

マイクロ波放電式イオンエンジン $\mu 10$ の性能向上に向けた実験的研究

Experimental Study for Enhancement Thrust Force of the ECR Ion Thruster $\mu 10$

○西山一平 (東大・院), 月崎竜童, 細田聡, 西山和孝, 國中均 (JAXA)

概要

小惑星探査機「はやぶさ」に搭載されたマイクロ波放電式イオンスラスタ $\mu 10$ の推力増強に向けて, 基本設計をなるべく変更せずスラスタヘッドの最適化を図った. 放電室内の加熱電子の閉じ込めと生成したイオンのグリッドへの輸送を効率化するために磁石間スペーサの高さ変更, 磁石間スペーサ上に正電極の設置, スラスタへの給電方法の変更という3つの手法を行った. 磁石間スペーサの高さ変更実験は, グリッドまで輸送されず壁に衝突して損失してしまうイオンの生成を抑制することを目的とし, 磁石間スペーサの高さをノミナル値7mmに加え, 4, 10, 13mmのもので試した. 結果はノミナル値の7mmが最適であることが分かった. 磁石間スペーサ上への正電極の設置は, 付近で生成されたイオンの衝突損失を抑制し, さらに電子を ECR 領域に引き寄せて電子加熱を効率化することを目的とした. 結果として別電源を用いることで3%程度推力が増強した. スラスタへの給電方法の変更実験では, これまでスクリーングリッド・放電室・導波管と一律等電位に給電していた状況から, 放電室内に電位勾配をつけイオンをグリッドへ輸送しやすい環境を作ることを目的とした. スクリーングリッドをフロートさせることで推力が5%増加し, 放電室に別電源で追加給電をすることで推力が5%増加した.

1. 背景および目的

小惑星探査機「はやぶさ」に搭載されたマイクロ波放電式イオンエンジン $\mu 10$ は, そのミッションを通じて4機累計約40000時間の作動時間を達成し, 高信頼性を実証した. 1号機から2号機の間様々な改良が成され, 主に寿命の向上と推力の2割増強が達成された. この性能改善によりはやぶさ2は1号機よりも衛星バスを90kg増やすことが出来, 搭載できる機器の幅が広がった.

表1に $\mu 10$ と同じ口径のイオンエンジン XIP-13, RIT-10 の諸言を示す^{1,3)}. 2つのエンジンと比較すると $\mu 10$ は推力と推力電力比が3割程度低い. 市場投入において, 競合製品は非常に重要となるが, 消費電力・大きさ当たりの推力性能という実際の運用性に関してはまだ $\mu 10$ の優位性は低いといえる.

そこで本研究では更なる推力増強を目的として, はやぶさで獲得した宇宙実績を活かすため, 導波管や放電室の基本設計を変更せず, 性能向上を測った.

イオン生成の方法について XIPS-13は直流放電式, RIT-10は高周波放電式である. この2種類の生成方式と比較して, $\mu 10$ のマイクロ波放電式は, 放電室内の電子の閉じ込めとイオンのグリッドへの輸送機構が十分実装されていない. したがって, $\mu 10$ の放電室を最適化し, ビーム電流を増加させることを目的とした.

表1 イオンエンジン性能比較

エンジン	$\mu 10$	XIPS-13	RIT-10
タイプ	ECR	DC	RF
口径(cm)	10	10	10
推力(mN)	10	18	15
比推力(s)	3200	3400	3300
推力電力比 (mN/kW)	24	34	33

2. 実験装置

2.1. マイクロ波放電式イオンエンジン

イオンエンジンは放電により推進剤ガスを電離, イオン化し, これを高電圧が印加されたグリッド状電極を用いて加速噴射して推力を発生する静電加速型の電気推進ロケットである. イオンエンジンは, 他の電気推進ロケットよりも大きい排気速度(数十~数百 km/s)が実現できるため, その比推力は3,000秒~10,000秒と極めて高い. 図1にイオンエンジンの概念図を示す. ここに示されるようにイオンエンジンは主にイオン源(イオン生成部), 加速グリッド(静電加速部), 中和器(中和部)から構成されている.

