

令和 6 年 6 月 24 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K18774

研究課題名（和文）周方向電場印加によるホール効果を利用した大電力無電極推進機の新たな可能性

研究課題名（英文）New Possibilities for High-Power Electrodeless Electric Propulsion Using the Hall Effect by Applying a Time-Varying Azimuthal Electric Field

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

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では将来の大型電気推進応用を見据え、半径方向に磁場が卓越したチャンネル内に高周波プラズマを生成し、さらに別の低周波変動磁場を与えることで、イオンを加速排出する軸方向電場を誘起する推進機を提案した。直径10cm級の円環チャンネルにソレノイドコイルとフェライトヨークを用いて半径方向磁場を生成し、円環底部（上流外部）に設置したスパイラルコイルにより低周波変動磁場を印加した。エミッシブプローブによりプラズマ電位を、ラングミアプローブによりプラズマ密度を時間分解測定した。この結果、低周波変動磁場の印加によりプラズマは有意な変化を示したが、変動磁場に同期する電場形成は確認されなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

将来、大規模な惑星間宇宙輸送が行われる時代には、100 kWを超える電力で作動するプラズマエンジンが不可欠となる。そのようなエンジンは既存エンジンの延長よりは、全く新しい原理/構造によって実現される可能性が高い。本研究では、そのような方式の1つとして高周波でプラズマを生成し、別の高周波でプラズマを加速する新しい方法を試みた。未だ推進機としては作動していないものの、今後別条件での研究を継続することで新たな発見の可能性はある。また、試みられたことのない条件における作動や、当初期待されていたものとは異なる結果が出たことで、さらに別の方式を生み出す可能性がある。

研究成果の概要（英文）：In this study, we proposed a propulsion system that induces an axial electric field to accelerate ions generated by high-frequency plasma in a channel with a predominant radial magnetic field and applying another low-frequency fluctuating magnetic field. A radial magnetic field was generated inside the 10 cm diameter circular channel using a solenoid coil and a ferrite yoke, and a low-frequency time-varying magnetic field was applied by a spiral coil installed at the bottom of the ring (upstream outside). The plasma potential profile was measured by an emissive probe and the plasma density profile by a Langmuir probe in a time-resolved manner. The results showed that the application of the low-frequency time-varying magnetic field caused a significant change in the plasma, but the formation of an electric field synchronized with the fluctuating magnetic field was not confirmed.

研究分野：宇宙推進工学

キーワード：大電力電気推進 無電極プラズマ ホール効果 宇宙探査

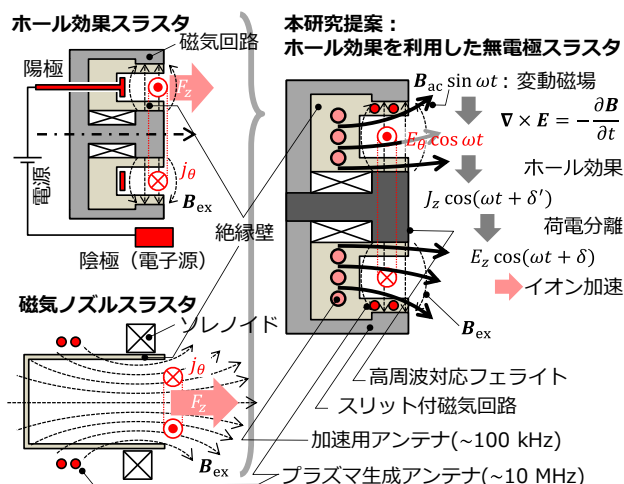
1. 研究開始当初の背景

現在、世界の宇宙開発は、国家宇宙機関、宇宙関連大企業、宇宙ベンチャー企業が入り混じりながら状況を呈しており、月そして火星へと続く深宇宙への機運が高まっている。そして、この深宇宙進出の鍵を握るのは効率的(優れた燃費)な大電力電気推進である。この「大電力」とは、現主流の1 kW級ではなく、100 kW超級を意味している。このために鎔を削る2大候補がホール効果スラスタと磁気ノズルスラスタである。

