

平成 30 年 5 月 21 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26247096

研究課題名(和文) 磁気ノズルプラズマ流ダイナミクスの総合的理解と大電力スラスタへの研究展開

研究課題名(英文) Understanding a magnetic nozzle plasma flow dynamics and extension to a high power electric propulsion

研究代表者

安藤 晃 (Ando, Akira)

東北大学・工学研究科・教授

研究者番号：90182998

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、大電力電流駆動型であるMPDスラスタおよび高周波駆動無電流型であるヘリコンスラスタに代表される磁気ノズルプラズマスラスタを用いて、広範なパラメータ領域にわたる磁気ノズル中プラズマ流ダイナミクスに関する実験を実施した。その結果、前者のMPD方式においては磁気ノズル形状により放電電流分布を制御可能であり、その結果推進性能向上が可能であることを示し、後者のヘリコンスラスタでは自発的なプラズマ電流と磁気ノズルのローレンツ力によって推力が発生することを明らかにし、さらにはこれらを融合した新概念大電力電気推進機の開発へと研究を展開した。

研究成果の概要(英文)：Plasma flow dynamics in magnetic nozzle are investigated over wide ranges of several parameters such as a plasma density, ion and electron temperatures, and a plasma flow velocities by using a current-driven magnetoplasmadynamic (MPD) thruster and a current-free helicon plasma thruster. The experiments demonstrate that the spatial profile of the external discharge current is controllable for the MPD thruster by the magnetic field configuration; resulting in the improvement of the thruster performance. For the case of the helicon thruster, the Lorentz force due to the spontaneous azimuthal plasma current and the radial magnetic field of the nozzle is a key factor to increase the thrust imparted by the thruster. By combining these two concept of the thruster, the novel high power thruster called a helicon MPD thruster is also demonstrated in the laboratory experiments.

研究分野：プラズマ科学

キーワード：プラズマ・核融合 惑星探査 ロケット 電気推進

1. 研究開始当初の背景

惑星探査衛星や通信観測衛星の商業利用が進展しそのミッションの多様性が増す中で、有人探査や大量物資輸送ミッションにおける高比推力・高推力の電気推進機の開発の重要性が高まりつつある。比推力(燃費)が高く、ソーラーパネル等で獲得した電力を利用しプラズマ生成・加速を介して噴射物体の運動量へと変換する電気推進機が有効であり、その大出力化・大電力化が早急な課題となっている。

大電力推進機の代表的な候補として、VASIMR, MPD スラスタ, ヘリコンスラスタ等のプラズマ密度 10^{17} - 10^{20} m^{-3} 程度で動作する磁気ノズルスラスタがあげられる。これらの電気推進方式では磁気ノズル中のプラズマ挙動が性能向上に重要な役割を担っていると考えられており、磁気ノズル中のプラズマダイナミクスの総合的理解とその知見を基盤とした大電力電気推進機開発へ向けた研究展開が求められている。

2. 研究の目的

上述の研究背景を踏まえて本研究では、磁気ノズル中プラズマ流に関する体系的な実験研究を通して、推進機開発に関連するプラズマダイナミクスの理解を進めることを目的とする。上述の VASIMR, MPD スラスタ, ヘリコンスラスタ方式では、それぞれプラズマ密度, 流速, 電子温度とイオン温度の比, 磁場強度などのプラズマパラメータ領域が大きく異なる。これらの各方式における特徴を室内実験で活用することで、広範なパラメータ領域を包括した磁気ノズルプラズマダイナミクスに関する実験研究を推進することが可能となる。

