

令和 3 年 5 月 11 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K18746

研究課題名(和文) 双方向プラズマ加速によるスペースデブリ除去技術の開発

研究課題名(英文) Development of a space debris removal technology by a bi-directional plasma acceleration

研究代表者

高橋 和貴 (TAKAHASHI, Kazunori)

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：80451491

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、無電極磁気ノズルRFプラズマ推進機からの双方向プラズマ噴射・加速現象が起こることを実証し、上流・下流域へと流出するプラズマ流を、外部磁場を用いて制御可能であることを示した。また、推進機の推力、およびスペースデブリ模擬のターゲットに対してプラズマ流が与える力を同時に計測し、スペースデブリ除去モード、加速モード、減速モードのデブリ除去ミッションに必要な推進機の動作を、外部磁場によって選択可能であることを実証した。また推進機の高周波数自動制御型のRFシステムを開発し、高速かつ小型で再現性良く高密度プラズマ生成が可能であることを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スペースデブリ除去技術の開発は、今後宇宙開発を継続していく中で最重要課題であり、国際的にもその開発が進められている。特に既に地球周回軌道に存在する大型デブリの除去技術に関して早急な開発が求められており、除去衛星がデブリに直接接触しない、非接触型の除去技術が有用であると考えられている。本研究で得られたプラズマ工学および宇宙工学的知見はこの課題の解決法の一つとなりうる成果であり、学術的・社会的に意義が大きい。

研究成果の概要(英文)：The present study demonstrates that the bi-directional plasma exhaust and acceleration can occur in an electrodeless, magnetic nozzle, rf plasma thruster; the plasma flux exhausted from the thruster to the upstream and downstream sides can be controlled by the magnetic field configuration. The thrust and the force exerted to the target plate simulating the space debris are simultaneously measured. The results demonstrate that the acceleration and deceleration modes of the spacecraft and the space debris removal modes can be switched by the magnetic field configuration. Furthermore, an automatically- and fast-controlled frequency tunable rf system is developed for future development of the propulsion module, where the rf frequency and the output power are controlled so as to minimize the reflection coefficient and to maintain the net rf power. This fast and compact system can produce the high density plasma with good reproducibility,

研究分野：プラズマ工学

キーワード：スペースデブリ プラズマ 電気推進

1. 研究開始当初の背景

宇宙環境の商用利用から深宇宙探査に代表されるように宇宙事業の多様化・活性化が進む中、スペースデブリ(軌道上の衛星残骸、宇宙ゴミ)の問題が深刻化し、小型のものも含めると50万個以上あるとされている。宇宙開発および宇宙利用産業を持続するためにはデブリ除去技術の開発が喫緊の課題である。周回デブリを減速することで高度を下げ、大気圏突入による燃焼で処理する必要があるが、その明確な方式の開発には至っていない。デブリの減速を実現するためには、周回速度と逆向きの運動量(または力)をデブリへと外部から照射する必要がある。化学推進機または電気推進機により燃料を高速噴射しデブリの減速を図った際には、衛星には逆向きの推力が働き、デブリとの距離を一定に保つことが原理的に不可能である。したがって図1(a)に示すように、デブリと逆方向にも運動量を放出し、衛星に加わる推力および速度の制御を同時に実現する必要がある。欧州では、イオンエンジン2台を用いたデブリ除去法が提案され検討が進められているが、打ち上げ重量が極限まで制限された宇宙ミッションでは、搭載推進システム1台でデブリ減速と衛星速度制御が可能な革新的方式の発案と開発が求められている。

