

SBSホールスラストシステムの性能特性

岐阜大・工 宮坂 武志 安里 勝雄

岐阜大・院 村木 良佑 古田 大樹

岐阜大・工 伊藤 聖太

1. 研究背景

火星などへの国際有人探査が計画され¹⁾、日本ではLEOからEMLへの軌道間輸送用として電気推進機の適用が議論されている。この電気推進機の1つとしてホールスラストが注目されている^{2, 3)}。このホールスラストについては、加速チャンネル形状の異なる様々なタイプが提案されこれまでに研究や実機開発が進められている。日本国内では主に4つのタイプのホールスラスト、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⁾について推進性能評価だけでなく、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、これらの研究で得られた知見を基に大出力ホールスラストシステム実現に向けた検討、共同開発研究が開始された²⁾。このプロジェクトは、RAIJINと名づけられ、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ており、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から構成されている^{29, 30)}。

岐阜大学では、ホールスラストクラスタシステムにおけるクラスタ干渉検討効果を評価することによるクラスタ最適設計指針の導出を目指して、実験システムによる基礎的なクラスタ干渉効果の評価を進めている。我々のグループでは、マグネチックレイヤ型のホールスラストについて、これまで実験と数値解析の両面から研究を進めてきた¹¹⁻¹⁹⁾。特に、電離振動に起因する20 kHz帯域の放電電流振動の振幅抑制について陽極オリフィス形状効果、推進剤余熱効果等の検討を進め知見を得てきた¹¹⁻¹⁹⁾。そこでクラスタ作動の基礎評価として、まずマグネチックレイヤ型スラストヘッド2基とホローカソード1基により構成されるSide by side(SBS)システムを構築し実験研究を開始した³¹⁾。

これまでの研究において、ヘッド間距離が近いSBS作動時に2つのヘッド電流の間に20kHz帯域の振動に関して逆位相の関係がみられることがわかっている³¹⁾。このような干渉効果の評価を目的に、本研究では、各ヘッドに印加する磁力線の向きの組み合わせによる干渉領域の磁場分布の違いに着目し、ブルーム形状への影響を通じて推進性能に与える効果について評価を行った。

2. 実験方法

2. 1 マグネチックレイヤヘッドを有するSBSシステム

本研究では、クラスタによる干渉効果の作動への影響に関する基礎評価を目的としているため、まずクラスタとしての最小構成である、スラストヘッド2基と中和器1基からなるシステムを採用した(図1)。これらは中和器を挟むように一直線上に配置されている。本実験ではヘッド間距離 $D_T=156$ mm、カソード位置 $D_C=0$ mmと固定している。本研究のSBSシステムには、マグネチックレイヤ型のスラ

スタヘッド GMK1 が用いられている。その概念図を図 2 に示す。本ヘッドは加速チャンネル内で磁力線分布が軸方向にほぼ一様に分布している特徴を有している。推進剤は周方向に等間隔で 24 個配置された陽極オリフィスを通して加速チャンネル内に流入する。これまでの単体運転研究から¹¹⁻¹⁹⁾、オリフィス径やテーパ形状等の陽極オリフィス形状の選択や推進剤余熱によって振動振幅の抑制効果が得られることが、実験および数値解析によって明らかにされている。中和器にはホローカソードを用い Veeco 製 HCN-252 を採用した。

