

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 30 日現在

機関番号：37110

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2011～2014

課題番号：23560962

研究課題名(和文) マイクロ波放電型イオンエンジンの内部プラズマの動的制御による性能向上に関する研究

研究課題名(英文) Study on performance improvement of a microwave discharge ion engine by dynamic control of internal plasma

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) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、5cm級可変磁場型マイクロ波放電型イオンエンジンを製作し、性能試験を実施した。イオンエンジンの製作において、内部磁場を変化させるための可動磁石の移動機構およびコントロール回路を開発した。性能試験は、カーボン製とモリブデン製のそれぞれ開孔率の異なる2種類のグリッドを用いて、Xeガス流量、可動磁石位置および入力マイクロ波電力をパラメータとして実施した。イオンエンジンのプラズマ点火性能は、可動磁石の移動による背景磁場の変化により格段に向上させることが出来た。更に、可動磁石の移動によるプラズマ形状と引出し電流値の変化が観察出来た。

研究成果の概要(英文)：In this study, a microwave discharge ion engine (5cm in diameter) with variable magnetic field was fabricated and its performance tests were carried out. A movement mechanism of the movable magnets and the control circuit of the mechanism to change the internal magnetic field of the ion engine were developed to construct the ion engine. On the experimental parameters of Xe gas flow rate, movable magnet position and input microwave power, the performance tests were carried out using two kinds of grids made of fine carbon or molybdenum and were different in opening ratio. In these performance tests, the plasma ignition performance of the ion engine was remarkably improved by changing the background magnetic field with the movable magnet. Furthermore, the change of the inner plasma shape of the ion engine and extracted ion beam current from it were observed.

研究分野：プラズマ工学

キーワード：推進・エンジン 航空宇宙工学 ロケット 宇宙推進 イオンエンジン マイクロ波放電

### 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、このタイプの宇宙推進機の優秀さが証明された。現在、このエンジンの長寿命、高推進効率などの特長に着目し、新しい宇宙探査ミッションに加えて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<sup>(1)</sup>。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が開発した「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<sup>(2)(3)</sup>。

### 2. 研究の目的

イオンエンジンは、放電室内で生成したプラズマを背景磁場で維持し、静電グリッドでイオンを引き出し放出することにより推力を生成する推進機である。従って、背景磁場により決定されるプラズマ形状は静電グリッドとの幾何学的な位置関係により、高効率でプラズマ内部のイオンが引き出されるように最適化されている。また、マイクロ波放電型イオンエンジンのフォロカソードタイプに対する最大の利点は、プラズマ生成にホットカソード等の電極を使用しておらず、それが故に長寿命が得られるところにある。マイクロ波によるプラズマ生成維持は、マイクロ波と背景磁場による ECR(電子サイクロトロン共鳴)を利用しており、ECR 領域の磁界中にマイクロ波で強電場を生成することによりプラズマが点火する。このプラズマの点火性を向上するためには、局所的に強い磁界を生成することが有効であるが、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。一方で、イオンエンジンの性能向上のためには静電グリッド全面に広が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効率化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おり、また一方では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ている。

本研究は、この点を改善し高性能のマイクロ波放電型イオンエンジンの開発とエンジン開発期間の短縮を目的として着想したものであり、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プラズマ点火性とイオン引き出し効率を向上し、高性能イオンエンジンを開発することを目的とした。

### 3. 研究の方法

5cm 級マイクロ波放電型イオンエンジンを作製し、放電室内部の背景磁場生成用マグネットに加えて背景磁場変化用の可動磁石を設置する。可動磁石には、アクチュエータを取り付け、制御をマイクロコンピュータにより行う。イオンエンジンの点火時の磁場形状およびイオン引き出し時の磁場形状は数値計算で算出し、ガウスメータで実測定を行い、相互チェックを行う。イオンエンジンの点火引き出し実験を行い、性能評価を実施し、超高性能イオンエンジンの開発の知見を収集する。以下に具体的な研究の方法をまとめる。

