

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360348

研究課題名(和文)ホール推進機クラスタシステムのビーム・磁場干渉物理の解明とシステム最適化

研究課題名(英文) Investigations of physics of beam and magnetic field interferences and system optimization in Hall thruster cluster systems

研究代表者

宮坂 武志 (MIYASAKA, Takeshi)

岐阜大学・工学部・准教授

研究者番号：60303666

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,100,000円

研究成果の概要(和文)：大電力電気推進クラスタシステムの開発を目的として、最小構成要素である2基のマグネチックレイヤ型ホールスラストヘッドからなるシステムを開発し、基本的な作動特性、推進性能を評価した。その結果、2基作動時の20 kHz帯域の放電電流振動振幅への影響、位相相関が認められた。推力は2基の磁場印加方向の組み合わせにより影響を受け逆方向印加の場合に高い値を示し、放電電圧の上昇に伴い印加方向組み合わせによる影響は低下することが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：To develop cluster systems of high power electric propulsions, a Hall thruster system consisting of two magnetic-layer-type heads were developed. Investigations of fundamental operational characteristics and thrust performance were performed. The measured discharge current profiles of the two heads suggested that the amplitude and the phase relation of 20 kHz-range discharge current oscillations were strongly influenced by interferences between operations of the two head. The results of the thrust measurements showed that the thrust depended on the combination of the applied magnetic field directions and became higher for opposite directions. It was also found that the difference in the thrust decreased as the discharge voltage increased.

研究分野：宇宙工学

キーワード：推進・エンジン ロケット 電気推進 航空宇宙流体力学 プラズマ計測

1. 研究開始当初の背景

(1)日本では有人火星探査等に向けた大電力電気推進機の開発の必要性が議論され始めた。

(2)大電力電気推進機として複数のヘッドを有するホールスラストのクラスタシステムが検討されていたが、実用化にはヘッド間の干渉による作動安定性、推進性能への影響についての物理的な理解が重要であった。

2. 研究の目的

電気推進機の一つである複数のホールスラストを束ねたクラスタシステムによる大推力化について以下の研究を行った。

クラスタシステムでは、複数スラスト間の「噴出イオンビーム干渉、磁場干渉」が複雑な非平衡過程を通じ基本性能である推進性能、寿命、作動安定性に影響を与えることが予想される。そこで本研究では、実用化に向けた最適指針に関する知見を得る目的で、実験機を用いた測定と数値解析による物理的な理解により、基本性能特性を明らかにする。

3. 研究の方法

(1)SBS システムの開発 同一線上に中和器を挟むように2基のマグネチックレイヤ型ヘッドを配置した Side by Side(SBS)システムを開発した。中和器にはホローカソードを用いた。

