

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 25 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25287150

研究課題名(和文)ヘリコンプラズマスラスタの推力発生機構の解明と大出力化

研究課題名(英文)Thrust generation mechanisms by a helicon plasma thruster and its performance improvement

研究代表者

高橋 和貴 (Takahashi, Kazunori)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：80451491

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,200,000円

研究成果の概要(和文)：磁気ノズル無電極ヘリコンプラズマスラスタの推力発生機構の解明およびその大出力化に関する実験的・理論的研究を行った。推力成分の分解計測法を開発し、スラスタ境界へと流入するプラズマ運動量、および磁気ノズル中で増加する軸方向運動量を直接計測することに成功した。これらの運動量計測結果とプラズマ構造計測を並列して行うことでプラズマダイナミクスと推力発生機構の関連性を明らかにすることに成功した。

これらの学術的な知見を基盤として、高効率のスラスタ開発、および大電力動作へ向けた開発を実施し、ヘリコンスラスタの高性能化を進め、最大推力60mN、最大比推力1800秒程度を得ることに成功した。

研究成果の概要(英文)：Thrust generation mechanisms in a magnetic nozzle, electrodeless helicon plasma thruster are experimentally and theoretically investigated. The individual and direct measurement of the thrust components arising from the physical boundaries and magnetic nozzle are performed for the first time. This technique clearly evidences the presence of the thrust gain by the magnetic nozzle even in the current-free plasma thruster. The comparison between the measured thrust and the plasma parameters reveal that the Lorentz force due to the azimuthal plasma current and the radial magnetic field accelerates the plasmas and increases their axial momentum; then the thrust corresponding to the axial plasma momentum is increased. Furthermore, the novel loss mechanisms of the axial momentum to the lateral wall is discovered here. Based on the above studies, the higher performance thruster is successfully designed and operated in the laboratory.

研究分野：プラズマ理工学

キーワード：ヘリコンプラズマ プラズマスラスタ 推力 磁気ノズル 電気推進

1. 研究開始当初の背景

宇宙探査機や人工衛星に搭載される従来型電気推進機では、プラズマ生成部または加速部の電極がプラズマに暴露され、その結果イオン衝撃および熱負荷による電極損傷が避けられず推進機自体の寿命が制限されている。電気推進機は化学推進機に比べて比推力が高いため、長時間動作により探査機最終到達速度は化学推進機を凌駕するが、上述の電極損傷による寿命の問題で動作時間が制限され、性能が最大限に活用されていない。この解決法として、無電極プラズマスラスタに関する研究の重要性が認識されつつある。

2011年になり研究代表者らによって1kW級の永久磁石利用ヘリコンスラスタの推力直接計測が世界に先駆けて実現され、さらに磁気ノズル中のプラズマ内部に自発的に流れる電流と径方向磁場によるローレンツ力によって推力が増加する新たな効果が見出されてきたが、その詳細な電流発生機構と磁気ノズル中の推力増加メカニズムが明らかになっていない。またヘリコンスラスタの推力電力比は研究開始当初で最大6.7mN/kWであり、実用化に向けてこの高性能化が必須課題である。

2. 研究の目的

上述の研究背景を踏まえて本研究では、無電極磁気ノズルヘリコンプラズマスラスタの推力発生機構を解明し、実用化へ向けた高性能化への指針確立とその実証を行うことを目的とする。特に磁気ノズル中を自発的に流れるプラズマ電流の同定と推力の比較を定量的に行い、プラズマ運動量の増減機構と推力発生に関する学術的基盤を構築する。

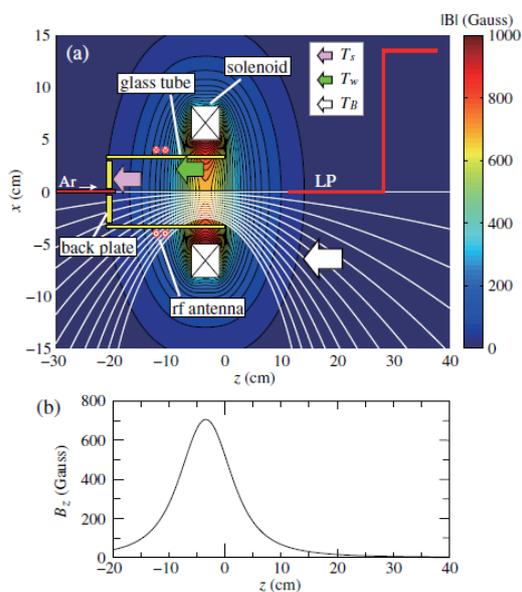


図1: (a)ヘリコンプラズマスラスタの概略図. (b)外部印加磁場配位の計算結果.