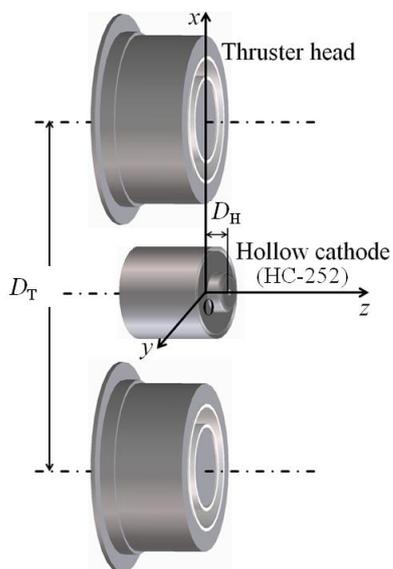


図 1 GMK1-SBSシステムの概念図

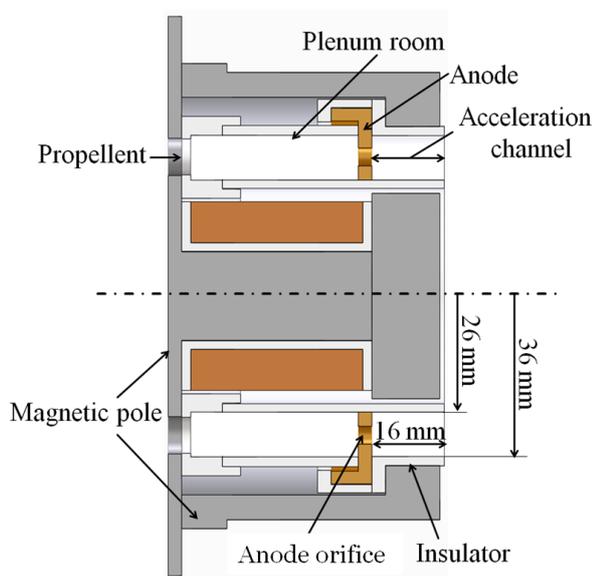


図 2 マグネチックレイヤ型スラストヘッドGMK1の概念図

2. 2 電源および真空系

図 3 に SBS 作動時の電源システムの概略を示す。2 基のヘッドに対し共通電源を用いている。コイル電源はそれぞれのヘッドに対し独立に設置されている。図 4 に本実験の真空系を示す。本実験の真空系は、1 基のロータリーポンプ、1 基のメカニカルブースターポンプ、および排気量が 3,000 l/s, 9,200 l/s の 2 基の拡散ポンプから構成されている。

2. 3 測定法および実験条件

本実験では図 5 に示す 3 つの作動を行った。ここで、1 基のみで単独に作動する場合を (a) Single 作動、放電電圧や磁場は 2 基ともに印加し推進剤を 1 基のみに供給する場合を (b) Solo 作動、2 基ともに作動させる場合を (c) SBS 作動、と区別している。ここで、2 基のヘッドに印加する磁力線の向きの組み合わせの違いによる影響を評価するために、Solo 作動、SBS 作動時には、図 6 に示す 2 通りの磁場印加組み合わせに対して測定を行った。

イオン流束測定には 2 基のファラデーカップを用い、図 7 に示すようにそれぞれカソード中心線上、1 基のヘッド中心線上の下流に 15 cm の位置に設置した。推力測定は振り子式スラストスタンドを用い、EMIC 社製の微小変位計により変位を測定した。

ヘッドの推進剤、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、放電電圧は 130 V、コイル電流は 3.5 A としている。

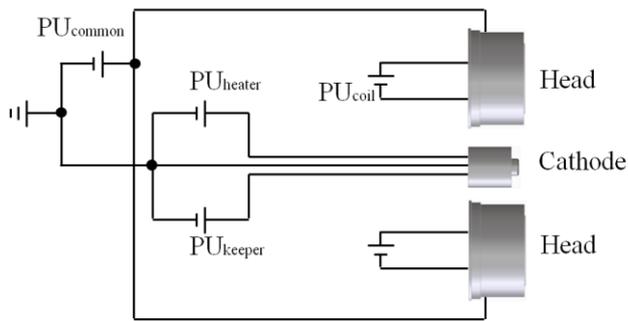


図3 SBS作動時の電源系

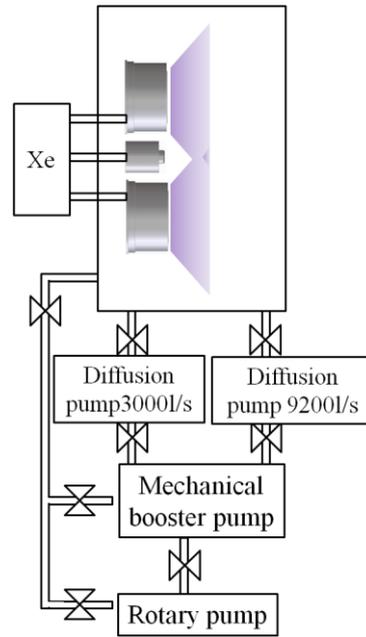
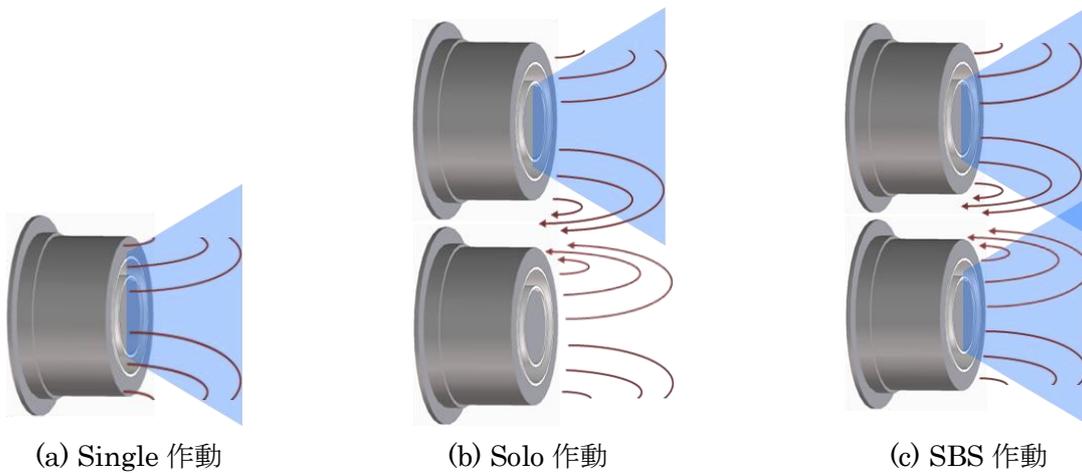


