

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25289304

研究課題名(和文)有限境界型ECR加熱プラズマの現象解明とマイクロ波放電式イオンスラスタへの応用

研究課題名(英文) Physics of a Small-Size ECR Heating Plasma and its Application to the Microwave Discharge Ion Thruster

研究代表者

小泉 宏之 (KOIZUMI, HIROYUKI)

東京大学・新領域創成科学研究科・准教授

研究者番号：40361505

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,900,000円

研究成果の概要(和文)：近年、宇宙利用開発には、プラズマ推進機の実用化と小型衛星の台頭という大きな2つの革新が起きており、マイクロ波放電式を利用したイオンスラスタが注目を集めている。しかし、そのプラズマ物理には未解明な点が多く実用化の妨げとなっている。本研究では、超小型プラズマ源を解析対象とすることで計算コストが大きく圧縮される点を利用して、3次元数値解析コードを構築し、実験による測定・検証とあわせて物理の解明と実応用の促進を行った。具体的には1)磁場を横切る電子輸送が内部の振動電位によることの解明、2)イオンスラスタの性能向上/改良および水を推進剤とした新しいイオンスラスタの提案、という成果を得た。

研究成果の概要(英文)：Recently, space development and utilization have two innovations which are plasma propulsion and small satellite. Ion thrusters using electron cyclotron resonance have attracted attentions, but its plasma behavior inside still need more understanding for further applications. This research developed an Electromagnetic 3D-Full-PIC numerical simulation code by using a miniature plasma source to reveal the plasma physics and enhance its applications. As a result, we obtained two major results: 1) electron transport across the magnetic field is caused by oscillating electric field inside and 2) performance improvement of the thruster and proposal of the new ion thruster using water.

研究分野：宇宙推進工学

キーワード：イオンスラスタ 小型衛星 プラズマ 数値計算 PIC ECR

1. 研究開始当初の背景

現在、宇宙利用開発には大きな2つの革新が起きている。それは、プラズマ推進機の実用化と小型衛星の台頭である。プラズマ推進機は、圧倒的な低燃費と超高精度の推力制御能力によって、「はやぶさ」や「DAWN」による深宇宙探査、「GOCE」による超高精度地球重力場観測、静止衛星への標準搭載化、そして全電化衛星の登場、と宇宙利用開発に大きな変革を与えている。他方の小型衛星はコスト削減と開発期間短縮により、宇宙利用をより活発で身近なものへと変え始めている。そして、これまでに研究代表者らによって実現した高性能小型イオン推進システムによって、小型衛星利用は新しい時代「推進系により自由に軌道を選べる時代」に入ろうとしている。

プラズマ推進機および小型推進機両者の鍵として注目を集めているのが、電子サイクロトロン共鳴加熱（以下、ECR加熱）プラズマを利用したマイクロ波放電式イオンスラストである。簡潔な構造を持つECRプラズマにより、堅牢なシステムや劇的な低電力化を可能とした。しかし、この成功に置き去りにされて、内部ECRプラズマの理解が難航しており、経験的／実験的な設計が続けられている。これは波長と同程度の有限境界で囲まれたECR加熱プラズマ（以下、有限境界型ECRプラズマ）は、次の理由から現象の理解が困難なためである。

1) 無限領域のプラズマを基にして構築されたプラズマ波動理論の適用ができない

2) 電子の累積的加熱が重要となるために、損失過程とのバランスが重要であり、ECR加熱単独では現象が把握できない。

これはイオンスラストだけでなく全ての有限境界型ECRプラズマに共通の問題である。この理解には電子・イオン運動の詳細把握が必要であり、厳密なモデルに基づいた数値計算解析が渴望されている。具体的にその計算方法は「電子イオンPIC、リアル質量比、3次元、電磁波」解析となるであろう。しかし、計算コストの高さがこの方法の大きな障害となっている。

