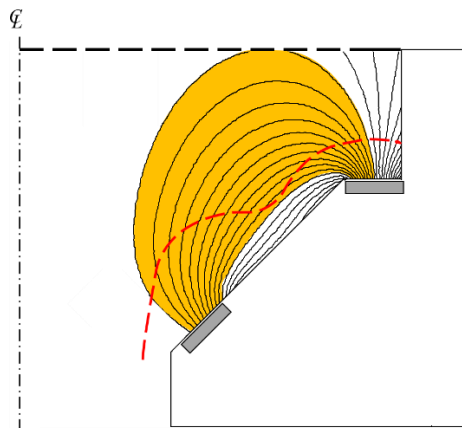
全イオン電流を増加させるためには、プラズマ生成体積 \tilde{V} を増加させることが有益であることがわかる。このため、放電室内部においてプラズマ生成領域の体積を増加させるような磁場配位を検討し、新たな放電室を作成した。Fig.1 に従来型の放電室と新型の放電室の比較を示す。 $\mu 10$ は放電室内部に2つの円環型磁石列を有しており、それにより弓形のミラー磁場を形成している。ラングミュアプローブ結果によると、図中黄色い領域は、他の部分に比べてプラズマ密度が数倍～数十倍高いため³⁾、プラズマが主に生成している領域であると考えられる。そのため、スラスタ下流磁石の向きを変更することで、プラ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。

¹ 東京大学 (The University of Tokyo)

² 宇宙航空研究開発機構(JAXA)



(a) 従来型放電室



(b) 新型放電室

Fig.1 放電室内部の磁場形状

2.2. 新型放電室性能

前章で示した新型放電室形状に対して、性能試験を実施した。詳細に関しては発表済みであるため⁴⁵⁾、参考文献を参照されたい。ここではビーム電流の流量特性、および性能パラメータである推力係数の測定結果に関して述べる。

2.2.1. 流量特性

Fig.2 にマイクロ波放電型イオンスラスタの概略図を、Table 1 に動作パラメータを示す。μ10 は導波管底部と放電室に推進剤供給口を有している。「はやぶさ」相当動作では、導波管 100% のガス導入、「はやぶさ 2」相当動作では導波管と放電室の分配導入となっている。放電室ガス供給割合が増加すると、ビーム電流も増加する。

流量特性結果を、従来型放電室の結果と合わせて Fig.3 に示す。新型放電室では、最大ビーム電流として 207mA のビーム電流を得ることが可能であった。また、放電室性能を推進剤利用効率とイオン生成コストで評価した結果を Fig.4 に示す。推進剤利用効率とイオン生成コストは下記で与えられる。

$$C_i = \frac{P_D}{I_s} \quad (1)$$

$$\eta_u = \frac{I_s}{\dot{m}} \quad (2)$$

P_D は放電に用いられた電力である。マイクロ波放電型では、プラズマの状態により投入されたマイクロ波の一部が反射する。この反射も損失と考慮して、ここでは進行は電力を P_D とした。新型放電室では、推進剤利用効率を大幅に低下させることなく、最高性能点で 165W/A のイオン生成コストを実現している。

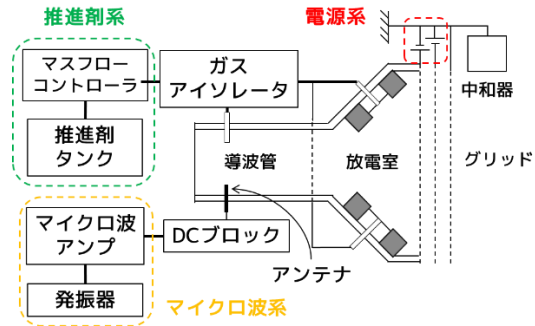


Fig.2 μ10 の概略図

Table 1 μ10 の動作パラメータ

項目	値
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
アクセラグリッド電圧 [V]	-350
推進剤ガス種	Xe
ガス流量 [sccm*]	1.0~3.5

*1.0sccm = 0.098 mg/s (Xe, 1atm, 273 K)

