

STEP-2014-027

ホールスラスタ複数ヘッド間干渉による作動安定性および推進性能への影響

岐阜大・院 古田 大樹

岐阜大・工 宮坂 武志 安里 勝雄

岐阜大・院 宇山 裕大 後藤 亮太 清水 大地 吉田 未古都

岐阜大・学 迫田 将拡 三宅 諄

1. 研究背景

現在、無人機による太陽系探査は幅広い天体において実施されており、近年では2030年代の火星探査等の国際有人探査が計画されるようになってきた¹⁾。これら惑星等への有人探査計画では、探査機本体はEMLでの組み立てが有力視されているが、日本ではLEOに打ち上げられたパーツを組み立て場所であるEMLへ輸送する際の輸送用エンジンとして電気推進機の適用が検討されている。この電気推進機の候補としてホールスラスタが提案されている^{2,3)}。

ホールスラスタには加速チャンネル形状の異なる様々なタイプが存在しており、日本国内では主に4つのタイプのホールスラスタ、マグネチックレイヤ型⁴⁻²⁰⁾、アノードレイヤ型^{21,22)}、シリンドリカル型²³⁾、マイクロ波放電式²⁴⁾について放電電流振動現象^{10-19, 21)}や損耗測定等の寿命^{20, 22)}等についての評価、中和器としてICPを適用した研究⁷⁾等が進められてきた。

日本では、RAIJINと名づけられたアノードレイヤ型ヘッドを複数有するクラスタシステムを想定した大電力システムプロジェクトが開始され、損耗を可能な限り低減させるヘッド開発、最適制御機構を有する電源システムの開発、高比推力までの作動範囲の拡大検討、クラスタ作動時の干渉検討、推進剤選択のためのプロジェクト検討について研究が進められている^{29,30)}。

岐阜大学では、RAIJIN等のクラスタシステム作動において推進性能、放電特性への影響が懸念されるヘッド間干渉についての基礎的な検討を目的として、最小構成システムである2基ヘッドと1基中和器を有するシステムであるSide by side(SBS)システムを開発し、評価を進めてきた。我々のグループでは、これまでにマグネチックレイヤ型の単体システムについて、20kHz帯域の放電電流振動現象について実験と数値解析の両面から研究を進め、その振幅抑制等についての知見を得てきた¹¹⁻¹⁹⁾。そこで、まずマグネチックレイヤ型スラスタヘッドを有するSBSシステムについての実験研究を開始した³¹⁾。

これまでの研究から、放電電流振動波形について干渉効果が見られること³¹⁾、推進性能、プルーム形状に干渉効果による影響が見られること等を明らかにしてきた³²⁾。本研究では、大電力化の際の知見を得る目的でこのような干渉効果について放電電圧依存性の評価を行った。

2. 実験方法

2. 1 マグネチックレイヤヘッド2基システム

本研究で採用したマグネチックレイヤ型スラスタヘッドの概念図を図1に示す。本ヘッドは、SPT型に比べ加速チャンネル内で磁力線がほぼ一様に分布し、比較的陽極に近い位置に電離領域が存在することが特徴である。このため、電離振動である20kHz帯域の放電電流振動振幅はSPTに比べ大きくなるが、ヘッド間干渉効果を評価するには大きな振幅を有する本タイプが適していると考えている。

本 SBS システムでは、中和器を挟むように 2 基のヘッドが一直線上に配置されており（図 2）、ヘッド中心間距離 D_T は変更が可能である。また、中和器として、ホローカソード Veeco 製 HCN-252 を採用した。