5cm 級マイクロ波放電型イオンエンジンの背景磁場(点火、プラズマ維持)の設計を行う。

5cm 級マイクロ波放電型イオンエンジン設計、製作。アクチュエータによる可動磁石を配置し、コンピュータコントロール回路を作製する。

プラズマの点火性の条件(マイクロ波電力、磁場配位、ガス流量など)を確定する。

点火後のプラズマをイオン引き出しプラズマへの展開実験を行う。

イオン引き出し実験を行い、イオンエンジンの性能を評価する。

### 4. 研究成果

(1) 背景磁場可変型マイクロ波放電型イオンエンジン

#### 実験体系

図1にマイクロ波放電型イオンエンジンの実験体系を示す。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  $1 \times 10^{-4}$ Pa で、推進剤として Xe ガス 2sccm をイオンエンジン内に導入した際の真空度は  $1.6 \times 10^{-3}$ Pa である。マイクロ波は、5.1GHz マイクロ波電源から供給される。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。また、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いる。

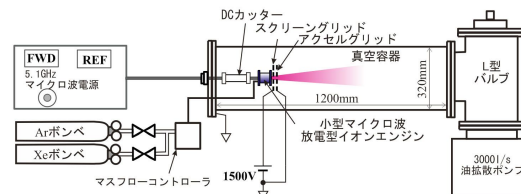


図1 マイクロ波放電型イオンエンジン実験体系

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, 3にそれぞれ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(磁石移動機構が見える様に外周の磁石と

放電室を取外している)を示す。本イオンエンジンは、図2の様に円筒形の放電室とその外周に設置された円柱型永久磁石(ネオジウム磁石、表面磁束密度 0.453T)、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)、放電室内にマイクロ波を導入するアンテナ(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、5x25mm)、磁石移動機構、磁石位置検出用スライド型可変抵抗器およびガスプレートで構成されている。放電室内部には外周部の永久磁石により磁場が生成される。マイクロ波の交流電界と外部磁場による電子サイクロトロン共鳴(ECR)により放電室内の電子が加熱(加速)され、中性粒子(推進剤)に衝突電離しプラズマが生成される。外部磁場は同時に、生成プラズマを閉じ込める作用があり、生成された電子の壁面損失とプラズマによる壁面損傷を低減している。このプラズマ内の正イオンを前面の2枚の静電グリッドを用いて引き出し、噴出することにより推力を発生させる。尚、本研究で使用した5.1GHzのマイクロ波では、磁束密度:0.182TでECR領域が形成される。外周ネオジウム磁石および可動磁石で本領域を生成、移動させ、プラズマ形状を変化させた。また、図3に示したガスプレートは、直径45mm厚さ3mmのアルミ合金製で、イオンエンジン内部に対称なプラズマ生成を行うために、放電室内部に推進剤を対称に導入するためのものである。