2. 研究の目的

本研究の目的は大きくわけて

- 1) 数値計算コード FEMP3 の構築
- 2) 計算実証データの取得
- 3) イオンスラストの実応用

はじめに、超小型プラズマ源を解析対象とすることにより、計算コストが大きく圧縮される点を利用して、「電子イオンPIC+リアル質量比+電磁波+3次元」の数値解析コードを構築する(1)。この構築には数値計算だけでなく、実験による検証データが不可欠であり、その取得も同時に行う(2)。そして、数値解析コードの構築と共に、これまで把握できていなかったECRプラズマ物理を解明することで、イオンスラストの性能向上および実応用へと役立てていくこと(3)

3. 研究の方法

(1) FEMP3 の構築

従来構築していた静電式PICをベースとして、プラズマ電流をフィードバックさせることで電磁式PICへと移行させ、FEMP3の原型を構築した(初期型FEMP3)。

イオンスラストの構成要素にはイオン源と中和器(電子源)があるが、本研究対象のイオンスラストでは両者に同一のプラズマ源を使用している。ここで、中和器からの磁場を横切る電子放出の詳細機構に関しては明らかになっていなかった(イオンは磁場に閉じ込められない)。FEMP3の検証ならびに実用化の両面から、中和器を計算および実験の主対象にとった。

(2) プラズマ内励起中性粒子密度の高分解能測定

はじめに、数値計算および検証実験、両者からの要求を満たすよう、可視化プラズマ生成室の改修を実施した。具体的には、数値計算においては計算高速化に適した生成室形状への変、かつ、実験においてはレーザー分光による内部測定が可能となる形状である。

また、測定点数ならびに解析データ数が膨大となるため、各点のデータ測定(吸収分光データ測定と2軸ステージ移動)およびデータ解析の完全自動化を実施した。

(3) 導電性インク印刷プローブによるプラズマ計測方法の構築

数値計算と直接比較できる物理量としてプラズマ生成室に流れ込むプラズマ電流を選定した。レーザー分光による励起中性粒子密度の計測では、高い空間分解能のデータが取得可能である。しかしながら、数値計算により得られる物理量との直接比較に対しては仮定が必要となる。この点、壁面に流れ込む電流であれば、直接的な比較が可能である。この測定のため、絶縁材/金属を多層コートして微小な電流捕集プローブを集積化する方法をとった。

(4) 改良型中和器オリフィスの小型深宇宙探査機への応用

数値計算との検証データを取得する目的と、中和器の性能向上を図る目的のため、オリフィス形状が電子放出特性に与える影響を実験的に求めた。

また、本研究では、数値計算結果、検証用実験データ、そして内部物理の考察をベースとして、イオンスラストの性能向上方法の考案と試験を続けた。さらに、宇宙飛行を最終試験の場と位置づけ、常に飛行機会を獲得できるよう準備を続けた(小型衛星の飛行機会が急遽生じることが多いため、事前の準備ができていないかが鍵となる)。

(5) 水イオンスラストの提案と実証

キューブサット用のイオンスラストとして、キセノンに代わり水やブタンガスを推進剤とする新しいイオンスラストの提案した。分子性ガスを推進剤として使用した場合、分子の解離によるエネルギー損失ならびにイオン種の違いによるグリッド設計の難易度上昇という課題がある。しかし、これまでに FEMP3 を使用して、プラズマ内部のエネルギー分布が明らかになってきたため、分子ガスを利用した場合の挙動を推定することができた。また、将来的に、FEMP3 を分子ガスに拡張することで直接的に解離を推定する見込みがたつた点も大きい。

(6) FEMP3 による電子輸送過程の解明

最終的な FEMP3 コード (電磁式, 高速化, 粒子数増加, セル幅縮小) を用いて, プラズマ源内部の電子輸送過程の解明を進めた。1 つの計算パターンを解析するために 3 週間程度の時間を要するが, 従来にくらべ詳細なプラズマ分布を得ることが可能である。

4. 研究成果

(1) FEMP3 の構築

初期型 FEMP3 により, ECR 放電プラズマの再現に成功した。計算コードの検証は後述の励起中性粒子密度分布および壁面プラズマ電流により実施した。この構築におけるプラズマ電流のフィードバックを進める中で, 完全な電磁式 PIC への移行には計算セルおよび粒子数の増加が必要であることがわかった。また, プラズマ生成/維持の物理を解明するために, 内部における電流分布を求め, 電子損失領域が局所化されていることを明らかにした。

