

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 21 日現在

機関番号：34406

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03484

研究課題名(和文) 深宇宙探査用大電力電磁加速プラズマスラスタの高性能・長寿命化

研究課題名(英文) Development of High-Performance, Long-Lifetime and High-Power Magneto-Plasma-Dynamic Thrusters for In-Space Exploration

研究代表者

田原 弘一 (TAHARA, Hiromazu)

大阪工業大学・工学部・教授

研究者番号：20207210

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：電磁加速プラズマ(Magneto-Plasma-Dynamic: MPD)スラスタは、大電流アーク放電プラズマを電磁力により加速・噴射させる電気推進機であり、将来の有人火星探査など深宇宙探査用推進機として期待されている。本研究では、推進性能向上、耐久性改善を積極的に行い、輻射冷却式定常作動型MPDスラスタシステムの実機開発を目指した。永久磁石により、特殊な軸方向発散状とカスプ形状の外部磁場の印加を行い、効率良い放電・プラズマ加速状態を実現した結果、NH₃推進剤流量60mg/sの性能として、投入電力6.75kWのとき、推力477.4mN、比推力811.4s、推進効率19.0%を達成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

1) 日本独自のオリジナリティを有する実用スラスタが研究開発された。有人火星探査や月基地建造などの直近の計画ミッションに利用できる、高性能・高耐久性の輻射冷却式定常作動型MPDスラスタシステムが開発された。

2) 実験結果とプラズマシミュレーション結果の比較検討により、外部磁場印加型MPDスラスタの放電状態、プラズマ生成・加速過程が明らかにされ、推進性能を予測できる設計相似則が構築された。さらに、スラスタシステムとしての熱設計法も確立、提案された。こうして、宇宙推進工学の分野だけではなく、プラズマ工学、高温気体力学の分野における基礎的資料が提供された。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to develop a practical MPD thruster system for manned Mars exploration. A conventional MPD thruster is generally heavy and complicated because it needs to have water-cooled solenoidal coils. Accordingly, it is hard to utilize conventional MPD thrusters for near-future large-scale space missions. When by using permanent magnets like samarium cobalt (SmCo) magnets a magnetic field is applied to an MPD thruster, its problem will be solved. In this research, shape and strength of magnetic fields applied with permanent magnets were changed, and electrode configuration was also changed. Then, the performance characteristics were examined and compared with previous results. A typical performance with 60 mg/s of NH₃ at 6.75 kW was a thrust of 477.4 mN, a specific impulse of 811.4 s and a thrust efficiency of 19.0% with an axial magnetic field strength of 0.157 T.

研究分野：宇宙推進，電気推進

キーワード：宇宙推進 電気推進 電磁加速プラズマスラスタ 定常作動 永久磁石 惑星探査 有人火星探査 宇宙旅行

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

電磁加速プラズマ (Magneto-Plasma-Dynamic: MPD) スラスタは、同軸電極構造を持ち、大電流アーク放電により生成したプラズマを電磁力により加速、噴出させる電気推進機である。1960年代より、電気推進の中では将来の大電力・大推力・高比推力のスラスタとして、イオンスラスタと共に、欧米、ロシア (旧ソ連) で精力的に研究された。日本においても宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 宇宙科学研究所を中心に活発に開発研究が行われ、たんせい4号 (1980年)、Space Flyer Unit (SFU: 1995年) 等に搭載され、パルス作動型 MPD スラスタの宇宙実証実験が行われた。日本にとっては宇宙作動実績のない諸外国に対して着実に実用化を進めていたが、スラスタシステムの複雑さや当時は大電力電気推進 (100kW 以上) の必要性がないなどの観点から実用化には至らなかった。現在でも諸外国、日本では JAXA、東北大学、名古屋大学、大阪工業大学などで研究が進められているが、近年はホールスラスタが世界中を席卷し、MPD スラスタの実用化は程遠い状況にある。しかしながら、これまでの研究経緯から、他の電気推進機に比べて、日本がシステム開発・宇宙実証のノウハウを有していること、「はやぶさ」搭載マイクロ波放電式イオンスラスタ同様に日本独自のオリジナリティを発揮できることから将来の宇宙開発を見据えて、日本が力を入れるべき重要な電気推進機であると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、将来の有人火星探査など深宇宙探査用推進機として期待されている、MPD スラスタの実用上の問題点である、推進性能向上、耐久性改善を積極的に行い、輻射冷却式定常作動型 MPD スラスタシステムの実機開発を目指す。目標性能は、電力 5-30kW レベルにて、1) 高推進性能 (高推力 (500mN-2N)、高比推力 (1,000-3,000sec)、高推進効率 (40%以上))、2) 推進機システムの高耐久性 (連続作動時間: 500-1500 時間) である。これらの実用目標を達成するために、永久磁石により、特殊な軸方向発散形状とカスプ状の外部磁場の印加を行い、効率良い放電・プラズマ加速状態を実現し、さらに独自に工夫した、中空陰極を含むスラスタ構造を研究開発する。