図4 真空排気系

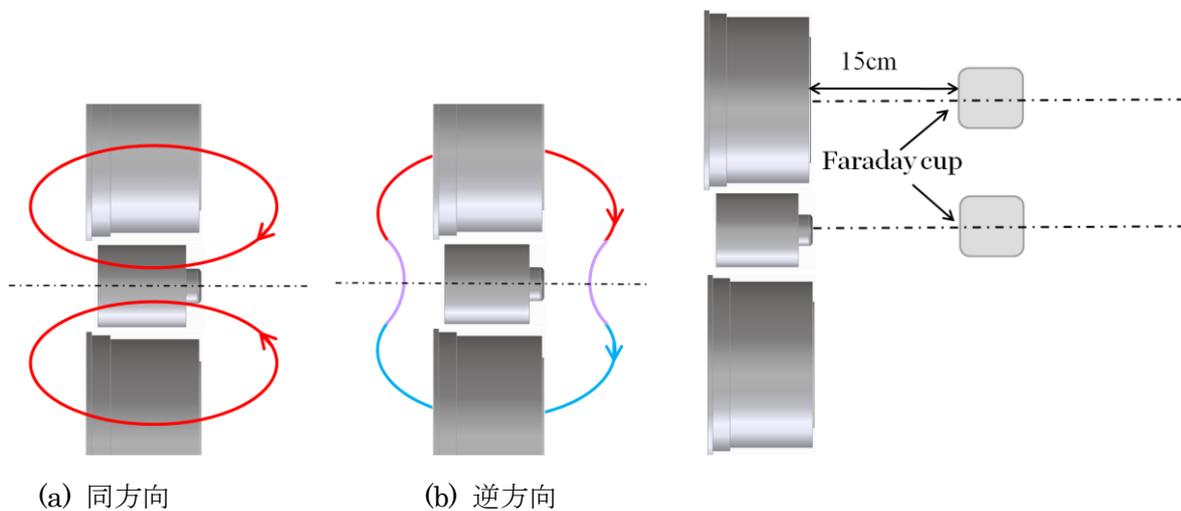


(a) Single 作動

(b) Solo 作動

(c) SBS 作動

図5 各作動モードの概念図



(a) 同方向

(b) 逆方向

図6 磁場印加方向組み合わせの概念図

図7 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8に同方向に磁場を印加した場合のSolo作動時およびSBS作動時の放電電流波形を、図9には逆方向に印加した場合の波形をそれぞれ示す。SBS作動時の2基の20kHz帯域振動波形は、図8、図9どちらの場合においても振幅の大小にかかわらずほぼ同程度の振幅を示し、位相は逆位相になっている様子が確認できる。ただし、磁場印加の組み合わせによる振幅の明らかな違いは確認できない。これらの図でSolo作動時とSBS作動時の振幅を比較してみると、どちらの場合においてもSolo作動時に比べ明らかにSBS作動時に振幅が増加していることがわかる。

図10に磁場を逆方向に印加したSBS作動時のイオン流束測定結果を示す。ここで、イオン流束はSolo作動時の値で無次元化されている。図10からイオン流束は、カソード前、すなわち干渉領域だけでなく、ヘッド前においてもSolo作動時からの増加がみられる。この結果は、プルームがヘッド下流領域においても十分に干渉していることを示している。この干渉は磁場を同方向に印加した場合においても得られた。これらの結果は、プルーム干渉による加速チャンネル内への電子電流の増加が、図8、図9に示された振幅の増加を引き起こす原因となっている可能性を示している。