(d) 0.7 W

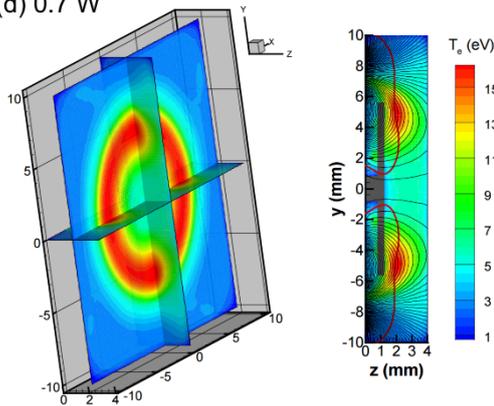


図 1: FEMP3 により計算された 3 次元電子温度分布 (発表論文・雑誌 6 より抜粋)

次に, 実験結果との対比を実施しながら, 数値計算の高速化に必要な条件を明らかにした。具体的には, 1/4 対称構造採用による計算コスト低減の可否, 不要空間の排除, PIC に要する計算格子幅, 安定計算に必要な超粒子数

の数, マイクロ波/イオン/電子のための時間ステップなどである。また, 並列化を進め計算コストの削減を実施した。

また, オリフィスおよびその下流領域も計算対象に拡張し, プラズマ生成から電子放出までを一括で解くことに成功した。

(2) プラズマ内励起中性粒子密度の高分解能測定

可視化プラズマ生成室に対して, 波長変調法による高感度化吸収分光法により, 短寿命の励起中性粒子計測を実施した。当初想定していた周波数変調法は, 高い感度上昇が見込めるものの, マイクロ波を使ったシステム実装の難易度が高いため, 同種の高感度法である波長変調法を採用した。この方法により感度の低い短寿命励起中性粒子密度の測定に成功した。これまで測定していた長寿命粒子に比べて, 局所的なプラズマ情報を得ることができた。

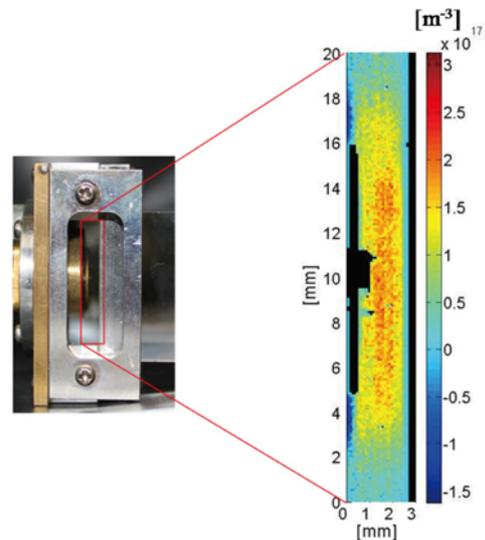


図 2: 測定された励起中性粒子密度分布 (発表論文・雑誌 9 より抜粋)

(3) 導電性インク印刷プローブによるプラズマ計測方法の構築

絶縁材/金属の多層コートによる微小な電流捕集プローブの研究を進める中で, 導電性インクジェットプリンタの適用の着想に至った。これにより極めて安価/容易/短時間での高密度微細プローブパターンの構築が可能となった。はじめにプラズマ測定への適用性を評価する基礎試験を経て, 中和器内部のプラズマ電流測定および分布測定に成功した。この結果, 内部賞味電流分布を測定し, 数値計算との比較を実施し良好な一致を示した。