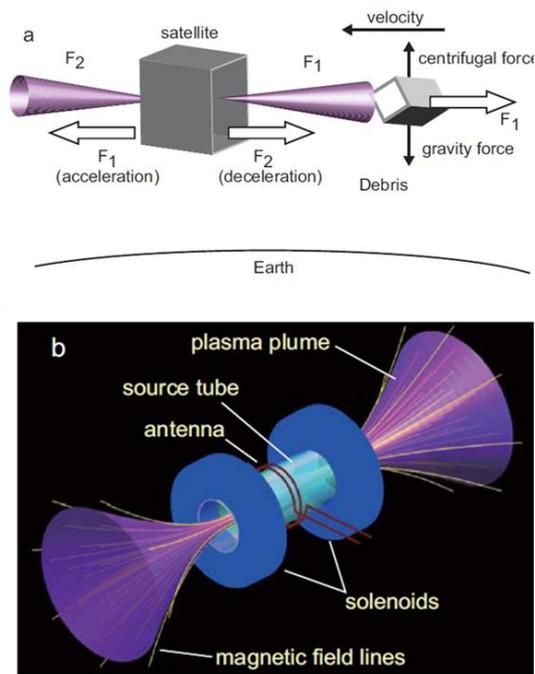


図1: (a) デブリおよびデブリ除去衛星に加わる力の様子。(b) 双方向加速型の磁気ノズル高周波プラズマ推進機概念図。

2. 研究の目的

本研究では、プラズマと磁場の相互作用および運動量変換過程を利用し、図1(b)に示すように推進機1台でデブリの減速と自己推進機能を兼ね備えた双方向加速・制御型の革新的電気推進システムの開発と原理実証試験を行うことを目的とした。ここでは、これまでに開発を進めてきた高周波磁気ノズルプラズマ推進機を基盤技術として、上流・下流域に開口部と磁気ノズルを有する双方向加速型の磁気ノズル高周波プラズマ推進機の開発とデブリ除去の原理実証実験、および実用化へ向けたモジュール化を進める。

3. 研究の方法

図2(a)に双方向加速型磁気ノズル高周波プラズマ推進機およびデブリ除去実証実験の概略図を示す。内径1m、長さ2mの小型スペースチャンバー内部に推力計測用のスラストバランスを設置し、ソレノイドコイルと絶縁管、ガス導入口から構成される磁気ノズルプラズマ推進機を接続する。スラストバランスは予め既知の力を加えた際の変位をレーザー変位計で計測し、力と変位を関係づける校正曲線を取得する。高周波電力によって高密度プラズマを生成した際の変位を計測することで、推進機が受ける力、すなわち推力の絶対値を計測可能である。図2(b)は、左右のソレノイドコイルを変化させた場合の磁場強度計算結果を示しており、自在に磁気ノズルの磁場強度分布を制御可能である。図2(a)に

