

令和 3 年 6 月 15 日現在

機関番号：82645

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H04973

研究課題名（和文）プラズマ推進機における基底準位のイオン生成・加速機構の解明

研究課題名（英文）Acceleration Mechanism of Xenon Ion in Electric Propulsion Thrusters

研究代表者

月崎 竜童 (Tsukizaki, Ryudo)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教

研究者番号：70720697

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 18,900,000円

研究成果の概要（和文）： 「はやぶさ2」に搭載されたマイクロ波イオンエンジンの推進剤・キセノン中性粒子密度を2光子レーザー誘起蛍光法にて計測することに成功した。イオンエンジンのイオン源では推力向上の前後で、運転状態における内部の数密度がどのように変化したのか定量的に計測し、中性粒子密度が増加すると励起中性粒子が多数生まれ、電離に寄与し性能向上に至ったという結論を得た。中和器においては、ブルーム領域における中性粒子のダイナミックな動きを初めて捉えることに成功した。かかる成果は、国内外の査読雑誌に13本出版され、現在も3本投稿中である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

イオンエンジンやホールスラストなどの宇宙用プラズマ推進機は、燃料の密度分布が推進性能や電源仕様に重大な影響を及ぼすにもかかわらず実験的に計測する手法が確立されてこなかった。本研究によって確立された中性粒子密度計測手法によって数値計算の妥当性が検証可能となっただけでなく、推進性能やプラズマの電流振動に中性粒子がどのような影響をもたらすのか明らかになった。プラズマ推進機のさらなる発展により、地球全域をカバーするインターネット衛星網や、太陽系の生命起源に迫る深宇宙探査などの新たな宇宙プロジェクトが可能となり、人類の宇宙進出が加速する。

研究成果の概要（英文）： In this research, two-photon absorption laser-induced fluorescence spectroscopy has been applied to the microwave ion thruster that was used for the asteroid explorer Hayabusa2. It revealed that neutrals are excited to metastable, which resulted in the increase of ionization rate and in the improvement of thrust performance in the ion source. Also, we applied it to the plume region of the microwave cathode. The dynamics of the xenon neutral number densities was revealed.

The above achievements have been published in 13 peer reviewed journal papers, and currently three review processes are undergoing.

研究分野：宇宙工学

キーワード：イオンエンジン マイクロ波 はやぶさ2 Destiny+ 中性粒子 2光子 LIF

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

1990 年台以降の電気推進の本格的な宇宙運用により、A.電気推進機による複数台同時打ち上げ、B.超低高度地球周回衛星、C. 小惑星探査機「はやぶさ」などによる深宇宙探査など、従来不可能だった宇宙ミッションが可能となってきた。これらのミッションは電気推進機の中でも、イオンを静電的・電磁的に加速し排気することで推力を生み出すホールスラスタやイオンエンジンによって実現されてきた。従来は寿命が数千時間と短く、推力発生部において加速されたイオンが推進機に衝突することで、スパッタリングによる損耗が進み寿命を迎えてきた。2000 年代以降の研究開発によってホールスラスタの磁場形状の最適化やイオンエンジンの加速グリッドの改善が進み、寿命は大幅に改善され寿命律速要因は、現在はカソードとなっている。カソードは、電子を排気する特性上、本質的にイオンを収集する役割を担っており、損耗が回避できない。「はやぶさ」のイオンエンジンでは地上試験では 2 万時間実証したカソードが宇宙環境では 1.2-1.5 万時間で作動を停止し、深刻な危機に陥った。その一因に流量を絞ったスロットリング運転が寿命性能に影響を及ぼしている可能性が指摘されているが、未だ詳細な解明には至っていない。¹⁾ また申請者は「はやぶさ 2」のイオンエンジンの開発を通じて、図 1 に示すように、マイクロ波カソードとイオン源との磁場配置でカソードの電位が大きく変化することを発見した。本研究では、小惑星探査機「はやぶさ 2」に搭載されたマイクロ波放電式イオンエンジンを対象に、発展的なレーザー誘起蛍光法を実証し、中性粒子とイオンの速度関数および密度分布を測定することで、寿命損耗を物理的に解明することを目的とする。

マイクロ波カソードを通じて確立した手法は、ホールスラスタ中のホローカソードにも適用できる。ホールスラスタにおいてもスラスタの磁場と電子の相互作用で、イオンが乱流を起こし異常加熱され、スパッタリング損耗が進む学説²⁾が提唱されており、中性粒子密度や磁場の最適化によって乱流現象を回避される措置が取られている。³⁾ マイクロ波カソードで実証した技術を適用し、電気推進の最大の問題であるカソードの損耗の全容解明を実現し、長寿命化を実現する。