(4) 改良型中和器オリフィスの小型深宇宙探査機への応用

オリフィス形状が電子放出特性に与える影響の試験の結果, 従来よりも大きな電子電流を得るオリフィス形状の指針が得られた

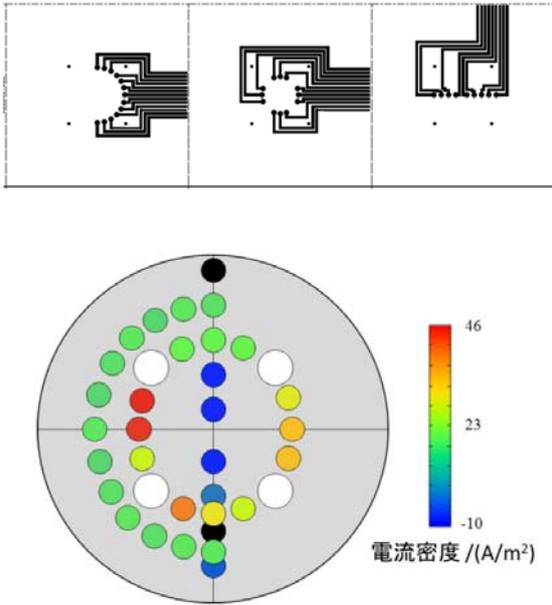


図 3: 導電性インク印刷技術によるプラズマ測定. プローブパターンと測定結果 (発表論文・学会 10 より抜粋)

東京大学が主導して開発した世界初の小型深宇宙探査機 PROCYON には、本研究で内部物理を解明を進めた小型イオンスラスタが搭載された (100-kg 以下衛星での深宇宙作動は世界初)。このイオンスラスタ用の中和器には、本研究を経て改良がなされた中和器オリフィスが実用された。中和器の改良によりイオンスラスタシステムの性能が向上した。

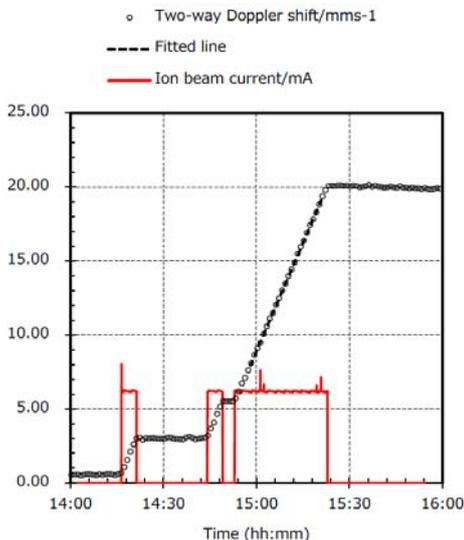


図 4: PROCYON におけるイオンスラスタの宇宙作動 (発表論文・雑誌 5 より抜粋)

さらに、PROCYON におけるイオンスラスタ作動の結果をうけて、その改良版イオンスラスタシステムの考案を実施した。具体的には、イオン源と中和器の流量独立制御、スラスタ冗長構成における冗長流量制御の 2 機構を、3次元プリンタ技術を用いて小型化を達成した。

(5) 水イオンスラスタの提案と実証

水を推進剤とする新しいイオンスラスタの基本作動の実証に成功した。水を供給した状態でのプラズマ着火に成功し、数十時間の作動における酸化の影響がないことの確認、そして、イオン源からのイオンビーム放出および中和器からの電子放出に成功した

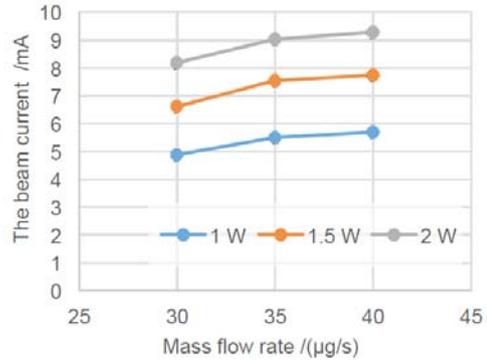


図 5: 水を推進剤としたイオンスラスタのビーム電流 (発表論文・学会 7 より抜粋)

(6) FEMP3 による電子輸送過程の解明

この結果、電子の輸送は、1) 周方向に発生する電位振動 (電位不安定性に由来するもの)、2) 電位振動によって生じる電子 ExB ドリフトによる磁場直行輸送、3) オリフィス近傍の 3次元電位構造に起因する ExB 輸送、によってオリフィスを通過していくことが明らかとなった。