3. 研究の方法

本研究では、磁気ノズル中の線形・非線形プラズマ流ダイナミクスの総合的理解をすすめるため、磁気ノズル重畳プラズマスラスタ開発とその大電力化を目的として、MPD スラスタ方式, VASIMR 方式, ヘリコンスラスタ方式などの各種プラズマ源を用いて広範なパラメータ領域での総合的な実験を行うことで研究開発を推進する。比較的口径が大きい Mega-HPT 装置を改修し高排気速度環境と推力計測装置の設置を実現し、各スラスタの小型・中型実験装置を並列運用した基礎実験と統合することで、磁気ノズル中のプラズマ流ダイナミクスと推力発生機構の関連性を調べた。また、プラズマ生成・加熱電源の大電力化により、新たに発現する物理現象の模索を行うとともに、プラズマ流挙動の体系化と推進性能に関して実験を行った。

プラズマ流の評価には、静電ラングミュアプローブ法によるプラズマパラメータの同定に加え、ドップラーシフト分光による流速計測や、Bdot プローブによるプラズマ誘起磁場の計測およびプラズマ電磁波動計測を実

施し、プラズマダイナミクスの理解に必要な基礎データを取得した。また、各種推進方式によって得られる推力の評価に関しては、これまでにヘリコンスラスタの推力直接計測において実績を有するスラストバランス法、および MPD スラスタの推力計測で実績を有するターゲットバランス法を適宜活用して評価を実施した。

また磁気ノズルと電流の相互作用による推力発生機構を理解するために、Bdot プローブによって計測した変動磁場よりプラズマ誘起電流および放電電流分布を求めることで評価し、その推力発生機構の理解を進めた。

4. 研究成果

図 1(a)に示す放電電圧 100-200V、電力 1-2MW、放電時間約 1ms のパルス放電でプラズマ密度 10^{19} ~ 10^{21} m^{-3} 、イオン温度 5~100 eV、電子温度 1~10 eV、流速 10~50 km/sec 程度的高速プラズマ流が準定常的に生成可能である MPD スラスタへ、図 1(b)に示すような発散磁場配位 (B_{zc})およびラバール磁場配位 (B_{zL})を重畳し、推力評価やプラズマ流体に働く電磁力分布を計測した。

動作ガスとしてヘリウムまたは水素を用いMPD スラスタへ発散型磁場 B_{zc} のみを印加した場合、図 2 に示すように放電電流の増加に伴い推力が増加し、印加した外部磁場強度の増加に伴った推力増加が観測されており、放電電流と外部磁場によるローレンツ力の効果によって推力増強が可能であることが

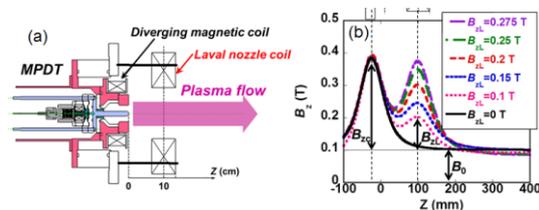


図 1: (a) MPD スラスタの概略図および(b) 外部印加磁場配位。

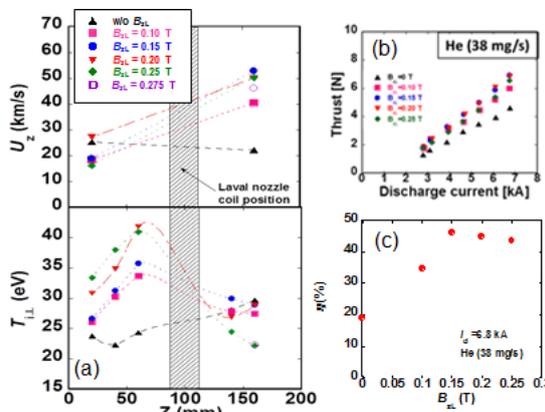


図 2: ラバール型磁場を印加した際の(a)プラズマ流速およびイオン温度の軸方向分布, (b) 推力の放電電流依存性, (c) 推進効率の外部印加磁場強度依存性。