3. 研究の方法

(1) 発散磁場搭載 MPD スラスタ: 発散磁場搭載 MPD スラスタの 3D モデルを図 1 に示す。永久磁石としてセグメント型のサマリウムコバルト磁石を用いた。セグメント型を採用した理由は、円環領域における磁石占有領域が円柱型よりも大きくとれ、より強い磁場を印加できる。さらに、磁石が 1 個ずつ独立しているため、取り外すことにより様々な磁束密度に変更することが可能である。最大磁石搭載数は 16 個であるが水冷の関係上 14 個まで搭載している。

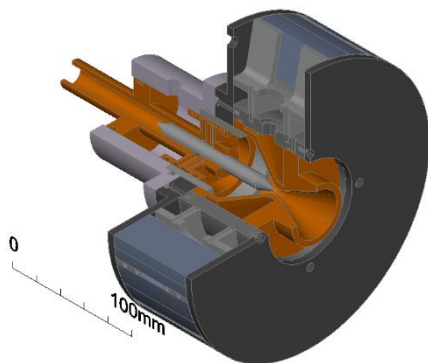


図1 発散磁場搭載MPDスラスタの3Dモデル

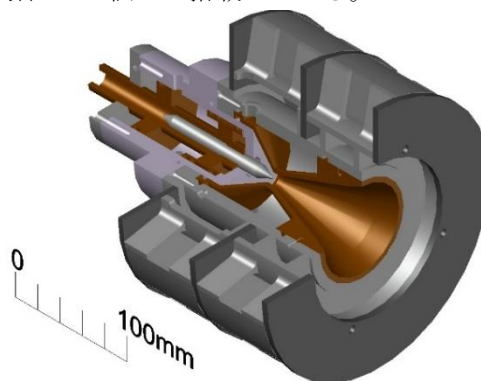


図2 カスプ磁場搭載MPDスラスタの3Dモデル

(2) カスプ磁場搭載 MPD スラスタ: カスプ磁場搭載 MPD スラスタの 3D モデルを図 2 に示す。磁石は発散磁場搭載 MPD スラスタと同じセグメント型サマリウムコバルト磁石を使用し、前方に 8 個、後方に 8 個の計 16 個搭載している。また、磁気回路とスラスタ本体は独立しているため、磁気回路を移動させることによりカスプ磁場形状のできる位置を変更することができる。

(3) 電極形状: 発散磁場搭載 MPD スラスタの電極形状が推進性能に及ぼす影響を調べるために、複数の形状のアノードを用意した。従来から使用しているコンバージェント-ダイバージェント型アノード (以降、CD ノズルと表記する。) の概略図を図 3 に示す。コンバージェントノズル角度は 120deg、ダイバージェントノズル角度は 50deg とした。新たな形状として、ストレート-ダイバージェント型アノード (以降、SD ノズルと表記する。) を用意した。SD ノズルの概略図を図 4 に示す。カスプ磁場搭載 MPD スラスタの電極形状の概略図を図 5 に示す。カスプ磁場搭載 MPD スラスタにおいて前出の CD ノズルを使用した場合、ノズル出口から噴射されたプルームが磁石ホルダに接触し、加熱されることで永久磁石の不可逆減磁を引き起こす可能性があるため、アノードの形状変更を行った。アノードのダイバージェントノズル角度を 40deg と 50deg の 2 段階とし、プルームが磁石ホルダに当たらないようにした。その他の形状は CD ノズルから変更していない。カソードはすべての形状のアノードにおいてロッドカソードを用いた。ロッドカソードの材質は、電気伝導性が高く、融点の高い純タングステンである。カソード形状は直径 10mm、先端角 45deg の棒状電極である。

