

令和 5 年 5 月 16 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19H00663

研究課題名(和文) 磁気ノズル中のプラズマ運動量輸送とディタッチメント

研究課題名(英文) Plasma momentum transport and detachment from a magnetic nozzle

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) 35,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、磁気ノズルプラズマ推進機に関して、内部での運動量輸送機構の理解を進め、特にプラズマ生成部内壁への損失エネルギー分布を解明するとともに、損失抑制によって推進機性能の向上を実現した。また、磁気ノズルからのプラズマ離脱現象に関する実験では、静電場によって加速されたイオンの離脱の観測、および自発的な波動励起に伴って駆動される電子の内向き輸送現象を発見し、プラズマ離脱に向けたシナリオを示した。さらには、推進システムの小型化や制御性の向上を目的として、高速・自動制御型の周波数可変RFシステムを開発し、10msec以下の時間でインピーダンス整合および推進機の安定運転が可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、大電力・長寿命の宇宙推進機の候補である磁気ノズルプラズマ推進機の開発と高性能化に向けて、プラズマ現象やエネルギー損失等を室内実験で明らかにし、その物理的解釈を与えており、学術的な意義が大きく、将来的には宇宙輸送技術の開発へとつながることから社会的な意義も大きいといえる。さらには、宇宙空間での作動に必要なプラズマ離脱現象に関して、静電場によるイオン加速と、自発的に励起される波動による電子の輸送が混合した輸送現象が起きていることを観測し、プラズマ離脱現象の新たなシナリオを提示した。このような現象は報告例がなく、学術的な意義が非常に高いといえる。

研究成果の概要(英文)：Momentum transport inside a magnetic nozzle plasma thruster are investigated; the spatial profile of the energy lost to the plasma-source wall is experimentally identified and inhibited, resulting in the performance improvement of the thruster. Furthermore, measurement of the ion velocity fields clearly demonstrated the less divergent ion flow than the magnetic field lines, indicating the ion detachment from the nozzle, while the electron inward transport is driven by the spontaneously excited wave. These observation suggest the new plasma detachment scenario. In terms of engineering, a fast- and automatically-controlled, frequency-tunable rf generator is developed, demonstrating the impedance matching within 10 msec and the stable operation of the plasma thruster.

研究分野：プラズマ理工学

キーワード：プラズマ推進 磁気ノズル 運動量輸送 ディタッチメント

1. 研究開始当初の背景

宇宙商業利用や有人惑星探査計画の進展によりミッションの多様性が増す中で、高比推力・高推力の長寿命・大電力電気推進機の開発の重要性が高まっている。申請者らの磁気ノズルヘリコンスラスタの推力計測や磁気ノズル中の電磁力を介した運動量変換による推力発生の実証等の基礎研究を皮切りに、磁気ノズルと高周波放電を用いた無電極磁気ノズルプラズマ推進機に関する研究開発が激化している。また無電極プラズマ推進機からの双方向プラズマ放出と制御を活用したスペースデブリ除去法が室内実験で実証されるなど、その応用先も拡大しつつある。

磁気ノズルプラズマ推進機では、高密度プラズマが発散磁場中での自発的加速過程や運動量変換過程を経て宇宙空間へと放出された際に、放出運動量に相当する推力が得られる。したがって宇宙空間で推力を発生させるためには、プラズマ流が閉ループ構造を有する磁力線から離脱する必要がある。磁気ノズルプラズマ推進機動作の最終ステージといえるプラズマ離脱現象の発現条件を明らかにするとともに、運動量放出過程を室内実験において明らかにする必要がある。これまでに、プラズマ流がアルベン速度を超えた際に磁気ノズルが伸長して離脱が起こるMHD離脱現象や乱流輸送が介在する離脱現象等のシナリオが提案されてきているが、これらを実験的に検証した例は報告されておらず、実験未踏領域であるといえる。これは高ベータプラズマ流の形成が容易でないことが原因の一つであると考えられるが、申請者らによって、ヘリコンプラズマ源電力を5kW程度まで増加した際に、下流域でプラズマ流が磁気ノズルを伸長していることが初めて観測され、MHD離脱現象実現の期待が高まっている。一方で、これまでのMHD離脱現象の理論予測とは大きく異なる条件で起きていることが示唆され、さらにここで観測される磁場強度の変化は外部磁場の数%にとどまっているため、プラズマ流が磁力線から離脱する過程の観測には至っていない。

また研究開始当初時点での推進効率は最大で10%程度であり、その原因として、プラズマ発生部内部での運動量およびエネルギーの損失が原因であると考えられており、その解明と損失抑制が今後の推進性能向上を左右する課題であるといえる。

2. 研究の目的

本研究では、磁気ノズルプラズマ推進機の最大の課題であるプラズマ離脱現象の実験的検証とその物理過程の理解を進めるとともに、推進機内部での運動量輸送過程を明らかにし、推進性能向上へ向けた学術基盤を構築することを目的とする。本研究を推進し離脱現象と運動量輸送制御法を模索することで、推進機の高性能化に向けた研究展開を図る。

3. 研究の方法

実験は主に、図1に示すような内径1m、長さ2mのスペースチャンバーを用いて行った。チャンバー内部には、磁気ノズルプラズマ推進機、推力計測用のスラストバランス、プラズマ計測用の各種プローブ、独自に開発した運動量ベクトル計測器(MVMI)を設置しており、3台のターボ分子ポンプを用いて真空排気が可能となっている。