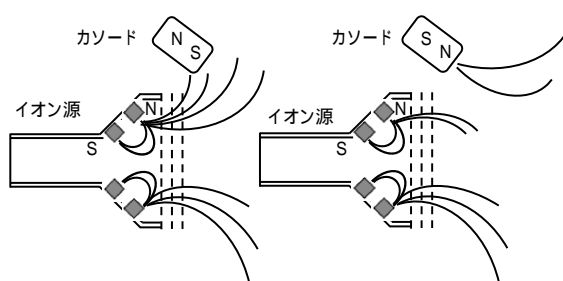


図1 マイクロ波カソードのイオン源との磁場形状組み合わせ。
左：イオン源磁石と磁場結合型、右：イオン源磁石と反転型

申請者は、若手研究(B)にて安価な半導体レーザーを用いて、レーザー誘起蛍光法によるイオンエンジンプルームの巡回速度測定に取り組み、**秒速 40km 程度で排気されるイオンに対し、約 1%(秒速 400m)程度垂直面上の巡回速度成分を、誤差 0.05%(秒速 20m)程度で検出することに成功した。研究の過程で、電荷交換衝突によってごくわずかに存在する低速イオンも検出可能であることを発見した。**しかし、従来のレーザー誘起蛍光法では、アクセスできる波長が可視光範囲内であり、励起準位を測定しており、励起準位と大多数を占める基底準位のイオンを関連付けるモデルの信頼性が低く、**基底準位を直接測定する重要性**を認識した。そこで 2 光子を用いて基底状態を直接励起させることで基底状態を直接測定できる 2 光子レーザー誘起蛍光法に着目し³⁾、基底イオンの速度測定を実現し、オリフィス近傍で発生する電荷交換衝突により、イオンがカソードへの逆流しスパッタリングしている現象を定量的に測定できるのではないかと、着想するにいたった。

2. 研究の目的

イオンエンジンやホールスラスタは近年、性能は大幅に向上し、本格的な宇宙運用に入った。スラスタの高性能化にともないカソードに要求される電流量は増加傾向にあり、カソードが電気推進システムの寿命を律速している。カソードの主たる劣化の一つに、高いエネルギーを持ったイオンが相対的に低い電位のカソードに衝突することで、スパッタリングによる損耗がおこり破壊にいたるが、イオン生成・加速過程の解明には至っていない。電子温度が比較的低いカソードプルームでは、基底状態のイオンを測定する必要があり、本研究では 2 光子レーザー誘起蛍光法を用い、イオンの数密度と速度分布関数を測定しカソード劣化のプロセスを解き明かすことを目的とする。本研究をカソードの寿命改善の端緒とし、電気推進に大きなブレイクスルーをもたらす。

3. 研究の方法

図 2 に示すように、レーザー誘起蛍光法の実験系をマイクロ波カソードへ適用する。 CW

外部共振器レーザから出た光は複数に分岐され、真空チャンバには光ファイバフィードスルーを通じて内部に導入される。真空チャンバでは測定対象のカソードが設置されており、レーザ光をブルームに照射する。以下の原理によって速度は求められる。

プラズマ中の電子のエネルギー準位間に等しい波長のレーザをプラズマに入射することで、電子を上準位に励起させる。

上準位に励起された電子が、違う波長の蛍光線を出し、他の準位に落ちる。

この蛍光線は、粒子の速度に依存して波長がシフトする。(ドップラーシフト) 放電管の蛍光線との波長シフトを求めることで粒子の速度を求めることができる。

研究の第一ステップとして、834.7 nm のレーザを用いて誘起させ、541.9 nm の蛍光線を検出する。既に申請者が若手研究(B)において、実績をあげており、励起準位であるものの誤差 ± 10 m/s 程度の精密なイオン速度関数が測定可能である。同時に予備実験として、翌年度取り組む、2光子レーザ誘起蛍光法の波長の選定を行う。先行研究では、複数の研究チームが基底状態の中性粒子の測定に成功しており^{4, 5)}、波長は 224 nm から 256 nm にまたがる。このなかで適切な波長を、選定する。選定には、角田宇宙