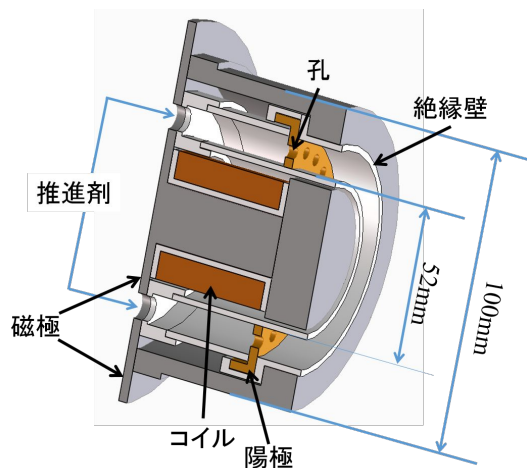


図1 岐阜大学マグネチックレイヤ型スラストヘッド GMK-1 の概念図

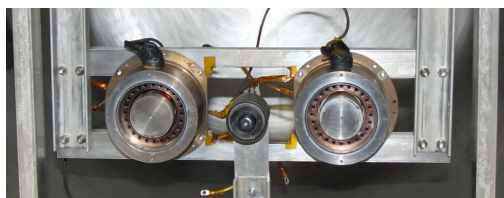
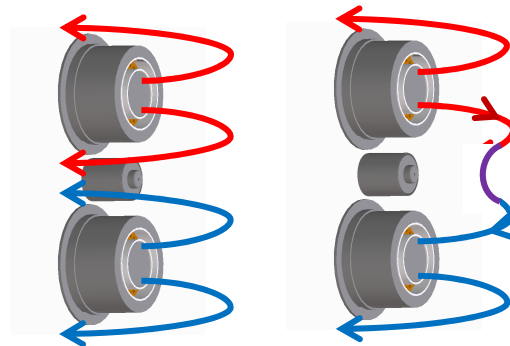


図2 SBS システム

(2)作動手法 2基の主放電には同一の電源を用いる。また各ヘッドのコイル電流は2基の電源により電流の向きを組み合わせを2通りに設定することができる。したがって2通りの磁場印加を行うことが可能であり、この印加方法の違いによる干渉場への影響を評価する。



同方向印加 逆方向印加
図3 磁場印加方向組み合わせの概念

(3)真空環境 本実験は岐阜大学所有の真空チャンバ(直径 1m×長さ 1.8m)内で基礎データを取得し、高真空下での定量評価は JAXA 宇宙科学研究所のスペースプラズマチャンバ(直径 2.5m×長さ 5m)内で実施した。

(4)測定法

推力測定 推力はチャンバ上部から吊り下げられた振り子式スラストスタンドにより微小変位を計測し、重りによる較正により評価した。このイオン流束測定時のヘッド中心間隔は 156 mm、ヘッド端間隔は 56 mm である。

放電電流測定 各ヘッドの主放電電流は電流プローブにより独立に測定され、オシロスコープで記録した。記録した電流波形を解析し、20 kHz 帯域の放電電流振動現象について振幅、位相について評価を行った。このイオン流束測定時のヘッド中心間隔は 200 mm、ヘッド端間隔は 100 mm である。

イオン流束測定 磁場印加方向の組み合わせによる推進性能への違いを調べる目的でイオン流束分布を測定した。

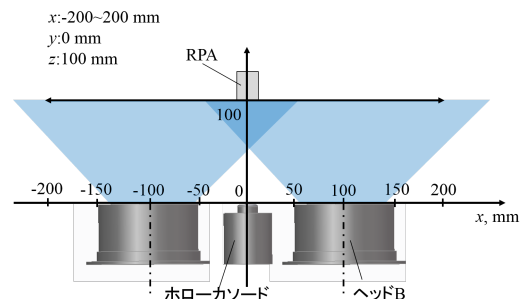


図4 イオン流束分布測定概念図

測定にはエネルギーアナライザ (RPA) を用いたが印加電圧を固定し、イオンコレクタ

として使用した。測定は、図4に示すようにヘッドから100 mm 下流において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200 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は200 mm、ヘッド端間隔は100 mmである。

4. 研究成果

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とした。

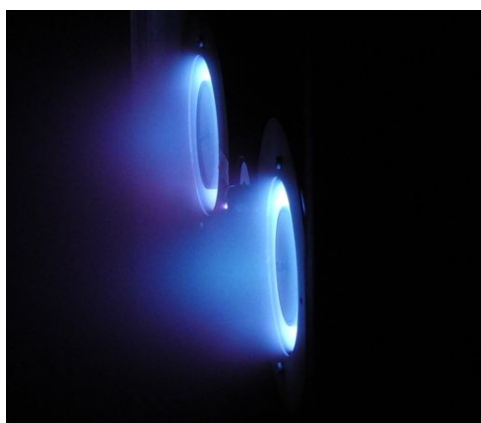


図5 SBS システム作動の例

(1)放電電流波形 図6、図7にSBS作動時に放電電圧をそれぞれ130Vおよび180V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。放電電圧180Vの場合には2つの20Hz帯域の放電波形の位相が同位相となっている。しかし、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。この傾向は磁場を同方向、逆方向に印加した2つの場合に共通している。