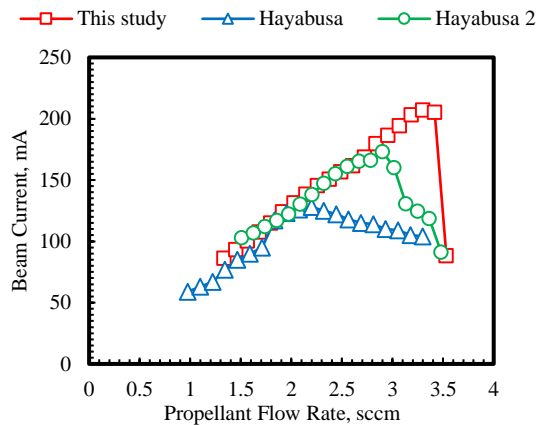


Fig.3 推進剤流量とビーム電流の関係

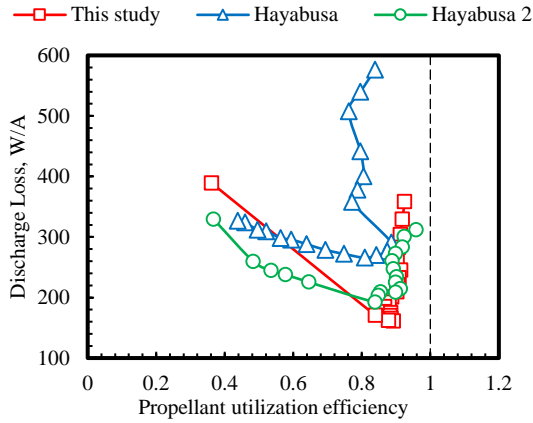


Fig.4 イオン生成コストと推進剤利用効率の関係

2.1.2. 推力係数計測

イオンスラスタは加速電圧とビーム電流値によりその推力が決定される。次式に推力とビーム電流の関係を示す。

$$F = \eta_{multi} \eta_{div} J_b \sqrt{\frac{2m_i V_b}{e}} \quad (3)$$

ここで、 η_{multi} は多価イオン効率、 η_{div} はビーム発散効率である。この積 $\eta = \eta_{multi} \eta_{div}$ を推力係数という。推力とビーム電流値は比例関係にあるが、 η 次第でビーム電流増加がそのまま推力に寄与しない。そのため、これらの値を決定する必要がある。

多価イオン効率は次式で与えられる。

$$\eta_{multi} = \frac{\sum J^{n+}}{\sqrt{n} \sum J^{n+}} \quad (4)$$

多価イオンが増加すると見かけのビーム電流は増加するが、推力係数が低下する。多価イオンはイオンスラスタ下流 1.3m 位置 (真空チャンバーの) に設置された $E \times B$ プロブにより計測した。

一方、発散係数は次式で与えられる。

$$\eta_{div} = \frac{\int_0^\pi j(\theta) \sin\theta \cos\theta d\theta}{\int_0^\pi j(\theta) \sin\theta d\theta} \quad (5)$$

新型放電室では下流磁場形状が変化していることから、発散効率が低下している可能性がある。ビーム発散角は、イオンスラスタ下流 80cm 位置で Faraday カップを円弧状に掃引することで計測した。多価イオン効率、発散効率の計測は、従来型放電室と新型放電室で、いずれも放電室 100% 導入かつ最大電流が得られる流量点で行った。

Table 2 にこれらの計測結果から得られた推進効率、およびビーム発散角の結果を示す。これらの結果から、新型放電室と従来型放電室において推進効率に大きな変化はなく、ビーム電流の増加は推力に寄与する性能向上であることが確認された。

Table 2 推力係数と発散角

項目	従来型	新型
多価イオン効率 η_{multi}	0.934	0.932
発散効率 η_{div}	0.97	0.975
ビーム発散角 θ [deg]	24.3	22.0

2.1.3. 放電室内部診断

推力向上の原因を調査すべく、放電室内部診断を行った。放電室内部を 6 箇所に分類し、各部への流入イオン電流を調査した。実験は従来型放電室の導波管 100% ガス導入と放電室 100% 導入、及び新型放電室の放電室 100% ガス導入において最大ビーム電流が出る点で実施した。

実験結果を Fig.5 に示す。また、全イオン電流で各部へのイオン電流を規格化した結果を Fig.6 に示す。各放電室を比較すると、全イオン電流値は引き出しビーム電流が増加する動作モードに従って増加していることが確認できる。しかしながら、Fig.6 を比較すると、放電室内部から引き出せるイオン電流の割合 f_s が新型放電室では低下していることが読み取れる。