ホール効果スラスタは、1-10 kW級として高い効率と豊富な宇宙実績を有し、もっとも堅実な候補である。しかし、電極を利用した放電とイオン中和用電子源の必要性が「大電力」化への課題となっている。一方の磁気ノズルスラスタは、無電極放電を利用した電子源フリーのスラスタであり、100 kW超級の大電力において真価を発揮する。しかし、現在の宇宙機に搭載できるレベルに達しておらず、未だ宇宙実証がない点が課題である。本研究では、両者の特性をあわせ持つ新しい推進機の可能性の探求を行う。

本研究が提案する新しいスラスタは、ホール効果スラスタと同様の半径方向磁場と、加速用アンテナが誘起する周方向電場のホール効果による荷電分離を利用する。まず、10 MHz級高周波が円環チャンネル内に高周波プラズマを生成する。次に、チャンネル底面にある加速用アンテナが、プラズマ中に100 kHz級の変動磁場とこれに伴う周方向電場を誘起する。この周方向電場と半径方向磁場のホール効果により軸方向電子電流が誘起されるが、上流の絶縁壁と下流の低密度プラズマ領域のために、軸方向の荷電分離を生じ軸方向に電場が誘起される。この電場がイオンを軸方向に加速する。

この荷電分離による軸方向電場は、ホールスラスタにおける電極による外部印加電場の代替、磁気ノズルにおける電子熱運動による両極性電場の代替と言える。この説明は粒子的視点であるが、流体的視点では、荷電分離による軸方向電場と半径方向磁場による周方向ホール電流と、半径方向磁場の電磁力による加速と言える。結果として、磁気ノズルスラスタと同様に無電極ながらも、ホール効果スラスタと同様の軸方向の直接加速が期待できる。



一方、上記の提案はあくまで生じうる

物理としての説明である。実際、通常の磁気ノズルスラスタのように軸方向磁場が卓越する磁場形状において、外部から変動磁場を印加することにより磁力線垂直方向、すなわち半径方向へのプラズマ移動は実験的に確認されている[1,2]。しかし、提案する半径方向磁場が卓越した推進機において、実際に軸方向電場が形成されプラズマ加速が実施されるかは実験による確認が必要であり、それが本研究の目的である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、変動磁場存在下における以下を明らかにすることである。

- プラズマポテンシャルに対する静的半径方向磁場強度の影響
- イオン飽和電流の静磁場強度依存性
- 静磁場強度の関数としてのホール電場形成

3. 研究の方法

3. 1. 実験装置

図 1 は、 $\phi 1.4\text{-m} \times 3\text{-m}$ の真空設備 (図 1 (b)) に取り付けられた RF プラズマ推進機 (以下 YIPAL と呼ぶ) の概略図であり、1000 L/min のロータリーポンプと連動した 10000 L/min のクライオポンプによって排気されている。YIPAL には、 $\phi 80\text{-mm} \times 30\text{-mm}$ のパイレックス™ガラス製排出管がある。吐出チューブの上流側はテフロン製バックプレートが接続され、下流側の開放端は金属チャンバーのフランジに取り付けられています。その他の構成部品としては、円筒側面に 3 巻の RF ソレノイドコイル、円筒底面に 10 回転スパイラル加速アンテナ、円筒フェライトコア、水冷電磁石がある。アルゴンガスは、バックプレートの小さなオリフィスを経由して、一定の質量流量 (60 sccm) で放電管に連続的に供給され、チャンバー背圧を $\sim 3 \times 10^{-2}$ Pa に保つ。RF コイルは、自動インピーダンス整合ボックスを経由して、13.56 MHz の RF 電源から給電される。スパイラル型プラズマ加速コイルはバックプレートの後ろ (上流側) に配置されている。加速コイル電流はロゴスキークoilで測定される。プラズマ加速電源はインピーダンス整合回路を介してプラズマに誘導結合される。フェライトコアは、マコール™セラミックカバーによってプラズマから遮蔽されている。図 2 は、典型的な磁場 (カラーマップ) と推進機内部 (r-z 平面) に誘導される磁場線 (実線) を示している。