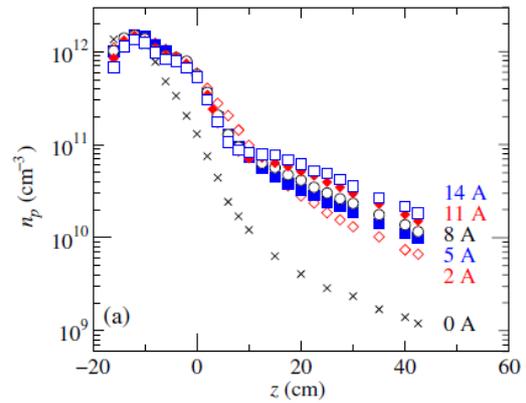


図2: プラズマ密度の軸方向分布.

3. 研究の方法

本研究対象である無電極ヘリコンプラズマスラスタの推力発生に関連するコンポーネントは、プラズマ生成部の軸方向および径方向の境界、すなわち上流終端板と径方向内壁、および磁気ノズルである。図1(a)にヘリコンスラスタの概略図、図1(b)には本研究で主に使用した磁場配位を示す。システムから放出する軸方向運動量の反力を推進機構が受けることで推力が発生する。これらの力の成分は、軸方向境界、径方向境界、磁気ノズルへとそれぞれ加わるため、変形振り子型スラストバランスへとそれぞれのコンポーネントを接続し、プラズマ生成に伴う振り子の変位を計測することで、推力成分の分解直接計測が可能となる。これらの成分をそれぞれ T_s , T_w , T_B と定義する。また全コンポーネントをスラストバランスへ接続することで、総推力 ($T_{total} = T_s + T_w + T_B$) の計測が可能となる。

またプラズマパラメータの計測には、図1(a)中に示した静電ラングミュアプローブ、静電イオンエネルギーアナライザなどの各種静電プローブ類、および中性粒子計測に関してはプラズマからの自発光の計測を行った。

4. 研究成果

(1) 磁気ノズルによる推力発生機構

図2にプラズマ密度 z 方向分布の、外部印加磁場強度依存性を示す。磁場強度の増加、すなわちソレノイド電流の増加に伴い、磁気ノズル領域 ($z > 0$) におけるプラズマ密度が増加していることが分かり、これは磁気ノズル中のプラズマの径方向拡散が抑制されるためであることが明らかになった。一方でプラズマ生成部 ($z < 0$) におけるプラズマ密度は一定に維持されており、プラズマ生成を一定に維持した状態で磁気ノズル中の径方向拡散・損失を抑制することに成功したといえる。磁気ノズルによる推力発生機構解明に向けた理想的な実験系を構築したといえる。

この状態において、各推力成分 (T_s , T_w , T_B) および総推力 T_{total} の直接計測を実施した。その結果を図3、図4にそれぞれ示す。プラズマ

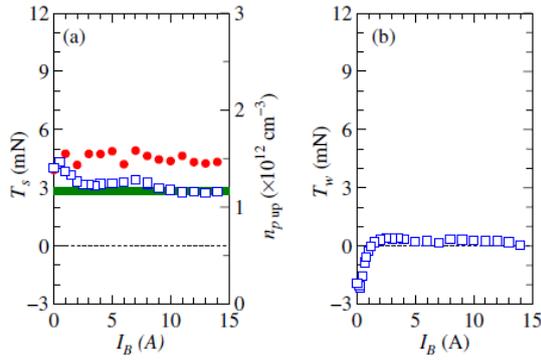


図 3: T_s , T_w の分解計測結果.