(a) ポテンシャル

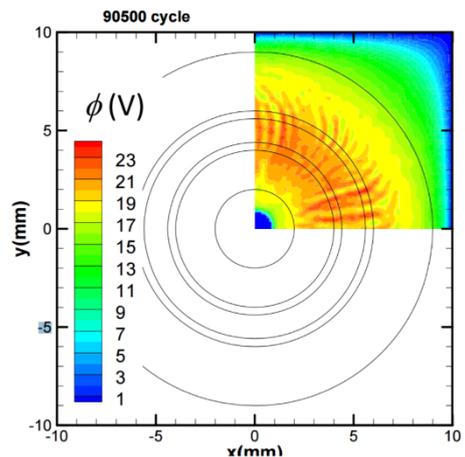


図 6: 周方向による発生する電位振動の様子 (業績発表論文・学会 5 より抜粋)

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] (全て査読あり) (計 12 件)

- 1) Hiramoto, K., Nakagawa, Y., Koizumi, H., and Takao, Y., "Effects of E×B drift on electron transport

- across the magnetic field in a miniature microwave discharge neutralizer," Physics of Plasmas (accepted).
- 2) 小泉 宏之: 超小型深宇宙探査機 PROCYON 推進系: 開発から宇宙運用までの道のりと教訓, プラズマ・核融合学会誌, Vol.92, No.7, pp. 501 - 513, 2016.
 - 3) Takao, Y., Hiramoto, K., Nakagawa, Y., Kasagi, Y., Koizumi, H., and Komurasaki, K., "Electron extraction mechanisms of a micro-ECR neutralizer," Japanese Journal of Applied Physics, Volume 55, Number 7S2, 2016
 - 4) 柳沼和也, 小泉 宏之, 河原大樹, 浅川純, 中川悠一, 稲垣匡志, 笠木友介, 五十里哲, 尾崎直哉, 船瀬龍, 小紫公也: 小型衛星用電気推進の推力ベクトル管理方法の提案と実証, 日本航空宇宙学会論文集, Vol. 64, No.2, pp.131-138, 2016.
 - 5) Koizumi, H., Kawahara, H., Yaginuma, K., Asakawa, J., Nakagawa, Y., Nakamura, Y., Kojima, S., Matsuguma, T., Funase, R., Nakatsuka, J., and Komurasaki, K., Initial Flight Operations of the Miniature Propulsion System installed on Small Space Probe: PROCYON, Transactions of Japan Soc. for Aeronautical and Space Sci., Aerospace Technology Japan, Voll. 14, Pb_13-Pb_22, 2016.
 - 6) Takao, Y., Koizumi, H., Komurasaki, K., Eriguchi, K., and Ono, K., "Three-dimensional particle-in-cell simulation of a miniature plasma source for a microwave discharge ion thruster," Plasma Sources Sci. Technol., 23 064004, 2014.
 - 7) Takao, Y., Koizumi, H., Kasagi, Y., and Komurasaki, K., "Investigation of Electron Extraction from a Microwave Discharge Neutralizer for a Miniature Ion Propulsion System," Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, Vol. 14, No. ists30, Sep. 2016, pp. Pb_41-Pb_46.
 - 8) 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.
 - 9) Sugita, Y., Koizumi, H., Kuninaka, H., Yamagiwa, Y., and Matsui, M., "Number Density Measurement of Neutral Particles in a Miniature Microwave Discharge Ion Thruster," Trans. JSASS Space Tech. Japan, Vol. 12, pp.Tb_31-Tb_35, 2014.
 - 10) 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.
 - 11) 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向上に関する研究, プラズマ応用科学, Vol. 21(2), pp.135-140, 2013.
 - 12) 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
- [学会発表] (計 32 件)
- 1) 平本 謙太, 中川 悠一, 小泉 宏之, 鷹尾 祥典, "小型マイクロ波放電式中和器を対象とした 3次元粒子計算とその高速化への取り組み," 平成 28 年度宇宙輸送シンポジウム, 宇宙科学研究所 (神奈川県・相模原), 2017 年 1 月 19 日
 - 2) Takao, Y., Hiramoto, K., Nakagawa, Y., Kasagi, Y., Koizumi, H., Komurasaki, K., "Electron Extraction Mechanisms of a Micro ECR Neutralizer," Joint Conference of the 68th Gaseous Electronics Conference, Hawaii(USA), Oct 12, 2016