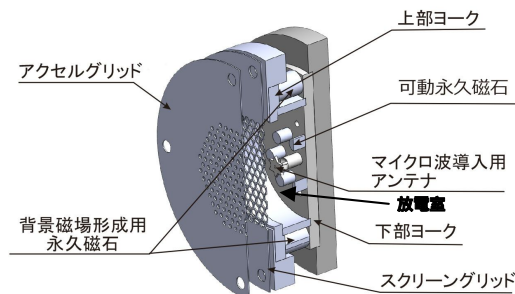


図2 背景磁場可変型マイクロ波放電型イオンエンジンの構成

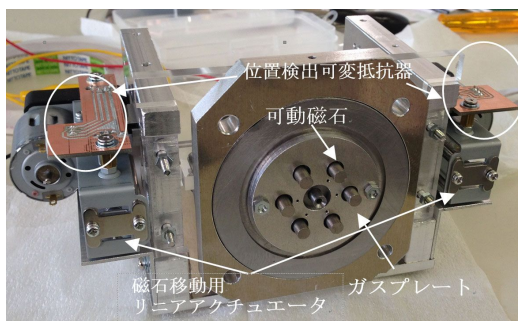


図3 背景磁場可変型マイクロ波放電型イオンエンジン

#### 可動磁石移動機構

可動磁石の移動機構を図4に示す。可動磁石は下部ヨークとガスプレートにあけた穴から放電室内部に挿入される構造である。可動磁石は後方で円筒形の鉄製ヨークに固定

されており、更に鉄製ヨークは磁石移動プレートに設置されている。イオンエンジンヘッドと磁石移動プレートは、イオン引出し時に真空容器に対して1500Vが印加されるので、それぞれイオンエンジン筐体とリニアアクチュエータにインシュレータ(アクリル)を介して接続されている。磁石移動プレートの駆動にはエンジン筐体の左右に固定された2台のリニアアクチュエータを用いており、リニアアクチュエータの可動部分がイオンエンジンの軸方向に移動することにより、可動部分に固定した磁石移動プレートが前後動し、放電室内で可動磁石が移動しイオンエンジン内部の景磁場形状が変化する。

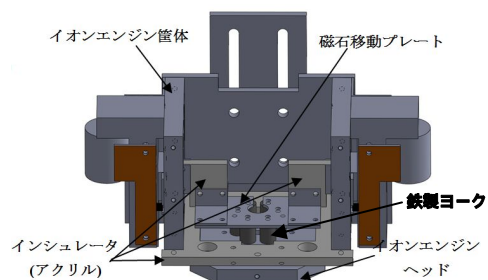


図4 可動磁石移動機構

#### 磁石駆動システム

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(PC)を用いて、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5に磁石駆動システムのブロック図を示す。図3の様にリニアアクチュエータの側面にスライド型可変抵抗器が設置されており、この抵抗器を磁石移動プレートでスライドさせることにより、磁石移動プレートの位置情報を電圧値に変換している。この電圧値をモータドライバ上のPICマイコンでAD変換し、シリアル通信によりPC上に位置データを表示する。また、PCからモータ制御信号がシリアル通信でPICマイコンに伝達され、モータドライバからリニアアクチュエータへの駆動電源が供給される。

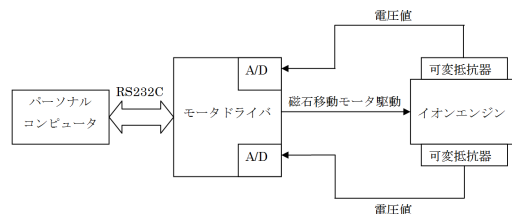


図5 磁石駆動システム

#### イオン引出しグリッド

本研究ではファインカーボン製およびモリブデン製のコンダクタンスの異なる2種類のイオン引出し用静電グリッドを使用した。静電グリッドは、スクリーングリッド、アクセルグリッドの2枚構成である。表1に各グリッドの仕様をまとめた。また、スクリーングリッドとアクセルグリッドの絶縁スペーサにはマイカ板を用いた。



表1 静電グリッドの仕様

材質	ファインカーボン		モリブデン	
グリッド	スクリーンアクセル		スクリーンアクセル	
開孔率 (%)	67	24	50	35
孔径 (mm)	3	1.8	1.2	1.0
孔数	163		851	
印加電圧 (V)	1500	0	1500	0
グリッド間隔 (mm)	0.5		0.34	

(2) イオンエンジン内部の背景磁場の計算

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、改良において、イオンエンジンの内部背景磁場配位の計算を行った。計算結果の例を図6に示す。図6(a)の様に、可動磁石をイオンエンジン内部に深く挿入すると、マイクロ波放電用アンテナ近傍に強い磁界 (ECR 領域) が形成され、アンテナ近傍の強電界により容易にプラズマ生成が行われることが考えられる。また、図6(b)の様に磁石を引き抜いていくと、強磁場領域が周辺部に移動し、プラズマが広がると考えられる。