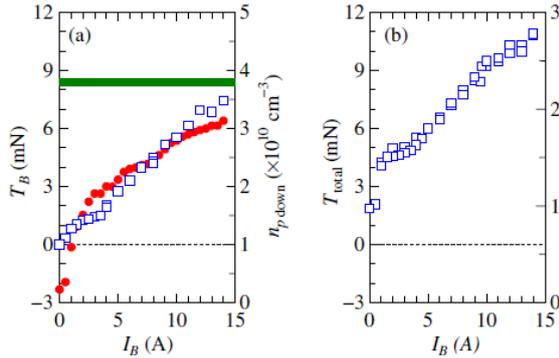


図 4: T_B , T_{total} の分解計測結果.

源内部のプラズマ密度を一定に維持しているため T_s は一定であり、かつ外部磁場の印加によりプラズマ源内壁への損失が比較的抑制されるため T_w は無視できる値であることが分かる。一方で磁気ノズルからのプラズマ損失を抑制した際には、磁気ノズルに起因する推力成分 T_B が増大し、その結果として総推力が増大することが明らかになった。図 4 中の実線は、磁気ノズルからのプラズマ損失を無視して 1 次元の電子反磁性スラストモデルより計算した T_B の値であり、磁場強度の増大に伴いこの値に漸近することが示唆される。一方で推力の飽和は観測されず、印加可能な磁場強度が不足しているためであると考えられる。

そこで、図 5 に示すようなパルス磁場発生回路をヘリコンプラズマ源へと導入し、最大磁場強度 3 kGauss まで印加可能なスラストおよびターゲットによる高精度推力計測法

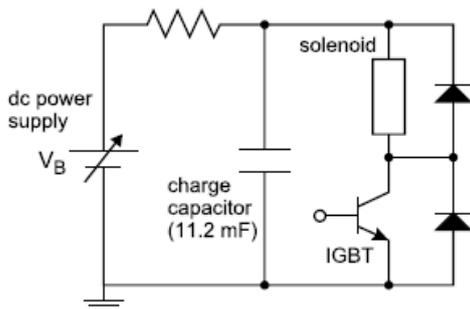


図 5: パルス磁場発生回路.

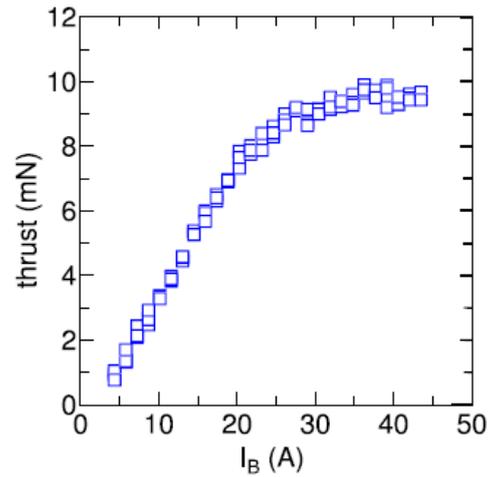


図 6: パルス磁場による強磁場ヘリコンプラズマの推力計測結果.

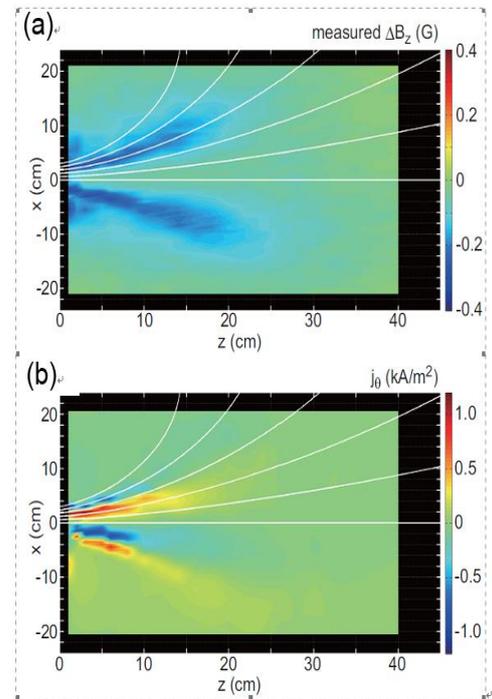


図 7: プラズマ生成による変動磁場および周方向電流の計測結果.