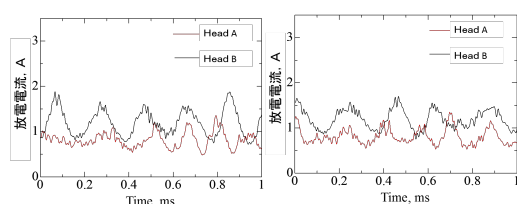


図6 放電電圧130Vの場合の2つの磁場印加方向の組み合わせに対する各ヘッド放電電流波形

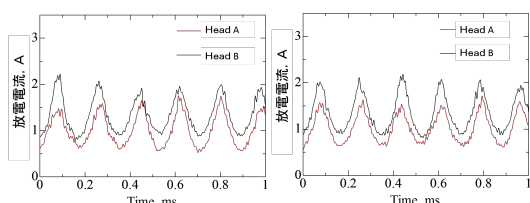


図7 放電電圧180Vの場合の2つの磁場印加方向の組み合わせに対する各ヘッド放電電流波形

また、干渉による振動振幅へ影響をみるために図8に同方向に各放電電圧下における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全振動振幅を示した。この結果から、どちらの磁場印加方向組み合わせの場合においても150V以下の低電圧下ではSBS作動時の振幅は単体作動時よりも明らかに増加しているのに対し、180V以上では単体作動に比べて減少している。

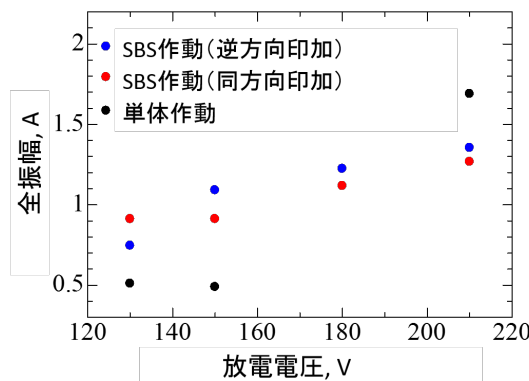


図8 20 kHz 帯域振動振幅の放電電圧依存性 (Head B)

これらの結果からSBS作動時には、干渉効果により、各ヘッドの位相の間に相関関係が存在すること、振動振幅は単体作動よりも増加または減少をしめすことが明らかになった。またこれらの干渉効果は放電電圧に依存し、低電圧下、高電圧化に特徴が分類できることが示された。これら電圧に関して2つのモードが存在することは、本実験は低電圧モードから高電圧モードへの遷移領域近傍で実施されていることから、推進剤の電離度を通じてヘッド内での電離現象へ与える影響の違いを生じているものと考えられる。

高電力実機作動条件としては200V以上の放電電圧下となるので、今回の結果から20 kHz帯域の放電電流振動についてはヘッド間の位相は同位相であり振幅は単体作動時よりも抑制されることが予測できる。

(2)推力 SBS作動時の干渉効果による推進性能への影響の評価を目的として、2つの異なる磁場印加方向の組み合わせに対して推力測定を行った。結果を図9に示す。図9からどの放電電圧下においても推力は逆方向印加の場合に同方向印加を上回っていることが観察できる。またシステムの推力比、放電電流比、推進効率比を図10に示す。この結果から推力は140Vの場合に4.4%増加しているなど放電電圧が低い場合に増加は大きく、放電電圧が高くなるにつれて2つの推力値は近づいており、200Vでは1.1%となっている。

