

アノードレイヤ型 SBS システムにおける放電特性評価

Evaluation of Discharge Characteristics of Anode-layer-type SBS System

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

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

Abstract

To investigate dependence of magnetic flux density on the discharge current and operational instability of a Hall cluster system, a Side By Side (SBS) system having two anode-layer type heads and a hollow cathode were developed at Gifu University. The results show the discharge current and the amplitude of the ionization oscillation for the SBS operation are higher than those for the single operation. These values for the solo operation show remarkable difference with those for the single operation. Thus, the differences between the SBS and the single operations are considered to be caused by the plume interference in the SBS operation.

1. 研究背景

ホールスラスタは中比推力領域で、比較的高い推進効率を得られることから、人工衛星の姿勢制御用エンジンや惑星間探査機のメインエンジンとして期待されており、今後大規模な宇宙ミッション¹⁾の本格化に向けて電機推進機の大電力化が急務となっている中で、その候補として有望視されている^{2,3)}。ホールスラスタはその電離・加速機構の違いにより様々なタイプが存在しており、マグネチックレイヤ型^{4,20)}やアノードレイヤ型^{21,22)}について特に研究が進められている。

現在、IN-Space Propulsion として大電力電気推進機の開発が検討されており²⁾、日本では、プロジェクト名を RAIJIN(Robust Anode-layer Intelligent Thruster for Japan's IN-space propulsion system)とした 5kW 級のアノードレイヤ型ホールスラスタヘッド 5 基で構成される 25kW 級のクラスタシステムの開発が進められている^{24,25)}(図 1)。

クラスタシステムでは、ブルーム同士が干渉するため、その干渉領域における物理的現象の解明が必要となる。これまで岐阜大学では最小構成システムである 2 基のマグネチックレイヤ型ヘッドと 1 基の中和器を有する「Side By Side (SBS)」システムを構築し、2 基のヘッド間の干渉が推進性能や放電電流振動現象、クラスタ作動に及ぼす影響を実験的に検討してきた²⁴⁻²⁷⁾。これまでの研究から、マグネチックレイヤ型ヘッドにおいて放電電流振動波形について干渉効果が見られること、推進性能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^{26,27)}。本研究ではこれまで培ってきたマグネチックレイヤ型 SBS システムの知見を活かし、実際に RAIJIN として想定されるアノードレイヤ型ヘッドについての評価を行う。アノードレイヤ型の作動特性は磁束密度に大きく影響することがわかっている²³⁾。そこで、磁束密度依存性について、放電電流、作動安定性(放電電流振動)の評価を行うことで、アノードレイヤ型 SBS システムの放電特性に対する干渉効果を検討する。

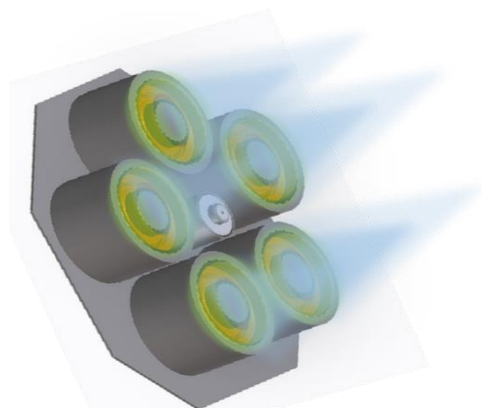


図 1 RAIJIN 概念図

2. 実験方法

2.1 アノードレイヤ型 SBS システム 本研究で採用した

アノードレイヤ型スラスタヘッドの概念図を図2に示す。アノードレイヤ型ヘッドは直径 100mm, チャンネル外径 78mm, チャンネル内径 44mm, 陽極の長さ 32mm とし, 磁束密度のピークが陽極より下流に来るように設計した。SBS システムの概念図を図3に示す。中央にホローカソードがあり, それを挟むようにヘッドを設置している。ヘッド間距離 D_T は 200mm, カソード距離 D_c は 0 mm とする。また, ホローカソードとしては Veeco 製 HCN-252 を採用した。