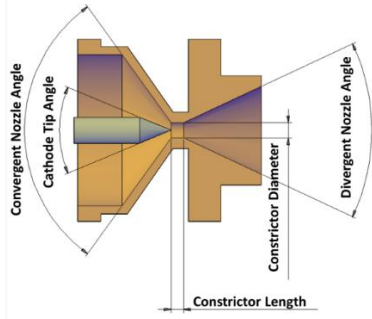


図3 CD ノズルの概略図

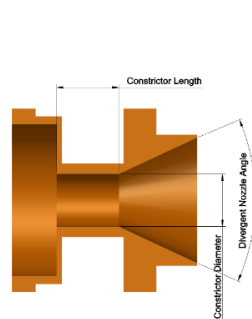


図4 SD ノズルの概略図

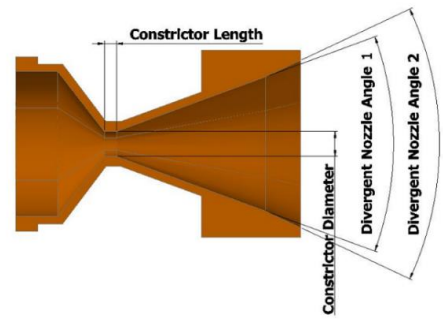


図5 カスプ磁場アノード形状

(4) 磁場形状：磁場解析ソフトウェア(TriComp)を用いて発散磁場搭載MPDスラスタとカスプ磁場搭載MPDスラスタの磁場形状を計算した。発散磁場搭載MPDスラスタの磁場形状を図6に、カスプ磁場搭載MPDスラスタの磁場形状を図7に示す。図6より、コンストリクタ付近では中心軸に対して平行な磁力線が、ノズル出口付近では発散磁場が確認できる。また、スラスタ中心軸上における磁場はコンストリクタ付近で最大となり、最大磁束密度は磁石14個で0.157Tであった。図7より、2つの磁石の間に設置したSS400製中央ヨークにカスプ磁場が形成されることが確認できる。これにより、SS400製の中央ヨークを含む磁気回路の位置を変更することでカスプ磁場形状が形成される位置が移動できる。

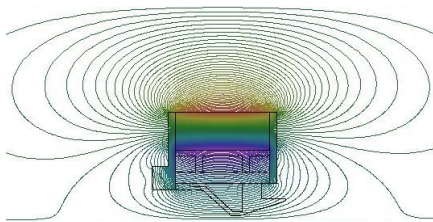


図6 発散磁場搭載MPDスラスタの磁場形状

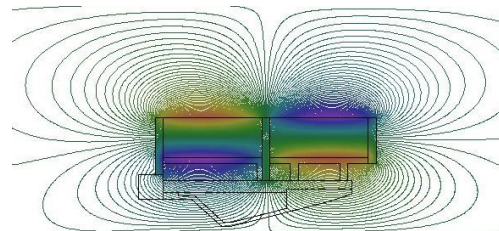


図7 カスプ磁場搭載MPDスラスタの磁場形状

(5) 実験装置システム：実験装置システムの概略図を図8に示す。真空チャンバは、直径1.2m、長さ2.0mの円筒形で、材質はステンレススチールである。排気速度600m³/hのロータリーポンプと排気速度6,000m³/hのメカニカルブースターを併用して排気を行う。真空チャンバ内圧力はピラニ真空計を用いて測定し、4Pa程度に到達した。MPDスラスタには推力測定装置と校正システムが取り付けられている。推力測定には振り子式を採用した。