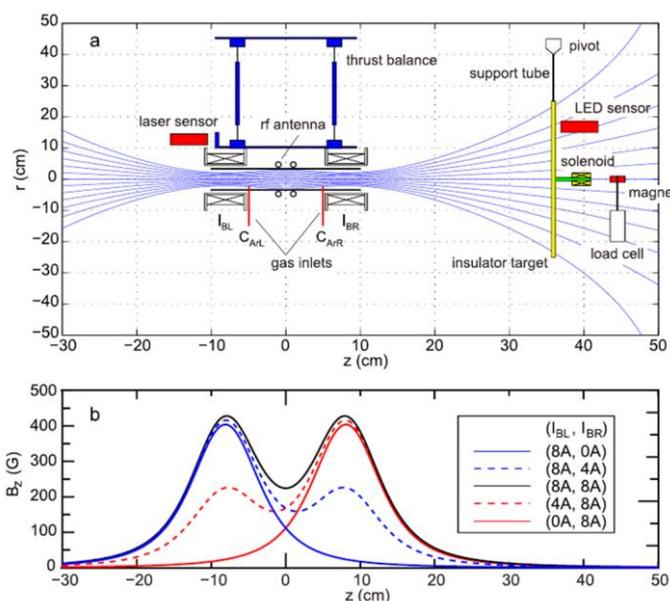


図2: (a) 双方向加速型磁気ノズル高周波プラズマ推進機およびデブリ除去実証実験の概略図。(b) 外部印加磁場計算結果。

示すように、絶縁管中心に高周波ループアンテナを設置し、13.56MHz、1kWの高周波電力を投入しプラズマを生成することが可能である。

また推進機の下流域 ($z=35\text{cm}$) には、スペースデブリを模擬した直径45cmの絶縁物円板ターゲットを設置しており、 z 軸方向に

振動する振子構造となっている。背面にはロードセルを用いた校正器が取り付けられており、プラズマ流によってスペースデブリが受ける力を計測可能な構造としている。

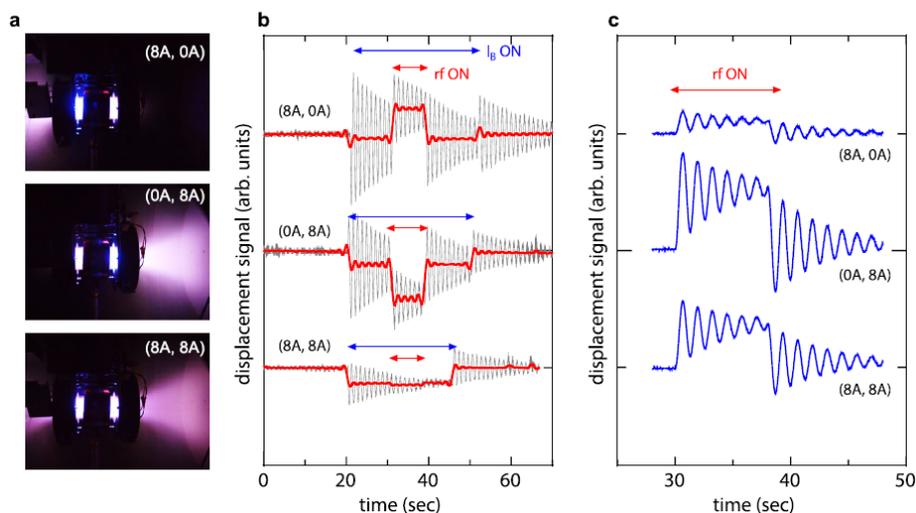


図3: 外部磁場を制御した際のプラズマ流の様子, スラストバランスによる推力計測の信号, およびデブリ模擬ターゲットに加わる力計測の信号。

4. 研究成果

図3(a)には、左右のソレノイドコイルに流す電流を変化させた場合のプラズマ流の写真を示している。磁場配位によって左右へと噴射されるプラズマ流の発光強度が大きく変化していることが分かる。また左右のコイルの電流が等しい場合には、左右に同程度の発光強度を有するプラズマ流が噴射されている。したがって、図1の概念図で示したような双方向加速型のプラズマ推進機として動作可能であることが分かる。図3(b)(c)には、スラストバランスによる推力計測の信号およびデブリ模擬ターゲットへ加わる力の計測信号を示している。いずれの条件においてもデブリには右向きの力が働いており、減速力を加えることが可能であることを示している(図3c)。一方で推進機に加わる推力の信号では、コイル電流によって左向きと右向きの力が逆転して発生可能であることが分かる。また、左右のコイル電流が等しい場合には、正味の力が発生していないことが明確に観測された(図3b)。

図4には、ターゲットに加わる力と推力の磁場電流依存性を計測した結果を示している。左右のコイル電流が等しい条件では、正味推力がゼロである一方で、ターゲットに約8mNの減速力を与えることが可能である(グラフ中央)。またコイル電流を変化させることで連続的に推力と減速力を制御することが可能であり、加速(グラフ右側)・減速(グラフ左側)・デブリ除去(グラフ中央)といった、デブリ除