(1) 推力計測法

推進機の推力計測には、振子型のスラストバランスを用いており、プラズマ発生に伴う振子の変位をレーザー変位計で計測することで推力を評価した。実験前に既知の力をスラストバランスに印加し同時に変位を計測することで校正係数を求め、プラズマ発生によって発生する推力の絶対値評価が可能である。

(2) プラズマ計測法

プラズマに関する各種物理諸量の計測では、静電ラングミュアプローブ、磁気プローブ、マッハプローブ等を用いて、プラズマ密度、電子温度(電子エネルギー分布関数)、プラズマ電位、イオン流束、変動磁場の計測を行った。またMVMIでは、ディテクタ表面に流入する軸方向および径方向の運動量流束を同時に計測することが可能であり、得られるデータとラングミュアプローブの電流値より、プラズマ損失に起因するエネルギーの見積が可能である。

(3) スラスタ作動

プラズマ推進機の作動は、マスフローコントローラを用いてプラズマ生

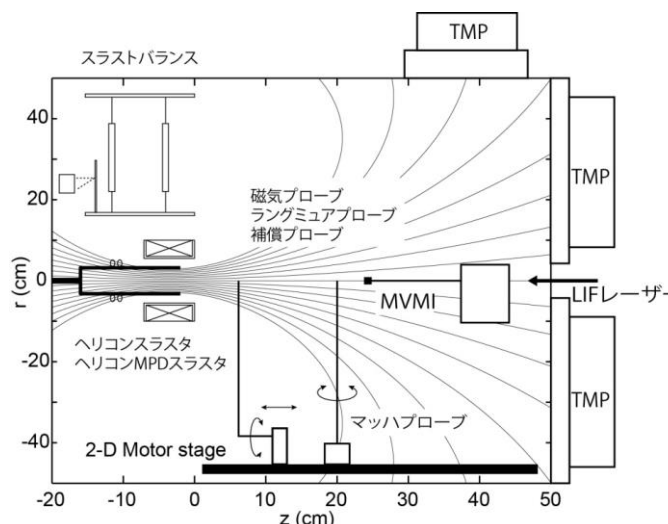


図1：典型的な実験装置セットアップの概略図。

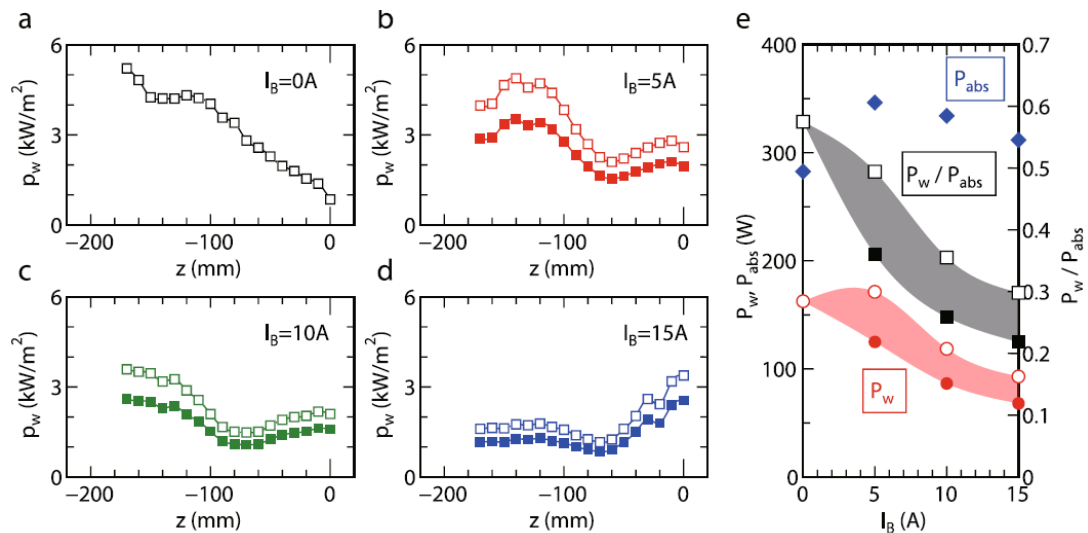


図 2：典型的な実験装置セットアップの概略図 [1].

成部に燃料ガスを導入し、ソレノイドコイルに電流を印加し磁気ノズルを形成した後に、高周波アンテナに高周波電力を投入することでプラズマを定常的またはパルス動作で発生させている。

4. 研究成果

(1) 運動量輸送の評価結果

図 2(a-d)には、ソレノイド電流、すなわち外部磁場強度を変化させた際の、磁気ノズルプラズマ推進機の性能低下の主要因であると考えられるプラズマ発生部壁面へのエネルギー損失分布の計測結果を示している。磁場強度の増大に伴い、上流域のエネルギー損失が抑制されていることが明らかになった。図 2(e)には、壁面へ損失する総エネルギー(P_w)、プラズマに吸収された高周波電力(P_{abs})、およびそれらの比 P_w/P_{abs} の評価結果を示している。このデータより、磁場強度の増加によって壁面へのエネルギー損失が抑制されることが実証されたといえる。一方で磁場強度を増加した状態でも 20-30%程度のエネルギーが損失することが明らかになり、この抑制が今後の課題であることを示した[1]。また、ガス導入位置を変更して壁面への運動量損失分布を評価したところ、プラズマ源出口近傍からガスを供給することでプラズマ密度分布が変化し、その結果壁面損失が抑制されることを明らかにした[2].

