

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 13 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2010～2013

課題番号：22686080

研究課題名(和文) 超低電力マイクロ波放電式イオン源を用いた革新的小型プラズマ宇宙推進機の実現

研究課題名(英文) Innovative Miniature Propulsion System using Low-Power, Microwave Discharge Ion Thruster

研究代表者

小泉 宏之 (KOIZUMI, Hiroyuki)

東京大学・先端科学技術研究センター・准教授

研究者番号：40361505

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,300,000円、(間接経費) 4,590,000円

研究成果の概要(和文)：次世代の宇宙利用/開発にとって鍵となる小型衛星(100 kg以下の衛星)の発展には、高性能小型イオンスラスタが不可欠である。本研究では、小型イオンスラスタに対して、その実現に必須となる内部現象の解明(マイクロ波特性、内部密度分布)、スラスタ特性把握(プルーム、推力ノイズ、推力係数)ならびに実証(長時間試験、ガス供給BBM開発)を実施した。これらから得られた成果は、50 kg級小型衛星程よし4号に搭載された小型イオン推進システム(同クラスでは世界初の実用となる予定)の設計に活かされた。

研究成果の概要(英文)：These days, small satellites (less than 100 kg) are innovating the space utilization and development and one of the key technologies is the development of high-performance, small propulsion system using ion thrusters. The purpose of this study is to realize such advanced small propulsion systems and various subjects were conducted to understand the microwave discharge plasma (microwave transmission and plasma density profile), to clarify the characteristics of the thruster (plume, thrust, and thrust noise), and to verify the propulsion system (long time operation and BBM of gas system). The conclusions of these studies were utilized to design and develop the MIPS (miniature ion propulsion system) which was installed on a 50-kg, small satellite, Hodoyoshi-4.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：イオンスラスタ プラズマ 小型衛星 イオンエンジン 小型イオン推進システム マイクロスラスタ

1. 研究開始当初の背景

一方、近年の小型衛星の台頭は宇宙開発にパラダイムシフトをもたらしている。小型化によるコスト削減／開発期間の短縮により、宇宙利用のハードルが劇的に下がったのである。これまで、宇宙開発は国および大企業のみが参入できる領域であった。しかし、小型衛星の登場は、この在り方を根本的に変え始めている。そして、現在、この小型衛星に搭載可能な小型推進機が待望されている。推進系の搭載により達成できるミッションが大幅に増加するのである。特にイオンスラスタは従来に比べ各段に精度の高い推力制御と10倍以上の低燃費を実現する。このため、イオンスラスタの小型化は、多くの新しいミッションを創造する。競争が熾烈かつ進展速度が速い小型衛星においては、一刻も早い高性能小型イオンスラスタの実現が切望されている。

2. 研究の目的

本研究は、1 W という超低電力のマイクロ波放電を用いた高効率小型イオン源（イオン生成コスト 250 W/A）に基づく発展応用研究である。この小型イオン源を実用面において本研究において各段に発展させる事によって、次世代小型衛星に必須の低電力・高比推力・高効率・高速応答／静推力という革新的な小型イオン推進機を実現させる。さらに、この過程におけるイオンスラスタのプラズマ密度の測定結果ならびに長時間作動試験の結果を数値計算の検証用データとして提供することにより、数値解析ツールの発展を同時に果たす目的にある。

3. 研究の方法

(1) 両極性作動イオンスラスタにおけるスラスタ配置が及ぼす影響

2 台の小型マイクロ波放電式イオンスラスタ（以降、イオンスラスタ）を、イオン源及び電子源として作動させる両極性作動モードで作動させた。2 台の配置パターンを変えた際のプルーム領域のプラズマ計測を実施した。シングルプローブを用いて電子密度分布、イオン密度分布を測定し、エミッシブプローブを用いて空間電位分布を測定した。