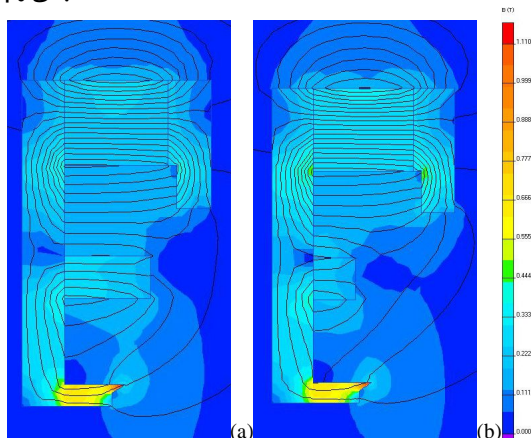


図6 イオンエンジン内部の背景磁場計算結果

(3) プラズマ点火実験結果

イオンエンジンのプラズマ点火性能の検証を行った。図2の下部ヨークからの可動磁石の突出し長さ:  $Z$  をパラメータとしてイオンエンジンの点火性能の検証を行った。下部ヨークからのアンテナ高さは  $Z=8.5\text{mm}$  であり、この幾何学的な位置関係がプラズマ点火性能に影響する。可動磁石  $Z=7\text{mm}$  において Xe ガス流量  $1.0\text{sccm}$  の低流量でも容易にプラズマが点火することが確認できた。点火後は、可動磁石位置を変更してもプラズマは維持された。一方、可動磁石位置を  $3\text{mm}$  (ガスプレート表面位置) とすると、プラズマ点火が不可能となった。可動磁石により、プラズマの点火性能の向上が確認された。

(4) イオン引出し実験結果

推進剤に Xe ガスを使用し、推進剤流量  $0.4 \sim 1.5\text{sccm}$ 、磁石位置  $3 \sim 6\text{mm}$ 、マイクロ波入力電力  $8 \sim 20\text{W}$ 、イオン引出し電圧  $1500\text{V}$  でフ

ァインカーボン製グリッドを用いて、イオン引出し実験を行った。図7に Xe ガス流量  $1.5\text{sccm}$  におけるイオン引出し実験結果を示す。図8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推進剤流量  $1.5\text{sccm}$  における推進剤利用効率とイオン生成コストである。磁石位置  $6\text{mm}$  で Xe ガス流量  $1.5\text{sccm}$ 、入力電力  $20\text{W}$  で最大出力電流  $24\text{mA}$ 、推進剤利用効率  $27\%$ 、イオン生成コスト  $820\text{V}$  が得られた。他の推進剤流量でのイオン引出し実験結果も同様に、入力電力の増加とともに引出しイオン電流値は増加する傾向を示した。引出しイオン電流値は、推進剤流量減少とともに減少した。本実験では、通常点火が難しい磁場配位でのプラズマ生成に成功している。また、イオンエンジン内部でのプラズマ形状を観察したところ、可動磁石の移動によるプラズマの高密度部の変化が観察されたが、最大出力を得られた可動磁石位置が  $6\text{mm}$  と高く、各可動磁石位置でのプラズマの高密度化が必要である。

図9は、モリブデン製グリッドを用いたイオン引出し実験結果である。実験結果は、ファインカーボン製グリッドを用いた実験結果と同様の傾向を示した。グリッドのコンダクタンス変化における、高密度プラズマの可動磁石位置に対する変化は見られなかった。

これらの実験結果より、可動磁石による背景磁場の変化は、イオンエンジンの点火性能の向上に効果があることが分かった。今後の展開として、グリッドの半径方向に対するプラズマの高密度化のために、孔径 (コンダクタンス) が半径方向に変化する静電グリッドの使用および可動磁石の2次元移動による背景磁場の変化が研究課題として考えられる。

本研究では、イオンエンジン内部のプラズマを動的に変化させた場合のイオンエンジン性能の変化を示すことが出来た。特に、これまでプラズマ点火が出来ず、実験データが取れなかった磁場配位での性能データを蓄積することが出来ており、上記の新たな性能向上方法を見出すことが出来た。