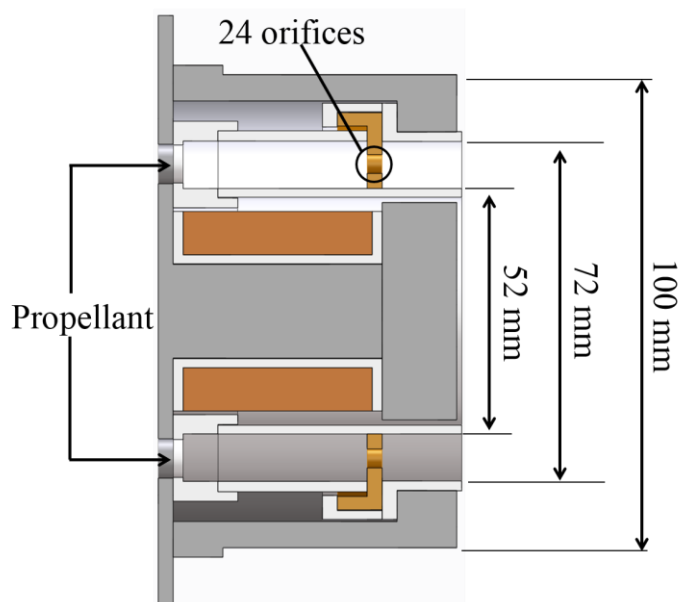


図 1 マグネチックレイヤ型スラスタヘッドGMK1の概念図

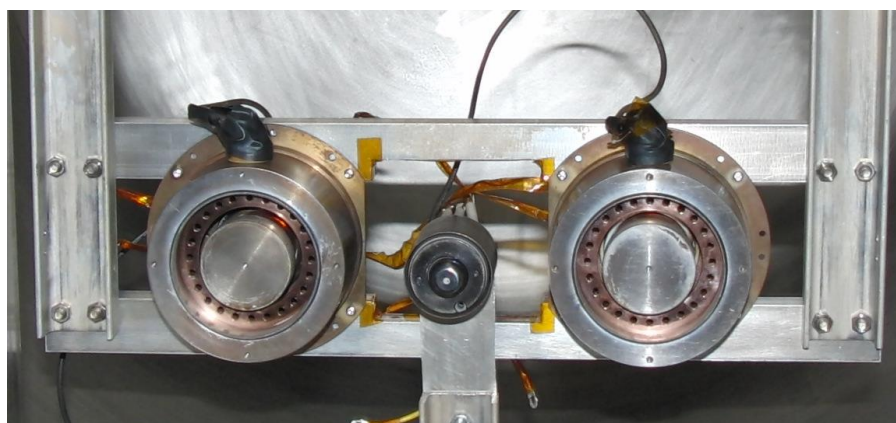
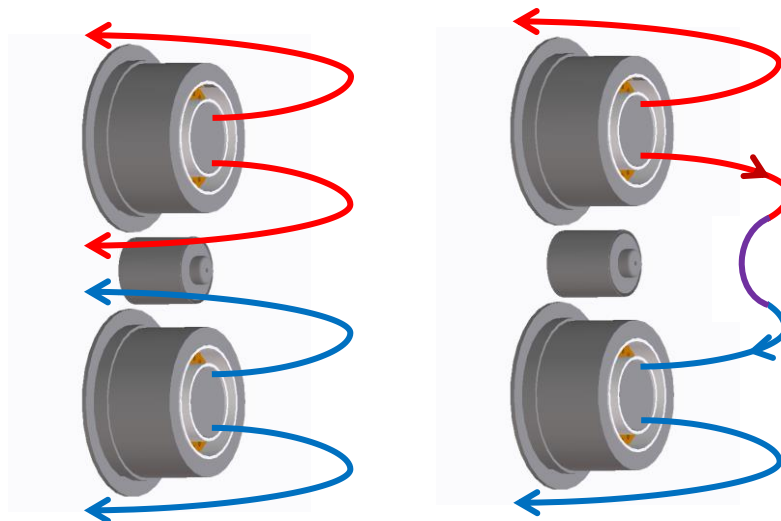


図 2 マグネチックレイヤ型SBSシステム

2. 2 コイル電流および真空系

本実験では、2 基のヘッドに対し共通電源を用いているが、コイル電源はそれぞれのヘッドに対し独立に設置され、2 基のヘッドに対する磁場印加方向の組み合わせを 2 通りに設定することができる。図 3 に本実験で実施した磁場印加の組み合わせの概念図を示す。

本実験は高真空下での評価を目的に、JAXA 宇宙科学研究所のスペースプラズマチャンバ内で実施した。



同方向印加(same direction)

逆方向印加 (opposite directions)