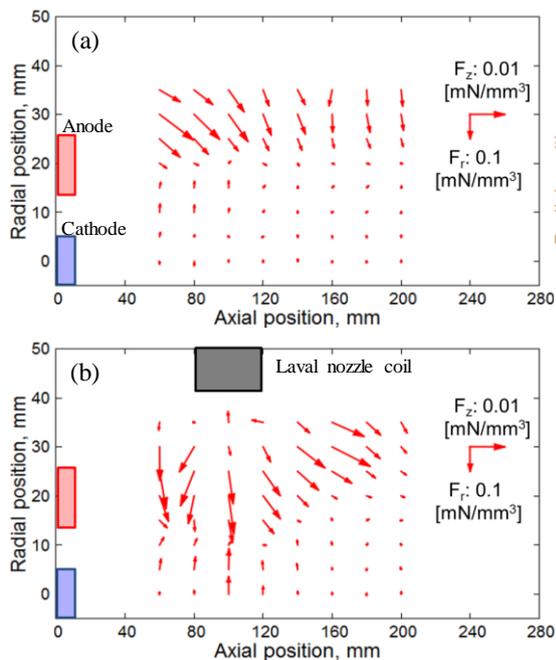


図3: (a)発散磁場および(b)ラバール磁場配位における電磁力 (F_z , F_r) の空間分布評価結果。

実証されたといえる。また図 2(a)から分かるように、ラバール型磁場印加によって流速の増加が起こることが明らかになり、図 2(b)(c)から分かるように、推力の増加が起こることが実験的に示された。ラバールノズル前後の密度温度変化は通常の固体ラバールノズルを通過する 1 次元流モデルで説明されるが、イオンのホールパラメータが小さく十分磁化されていない一方で電子は磁化されており、ラバール型の磁気ノズル形状に沿ったプラズマ流が形成された効果と考えられる。

MPD スラスタで生成されたプラズマ内部にどのような電磁力が働いているかを調べるため、プラズマ中に流れる電流分布と磁場分布を直接計測し、実際に作用している電磁力 ($\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ 力) を評価した。3次元の磁場変化を計測できる磁気プローブを製作し、MPD スラスタ出口近傍での磁場変化から電流分布や電磁力評価を行った。図 3 にその一例を示す。発散型磁場配位やラバール型配位ともに高密度プラズマ流の内圧とバランスする内向きの電磁力が強く働いていることがわかり、これらの電磁力分布によって発生する推力が変化する可能性が示唆されたといえる。

以上のように、電流駆動型の MPD スラスタにおいては、外部印加磁場によって放電電流分布が大きく変化し、その結果磁気ノズルとの相互作用により発生する電磁力分布が変化することが実験的に明らかになり、磁場形状による推力分布の制御と性能向上が可能であることが示されたといえる。

電流駆動型の MPD スラスタとは対照的に、高周波を用いたヘリコンスラスタ及び VASIMR 方式においては、外部電流は常にゼロであるため、MPD スラスタとは異なる物理描像が支配的になると予想される。ヘリコ

