

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 7 月 13 日現在

機関番号：37110

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K06896

研究課題名(和文) マイクロ波放電型イオンエンジンの磁場制御による性能変化の解明

研究課題名(英文) Study of the performance dependence on the magnetic configuration in the discharge chamber of the microwave discharge ion engine

研究代表者

鷹尾 良行 (Takao, Yoshiyuki)

西日本工業大学・工学部・教授

研究者番号：60206711

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)： マイクロ波放電型イオンエンジンでは、永久磁石によって背景磁場を形成した放電室内にマイクロ波を導入し、電子サイクロトロン共鳴を用いてプラズマを生成する。このプラズマ形状は、放電室内の磁場形状で決定され、イオンエンジンの性能決定の主要因である。本研究では、5cm級イオンエンジンの円筒型放電室内の背景磁界を、固定磁石に加えて軸方向と半径方向に移動可能な6個の可動磁石を用いて変化させる、2次元背景磁場可変型イオンエンジンを開発した。更に本エンジンを用いて、背景磁場の変化に対するイオンエンジンの性能変化データを得ることが出来た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

マイクロ波放電型イオンエンジンはJAXA(ISAS)が開発した世界的にユニークな電気推進機であり、「はやぶさ」でその優秀さを証明した。そこで今後、日本で様々なスケールのエンジンの新開発が予想される。本研究成果は、このタイプのイオンエンジンの放電室内プラズマの形状を制御する研究であり、エンジンサイズの変更や推力可変型のイオンエンジン開発の基礎データとなる。また、プラズマ生成に熱陰極を使用しないので、寿命や不純物混入の問題を低減出来、様々な分野でのイオン源開発にプラズマ工学的な新しい知見を与えるものである。

研究成果の概要(英文)： A microwave discharge ion thruster uses the electron cyclotron resonance phenomenon for plasma production in its discharge chamber with a background magnetic field and therefore the performance of the engine is affected by the magnetic configuration. In this work, a 5cm size microwave discharge ion engine of two-dimensional background magnetic field variable type is developed. The background magnetic field in its cylindrical discharge chamber is generated and is changed with static magnets and movable 6 permanent magnets which move in axial and radial directions of the discharge chamber. The ion beam current measurements were carried out with the ion engine to investigate its performance dependence on the background magnetic configuration.

研究分野：プラズマ推進工学

キーワード：マイクロ波放電 イオンエンジン 磁場可変型 宇宙電気推進 航空宇宙工学 推進・エンジン

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

マイクロ波放電型イオンエンジンを主推進機として搭載した「はやぶさ」が地球に帰還し、このタイプの電気宇宙推進機の優秀さが証明された。そして現在、「はやぶさ2」が順調に宇宙航行を続けている。本タイプのイオンエンジンは、長寿命、高信頼性、高推進効率などの特長から、今後も静止軌道上の人工衛星の長期姿勢制御や小型人工衛星の推進機への応用が計画されている。これまでのイオンエンジンの開発例として、国内外においてフォローカソードを用いたイオンエンジンの多数の開発例があるが、マイクロ波放電型イオンエンジンに関しては JAXA が開発し「はやぶさ」に搭載した $\mu 10$ を中心とした開発ラインナップと九州大学と西日本工業大学での小型マイクロ波イオンエンジンの共同開発事例があるのみである。