図3 2基のヘッドに印加する磁場方向の組み合わせに対する磁力線形状の概念図

2.3 測定法および実験条件

本実験では、ヘッドに印加する磁場方向の2つの組み合わせに対するSBS作動について、放電電流波形、イオン流束分布、推力測定を行った。

放電電流評価は、カレントプローブを用いて各ヘッドの放電電流波形を取得した。推力測定には振り子式スラストスタンドによる測定を行い、イオン流束測定では図7に示すようにRPAをイオンコレクタとして用いた。図4に示すようにRPAはヘッド下流に100 mmの位置に設置され、ヘッド中心間を結ぶ方向である x 方向にホローカソードの両側150 mmの範囲を掃引した。このイオン流束測定時のヘッド中心間隔 D_T は200 mm、ヘッド端間隔 D_I は100 mmである。

ヘッドの推進剤およびホローカソード用ガスにはキセノンを用いた。ヘッド流量は各ヘッドに12.5 sccm、加速チャンネル内最大磁束密度は45 mTである。

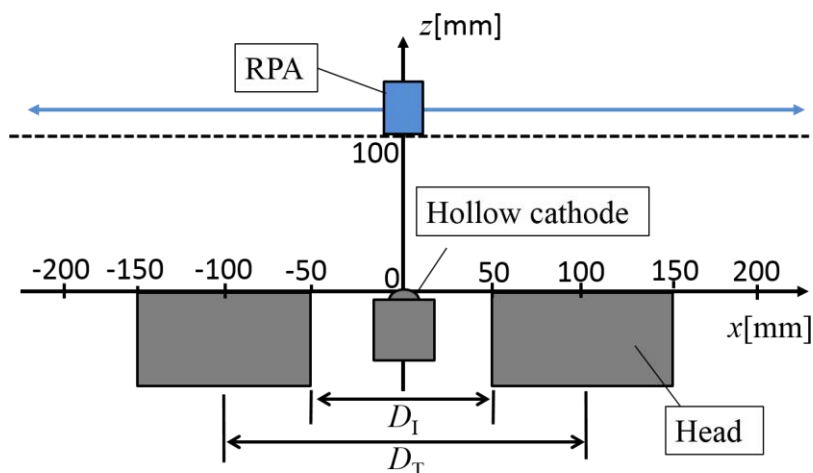


図4 イオン流束測定概念図

3. 結果および考察

3. 1 放電電流振動

図5にSBS作動時に放電電圧を210Vおよび130Vに設定した場合の2基のヘッドそれぞれの放電電流振動波形を示す。図5の結果は磁場を同方向に印加した場合のものである。放電電圧210Vの場合には2つの20kHz帯域の放電波形の位相が同位相となっている。これに対し、130Vの場合では2つの波形の間に明確な位相関係は認められない。この傾向は磁場を逆方向に印加した場合でも同様である。この結果から、電離振動である20kHz帯域振動については、放電電圧が高い場合、つまり電位干渉が顕著な場合に加速チャンネル内の電離過程に影響を与え位相関係が生じることが示唆される。

また、干渉による振動振幅へ影響をみるために図6に同方向に磁場を印加した場合の単体作動(single operation)時とSBS作動時の同ヘッドの放電電流波形を示した。この場合もSBS作動時の磁場は同方向に印加されている。この結果から210Vの場合では振幅にほとんど違いが見られないのにも関わらず、130Vの場合にはSingle作動時に比べてSBS作動時に明らかな増加が確認できる。これらの結果は、20kHz帯域放電電流振動の振幅への影響も放電電圧に依存していることを示している。この130Vという放電電圧の値は、キセノンのknee pointの値に近く、放電電圧の干渉により電離が促進されたことも一因と考えられる。