 - 3) Takao, Y., Hiramoto, K., Nakagawa, Y., Koizumi, H., Komurasaki, K., "Electron drift across the magnetic field in a micro-ECR neutralizer," 69th Annual Gaseous Electronics Conference, Bochum(Germany), Oct 10, 2016
 - 4) 小泉 宏之, 中川 悠一, 富田 大貴, 飯田 未来, 倉重 宏康, 河原 大樹, 小紫 公也, "改良型小型イオン推進システム MIPS-A エンジニアリングモデルの開発状況," 第 60 回宇宙科学技術連合講演会, 函館アリーナ (北海道・函館), 2016 年 9 月 6 日
 - 5) 平本 謙太, 中川 悠一, 小泉 宏之, 小紫 公也, 鷹尾 祥典, "小型マイクロ波放電式中和器のプラズマ源における E×B ドリフトの効果," 第 60 回宇宙科学技術連合講演会, 函館アリーナ (北海道・函館), 2016 年 9 月 6 日
 - 6) Hiramoto, K., Nakagawa, Y., Koizumi, H., Komurasaki, K., Takao, Y., "3D Particle Simulation for Electron Extraction Mechanisms of a Miniature Microwave Discharge Neutralizer," Propulsion and Energy Forum, 52nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Salt lake(USA), July 25, 2016
 - 7) Nakagawa, Y., Kawahara, H., Koizumi, H., Komurasaki, K., "Fundamental Experiments with Liquid Propellants for the Microwave-discharge Ion Thruster," Space Propulsion 2016, Roma(Italy), Apr 16, 2016
 - 8) 河原 大樹, 中川 悠一, 小泉 宏之, 小紫 公也, "水を推進剤とした小型衛星用イオンスラスタの加速時の電流特性," 平成 27 年度宇宙輸送シンポジウム, 宇宙科学研究所 (神奈川県・相模原), 2016 年 1 月 15 日
 - 9) 平本 謙太, 中川 悠一, 小泉 宏之, 小紫 公也, 鷹尾 祥典, "小型マイクロ波放電式中和器を対象とした電子引き出し機構の 3次元粒子計算解析," 平成 27 年度宇宙輸送シンポジウム, 宇宙科学研究所 (神奈川県・相模原), 2016 年 1 月 15 日
 - 10) 中川 悠一, 小泉 宏之, 笠木 友介, 河原 大樹, 鷹尾 祥典, 平本 謙太, 小紫 公也, "導電性回路印刷技術を用いた面型プローブによる 10 mm 級プラズマ源の測定," 第 59 回宇宙科学技術連合講演会, かがしま県民交流センター (鹿児島県・鹿児島), 2015 年 10 月 2 日
 - 11) 小泉 宏之, 河原 大樹, 柳沼 和也, 浅川 純, 中川 悠一, 中村 友祐, 松隈 俊大, 小島 隼一, 船瀬 龍, 小紫 公也, 中塚 潤一, "イオンスラスタおよびコールドガススラスタを用いた超小型推進システムの深宇宙作動実証に関する報告," 第 59 回宇宙科学技術連合講演会, かがしま県民交流センター (鹿児島県・鹿児島), 2015 年 10 月 2 日
 - 12) 河原 大樹, 中川 悠一, 小泉 宏之, 小紫 公也, "水およびブタンの小型衛星用イオンスラスタへの適用," 第 59 回宇宙科学技術連合講演会, かがしま県民交流センター (鹿児島県・鹿児島), 2015 年 10 月 2 日
 - 13) 平本 謙太, 中川 悠一, 小泉 宏之, 小紫 公也, 鷹尾 祥典, "小型マイクロ波放電式中和器のプラズマ源における E×B ドリフトの効果," 第 59 回宇宙科学技術連合講演会, かがしま県民交流センター (鹿児島県・鹿児島), 2015 年 10 月 2 日
 - 14) Koizumi, H., Kawahara, H., Yaginuma, K., Asakawa, J., Nakagawa, Y., Nakatsuka, J., Ikari, S., Funase, R., Komurasaki, K., "On-orbit Performance of a Miniature Propulsion System on a 70 kg Space Probe to Explore Near-Earth Asteroids," Small Satellite Conference 2015, Logan(USA), Aug 10, 2015
 - 15) Koizumi, H., Kawahara, H., Yaginuma, K., Asakawa, J., Funase, R., Komurasaki, K., "In-Flight Operation of the Miniature Propulsion System installed on Small Space Probe: PROCYON," 34th International Electric Propulsion Conference, 神戸コンベンションセンター (兵庫県・神戸), July 3, 2015
 - 16) Kawahara, H., Yaginuma, K., Asakawa, J.,