を開発し実験を実施した。図 6 に、推力の磁場強度依存性の計測結果を示す。この結果より、確かに磁場強度を増大した際に推力が飽和していることが観測され、さらにこの際のプラズマの発散過程は、電子反磁性モデルとよく一致することが示された。したがって、外部印加磁場強度が十分強い場合には、プラズマ中を流れる集方向電流は、電子反磁性ドリフト電流で記述することができると考えられる。

一方で、磁気ノズル中では磁場強度が空間的に減衰するため、下流域においては十分な磁場強度を得ることは不可能である。したがって、全領域または磁場強度が弱い条件での

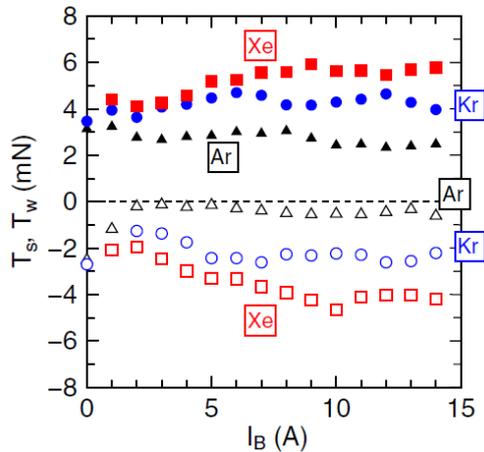


図8: 動作ガスを Ar, Kr, Xe とした際の, T_s , T_w の計測結果.

プラズマ周方向電流を理解する必要がある。図7には、プラズマ生成によって発生する軸方向磁場とその計測結果から算出した周方向電流を示す。磁気ノズルの表面領域において推力を増加する周方向電流が流れており、中心領域では逆向きに流れていることが明らかになった。ここで流れるプラズマ電流分布は、電子反磁性ドリフト電流に加えて、電子 ExB ドリフト電流の寄与が大きいことが、プラズマパラメータの詳細計測より明らかになった。さらに、外部磁場強度を十分に強くした場合には、後者の電流成分が小さくなることが明らかになり、これまでに提唱してきた電子反磁性モデルの強磁場条件での妥当性に関して矛盾ないことが示されたといえる。

(2) プラズマ運動量損失機構

上述より、ヘリコンスラスタの性能向上のためには、高電離・高密度プラズマの生成がキーテクノロジーであると考えられる。そこで動作ガスを電離レートが高い Kr, Xe として実験を実施した。図8にはその際の T_s , T_w の計測結果を示す。高密度プラズマ生成が容易に可能な Kr, Xe においては T_s の値が増加している一方で、これまでは無視できていた T_w が負の値として発生している、すなわち軸方向の運動量が径方向壁面へ損失していることが観測された。プラズマパラメータの詳細計測と比較すると、径方向壁面への軸方向運動量損失が顕著になる際には、プラズマ源内部において急激な密度勾配が生じていることが明らかとなった。燃料ガスを上流域から導入した状態で高密度プラズマを生成した際に、中性粒子の枯渇が起きて上述のプラズマ構造が形成されていると考えられる。このことから、図9に示すように、プラズマ中心部で電位勾配または密度勾配が形成された際に、電子圧力がイオン運動量へと変換され、これらのイオンが径方向壁面へ損失する際に重大な軸方向運動量の損失を引き起こすためであると考えられる。このことから、

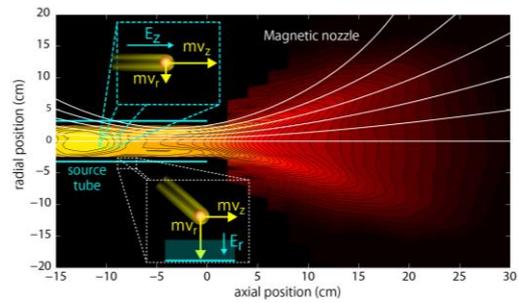


図9: ヘリコンスラスタ中の、径方向内壁への軸方向運動量損失メカニズム.