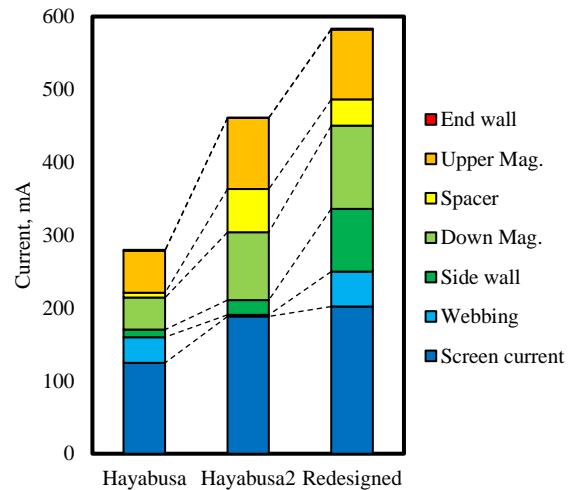


Fig.5 放電室内部イオン電流分布

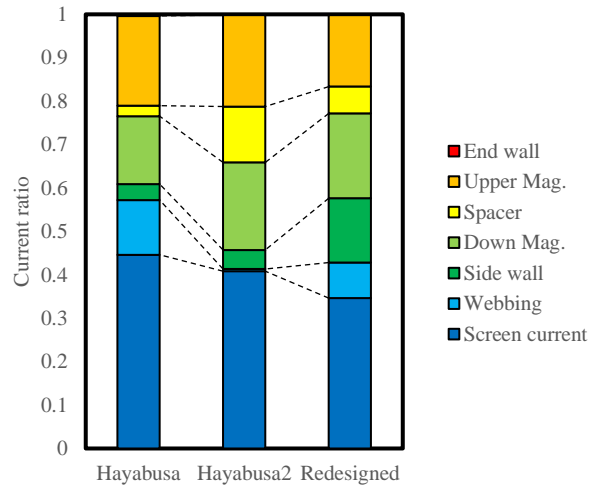


Fig.6 放電室内部イオン電流分布割合

3. 放電室形状依存性

3.1. 実験装置

前章で得られた結果を調査する。手法として、放電室長さを変化させて内部イオン電流分布を計測する。放電室長さを変化させることで、Fig.1 で示したプラズマ生成領域が変化する。このことが引き出し性能にどのような影響があるのかを調べる。

実験は従来型放電室の放電室 100%ガス導入において放電室長さをノミナル位置から±10mm 変化させ、放電室内部のイオン電流分布の分布を計測した。Fig.7 に計測点の概略図を、Fig.8 に用いたプローブの概略図、Table 4 に計測位置とプローブの対応を示す。プローブはガードリングのついた銅製の平面プローブを用いて、イオンスラスタ内壁表面に流入するイオン飽和電流を計測した。グリッドの穴の開いていないリム部分に関しては、直接計測ができないため、Fig.8 に示した Type B プローブでグリッド上流面に流入する総イオン電流を計測した後、そこからビーム電流値を差し引くことで間接的に求めた。

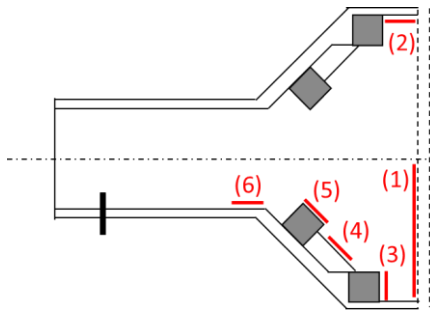


Fig.7 イオン電流計測位置

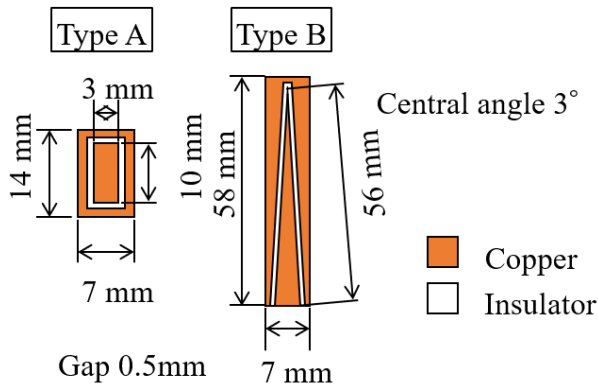


Fig.8 計測用プローブ

3.2. 実験結果

Fig.9 に放電室高さを変化させた際の流量特性を示す。放電室高さはイオンスラスタの最大ビーム電流に大きく影響を与えていることがこの結果からわかる。最も大きなイオンビーム電流を得られたのはノミナル高さの放電室においてであった。

Fig.10 と Fig.11 に実験結果を示す。総イオン電流は放電室長

さの変化に従って、増加していることが読み取れる。これは放電室内部のプラズマ生成領域の増加のためと考えられる。しかしながら、放電室高さが増加するに従い、イオン引き出し割合 f_s は -10mm では 0.44、±0mm では 0.42、+10mm では 0.37 となり、低下していることが読み取れた。