マイクロ波放電型イオンエンジンは、背景磁場を形成した放電室内にアンテナや導波管を用いてマイクロ波を導入し、ECR (電子サイクロトロン共鳴) によって生成されたプラズマから静電グリッドで、イオンを引出し放出することにより推力を生成している。従って、本イオンエンジンの高性能化には、静電グリッドとの幾何学的な位置関係に基づく最適な形状のプラズマ生成が重要である。しかし同時にプラズマ点火性能も維持する必要があるため、このためにはマイクロ波導入点近傍の強電界領域に、ECR 領域を作り出すことが必要になる。そこでプラズマの点火性能を向上維持するためには、アンテナ近傍に強い磁界を生成することが有効であるが、一方で強磁場中にプラズマが閉じ込められプラズマ生成領域が限られてしまうという問題が発生する。当然イオンエンジンの推進効率向上のためには、静電グリッドの広域に伸展する高密度プラズマ生成が必要であり、ここにおいてプラズマの点火性とマイクロ波放電型イオンエンジンの推進効率向上にトレードオフが生じている。それ故に、これまでのマイクロ波放電型イオンエンジンの開発は、点火性とプラズマ形状両方の兼ね合いで磁場設計を行っており、最高性能のマイクロ波放電型イオンエンジン開発の足かせとなっている。また更に、イオンエンジンのスケールを変えるたびに、最適磁場配位の発見に多くの時間を費やし開発期間に遅延が生じている。

2. 研究の目的

本研究は、前記の問題を改善した高性能のマイクロ波放電型イオンエンジンの開発を目標としたもので、プラズマ着火時とイオンエンジン動作時の背景磁場を動的に変化させる高性能マイクロ波放電型イオンエンジンの開発に資するものである。本研究室では、これまでに放電室内に設置した軸方向に移動する永久磁石で背景磁場を変化させ、エンジン性能の向上に関する研究を進めてきた。その結果プラズマの点火性能は改善された⁽¹⁾⁽²⁾。しかしながら、プラズマの伸展と自由度の高い形状制御には限界が生じている。そこで、放電室の軸方向および半径方向に移動可能な可動磁石を有する2次元可動型磁石を用いたプラズマ制御型のイオンエンジン開発が必要不可欠である。

本研究では、5cm級のマイクロ波放電型イオンエンジンの放電室内の背景磁場を、放電室内部に設けた2次元可動型磁石で変化させ、磁場形状に対するイオンエンジンの性能の関係を明らかにすることを目的とする。この研究によって、最適なプラズマ形状を見出すことが出来るので、これまで試行錯誤であったマイクロ波放電型イオンエンジンの設計に一つの指針を与えるデータとなる。

3. 研究の方法

イオンビームの引出しグリッド直径が5cmのマイクロ波放電型イオンエンジンを作製し、放電室外周の背景磁場生成用永久磁石に加えて、放電室内で2次元(半径方向および軸方向)移動が可能な背景磁場変化用の可動磁石を設置する。可動磁石は、アクチュエータにより駆動され、位置制御をマイクロコンピュータにより行う。イオンエンジンを点火し、引出し実験を行い、性能評価を実施し高性能イオンエンジン開発の知見を収集する。以下に、具体的な方法を列記する。

- ① 5cm級の2次元磁場可変型マイクロ波放電型イオンエンジンを設計、製作する。
- ② アクチュエータによる可動磁石移動機構とコンピュータコントロール回路を作製する。
- ③ イオン引出し実験を行う。その際、背景磁場を変化させ生成プラズマを変化させる。
- ④ イオンビーム測定結果よりイオンエンジンの性能を評価する。

4. 研究成果

(1) 2次元背景磁場可変型マイクロ波放電型イオンエンジンの実験体系

2次元背景磁場可変型マイクロ波放電型イオンエンジンの実験体系を図1に示す。イオンエンジンは円筒型真空容器(内径320mm、長さ1200mm)の中に設置されており、油拡散ポンプ(排気速度3000l/s)により真空排気されている。真空容器の到達圧力は 1×10^{-4} Paで、推進剤としてXeガス1sccmをイオンエンジン内に導入した際の真空度は 1.3×10^{-3} Paである。イオンエンジンはDCカッターを用いて直流的に真空容器から絶縁されており、マイクロ波は、2.45GHzマイクロ波電源からフィードスルー、DCカッターを介してイオンエンジンの放電室内部へ導入される。推進剤のXeガスは、マスフローコントローラからイオンエンジンに供給する。イオンエンジンから、1500Vを印加されたイオンエンジンおよびスクリーングリッドと、グラウンドに設置したアークセルグリッドとの電位差によりイオンビームが引出され放出される。引出しイオンビームは、イ