両極性作動型のイオンスラスタの配置と

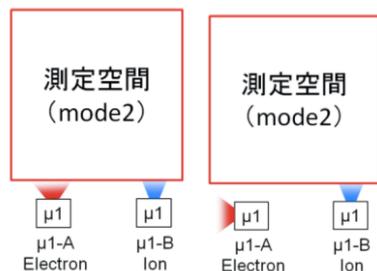


図 1：両極性イオンスラスタの配置図；左：並列配置，右：垂直配置

して次に示す2通りの配置を用いた。この配置によりイオンビームならびに中和状況がどのように変化するかを調べた。

(2) ドラッグフリー用超精密推力制御

マイクロ波放電式小型イオンスラスタをドラッグフリー衛星に搭載することを目標として、推力ノイズ要因を明らかにする。イオンビーム測定により推力ノイズを測定し、さらにスラスタの各パラメータと推力との間の結合係数を求め、推力ノイズの分解を行う。さらに、得られた結果から、実際に推力可変制御と推力ノイズの削減を実現するための方法を提案／実証する。

(3) イオンスラスタの推力実測定

本研究では、微小推力用スラストスタンドを用いることにより、小型イオンスラスタの推力測定を実施した。マイクロ波放電式イオンスラスタは、マイクロ波電源との接続が問題となって、通常、実際の推力測定が行われることは少ない（代わりにイオンビーム電流を測定する）。ここでは、小型マイクロ波アンプを適用することにより、マイクロ波電力用のケーブルの問題を回避した。

測定された実推力を理想推力と比較することで、ビーム発散角や多価イオンの計測を行わずに推力係数を直接的に算出することができる。さらに、本研究の成果は、ドラッグフリー制御における微小推力制御の実測定のための技術へとつながる。

(4) マイクロ波伝搬特性の解明

放電室への効率的なマイクロ波伝送を達成するために、3次元電磁場解析を実施した。放電室内に存在する誘電体部品は、放電室内面の金属スパッタによりコーティングされ、長時間作動における寿命要因となることが懸念されている。これを解決するために、プラズマ生成室に誘電体を出さない新しいマイクロ波伝送線路が必要となる。このために、内部におけるマイクロ波伝送の詳細解析を実施した。

(5) 民生品を利用したガス供給機構の開発

ガス供給系は、スラスタユニットに $\mu 1$ の作動に必要な分だけのガス流量を安定して供給することが求められる。流量の制御は圧力制御と通じて行い、流量の調整は圧力。調圧方式には、サブタンクと調圧弁を用いる方

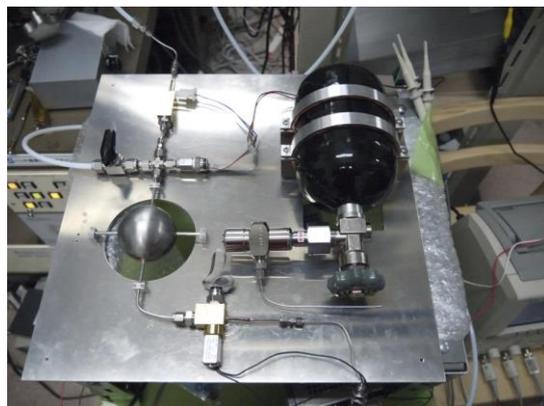


図 2：ガス供給機構の BBM

式（バンバン制御）を採用した。推進材供給ユニットの写真を図に示す。

高圧タンクは、BBM において推進剤を貯蔵する目的で使用される。使用した高圧タンクは、ウルトラレッサ社製 ALT764J であり、内容量 1.1[l] である。本体は CFRP 製本体と sus 製バルブからなり、全体質量は推進剤未充填時で 1.2 kg、うちバルブが 0.6 kg である。

(6) 高解像度 LAS 法によるプラズマ測定

小型イオンスラスタにおけるマイクロ波放電プラズマの物理を解明し、次世代型のイオンスラスタの設計指針をえるために、放電室プラズマのレーザー吸収分光（LAS）計測を実施した。特に、複雑なプラズマ物理を把握するために必須の数値計算の検証として使用できるように高い空間分解能を有する系を構築した。本研究用に設計された可視化/検証用プラズマ源と、高空間分解能計測のために開発された 2 軸ステージを下図に示す。

(7) 高感度 LAS 法の適用

放電室プラズマにおけるイオン密度は、中性粒子密度に比べて小さいため、LAS による測定が困難となる。このために高感度 LAS 方である WMS を構築した。レーザー波長を変調させて、変調成分のみをロックインアンプで検出することにより、通常の LAS よりも感度を向上させることができる。