- Nakagawa, Y., Koizumi, H., Funase, R., Komurasaki, K., "Ground Experiment for the Small Unified Propulsion System: I-COUPS Installed on the Small Space Probe: PROCYON," 34th International Electric Propulsion Conference, 神戸コンベンションセンター (兵庫県・神戸), July 3, 2015
- 17) Takao, Y., Koizumi, H., Kasagi, Y., Komurasaki, K., "Investigation of Electron Extraction from a Microwave Discharge Neutralizer for a Miniature Ion Propulsion System," 34th International Electric Propulsion Conference, 神戸コンベンションセンター (兵庫県・神戸), July 3, 2015
- 18) 河原 大樹, 中川 悠一, 小泉 宏之, 小紫 公也, "小型衛星用イオンスラスタ液化ガス駆動についての検証," 平成 26 年度宇宙輸送シンポジウム, 宇宙科学研究所 (神奈川県・相模原), 2015 年 1 月 15 日
- 19) 小泉 宏之, 河原 大樹, 柳沼 和也, 浅川 純, 笠木 友介, 稲垣 匡志, 小紫 公也, 船瀬 龍, "ほどよし 4 号および PROCYON 搭載の小型イオンスラスタの初期運用報告," 平成 26 年度宇宙輸送シンポジウム, 宇宙科学研究所 (神奈川県・相模原), 2015 年 1 月 15 日
- 20) 鷹尾 祥典, 小泉 宏之, 笠木 友介, 小紫 公也, "小型イオン推進システムのマイクロ波放電式中和器を対象とした 3 次元粒子計算," 平成 26 年度宇宙輸送シンポジウム, 宇宙科学研究所 (神奈川県・相模原), 2015 年 1 月 15 日
- 21) 鷹尾 祥典, 小泉 宏之, 小紫 公也, "マイクロ波/高周波プラズマ源を用いた超小型イオンスラスタ," Plasma Conference 2014, 朱鷺メッセ (新潟県・新潟), 2014 年 11 月 18 日
- 22) 稲垣 匡志, 笠木 友介, 浅川 純, 河原 大樹, 柳沼 和也, 小泉 宏之, 船瀬 龍, 小紫 公也, "イオンスラスタとコールドガスジェット 複合システム(I-COUPS)における 小型イオンスラスタの推力ベクトル中心測定," 第 5 8 回宇宙科学技術連合講演会, 長崎ブリックホール (長崎県・長崎), 2014 年 11 月 13 日
- 23) 笠木 友介, 稲垣 匡志, 浅川 純, 河原 大樹, 柳沼 和也, 小泉 宏之, 船瀬 龍, 小紫 公也, "イオンスラスタ・コールドガススラスタ統合小型推進システム I-COUPS における 中和器特性の把握と性能の改良," 第 5 8 回宇宙科学技術連合講演会, 長崎ブリックホール (長崎県・長崎), 2014 年 11 月 13 日
- 24) 小泉 宏之, 笠木 友介, 稲垣 匡志, 河原 大樹, 柳沼 和也, 浅川 純, 小紫 公也, "小型衛星用推進機-マイクロスラスタの開発と今後の課題," 第 5 8 回宇宙科学技術連合講演会, 長崎ブリックホール (長崎県・長崎), 2014 年 11 月 13 日
- 25) Koizumi, H., Inagaki, T., Kasagi, Y., Naoi, T., Hayashi, T., Funase, R., Komurasaki, K., "Unified Propulsion System to Explore Near-Earth Asteroids by a 50 kg Spacecraft," Small Satellite Conference 2014, Logan(USA), Aug 5, 2014