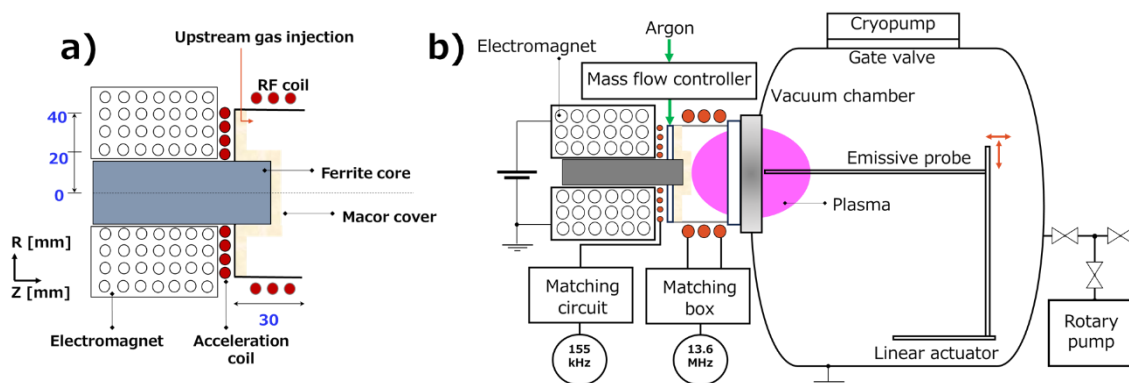


Figure 1. a) Schematic of the YIPAL plasma thruster and b) Schematic of the experimental setup.

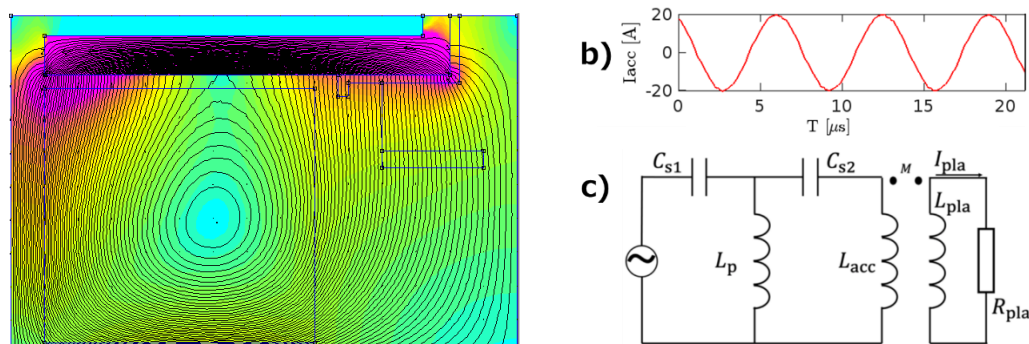


Figure 2 a) A 2D map showing the static magnetic field distribution created by the electromagnet. b) the acceleration current waveform and c) acceleration impedance matching circuit.

3. 2. エミッシブプローブおよびラングミアプローブ

可動二軸モーターステージに取り付けられたエミッシブプローブ (EP) が、プラズマ電位の直接測定に使用された。このプローブは、 $\phi 0.15\text{ mm}$ のヘアピン形状のトリエーテッドタングステンフィラメントを、 $\phi 3\text{ mm}$ のデュアル孔セラミックチューブにある $\phi 0.8\text{ mm}$ の穴に挿入したもの

である。薄シース極限において、コールド EP フィラメントの浮遊電位は次式で与えられる：
 $V_f^c \simeq \phi_p - \beta T_e$ [J. P. Sheehan et al, *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 3 No. 33, 2017, pp. 615-637]。
 ここで、 ϕ_p はプラズマポテンシャル、アルゴンプラズマでは $\beta = 5.17$ 、 T_e は電子温度である。対
 照的に、ホット EP フローティングポテンシャルは、 $V_f^h \simeq \phi_p - \alpha T_e$ ($\alpha \simeq 1.5$) と書かれる [L. A.
 Schwager, *Physics of Fluids B*, Vol.2, No. 5, 1993, pp. 631-645]。これらの式を解くと、 $T_e = (V_f^h -$
 $V_f^c)/(\beta - \alpha)$ が得られる。さらに、イオン飽和電流 I_{is} は、円筒形 RF 補償ラングミュアプローブ
 (LP) を用いて、バイアス電圧 $V_{bias} = -70$ V、 $P_{RF} = 200$ W、 $I_{acc} = 20$ A、 $f_{acc} = 155$ kHz、 $\dot{m} =$
 60 sccm において測定した。イオン飽和電流 I_{is} の決定には、RF 補正は不要であることに注意が必
 要である。