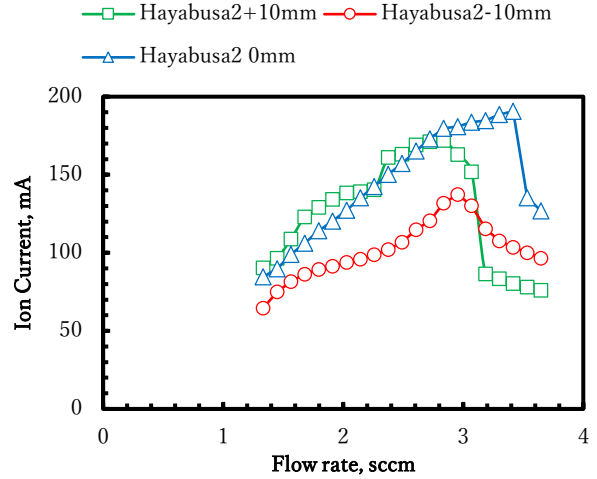


Fig.9 放電室長さごとの流量特性

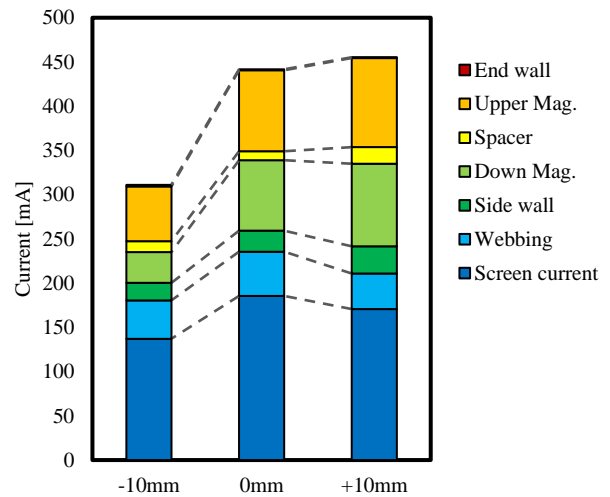


Fig.10 放電室長さごとの放電室内部イオン電流分布

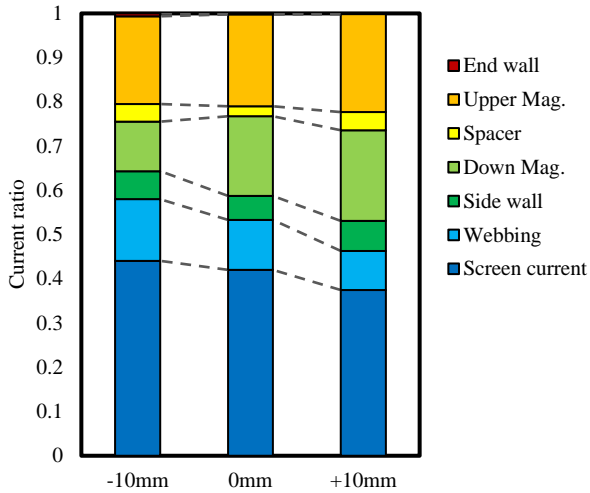


Fig.11 放電室長さごとの放電室内部イオン電流分布割合

3.3. 考察

放電室長さによりイオン引き出し割合が低下していることに関して考察する。μ10では、放電室内部のイオンラーマー半径がミリメートルオーダーとなるため、イオンはほとんどラーマー半径のオーダーで拡散していると考えられる。このため、イオンは強磁場側には拡散できず、弱磁場壁面へと多く損失するものと考えられる。

一方で、放電室内部はイオンの旋回中心から見るとラーマー半径分小さくなる。この影響を Fig.12 に示す。斜線を施した部分にイオンの旋回中心が到達すると、ラーマー旋回中に壁面へと損失する。この効果を考慮し、イオン到達領域をプラズマ生成領域より弱磁場側のスクリーングリッド表面・側壁・磁石表面と考え、それぞれの領域へのイオンフラックスが同程度となるような有効面積（ラーマー半径を考慮した損失領域のぬれ面積）を $A_{sc,eff}$, $A_{wall,eff}$, $A_{mag,eff}$ として、イオン引き出し割合 f_s を次式のように見積もってみる。

$$f_s = \frac{A_{sc,eff}}{A_{sc,eff} + A_{wall,eff} + A_{mag,eff}} \phi_{tr} \quad (6)$$