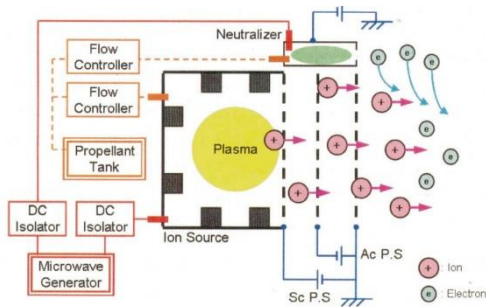


図 1 イオンエンジン概念図

2.2. イオン生成

マイクロ波放電式イオン源では磁場中の電子サイクロトロン共鳴 (ECR) を利用してプラズマ生成を行っている。磁場中の電子は、ローレンツ力を受け、磁力線に巻きついて回転運動をする。その回転周波数に一致した周波数のマイクロ波を照射することで電子を共鳴的に加速し、推進剤と衝突させることでプラズマを生成する。磁場は永久磁石によって発生させる。加速過程にある電子は、対となる永久磁石間に形成される弓形磁束管内に捕捉されて、ミラー磁場閉じ込めによって往復運動を繰り返す。往復のたびに ECR 領域を複数回通過することにより加速が進む。

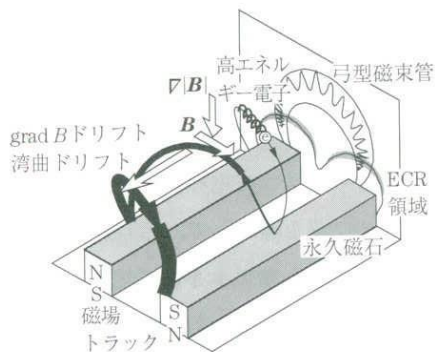


図 2 ECR 電子加速機構

3. 実験方法

3.1. 磁石間スペーサの高さ変更

図 3 に実際のエンジン内部での弓形磁束管の様子を示す。磁場トラックの間には磁石を固定するためのスペーサが設けられている。磁石の高さ 10 mm に対して現在のスペーサの高さは 7 mm であり、弓形磁束管の内部は空間になっている。この空間でのイオンのラーマ半径は数 cm 程度であるため、生成されたイオンはグリッドに向かわず、スペーサに衝突して損失してしまっており、イオン生成効率を下げていると仮説を立てた。そこでスペーサの高さを高くす

ることによりこの空間を埋め、損失可能性の高いイオンの生成を抑制することでイオン生成効率が上がるのではないかと考えた。スペーサ高さは、4, 7, 10, 13 mm の 4 種類について行った。

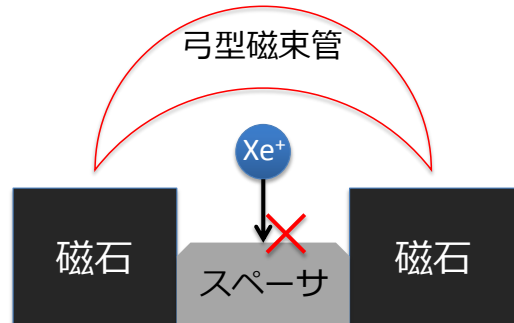


図 3 磁石付近の様子

3.2. 磁石間に電極の設置

生成されたイオンが磁石間のスペーサに衝突して損失してしまうのを防ぎ、さらに電子を ECR 領域付近に集めるため、磁石間のスペーサ上に正電極を設置した。電極への給電方法は、電極のみに給電し残りのスラスタ部分はフロートにする場合 (図 4) と、スラスタ全体には従来通り給電し別電源を用いて電極のみに追加給電するという場合 (図 5) について行った。