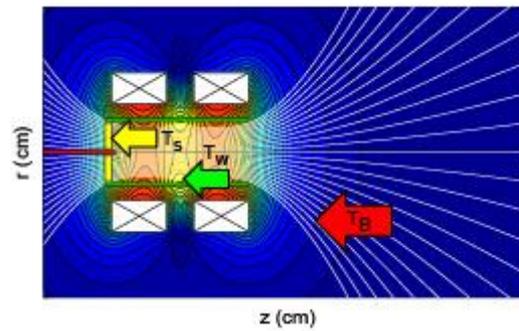


図 4: ヘリコンスラスタ概略図。

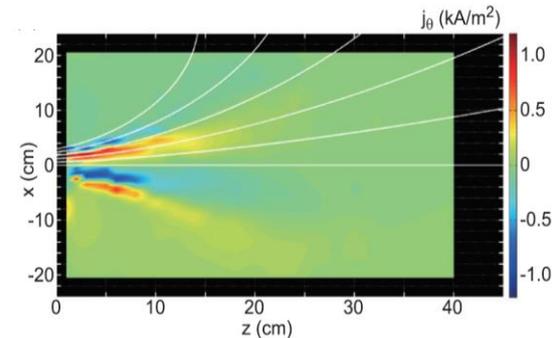


図 5: ヘリコンスラスタの下流域で計測した、プラズマ誘起電流分布。

ンスラスタによって発生する推力は、図 4 中に矢印で示す T_s , T_w , T_B の項で表され、それぞれ軸方向境界への圧力項、内壁への運動量損失項、磁気ノズルと自発的なプラズマ誘起電流に起因するローレンツ力に相当する。

図 5 は、ヘリコンスラスタの下流域で計測したプラズマ誘起電流の空間分布であり、スラスタ下流の 15cm 程度の領域にわたり、電子反磁性ドリフト電流にほぼ相当する周方向電流が流れていることが明らかになり、この周方向電流と磁気ノズルの相互作用によるローレンツ力で推力が発生していることが明らかになった。これは、電子が有する径方向の圧力勾配に相当する運動量が、軸方向

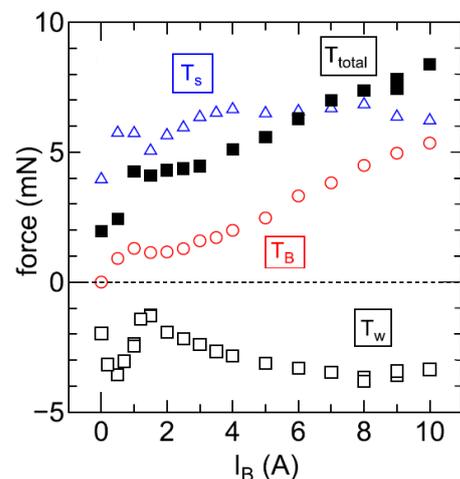


図 6: 一様磁場配位におけるヘリコンスラスタ推力分解計測の磁場電流依存性。

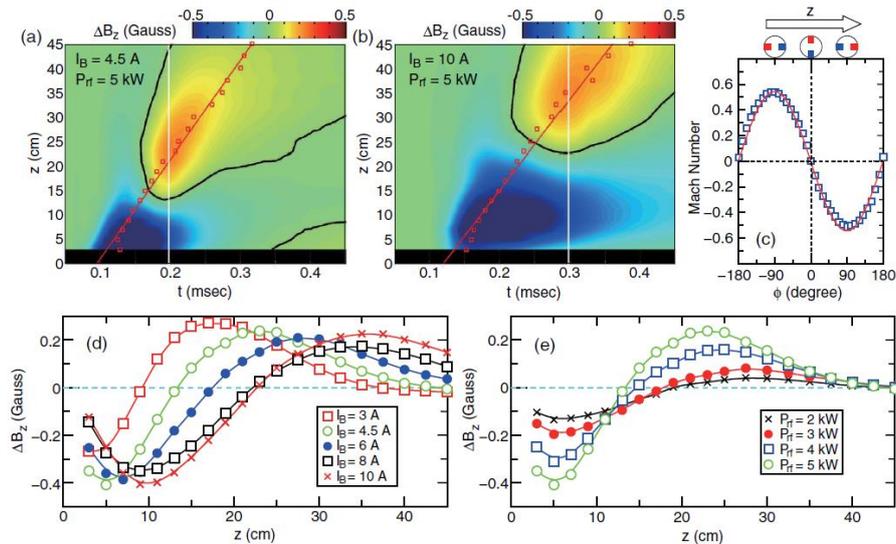


図 7: (a)(b)プラズマ誘起磁場の時空間発展, (c)プラズマ流速の測定結果, (d)(e)プラズマ誘起磁場の z 軸方向分布の外部パラメータ依存性.