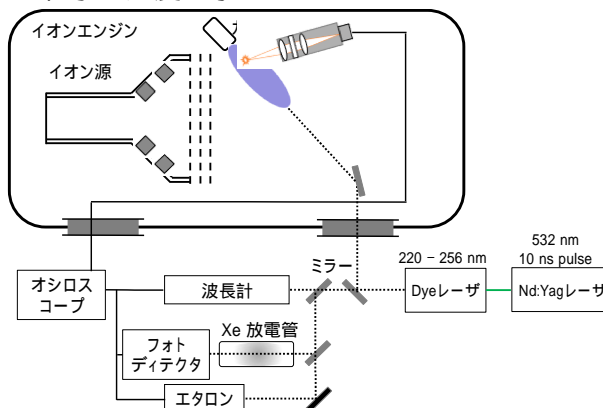


図2 マイクロ波カソードへの2光子レーザ誘起蛍光法の適用

センターに設置された色素レーザを借用し、Xe 管を持ちこみ測定する。また基底状態のイオンは先行研究の前例がなく、ハイリスクハイリターンである。イオンの基底を2光子で励起するには、レーザが発信可能な 220 nm を第1候補とし、色素をレーザと同時に購入する。

4. 研究成果

Xe イオンの基底の数密度計測の成功には至っていないものの、図3に示すようにXe中性粒子の計測には、マイクロ波イオン源の内部およびカソードのブルーム領域にて成功した。図3左はイオン源内部における、①エンジン作動前(Xeガスのみ投入)、②プラズマ点火、③プラズマ点火しさらに加速状態の3つの蛍光信号のスペクトラムを比較したものである。3者の信号を規格化すると同じ形状であり、温度や各種広がりの影響は数%以内の精度で一致している。規格化前の面積に基づき、エンジン加速状態の数密度を算出したものが右図の実線である。計測点はイオン源の導波管部の1点であるが、イオンエンジン加速状態での中性粒子の内部密度計測に初めて成功した。破線がエンジン全体を一様に仮定した際の理論的な見積りであるが、横軸の流量に対して約1割程度の差が見られるが、これは中性粒子が実際には一様ではなく局所的な分布をもっていることに起因している。一方でグラフの形状については理論式と計測値は、急激に密度が立ち上がる特徴的な傾向をもっている点で一致している。放電室(DC)から推進剤を投入することで導波管(WG)投入時よりもエンジン内部の中性粒子密度が抑えられ、よりイオンとして外部に排気されていることが裏付けられている。カソードにおいてもブルームの発出前後における中性粒子のダイナミクスが捉えることに成功し、13件の査読論文を出版し、現在も2本投稿中である。

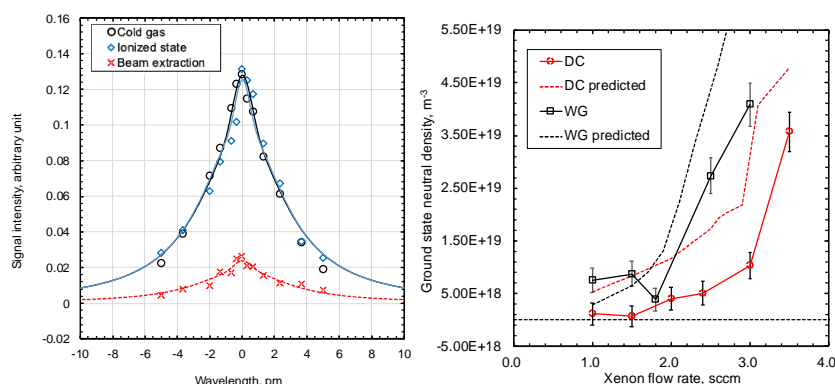


図3 2光子レーザ誘起蛍光法によるイオン源内部の計測結果の比較(左)と基底中性粒子の数密度変化(右)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 13件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 12件）