- 26) Koizumi, H., Inagaki, T., Naoi, T., Kasagi, Y., Komurasaki, K., Aoyama, J., Yamaguchi, K., "Development of the Miniature Ion Propulsion System: MIPS for the 50-kg-Nano-satellite HODOYOSHI-4," Space Propulsion 2014, Colognet(Germany), May 21, 2014
- 27) 小泉 宏之, 直井 太郎, 稲垣 匡志, 笠木 友介, 船瀬 龍, 小紫 公也, "イオンスラスタ・コールドガススラスタ統合小型推進システム I-COUPS の提案と開発," 平成 25 年度宇宙輸送シンポジウム, 宇宙科学研究所 (神奈川県・相模原), 2014 年 1 月 17 日
- 28) 笠木 友介, 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の中和器におけるオリフィス形状変化が性能に与える影響," 平成 25 年度宇宙輸送シンポジウム, 宇宙科学研究所 (神奈川県・相模原), 2014 年 1 月 17 日
- 29) 稲垣 匡志, 小泉 宏之, 小紫 公也, "イオンスラスタとコールドガスジェットのガス統合推進システムの推進剤最適化検討," 平成 25 年度宇宙輸送シンポジウム, 宇宙科学研究所 (神奈川県・相模原), 2014 年 1 月 17 日
- 30) 直井 太郎, 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の伝送線路形状によるマイクロ波吸収率の定式化," 平成 25 年度宇宙輸送シンポジウム, 宇宙科学研究所 (神奈川県・相模原), 2014 年 1 月 17 日
- 31) 稲垣 匡志, 小泉 宏之, 船瀬 龍, 小紫 公也, "マイクロ波放電式小型イオンスラスタとコールドガスジェット複合システムの超小型深宇宙探査機への適用," 第 5 7 回宇宙科学技術連合講演会, 米子コンベンションセンター (鳥取県・米子), 2013 年 10 月 5 日
- 32) 直井 太郎, 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マイクロ波伝送線路形状とプラズマによるマイクロ波吸収率の関係," 第 5 7 回宇宙科学技術連合講演会, 米子コンベンションセンター (鳥取県・米子), 2013 年 10 月 5 日
- [図書] (計 0 件): なし
- [産業財産権]
- 出願状況 (計 0 件): なし
- 取得状況 (計 0 件): なし
- [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) ホームページ (鷹尾研究室)
<http://www.takao-lab.ynu.ac.jp/>
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
小泉 宏之 (KOIZUMI, Hiroyuki), 東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授
研究者番号: 40361505
- (2) 研究分担者
鷹尾 祥典 (TAKAO, Yoshinori), 横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号: 80552661
- (3) 連携研究者: なし
- (4) 研究協力者
直井 太郎 (Naoi, T.), 東京大学・大学院工学系研究科・修士課程
稲垣 匡志 (Inagaki, T.), 東京大学・大学院工学系研究科・修士課程
笠木 友介 (Kasagi, Y.), 東京大学・大学院工学系研究科・修士課程
河原 大樹 (Kawahara, H.), 東京大学・大学院工学系研究科・修士課程
平本 謙太 (Hiramoto, K.), 横浜国立大学・大学院工学研究院・修士課程
中川悠一 (Nakagawa, Y.), 東京大学・大学院工学系研究科・修士課程