の運動量へと変換されることに相当していることが明らかになった。

図 6 は、一様磁場配位を適用したヘリコンスラストの推力成分および総推力の分解計測結果を示している。磁場強度の増大に伴い発生する推力が増加する一方で、プラズマ生成部内壁への軸方向運動量損失項 T_w が顕著になることが観測された。これは従来の理論モデルでは無視されていた損失項であり、本実験によりその重要性が明確にされたといえる。すなわち将来的にヘリコンスラストの大電力化および高効率化を進めるためには、内壁への損失を抑制することが重要であることを明らかにしたといえる。

上述のように磁気ノズルによって推力が増加する際には、反磁性効果、すなわち外部磁場とは逆向きの B_z をプラズマ流が誘起する状態であると考えられる。一方で、本研究の一部で推進した大電力ヘリコンスラストの実験では、スラスト出口近傍では反磁性効果を維持し、ノズル下流域においてプラズマ誘起 B_z が外部磁場と同様の向きを示す、すなわち磁力線を伸長する状態へと遷移することが観測された [図 7(a)(b)]。この際のプラズマ流速はおおよそマッハ 0.5 程度であり、これは磁気ノズルおよび静電ポテンシャルにより加速された成分であると考えられる。この遷移が起こる空間位置は図 7(d)(e)のプラズマ誘起磁場 z 軸方向分布の外部パラメータ依存性から分かるように、プラズマ密度や外部磁場強度によって大きく変化することが実験的に明らかになった。

ここで観測された磁気ノズルの伸長現象は、磁力線からのプラズマ離脱現象に関連したものであり、世界初の観測結果であるといえ、磁気ノズルプラズマスラストに関する研究の新局面を切り拓いたのものであると考えられ、その物理素過程の理解が必要である。

上述の MPD スラストでは MW 級の大電力

動作が可能な一方でプラズマの安定維持・着火のために大推進剤流量が必要であり、ヘリコンスラストでは推進剤流量は少なく、高周波電源や耐熱設計等の問題で数 kW 級の動作が現時点での最大値である。そこでこれらのハイブリッド方式であるヘリコン MPD スラストの開発を実施した。ヘリコンプラズマによって低ガス流量であっても 10^{19}m^{-3} の安定したプラズマを生成可能であり、この放電によってヘリコンプラズマ源の上流・下流域に設置されたアノード・カソード間に確実にアーク放電を誘起可能なプラズマ源の開発に成功した(図 8)。ヘリコンプラズマ源と同等の推進剤流量において、数 100kW 級の電力を瞬間的に投入可能であり、その結果ほぼ完全電離状態である 10^{20}m^{-3} を超えるプラズマを生成可能であることを示し、かつ超音速プラズマ流を誘起可能であることを明らかにした。これにより、低ガス流量および大電力という、従来では実現が不可能であった動作領域での推進機開発に着手できたといえる。今後その推進性能の評価や最適化を進める必要がある。

これまでに述べたように、各種スラスト方

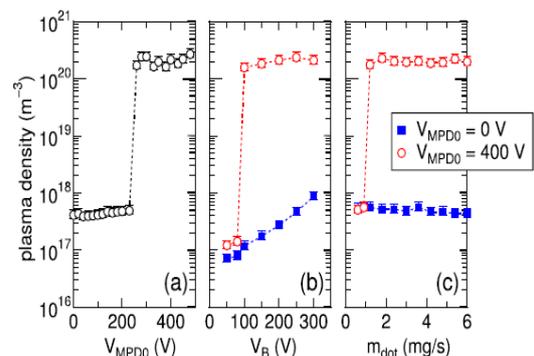


図 8: ヘリコン MPD スラスト下流域におけるプラズマ密度の外部パラメータ依存性.