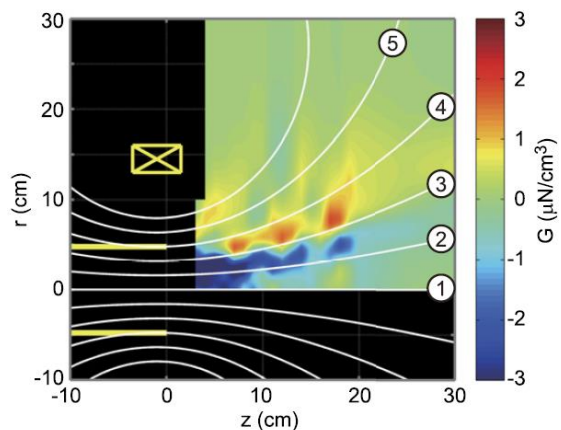


図 3：運動量ゲインの評価結果[2].

(2) 磁気ノズル中の運動量変換・輸送過程

磁気ノズル中では、自発的に誘起される電場、および内部電流と磁場のローレンツ力によって運動量変換が起こりうる。そこで、MVMIを用いて運動量ゲインの評価を実験的に行った結果を図 3 に示す。ここでプラズマ密度分布はホロー形状を有しているため中心部と周辺部では、反磁性電流は逆向きに誘起されると考えられる。図 3 青部で示すように、プラズマ中心部では運動量の減少が起きており、周辺部では顕著な増加が確認された。このデータを断面にわたって積分したところ、下流 20-30cm の範囲で軸方向運動量が増加していることを明らかにした[3]。さらに、PIC シミュレーションによりこの運動量増減に関して評価し、実験と一致する結果が得られている[4]。この運動量変換過程では、電子反磁性効果、すなわち電子の圧力勾配が駆動力になっていると考えられる。そこで、磁気ノズルと電子のみが相互作用をする実験系を構築し、電子の内部エネルギーの評価、す

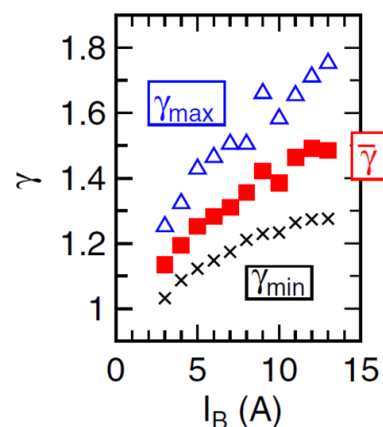


図 4：電子のポリトロピー指数の計測結果[5].

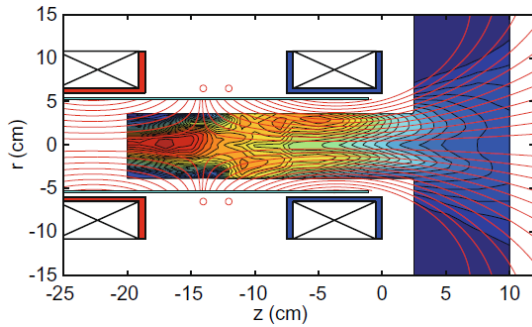


図 5 : カスプ磁場を搭載した磁気ノズル高周波プラズマスラスタのプラズマ密度分布計測結果 [7].

なわちポリトロプ指数の評価を行ったところ、磁場が弱い場合には真空膨張に相当する $\gamma=1$, 磁場強度の増加に伴い断熱膨張を示す $\gamma=5/3$ に近づくことが観測された (図 4). すなわち、磁場強度が十分に強い条件では、電子が磁気ノズルへと仕事をを行い、その結果冷却されることを実証したといえる[5].

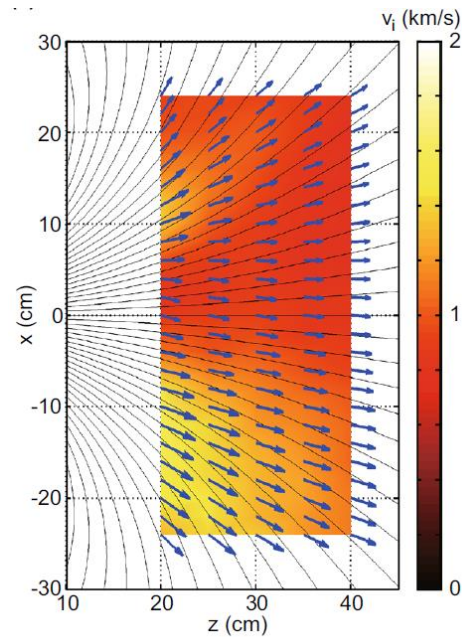


図 6 : イオンの速度場の計測結果 [8].

(3) 推進機の性能向上

プラズマ発生部における壁面への損失抑制には、上述したガス導入の効果に加えて、プラズマ発生部の大口径化が有効であると考えられる. また磁気ノズル効果の効率を向上するためには、磁場強度の増加が必要であることを踏まえて、直径 10cm 級の磁気ノズル高周波プラズマスラスタの設計・製作を行い、その性能を評価した. その結果、当該推進方式では当時最高記録となる推進効率 20%を得ることに成功した[6]. さらに損失を抑制する為に、プラズマ発生部上流にソレノイドコイルを追加し、高周波アンテナ上流にカスプ磁場を形成して推力評価を行った (図 5). その結果、プラズマ損失が抑制され最大推進効率 30%を得ることに成功した[7].

