

マイクロ波放電式イオンエンジンの性能向上に向けた実験的研究

Experimental Study for Improving the Performance of Microwave Ion Thruster

○西山一平（東大・院），月崎竜童，西山和孝，小泉宏之，國中均（JAXA）

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。この実績を受け、2014年打ち上げ予定である、はやぶさの後継機「はやぶさ2」への主推進器としての搭載が決まっている。今後、NEC および Aerojet-General 社の下、国際市場への投入が進められている。[1]

表1に $\mu 10$ と同じ口径のイオンエンジン T-5, RIT-10 と NASA の最新のイオンエンジン NEXT の性能を示す。国際市場への投入を考えると他のエンジンとの差別化をはからねばならないが、 $\mu 10$ は性能が劣っていることが見て取れる。はやぶさミッションでの実績はあるものの、性能自体を他のエンジンと少なくとも同等な水準にしなければこれから広く普及させていくことは難しいといえる。

はやぶさの打ち上げ後、推進剤投入方法の工夫と薄型スクリーングリッド・小口径アクセルグリッドの使用によって推力が2割増強された。[1] またエンジン内部のプラズマ状態の計測により $\mu 10$ の推力が頭打ちとなってしまうメカニズムの解明が行われた。これを踏まえ、本研究では更なる推力増強を目的として、マイクロ波放電式イオンエンジン $\mu 10$ の内部状況を変化させたときのエンジン性能に与える影響について実験を行った。

表1 イオンエンジン性能比較

エンジン	$\mu 10$	T-5	RIT-10	NEXT
タイプ	ECR	DC	RF	DC

口径(cm)	10	10	10	36
寿命(hour)	20,000	-	19,000	48,000
推力(mN)	10	18	15	236
推力電力比 (mN/kW)	30	38	35	34

2. 実験装置

2.1 マイクロ波放電式イオンスラスタ

イオンスラスタ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。イオンスラスタは、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。その反面、空間電荷制限により、抽出可能なイオンビーム電流が制限されるので、その推力密度は比較的小さい。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スラスタは主にイオン源(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。

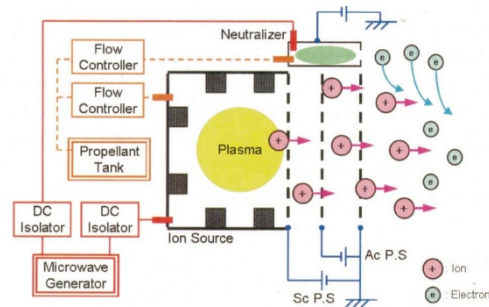


図1 マイクロ波放電式イオンスラスタ

2.2 イオン生成

マイクロ波を用いたプラズマ生成の原理を説明

する。[2]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。磁場中を電子は、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。

次に電子加速の機構を説明する。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。

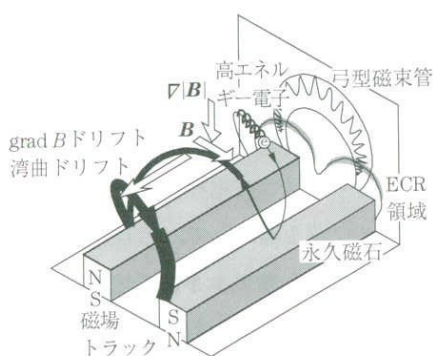


図2 ECR電子加速機構

3. 実験方法

3.1 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10mmに対して現在のスペーサの高さは7mmであり、弓形磁束管の内部は空間になっている。この空間で生成されたイオンはグリッドに行かずに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で弓形磁束管の内部空間を埋め、損失してしまうイオンの量を減らすことでイオン生成効率が上昇し性能向上につながると考えられる。本研究ではこのスペーサの高さを変化させることで性能への影響を調べる。