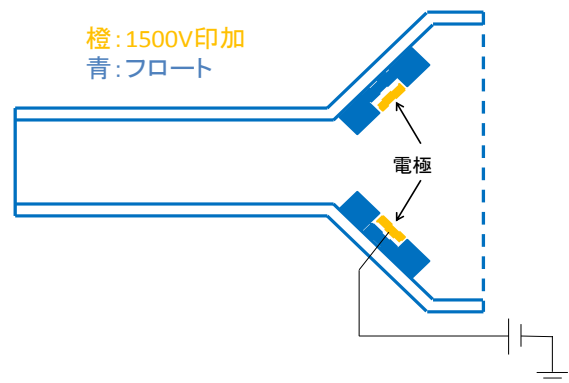


図 4 電極のみに給電

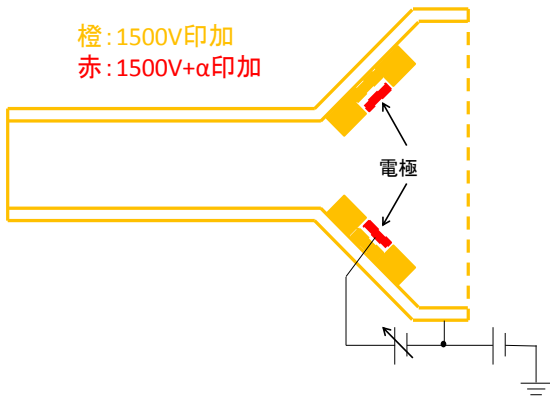


図5 別電源で電極に追加給電

3.3. スラスタ給電方法変更

これまでスクリーングリッド・放電室・導波管と等電位に給電していた状況から、それぞれを絶縁し部分的に給電できるようにした。無数に考えられるパターンの中から、ビーム電流の増加が期待される2パターンについて行った、導波管と放電室に給電しスクリーングリッドをフロートさせる場合(図6)と、導波管とスクリーングリッドに従来通り給電し、別電源を用いて放電室を追加給電する場合(図7)である。

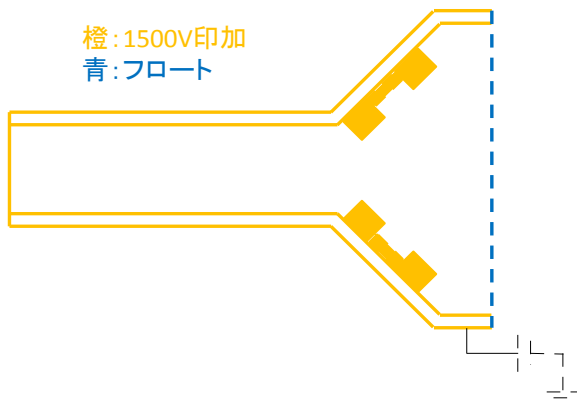


図6 スクリーングリッドをフロート

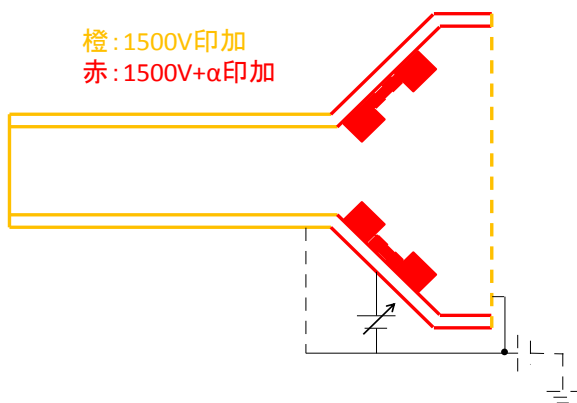


図7 別電源で放電室を追加給電

4. 実験結果と考察

4.1. 磁石間スペーサの変更

4.1.1. 結果

図8にスペーサの高さを高くした場合の結果を図9には低くした場合の結果を示す。推進剤は、放電室から導入している。グラフより、スペーサの高さを変化させるとビーム電流は低下してしまうということがわかる。

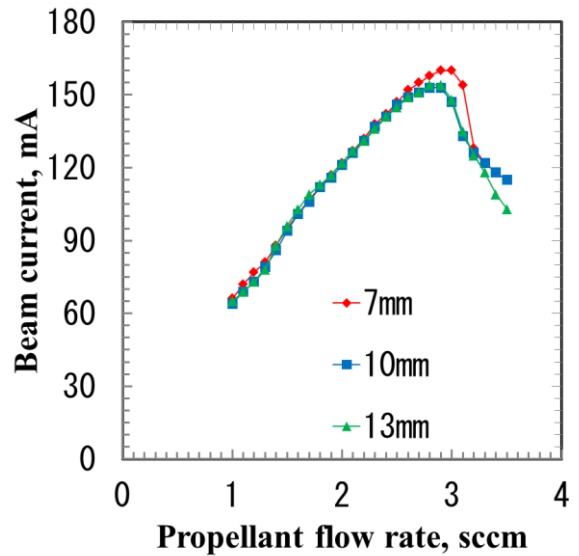


図8 スペーサの高さ変更(高くした場合)