(4) 磁力線からの離脱現象

磁気ノズル中に発生する自発的な電場によってイオンが加速されることが多くの実験で観測され、典型的には静電イオンエネルギーアナライザを用いたビーム計測が実施されてきた. 本実験では、マクロなイオンの速度場を評価するために、マッハプローブを用いて流速評価を実施した. 図 6 の矢印がイオンの速度場、実線が磁力線の計算結果を示しており、イオンの速度ベクトルの発散角が磁力線よりも小さく、推進機の長手軸方向にイオンが離脱していることが明らかになったといえる.

磁化した状態にある電子の離脱過程を検証する為に、静電ラングミュアプローブを用いて密度揺動および電場揺動の計測を行った. 図 7(a)に示すように、密度揺動および電場揺動ともに 40kHz 帯に大振幅の波動が励起されていることが観測されている. 図 7(b)に示すように、これらの信号のコ

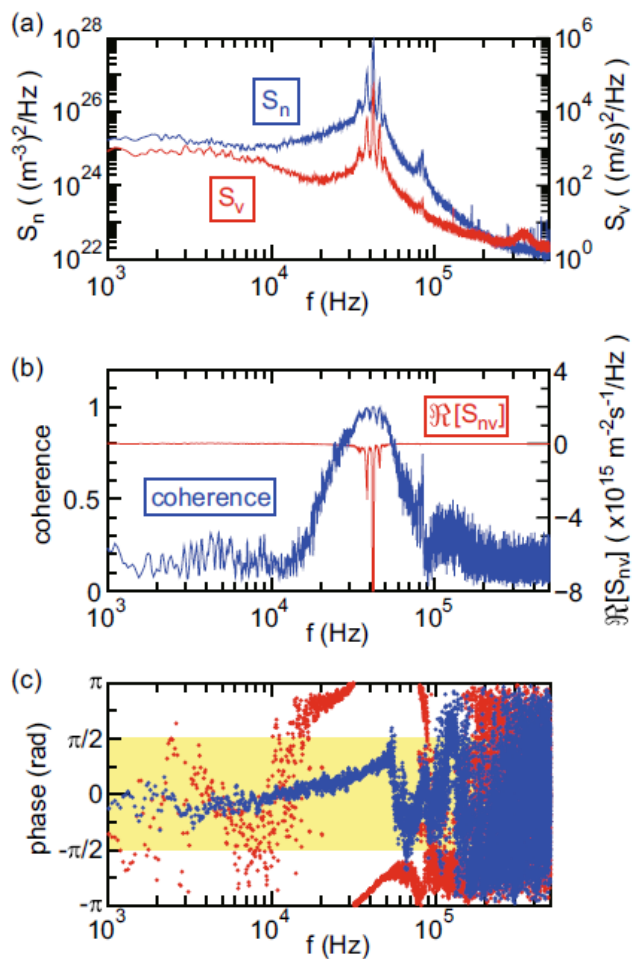


図 7 : (a)密度揺動, 電場揺動, (b) コヒーレンス, クロススペクトルの実部, (c)位相の計測結果 [8].

ヒーレンスを評価したところ電場揺動と密度揺動に強い相関が確認された。またクロススペクトルの実部は、磁力線を横切る電子の流束に相当しており、図 7(b)のデータでは負の値を示し、これは中心軸方向に向かった電子輸送が起きていることを示唆している。また、異なる半径位置でも計測を実施したところ、図 7(c)に示すように、電場揺動と密度揺動の位相関係が逆転し、中心軸方向に向かった電子の内向き輸送が起きていることが明らかになったといえる[8]。このデータは、磁気ノズルからの電子の離脱現象に寄与する輸送を示唆するものであり、その詳細な解明と制御が今後大きな課題になることを示した。

(5) 高周波システム開発

推進機に高周波プラズマ源を搭載するためには、推進機の高性能化に加えて、高周波電源等の周辺機器の小型化や高効率化が求められる。本研究では、将来的な実機搭載を念頭に置いて、高周波システムの小型化・自動制御化に向けた開発を実施した。従来の高周波システムでは可変コンデンサを用いたインピーダンス整合器を使用するが、応答性や小型化が困難である等の課題を有している。そこで、周波数制御型の高周波システムを構築し、電源内部に制御ボードも搭載することで、整合回路の小型化とインピーダンスの高速化を実現した。図 8 には 1000shot のデータを解析したインピーダンス整合時間、各種電力、反射係数の確率密度関数の評価結果を閉めしている。10msec 以下の高速でインピーダンス整合が完了し、反射電力も数%に抑制されていることが分かる。またここで使用したインピーダンス整合回路には、表面実装用の High-Q セラミックキャパシタを使用しており、飛躍的な小型化を実現している [9]。

またこの技術の応用として、小型のプラズマ発生装置を必要とするミニマルファブ対応のプラズマエッチング装置開発を実施し、高速のガス切替を使用したボッシュプロセスにより、シリコン垂直・深堀加工が可能であることを実証し、多方面への研究展開を図っている [10]。