オンエンジンの下流に設置したイオンコレクタで捕集し測定される。また、イオンエンジン内部のプラズマ形状の観察時には、イオンコレクタの中央部にステンレス製ミラーを取付ける。真空容器側面の覗き窓（ミラーをこの位置に設置）に CCD カメラを設置し、プラズマ変化の状態を観察した。

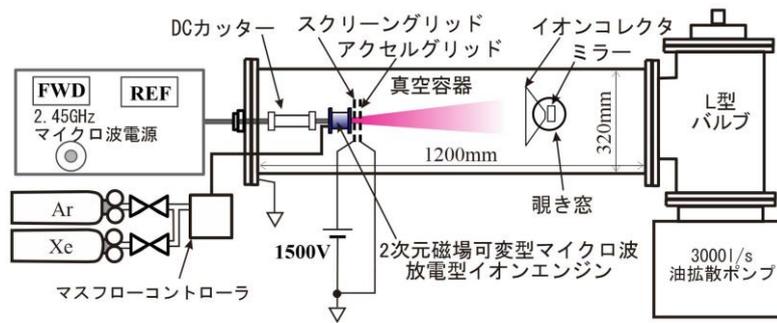


図 1 2次元背景磁場可変型マイクロ波放電型イオンエンジンの実験体系

(2) 2次元背景磁場可変型マイクロ波放電型イオンエンジンの構造

図 2, 図 3 にそれぞれ 2次元背景磁場可変型マイクロ波放電型イオンエンジンの概略図と写真（構造が見える様に静電グリッドと水冷プレートを取外している）を示す。本イオンエンジンは、図 2 の様に円筒形の放電室（内径 50mm）とその外周に設置された円柱型永久磁石（以下、固定磁石、ネオジウム磁石、表面磁束密度 0.44T）、放電室開放部（下流）に設置した 2枚の静電グリッド（スクリーングリッド、アクセルグリッド）、これらの温度上昇を低減するための水冷プレート、放電室内にマイクロ波を導入するアンテナ（φ12の星型、モリブデン製）、内部プラズマ形状を変化させるための可動磁石（SmCo、表面磁束密度 0.35T、φ5x30mm）、半径方向と軸方向の磁石移動機構で構成されている。放電室内には固定磁石と可動磁石により背景磁場が生成される。マイクロ波の交流電界と外部磁場による ECR 現象により放電室内の電子が加熱（加速）され、推進剤（Xe）を衝突電離しプラズマが生成される。このプラズマ内の正イオンを下流の 2枚の静電グリッドを用いて引出し、噴出することにより推力を発生させる。尚、2.45GHz のマイクロ波では、磁束密度が 0.0875T の位置に ECR 領域が形成される。固定磁石および可動磁石で ECR 領域を生成、移動させ、プラズマ形状を変化させた。

(3) 2次元可動磁石移動機構

軸方向と半径方向へ可動磁石を移動させる機構をそれぞれ図 4, 図 5 に示す。軸方向および半径方向への可動磁石の移動量をそれぞれ、 Z , r で表し、放電室の底部を 0mm として $Z=0\sim 7\text{mm}$ 、放電室の中心を 0mm として $r=14\sim 21\text{mm}$ の範囲で磁石移動が可能である。図の様に可動磁石は、スライドに固定されており、スライドの動きが可動磁石の動きとなる。スライドは、前後駆動プレートに固定されたスライドレール上を移動する。図 4 において、軸方向磁石移動用リニアアクチュエータは、イオンエンジンの筐体に固定されており、アクチュエータの移動部分に前後駆動プレートが固定されている。アクチュエータの移動部分の前後動により、前後駆動プレートが移動し、それに伴い可動磁石は軸方向に移動する。同様に、可動磁石は、図 5 の様にスライドのスライドレールに沿う半径方向への移動に伴い半径方向に移動する。半径方向磁石移動用リニアアクチュエータは、前後駆動プレートに固定されており、このリニアアクチュエータの移動部分に左右駆動プレートが固定されている。この移動部分の軸方向移動により、前後駆動プレートと左右駆動プレートの間隔が変化する。スライドをスライドレールに沿った移動をさせるためにクランクで左右駆動プレートとス

