

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 7 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18H03815

研究課題名（和文）ホールスラストにおける異常輸送現象の解明

研究課題名（英文）Understanding of anomalous transport in Hall thrusters

研究代表者

山本 直嗣（Yamamoto, Naoji）

九州大学・総合理工学研究院・教授

研究者番号：40380711

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 38,300,000円

研究成果の概要（和文）：ホールスラストの推力電力比向上を阻害する電子の異常輸送に関して、異常輸送の物理機構解明のために、プラズマ揺動と異常輸送の関係を調査した。ある特定のプラズマ揺動は乱流の様相を示し、この揺動が放電電流と相関関係があることを明らかにした。さらにこの揺動は電離不安定性とも非線形結合していることが明らかになった。並行して数百Hzの低周波揺動も観察され、この低周波揺動がプラズマの乱流を抑制することを示唆された。並行して、これまで困難であったホールスラスト内部のプラズマ諸量計測のために、ピコ秒レーザー診断法を開発し、その優位性を示した。本手法により、異常輸送と揺動間の定量的な関係解明に貢献する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の最大の成果はホールスラストの異常輸送にはこれまであまり注目されてこなかったプラズマ乱流が影響していることを実験的に示したものであり、異常輸送を抑制し、推力電力比向上にはこのプラズマ乱流の制御が鍵となることを示したことである。この成果をさらに発展させ、プラズマ乱流の物理機構を解明することで、異常輸送の抑制が可能になり、推力電力比90 mN/kWを超えるホールスラスト開発への道が開ける。このホールスラストは宇宙利用コストの大幅な削減を通して安全安心社会の構築に貢献する。

研究成果の概要（英文）： To understand anomalous electron transport in a Hall thruster, plasma turbulence inside the acceleration channel was observed using a E-band microwave interferometer. The dependence of the amplitude of the turbulence on magnetic flux density, and the relations between the turbulence and other plasma perturbations and between the turbulence and the discharge current, were investigated through power spectral density and bi-coherence analysis. The turbulence has a positive relation to the discharge current, leads to anomalous electron transport inside the acceleration channel, and is coupled with ionization instability. Low frequency perturbations (several hundred Hertz) were observed; this low frequency perturbation could be a key to suppressing plasma turbulence. In addition, we showed usefulness of the short pulse width laser (picosecond laser) diagnostics for the measurement inside the Hall thrusters.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：ホールスラスト 異常輸送 プラズマ揺動 レーザー診断 マイクロ波干渉計測計 ピコ秒レーザー プラズマ乱流

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

小惑星探査機「はやぶさ」やボーイングのオール電化衛星の成功により、今後の軌道間輸送に化学推進機から電気推進機への移行が加速している。

電気推進は、「はやぶさ」で実証されたように、従来のエンジンと比較して5倍から10倍燃費がよいため、従来の化学推進と比べて1/10と劇的な燃料の低減が望める。その反面、宇宙空間で利用できる電力に限りがあるため、推力は小さいといった欠点がある。そのため、電力あたりの推力である推力電力比が重要な指標となっている。

電気推進の中でも、ホール電流を利用したホールスラスト(図1)はエネルギー変換効率が50%以上と高く、作動原理上高密度イオンを排出できるためコンパクトで、推力電力比が60 mN/kW以上とイオンエンジンの2倍以上大きい。このためJAXAが開発しているオール電化衛星の主推進機として、研究開発が進められている。電気推進で静止軌道に投入されるオール電化衛星は、衛星重量を半減できるが推力が小さいため、打ち上げから静止軌道投入まで半年かかる。衛星の早期運用や太陽電池の宇宙線による損傷を考慮すると、軌道投入までの期間は3ヶ月以内に収めるのが好ましい。3ヶ月で静止軌道へ投入するためには推力電力比を90 mN/kWまで上げる必要がある。

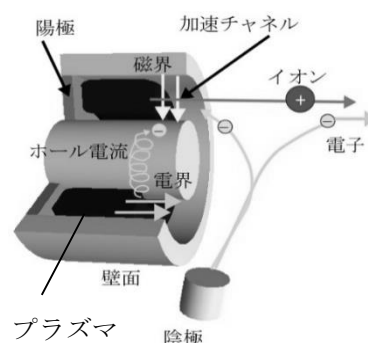


図1 ホールスラスト概念
電界と磁界によりイオンの生成・加速を制御する。

推力電力比向上に立ちだかる障壁が、電子の異常輸送である。ホールスラストはイオンを排出し、その反作用で推力を得るエンジンであるため、電子は推力に寄与しない。そのため電子電流は消費電力を増大させるだけである。ホールスラストにおいて、磁場を印加して電子電流を抑制しているが、電子は中性粒子との衝突による拡散によって陽極に向かう。電子の輸送において、磁場がある閾値を超える古典拡散モードから異常輸送モードに遷移し、電子電流が増えて推力電力比は2/3になってしまう。