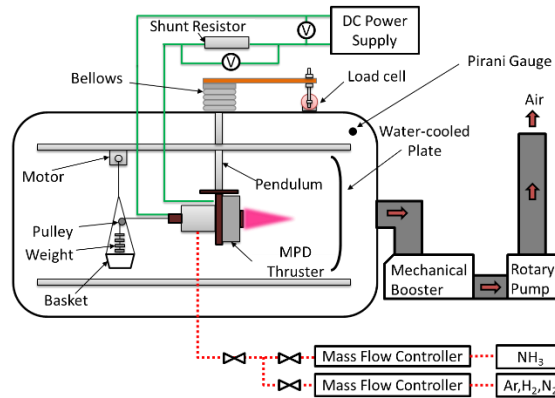


図8 実験装置システムの概略図

4. 研究成果

(1) コンストリクタ径が推進性能に及ぼす影響：実験条件を表1に示す。アノードのコンストリクタ径が2mmと10mmのものを使用し、推進性能の取得および検討を行った。また、推進剤はNH₃を用いた。本実験の目的として、電熱加速を優位にすることで、推進効率の向上を狙った。推進剤流量を小流領域、中流領域、大流領域と設定し、表1の値で実験を行った。

表1 実験条件

Propellant	NH ₃
Constrictor Diameter, mm	2, 10
Mass Flow Rate, mg/s	5, 60, 150
Magnetic Flux Density, T	0.157
Discharge Current, A	70-150

放電電圧-放電電流特性を図9に、推力-放電電流特性を図10に示す。図9より、全流領域において垂下特性が確認できる。また、コンストリクタ径が2mmの方が10mmの条件よりも全流量域で電圧が低いことが確認できる。図10より、推力は放電電流の増加に伴い増加していることが確認できる。小流量時において放電室内圧力が低いため電磁加速優位となる。そのため、コンストリクタ径10mmの方が推力は大きい。中流量,大流量域においては放電室内圧力が高くなり、電熱加速優位になりコンストリクタ径2mmの方が推力は大きい。また、電熱加速優位の条件では電圧が電磁加速優位の条件より低くなると考えられる。本実験において、NH₃が60mg/s、投入電力6.75kWの条件で、推力477.4mN、比推力811.4s、推進効率19.0%を得た。

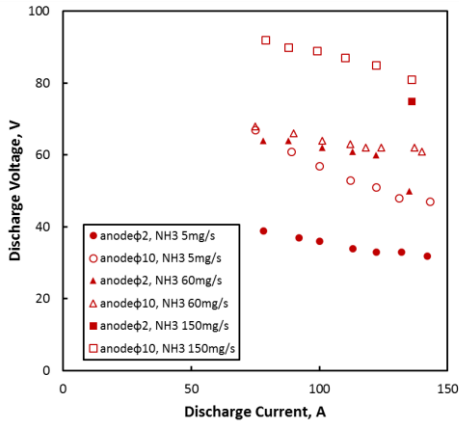


図9 放電電圧-放電電流特性

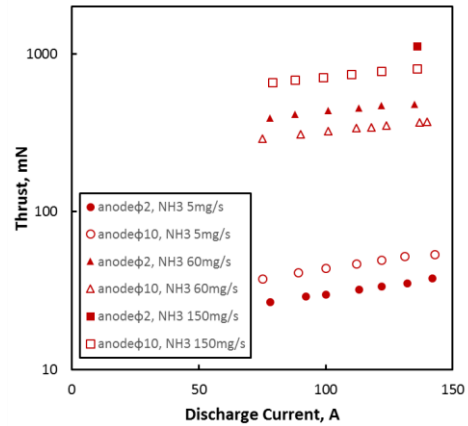


図10 推力-放電電流特性

(2) ノズル形状が推進性能に及ぼす影響：実験条件を表2に示す。MPD スラスタは磁気ノズルによって推進剤がコンバージェント部ですでに超音速域に達していると推測されるため、CD ノズルでは速度損失を招いている恐れがある。SD ノズルを採用することでCD ノズルによって発生する速度損失とさらにはエネルギー損失をなくし、推力と推進効率の向上が期待できる。