<引用文献>

- [1] K. Takahashi, T. Sugawara, and Ando, Spatially- and vector-resolved momentum flux lost to a wall in a magnetic nozzle rf plasma thruster, *Scientific Reports*, **10**, 1061 (2020).
- [2] K. Takahashi, T. Sugawara, and Ando, Modification of momentum flux lost to a radial wall of a helicon plasma source by neutral injection, *Physics of Plasmas*, **27**, 064504 (2020).
- [3] K. Takahashi, T. Sugawara, and Ando, Spatial measurement of axial and radial momentum fluxes of a plasma expanding in a magnetic nozzle, *New Journal of Physics*, **22**, 073034 (2020).
- [4] K. Emoto, K. Takahashi, and Y. Takao, Axial momentum gains of ions and electrons in magnetic nozzle acceleration, *Plasma Sources Science and Technology*, **30**, 115016 (2021).
- [5] K. Takahashi, C. Charles, and R.W. Boswell, Thermodynamic analogy for electrons interacting with a magnetic nozzle, *Physical Review Letters*, **125**, 165001 (2020).
- [6] K. Takahashi, Magnetic nozzle radiofrequency plasma thruster approaching twenty percent thruster efficiency, *Scientific Reports*, **11**, 2768 (2021).
- [7] K. Takahashi, Thirty percent conversion efficiency from radiofrequency power to thrust energy in a magnetic nozzle plasma thruster, *Scientific Reports*, **12**, 18618 (2022).
- [8] K. Takahashi, C. Charles, and R.W. Boswell, Wave-driven electron inward transport in a magnetic nozzle, *Scientific Reports* **12**, 201737 (2022).
- [9] K. Takahashi, R. Imai, and K. Hanaoka, Automatically controlled frequency-tunable rf plasma thruster: Ion beam and thrust measurements, *Frontiers in Physics* **9**, 639010 (2021).
- [10] K. Hanaoka and K. Takahashi, Vertical silicon etching by using an automatically and fast-controlled frequency tunable rf plasma source, *AIP Advances* **11**, 025013 (2021).

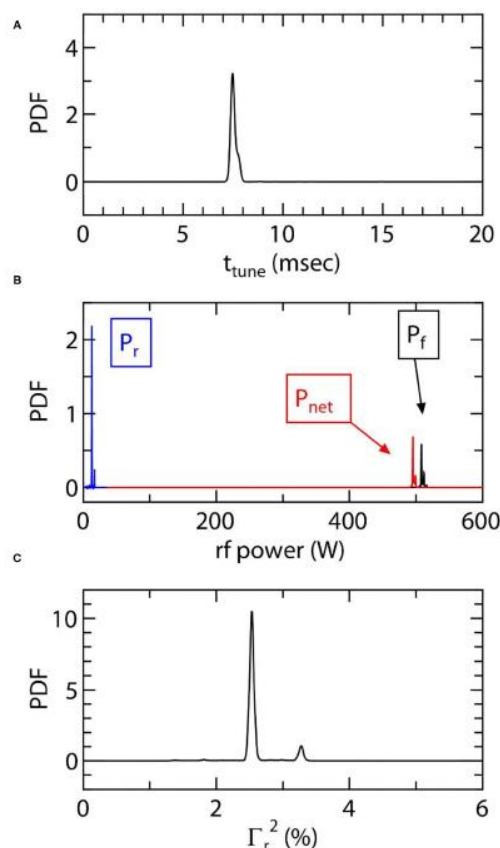


図 8 : インピーダンス整合時間, 入射・反射・正味電力, 反射係数の確率密度関数の評価結果。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計34件（うち査読付論文 30件 / うち国際共著 5件 / うちオープンアクセス 18件）