これらの結果について考察を行う目的でまず異なる磁場印加方向の組み合わせに対して磁束密度ベクトル分布を解析により求

めた。結果を図 11 に示す。

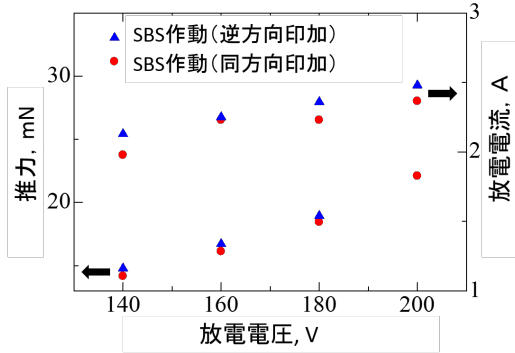


図 9 磁場印加方向の組み合わせに対する推力および放電電流値の放電電圧依存

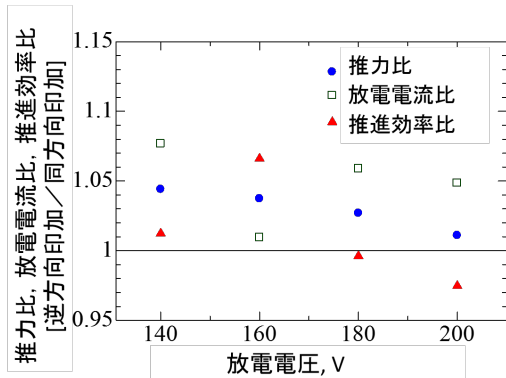


図 10 推力比, 放電電流比, 推進効率比の放電電圧依存

図 11 から干渉領域である中和器下流部において磁束密度ベクトルに明らかな違いが確認できる。同方向に印加した場合にはベクトル、すなわち磁力線は下流方向を向いているのに対して、逆方向に印加した場合にはヘッド間方向に向いている。磁力線形状は電子分布を通じて等電位線に影響を及ぼすことから、同方向印加により干渉領域の等電位線は下流方向成分が増加し、逆方向印加ではヘッド間方向成分が増加するものと予測できる。この等電位線形状の違いにより干渉領域側のプルーム発散角が同方向印加の場合は増加し、逆方向印加の場合は減少すると考えることで図 9、図 10 において観察される推力の磁場印加方向依存性が説明できる。

この磁場印加方向の組み合わせによりプルーム発散角の違いが生じているという機構を確認するために、実際にプルーム内のイオン流束分布を評価した。図 12 に放電で圧 130V および 210V の場合の 100mm 下流におけるヘッド間方向のイオン流束分布の結果を示す。この結果から干渉領域において逆方向印加に比べ同方向印加の場合に明らかなイオン流束の増加が確認できる。このことは磁場印加方向の組み合わせの違いにより干渉領域方向のプルーム発散角に違いが生じていることを示している。また、130V と 210V の比較から、放電電圧が高い場合に磁場印加方向の違いによる影響が低下していること

が確認できる。これは、イオン加速において放電電圧の上昇に伴い下部である干渉領域の等電位線の影響が相対的に低下していると理解することができる。このプルーム発散角の差が放電電圧の上昇により低下していくという結果は、図 10 で観察できる推力比の減少傾向と一致している。