表2 実験条件

Propellant	NH ₃
Mass Flow Rate, mg/s	150
Constrictor Diameter, mm	12, 15, 20
Magnetic Flux Density, T	0.157
Discharge Current, A	70-150

表3 生ガス推力(φ15)

SD nozzle	114.838 mN
CD nozzle	105.624 mN

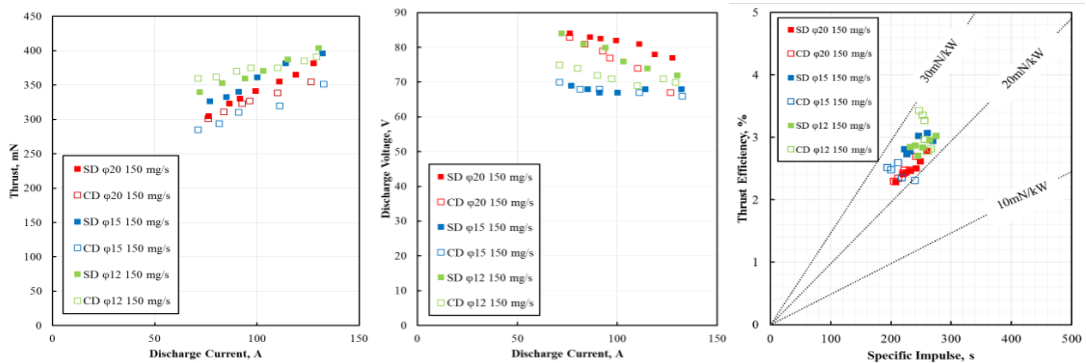


図11 推力-放電電流特性 図12 放電電圧-放電電流特性 図13 推進効率-比推力特性

表3にコンストリクタ径が15mmにおけるSDノズルとCDノズルの生ガス推力を、図11に推力-放電電流特性を示す。SDノズルを用いることで生ガス推力が向上していることがわかる。また、SDノズルを用いたことで実推力の向上が確認できた。これは、コンバージェント部をなくしたSDノズルを用いたことで推進剤の速度損失が小さくなり、ノズルより排出されるプラズマの速度が大きくなったことで推力が向上したと考えられる。次に、図12に放電電圧-放電電流特

性を示す。SD ノズルに比べ、CD ノズルを用いたときの方が電圧降下が著しくなった。また、推進剤流量が大きいほど放電電圧の値が高くなった。図 13 に推進効率-比推力特性を示す。SD ノズルを用いた場合に推力値が高くなること、電圧低下の傾きは CD ノズルを用いた方が顕著であることが確認されている。そのため、図 13 において、推進効率は両ノズルで大きな違いは見られなかった。しかし、SD ノズルを用いたとき、推力が改善されたことから比推力の向上を確認することができた。本実験では、コンストリクタ径が 12, 15, 20mm のアノードを用いている。今後、電熱加速モードを用いた推力の向上から推進効率の改善を目指すために、コンストリクタ径を小さくし最適な条件を模索必要がある。

(3)カusp磁場搭載 MPD スラスタの性能取得：カusp磁場を用いることで放電電圧の減少が見込まれ、推進効率の向上ができると予想し、カusp磁場搭載 MPD スラスタの性能特性を取得した。発散磁場搭載 MPD スラスタとの性能比較を行うため実験条件の変更は行わなかった。性能取得するカusp位置は、コンストリクタ上を基準位置 0mm と定義しスラスタ下流方向を正としたとき、-5mm, 0mm, +5mm の 3 箇所とした。カusp位置の詳細を図 14 に示す。推進剤流量 60mg/s における発散磁場搭載 MPD スラスタとカusp磁場搭載 MPD スラスタの放電電圧-放電電流特性を図 15 に、推力-放電電流特性を図 16 に、推進効率-比推力特性を図 17 に示す。