1. 著者名 Takahashi Kazunori、Imai Ryoji	4. 巻 29
2. 論文標題 Two-dimensional deflection of a plasma plume exhausted from a magnetically steered radiofrequency plasma thruster	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 054501 ~ 054501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0090476	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 Nakul Thanatith、Takahashi Kazunori	4. 巻 12
2. 論文標題 Characterization of a 2 MHz-radiofrequency-driven magnetically expanding plasma source	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 095118 ~ 095118
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0106732	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	4. 巻 12
2. 論文標題 Thirty percent conversion efficiency from radiofrequency power to thrust energy in a magnetic nozzle plasma thruster	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 18618 ~ 18618
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-022-22789-7	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、Charles Christine、Boswell Rod W.	4. 巻 12
2. 論文標題 Wave-driven electron inward transport in a magnetic nozzle	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 20137 ~ 20137
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-022-24202-9	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 Emoto Kazuma, Takahashi Kazunori, Takao Yoshinori	4. 巻 30
2. 論文標題 Density profile transition and high-energy electron transport in a magnetically expanding radio frequency plasma	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 013509 ~ 013509
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0126901	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 Shimizu Sota, Takahashi Kazunori	4. 巻 204
2. 論文標題 Assessment of a thrust induced by a water-fueled magnetron sputtering source	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Acta Astronautica	6. 最初と最後の頁 370 ~ 375
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actaastro.2023.01.014	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 Sumikawa Soya, Takahashi Kazunori	4. 巻 62
2. 論文標題 Radial profile control of a magnetically expanding plasma and its impact on a plasma thruster	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SL1001 ~ SL1001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/acc3a3	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, Miura Hidemasa	4. 巻 118
2. 論文標題 Direct measurement of thrust induced by a magnetron sputtering source	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 154101-1 ~ 5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0042798	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 Imai Ryoji, Takahashi Kazunori	4. 巻 118
2. 論文標題 Demonstrating a magnetic steering of the thrust imparted by the magnetic nozzle radiofrequency plasma thruster	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 264102-1~5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0058202	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 Emoto Kazuma, Takahashi Kazunori, Takao Yoshinori	4. 巻 AIAA2021
2. 論文標題 Investigation of Momentum Flux Lost to a Lateral Wall in an Electrodeless RF Plasma Thruster	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 AIAA Propulsion and Energy Forum	6. 最初と最後の頁 3383-1~6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2514/6.2021-3383	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 Emoto Kazuma, Takahashi Kazunori, Takao Yoshinori	4. 巻 28
2. 論文標題 Numerical investigation of internal plasma currents in a magnetic nozzle	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 093506-1~11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0053336	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 Emoto Kazuma, Takahashi Kazunori, Takao Yoshinori	4. 巻 30
2. 論文標題 Axial momentum gains of ions and electrons in magnetic nozzle acceleration	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Plasma Sources Science and Technology	6. 最初と最後の頁 115016-1~11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6595/ac33ee	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 Emoto Kazuma, Takahashi Kazunori, Takao Yoshinori	4. 巻 9
2. 論文標題 Vector Resolved Energy Fluxes and Collisional Energy Losses in Magnetic Nozzle Radiofrequency Plasma Thrusters	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Frontiers in Physics	6. 最初と最後の頁 779204-1 ~ 13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fphy.2021.779204	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, Miura Hidemasa	4. 巻 11
2. 論文標題 Comparison of thrusts imparted by a magnetron sputtering source operated in DC and high power impulse modes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 105115-1 ~ 6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0069184	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 Imai Ryoji, Takahashi Kazunori	4. 巻 55
2. 論文標題 Deflections of dynamic momentum flux and electron diamagnetic thrust in a magnetically steered rf plasma thruster	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Physics D: Applied Physics	6. 最初と最後の頁 135201-1 ~ 11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6463/ac4451	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, Sugawara Takeharu, Ando Akira	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, 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 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 高橋和貴, Christine Charles, Rod 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) なし	査読の有無 無
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 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, Sugawara Takeharu, Ando Akira	4. 巻 22
2. 論文標題 Spatial measurement of axial and radial momentum fluxes of a plasma expanding in a magnetic nozzle	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 New Journal of Physics	6. 最初と最後の頁 073034-1~9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1367-2630/ab98d5	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, Charles Christine, Boswell Rod W., Takao Yoshinori, Fruchtman Amnon, Navarro-Cavall Jaume, Merino Mario	4. 巻 8
2. 論文標題 Commentary: On helicon thrusters: Will they ever fly?	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Frontiers in Physics	6. 最初と最後の頁 277-1~3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fphy.2020.00277	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 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, Charles Christine, Boswell Rod W., Ando Akira	4. 巻 125
2. 論文標題 Thermodynamic Analogy for Electrons Interacting with a Magnetic Nozzle	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 165001-1~5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.125.165001	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 該当する

1. 著者名 Takahashi Kazunori	4. 巻 11
2. 論文標題 Magnetic nozzle radiofrequency plasma thruster approaching twenty percent thruster efficiency	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 2768-1~11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-021-82471-2	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 Hanaoka Kengo, Takahashi Kazunori	4. 巻 11
2. 論文標題 Vertical silicon etching by using an automatically and fast-controlled frequency tunable rf plasma source	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 025013-1~6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0038596	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, 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 -

1. 著者名 Takahashi Kazunori、Miura Hidemasa	4. 巻 in press
2. 論文標題 Direct measurement of thrust induced by a magnetron sputtering source	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 in press
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 Takahashi Kazunori	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 3-1~61
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 1301143-1~5
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、Imagi Tsuyoshi、Ishitomi Masashi、Nagaoka Kenichi、Haba Yasuaki、Nakano Haruhisa、Ando Akira、Kisaki Masashi、Tsumori Katsuyoshi、Ikeda Katsunori	4. 巻 21
2. 論文標題 Spatiotemporal oscillation of an ion beam extracted from a potential-oscillating plasma source	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 New Journal of Physics	6. 最初と最後の頁 093043-1~9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1367-2630/ab3f70	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, Akira Ando	4. 巻 IEPC-2019
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 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 Kazunori Takahashi, Yoshinori Takao, Akira Ando	4. 巻 IEPC-2019
2. 論文標題 Performance improvement of a magnetic nozzle plasma thruster	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 A855-1 ~ 5
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 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 -

〔学会発表〕 計66件 (うち招待講演 16件 / うち国際学会 34件)