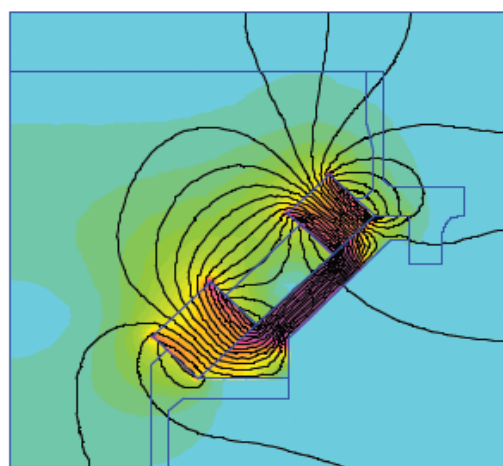


図3 イオンエンジンの磁力線の様子

3.2 石英ガラス板の挿入

はやぶさ搭載時は、推進剤は導波管からのみ導入していたが、放電質からも導入することで推力が増強した。導波管から推進剤を導入すると導波管内にプラズマが出来てしまい、そのプラズマがマイクロ波の伝送を阻害していることが原因であることが分かっている。したがって導波管出口に石英ガラス板を設置し、電子の導波管への流入を防ぐことを試みた。これによりマイクロ波が阻害されることなく ECR 領域まで伝送され効率よくイオン生成が行われると考えられる。

ガラス板を直立させ、位置の移動を行うためにガラス棒の先端に板を取り付けた。

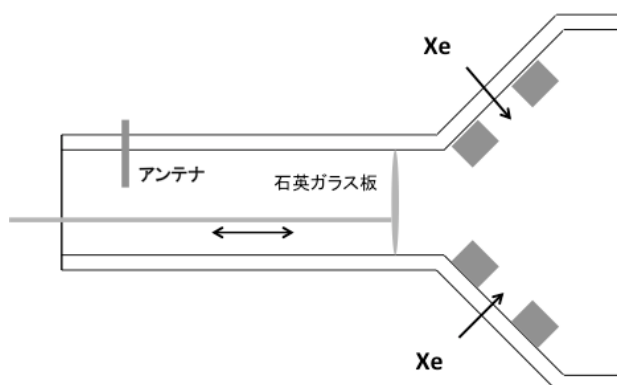


図4 導波管内概略図

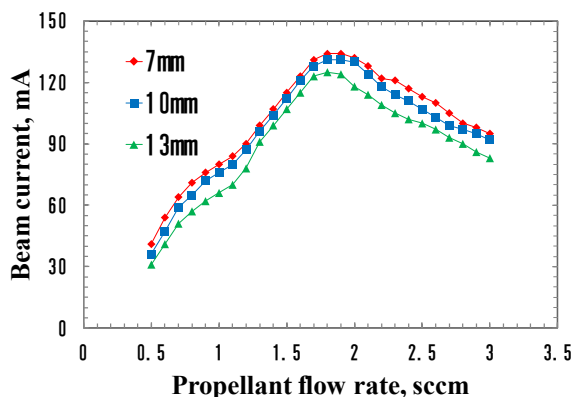
4. 結果と考察

4.1 スペーサの高さ変更

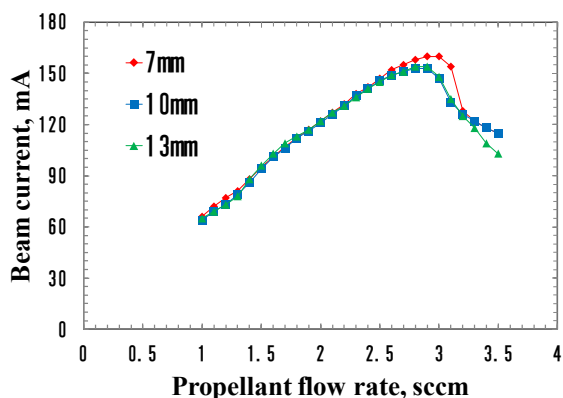
図5, 6に実験結果を示す. スペーサのももとの高さは7mmであり, これを10mm, 13mmと段階的に変化させた. 推進剤導入方法は, 導波管からすべて導入する場合と, 放電室からすべて導入する場合について行った. またマイクロ波投入電力は, 実際の運用で用いる34Wで固定した.

図5, 6から, すべての場合において変化の程度の違いはあるものの, 高くするほどに性能は低下していることがわかる.

そこで次にスペーサの高さを4mmに低くして実験を行った結果が図6である. 推進剤導入方法は同様に2つの場合について示す. 性能に変化はほとんど見られないか, 微小に低下するという結果であった.