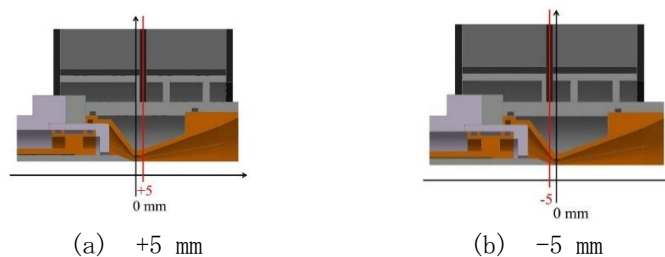


図 14 カusp位置

図 15 より、すべての条件において垂下特性を確認できた。また、カusp磁場を用いることによって放電電圧の減少を確認した。図 16 より、カusp磁場を用いた場合より発散磁場を用いた方が推力が高い結果となった。これは、印加したカusp磁場に噴射方向とは逆向きのローレンツ力が存在しており、それが加速の障害になっているためと考えられる。また、図 17 より、推進効率においても発散磁場を用いた方が高い結果となった。今後、さらにカusp位置を変更することで推力値および推進効率が小さくなりにくい条件を見つける必要がある。

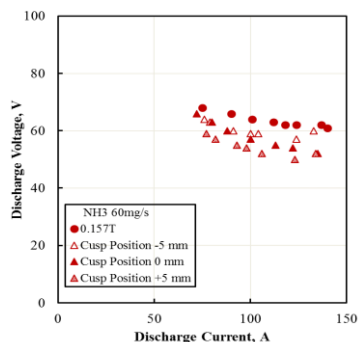


図 15 放電電圧-放電電流特性

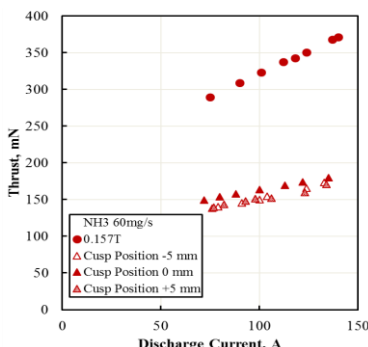


図 16 推力-放電電流特性

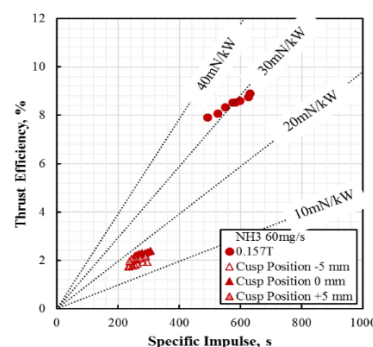


図 17 推進効率-比推力特性

(4)熱解析：完全輻射冷却式 MPD スラスタの熱解析モデルを図 18 に、その結果の一例を図 19 に示す。計算結果より永久磁石の温度が十分低く、スラスタシステム開発の方向性が得られた。