式をプラズマ源として、広範なパラメータ領域にわたって磁気ノズル中のプラズマ流ダイナミクスに関する実験を実施した。外部電流がエネルギー源である電流駆動型のMPDスラスタにおいては、磁気ノズル形状により放電電流分布を制御可能であり、その結果生じるローレンツ力の分布により推進性能を向上可能であることを明らかにした。一方で正味の電流がゼロとなる無電流タイプの高周波スラスタにおいては、プラズマ中に自発的に誘起されるプラズマ電流と外部磁場のローレンツ力によって推力増加が起ることを明らかにし、その過程で新たな運動量損失機構や磁場の変形現象など、種々の新規物理現象の開拓に成功した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 24 件)

- ① K. Takahashi, C. Charles, R.W. Boswell, and A. Ando, Adiabatic Expansion of Electron Gas in a Magnetic Nozzle, *Physical Review Letters*, 査読有, Vol.120, pp.045001-1 - 5 (2018).
DOI: 10.1103/PhysRevLett.120.045001
- ② K. Takahashi, Thruster: Current-free plasma, *Encyclopedia of Plasma Technology*, 査読有, pp.1462 - 1473 (2017).
DOI: 10.1081/E-EPLT-120053924.
- ③ K. Takahashi and A. Ando, Enhancement of axial momentum lost to the radial wall by the upstream magnetic field in a helicon source, *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 査読有, Vol.59, pp.054007-1 - 7 (2017).
DOI: 10.1088/1361-6587/aa626f.
- ④ K. Takahashi and A. Ando, Laboratory Observation of a Plasma-Flow-State Transition from Diverging to Stagnant a Magnetic Nozzle, *Physical Review Letters*, 査読有, Vol.118, pp.054007-1 - 5 (2017).
DOI: 10.1103/PhysRevLett.118.225002.
- ⑤ K. Takahashi, H. Akahoshi, C. Charles, R.W. Boswell, and A. Ando, High temperature electrons exhausted from rf plasma sources along a magnetic nozzle, *Physics of Plasmas*, 査読有, Vol.24, pp.084503-1 - 4 (2017).
DOI: 10.1063/1.4990110
- ⑥ 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.
- ⑦ 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.
- ⑧ 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.
- ⑨ H. Nabuchi, K. Suzuki, Y. Kobayashi, A. Komuro, K. Takahashi, and A. Ando, Thrust enhanced by a magnetic Laval nozzle in an applied-field magneto-plasma-dynamic thruster, *Plasma and Fusion Research*, 査読有, Vol.11, pp.2406033-1 - 4 (2016).
DOI: 10.1585/pfr.11.2406033.
- ⑩ Y. Sasaki, S. Takayama, H. Nakano, A. Komuro, K. Takahashi, and A. Ando, Characteristics of a Large Diameter Radio-Frequency Negative Hydrogen Ion Source, *Plasma and Fusion Research*, 査読有, Vol.11, pp.2405088-1 - 4 (2016).
DOI: 10.1585/pfr.11.2405088.
- ⑪ K. Takahashi, A. Chiba, A. Komuro, and A. Ando, Experimental identification of an azimuthal current in a magnetic nozzle of a radiofrequency plasma thruster, *Plasma Sources Science and Technology*, 査読有, Vol.25, pp.055011 -1 - 8 (2016).
DOI: 10.1088/0963-0252/25/5/055011.
- ⑫ K. Takahashi, Y. Takao, and A. Ando, Modifications of plasma density profile and thrust by neutral injection in a helicon plasma thruster, *Applied Physics Letters*, 査読有, Vol.109, pp.194101 -1 - 4 (2016).
DOI: 10.1063/1.4967193.
- ⑬ K. Takahashi, A. Komuro, and A. Ando, Measurement of plasma momentum exerted on target by a small helicon plasma thruster and comparison with direct thrust measurement, *Review of Scientific Instruments*, 査読有, Vol.86, pp.023505-1 - 6 (2015).
DOI: 10.1063/1.4907797.
- ⑭ Y. Hoshino, T. Ishiyama, A. Komuro, K. Takahashi, and A. Ando, Development of 15kW class RF plasma source for VASIMR type space propulsion with magnetic nozzle, *Plasma and Fusion Research: Regular Articles*, 査読有, Vol.10, pp.3406052-1 - 4 (2015).
DOI: 10.1585/pfr.10.3406052.
- ⑮ A. Chiba, K. Takahashi, A. Komuro, and A. Ando, Characterization of Helicon Plasma Thruster Performance Operated for Various Rare Gas Propellants, *Journal of Propulsion and Power*, 査読有, Vol.31, pp.962 - 965 (2015).
DOI: 10.2514/1.B35609.
- ⑯ K. Takahashi, A. Chiba, A. Komuro, and A. Ando, Axial Momentum Lost to a Lateral Wall of a Helicon Source, *Physical Review*