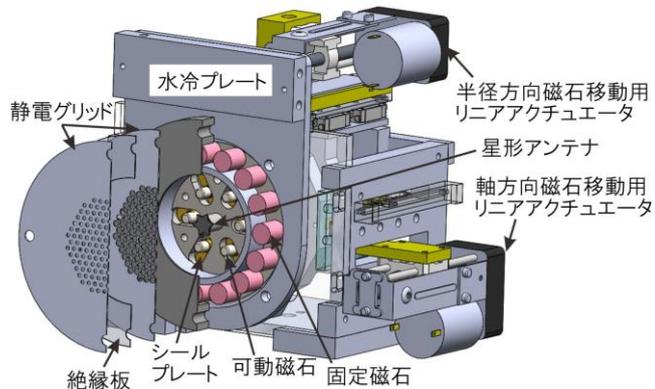


図 2 2次元背景磁場可変型マイクロ波放電型イオンエンジンの構成

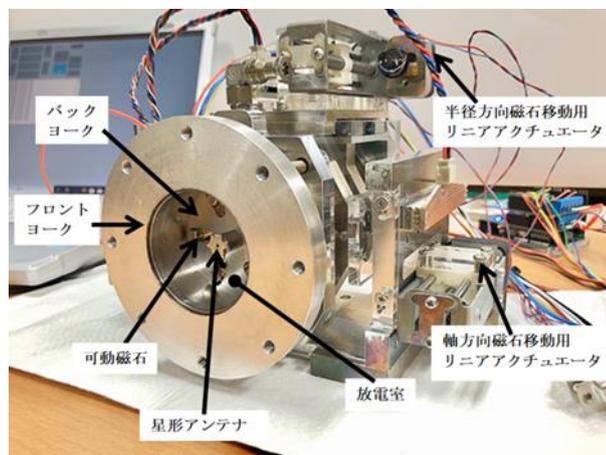


図 3 2次元背景磁場可変型マイクロ波放電型イオンエンジン

ライドをつないでおり、これらの両プレートの間隔の変化により、スライドは、半径方向に移動する。両プレートの間隔が狭まるに伴い、可動磁石は放電室中心方向に移動する。間隔が広がると可動磁石は放電室外壁方向に移動する。なお、直流的な絶縁のためにリニアアクチュエータの移動部分はアクリル材を用いて、軸方向および左右方向移動プレートに接続されている。

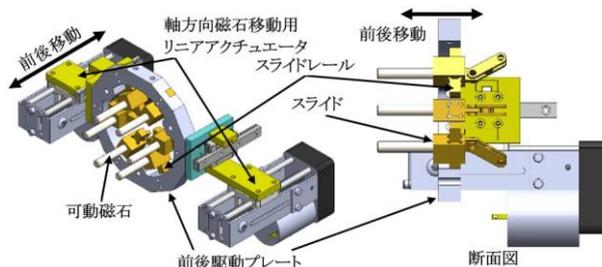


図4. 可動磁石の軸方向駆動機構

(4) 磁石移動制御システム
可動磁石を所定の位置に移動させるために、パーソナルコンピュータを用いて、3台のリニアアクチュエータをコントロールするシステムを構築した。図6に磁石駆動システムのブロック図を示す。3台のリニアアクチュエータの移動部分には、それぞれスライド型の変抵抗器が設置されており、移動部分の位置の変化に伴い抵抗値が変化し、それに比例する電圧が出力される。この電圧値をA/D変換し、パーソナルコンピュータ上に可動磁石の位置を表示する。リニアアクチュエータの動作制御は、パーソナルコンピュータからの移動命令信号を外部のCPUボードにUSBを介して出力する。CPUボードより、モータドライバに信号を送り、モータ駆動電力を発生し、3台のリニアアクチュエータを動作させる。