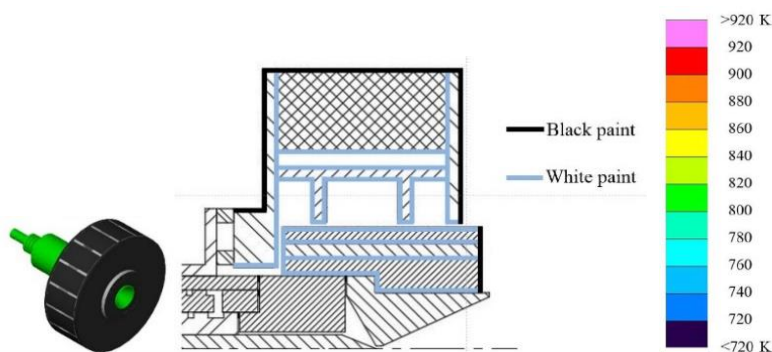


図 18 完全輻射冷却式スラスタ熱解析モデル

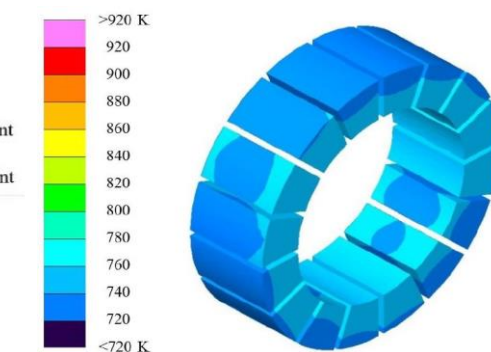


図 19 解析されたスラスタ温度分布

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 田原 弘一、小林 充宜、川上 天誠、多川 真登、高田 恭子、池田 知行	4. 巻 67
2. 論文標題 大阪工業大学・超小型月探査機プロイテレス3動力飛行用シンドリカル型ホールスラスタの研究開発	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本航空宇宙学会誌	6. 最初と最後の頁 53～58
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.14822/kjsass.67.2_53	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 田原弘一	4. 巻 71
2. 論文標題 電気推進ロケットエンジンの性能と開発動向	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 機械の研究	6. 最初と最後の頁 1-10
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 Kengo Chino, Yoshikazu Sugiyama, Shota Saito, Hirokazu Tahara and Kyoko Takada	4. 巻 IEPC-2017-81
2. 論文標題 Research and Development of High-Power Steady-State MPD Thrusters with Divergent and Cusp Magnetic Fields Using Permanent Magnets for In-Space Propulsion	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of IEPC 2017	6. 最初と最後の頁 1-10
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 Kengo Chino, Yoshikazu Sugiyama, Shota Saito, Hirokazu Tahara and Kyoko Takada	4. 巻 IEPC-2017-80
2. 論文標題 Thermal Analysis of High-Power Steady-State Fully Radiation-Cooled MPD Thrusters with Permanent Magnets for In-Space Propulsion	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of IEPC 2017	6. 最初と最後の頁 1-10
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 Ryota Fujita, Hirokazu Tahara, and Kyoko Takada	4. 巻 IEPC-2017-83
2. 論文標題 Electric Propulsion R&D at Osaka Institute of Technology	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of IEPC 2017	6. 最初と最後の頁 1-10
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 Ryota Fujita, Hirokazu Tahara, and Kyoko Takada	4. 巻 IEPC-2017-84
2. 論文標題 Research and Development of PROITERES Micro/Nano-Satellite Series at Osaka Institute of Technology	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of IEPC 2017	6. 最初と最後の頁 1-10
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 -

〔学会発表〕 計5件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 水谷康一郎, 谷和真, 斉藤将太, 田原弘一, 高田恭子
2. 発表標題 永久磁石搭載定常作動同軸型電磁加速プラズマスラスタの電極形状及び磁場位置が推進性能に及ぼす影響
3. 学会等名 第59回航空原動機・宇宙推進講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 水谷康一郎, 谷和真, 斉藤将太, 田原弘一, 高田恭子
2. 発表標題 永久磁石搭載定常作動同軸型MPDスラスタの電極形状及び磁場位置が推進性能に及ぼす影響
3. 学会等名 第55回日本航空宇宙学会中部・関西支部合同秋期大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 斉藤将太, 谷和真, 水谷康一郎, 田原弘一, 高田恭子
2. 発表標題 永久磁石を用いた大電力定常作動型深宇宙探査用永久磁石搭載電磁加速プラズマスラストの性能特性に及ぼす電極形状の影響
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 斉藤将太, Nils Ostermann, 知野健吾, 谷和真, 瀬川秋桜子, 田原弘一, 高田恭子
2. 発表標題 永久磁石を用いた大電力定常作動型電磁加速プラズマスラストの性能特性に及ぼす電極形状の影響
3. 学会等名 第61回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 知野健吾, 斉藤将太, Nils Ostermann, 谷和真, 瀬川秋桜子, 田原弘一, 高田恭子
2. 発表標題 有人火星探査用定常作動型完全輻射冷却式MPDスラストの熱設計
3. 学会等名 第61回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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