申請者らが開発した5 kW級ホールスラストにおいて、プラズマ生成部に均一に中性粒子を供給できるようにプラズマ生成部の上流部の形状を変更したところ、異常輸送モードへの遷移は抑制され、その結果として推力電力比80 mN/kWを達成できた。しかしながら、なぜ異常輸送が抑制できたのか理論的に説明出来ず、結果として更なる抑制には至っておらず、最大推力電力比は80 mN/kWにとどまっている。

ゆえに推力電力比向上には「なぜ電子の異常輸送が起きるのか」、「どのようにすれば抑制することが出来るのか」という本研究の核心をなす学術的「問い」に答える必要がある。

2. 研究の目的

本研究課題の目的は、ホールスラストにおける異常輸送の物理機構を解明することである。異常輸送の解明は消費電力低減を可能にし、推力電力比90 mN/kWのホールスラスト開発への道が開ける。ホールスラスト内部の狭いプラズマ生成領域の物理量を計測し、計測された密度の空間的な不均一性や揺動の大きさを数値解析に落とし込み、異常輸送の原因となりうるのか検証する。検証を通して、異常輸送を引き起こす要因を解明し、得られた知見より推力電力比の大きいホールスラストを開発し、宇宙利用の低コスト化に貢献する。

オール電化衛星の有用性が実証された今、オール電化衛星の弱点である静止軌道までの半年間の期間を短縮することができれば、オール電化衛星への転換が一気に進み、宇宙利用コストの削減に貢献する。さらに将来の太陽光発電衛星の輸送費を JAXA が定めた目標の 3000 億に収める鍵となる技術であり、これらを通して、安全・安心社会の実現に貢献する。プラズマ物理においても、開発する技術は様々な揺動の解明に貢献し、核融合炉の閉じ込め性能改善等に貢献する。産業応用においては計測技術がプロセス用プラズマ源の均一化等の性能向上に貢献するなど波及効果は大きい。

3. 研究の方法

研究はプラズマ諸量の計測精度の向上、プラズマ揺動計測システムの構築、揺動と電子輸送の関係の 3 つに着目して進めてきた。

4. 研究成果

4.1 プラズマ諸量の計測精度の向上

中性粒子密度の高感度計測手法の確立を目指し、J. H. Grinstead らにより実験的に確認されているコヒーレントレイリー散乱に注目し実験を実施した。ポンプレーザーおよびプローブレーザーのエネルギーは、共に 8 mJ とした。散乱光の検出には ICCD カメラを用いた。信号の絶対強度を知るために、同様の光学系でレイリー散乱計測も併せて行った。この場合、ポンプレーザーは使用せず、プローブレーザーのみを使用した。

計測の結果、CRS によりレイリー散乱信号の 1000 倍以上の信号を確認できた。CRS はその原理から、対向するポンプレーザーのそれぞれのエネルギー、プローブレーザーのエネルギー、および交差する体積の積に比例して、信号強度が増加する。低圧ではレーザーエネルギーの増加が容易であり、レーザーエネルギー増加による信号強度増加が期待される。一方で、同計測では各レーザーの光軸上の大気揺らぎを敏感に感知するため、安定した信号観測には、そのための対策が必要であることがわかった。そこで対策を行って計測したところ、4 波混合のためのレーザー光軸調整が安定して行えることを確認した。しかし本研究で想定している低密度の中性粒子計測に対して計測を試みたところ、コヒーレントレイリー散乱の特性を活用できないことが明らかになった。