(8) 小型イオンスラスタの長時間試験

イオンスラスタの実現には長時間試験が必至となる。特に、作動初期（1000 時間以内）に生じるアクセルグリッドの損耗がスラスタの性能変化に大きな影響を持つ。本研究では累積 2,000 時間強の作動試験により最低限の動作保証を行うと同時に、初期 1000 時間の間に得られたデータを、大型イオンスラスタの寿命評価計算ツールの研究者に渡すことにより、10,000 時間クラスの寿命予測を行った。また、これは寿命評価計算ツールの検証としての意味も有する

4. 研究成果

(1) 両極性作動イオンスラスタにおけるスラスタ配置が及ぼす影響

プルーム域の電子密度分布を、イオン源と電子源を並列配置とした場合と垂直配置とした場合で比べると、分布および密度ともに大きな違いはなかった。イオン密度の結果と合わせて見ても、中和器の配置はプルーム発

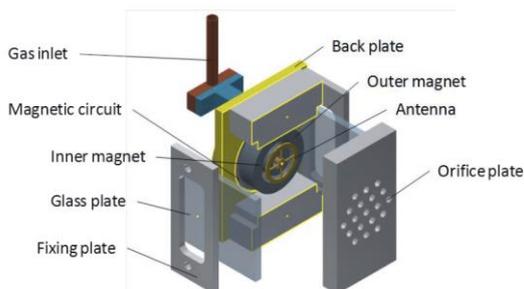


図 3：可視化用のプラズマ源。数値計算の検証としても使用できる設計となっている。

散角には大きな影響を与えないといえる。下流領域において、並列配置では電子密度が垂直配置より高くなっているが、測定誤差の範囲内であるため、有意な差であるかどうかの判別は難しい。

空間電位分布の結果から、どの配置パターンでもイオン源近くでは周囲よりも電位が高いという結果が得られており、下流に行くに従って電位は下がった。イオン源と電子源が並列配置の場合では測定空間の下流の領域では周囲の電位と近い値を取っていることが分かる。また、並列配置で相互距離を変えた場合の電位変化を比較しても下流の電位分布に大きな変化は見られなかったため、並列配置の場合、下流の領域ではビーム中和されている。一方、イオン源と電子源を垂直配置とした場合、イオン源下流の電位は、並列配置とした場合よりも高い値を取っている。このことから、イオン源と電子源が垂直配置とした場合は並列配置とした場合よりもビーム中和される位置が遠くなる、または十分にビーム中和されていないといえる。

(2) ドラッグフリー用超精密推力制御

小型イオンスラスタは、マイクロ波電力とイオン加速電圧の制御を用いることにより 5-100% レンジでの推力可変が可能であることを示した。また、同スラスタの推力ノイズは、マイクロ波電力制御回路を用いることにより 1 桁以上削減でき、DPF ミッションスラスタの要求値 $0.1 \mu\text{N}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以下を達成した。

さらに、小型イオンスラスタの推力連続可変制御は、ビーム電流のフィードバック制御と微積分制御を利用することによって、応答速度は 10 Hz 以上が可能となった。また、その際の推力ノイズは、マイクロ波電力制御回路使用時よりも低く抑えられている。