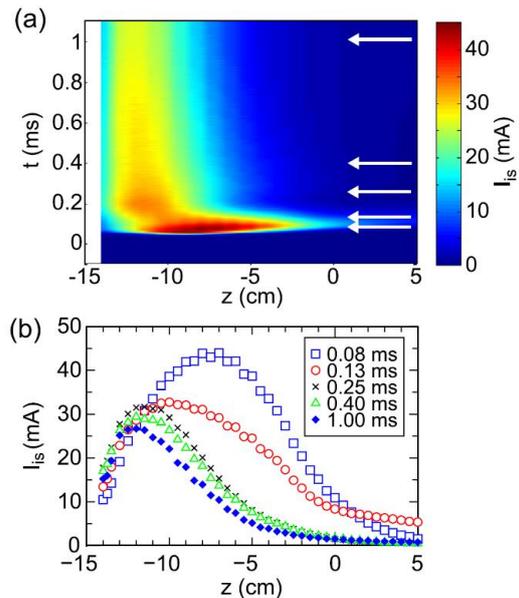


図10: 大電力RFパルス放電時のプラズマ構造形成の時空間発展.

新たな運動量損失機構が発見されたといえ、中性粒子によるプラズマ構造変形現象やその制御法が今後の重要課題であることが明らかになった。また、動作ガスを Ar とした場合においても、高周波電力を増大した際に中性粒子枯渇が起これ、プラズマ密度ピークが上流域に現れる様子が実験で観測され、今後のこの条件での内壁への運動量損失の評価や、Particle-in-cell シミュレーションによる評価などを進める予定である。

(3) ヘリコンスラスタの高性能化

上述の(1)における推力増加メカニズム、(2)における推力損失メカニズムを基盤として、ヘリコンスラスタの高性能化に関する実験を実施した。具体的には、磁気ノズル中の径方向拡散の抑制と、プラズマ源内壁への運動量損失の抑制が重要であるが、消費電力なども考慮して、永久磁石のみを用いた磁気ノズルスラスタの開発についても並行して開発を進めた。

図11には、本研究で考案した永久磁石のみを用いた磁気ノズルの磁場分布計算結果とそれぞれの配位における推力計測結果を

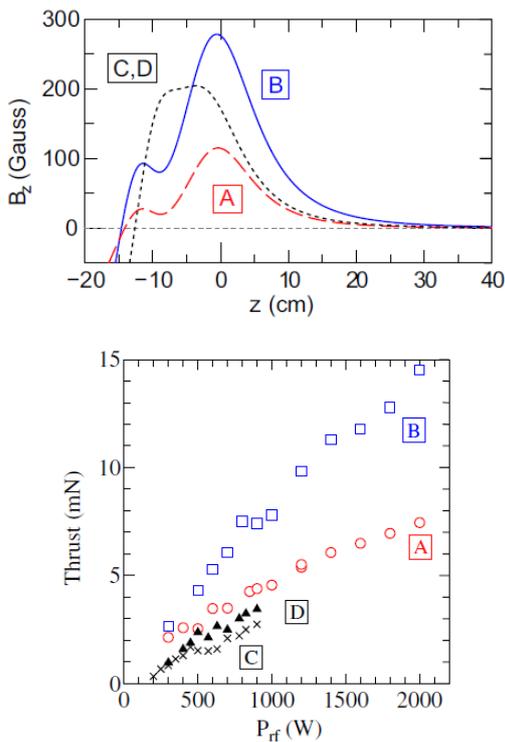


図 11: 永久磁石のみを用いて形成した磁気ノズルの磁場分布計算結果と推力計測結果.

示す. 配置 B において, 最大推力 15mN を得られることが示された. また, (2) で述べた運動量損失機構を考慮すると, プラズマ源の大口径化によって径方向内壁へのプラズマ損失の抑制が推力向上につながると思われる. そこで大口径の永久磁石利用ヘリコンプラズマ源の開発を実施し, 直径 14cm のプラズマ源の開発を実施した. 図 12 にプラズマ源の下流域で計測したイオンエネルギー分布関数の半径方向分布を示す. プラズマ源の内径にほぼ相当する領域において, 超音速のイオンビームが自発的に励起可能であることが示されたといえる.