1. 発表者名 Kazunori Takahashi
2. 発表標題 Helicon plasmas, magnetic nozzles
3. 学会等名 Online low temperature plasma seminar (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazunori Takahashi, Christine Charles, Rod Boswell
2. 発表標題 Assessment of cross-field electron transport in a magnetic nozzle
3. 学会等名 The 75th Annual Gaseous Electronics Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazuma Emoto, Kazunori Takahashi, Yoshinori Takao
2. 発表標題 Numerical investigation on plasma expansion and particle energy in a magnetic nozzle
3. 学会等名 The 75th Annual Gaseous Electronics Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Christine Charles, Dimitrios Tsifakis, Rod Boswell, Kazunori Takahashi, Robert Georges, Jessica Benedicto, Eric Rius, Noel Smith, Paul Tesch
2. 発表標題 Radiofrequency plasma thrusters and related studies
3. 学会等名 The 75th Annual Gaseous Electronics Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Rod Boswell, Felicien Filleul, Antonella Caldarelli, Christine Charles, Kazunori Takahashi, Alex Bennet
2. 発表標題 The Blue Core Paradigm
3. 学会等名 The 75th Annual Gaseous Electronics Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Thanatith Nakul, Kazunori Takahashi
2. 発表標題 Characterization of a 2 MHz magnetically expanding RF plasma source for thruster development
3. 学会等名 The 75th Annual Gaseous Electronics Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Soya Sumikawa, Kazunori Takahashi
2. 発表標題 Density profile control of a magnetically expanding plasma and its impact on a plasma thruster
3. 学会等名 The 75th Annual Gaseous Electronics Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kosuke Tsukuda, Kazunori Takahashi
2. 発表標題 Effect of energetic tail component on a polytropic index of electrons expanding in a magnetic nozzle
3. 学会等名 6th Asia Pacific Conference on Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazunori Takahashi
2. 発表標題 Magnetic nozzle radiofrequency plasma systems for space and industry
3. 学会等名 The 31st International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazunori Takahashi
2. 発表標題 Plasma Transport in a Magnetic Nozzle and Thruster Development
3. 学会等名 20th International Congress on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazunori Takahashi
2. 発表標題 Magnetic nozzle rf plasma thruster
3. 学会等名 Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) workshop on helicon thruster (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kazunori Takahashi
2. 発表標題 Magnetic nozzle radiofrequency plasma thruster
3. 学会等名 The 11th Asia Joint Conference on Propulsion and Power (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高橋和貴, Christine Charles, Rod Boswell
2. 発表標題 磁気ノズル高周波プラズマ推進機における電子内向き輸送の観測
3. 学会等名 日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 江本一磨, 高橋和貴, 鷹尾祥典
2. 発表標題 磁気ノズルによるプラズマ膨張におけるエネルギー依存性の数値解析
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 高橋和貴
2. 発表標題 磁気ノズルヘリコンスラストの性能改善
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 角川颯哉, 高橋和貴
2. 発表標題 磁気ノズル中のプラズマ密度分布制御と推進性能に与える影響
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 高橋和貴, Christine Charles, Rod W Boswell
2. 発表標題 発散磁場中を膨張する電子のポリトロープ指数
3. 学会等名 第39回 プラズマ・核融合学会 年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高橋和貴, Christine Charles, Rod W Boswell
2. 発表標題 磁気ノズルRFプラズマスラストの性能・物理に関する実験的研究の状況
3. 学会等名 2022年度宇宙輸送シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高橋和貴
2. 発表標題 ミニマルファブ向けヘリコンプラズマ源を用いたマルチターゲットスパッタリング装置の開発
3. 学会等名 日本表面真空学会 スパッタリングおよびプラズマプロセス技術部会 第173回定例研究会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高橋和貴
2. 発表標題 プラズマ材料科学分野の歴史と将来展望
3. 学会等名 JSPS プラズマ材料科学第153委員会 研究会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高橋和貴, Christine Charles, Rod W. Boswell
2. 発表標題 磁気ノズル中の内向き電子輸送を誘発する波動モードの計測
3. 学会等名 日本物理学会 2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kazunori Takahashi
2. 発表標題 Expansion of a helicon plasma in a magnetic nozzle and space thruster
3. 学会等名 First Helicon Plasma Physics and Applications Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazunori Takahashi
2. 発表標題 Momentum and energy lost to the wall in a magnetic nozzle plasma thruster and performance improvement
3. 学会等名 5th Asia Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryoji Imai, Kazunori Takahashi
2. 発表標題 Deflected thrust vector of a magnetically steered radiofrequency plasma thruster
3. 学会等名 5th Asia Pacific Conference on Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazunori Takahashi
2. 発表標題 The 74th Annual Gaseous Electronics Conference
3. 学会等名 Recent performance improvement of a magnetic nozzle rf plasma thruster (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryoji Imai, Kazunori Takahashi
2. 発表標題 Measurements of axial and horizontal thrusts in a magnetically steered radiofrequency plasma thruster
3. 学会等名 The 74th Annual Gaseous Electronics Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazunori Takahashi, Ryoji Imai, and Kengo Hanaoka
2. 発表標題 A magnetic nozzle rf plasma thruster - performance improvement and rf system development -
3. 学会等名 33rd International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ryoji Imai, Kazunori Takahashi
2. 発表標題 Experimental investigation on a magnetically-steered radiofrequency plasma thruster
3. 学会等名 33rd International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazunori Takahashi, Christine Charles, Rod Boswell
2. 発表標題 Magnetic nozzles and plasma plumes
3. 学会等名 ExB Plasma Workshop 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佃耕介, 高橋和貴, 安藤晃
2. 発表標題 Electron thermodynamics in a high-density plasma interacting with a magnetic nozzle
3. 学会等名 2021年度 電気関係学会東北支部連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 ナーグル タナーテット, 高橋和貴, 安藤晃
2. 発表標題 Development of a 2 MHz band high-power RF plasma source for large diameter helicon plasma thruster
3. 学会等名 2021年度 電気関係学会東北支部連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高橋和貴
2. 発表標題 磁気ノズル中の電子の動的輸送ダイナミクス
3. 学会等名 第38回 プラズマ・核融合学会 年会
4. 発表年 2021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タの多方向への推力偏向
3. 学会等名 第38回 プラズマ・核融合学会 年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佃耕介, 高橋和貴
2. 発表標題 磁気ノズル中電子ビーム励起プラズマの熱力学膨張過程
3. 学会等名 第38回 プラズマ・核融合学会 年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 ナーグル タナーテット,高橋和貴
2. 発表標題 Development of a 2 MHz band RF plasma source for large diameter helicon plasma thruster
3. 学会等名 第38回プラズマ・核融合学会 年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazuma Emoto, Kazunori Takahashi, and Yoshinori Takao
2. 発表標題 Investigation of Momentum Flux Lost to a Lateral Wall in an Electrodeless RF Plasma Thruster
3. 学会等名 AIAA Propulsion and Energy 2021 Forum (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazuma Emoto, Kazunori Takahashi, and Yoshinori Takao
2. 発表標題 Fully kinetic simulations of a magnetic nozzle radiofrequency plasma thruster using an open axial boundary condition
3. 学会等名 The 74th Annual Gaseous Electronics Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazuma Emoto, Kazunori Takahashi, and Yoshinori Takao
2. 発表標題 Effects of Neutral Distributions on Plasma Flow Through a Magnetic Nozzle
3. 学会等名 33rd International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 江本一磨, 高橋和貴, 鷹尾祥典
2. 発表標題 磁気ノズル加速におけるエネルギー輸送の数値解析
3. 学会等名 第38回 プラズマ・核融合学会 年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 江本一磨, 高橋和貴, 鷹尾祥典
2. 発表標題 下流シースを除去した磁気ノズルRFプラズマスラストの数値計算
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 江本一磨, 高橋和貴, 鷹尾祥典
2. 発表標題 無電極プラズマスラストのエネルギー損失に関する数値解析
3. 学会等名 第22回 宇宙輸送シンポジウム
4. 発表年 2022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 Kazuma Emoto, Kazunori Takahashi, Yoshinori Takao
2. 発表標題 Investigaion of the electromagnetic force and momentum gain in a magnetic nozzle plasma thruster
3. 学会等名 The 73rd Annual Gaseous Electronics Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 江本一磨, 高橋和貴, 鷹尾祥典
2. 発表標題 磁気ノズルプラズマスラスタの粒子計算による反磁性ドリフト電流分布の評価
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, 花岡健吾, 今井 涼二
2. 発表標題 ヘリコンスラスタ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 Kazunori Takahashi
2. 発表標題 Thermodynamics of electrons expanding in a magnetic nozzle
3. 学会等名 4th Asia Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kengo Hanaoka, Kazunori Takahashi, Ando Akira
2. 発表標題 Testing a scallop free vertical silicon etching by using a fast- and automatically- controlled RF plasma source
3. 学会等名 4th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hidemasa Miura, Kazunori Takahashi, Ando Akira
2. 発表標題 Direct measurement of a thrust induced by sputtered materials in magnetron-type plasma sources
3. 学会等名 4th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (国際学会)
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 江本一磨, 高橋和貴, 鷹尾祥典
2. 発表標題 磁気ノズルプラズマスラスタにおけるエネルギー輸送の数値解析
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 江本一磨, 高橋和貴, 鷹尾祥典
2. 発表標題 磁気ノズル加速における電磁気力と運動量増分の数値解析
3. 学会等名 2020年度宇宙輸送シンポジウム
4. 発表年 2021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 2021年