以上の成果は国内で初めてのドラッグフリー衛星用小型スラスタの実現を意味する。そして今後、DPF ミッション衛星に搭載され

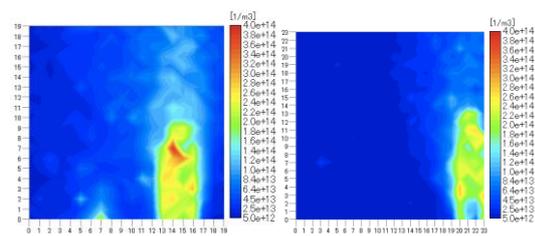


図 4：電子密度分布（左：並列、右：垂直配置）

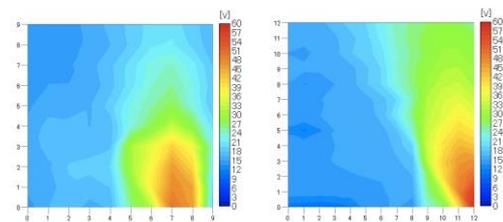


図 5：電位分布（左：並列、右：垂直配置）

ることによって、ドラッグフリー衛星用小型イオンスラスタとして世界で初めての宇宙実績を得ることが期待できる。

(3) イオンスラスタの推力実測定

スラスタスタンドを用いた測定で、小型イオンスラスタの推力による変位を検出することに成功した。変位の増減は推力の増減に対応していた。また、推力係数はそれぞれの測定点で 0.77~1.06 程度であった。また、各条件での平均値は 0.85~0.94 と 0.9 前後であった。

(4) マイクロ波伝搬特性の解明

マイクロ波伝送線路の 3 次元解析の結果 (図に例を示す), これまで構造的制約から採用していた非 50Ω 線路が, 放電室内の電場生成に重要な役割を果たすことが明らかとなった。さらに, この現象は非 50Ω 線路が共振器を形成しているためであることを明らかにした。この特性を利用することで, 放電室に都合の良い任意の伝送線路形状を, 簡単な計算によって放電室内電場を強める最適な位置に配置することが可能となった。

さらに, 放電室にプラズマが存在するときの状況を, プラズマを複素誘電率を表すことで定式化することに成功した。この定式化と共振効果を含めた見かけのプラズマ吸収率を測定することにより, プラズマ単体の吸収率を求めることが可能となった。

この研究成果によって設計された新しいマイクロ波伝送線路は, 5 小型イオン推進システムのイオンスラスタに採用された。

(5) 民生品を利用したガス供給機構の開発

マイクロ波放電式小型イオン推進システムのガス供給機構 BBM の設計, 製作, 実証に成功した。そのガス供給系に対して下限閾値圧力およびタイマ作動時間を変化させ大気圧下, 真空中における流量制御性能の評価を行った。

この結果, 製作した BBM のガス供給系において, 7%以下の流量誤差で微小流量制御作動を達成した。また, 微小流量制御において, 精度を上げる際の設計重要事項がバルブの応答遅れ時間にあることを確認した。