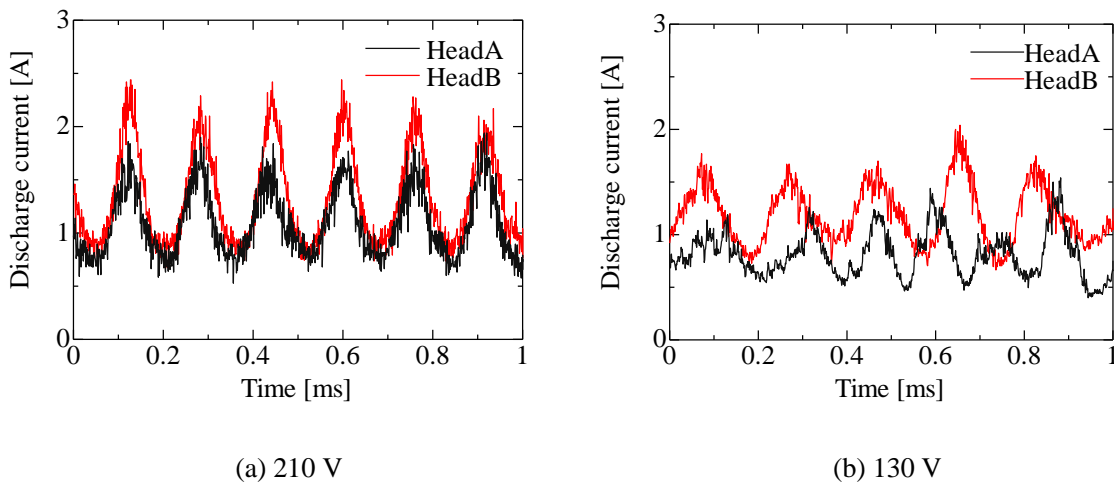


図5 同方向に磁場を印加した場合のSBS作動時の放電電流波形

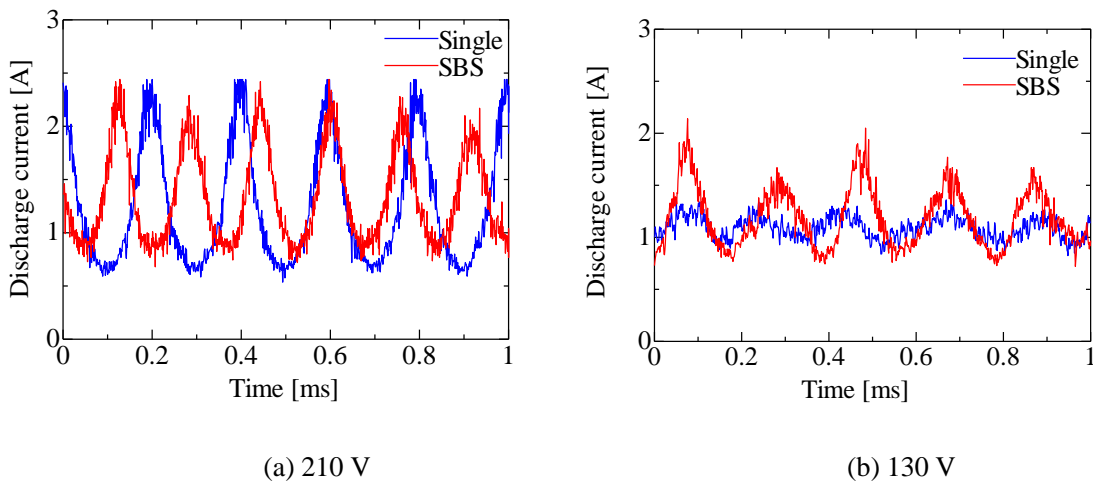


図6 同方向に磁場を印加した場合のSBS作動時とSingle作動時の放電電流波形の比較

3. 2 推力

SBS 作動時の印加方向の組み合わせの違いによる推力への影響が放電電圧にどのように依存しているのかを調べる目的で、図7に同方向に磁場を印加した場合に対する逆方向印加時の推力増加率を与えた。本評価の際の D_r は 156 mm である。放電電圧が 140V の場合には 4.4% の増加が見られるのに対し、放電電圧を上げていくに従って増加率は減少し、200V では 1.1% と 140V の場合の約 1/4 まで減少するという結果が得られた。

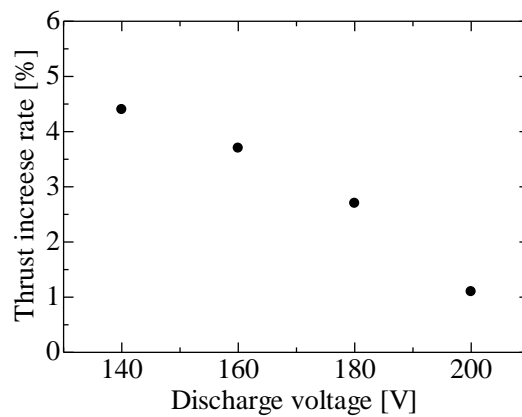


図7 逆方向磁場印加時の推力の同方向印加時からの増加率

これまでの研究では、SBS 作動時の磁場印加方向の組み合わせの違いがプルーム発散角に影響を与え、推力の違いを生じさせているのではないかと、逆印加方向の場合磁力線が干渉領域で結合し等電位線がよりヘッド間方向に曲げられるためプルーム発散角が抑えられ推力が上昇するのではないかと、という視点に立ち考察を進めてきた。本研究で得られた各放電電圧下での傾向もこの考察と一致している結果となっている。ここで、図4に示すように2基のヘッド間のイオン流束分布を測定した結果を異なる放電電圧下の分布で比較する。その結果を図8に示す。