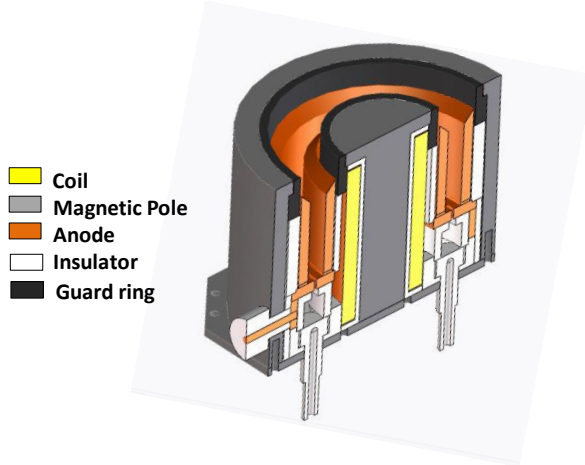


図2 アノードレイヤ型ヘッド概念図

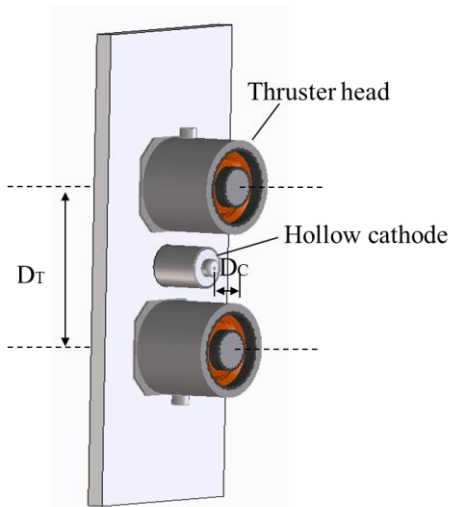


図3 SBS システム概念図

2.2 電源システムおよびコイル電源 電源システムを図4に示す。2基のヘッドは共通電源を用いており, スイッチを設置することで単体作動である Single 作動と2基作動の SBS 作動を切り替え可能としている。また, コイル電源はそれぞれのヘッドに対し独立に設置し, ヘッドの磁場印加方向の組合せを変更可能としている(図5)。ヘッドから出る磁力線の向きが同じ方向のものを磁場印加同方向, ヘッドから出る磁力線の向きが逆方向になりブルーム干渉領域で結合する場合は磁場印加逆方向としている。

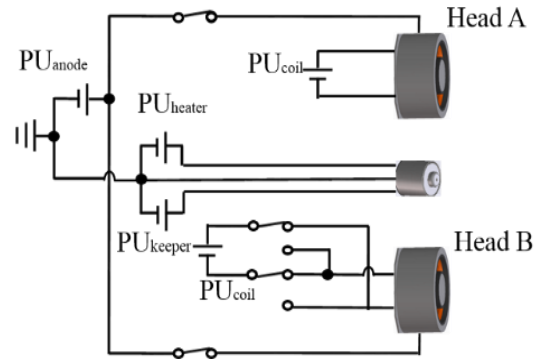
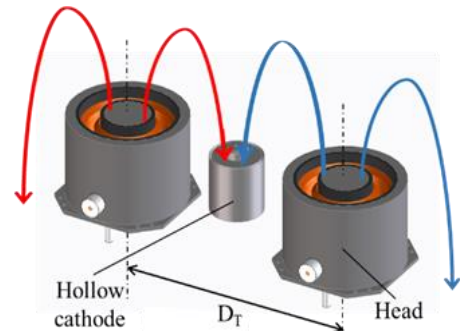
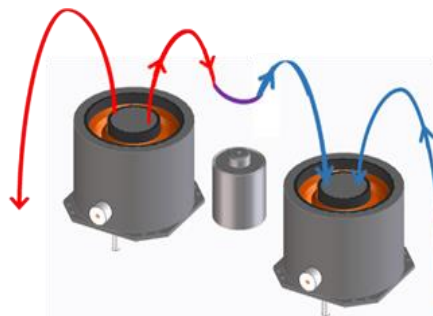


図4 電源システム



(a)The Same direction



(b)Opposite directions

図5 磁場印加方向の組合せ概念図

2.3 真空系および実験条件 本実験は定量評価を目的としていることから, 高真空環境である 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。

実験条件としては, 推進剤には Xe を使用し, カソード流量を 5.0sccm(0.35Aeq), ヘッド流量は SBS 作動時に 25.8sccm(1.84Aeq), Single 作動時に 12.9sccm(0.92Aeq), 放電電圧を 140V とした。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。今回イオンコレクタによるイオンビーム電流の測定を試みたところ, セッティング上, イオンコレクタが放電に影響を及ぼしてしまったため, 測定を行うことが出来なかった。そこで推力測定によりイオンビーム電流の評価を行った。推力測定には振り子式スラスタスタンドを用いた。

3. 結果・考察

3.1 磁場—放電電流特性 図6にSingle作動, SBS作動時の磁場—放電電流特性を示す. ここでSBS作動結果は磁場印加逆方向時と磁場印加同方向時のヘッド1基(Head A)の値を平均したものを表す.