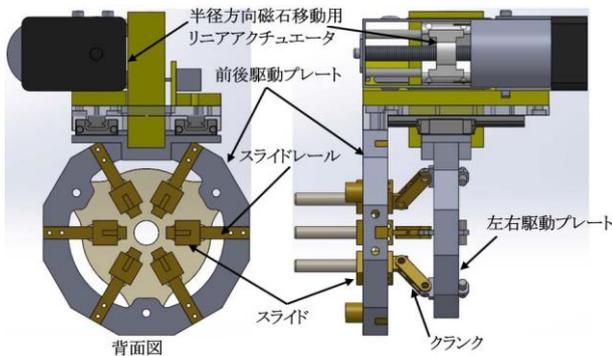


図5. 可動磁石の半径方向駆動機構

(5) イオンエンジン内部の背景磁界
2次元背景磁場可変型マイクロ波放電型イオンエンジンの設計において、イオンエンジンの放電室内部の磁場配位の計算を行った。計算結果の例を図7に示す。図7(a)~(c)は、放電室の半断面で各図の下部が放電室の中心で、マイクロ波導入用の星形アンテナの位置になる。図の様に、可動磁石をイオンエンジン内部に挿入した状態で、(a)⇒(c)へと半径方向に移動させると ECR 領域が中央部から外周部へと広がっている。