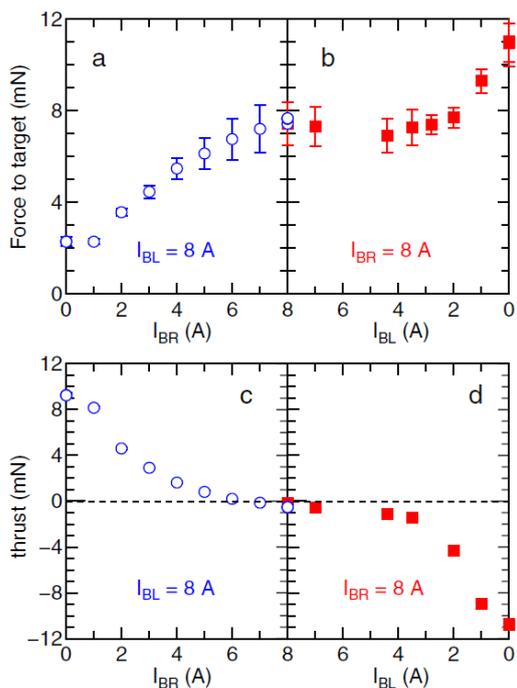


図4: デブリ模擬ターゲットに加わる力, および推力の磁場電流依存性計測結果。

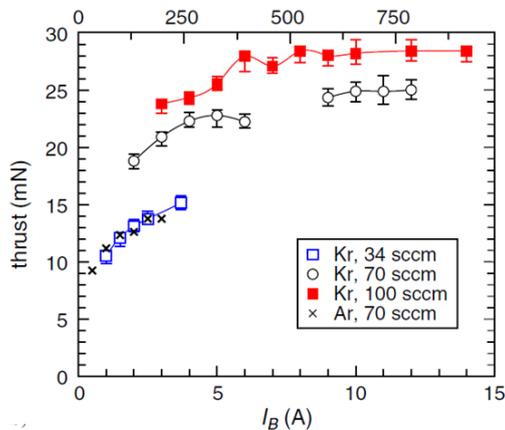


図5: 作動ガスをAr, Krとした場合の推力計測結果。

去ミッションに必要となる推進機動作を、磁場コイル電流のみで制御可能であることが明らかになった[文献①].

スペースデブリに関して最も大きな問題となっているのが、重さ数 t 級、大きさ数 m 級の大型デブリの存在であり、デブリ同士の衝突によってデブリ数が増加する自己増殖現象が懸念されているためである。国際的にもデブリ除去に関する最優先事項は、大型デブリの除去であるという認識で研究開発が進められている。欧州の研究グループの試算結果では、数 kW 級の電力帯において 30–50mN 級の推力、3000sec 級の比推力が必要であることが示されている。そこで、今回の双方向加速型プラズマ推進機の基盤技術である磁気ノズルプラズマ推進機の性能改善を実施した。

図 5 には、高周波電力を 1kW とし、作動ガスを Ar および Kr とした場合の推力計測結果を示している。Kr を用いた場合には高い推力電力比が得られることが分かった。一方で、燃料の質量流量が増加するため、推進効率や比推力は低下することが分かった[文献②].

推進機の高性能化を図るために、これまでの知見を元にグローバルモデルと一次元磁気ノズルモデルを組み合わせた解析を実施し、プラズマ生成部の大口径化、強磁場化、およびガス導入口の改善を実施した。図 6 は、高性能化したプラズマスラスタの推力計測結果と推進効率の評価結果である。3–5kW 程度の高周波電力において約 50–60mN 程度の推力が得られていることが分かる。また、磁気ノズル RF プラズマ推進機では最高性能となる推進効率 20% が得られることが分かった。これにより、更に高性能化を進めることで、大型デブリの除去技術の開発へと進展する可能性が見いだされたといえる。