そこで、誘導ブリルアン散乱 (SBS) 現象を利用した、既存のナノ秒パルスレーザーのピコ秒パルス化を行い、迷光とレイリー散乱の分離による S/N 比の改善を進めた。プラズマ計測計測対象として高密度プラズマ (レーザー生成プラズマ) を用いた実験を行った。パルス圧縮前 (半値全幅で 8 ns のパルス幅) の環境では、プラズマ電子密度が 10^{24} m^{-3} 以下でなければ、強いプラズマ自発光 (制動放射光) が微弱なトムソン散乱信号に重畳し、信号検出は困難であった。一方、1 ns 以下のサブナノ秒パルス圧縮レーザーにて、50 mJ 以上のレーザー出力を用いた場合、 $5 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$ 程度の高密度プラズマであっても、トムソン散乱信号を観測可能とした。これは、レーザーのパルス幅圧縮に対応して、観測機器 (電子増倍型 CCD カメラ) のゲート幅を 1 ns 以下まで短くし、検出可能なトムソン散乱信号強度は弱めずに、自発光の時間積分強度を抑えることができたためである。迷光に関しては、ゲート幅を短くすることで、計測用チャンバーが概ね半径 50 cm 以上であれば、器壁散乱光とレーザーの散乱光は、光路長により分離できることを確認した。サブナノ秒パルス圧縮により、 10^{11} W/cm^2 以上の比較的高いレーザーパワー密度が容易に得られる。この場合、波長 6 nm 帯の新規軟 X 線源となるレーザー生成プラズマが発生可能となる。サブナノ秒レーザーは、プローブだけでなく、プラズマ生成用にも利用可能であり、併用した実験研究が行える。

4.2 プラズマ揺動計測システムの構築

広帯域計測が可能かつ、非侵入計測手法であるマイクロ波干渉法を用いた揺動計測システムを構築した。マイクロ波干渉法を用いたもう一つの理由として、マイクロ波はセラミックなどの誘電体を透過できるため、ホールスラストの壁面に穴を開けたりすることをせずに計測出来ることがあげられる。これは測定条件と作動条件の間に差異が無いことを意味し、計測としてのメリットが大きい。

開発したマイクロ波干渉計測システムの写真を図 2 に示す。このシステムを用いて算出された線密度の時間変化に対して、プラズマは半径方向に均一でその長さは加速チャンネル幅と同じ 15 mm と仮定して相対密度の時間履歴を算出するとともに、プラズマが無い状態との比較より絶対値の計測にも成功し、その値は 10^{18} m^{-3} と、プローブ等の計測とほぼ同じ値を示している。

図 3 に密度揺動の時間変化を高速フーリエ変換して求めた密度揺動のスペクトルを示す。計測器に 7.7 MHz のローパスフィルタを入れている関係上高周波成分は感度が落ちてはいるが、10 MHz までの揺動が計測できている。このようにホールスラストにおいて、注目しているプラズマ揺動が計測出来ることを確認した。

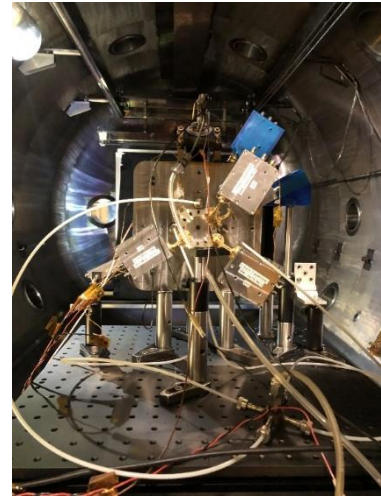


図 2 マイクロ波干渉計測システム

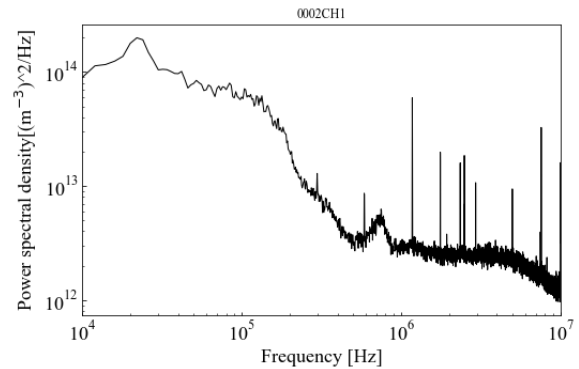


図 3 密度揺動のスペクトル例

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計28件（うち査読付論文 26件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 14件）