(5) まとめ

$5\text{cm}$  級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。

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永久磁石移動型のイオンエンジンを設計製作した。

磁石駆動システムを構築し、可動磁石を任意の位置に移動することが出来た。

可動磁石による背景磁場変化により、イオンエンジンのプラズマ点火性能が大きく改善された。

磁石位置  $Z=6\text{mm}$  で、Xe ガス流量  $1.5\text{sccm}$ 、入力電力  $20\text{W}$  で最大出力電流  $24\text{mA}$ 、推進剤利用効率  $27\%$ 、イオン生成コスト  $820\text{V}$  が得られた。

高密度プラズマ領域の拡大のために、静電

グリッドの最適化および可動磁石の 2 次元駆動が必要であると考えられる。

プラズマ点火が困難な磁場配位でのイオンエンジンの性能データを蓄積することが出来た。

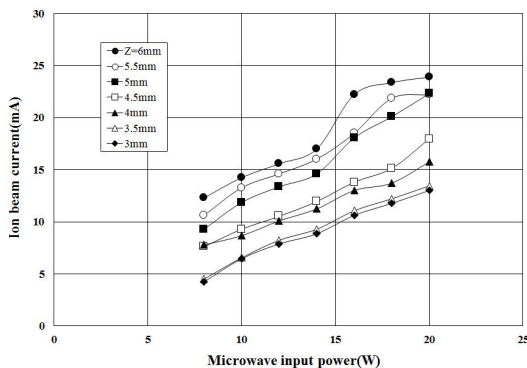


図7 イオン引出し実験結果(ファインカーボングリッド, Xe ガス流量 1.5sccm)

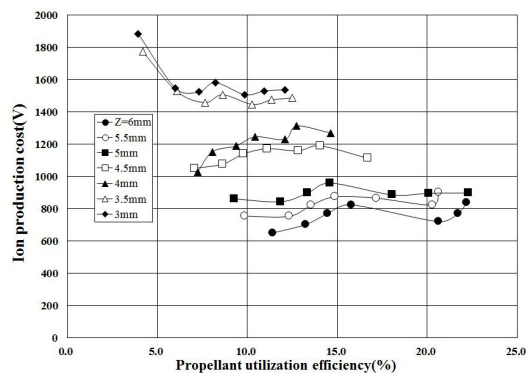


図8 イオンエンジンの性能評価値

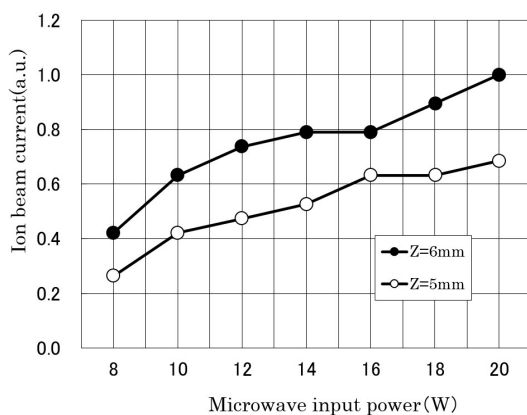


図9 イオン引出し実験結果(モリブデングリッド)

< 引用文献 >

細田聡史, 西山和孝, 清水幸夫, 國中均, マイクロ波放電式イオンエンジン  $\mu 10$  の小型静止衛星対応化研究開発, 平成 19 年度宇宙輸送シンポジウム, pp.313-316.

Y.Takao, T.Miyamoto, H.Kataharada, H.Masui, Y.Mori, N.Yamamoto, T.Kai, H.Ijiri and H.Nakashima, Development of Small Scale Ion Thruster Utilizing Microwave Discharge Plasma, ISTS 2004-b-20, 2004.

Y.Takao, H.Kataharada, T.Miyamoto, H.Masui, N.Yamamoto, T.Kai, H.Ijiri and H.Nakashima, Performance Test of Micro Ion Thruster Using Microwave Discharge, Vacuum, Vol.80, pp.1239-1243, 2006.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 5 件)

Yoshiyuki Takao, Koichi Hashimoto, Masamitsu Hata, Development of Microwave Discharge Ion Engine of Variable Magnetic Field Type, Plasma Application and Hybrid Functionally Materials, 査読無, Vol.24, pp.21-22, 2015.