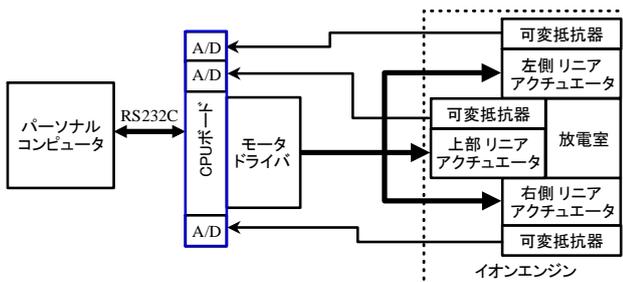


図6. 磁石移動制御システム

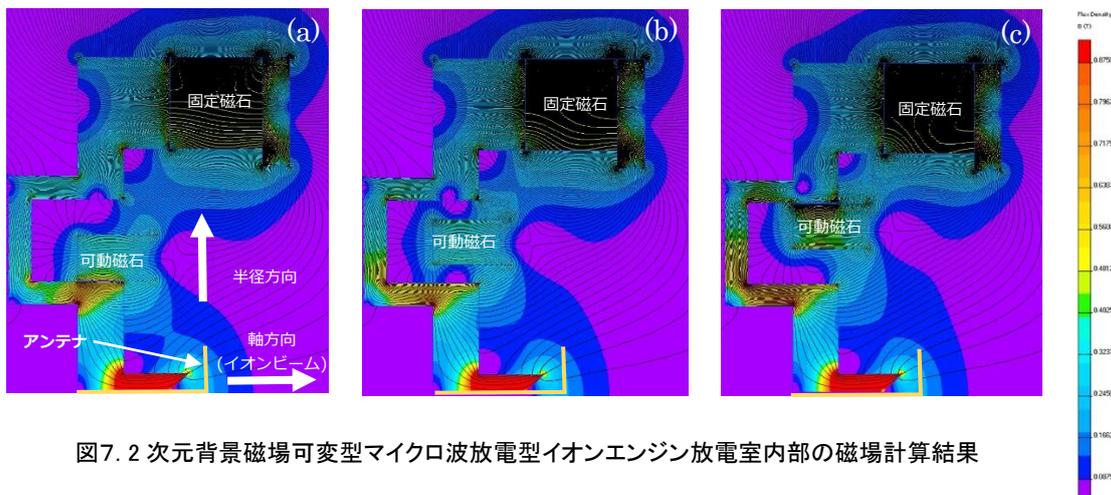


図7. 2次元背景磁場可変型マイクロ波放電型イオンエンジン放電室内の磁場計算結果

(6) イオン引出し実験結果
イオン引出し実験は、ファインカーボン製の静電グリッドを用いて行った。表1に各グリッドの仕様をまとめた。また、両グリッドは、マイカ製の絶縁スペーサにより間隔1mmを空けている。イオン引出し時のイオンエンジンの前方向からのプラズマ形状の写真を図8(a)(b)に示す。推進剤流量1.0sccm、マイクロ波入力電力20W、可動磁石の位置は、Z=3mm、(a)r=15.4mm、

(b) $r=20.4\text{mm}$ で撮影したもので、放電室内でプラズマが拡大しているのがわかる。図7の磁場形状の様に 2.45GHz のマイクロ波の ECR 領域はアンテナを覆う様に形成され、そこでプラズマが生成されている。また、引出しイオン電流値は、(b)が(a)よりも約25%増加していた。イオン引出し実験結果を図9に示す。推進剤流量 1.0sccm 、軸方向磁石位置 $Z=0\sim 7\text{mm}$ 、半径方向磁石位置 $r=15.4\sim 20.7\text{mm}$ 、マイクロ波入力電力 20W 、固定磁石数 17 個、イオン引出し電圧 1500V でイオン引出し実験を行った。磁場の極性は、放電室中央のアンテナ近傍の中心ヨークが S 極、可動磁石およびフロントヨークが N 極である。図10は、実験条件および引出しイオンビーム電流から算出したイオン生成コストである。磁石位置 $Z=4\text{mm}$ 、 $r=20.5\text{mm}$ 、Xe ガス流量 1.0sccm 、入力電力 20W で最大出力電流 56mA 、推進剤利用効率 78% 、イオン生成コスト 356W/A が得られた。

図9において、引出しイオン電流値は可動磁石の半径方向移動量の増加とともに増加する傾向を示した。また、可動磁石の軸方向移動に対しては、挿入量を増加させて行くと、挿入量 $Z=4\text{mm}$ で最大となり、それ以降ははだいに減少している。イオンエンジン内部に固定磁石と可動磁石で形成される ECR 領域がアンテナより遠ざかっているためと考えられる。

本研究結果は、背景磁場の変化とイオンエンジン性能の変化の関係を示しており、エンジン性能向上の指針の一つと成るものである。また更に、開発した実験装置を用いて体系を変えた種々のデータ収集が可能である。今後の研究展開として、①更なる実験データの蓄積、②その知見を活かした磁場配位による高性能イオンエンジンの設計、③アルゴンや水など性能向上が難しい他の推進剤利用における磁場形状の最適化などが研究課題として考えられる。

表1 静電グリッドの仕様

材質	ファインカーボン	
グリッド	スクリーン	アクセラ
開孔率 (%)	67	24
孔径 (mm)	3	1.8
孔数	163	
印加電圧 (V)	1500	0
グリッド間隔 (mm)	1	

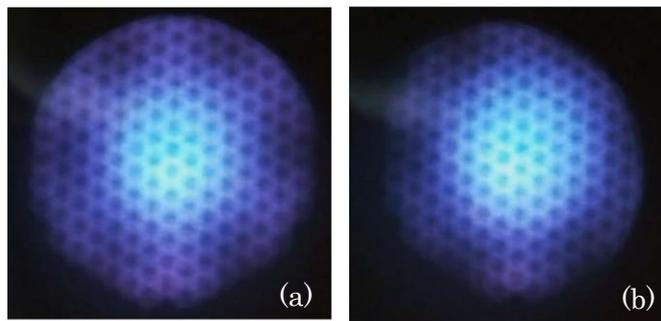


図8. イオン引出し実験におけるプラズマ形状変化 $Z=3\text{mm}$, (a) $r=15.4\text{mm}$, (b) $r=20.4\text{mm}$