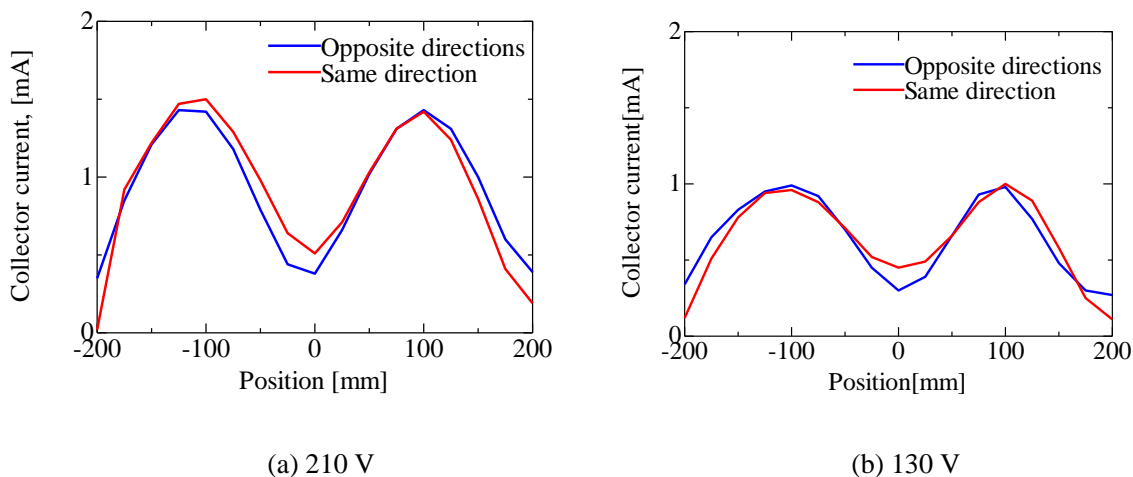


図8 イオン流束分布

放電電圧が 210V と 130V のどちらの場合においてもヘッド前に比べ、カソード下流近傍で磁場印加方向の組み合わせの影響が強く、逆方向磁場印加の場合にイオン流束が増加しプルームが発散している様子が捉えられている。また、210V の場合には、各ヘッド中心部におけるイオン流束は増加するが、カソード前でのイオン流束に明らかな増加は見られていない。この結果は、放電電圧を上げていくに従って加速チャンネル内での加速が充分に行われることでプルームの直進性が増し、干渉領域での磁力線形状の違いによるプルーム発散への影響が抑えられていることを示している。この結果は、放電電圧を上げていくにつれ推力の増加が抑えられた図 7 の結果を説明している。これらの結果から更に放電電圧を上げていった場合、つまり大電力下、特に高比推力下の作動では、磁場印加方向の違いによる推力の違いが殆ど見られなくなることが予測される。

4. まとめ

マグネチックレイヤ型ヘッド 2 基からなる SBS システムについて、放電電圧特性、推力、イオン流束分布について放電電圧への依存性を評価した。その結果、20kHz 帯域放電電流振動については、位相関係および振幅について放電電圧依存性が確認され、電位干渉が電離過程に影響を及ぼしている可能性が示された。また、推力については 2 基のヘッドに磁場印加方向の組み合わせを逆方向にすると、同方向印加時に比べてプルーム発散角が抑えられて推力は増加するが、放電電圧を上げていくに従い増加率は減少していくことが示された。本結果からは、特に高比推力作動時には磁場印加方向の組み合わせによる推力への影響は殆ど考慮しなくてよいと予測されるが、放電電流振動特性の違いによる電源への負荷への影響、放電電流値自体への影響等による推進効率への影響等について、高放電電流下で今後評価検討していく必要がある。