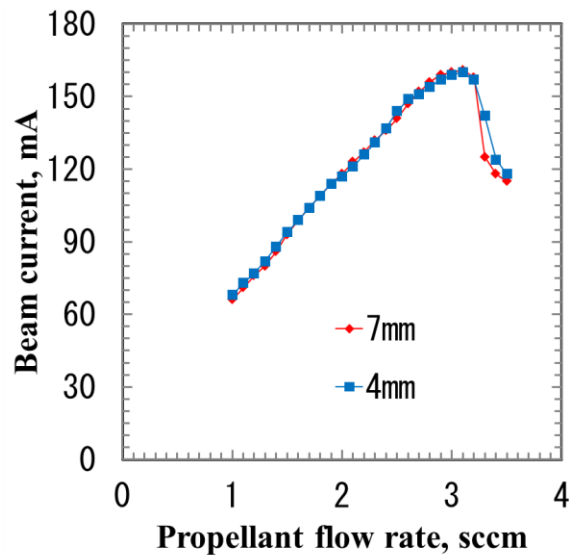


図9 スペーサの高さ変更(低くした場合)

4.1.2. 考察

スペーサの高さを高くするとビーム電流値が低下してしまった原因として、損失可能性の高いイオン

の生成を抑えることでの好影響よりも、空間が埋まったことでの電子の衝突損失が多くなり全体のイオン生成量の減少の影響が大きくなってしまったためと考えられる。逆に高さを低くしてもビーム電流値が低下してしまった原因は、損失可能性の高いイオンを多く生成してしまったためだと考えられる。以上のことから、現状の7mmの高さが最適であることがわかった。

4.2. 磁石間に電極を設置

4.2.1. 結果

図10に電極にのみ給電した場合の結果を示す。ノミナル値の180 mAに比べてビーム電流値は3分の1程度となっている。また放電室のフロート電圧が十分に上がっていないことがわかる。

図11に別電源で電極を追加給電した場合の結果を示す。対照実験として、スクリーングリッド、放電室、電極のすべてを1500Vからさらに電圧を上昇させた場合と比較した。推進剤流量はビーム電流が一番大きくなる3.2 sccm (1 sccm = 0.0983 mg/s)に固定した。

図11より、電極のみを追加給電した場合の方が、スラスタ全体を同様に加圧するよりもビーム電流値が大きくなった。

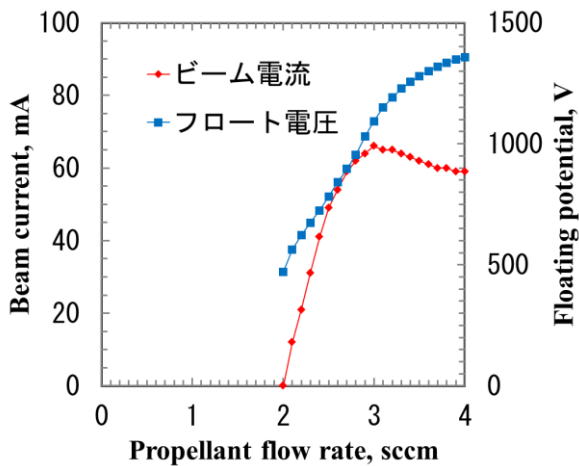


図10 電極のみ給電

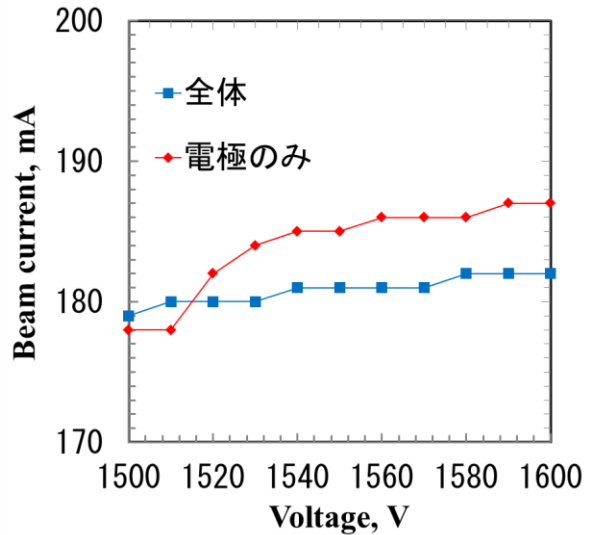


図11 別電源で電極に給電

4.2.2. 考察

電極にのみ給電した際にノミナル値の半分しかビーム電流がでなかった原因は以下のように考えられる。通常の作動では、イオンとして外に放出する電荷と同じ電荷量の電子をスクリーングリッドとエンジン全体で収集している、しかしこの場合は磁場に囲まれて電子が到達しにくいスペーサ上に設置された面積の小さい電極みでの収集となるため、十分な電子収集が出来ず、ビーム電流が低下してしまったのである。