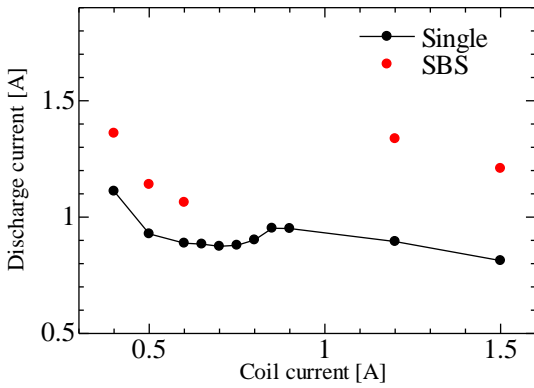


図6 Single作動時及びSBS作動時の磁場—放電電流特性

SBS作動において電離振動振幅の急激な増加により0.7Aから1.1Aは作動不安定となり測定を行うことが出来なかった. どのコイル電流の場合においてもSBS作動時の放電電流はSingle作動時に比べ増加している様子がわかる. コイル電流1.2AではSBS作動時の放電電流はSingle作動時に比べ49%増加し, コイル電流1.5AにおいてはSBS作動時の放電電流はSingle作動時に比べ48%増加した. SBS作動ではクラスタ化によるイオンビーム干渉, 電位干渉, 磁場干渉が放電特性等に影響を与えると考えられ, その結果イオンビーム電流または電子電流が増加することでSBS作動時の放電電流が増加したと考えられるが, どの干渉が主に影響を及ぼしているかを確認する目的で, まず電位干渉及び, 磁場干渉による放電電流への影響の評価を目的に, 電位, 磁場を2つのヘッドに印加し, 片方のヘッドのみに推進剤を供給するSolo作動の測定を実施し, 磁場—放電電流特性の評価を行った. 図7に結果を示す.

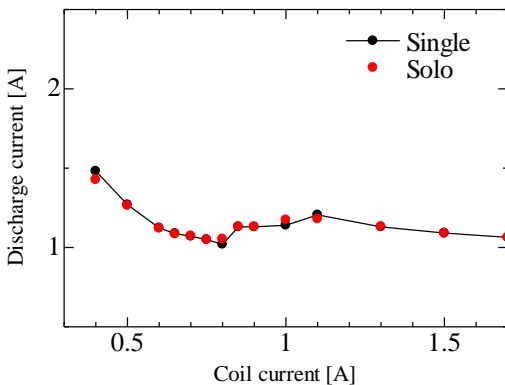


図7 Single作動時及びSolo作動時の磁場—放電電流特性

図7からSingle作動時とSolo作動時では放電電流に明確な違いは見られなかった. このことから, SBS作動において磁場, 電位の干渉のみによる放電電流への影響は非常に弱いことが示された.

3.2 放電電流振動評価 図8, 図9にコイル電流1.2A, 1.5A時のSingle作動時, SBS作動磁場印加逆方向時, 磁場印加同方向時それぞれの放電電流振動波形の結果を示す. ここでSBS作動時の波形はHead Aのみの値としている.

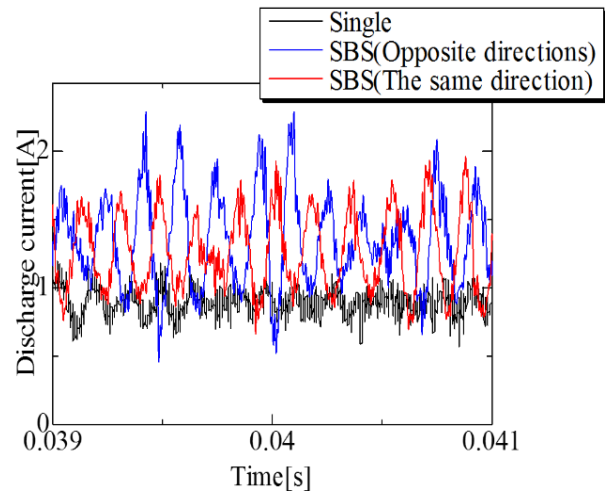


図8 コイル電流1.2A時の放電電流振動波形

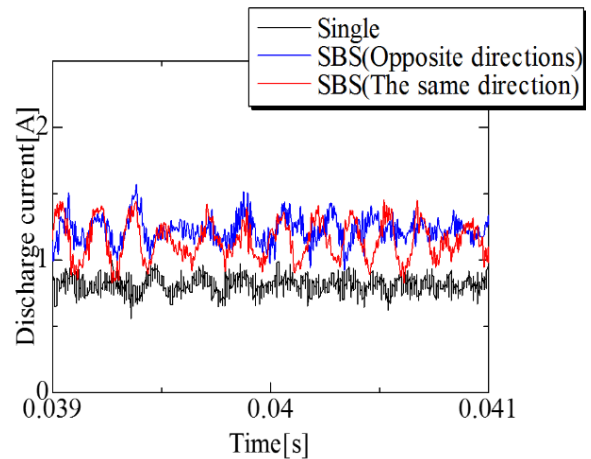


図9 コイル電流1.5A時の放電電流振動波形

図8, 図9から電流波形の最大振幅を与える電離振動の振幅はSBS作動時にはSingle作動時よりも増加していること, コイル電流により増加率の違いが存在していることがわかる. そこで, これらの値について放電電離平均振幅の評価を行った結果を図10に示す. 評価はSBS作動磁場印加同方向とSingle作動, Solo作動磁場印加同方向で行った. Solo作動の結果はコイル電流1.5Aの取得できた.