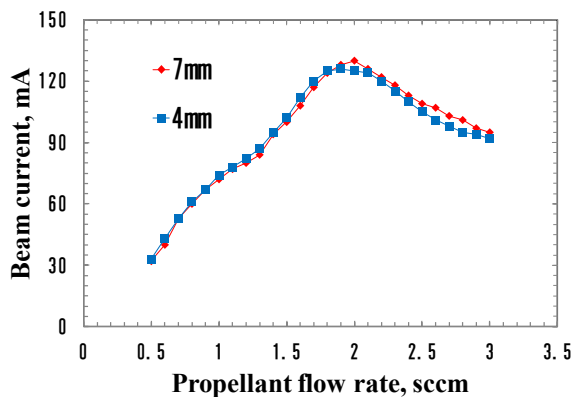


a) 導波管導入

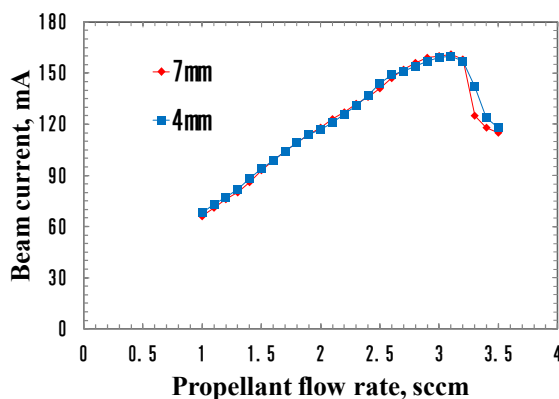


b) 放電室導入

図5 スペーサの高さ変更 (高くした場合)



a) 導波管導入



b) 放電室導入

図6 スペーサの高さ変更 (低くした場合)

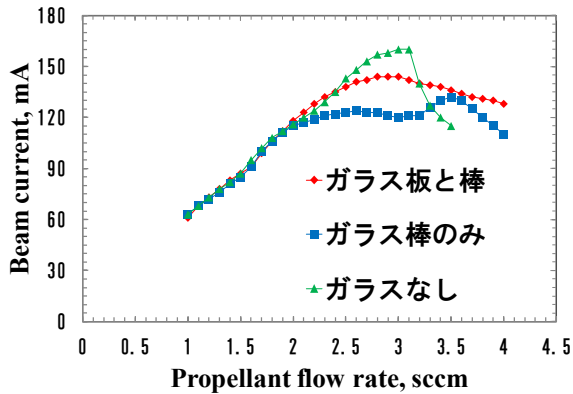
3.1 石英ガラス板の挿入

図7は導波管出口までガラス棒を入れた場合とガラス板を入れた場合と何も入れない場合の比較である. つまりガラス棒の状況は同じで先端に板がついているかないかの違いである. 性能はガラス板があるほうが良く, 反射電力も小さいので導波管内へのプラズマ流入がおさえられているのではないかと考えられる. 何も入れない場合と比べると, 交流量領域での急激な性能低下が起こらなくなっている. しかし, ガラス棒の悪影響が大きく見られ, 結果として何もない場合よりもビーム電流のピーク値は低くなっている.

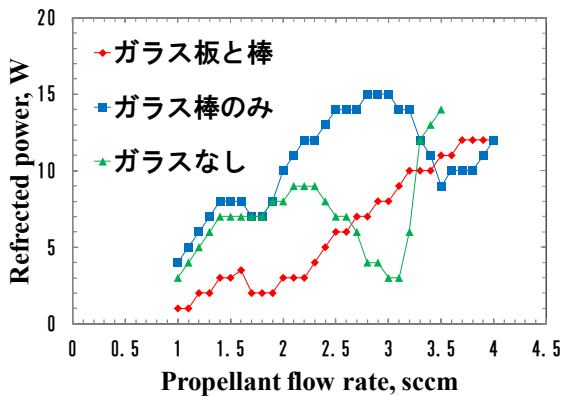
図8は導波管出口から50mm後方の位置に同様に設置した場合である. 先行研究ではこのあたりにプラズマが存在しているとされている. [3]結果は板がついている場合に1番性能が低くなっている. プラズマの位置にガラスという異物が存在することで悪影響を及ぼしてしまったと考

えられる。

図9は導波管出口から100mm後方の位置に同様に設置した場合である。性能や反射電力にほとんど違いは見られなかったが、板がある方がピーク値をとる流量が少し低流量側になっている。ガラス板の有無はプラズマにほとんど影響していないと思われる。

