

マグネチックレイヤ型SBSシステムにおける磁場干渉効果

Effects of Magnetic field Interference on the SBS system of Magnetic-Layer Heads

○後藤 亮太(岐阜大・院)・宮坂 武志(岐阜大・工)・清水 大地・吉田 未古都
宇山 裕大・迫田 将拡・三宅 誼(岐阜大・院)

○Ryota Goto・Takeshi Miyasaka・Daichi Shimizu・Mikoto Yoshida
Yudai Uyama・Masahiro Sakoda・Yoshimi Miyake (Gifu University)

At Gifu University, influences of interference effects of a Side By Side (SBS) system consisted of a hollow cathode and two magnetic-layer type thruster heads on operational stability were investigated. The results revealed that the amplitude of ionization discharge current oscillations in the SBS operation at high discharge voltage was clearly decreased compared with that in the single operation. The peak energy of ionization beam in the SBS operation at high discharge voltage was lower than that in single operation. These results reveal that the ionization region in the SBS operation is extended to the downstream by the plume interference in the SBS operation.

1. 研究背景

惑星等への有人探査計画では、LEO から EML へ部品を輸送する際の軌道間輸送用エンジンとして電気推進機の適用が有力視されている¹⁾。ホールスラスタは中比推力領域において高い推進効率が得られるため、この電気推進機の候補として注目されている^{2,3)}。ホールスラスタは加速チャンネル形状によって分類され、マグネチックレイヤ型⁴⁻²⁰⁾とアノードレイヤ型^{21,22)}の2種類が主に研究開発されている。マグネチックレイヤ型は、加速チャンネル長がチャンネル幅より長く、作動が比較的安定という利点がある。

日本では、アノードレイヤ型ヘッドを複数基適用し、クラスタシステムでの大電力ホールスラスタの開発に向けて、プロジェクト名を「RAIJIN (Robust Anode-layer Intelligent thruster for Japan IN-space propulsion)」として、共同開発研究が行われている^{23,24)}。

岐阜大学では、RAIJIN にて想定されるクラスタシステムでの最小構成数であるホールスラスタヘッド2基とホローカソード1基で構成される Side By Side(SBS)システムを開発し、ヘッド間干渉が及ぼす放電特性、推進性能への影響について評価を進めてきた。これまでに、マグネチックレイヤ型ヘッドにおける単体システムと SBS システムについて、実験と数値解析の両面から研究を進めることで、干渉効果が推進性能、プルーム形状に影響を及ぼすこと等を明らかにしてきた^{25,26)}。また、高放電電圧下において SBS システムにおける電離振動振幅の抑制可能性が示された²⁷⁾。

本研究では、作動特性における放電電圧依存性の詳細評

価と SBS 作動での干渉効果による電離過程への影響についての検討を行った。

2. 実験方法

2.1 Side By Side(SBS)システム 本研究にて用いたマグネチックレイヤ型スラスタヘッド GMK1 の概念図を図1に示す。GMK1 は SPT 型に比べ加速チャンネル内で磁力線分布ほぼ一様であり、陽極に比較的近い位置にて電離が起ることが特徴である。

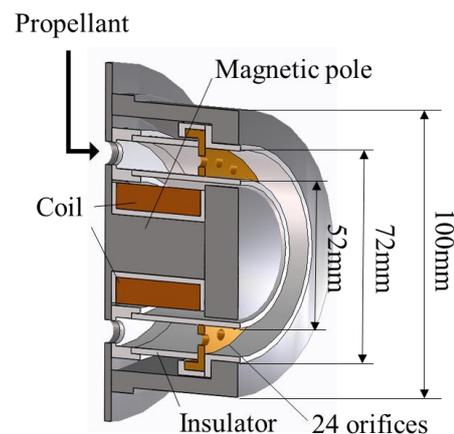


図1 マグネチックレイヤ型ヘッド GMK1 の概念図

本 SBS システムを図2に示す。中央に中和器としてホローカソードを配置し、一直線上にスラスタヘッドを2基配置する。ホローカソードは Veeco 製 HCN-252 を用いた。