1. 著者名 R. Shirakawa, Y. Yamashita, D. Koda, R. Tsukizaki, Y. Shimizu, M. Tagawa and K. Nishiyama	4. 巻 174
2. 論文標題 Investigation and experimental simulation of performance deterioration of microwave discharge ion thruster $\mu 10$ during space operation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Acta Astronautica	6. 最初と最後の頁 367-376
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actaastro.2019.10.005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Yamashita, Y., Tani, Y., Tsukizaki, R., Koda, D., and Nishiyama, K.	4. 巻 18
2. 論文標題 Characteristics of Plasma and Gas in Microwave Discharge Ion Thruster $\mu 10$ Using Kinetic Particle Simulation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES	6. 最初と最後の頁 57-63
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2322/tastj.18.57	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Y. Yamashita, R. Tsukizaki, K. Kinefuchi, D. Koda, and K. Nishiyama	4. 巻 168
2. 論文標題 Neutral ground state particle density measurement of xenon plasma in microwave cathode by two-photon laser-induced fluorescence spectroscopy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Vacuum	6. 最初と最後の頁 108846
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.vacuum.2019.108846	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Y. Yamashita, Y. Tani, R. Tsukizaki, D. Koda, and K. Nishiyama	4. 巻 7
2. 論文標題 Numerical investigation of plasma properties for the microwave discharge ion thruster $\mu 10$ using PIC-MCC simulation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 73510
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5097661	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yamashita Yusuke, Tsukizaki Ryudo, Yamamoto Yuta, Koda Daiki, Nishiyama Kazutaka, Kuninaka Hitoshi	4. 巻 27
2. 論文標題 Azimuthal ion drift of a gridded ion thruster	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Plasma Sources Science and Technology	6. 最初と最後の頁 105006 ~ 105006
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6595/aae29b	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Tsukizaki Ryudo, Yamamoto Yuta, Koda Daiki, Yusuke Yamashita, Nishiyama Kazutaka, Kuninaka Hitoshi	4. 巻 27
2. 論文標題 Azimuthal velocity measurement in the ion beam of a gridded ion thruster using laser-induced fluorescence spectroscopy	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Plasma Sources Science and Technology	6. 最初と最後の頁 015013 ~ 015013
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6595/aa9f9a	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ryudo Tsukizaki, Yoshitaka Tani, Satoshi Hosoda, Kazutaka Nishiyama, and Hitoshi Kuninaka	4. 巻 10
2. 論文標題 Effect of Throttling Operation on Lifetime of Microwave Discharge Cathode	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Frontier of Applied Plasma Technology	6. 最初と最後の頁 pp.1-6
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 有
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 Yamashita Yusuke, Tsukizaki Ryudo, Daiki Koda, Tani Yoshitaka, Shirakawa Ryo, Hattori Kana, Nishiyama Kazutaka	4. 巻 185
2. 論文標題 Plasma hysteresis caused by high-voltage breakdown in gridded microwave discharge ion thruster $\mu 10$	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Acta Astronautica	6. 最初と最後の頁 179 ~ 187
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actaastro.2021.05.001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Tsukizaki Ryudo, Yamashita Yusuke, Kinefuchi Kiyoshi, Nishiyama Kazutaka	4. 巻 190
2. 論文標題 Neutral atom density measurements of xenon plasma inside a μ 10 microwave ion thruster using two-photon laser-induced fluorescence spectroscopy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Vacuum	6. 最初と最後の頁 110269 ~ 110269
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.vacuum.2021.110269	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 TSUKIZAKI Ryudo, YAMASHITA Yusuke, KINEFUCHI Kiyoshi, NISHIYAMA Kazutaka	4. 巻 63
2. 論文標題 Application of Two-photon Laser-induced Fluorescence Spectroscopy to Microwave Cathode	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES	6. 最初と最後の頁 281 ~ 283
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2322/tjsass.63.281	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Morishita Takato, Tsukizaki Ryudo, Yamamoto Naoji, Kinefuchi Kiyoshi, Nishiyama Kazutaka	4. 巻 176
2. 論文標題 Application of a microwave cathode to a 200-W Hall thruster with comparison to a hollow cathode	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Acta Astronautica	6. 最初と最後の頁 413 ~ 423
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actaastro.2020.06.049	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Morishita Takato, Tsukizaki Ryudo, Morita Shunya, Koda Daiki, Nishiyama Kazutaka, Kuninaka Hitoshi	4. 巻 165
2. 論文標題 Effect of nozzle magnetic field on microwave discharge cathode performance	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Acta Astronautica	6. 最初と最後の頁 25 ~ 31
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actaastro.2019.08.025	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kinefuchi Kiyoshi, Nunome Yoshio, Cho Shinatora, Tsukizaki Ryudo, Chng Tat Loon	4. 巻 161
2. 論文標題 Two-photon absorption laser induced fluorescence with various laser intensities for density measurement of ground state neutral xenon	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Acta Astronautica	6. 最初と最後の頁 382 ~ 388
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actaastro.2019.03.018	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計13件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 13件)