4. 研究成果

図 1 は、異なるソレノイド電流に対するプラズマ電位を軸方向位置の関数として示している。上
 流領域 ($z \leq 20$ mm) では、 $I_{coil} = 5$ A の場合のプラズマ電位 $\phi_{p,5A}$ は、 $\phi_{p,15A}$ を除く全てのコイル
 電流の場合よりも大きい。遷移領域 ($20 \text{ mm} \leq z \leq 50 \text{ mm}$) では、上記の傾向は維持されるが、 $\phi_{p,0A}$
 は $\phi_{p,20A}$ よりわずかに高くなる。下流域 ($z > 50$ mm) では、前述の傾向は続くが、 $\phi_{p,0A}$ と $\phi_{p,20A}$
 の差はほとんどなくなる。 ϕ_p と軸方向位置 (z) の関係は線形に見えるが、 ϕ_p の B_r 依存性は不明で
 ある。この結果は、静磁場 B_r は ϕ_p に明確な影響を与えないことを示唆している。

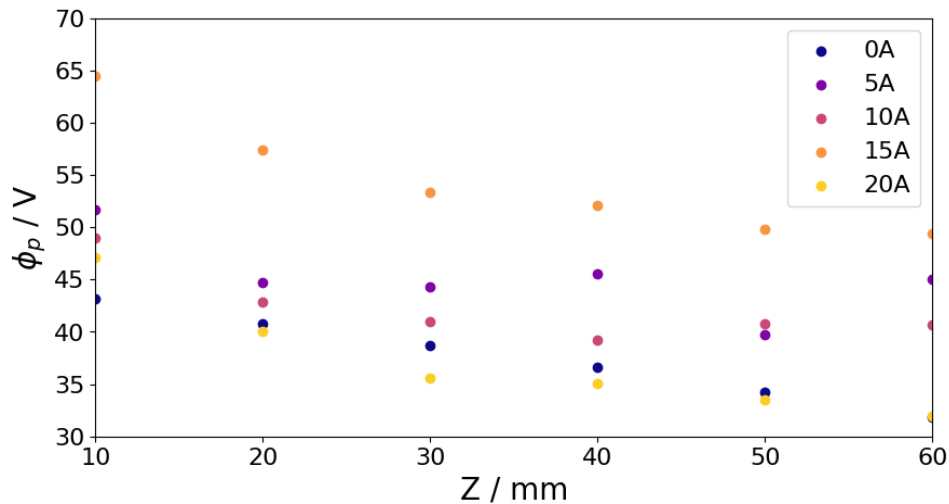


Fig. 1 Axial profile of ϕ_p as a function of I_{coil} at $r = 30$ mm, $P_{RF} = 200$ W, and $\dot{m}_{dot} = 60$ sccm and $\theta = \frac{\pi}{2}$. The relation between ϕ_p and z seems linear, but the dependence on I_{coil} is complex.

図 2 は、ソレノイド電流 I_{coil} の関数としての電場 E_{\perp} の時間変化を示している。一般的に、ソレノ
 イド電流が大きいほど電場は高くなる。ここで、予期していなかった結果があり、それは $E_{\perp,5A}$ は
 $E_{\perp,15A}$ および $E_{\perp,20A}$ と比較的等しいが、予想外に $E_{\perp,10A}$ より高い点である。この結果は、 B_r は E_{\perp} に
 説得力のある影響を与えないという主張を確固たるものにするようである。しかし、 B_r が存在す
 る場合の E_{\perp} は、非磁場条件で測定した $E_{\perp,0A}$ よりも $\sim 23\%$ 高い。もう一つの興味深い点は、ソレノ
 イド電流が大きいほど電場変動が大きくなることである。特に、 $E_{\perp,20A}$ は加速電流よりも高い周
 波数で振動する一方で、 $E_{\perp,0A}$ と $E_{\perp,5A}$ の変動は最も小さい。RF アンテナの近く ($z = 10$ mm) での
 測定 (図 2a) は、アンテナから離れた場所での測定 (図 2b) よりも強い揺らぎを示している。
 $z = 55$ mm のプラズマ源のさらに下流 (図 2b) では、 B_r の影響は完全に減少している。実際、 $I_{coil} =$
 0 A による $E_{\perp,0A}$ が最も強い。