(6) 高解像度 LAS による中性粒子分布測定

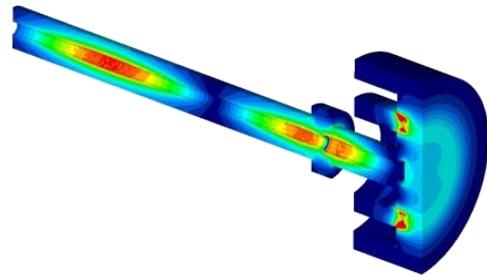


図 8 : 小型イオンスラスタの放電室およびマイクロ波線路の 3 次元電磁場解析の例

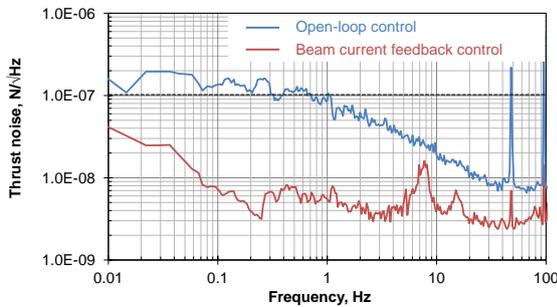


図 6 : フィードバック制御による推力ノイズの低減

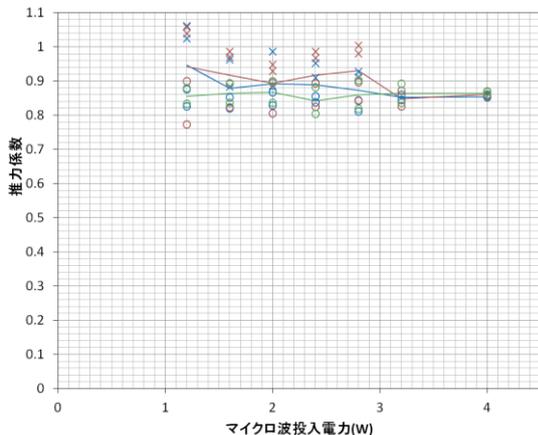


図 7 : 推力測定により求めた推力経数

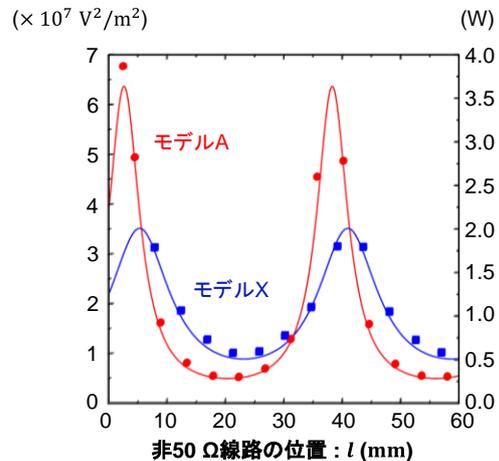


図 9 : マイクロ波伝送線路における非 50Ω 線路であるアンテナ保持機構の位置をずらした場合の電場強度 (共振器を形成している)

下限閾値圧力[atm]	0.166	0.246	0.327
最小圧力[atm]	0.166	0.246	0.328
最大圧力[atm]	0.198	0.283	0.36
圧力差[atm]	0.032	0.037	0.036
最大周期[s]	1795.5	930	485
最小周期[s]	1679	911.5	441
平均周期[s]	1787.3	918.2	463.8
最大流量[sccm]	0.129	0.2752	0.5534
最小流量[sccm]	0.120	0.2697	0.5032
平均流量[sccm]	0.121	0.2732	0.5262

図 10 : 調圧制御により実際に達成された流量とばらつきまとめ

高い空間解像度を持つ LAS 法を開発することによって、放電室プラズマの詳細構造を測定することに成功した。測定した粒子は、感度の制約から準安定の中性粒子である。小泉の結果、プラズマ密度と電子温度が高い領域が半径 7 mm 以内の領域に集中していることがわかった。また、その領域はアンテナと強い相関を有していた。したがって、今後、イオンスラストの大口徑化を測るためには、アンテナ自体のサイズ変更等が必須となることがわかった。また、本測定結果は、マイクロ波放電の 3次元 Full-PIC 数値計算を行っている研究者に渡され、数値計算の検証用として使用されている。

(7) 高感度 LAS 法の適用

通常の LAS 法よりも高感度な方法として波長変調 LAS 法 (WMS 法) を構築し、可視化イオンスラストへの適用、ならびに一桁以上の高感度化に成功した。これは将来的にイオンの LAS 測定を実施する場合に必須となる技術である。