| | |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名 Kaneko Toshiro, Kato Hiromitsu, Yamada Hideaki, Yamamoto Muneaki, Yoshida Tomoko, Attri Pankaj, Koga Kazunori, Murakami Tomoyuki, Kuchitsu Kazuyuki, Ando Sugihito, Nishikawa Yasuhiro, Tomita Kentaro, Ono Ryo, Ito Tsuyohito, Ito Atsushi M., Eriguchi Koji, Nozaki Tomohiro, Tsutsumi Takayoshi, Ishikawa Kenji | 4. 巻 61 |
| 2. 論文標題 Functional nitrogen science based on plasma processing: quantum devices, photocatalysts and activation of plant defense and immune systems | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics | 6. 最初と最後の頁 SA0805 ~ SA0805 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac25dc | 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 Kouge Kouichiro, Tomita Kentaro, Hotta Junya, Pan Yiming, Tomuro Hiroaki, Morita Masayuki, Yanagida Tatsuya, Uchino Kiichiro, Yamamoto Naoji | 4. 巻 60 |
| 2. 論文標題 Time-resolved spatial profiles of electron density and temperature in hydrogen plasmas induced by radiation from laser-produced tin plasmas for extreme ultraviolet lithography light sources | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics | 6. 最初と最後の頁 066002 ~ 066002 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/abfadc | 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 Kouge Kouichiro, Tomita Kentaro, Hotta Junya, Pan Yiming, Tomuro Hiroaki, Yanagida Tatsuya, Uchino Kiichiro, Yamamoto Naoji | 4. 巻 - |
| 2. 論文標題 Feasibility study on reactive ion etching occurrence in EUV-induced photoionized hydrogen plasmas based on electron temperature and electron density measurements | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics | 6. 最初と最後の頁 - |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac5d25 | 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 Pan Yiming, Tomita Kentaro, Uchino Kiichiro, Sunahara Atsushi, Nishihara Katsunobu | 4. 巻 14 |
| 2. 論文標題 Time-resolved two-dimensional measurements of the electron density, electron temperature, and drift velocity of laser-produced carbon plasmas using the ion feature of collective laser Thomson scattering | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Applied Physics Express | 6. 最初と最後の頁 066001 ~ 066001 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/abfec | 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 Inoue Atsumu, Edazawa Yuya, Yamamoto Naoji, Nakano Masakatsu | 4. 巻 20 |
| 2. 論文標題 Design of Ion Engine Grid System Using Genetic Algorithm and Visualization of Searching Process | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 AEROSPACE TECHNOLOGY JAPAN, THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES | 6. 最初と最後の頁 114 ~ 117 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2322/astj.20.114 | 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 Kinoshita Jumpei, Shiraki Ryo, Yamamoto Naoji, Nakano Masakatsu, Ohkawa Yasushi, Funaki Ikkoh | 4. 巻 69 |
| 2. 論文標題 Neutralization Performance with Two Field Emission Cathodes in an Ion Engine | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 JOURNAL OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES | 6. 最初と最後の頁 215 ~ 218 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2322/jjsass.69.215 | 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 KINOSHITA Jumpei, IKEDA Ryo, ADACHI Misaki, SHIRAKI Ryo, MORITA Taichi, YAMAMOTO Naoji, NAKANO Masakatsu, OHKAWA Yasushi, FUNAKI Ikkoh | 4. 巻 64 |
| 2. 論文標題 Position and Attitude Tolerances of Carbon Nanotube Field Emission Cathode as a Neutralizer in an Ion Engine System | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES | 6. 最初と最後の頁 288 ~ 291 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2322/tjsass.64.288 | 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 CHONO Masatoshi, YAMAMOTO Naoji, TSUKIZAKI Ryudo, MORISHITA Takato, KUBOTA Kenichi, CHO Shinatra, KINEFUCHI Kiyoshi, TAKAHASHI Toru | 4. 巻 64 |
| 2. 論文標題 Performance of a Miniature Hall Thruster and an In-house PPU | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES | 6. 最初と最後の頁 189 ~ 192 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2322/tjsass.64.189 | 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 M. Nonaka, J. Yamasaki, Y. Murayama, T. Kobayashi, E. Maruyama, H. Ito, S. Yokota, K. Shimamura | 4. 巻 14 |
| 2. 論文標題 Development of Hall Thruster for Observing Rotating Spoke to Examine Anomalous Electron Transport | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Frontier of Applied Plasma Technology | 6. 最初と最後の頁 3-14 |
| 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 Kawazu Masato, Fuchigami Hirotaka, Yamamoto Naoji, Tamida Taichiro | 4. 巻 20 |
| 2. 論文標題 Neural Network Prediction of Discharge Current using Plume Shape and Operational Parameters in Hall Thrusters | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 AEROSPACE TECHNOLOGY JAPAN, THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES | 6. 最初と最後の頁 47 ~ 51 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2322/astj.20.47 | 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 Kwabara Naoya, Chono Masatoshi, Yamamoto Naoji, Kuwahara Daisuke | 4. 巻 - |
| 2. 論文標題 Electron Density Measurement Inside a Hall Thruster Using Microwave Interferometry | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Propulsion and Power | 6. 最初と最後の頁 1 ~ 4 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2514/1.B38163 | 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 KUWABARA Naoya, CHONO Masatoshi, MORITA Taichi, YAMAMOTO Naoji | 4. 巻 19 |
| 2. 論文標題 Anomalous Electron Transport in Hall Thrusters: Electric Field Fluctuation Measurement | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES, AEROSPACE TECHNOLOGY JAPAN | 6. 最初と最後の頁 81 ~ 86 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2322/tastj.19.81 | 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 INOUE Atsumu, YAMAMOTO Naoji, NAKAMURA Yusuke, NAKANO Masakatsu | 4. 巻 19 |