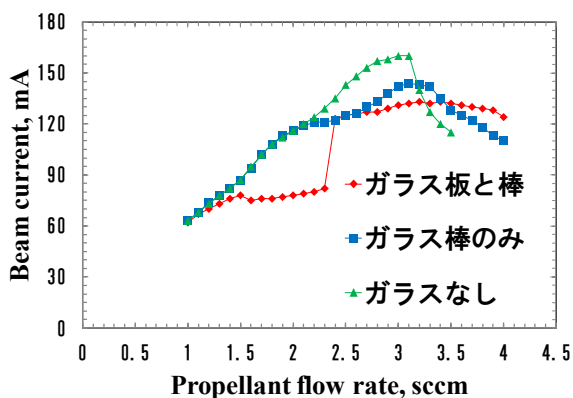


a) ビーム電流比較

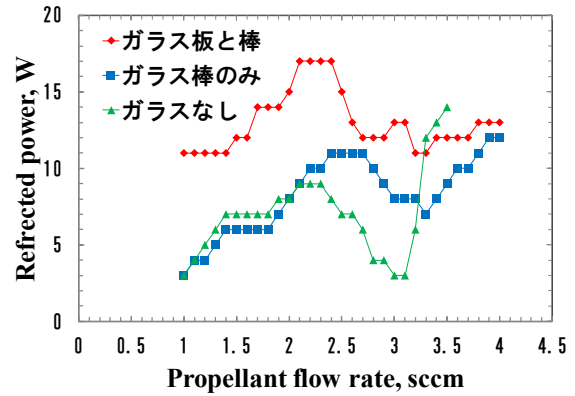


b) 反射電力比較

図7 ガラス板設置 (導波管出口)

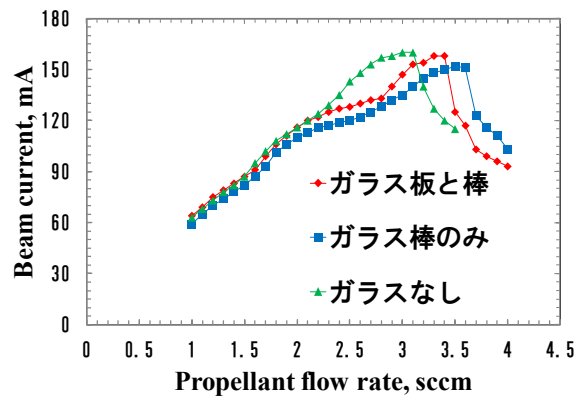


a) ビーム電流比較

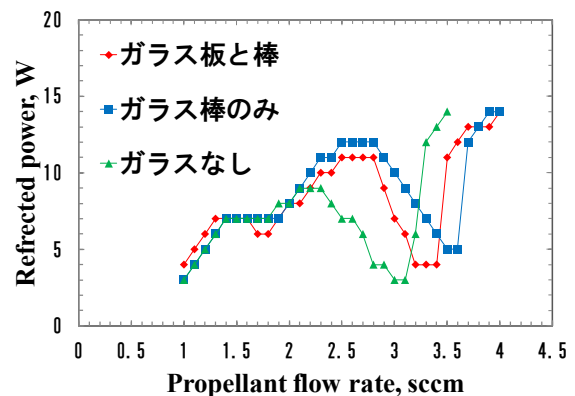


b) 反射電力比較

図8 ガラス板設置 (導波管出口から 50mm 後方)



a) ビーム電流比較



b) 反射電力比較

図9 ガラス板設置 (導波管出口から 100mm 後方)

4. 結論

本研究では、磁石間に設置してあるスペーサの高さ変更と、導波管出口へのガラス板設置を行った。スペーサの高さはノミナル高さが1番性能が高かった。ガラス板設置で導波管へのプラズマ流入を防ぐことができたが、ガラス棒が与える悪影

響により性能向上とはならなかった。今度はガラス棒の影響を最大限小さくする工夫が必要である。

参考文献

- [1] 月崎竜童, “マイクロ波放電式イオンスラスタにおける性能向上と光ファイバ探針による内部現象解明”, 東京大学修士論文 (2009)
- [2] 國中均, 中山宜典, 西山和孝, 荒川義博, イオンエンジンによる動力航行, コロナ社, 2006年
- [3] 月崎竜童, ”Plasma Diagnostics of the Microwave Ion Thruster Utilizing Optical Fiber Probes”, 東京大学博士論文 (2013)