- Letters, 査読有, Vol.114, pp.195001-1 – 5 (2015).
DOI: 10.1103/PhysRevLett.114.195001.
- ⑰ A. Chiba, K. Takahashi, A. Komuro, and A. Ando, Effect of Propellant Species on Thrust Imparted by a Helicon Plasma Thruster, Proceedings of Joint Conference of 30th ISTS, 34th IEPC and 6th NSAT, 査読無, CD-ROM, pp.IEPC-2015-385 (2015).
- ⑱ K. Takahashi, A. Komuro, and A. Ando, Helicon Magnetoplasma-dynamic Plasma Thruster for Large Thrust and High Specific Impulse Electric Propulsion, Proceedings of Joint Conference of 30th ISTS, 34th IEPC and 6th NSAT, 査読無, CD-ROM, pp.IEPC-2015-383 (2015).
- ⑲ K. Takahashi, A. Komuro, and A. Ando, Recent progress of a helicon plasma thruster development, Proceedings of Joint Conference of 30th ISTS, 34th IEPC and 6th NSAT, 査読無, CD-ROM, pp.IEPC-2015-294 (2015).
- ⑳ T. Ishiyama, A. Chiba, K. Takahashi, A. Komuro, and A. Ando, A High Power Electrodeless Plasma Thruster Operated with a FET-Based Inverter Power Supply, Proceedings of Joint Conference of 30th ISTS, 34th IEPC and 6th NSAT, 査読無, CD-ROM, pp.IEPC-2015-87 (2015).
- ㉑ 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
- ㉒ S. Komizunai, K. Oikawa, Y. Saito, K. Takahashi, and A. Ando, High-power, low-pressure, inductively coupled RF plasma source using a FET-based inverter power supply, Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, Vol.54, pp.01AA08-1 – 4 (2015).
DOI: 10.7567/JJAP.54.01AA08
- ㉓ 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, Vol23, pp. 064005-1 – 9 (2014).
DOI: 10.1088/0963-0252/23/6/064005
- ㉔ 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
- Ando, Neutral-depletion-induced asymmetric plasma density profile and momentum transport in a helicon thruster, 69th Annual Gaseous Electronics Conference, 2016.10.12, Bochum (Germany).
- ② K. Takahashi, Plasma momentum imparted by a magnetic nozzle helicon plasma, 18th International Congress on Plasma Physics, (invited talk) 2016.6.28, Kauhising (Taiwan).
- ③ K. Takahashi, C. Charles, R.W. Boswell, and A. Ando, 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).
- ④ 高橋和貴, Christine Charles, Rod Boswell, 安藤晃, 磁気ノズル中のプラズマ流運動量の直接計測と電気推進機の開発, 日本地球惑星科学連合 連合大会 2014年大会 (招待講演) 2014.4.28, パシフィコ横浜.

他 77 件

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

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

國中 均 (KUNINAKA Hitoshi)
国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・教授
研究者番号：60234465

永岡 賢一 (NAGAOKA Kenichi)
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授
研究者番号：20353443

小室 淳史 (KOMURO Atushi)
東北大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：70733137

[学会発表] (計 81 件)

- ① K. Takahashi, Y. Takao, A. Chiba, and A.