| 2. 論文標題 Optimization of Ion Thruster Grids Using JIEDI Code with Genetic Algorithm | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES, AEROSPACE TECHNOLOGY JAPAN | 6. 最初と最後の頁 75 ~ 80 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2322/tastj.19.75 | 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 安達 美咲, 山本 直嗣, 中野 正勝, 大川 恭志, 船木 一幸 | 4. 巻 5 |
| 2. 論文標題 イオンエンジンの推進剤としての昇華性物質の検討 | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 宇宙太陽発電 | 6. 最初と最後の頁 65 ~ 67 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.24662/ssps.5.0_65 | 査読の有無 無 |
| 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 Egawa Yusuke, Yamamoto Naoji, Yamaguchi Atsushi, Morita Taichi | 4. 巻 91 |
| 2. 論文標題 Erosion sensor using time-resolved cavity ring-down spectroscopy for Hall thrusters | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments | 6. 最初と最後の頁 113105 ~ 113105 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5127788 | 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 Kojima Tomihiko, Morita Taichi, Yamamoto Naoji | 4. 巻 36 |
| 2. 論文標題 Analysis of plasma detachment in the magnetic thrust chamber using full particle-in-cell simulation | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 High Energy Density Physics | 6. 最初と最後の頁 100814 ~ 100814 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.hedp.2020.100814 | 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 張 科寅、月崎 竜童、後藤 大亮、松永 芳樹、艸分 宏昌、渡邊 裕樹、大川 恭志 | 4. 巻 5 |
| 2. 論文標題 電気推進機による軌道間輸送の質量とコストに関する検討 | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 宇宙太陽発電 | 6. 最初と最後の頁 101 ~ 106 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.24662/ssps.5.0_101 | 査読の有無 無 |
| 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 Pan Yiming, Tomita Kentaro, Kawai Yoshinobu, Matsukuma Masaaki, Uchino Kiichiro | 4. 巻 60 |
| 2. 論文標題 Measurements of spatial distributions of electron density and temperature of 450 MHz UHF plasma using laser Thomson scattering | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics | 6. 最初と最後の頁 SAAB03 ~ SAAB03 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/abbb6b | 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 山本 直嗣 | 4. 巻 68 |
| 2. 論文標題 ホールスラスト | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 日本航空宇宙学会誌 | 6. 最初と最後の頁 120 ~ 120 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14822/kjsass.68.4_120 | 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 Tomita Kentaro, Inada Yuki, Komuro Atsushi, Zhang Xiang, Uchino Kiichiro, Ono Ryo | 4. 巻 53 |
| 2. 論文標題 Measurement of electron velocity distribution function in a pulsed positive streamer discharge in atmospheric-pressure air | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Physics D: Applied Physics | 6. 最初と最後の頁 08LT01 ~ 08LT01 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6463/ab58b4 | 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 Naruya Hiroike and Naoji Yamamoto | 4. 巻 12 |
| 2. 論文標題 Investigation of Physical Phenomena inside Microwave Discharge Neutralizer Using Numerical Analysis | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Frontier of Applied Plasma Technology | 6. 最初と最後の頁 7-12 |
| 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 オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名 Yoshikawa M., Kohagura J., Shima Y., Nakanishi H., Mouri T., Suto S., Nojiri K., Terakado A., Ezumi N., Sakamoto M., Nakashima Y., Minami R., Yamada I., Yasuhara R., Funaba H., Minami T., Kenmochi N., Kuwahara D., Meiden H. Van der | 4. 巻 14 |
| 2. 論文標題 First electron temperature and density measurements of D-module plasma in GAMMA 10/PDX using Thomson scattering and microwave interferometer systems | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Instrumentation | 6. 最初と最後の頁 P06033 ~ P06033 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-0221/14/06/P06033 | 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 Yamamoto Naoji, Morita Taichi, Ohkawa Yasushi, Nakano Masakatsu, Funaki Ikkoh | 4. 巻 35 |
| 2. 論文標題 Ion Thruster Operation with Carbon Nanotube Field Emission Cathode | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Propulsion and Power | 6. 最初と最後の頁 490 ~ 493 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2514/1.B37214 | 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 Fuchigami Hirotaka, Chono Masatoshi, Yamamoto Naoji | 4. 巻 66 |
| 2. 論文標題 Prediction of Discharge Current using Neural Network in Hall Thruster | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 JOURNAL OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES | 6. 最初と最後の頁 143 ~ 145 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2322/jjsass.66.143 | 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 TAKESUE Ippei, KAWAHARA Yutarō, IJIMA Kensuke, USHIO Kouichi, YAMAMOTO Naoji, MORITA Taichi, NAKANO Masakatsu, OHKAWA Yasushi, FUNAKI Ikkoh | 4. 巻 16 |
| 2. 論文標題 Development of Variable Time-Averaged Thrust System by Controlling Duty Ratio of Ion Beam Extraction in Ion Thrusters | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES, AEROSPACE TECHNOLOGY JAPAN | 6. 最初と最後の頁 388 ~ 391 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2322/tastj.16.388 | 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 Mase A., Kogi Y., Kuwahara D., Nagayama Y., Ito N., Maruyama T., Ikezi H., Wang X., Inutake M., Tokuzawa T., Kohagura J., Yoshikawa M., Shinohara S., Suzuki A., Sakai F., Yamashika M., Tobias B. J., Muscatello C., Ren X., Chen M., Domier C. W., Luhmann N. C. | 4. 巻 3 |
| 2. 論文標題 Development and application of radar reflectometer using micro to infrared waves | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Advances in Physics: X | 6. 最初と最後の頁 1472529 ~ 1472529 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/23746149.2018.1472529 | 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 該当する |