ただし、 ϕ_{tr} はグリッドのイオン透過率である。この見積もり結果と各放電室長さで得られた引き出し割合の関係を Fig.13 に示す。 ϕ_{tr} は 0.8 で計算している。放電室長さが増加するに従って、スクリーングリッド有効面積が増加するものの、その他の領域の損失面積も増加するために、引き出し効率 f_s は長さの増加とともに低下する。また、新型放電室では磁場形状の変更に伴い壁面損失有効面積も増加し、 f_s が低下していると考えられる。

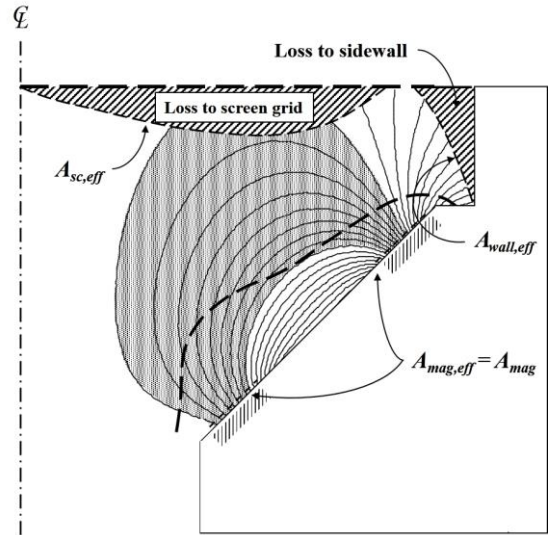


Fig.12 ラーマー半径を考慮したイオン損失領域

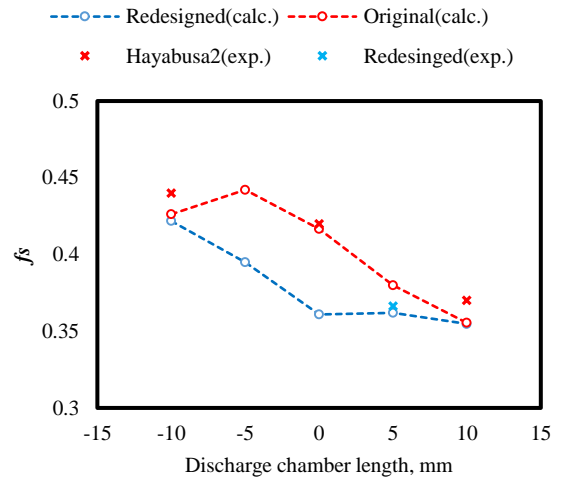


Fig.13 f_s の見積もり

4. 結 論

放電室長さを変更し内部イオン電流分布を計測することで放電室の形状に応じてイオン引き出し割合がどのように変化するかを調査した。放電室内部ではイオンはラーマー半径のオーダーで拡散していると考えられ、放電室内部はラーマー半径分だけ狭くなっていると考えられる。この領域の表面積を考慮し、イオン引き出し割合を、見積もってみると、放電室長さの変化とイオン引き出し割合の低下に対して傾向の一致を見た。新旧放電室の変更に伴うイオン引き出し割合の低下は放電室内部のイオンラーマー半径を考慮した損失面積の増加によるものであることが示唆される。

5. 謝 辞

本研究は日本学術振興会特別研究員奨励費 16J0896 の助成を受けて行われたものである。ここに謝意を示す。

また、本研究を行うにあたり、宇宙航空研究開発機構の先端工作技術グループの支援を得た。当グループの支援に深く感謝する。

参考文献

- 1) Kazutaka Nishiyama, Hiroyuki Toyota, Yasuhiro Kawakatsu, Tomoko Arai, "DESTINY⁺: Technology Demonstration and Exploration of Asteroid 3200 Phaethon," *Proceedings of 68th International Astronautical Congress, IAC-17.A3.4B.7*, 2017.
- 2) Osamu Mori, Takanao Saiki, et al, "Jovian Trojan Asteroid Exploration by Solar Power Sail-craft," *Trans. JSASS Aerospace Tech*, Vol.14, No. ists30, pp. Pk_1-Pk_7, 2016.
- 3) Coral, Giulio, et al. "Microwave power absorption to high energy electrons in the ECR ion thruster." *Plasma Sources Science and Technology* 27.9 (2018): 095015.
- 4) Tani, Y., et al. "Performance improvement of the μ 10 microwave discharge ion thruster by expansion of the plasma production volume." *Acta Astronautica* (2018).
- 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" 第 62 回宇宙科学技術連合講演会予稿集, 3E01, 2018