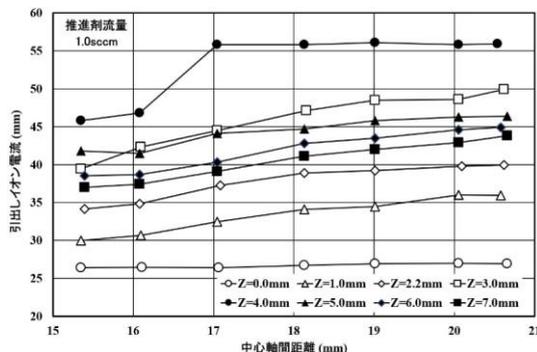


図9. イオン引出し実験結果 (Xe ガス流量 1.0sccm)

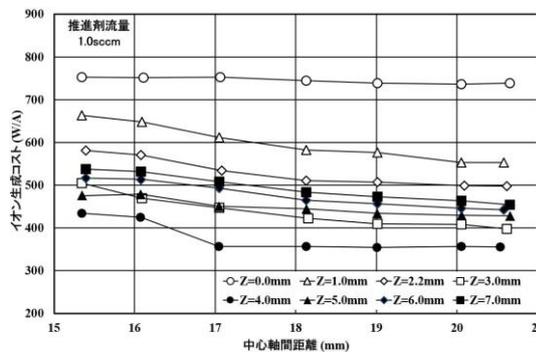


図10. イオン引出し実験結果 (イオン生成コスト)

(7) まとめ

5cm 級の 2 次元背景磁場可変型マイクロ波放電型イオンエンジンを作製し、以下の結果を得た。

- ① 磁場の可変方式を検討し、リニアアクチュエータを用いた軸方向と半径方向へ永久磁石を移動できる 2 次元背景磁場可変型のイオンエンジンを開発した。
- ② 磁石移動制御システムを構築し、可動磁石を任意の位置に移動することが出来た。
- ③ 可動磁石による背景磁場変化によるイオンエンジンの引出し電流の変化の測定およびプラズマ形状変化の観察が出来た。
- ④ 磁石位置 $Z=4\text{mm}$ 、 $r=20.5\text{mm}$ 、Xe ガス流量 1.0sccm 、入力電力 20W で最大出力電流 56mA 、推進剤利用効率 78% 、イオン生成コスト 356W/A が得られた。

<引用文献>

- (1) Development of Microwave Discharge Ion Engine of Variable Magnetic Field Type, Y. Takao, K. Hashimoto, M. Hata, Plasma Application and Hybrid Functionally Materials, Vol.24, pp.21-22(2015).
- (2) Development of 5cm Size Microwave Discharge Ion Thruster with Variable Magnetic Field, Y. Takao, K. Hashimoto, M. Hata, Joint Conference : 30th ISTS, 34th IEPC & 6th NAST, IEPC-2015-480p/ISTS-2015-b-480p(2015).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 0件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yoshiyuki Takao, Ranma Kitou, Ryuya Tujimoto, Ryuji Isayama and Rakuraku Kyo	4. 巻 12
2. 論文標題 Development of Microwave Discharge Ion Engine with Magnetic Field Arranged by Mover Permanent Magnets to Axial and Radial Directions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Advances in applied plasma science	6. 最初と最後の頁 70
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yoshiyuki TAKAO, Ranma KITO, Ryuya TUJIMOTO, Yuuki INOBUCHI, Koutaro KUMANO	4. 巻 28
2. 論文標題 Development of Microwave Discharge Ion Engine Having Magnetic Field Control Mechanism	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Plasma Application and Hybrid Functionally Materials	6. 最初と最後の頁 77,78
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yoshiyuki TAKAO, Yuki MOTOKAWA, Keita NASU	4. 巻 27
2. 論文標題 Development of Microwave discharge Ion Engine of Variable Magnetic Field Type with Mover Permanent Magnets	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Plasma Application and Hybrid Functionally Materials	6. 最初と最後の頁 57
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yoshiyuki TAKAO, Yuki MOTOKAWA, Keita NASU	4. 巻 11
2. 論文標題 Design of Microwave Discharge Ion Engine with Biaxial Movable Magnets	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Advances in applied plasma science	6. 最初と最後の頁 62
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yoshiyuki TAKAO, Shinichiro TAKASAKI, Yuuki NAKAMINE	4. 巻 26
2. 論文標題 Study of Magnetic Field Configuration in an Ion Engine of Variable Magnetic Field Type	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Plasma Application and Hybrid Functionally Materials	6. 最初と最後の頁 76
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計8件(うち招待講演 0件/うち国際学会 7件)