| | |
|--|---------------------------------|
| 1. 著者名 TSUCHIYA Hayato, KUWAHARA Daisuke, TOKUZAWA Tokihiko, NAGAYAMA Yoshio, TAKEMURA Yuki, LHD Experiment Group | 4. 巻 13 |
| 2. 論文標題 Installation of New Electron Cyclotron Emission Imaging in LHD | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research | 6. 最初と最後の頁 3402063 ~ 3402063 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.13.3402063 | 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36件 (うち招待講演 9件 / うち国際学会 17件)

| |
|--|
| 1. 発表者名 D. Kuwahara, T. Furukawa, Y. Ishigami, J. Miyazawa, T. Mutoh, and S. Shinohara, |
| 2. 発表標題 Study of advanced gas feeding methods for radio-frequency plasma thruster |
| 3. 学会等名 AAPPS-DPP2020 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 張科寅, 渡邊裕樹, 松永芳樹, 月崎竜童, 大川恭志, |
| 2. 発表標題 1kW級ホールスラストの100時間級作動試験と数値シミュレーション |
| 3. 学会等名 FY2020宇宙輸送シンポ, 相模原 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 桑原 直也, 山本 直嗣, 桑原 大介 |
| 2. 発表標題 マイクロ波干渉法を用いたホールスラストのブルームにおける電子密度計測 |
| 3. 学会等名 FY2020宇宙輸送シンポ, 相模原 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 江川裕貴、山本直嗣、河津 誠人 |
| 2. 発表標題 ホールスラストにおける中和現象の解明 に向けた プラズマ計測 |
| 3. 学会等名 FY2020宇宙輸送シンポ, 相模原 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 山本 直嗣, 江川 裕貴, 木下 順平, 中野正勝, 船木 一幸, 大川 恭志 |
| 2. 発表標題 電気推進機における中和現象の解明 |
| 3. 学会等名 令和2年度宇宙科学に関する室内実験シンポジウム |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 胡澤豊、廣池 匠哉、山本直嗣 |
| 2. 発表標題 アルゴンを推進剤とするイオンエンジンの性能向上に関する研究 |
| 3. 学会等名 第 6 回宇宙太陽発電(SSPS)シンポジウム |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 K. Tomita, |
| 2. 発表標題 Thomson scattering diagnostics of a streamer discharge in atmospheric-pressure air and laser-produced plasmas for light sources |
| 3. 学会等名 The 73rd Annual Gaseous Electronics Conference, October 5 - 9, 2020 as Virtual Conference (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 K. Tomita and K. Uchino |
| 2. 発表標題 Recent Diagnostics Results of EUV Source and EUV Induced Plasmas |
| 3. 学会等名 2020 Source Workshop, (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Masato Kawazu |
| 2. 発表標題 Prediction of Thruster Performance in Hall Thrusters using Neural Network with Auto Encoder |
| 3. 学会等名 the 32nd ISTS (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Naoya Kuwabara |
| 2. 発表標題 Development of Measuring Equipment for Understanding Anomalous Transport in Hall Thruster |
| 3. 学会等名 the 32nd ISTS (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Takato Morishita |
| 2. 発表標題 Performance Characterization of a Microwave Discharge Cathode - Hall Thruster System |
| 3. 学会等名 the 32nd ISTS (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Yusuke Egawa |
| 2. 発表標題 Time-resolved Sputter Erosion Sensor for Hall Thruster Lifetime Assessment |
| 3. 学会等名 the 32nd ISTS (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Naoji Yamamoto |
| 2. 発表標題 Development of a 200 W Class Hall Thruster for an Active Debris Removal System |
| 3. 学会等名 the 36th International Electric Propulsion Conference (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Naoji Yamamoto |
| 2. 発表標題 Plasma fluctuations measurements in a Hall Thruster |
| 3. 学会等名 the 36th International Electric Propulsion Conference (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Shinatora Cho |
| 2. 発表標題 Investigation of cross-field electron transport in a 100-W class Hall Thruster using a full particle-in-cell simulation |
| 3. 学会等名 the 36th International Electric Propulsion Conference (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Kentaro Tomita |
| 2. 発表標題 Development of a Sensitive Electric Field Probe in Ar plasmas using Optically Trapped Fine Particles |