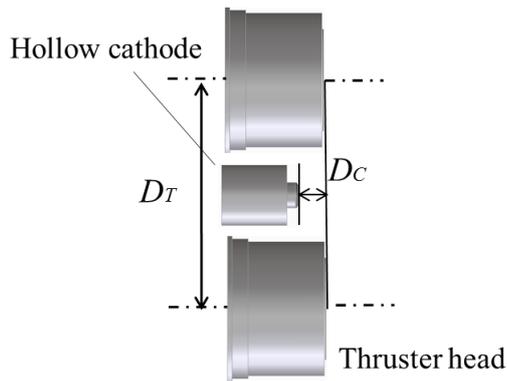


図2 SBS システムの概念図

2.2 電源システムおよび磁場印加方向の組み合わせ

SBS システムの電源システムを図3に示す。2基のヘッドには共通電源を用いている。SBS システムでは、コイル電源を各ヘッドに用意することで2基のヘッドに対する磁場印加方向の組み合わせを2種類設定することができる。図4(a)(b)に2つの磁場印加方向の組み合わせの概念図を示す。

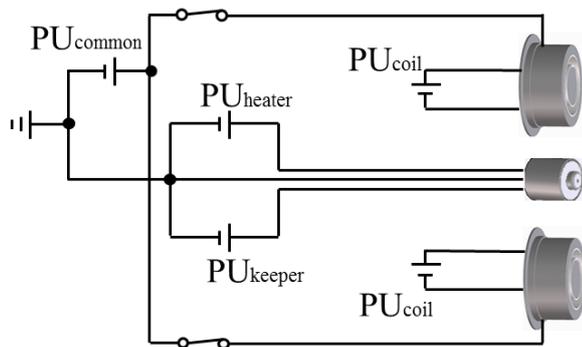
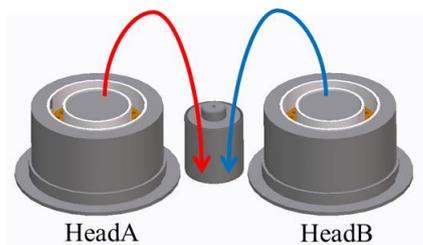
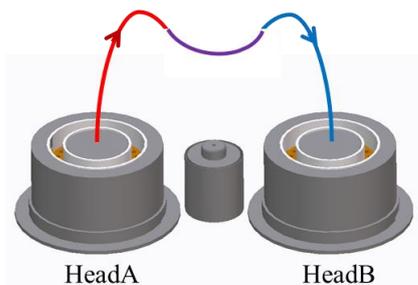


図3 SBS システムにおける電源システム



(a) 磁場印加同方向(Same direction)



(b) 磁場印加逆方向(The Opposite directions)

図4 磁場印加方向の組み合わせに対する磁力線の概念図

2.3 作動システム 本実験にて作動を行ったシステムの条件を表1に示す。

表1 各システム作動条件

	SBS 作動	Single 作動	Solo 作動
推進剤供給	ヘッド2基	ヘッド1基	ヘッド1基
磁場印加	ヘッド2基	ヘッド1基	ヘッド2基
電位印加	ヘッド2基	ヘッド1基	ヘッド2基

2.4 測定法および実験条件 本実験では、放電電流値測定、放電電流振動波形測定、イオンビームエネルギー測定を行った。

放電電流値、放電電流振動波形はカレントプローブを用いて測定した。イオンビームエネルギー測定では、図5に示すRPAを用いた。1stグリッドは浮遊電位、2ndグリッドに-30V、3rdグリッドに0~300V、コレクタに-30V印加した。RPAは図6に示すようにz方向ヘッド下流に250mmの位置、x方向にはHeadA中心位置である78mmの位置に設置した。イオンビームエネルギー評価方法は、コレクタ電流を測定することでイオンエネルギー分布を算出し、エネルギーピーク値における3rdグリッド印加電圧に着目し、イオンビームのピークエネルギー電圧として評価を行う。