宇宙空間で推進機を使用するためには、高性能化に加えてシステムの小型化や制御性の向上などが求められる。そこで本研究では、従来の高周波プラズマ発生方式で必要となるインピーダンス整合器に着目し、小型化を妨げる要因である可変コンデンサを用いないプラズマ発生用 RF システムの開発を行った。ここでは、RF 周波数を可変とすることでインピーダンス整合を行い、かつ入射電力と反射電力の差である正味電力を一定に保つようにフィードバック制御している。宇宙空間での通信負荷を削減するために、今回開発した RF システムではこの制御ボードを内蔵している。図 7 を見ると、RF 電力を投入してから 10msec 以内に周波数が変化し、反射電力が減少、すなわち反射係数が低下し、効率良く RF 電力を伝送していることが分かる。また、正味電力一定の制御機構によって安定したプラズマ生成が可能であることが実証された。これより、従来の可変コンデンサを用いたインピーダンス整合器を用いない小型の RF システムが実現可能であることが実証されたといえる[文献③].

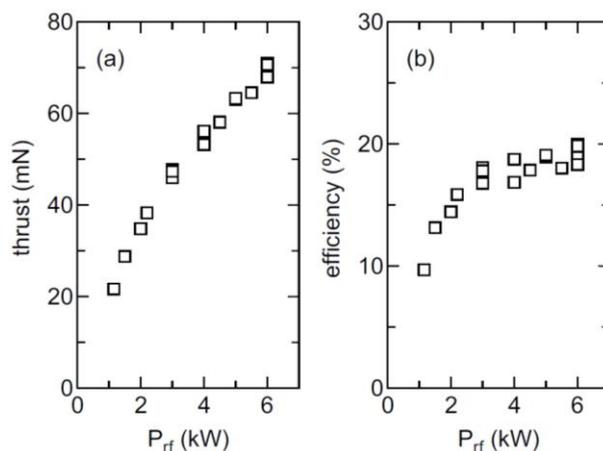


図 6: 高性能化したプラズマスラスタの推力計測結果および推進効率。

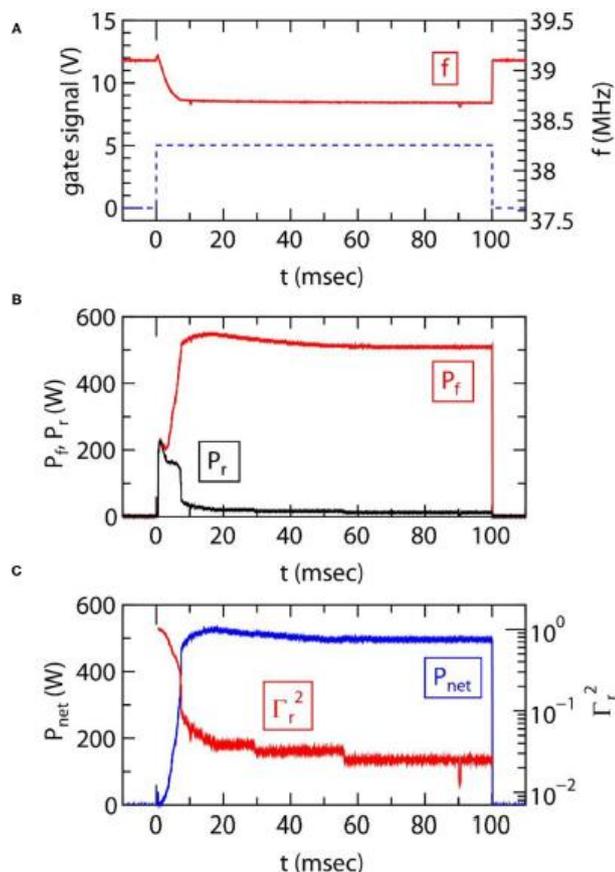


図 7: 自動周波数制御型の RF システムによるプラズマ生成時の駆動周波数、入射・反射電力、正味電力、反射係数の計測結果。

<引用文献>

- ① K. Takahashi, C. Charles, R.W. Boswell, and A. Ando, *Sci. Rep.* **8**, 14417 (2018).
- ② K. Takahashi, Y. Takao, and A. Ando, *J. Propul. Power* **36**, 961 (2020).
- ③ K. Takahashi, R. Imai, and K. Hanaoka, *Front. Phys.* **9**, 639010 (2021).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 12件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 Takahashi Kazunori、Takao Yoshinori、Ando Akira	4. 巻 28
2. 論文標題 Low-magnetic-field enhancement of thrust imparted by a stepped-diameter and downstream-gas-injected rf plasma thruster	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Plasma Sources Science and Technology	6. 最初と最後の頁 085014-1 ~ 8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-6595/ab3100	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 Kazunori Takahashi	4. 巻 3
2. 論文標題 Helicon-type radiofrequency plasma thrusters and magnetic plasma nozzles	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Reviews of Modern Plasma Physics	6. 最初と最後の頁 3-1 ~ 3-61
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s41614-019-0024-2	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 SUGAWARA Takeharu、TAKAHASHI Kazunori、ANDO Akira	4. 巻 14