| 3. 学会等名 The 72nd Annual Gaseous Electronics Conference (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Kentaro Tomita |
| 2. 発表標題 Observation of the whole Thomson scattering spectrum of laser produced plasma for EUV and soft X-ray light sources |
| 3. 学会等名 The 19th LASER AIDED PLASMA DIAGNOSTICS 2019 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名 富田健太郎 |
| 2. 発表標題 プラズマを精度良く分析できるレーザー計測システム |
| 3. 学会等名 JST新技術説明会 (招待講演) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Kentaro Tomita |
| 2. 発表標題 Observation of the whole Thomson scattering spectrum for diagnostics of EUV and Soft X-ray light source plasmas |
| 3. 学会等名 EUV source workshop (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 桑原 直也 |
| 2. 発表標題 マイクロ波干渉計測を用いたホールスラスト内部の電子密度計測 |
| 3. 学会等名 2019年度 宇宙輸送シンポジウム |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 山本 直嗣, 池田凌, 竹末一平, 森田 太智, 中野 正勝, 大川 恭志, 船木 一幸 |
| 2. 発表標題 電界放出型カソードを用いたイオンエンジンの中和特性 |
| 3. 学会等名 2018年度宇宙科学に関する室内シンポジウム |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名 江川 雄亮, 山本 直嗣, 山口 敦, 黄 燕 |
| 2. 発表標題 時間分解CRDSによるホールスラストの壁面損耗計測 |
| 3. 学会等名 第62回宇宙科学技術連合講演会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名 大坪 正和, 牛尾 康一, 森田 太智, 山本 直嗣 |
| 2. 発表標題 低電力ホールスラストの開発 |
| 3. 学会等名 第62回宇宙科学技術連合講演会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 長野 公勇, 山本 直嗣, 窪田 健一, 杵淵 紀世志 |
| 2. 発表標題 200 W級ホールスラストにおけるアノード形状依存性 |
| 3. 学会等名 第62回宇宙科学技術連合講演会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|----------------------------------|
| 1. 発表者名 山本 直嗣 |
| 2. 発表標題 九州大学総合理工学府における電気推進機開発 |
| 3. 学会等名 第62回宇宙科学技術連合講演会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 池田 凌, 山本 直嗣, 中野 正勝, 大川 恭志, 船木 一幸 |
| 2. 発表標題 100 μ N級推力可変イオンスラストの開発 |
| 3. 学会等名 第62回宇宙科学技術連合講演会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 黒江 雄貴, 山本 直嗣, 森田 太智 |
| 2. 発表標題 ピコ秒レーザーを用いた電気推進機における中性粒子密度計測システムの構築 |
| 3. 学会等名 第62回宇宙科学技術連合講演会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Yousefian Ali,山本 直嗣 |
| 2. 発表標題 Numerical Simulation of Particle Density Distribution inside a Miniature Ion Thruster with respect to Orifice Configuration |
| 3. 学会等名 第62回宇宙科学技術連合講演会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 牛尾 康一, Yousefian Ali, 森田 太智, 山本 直嗣, 中島 秀紀 |
| 2. 発表標題 数値解析を用いた小型プラズマスラスタにおけるイオン加速機構の調査 |
| 3. 学会等名 第62回宇宙科学技術連合講演会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Naoji Yamamoto, Masatoshi Chono, Taichi Morita, Takato Morishita, Ryudo Tsukizaki, Kenichi Kubota, Kiyoshi Kinefuchi |
| 2. 発表標題 Development of 200 W class Hal thruster for ADR main propulsion |
| 3. 学会等名 第8回スペースデブリワークショップ(国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 D. Kuwahara |
| 2. 発表標題 Study of Helicon Plasma Thruster using Internal Gas Feeding Method |
| 3. 学会等名 AAPPS DPP 2018(招待講演)(国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 桑原大介 |
| 2. 発表標題 広周波数帯域に対応したマイクロ波イメージング用ローカル内蔵型アンテナアレイの開発 |
| 3. 学会等名 第35回プラズマ核融合学会年会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--------------------------------|
| 1. 発表者名 山本直嗣 |
| 2. 発表標題 電気推進ロケットエンジンの展望 |
| 3. 学会等名 第18回宇宙環境技術交流会（招待講演） |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Naoji Yamamoto, Taichi Morita, Ikkoh Funaki, Masakatsu Nakano, Yasushi Ohkawa |
| 2. 発表標題 Demonstration of Wide Throttling Range Ion Engines |
| 3. 学会等名 2018 Joint Propulsion Conference (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Naoji Yamamoto, Ryo Ikeda, Ippei Takesue, Taichi Morita, Masakatsu Nakano, Yasushi Ohkawa and Ikkoh Funaki |
| 2. 発表標題 Development of Wide Throttling Range Ion Engines |
| 3. 学会等名 UP3 to Space International Symposium (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名 山本直嗣 |
| 2. 発表標題 電気推進機ロケットエンジンの現状と課題 |
| 3. 学会等名 第34回九州・山口プラズマ研究会（招待講演） |
| 4. 発表年 2018年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