(8) 小型イオンスラストの長時間試験達成 地上試験装置に各種の自動化システムを

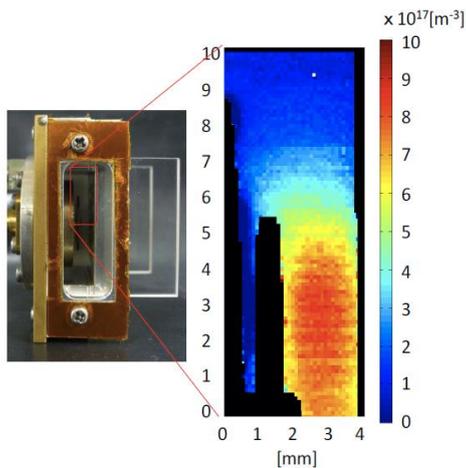


図 11：準安定中性粒子の密度分布

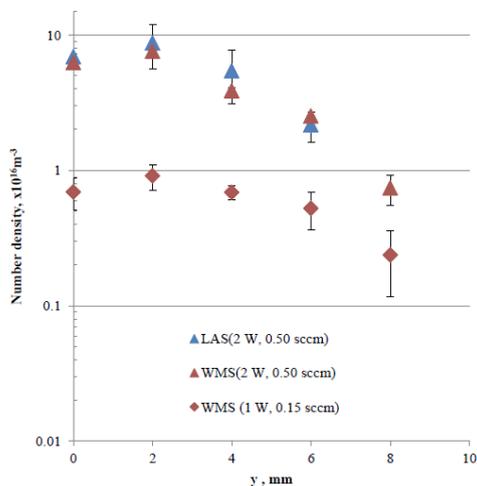


図 12: LAS 法と WMS 法による測定結果の違い。

組み込むことにより、累積 2500 時間強の長時間運転に成功した。これによりイオンスラストの実用に必要な寿命の最低ラインを確保することができた。

さらに、この運転初期 1000 時間時におけるグリッドをレーザー顕微鏡で測定することにより、グリッド損耗形状を測定した。この試験において得られた電流値と形状測定結果はイオンスラストの寿命評価ツールを開発している研究者により、さらなる長時間の寿命予測が実施され、10,000 時間以上の作動が可能であることが予測された。



図 13：長時間試験におけるアクセラグリッドの損耗。白い点線はオリジナルの穴形状を示す。

(9) アウトカム／波及効果

本研究の成果に基づいて、以下 2 つの大きなアウトカム／波及効果が生じた。

A. 世界初となる 50kg 級衛星への小型イオン推進システム：MIPS の搭載

超小型衛星「ほどよし 4 号」は 2014 年 6 月に打ち上げ予定の 50kg 級小型衛星である。本衛星には多くの新規技術が搭載されているが、その目玉となっているのが小型イオン推進システム MIPS である。MIPS は小型イオンスラストを用いた推進システムであり、この小型イオンスラストは、本研究で得られた成果に基づいて設計されている。具体的には、研究成果の(3), (4), (5), (8)が、MIPS の設計に直接的に結びついている。

100 kg 級以下の衛星に対して、イオンスラストおよびホールスラストが搭載された例は世界的にこれまでにない。従って、ほどよし 4 号による MIPS の作動が成功すれば世界初の快挙となる。

B. 超小型新宇宙探査機 PROCYON の統合型イオン推進システム：I-COUPS の開発

超小型新宇宙探査機 PROCYON は、大型の新宇宙探査機に相乗りして打ち上げられ、小惑星探査を行う小型衛星であり、2014 年末の打ち上げを予定して現在 (2014 年 6 月)、開発が進められている。小型衛星による小惑星探査は世界でも初の試みであり、成功すれば大きな快挙となる。

この探査に必須となるのが、複数の機能 (RCS, High- ΔV , TCM) を有する小型推進系である。この小型推進系として、研究代表者は MIPS に多数のコールドガススラスト機能を統合した新しい推進システム I-COUPS (Ion

thruster and COLD gas Unified Propulsion System) を提案し, PROCYON の推進系として現在開発が行われている. I-COUPS は MIPS をベースとしており, 本研究なしでは成し得なかった推進系である.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 10 件)

- 1) Koizumi, H. Komurasaki, K., Aoyama, J., and Yamaguchi, K., "Engineering Model of the Miniature Ion Propulsion System for the Nano-satellite," Trans. JSASS Space Tech. Japan, Vol. 12, pp.Tb_19-Tb_24, 2014.
- 2) Nakano, M., Koizumi, H., Inagaki, T., and Komurasaki, K., "Numerical Study of μ l Ion Engine Optics Using JIEDI Tool," Trans. JSASS Space Tech. Japan, Vol. 12, pp.Pb_27-Pb_32, 2014.
- 3) 稲垣匡志, 小泉宏之, 小紫公也: マイクロ波放電式小型イオンスラスタにおける外部着火装置によるプラズマ着火確率工場に関する研究, プラズマ応用科学, Vol. 21(2), pp.**_**, 2013.
- 4) 杉田裕人, 小泉宏之, 國中均: マイクロ波放電式小型イオンエンジンの高分解能中性粒子数密度分布測定, プラズマ応用科学, Vol. 21(1), pp.9-14, 2013
- 5) Ise, T., Tsukizaki, R., Togo, H., Koizumi, H., and Kuninaka, H., "Electric field measurement in microwave discharge ion thruster with electro-optic probe," Rev. Sci. Instrum., Volume 83(2013), No.124702
- 6) 月崎童童, 小泉宏之, 嶋村耕平, 西山和孝, 國中均: マイクロ波放電式イオンエンジン μ 10 の推力増強と準安定中性粒子の空間密度分布との関係, 日本航空宇宙学会論文集, Vol. 60 (2012), pp.135-141.
- 7) 小泉宏之, 國中均: マイクロ波放電式小型イオンスラスタのシステム性能, 日本航空宇宙学会論文集, Vol. 60 (2012), pp.128-134.
- 8) Kawamura, S., Ando, M., Seto, N., et al.(58/147), "The Japanese space gravitational wave antenna: DECIGO," CLASSICAL AND QUANTUM GRAVITY, Vol.28, No.9, 2011.
- 9) Tsukizaki, R., Koizumi, H., Nishiyama, K., and Kuninaka, H., "Measurement of axial neutral density profiles in a microwave discharge ion thruster by laser absorption spectroscopy with optical fiber probes," Rev. Sci. Instrum. 82, 123103, 2011.
- 10) Koizumi, H. and Kuninaka, H., "Development of a Miniature microwave discharge ion thruster driven by 1 W microwave power," Journal of Propulsion and Power, Vol26,No.3, pp.601-604, 2010.