1. 発表者名 Morishita T., Tsukizaki R., Yamamoto N., Nishiyama K., Kuninaka H.
2. 発表標題 Performance Characterization of a Microwave Discharge Cathode - Hall Thruster System
3. 学会等名 32nd International symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Morishita T., Tsukizaki R., Yamamoto N., Kubota K., Kinefuchi K., Nishiyama K., Kuninaka H.
2. 発表標題 Development of a Microwave Discharge Cathode for a 200 W Class Hall Thruster
3. 学会等名 36th International Electric Propulsion Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryudo Tsukizaki, Yusuke Yamashita, Kinefuchi Kiyoshi, Kazutaka Nishiyama, and Hitoshi Kuninaka
2. 発表標題 Neutral density measurement of microwave cathode by two photon laser-induced fluorescence spectroscopy
3. 学会等名 32nd International symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryudo Tsukizaki, Yusuke Yamashita, Kinefuchi Kiyoshi, Kazutaka Nishiyama, and Hitoshi Kuninaka
2. 発表標題 Neutral density measurement of microwave cathode by two photon absorption LIF
3. 学会等名 36th International Electric Propulsion Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yusuke Yamashita, Yoshitaka Tani, Ryudo Tsukizaki, Daiki Koda, Kazutaka Nishiyama, and Hitoshi Kuninaka
2. 発表標題 Numerical study of microwave discharge ion thruster
3. 学会等名 36th International Electric Propulsion Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yusuke Yamashita, Yoshitaka Tani, Ryudo Tsukizaki, Daiki Koda, Kazutaka Nishiyama, and Hitoshi Kuninaka
2. 発表標題 Plasma characteristics of microwave ion thrusters $\mu 10$ using 2D-PIC/MCC simulation
3. 学会等名 32nd International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yusuke Yamashita, Ryudo Tsukizaki, Yuta Yamamoto, Daiki Koda, Kazutaka Nishiyama, Hitoshi Kuninaka
2. 発表標題 2DPIC simulation and laser-induced fluorescence spectroscopy of the roll torque of the gridded ion thruster
3. 学会等名 2018 Joint Propulsion Conference AIAA (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ryudo Tsukizaki, Yuta Yamamoto, Yusuke Yamashita, Koda Taiki, Kazutaka Nishiyama and Hitoshi Kuninaka
2. 発表標題 Azimuthal Velocity Measurement of $\mu 10$ Microwave Ion Thruster by Laser Induced Fluorescence Spectroscopy
3. 学会等名 The 35th International Electric Propulsion Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Shunichiro Ide, Ryudo Tsukizaki, Hitoshi Kuninaka,
2. 発表標題 Evaluation of Quasisteady Operation of Applied Field 2DMPD Thruster using Electric Double-Layer Capacitors
3. 学会等名 The 35th International Electric Propulsion Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yusuke Oka, Ryudo Tsukizaki, Hitoshi Kuninaka
2. 発表標題 Magnetic Responsiveness of Magnetic Circuit composed of Electrical Steel for Hall Thruster
3. 学会等名 The 35th International Electric Propulsion Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Giulio Coral, Ryudo Tsukizaki, Kazutaka Nishiyama, Hitoshi Kuninaka
2. 発表標題 Electron Heating Model in $\mu 10$ Ion Thruster
3. 学会等名 The 35th International Electric Propulsion Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kiyoshi Kinefuchi, Yuya Oshio Nunome, Shinatora Cho, Ryudo Tsukizaki
2. 発表標題 Investigation of Twophoton LIF of Ground State Neutral Xe for Electric Propulsion Application
3. 学会等名 The 35th International Electric Propulsion Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Shunya Morita, Yoshitaka Tani, Daiki Koda, Ryudo Tsukizaki, Kazutaka Nishiyama, Hitoshi
2. 発表標題 A Study of Sputtering in Microwave Discharge Neutralizer using Quartz Crystal Microbalance
3. 学会等名 The 35th International Electric Propulsion Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

宇宙航空研究開発機構 電気推進研究室 https://stage.tksc.jaxa.jp/wp-ep/lab/publication/ 研究教育職員 月崎竜童 https://cv01.ufinity.jp/isas/index.php?action=pages_view_main&active_action=cvclient_view_main_init&cvid=rtsukizaki&display_type=cv&block_id=251#_251

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
研究協力者	西山 和孝 (Nishiyama Kazutaka) (60342622)	宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・准教授 (82645)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	森下 貴都 (Morishita Takato)	東京大学・大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻・日本学術振興会特別研究員DC2 (12601)	
研究協力者	山下 裕介 (Yamashita Yusuke)	東京大学・大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻・日本学術振興会特別研究員DC2 (12601)	
連携研究者	杵淵 紀世志 (Kinefuchi Kiyoshi) (90648502)	名古屋大学・工学研究科・准教授 (13901)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関