| |
|--|
| <p>ホールスラストにおける異常輸送現象の解明 http://art.aees.kyushu-u.ac.jp/research/elec/Hall/kibanA.html ホールスラスト http://art.aees.kyushu-u.ac.jp/research/elec/Hall/Hall_j.html 電気推進 http://art.aees.kyushu-u.ac.jp/research/elec/index.html ホールスラスト（先進宇宙ロケット工学研究室） http://art.aees.kyushu-u.ac.jp/research/elec/Hall/Hall_j.html 筑波大学大学院 システム情報工学研究科 構造エネルギー工学専攻 宇宙推進工学研究室 http://spl.kz.tsukuba.ac.jp/ ホールスラストとは http://art.aees.kyushu-u.ac.jp/research/Hall/Hall_j.html</p> |
|--|

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 |
|-------|--|--|----|
| 研究分担者 | 横田 茂 (Yokota Shigeru) (30545778) | 筑波大学・システム情報系・准教授 (12102) | |
| 研究分担者 | 森田 太智 (Morita Taichi) (30726401) | 九州大学・総合理工学研究院・助教 (17102) | |
| 研究分担者 | 張 科寅 (Cho Shinatora) (40710596) | 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・研究開発部門・研究開発員 (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 |
|-------|---|--|----|
| 研究分担者 | 桑原 大介 (Kuwahara Daisuke) (60645688) | 中部大学・工学部・講師 (33910) | |
| 研究分担者 | 富田 健太郎 (Tomita Kentaro) (70452729) | 北海道大学・工学研究院・准教授 (10101) | |

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 | | | |
|---------|------------------|--|--|--|
| フランス | フランス原子力・代替エネルギー庁 | | | |
| 米国 | コロラド州立大学 | | | |