本研究は、科学研究費補助金（基盤研究(B)(No. 24360348)）、JAXA 共同研究の支援を受けた。また、JAXA 宇宙科学研究所のスペースプラズマ共同利用によりスペースプラズマチャンバ内で実験を実施した。実験実施では、九州大学の山本先生、宇宙科学研究所の國中先生、船木先生、細田様、中園様、首都大学の竹ヶ原先生、渡邊先生にご協力を頂いた。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) ホールスラスタ研究会 <http://art.aees.kyushu-u.ac.jp/research/Hall/inospace/inospace.html>
- 2) 山本直嗣ら：In space propulsion としての大型ホールスラスタの検討，平成 23 年度宇宙輸送シンポジウム，講演集録，2012.
- 3) 栗木恭一，荒川義博編：電気推進ロケット入門，2003.
- 4) Yamamoto, N., Ezaki, T. and Nakashima, H.: Thrust Performance of a Low Power Hall Thruster, Trans. of Japan Soc. for Aeronautical and Space Sci., Aerospace Technology Japan, Vol. 10, No. ists 28, pp.Tb_9-Tb_12, 2012.
- 5) 弓削政郎，白崎篤志，田原弘一：ホールスラスタの推進効率および内部効率に与える磁場特性の影響，日本航空宇宙学会論文集，第 55 巻，第 636 号，pp.8-16, 2007.
- 6) Ando, A., Tashiro, M., Hitomi, K. and Inutake, M.: Beam Extraction from a Hall-Type Ion Accelerator, Rev. Sci. Instrum., Vol. 79, 2008.
- 7) Kasagami, S., Okuma, T., Yamamoto, N., Watanabe, H., Nakabayashi, T., Tamida, T., Osuga, H., Aoyagi, J. and

- Takegahara, H.: Feasibility Study on Hall Thruster with Inductively Coupled Plasma Cathode, Proc. of the Eighth International Symposium on Applied Plasma Science, Advances in Applied Plasma Science, Vol. 8, pp.27-30, 2011.
- 8) Ozaki, T., Inanaga, T., Nakagawa, T., Kasai, Y., and Matsui, K.: Development Status of High Power Xenon Hall Thruster of MELCO, 25th International Symposium on Space Technology and Science, ISTS paper 2005-b-34, 2006.
- 9) 淵上健児, 網本順一, 上野文裕, 宮田升美, 上松和夫, 井伊谷不二夫, 田原弘一, 吉川孝雄: ホールスラスタの熱特性, 平成 14 年度宇宙輸送シンポジウム, pp.209-212, 2003.
- 10) Nejob, Y., Nakamoto, H., Tahara, H.: Investigation on the Cross-Field Ion Transport on the Discharge Current Oscillation and Performance of SPT-100 Type Hall Thrusters, J. Plasma Fusion Res. Ser., 2009, pp.773-779.
- 11) Miyasaka, T., Shibata, Y., Asato, K. and Segawa, K.: Investigation of Acceleration Channel Processes in Hall Thrusters by Particles Simulations, Trans. of Japan Soc. for Aeronautical and Space Sci., Space Technology Japan, Vol. 7, No. ists 26, pp.Pb_83-Pb_88, 2009.
- 12) Miyasaka, T., Shibata, T., and Asato, K.: Particle Simulation of Discharge Current Oscillation in Hall Thrusters, Vacuum, Vol.83, pp.61-66, 2008.
- 13) Furukawa, T., Miyasaka, T., Nakayama, E. and Soga, T.: Enhanced Propulsion Performances under Optimum Parameters in Closed Drift Accelerators, Vacuum, Vol.73, pp.407-418, 2004.
- 14) 古川剛, 桜井康行, 宮坂武志, 藤原俊隆: ,ホールスラスタにおける低周波振動現象のプラズマ特性, 日本航空宇宙学会論文集, 第 48 巻, 第 561 号, pp.336-342, 2000.
- 15) Furukawa, T., Miyasaka, T. and Fujiwara, T.: Control of Low-Frequency Oscillation in a Hall Thruster, Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci., Vol.44, No.145, pp.164-170, 2001.
- 16) 古川剛, 宮坂武志, 藤原俊隆: ホールスラスタの低周波振動制御に及ぼす推進剤予熱効果実験, 日本航空宇宙学会論文集, 第 50 巻, 第 583 号, pp.325-329, 2002.
- 17) 古川剛, 宮坂武志, 藤原俊隆: ホール型電気推進機の放電特性に与える中性粒子条件の影響, プラズマ応用科学, 第 10 巻, pp.36-43, 2002.
- 18) 古川剛, 宮坂武志, 曾我丈夫, 藤原俊隆: Hall 加速器の非定常数値解析における電圧振動考慮の効果, プラズマ応用科学, 第 11 巻, pp.41-46, 2003.
- 19) T. Miyasaka, T. Furukawa, Soga, T., Nakayama, E., Kitagawa, T. and F.Y. Zhang, Influence of Propellant-Inlet Condition on Hall Thruster Performance, the 28th International Electric Propulsion Conference, IEPC-03-091, pp.1-9, CD-ROM, 2003.
- 20) Cho, S., Yokota, Y., Hara, Y., Takahashi, Y., Arakawa, Y., Komurasaki, K. and Kobayashi, A.: Development of Lifetime Evaluation Method Using Multilayer Coated Chip, Trans. of Japan Soc. for Aeronautical and Space Sci., Aerospace Technology Japan, Vol. 8, No. ists 27, pp.Pb_51-Pb_54, 2010.
- 21) Yamamoto N., Nakagawa, T., Komurasaki, K. and Arakawa, Y.: Discharge Plasma Fluctuations Hall Thrusters, Vacuum, Vol. 65, issues 3-4, pp. 375-381, 2002.
- 22) Yamamoto, N., Tao., L. and Yalin, A. P.: Development of Real-time Erosion Monitoring System for Hall Thrusters by Cavity Ring-Down Spectroscopy, Trans. of Japan Soc. for Aeronautical and Space Sci., Aerospace Technology Japan, Vol. 8, No. ists 27, pp.Pb_39-Pb_44, 2010.
- 23) Ikeda, T., Togawa, K., Nishida, T., Tahara, H. and Watanabe, Y.: Research and Development of Very Low Power Cylindrical Hall Thrusters for Nano-Satellites, the 32nd IEPC, IEPC-2011-039, 2011.
- 24) 桑野寛久, 國中均, 中島秀紀: マイクロ波放電式ホールスラスタのチャンネル内プラズマ状態およびチャンネル長さ