2. 論文標題 Simultaneous Measurements of Local Axial and Radial Momentum Fluxes near a Radial Wall of a Helicon Source	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1301143-1 ~ 4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1585/pfr.14.1301143	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 Kazunori Takahashi, Christine Charles, Rod W Boswell, and Akira Ando	4. 巻 IEPC2019
2. 論文標題 Laboratory demonstration of a bidirectional helicon plasma thruster for space debris removal	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 36th International Electric Propulsion Conference	6. 最初と最後の頁 A852-1 ~ 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 Kazunori Takahashi, Takeharu Sugawara, and Akira Ando	4. 巻 10
2. 論文標題 Spatially- and vector-resolved momentum flux lost to a wall in a magnetic nozzle rf plasma thruster	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1061-1 ~ 11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-020-58022-6	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 Takahashi Kazunori, Saito Taichi, Ando Akira, Yabuta Yuki, Mizuguchi Hisashi, Yamamoto Naoko, Kamei Ryuichiro, Hara Shiro	4. 巻 171
2. 論文標題 Minimal multi-target plasma sputtering tool	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Vacuum	6. 最初と最後の頁 109000-1 ~ 7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.vacuum.2019.109000	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 Takahashi Kazunori, Hanaoka Kengo, Ando Akira	4. 巻 7
2. 論文標題 Fast and Automatic Control of a Frequency-Tuned Radiofrequency Plasma Source	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Frontiers in Physics	6. 最初と最後の頁 227-1 ~ 8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fphy.2019.00227	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 高橋和貴, Christine Charles, Rod W Boswell, 鷹尾祥典, 安藤晃	4. 巻 5
2. 論文標題 磁気ノズルRFプラズマスラスト開発の現状	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 宇宙太陽発電	6. 最初と最後の頁 14 ~ 17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.24662/ssps.5.0_14	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 該当する