また大口径化に加えて, 将来的な大推力を要するミッションを考慮した際には, 推進機の大電力化が必要な技術になる. そこで, 直

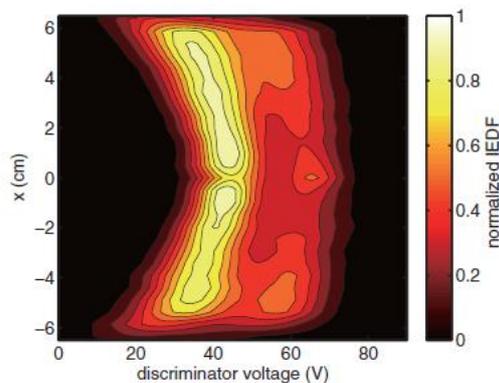


図 12: 大口径永久磁石利用ヘリコンプラズマ源の下流域で計測した, イオンエネルギー分布関数の半径方向分布.

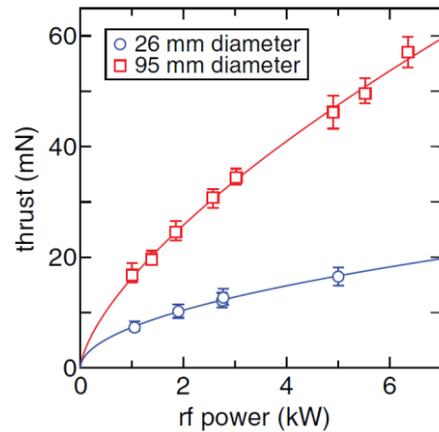


図 13: 発生推力のプラズマ源口径依存性.

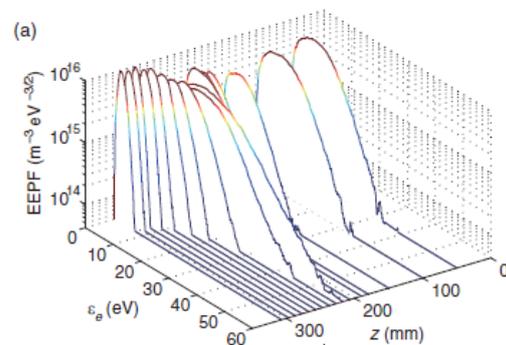


図 14: 局所磁場を導入した際の磁場構造および電子エネルギー確率関数の計測結果.

径 9.5cm のヘリコンプラズマスラスタの高周波電力を最大 6kW まで増強し, 推力の直接計測を実施した結果を図 13 へ示す. 大口径化に伴い発生推力が増加していることが分かり, 高周波電力 1kW において推力電力比 18mN/kW と研究開始当初の 3 倍程度まで推力電力比を増大することに成功した. また大電力化に伴い最大推力 60mN を得ることに成功し, 現在盛んに研究が進められている無電極ヘリコンプラズマスラスタにおいて最高性能を実証することに成功したといえる.

さらに高効率のスラスタを実現するためには, プラズマ生成部の効率を向上する必要性が考えられ, プラズマ源内部でのプラズマ-波動の相互作用や電子加熱機構を制御する必要がある. この可能性を検証するために, プラズマ中に局所的な磁場構造を導入し, WKB 近似が成立しない条件を積極的に形成した際のプラズマ波動と電子エネルギー確率関数 (EPPF) の計測を実施した. 図 14 には, EPPF の z 軸分布を示しており, プラズマ源出口は $z = 17.5$ cm に相当しており, 局所磁場は $z = 25$ cm 付近に設置している. WKB 近似が破綻する $z = 25$ cm 付近にてヘリコン波が反射されていることが観測され, プラズマ源出口との間に定在波が励起されることが明らかになった. 同時に図 14 を見ると, 定在波が励起される領域において局所的な電子加熱が起こり, 高エネルギー電子が生成され

ることが実験的に明らかになった。このことより磁場構造によりプラズマ拡散過程のみならず、プラズマ波動と加熱が磁場構造のみで制御可能であることが実証された。またこれらの知見は産業プロセス装置の開発において重要な役割を果たすと期待されるため、エッチング装置やスパッタリング装置の開発へと展開を図った。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 34 件)