1. 発表者名 Yoshiyuki TAKAO, Ranma KITOU, Ryuya TUJIMOTO, Ryuji ISAYAMA, Rakuraku KYO
2. 発表標題 Development of Microwave Discharge Ion Engine with Magnetic Field Arranged by Mover Permanent Magnets to Axial and Radial Directions
3. 学会等名 The 12th International Symposium on Applied Plasma Science, Yamanashi, Japan, September 24- 28 , 2019. (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshiyuki TAKAO, Ranma KITOU, Ryuya TUJIMOTO
2. 発表標題 Development of Microwave Discharge Ion Engine of Variable Magnetic Field Type with Moving Permanent Magnets to Axial and Radial Directions
3. 学会等名 Joint Symposium: The 32nd International Symposium on Space Technology and Science, and The 9th Nano-Satellite Symposium, Fukui, Japan, June 15-21, 2019. (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshiyuki TAKAO, Ranma KITOU, Ryuya TUJIMOTO, Yuuki INOGUCHI, Koutaro KUMANO
2. 発表標題 Development of Microwave Discharge Ion Engine Having Magnetic Field Control Mechanism
3. 学会等名 The 26th Annual Meeting of IAPS/ The 12th International Workshop on Plasma Application and Hybrid Functionally Materials, Okinawa, March 8- 11, 2019. (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 木藤蘭真, 辻本龍弥、鷹尾良行
2. 発表標題 直行移動磁石による背景磁場可変型イオンエンジンの開発
3. 学会等名 第62回宇宙科学連合技術連合講演会、日本航空宇宙学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoshiyuki TAKAO, Yuki MOTOKAWA, Keita NASU
2. 発表標題 Development of Microwave discharge Ion Engine of Variable Magnetic Field Type with Mover Permanent Magnets
3. 学会等名 The 25th Annual Meeting of IAPS/ The 11th International Workshop on Plasma Application and Hybrid Functionally Materials, Hanoi, March 9- 12, 2018. (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoshiyuki TAKAO, Yuki MOTOKAWA, Kaka HAKU
2. 発表標題 Performance of Variable Magnetic Field Ion Engine of Microwave Discharge Type
3. 学会等名 The 31th International Symposium on Space Technology and Science, Ehime Matsuyama, Japan, July 3-9, 2017. (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yoshiyuki TAKAO, Yuki MOTOKAWA, Keita NASU
2. 発表標題 Design of Microwave Discharge Ion Engine with Biaxial Movable Magnets
3. 学会等名 The 11th International Symposium on Applied Plasma Science, WARSAW, POLAND, September 11- 25 , 2017. (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yoshiyuki TAKAO, Shinichiro TAKASAKI and Yuuki NAKAMINE
2. 発表標題 Study of Magnetic Field Configuration in an Ion Engine of Variable Magnetic Field Type
3. 学会等名 The 24th Annual Meeting of IAPS / The 10th International Workshop on Plasma Application and Hybrid Functionally Materials, Hanoi, March 10-13, 2017. (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----