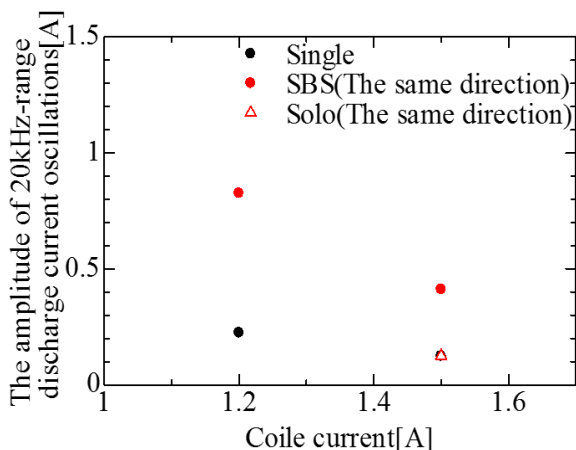


図 10 放電電離平均振幅

コイル電流 1.2A において、SBS 作動時の電離振幅は Single 作動時の 3.7 倍となり、コイル電流 1.5A では 3.3 倍となった。また、Solo 作動時と Single 作動時の電離振幅は同程度となった。これらの結果より、SBS 作動時の電離振幅の増加は、電位干渉、磁場干渉によるものではなく、イオンビーム干渉によるものと考えられる。つまり、この結果は、イオンビーム干渉により逆流電子流束が増加し、電離加速領域の電子密度が増加したことで、電離速度が増加し振幅が増大したことを示している。また、この電子電流の増加は SBS 作動における放電電流増加の 1 つの要因と想定できる。そこで、SBS 作動時の放電電流増加のもう 1 つの要因として考えられるイオンビーム電流の評価を推力測定結果より検討する。

3.3 推力測定結果 表 1 に SBS 磁場印加逆方向時、同方向時の推力結果を示す。これらの値は Single 作動 Head A, Head B の推力を足し合わせたもので無次元化している。作動条件はコイル電流 1.5A である。

表 1 推力結果

	Opposite directions	The Same direction
Thrust	1.45	1.33

表 1 により SBS 磁場印加逆方向時は Single 作動に比べ 45% 推力が増加し、SBS 磁場印加同方向時は 33% 推力が増加したことがわかる。イオンビーム干渉により、プルーム干渉領域においてプラズマ密度が増加する。そして、逆流電子が増加し、電離加速領域の電子密度が増加することで、電離が促進されイオンビーム電流が増加する。その結果、表 1 に示すように SBS 作動時の推力が増加したと考えられる。

この SBS 作動時の推力の増加は、放電電流の増加と同様の傾向を示している。これらの結果はイオンビーム電流の増加は SBS 作動における放電電流の増加の主な要因であることを示している。

4. まとめ

本研究ではアノードレイヤ型ヘッド 2 基と 1 基のホローカソードにより構成される SBS システムについて磁束密度依存性に着目し、放電電流の評価、作動安定性の評価を行い、放電特性に対する干渉効果を検討した。

磁場-放電電流特性を評価した結果、SBS 作動時の放電電流は Single 作動時に比べ増加した。また、Solo 作動時と Single 作動時の比較により、SBS 作動における磁場、電位のみ干渉による放電電流への影響は非常に弱いことが示された。

放電電流振動振幅を評価した結果、SBS 作動は Single 作動に比べ電離振幅が増加した。

推力測定結果より、SBS 作動における大幅な放電電流の増加は主にイオンビーム電流によるものと示された。

今後は、イオンコレクタによるイオンビーム電流の測定、実際のミッションを想定した高放電電圧下での評価検討を行い、3 基の 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、JAXA 宇宙科学研究所の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させていただいた。実験実施においては、九州大学の山本先生、首都大学の竹ヶ原先生、渡邊先生、宇宙科学研究所の國中先生、船木先生、細田様、中園様にご協力を頂いた。ここに謝意を表する。

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：Inspacepropulsion 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) 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) Alexander V.Semenkin, Feasibility of High Power Multi-Mode EPS Development Based on the Thruster with Anode Layer , 201129)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) 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.
 - 25) 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.
 - 26) 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
 - 27) 古田大樹,宮坂武,安里勝雄,宇山裕大,清水大地・吉田未古都,後藤亮太,迫田将広,三宅諄: 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,