- ① K. Takahashi, S. Takayama, A. Komuro, and A. Ando, *Standing helicon wave induced by a rapidly bent magnetic field in plasmas*, Physical Review Letters, 査読有, vol. 116, pp. 135001-1 - 5 (2016).
DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.135001
- ② K. Takahashi, A. Komuro, and A. Ando, *Operating a magnetic nozzle helicon thruster with strong magnetic field*, Physics of Plasmas, 査読有, vol. 23, pp. 033505-1 - 7 (2016).
DOI: 10.1063/1.4943406
- ③ K. Takahashi, Y. Takao, and A. Ando, *Neutral-depletion-induced axially asymmetric density in a helicon source and imparted thrust*, Applied Physics Letters, 査読有, vol. 108, pp. 074103-1 - 4 (2016).
DOI: 10.1063/1.4942469
- ④ K. Takahashi, A. Chiba, A. Komuro, and A. Ando, *Axial momentum lost to a lateral wall of a helicon plasma source*, Physical Review Letters, 査読有, vol. 114, pp. 195001 (2015).
DOI: 10.1103/PhysRevLett.114.195001
- ⑤ K. Takahashi, A. Komuro, and A. Ando, *Effect of source diameter on helicon plasma thruster performance and its high power operation*, Plasma Sources Science and Technology, 査読有, vol. 24, pp. 055004-1 - 8 (2015).
DOI: 10.1088/0963-0252/24/5/055004
- ⑥ K. Takahashi, A. Chiba, and A. Ando, *Modifications of wave and plasma structures by a mechanical aperture in a helicon plasma thruster*, Plasma Sources Science and Technology, 査読有, vol. 23, pp. 064005-1 - 9 (2014).
DOI: 10.1088/0963-0252/23/6/064005
- ⑦ K. Takahashi, A. Komuro, and A. Ando, *Low-pressure, high-density, and supersonic plasma flow generated by a helicon magnetoplasma dynamic thruster*, Applied Physics Letters, 査読有, vol. 105, pp. 193503-1 - 4 (2014).
DOI: 10.1063/1.4901744
- ⑧ K. Takahashi, C. Charles, R.W. Boswell, and A. Ando, *Effect of magnetic and physical nozzles on plasma thruster performance*, Plasma Sources Science and Technology, 査

読有, vol. 23, 044004-1 - 9 (2014).

DOI: 10.1088/0963-0252/23/4/044004

- ⑨ K. Takahashi, T. Motomura, A. Ando, Y. Kasashima, K. Kikunaga, F. Uesugi, and S. Hara, *Transport of a helicon plasma by a convergent magnetic field for high speed and compact plasma etching*, Journal of Physics D: Applied Physics, 査読有, vol. 47, pp. 425201-1 - 6 (2014).
DOI: 10.1088/0022-3727/47/42/425201
- ⑩ K. Takahashi, C. Charles, and R.W. Boswell, *Approaching the theoretical limit of diamagnetic-induced momentum in a rapidly diverging magnetic nozzle*, Physical Review Letters, 査読有, vol. 110, pp. 195003-1 - 5 (2013).
DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.195003
- ⑪ K. Takahashi, C. Charles, R.W. Boswell, and A. Ando, *Performance improvement of a permanent magnet helicon plasma thruster*, Journal of Physics D: Applied Physics, 査読有, vol. 46, pp. 352001-1 - 5 (2013).
DOI: 10.1088/0022-3727/46/35/352001

[学会発表] (計 61 件)

- ① K. Takahashi, et al., *Direct identification of axial plasma momentum in a magnetic nozzle helicon plasma*, 57th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, 2015.11.16, Savannah (USA).
- ② K. Takahashi, *Direct measurement of thrust components arising from physical boundaries and a magnetic nozzle in a helicon plasma thruster*, 9th International Conference on Reactive Plasmas, 2014.2.7, Fukuoka Convention Center (Fukuoka, Hakata).

[産業財産権]

○出願状況 (計 2 件)

名称: ドライエッチング装置及びプラズマスパッタリング装置

発明者: 本村大成, 笠嶋悠司, 上杉文彦, 高橋和貴, 安藤晃

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 特開 2015-135883

出願年月日: 2014 年 1 月 17 日

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 和貴 (TAKAHASHI, Kazunori)

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 80451491

(2) 研究分担者

安藤 晃 (ANDO, Akira)

東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 90182998