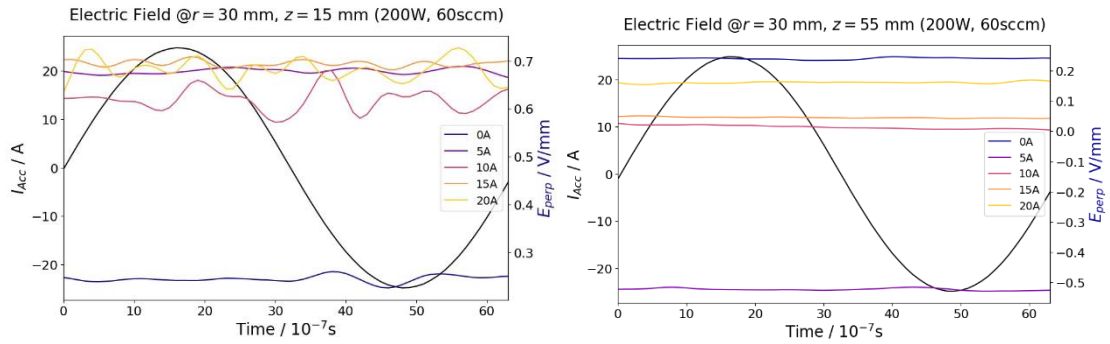


Fig. 2 The influence of I_{coil} on the temporal profile of E at different axial positions and $r = 30$ mm, $P_{\text{RF}} = 200$ W, and $m_{\text{dot}} = 60$ sccm and $\theta = \frac{\pi}{2}$. The relation between E and I_{coil} is not straightforward.

図3は、 I_{coil} の関数として時間平均したプラズマパラメータを示している。1,2,3行目はそれぞれ I_{is} , ϕ_p , $V_{f,\text{cold}}$ を表す。一言で言えば、 B_r が強くなるにつれて、側壁近傍の浮遊ポテンシャルは、特に上流領域($I_{\text{coil}} > 5$ A)で負になる。これとは対照的に、 I_{is} は当初、 $I_{\text{coil}} = 0$ Aから $I_{\text{coil}} = 5$ A ($(r,z) = (27,12)$ mmの奇妙な4 mA領域を無視)までわずかに増加し、その後、 B_r の強度が増すにつれて減少し始める ($I_{\text{coil}} > 5$ A)。