別電源で電極を追加給電した場合は、スラスタ全体で電子を収集するので安定した作動ができた。なおかつ磁石間に電位の高い場所ができ、電子がこの付近に引き寄せられることで加熱が効率化し、イオンのスペーサ衝突による損失が防がれてビーム電流が上昇したと考えられる。

4.3. スラスタの給電方法変更

4.3.1. 結果

図12にスクリーングリッドをフロートさせた際の結果を示す。ビーム電流の最大値が増加しているのがわかる。

図13に別電源で放電室に追加給電した際の結果を示す。電極設置の実験と同様に対照実験としてスラスタすべてを1500Vからさらに電圧を上昇させた場合と比較した。推進剤流量はビーム電流が一番大きくなる3.2 sccm (1 sccm = 0.0983 mg/s)に固定した。+15Vまでは放電室に追加給電するとビーム電流は増加しているがそれ以上になると急激にドロップしている。

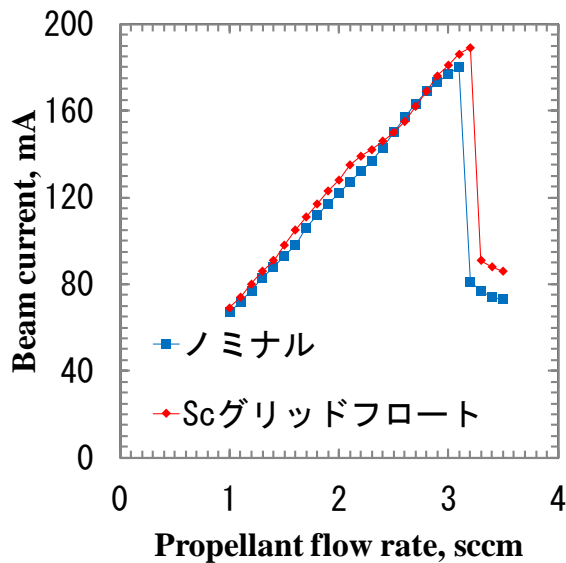


図 12 スクリーニンググリッドをフロート

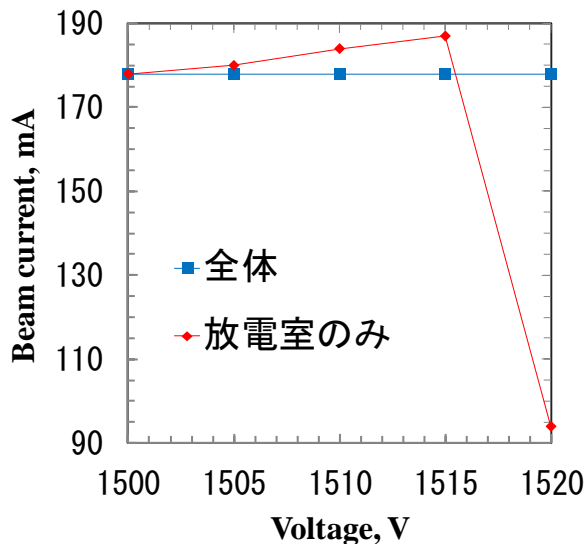


図 13 別電源で放電室に追加給電

4.3.2. 考察

スクリーングリッドをフロートにしたことで電位が 1440V までさがり、放電室内に電位勾配が生まれたことで電子が磁石側へ行きやすくなりイオンはグリッド側へ行きやすくなり、結果的にビーム電流増加につながったと考えられる。この電位勾配でビーム電流が増加したという原理は、放電室に追加給電することでその電位をスラストより上げた実験結果にもあてはめることができる。

5. まとめ

5.1. 結論

放電室内の電子閉じ込めとグリッドへのイオン輸送に注目した最適化を図ることで、ビーム電流を増加できることがわかった。

5.2. 今後の課題

- 追加電源を用いずにできる手法の模索
- 電子閉じ込めの定量的な計測手法の確立

参考文献

- 1) Goebel, D. M., and Katz, I., "Fundamentals of Electric Propulsion," WILEY, pp. 429 – 439.
- 2) Bassner, H., Berg, H.-P., and Kukies, R., "Recent Results on Qualification of the RITA Components for the ARTEMIS Satellite," 28th AIAA/ SAE/ ASME/ ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA-1992-3207, USA, 1992.
- 3) H. Gray, P. Smith, and D. G. Fern, "Design and development of the UK-10 Ion Propulsion System," 32nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, AIAA-96-3084, USA, 1996.