[学会発表] (計 8 件)

- 1) Hiroyuki KOIZUMI, Development of the Miniature Ion Propulsion System for 50 kg Small Spacecraft, 48th Joint Propulsion Conference and Exhibit, Atlanta (USA), 2012, Aug. 1.
- 2) Hiroyuki KOIZUMI, Engineering Model Development of a Miniature Ion Propulsion System, UN/Japan Nano-Satellite Symposium, Nagoya (Japan), 2012, Oct. 11.
- 3) Hiroyuki KOIZUMI, Study of Frequency Modulation Laser Absorption Spectroscopy for the Plasma Measurement of a Miniature Microwave Discharge Ion Thruster, The 28th International Symposium on Space Technology and Science, Okinawa (Japan), 2011, June 7.
- 4) Hiroyuki KOIZUMI, Performance Evaluation of a Miniature Ion Thruster μ l with a Unipolar and Bipolar Operation, 32nd International Electric Propulsion

Conference, Wiesbaden (Germany), 2011, Sept. 13.

- 5) 小泉宏之, 50 kg 超小型衛星用小型低電カイオンエンジンの紹介, 第 10 回 DECIGO ワークショップ, 2011 年 11 月 19 日, 京都大学
- 6) Hiroyuki KOIZUMI, Performance of the Miniature and Low Power Microwave Discharge Ion Engine μ l, 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Nashville (USA), 2010, July 26.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 4 件)

- (1)
名称: イオンエンジンのプラズマ着火用ガス供給方法及びシステム
発明者: 小泉宏之, 青山順一
権利者: 同上
種類: 特許
番号: 特願 2013-008934
出願年月日: 2013 年 01 月 22 日
国内外の別: 国内
- (2)
名称: 小型低消費電力カイオンエンジンに用いるマイクロ波電源の起動時パワーアップ回路
発明者: 小泉宏之, 時藤勉, 青山順一
権利者: 同上
種類: 特許
番号: 特願 2013-048155
出願年月日: 2013 年 03 月 10 日
国内外の別: 国内
- (3)
名称: 人工衛星の軌道面制御方法
発明者: 小泉宏之, 青山順一
権利者: 同上
種類: 特許
番号: 特願 2013-008935
出願年月日: 2013 年 01 月 20 日
国内外の別: 国内
- (4)
名称: 小型マイクロ波プラズマ源における誘電体保護機構
発明者: 小泉宏之, 直井太郎, 青山順一
権利者: 同上
種類: 特許
番号: 特願 2013-211478
出願年月日: 2013 年 10 月 8 日
国内外の別: 国内

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

- 1) ホームページ (小泉研究室)
<http://www.al.t.u-tokyo.ac.jp/Koizumi/html/htdocs/>
- 2) ニュースリリース (小型イオン推進システムの開発):
<http://www.rcast.u-tokyo.ac.jp/ja/rcast/report/2013/0627.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

小泉 宏之 (KOIZUMI, Hiroyuki), 東京大学・先端科学技術研究センター・准教授, 研究者番号: 40361505

(2)研究分担者: なし

(3)連携研究者: なし