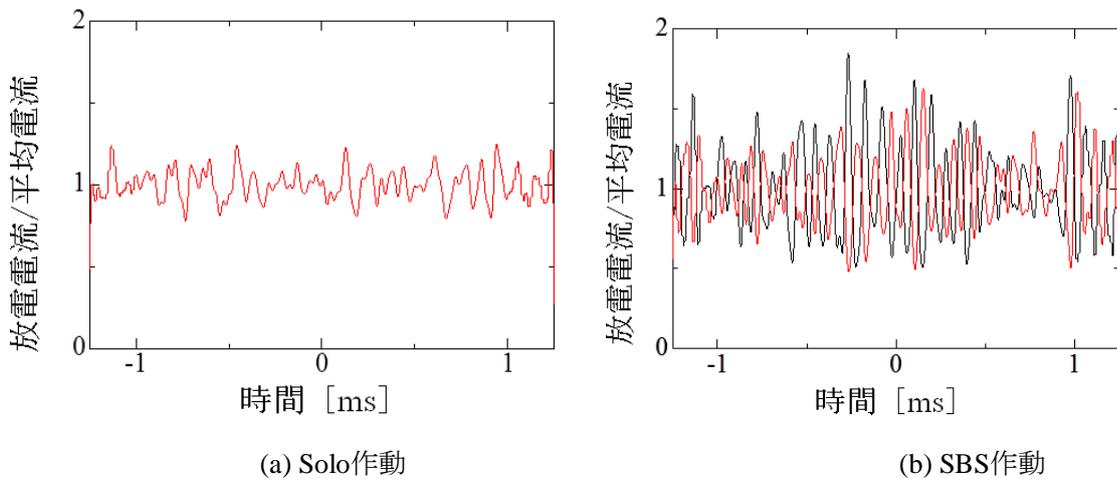


図8 同方向に磁場を印加した場合の放電電流波形

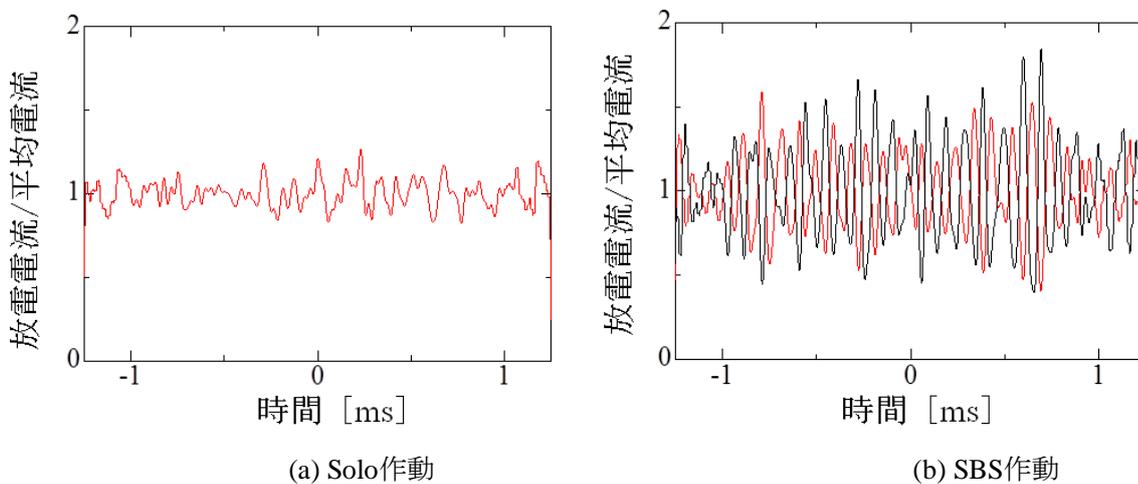


図9 逆方向に磁場を印加した場合の放電電流波形

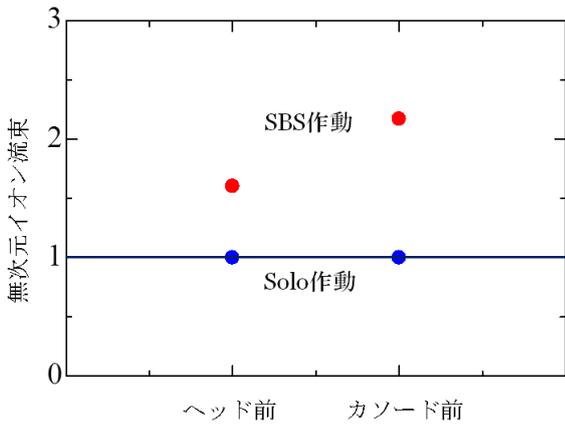


図 1 0 逆方向に磁場を印加した場合のSolo作動時とSBS作動時のイオン流束比較

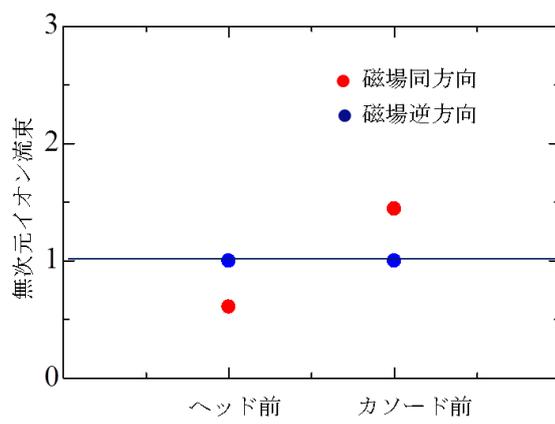


図 1 1 SBS作動時の磁場印加方向の組み合わせに対するイオン流束比較

3. 2 推進性能

図 1 1 に異なる磁場印加方向の組み合わせに対するSBS作動時のイオン流束測定結果を示す。これらのイオン流束は磁場逆方向印加の場合の値で無次元化されている。図 1 1 から磁場同方向印加の場合、磁場逆印加に比べてヘッド前ではイオン流束が39%減少し、カソード前では逆に44%増加していることがわかる。これは磁場同方向印加の場合にプルームがより発散していることを示している。図 6 の概念図に示すように磁場同方向印加の場合には、干渉領域で磁力線がより軸方向に向くようになる。このため等電位線も同様に変化するとすればプルームの発散角の増加が理解できる。逆に磁場逆方向印加の場合には、干渉領域で磁力線が半径方向に曲げられるのでプルームの発散角が抑えられることが予想できる。

図 1 2 に推力測定結果を示す。SBS作動時において、磁場同方向印加の場合にはSingle作動時比べ推力が8.2%減少し、逆に磁場逆方向印加の場合には13%増加している。これらの傾向は、上述した図 1 1 に示すイオン流束の違いから予想されるプルーム発散の違いから予測される傾向と一致している。