鷹尾良行, 橋本康一, 可動磁石を用いた小型マイクロ波放電型イオンエンジンの開発, 査読無, 電気学会研究会 プラズマ研究会, 2014 年 5 月 9 日, 足利 PST-14-013, pp.63-66, 2014.

Yoshiyuki Takao, Nan Zhang, Development of Small Variable Magnetic Field Ion Engine of Microwave Discharge Type, 査読無, Plasma Application and Hybrid Functionally Materials, Vol.23, pp.63-64, 2014.

Yoshiyuki Takao, Iori Iwata, Nan Chou, Development of Small Scale Microwave Discharge Ion Thruster with Variable Magnetic Field, 査読無, International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA) 2012 Proceedings, pp.201-202, 2012.

Yoshiyuki Takao, Iori Iwata, Nan Chou, Development of Small Scale Microwave Discharge Ion Thruster of 3-5cm size, 査読無, Proceedings of the 2012 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (ISBN: 978-1-4673-0952-3), pp.497-499, 2012.

[学会発表](計 9 件)

Yoshiyuki Takao, Koichi Hashimoto, Masamitsu Hata, Development of 5cm Size Microwave Discharge Ion Thruster with Variable Magnetic Field, Joint Conference The 30th ISTS, The 34th IEPC & The 6th NSAT, Kobe, Hyogo, Japan, July 4-10, 2015.

Yoshiyuki Takao, Koichi Hashimoto, Masamitsu Hata, Development of Microwave Discharge Ion Engine of Variable Magnetic Field Type, The 22th Annual Meeting of IAPS/ The 8th International Workshop on Plasma Application and Hybrid Functionally

Materials, Honolulu, Hawaii, USA, March 6-9, 2015.

橋本康一, 鷹尾良行, 磁場可変型マイクロ波放電型イオンエンジンの開発, 第 58 回宇宙科学技術連合講演会 2014 年 11 月 12 日-14 日, 長崎市, 長崎県, 2014.

鷹尾良行, 橋本康一, 可動磁石を用いた小型マイクロ波放電型イオンエンジンの開発, 電気学会研究会 プラズマ研究会, 2014 年 5 月 9 日, 足利市, 栃木県, 2014.

Yoshiyuki Takao, Nan Zhang, Development of Small Variable Magnetic Field Ion Engine of Microwave Discharge Type, The 21th Annual Meeting of IAPS/ The 7th International Workshop on Plasma Application and Hybrid Functionally Materials, Hong Kong, China, March 7-10, 2014.

Yoshiyuki Takao, Nan Chou, Development of Small Microwave Discharge Ion Engine with Variable Magnetic Field, The 9th International Symposium on Applied Plasma Science, Istanbul City, September 23-25 and Sakarya University on September 26-27, Turkey, 2013 .

Yoshiyuki Takao, Iori Iwata, Nan Chou, International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA) 2012, Nagasaki City, Japan November 11-14, 2012.

Iori Iwata, Yoshiyuki Takao, Study of microwave discharge ion engine with variable magnetic field, The 19th Annual Meeting of IAPS/ The 5th International Workshop on Plasma Application and Hybrid Functionally Materials, Taipei, Taiwan, March9-12, 2012 .

Yoshiyuki Takao, Naoji Yamamoto, Hideki Nakashima, Development of 5cm Size Microwave Discharge Ion Thruster, The 28th International Symposium on Space Technology and Science, Naha City, Okinawa, Japan, July 5-10, 2011.

〔その他〕

ホームページ等

<http://ms.nishitech.ac.jp/cgi-bin/researchdb-output.pl>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

鷹尾 良行 (TAKAO Yoshiyuki)

西日本工業大学・工学部・総合システム工学科・教授

研究者番号 : 6 0 2 0 6 7 1 1