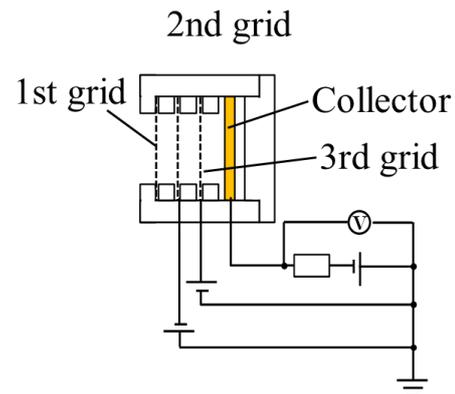


図5 RPA の概念図

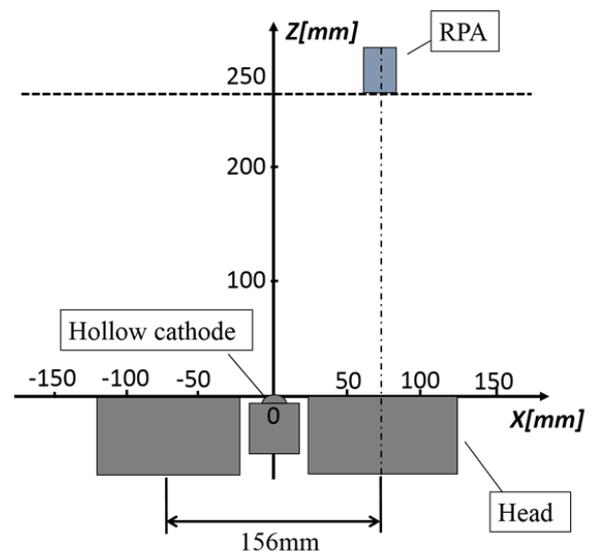


図6 イオンビームエネルギー測定位置

本実験は、JAXA 宇宙科学研究所のスペースチャンバールにて実施した。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、ヘッド流量は 1 基あたり 12.9sccm、加速チャンネル内最大磁場は 35mT である。

ヘッド間距離 DT は構造上最も近接な 156mm、カソード位置 DC は 0mm にて作動を行った。ホールスラスト作動中の真空度は 2.2×10^{-3} Pa である。

3. 結果 および 考察

3.1 放電電流値評価 図 7 に各放電電圧に対する SBS 作動時と Single 作動時での HeadA の放電電流値を示す。SBS 作動時の評価は、2 つの磁場印加方向の組み合わせの平均値にて行った。放電電圧 140V では SBS 作動時に Single 作動に比べ、放電電流値が 15% 増加、放電電圧 200V では 20% 増加した。このようにどの放電電圧下であっても SBS 作動時での放電電流値が Single 作動時よりも増加することが確認できた。