とスラスタ性能の関係, 日本航空宇宙学会論文集, 第 55 卷, 第 639 号, pp. 188-194, 2007.

- 25) Semenkin, A. V., Zakharenkov, L. E. and Soldukhin, A. E.: Feasibility of High Power Multi-Mode EPS Development Based on the Thruster with Anode Layer, the 32nd International Electric Propulsion Conference, IEPC-2011-064, 2011.
- 26) Miyasaka, T., Asato, K., Baharudin, F. B., Sugiyama, H. and Funaki, I.: Study on Electron Distributions in a Three Dimensional Particle Simulation of an Ion Engine, Trans. of Japan Soc. for Aeronautical and Space Sci., Aerospace Technology Japan, Vol. 10, No. ists 28, pp.Pb_13-Pb_17, 2012.
- 27) Miyasaka, T., Asato, K., Sakaguchi N. and Ito, K.: Optical Measurements of Unsteady Phenomena on Coaxial Pulsed Plasma Thruster, Vacuum, in press.
- 28) Ito, K., Miyasaka, T., Asato, K. and Sakaguchi, N.: Measurements of Late-Time Ablation Phenomena of PPT Using a Propellant with Slits, Plasma Application & Hybrid Functionally Materials, Vol. 21, p.66, 2012.
- 29) Miyasaka, T. et al. : Overview on Developments of High-Power Anode Layer Thruster in Japan, 29th ISTS, ISTS paper 2013-o-1-1, Nagoya, 2013.
- 30) Yamamoto, N. et. al. : Developments of Robust Anode-layer Intelligent Thruster for Japan IN-space propulsion system, the 33st IEPC, IEPC-2013-244, Washington D.C.,2013.
- 31) Miyasaka, T., Asato, K., Muraki, R., Furuta, D., and Kubota, K.: Investigation of Side by Side Hall Thruster System, the 33st IEPC, IEPC-2013-110, Washington D.C.,2013.+30 ISTS+IEPC
- 32) 宮坂武志, 安里勝雄, 村木良佑, 古田大樹, 伊藤聖太 : SBS ホールスラスタシステムの性能特性, 平成 25 年度宇宙輸送シンポジウム講演収録, STEP-2013-051, 2014.