1. 著者名 Takahashi Kazunori, Charles Christine, Boswell Rod W., Ando Akira	4. 巻 8
2. 論文標題 Demonstrating a new technology for space debris removal using a bi-directional plasma thruster	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 14417-1 ~ 10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-018-32697-4	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 Hanaoka Kengo, Takahashi Kazunori, Ando Akira	4. 巻 48
2. 論文標題 Reproducibility of a Plasma Production in a Fast- and Automatically-controlled Radio Frequency Plasma Source	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Plasma Science	6. 最初と最後の頁 2138 ~ 2142
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TPS.2020.2987554	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 Takahashi Kazunori, Sugawara Takeharu, Ando Akira	4. 巻 27
2. 論文標題 Modification of momentum flux lost to a radial wall of a helicon source by neutral injection	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 064504-1 ~ 5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0002173	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 Takahashi Kazunori, Takao Yoshinori, Ando Akira	4. 巻 36
2. 論文標題 Increased Thrust-to-Power Ratio of a Stepped-Diameter Helicon Plasma Thruster with Krypton Propellant	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Propulsion and Power	6. 最初と最後の頁 961 ~ 965
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2514/1.B37940	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 Takahashi Kazunori, Imai Ryoji, Hanaoka Kengo	4. 巻 9
2. 論文標題 Automatically Controlled Frequency-Tunable rf Plasma Thruster: Ion Beam and Thrust Measurements	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Frontiers in Physics	6. 最初と最後の頁 639010-1 ~ 13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fphy.2021.639010	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17件(うち招待講演 4件/うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Kengo Hanaoka, Kazunori Takahashi, Akira Ando and Shiro Hara
2. 発表標題 Development of a compact, frequency-tuned, and pulsed helicon plasma source for silicon etching
3. 学会等名 15th International Symposium on Sputtering & Plasma Processes (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazunori Takahashi, Taichi Saito, Akira Ando, and Shiro Hara
2. 発表標題 Minimal multi-target helicon sputtering tool
3. 学会等名 15th International Symposium on Sputtering & Plasma Processes (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazunori Takahashi, Christine Charles, Rod Boswell, and Akira Ando
2. 発表標題 Laboratory demonstration of a bidirectional helicon plasma thruster for space debris removal
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 Kazunori Takahashi
2. 発表標題 Many aspects of plasma expansion physics in the magnetic nozzle and space applications
3. 学会等名 3rd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takeharu Sugawara, Kazunori Takahashi and Akira Ando
2. 発表標題 Axial and radial momentum fluxes lost to a radial wall of a helicon plasma thruster
3. 学会等名 3rd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 花岡健吾, 高橋和貴, 安藤晃
2. 発表標題 The pulse-controlled helicon plasma source for the silicon etching
3. 学会等名 2019年度 電気関係学会東北支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋和貴, Christine Charles, Rod W Boswell, 鷹尾祥典, 安藤晃
2. 発表標題 磁気ノズルRFプラズマスラスタ開発の現状
3. 学会等名 第5回宇宙太陽発電(SSPS)シンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋和貴, 花岡健吾, 安藤 晃
2. 発表標題 周波数制御型ヘリコンプラズマ源の開発と応用
3. 学会等名 第36回 プラズマ・核融合学会 年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋和貴, Christine Charles, Rod Boswell, 鷹尾祥典, 菅原文晴, 斎藤太地, 高瀬一樹, 安藤晃
2. 発表標題 ヘリコンスラスト中のプラズマ物理現象とRFシステム開発
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 高橋和貴
2. 発表標題 ヘリコンスラスト中のエネルギー分布関数と推力計測
3. 学会等名 電気推進夏の学校 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高橋和貴
2. 発表標題 小型高周波プラズマ源を用いた実用化装置開発
3. 学会等名 プラズマ流の基礎と応用に関する研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋和貴, Christine Charles, Rod Boswell, 安藤晃
2. 発表標題 ヘリコンスラストからの双方向プラズマ運動量放出とスペースデブリ除去
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazunori Takahashi
2. 発表標題 Plasma expansion in a magnetic nozzle thruster
3. 学会等名 The 73rd Annual Gaseous Electronics Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高橋和貴, 花岡健吾, 今井 涼二
2. 発表標題 ヘリコンスラスト開発と自動制御高周波システム
3. 学会等名 第64回宇宙科学連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高橋和貴
2. 発表標題 ヘリコン波プラズマを用いた宇宙工学と地上産業応用
3. 学会等名 第37回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 今井涼二, 高橋和貴
2. 発表標題 磁気ステアリングによるヘリコンスラストの推力ベクトル制御の検証
3. 学会等名 第37回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 今井涼二, 高橋和貴, 安藤晃
2. 発表標題 磁気ステアリングを用いたヘリコンスラストの推力ベクトル制御
3. 学会等名 2020年度宇宙輸送シンポジウム
4. 発表年 2020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
研究分担者	安藤 晃 (ANDO Akira) (90182998)	東北大学・工学研究科・教授 (11301)	

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		
オーストラリア	The Australian National University		