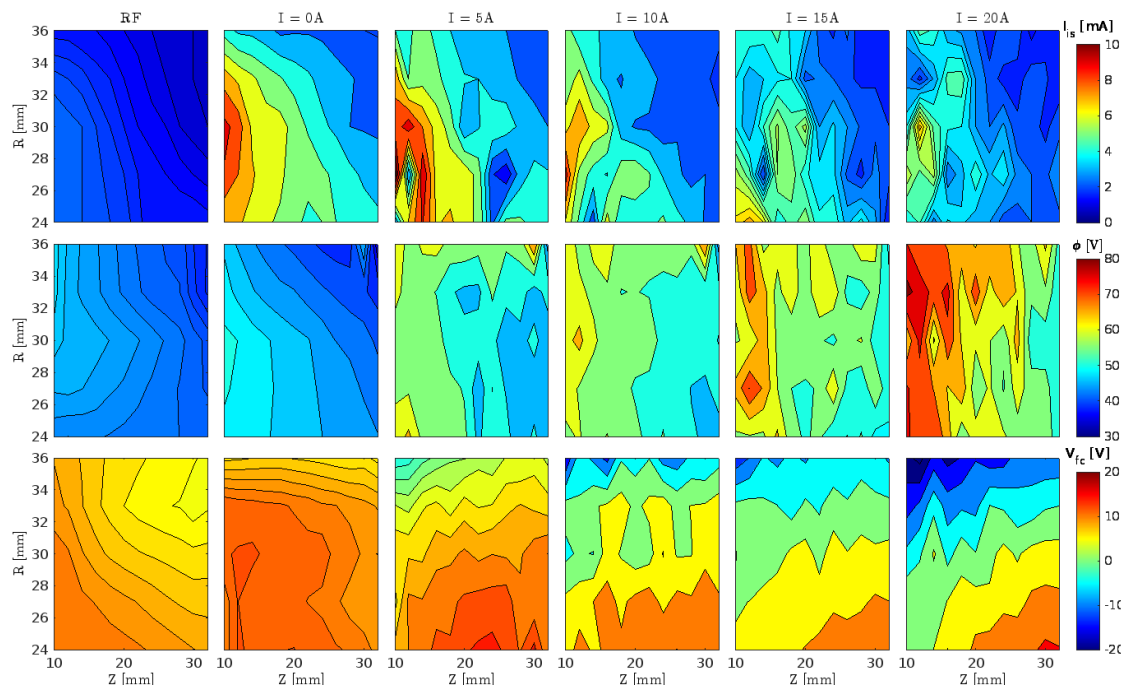


Fig. 3 Time averaged plasma parameters in the YIPAL plasma source. The first, second, and third rows represent I_{is} , ϕ_p and $V_{f,\text{cold}}$ respectively at $P_{\text{RF}} = 200$ W. Results were averaged over $50 \mu\text{s}$.

興味深いことに、図3では、浮遊電位が負の領域においてプラズマ電位が最大であり、逆もまた同様である。つまり、プラズマ電位は $I_{\text{coil}} = 20$ Aで最大になることが示唆される。これはまた、 $E_{\perp,20A}$ が最も強いはずであることを意味し、図2の結果と矛盾している。負の浮遊ポテンシャルは、側壁近傍に非マクスウェル型エネルギー分布を持つ高エネルギー電子が存在することを示すが、その主な原因は現在のところ不明である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hokuto Sekine, Hiroyuki Koizumi, and Kimiya Komurasaki	4. 巻 -
2. 論文標題 Observation of strong in-plane perpendicular electric field in a radio-frequency plasma with a time-varying magnetic nozzle	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 印刷中
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 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Shimhanda, S., Sekine, H., Koizumi, H., and Komurasaki, K.
2. 発表標題 Effect of the Static Radial Magnetic Field on the Hall Electric Field Formation in an Inductive Radiofrequency Plasma Thruster using a Time-Varying Magnetic Field
3. 学会等名 International Electric Propulsion Conference 2024（国際学会）
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Shimhanda, S., Sekine, H., Koizumi, H., and Komurasaki, K.
2. 発表標題 Performance dependence of an inductive radio-frequency plasma thruster with a radial magnetic field on acceleration frequency
3. 学会等名 75th International Astronautical Congress（国際学会）
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 野口 湖月、関根 北斗、小泉 宏之、小紫 公也
2. 発表標題 径方向磁場を印加した無電極電気推進機におけるイオンエネルギー分布測定
3. 学会等名 第66回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 畑悠希, 関根北斗, 小泉宏之, 小紫公也
2. 発表標題 変動磁場印加型無電極推進機におけるプラズマポテンシャル測定と磁場垂直方向の電場形成
3. 学会等名 第65回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 関根 北斗, 畑 悠希, 小泉 宏之, 小紫 公也
2. 発表標題 時間変動型磁気ノズルにおける磁場垂直電場形成現象とプラズマ電流駆動
3. 学会等名 第65回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤澤天馬, 関根北斗, 小泉宏之, 小紫公也
2. 発表標題 径方向磁場卓越型無電極電極電気推進機におけるイオンエネルギー分布の静磁場依存性
3. 学会等名 令和3年度宇宙輸送シンポジウム
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

小泉研究室ホームページ http://www.al.t.u-tokyo.ac.jp/koizumi/html/htdocs/
--

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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------