1. 発表者名 高橋和貴, Christine Charles, Rod W Boswell
2. 発表標題 磁気ノズル中の電子エネルギー分布関数：等温-断熱膨張の変化
3. 学会等名 2020年度宇宙輸送シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高橋和貴
2. 発表標題 境界における非局所性 及び動的液体金属-プラズマ接触実験
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021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
2. 発表標題 Development of automatically-controlled compact rf plasma source and its application
3. 学会等名 KAIST Workshop on the next generation RF plasma sources (招待講演) (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 三浦英将, 高橋和貴, 安藤晃
2. 発表標題 Direct measurement of thrust induced by sputtered materials for a compact electric propulsion device
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 Kazunori Takahashi, Christine Charles, Rod Boswell, 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, Yoshinori Takao, Akira Ando
2. 発表標題 Performance improvement of a magnetic nozzle plasma 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 Takeharu Sugawara, Kazunori Takahashi, 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 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 高橋和貴
2. 発表標題 磁気ノズルRFプラズマスラスト開発の現状
3. 学会等名 第5回宇宙太陽発電(SSPS)シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三浦英将, 高橋和貴
2. 発表標題 金属スパッタリングによる放出運動量計測と小型電気推進応用
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, 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

〔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	永岡 賢一 (Nagaoka Kenichi) (20353443)	核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授 (63902)	
研究分担者	鷹尾 祥典 (Takao Yoshinori) (80552661)	横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授 (12701)	
研究分担者	安藤 晃 (Ando Arkia) (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			
ドイツ	ドイツ航空宇宙局			
韓国	ソウル大学			
イスラエル	Holon Institute of Technology			
スペイン	Universidad Carlos III de Madrid			
オーストラリア	The Australian National University			