推力から推進効率を見積もってみると、磁場同方向印加、逆方向印加のSBS作動時の推進効率は、Single作動時よりも、それぞれ0.4%、8%低い値となった。推力の場合と同様にSBS作動時には磁場逆方向印加の場合に磁場同方向印加の場合に比べ推進効率は高くなっているが、3. 1 で述べたようにSBS作動時にプルームの干渉による電子電流増加により、Single作動に比べて推進効率は低下する結果となった。

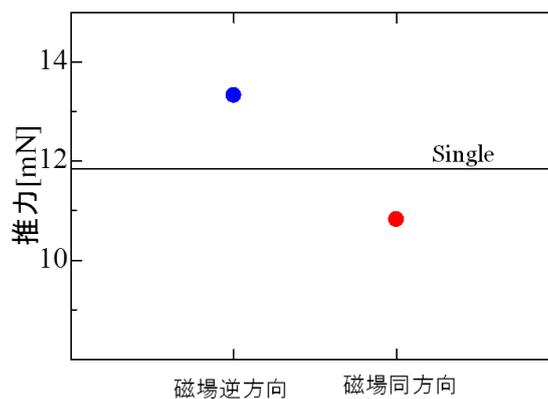


図 1 2 推力比較

4. まとめ

マグネチックレイヤ型スラスタヘッドからなるSBSシステムについて、2基のヘッドに対する磁場の印加方向の組み合わせを変えて評価を行った。その結果、どちらの組み合わせに対しても20kHz帯域放電電流振動の振幅は印加方向組み合わせの違いはとらえられなかったが、Solo作動時に比べて増加した。また、推力は磁場を逆方向に印加した場合に、Single作動時よりも増加し、同方向印加の場合には減少した。ただし、逆方向印加の場合も推進効率はSingle作動時よりも低下した。これらの結果は、プルーム干渉の測定結果を用いて説明が可能であることが示された。

今後は、3基等の2次元的な干渉効果が見込まれるシステムに対して同様な検討を進める必要がある。

本研究は、科学研究費補助金（基盤研究(B)(No. 24360348)）の支援を受けた。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/inspace/inspace.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 卷, 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 卷, 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 卷, 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 卷, 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