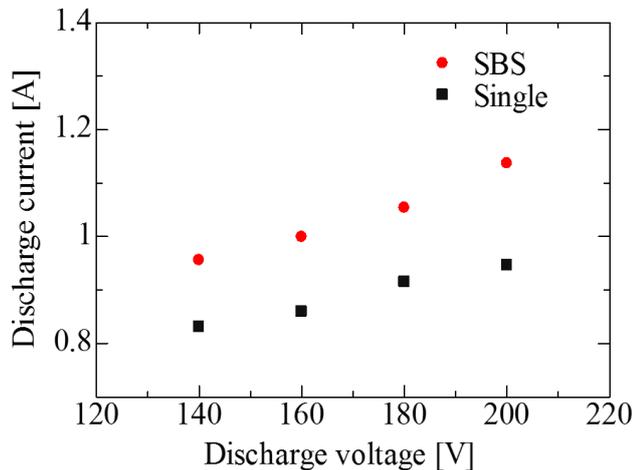


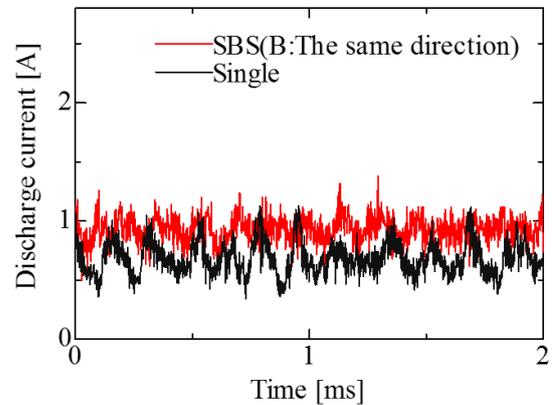
図 7 SBS 作動時と Single 作動時における放電電流値

3.2 放電電流振動波形評価 図 8 に SBS 作動時と Single 作動時における放電電圧 130V および 200V に設定した場合での HeadA の放電電流振動波形を示す。SBS 作動時における 2 つの磁場印加方向の組み合わせによる明確な違いは確認できなかったため、図 8 には SBS 作動時の結果として磁場を同方向に印加した場合のもののみを示している。

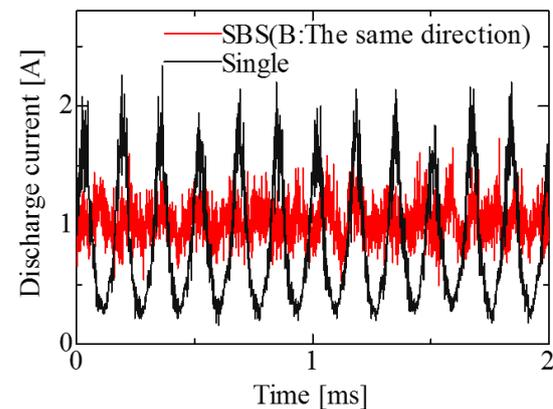
放電電圧 130V では、SBS 作動時の電離振動振幅が Single 作動時に比べ、ほぼ同程度または僅かに抑制されることが確認できた。しかし、放電電圧 200V では、単体作動時に振幅が大幅に増加するのに対し、SBS 作動時は増加が僅かであり、2 つの作動モード間での電離振動振幅の間に明確な差が確認できた。

図 9 に各放電電圧下での電離振動振幅の平均値を示す。すべての放電電圧下において、Single 作動時に SBS 作動時に比べて振幅が増加しているが、放電電圧 140V では 56% の増加に対し放電電圧 200V では 301% 増加した。このよう

に高放電電圧下では、電離振動振幅に明確な差が見られた。放電電圧が増加すると振幅が増加することは、電離が急激に進行することで明らかであるが、本測定結果から、SBS 作動時での振幅の増加率は Single 作動より緩やかであることが明らかになった。



(a) 放電電圧 130V



(b) 放電電圧 200V

図 8 SBS 作動時と Single 作動時での放電電流振動波形

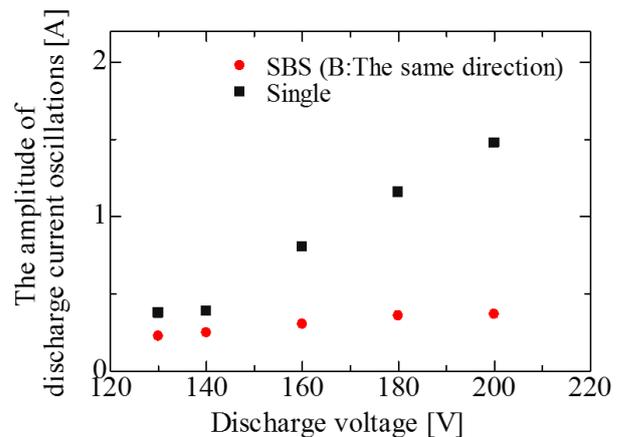


図 9 SBS 作動時と Single 作動時での電離振動振幅, 2A

表 2 に放電電圧 210V における Solo 作動時と Single 作動時の電離振動平均振幅および平均振動数を示す。この測定

はヘッド間距離 D_T を 200mm, 加速チャンネル内最大磁場は 24mT, ヘッド流量が 12.5sccm にて実施した。

表 2 に示されるように, Solo 作動時と Single 作動時の平均振幅と平均振動数はほぼ同程度であり, 明確な差は確認できなかった。Solo 作動は推進剤を 1 基のみに供給することで 1 基のみ作動するものであるが, 磁場および電位が 2 基に印加されており, Dingle 作動時と明確な違いが生じない結果となったことは, SBS 作動時における電離振動振幅が抑制される主要因は磁場干渉と電位干渉によるものではなく, プルーム干渉であることを示している。

表 2 Solo 作動時と Single 作動時の平均振幅と平均振動数

	Solo 作動時	Single 作動時
電離振動平均振幅 [A]	1.199	1.185
平均振動数 [kHz]	6652	6831

3.3 イオンビーム, ピークエネルギー評価 図 10 に SBS 作動時と Single 作動時におけるイオンビームのピークエネルギーを示す。放電電圧が 140V から 200V の間では, SBS 作動時におけるイオンビームのピークエネルギーが Single 作動時より低下した。特に放電電圧が 200V の場合, SBS 作動時のピーク電圧が Single 作動時に比べて 10V 低下しており, 放電電圧が増加することで SBS 作動時のピーク電圧が低下する傾向を示している。この結果は, SBS 作動時では Single 作動時に比べ電離が下流に伸長すること, 放電電圧の上昇に伴い, その効果がより増加すると考えられる。

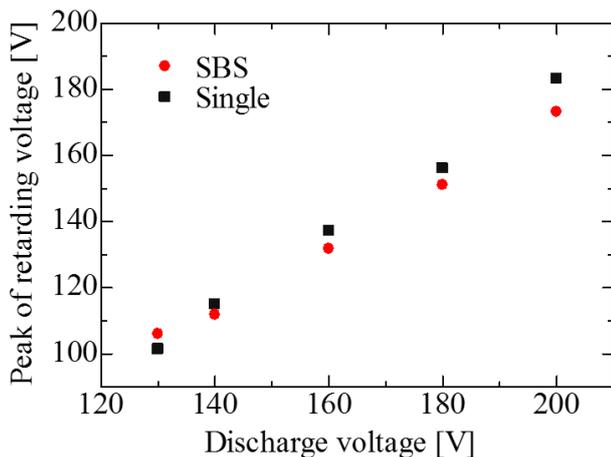


図 10 イオンビーム, ピークエネルギー

この結果をプルーム干渉の観点から考察してみる。まず, プルームが干渉することにより干渉領域にてプラズマ密度が増加する。プラズマ密度が増加することにより, 加速チャンネルへの逆流電子の電子流束の電子密度が増加する。この電子密度の増加により, 下流から電離が開始, すなわち電離領域が下流へ伸長する。この電離領域の伸長により電離領域内の急激なプラズマ密度の増加が抑えられ, 電離

振動振幅の抑制に繋がったと考えられる。

4. まとめ

マグネチックレイヤ型ヘッド 2 基からなる SBS 作動と 1 基による Single 作動を行い, 放電電流値, 放電電流振動波形の放電電圧依存性の評価を行った。またイオンビームエネルギー測定により, 干渉効果が電離過程へ及ぼす影響についてその機構の解明を行った。Single 作動時に比べ, SBS 作動時に放電電流値が増加した。放電電流振動評価では, 高放電電圧作動時に SBS 作動での電離振動振幅が Single 作動時よりも抑制された。また, イオンビームのピークエネルギー評価から, 放電電圧が 140V 以上において, SBS 作動時でのピークエネルギーが Single 作動時より低下することが確認できた。これらの結果は SBS 作動時に電離領域の伸長による作動安定性の向上の可能性を示している。

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 This document is provided by JAXA. 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) Nejoh, 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 28 th 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) 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.
 - 24) 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.
 - 25) 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
 - 26) 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.
 - 27) 古田大樹, 宮坂武志, 安里勝雄, 宇山裕大, 後藤亮太, 清水大地, 吉田未古都, 迫田将弘, 三宅誼: 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, 平成 26 年度宇宙輸送シンポジウム講演収録, STEP-2014-027, 2014.