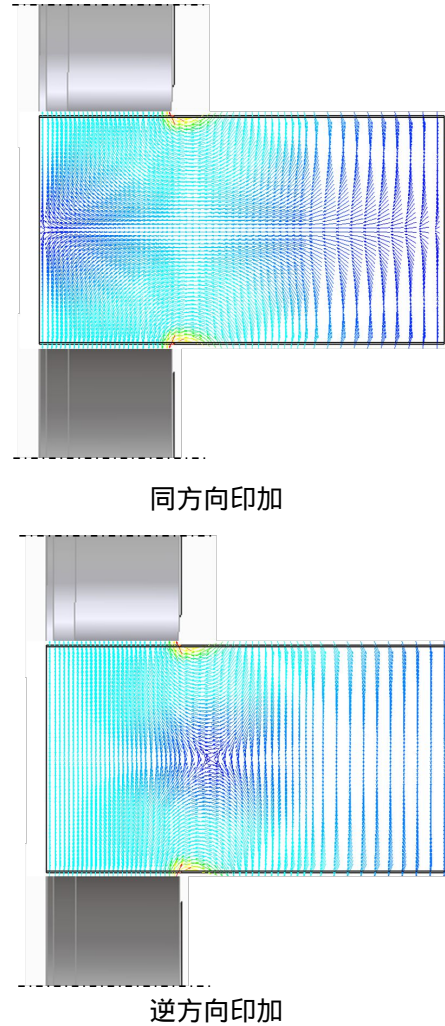


図 11 磁場印加方向の組み合わせに対する干渉領域の磁束密度分布

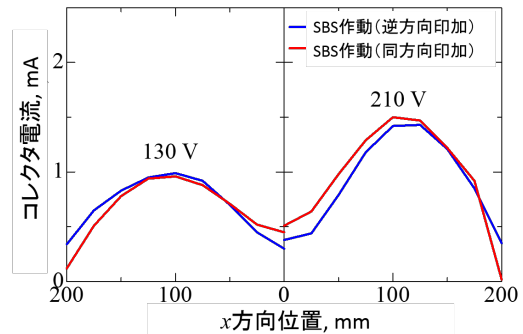


図 12 イオン流束ヘッド間方向分布(Head B)

(3) 推進効率

図 9, 図 10 に示すように推力はどの放電電圧においても逆方向印加の場合に上昇が見られた。そこで、図 10 に示す磁場印加逆方

向の場合と同方向の場合の推進効率比に着目すると、推力の場合に観察されるような逆方向印加の場合の優位性は確認できず 180V, 200V の場合に同方向印加の値を下回っている。これは図 9, 図 10 に見られるように放電電流値が同方向印加の場合よりも逆方向印加で上回っているからである。この放電電流値の上昇については磁力線形状の違いによる逆流電子流束の違いによるものと推察できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

宮坂 武志、安里 勝雄、古田 大樹、村木良祐、清水 大地、マグネチックレイヤ型 SBS システム 作動時の干渉評価、プラズマ応用科学、査読有、掲載決定

〔学会発表〕(計 16 件)

Daiki FURUTA, Thrust Performance on Side by Side Magnetic-Layer System, the 22th Annual Meeting of IAPS, International Workshop 2015, 2015.3.7, Hawaii (USA).

Daichi SHIMIZU, Influences of Plume Interference on Discharge Characteristics of Two Magnetic-Layer Heads, the 22th Annual Meeting of IAPS, International Workshop 2015, 2015.3.7, Hawaii(USA).

古田大樹、ホールスラスト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、2015 年 1 月 15 日～16 日、宇宙科学研究所(神奈川県・相模原市)。

Mikoto YOSHIDA, Effects of Magnetic Field Interactions on Plume Divergences of Cluster Systems, the International Symposium on Visualization in Joining & Welding Science Through Advanced Measurements and Simulation, 2014.11.26～11.28, Hotel Hankyu Expo Park (大阪府・吹田市), 2014.

Ryota GOTO, Developments of High-Power Electric Propulsion Systems for Human Explorations of Mars, the 8th Joint Symposium Faculty of Engineering, Gifu University and College of Engineering, Chonnam National University, 2014.9.18～2014.9.19, Gwangju(Korea).

Yudai Uyama, Plume interference effects on cluster operations of Hall thruster system, 2014 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology, 2014.9.24～2014.9.26, Shanghai(China).

古田大樹、ホールスラストシステムにおけるブルーム干渉効果の検討、第 51 回日本航空宇宙学会中部・関西支部合同秋期大会、2014.11.21、名城大学(愛知県・名古屋市)。

Takeshi Miyasaka, Effects of Plume

Interaction on Operational Characteristics of Side by Side Hall Thruster Systems, the 21st Annual Meeting of IAPS, International Workshop 2014, 2014.3.7～2014.3.10, Hong Kong(China).

村木良祐、SBS ホールスラストシステムの性能特性、平成 25 年度宇宙輸送シンポジウム、2014.1.16～2014.1.17、宇宙科学研究所(神奈川県・相模原市)。

Takeshi Miyasaka, Investigation of Side by Side Hall Thruster System, the 33rd International Electric Propulsion Conference, 2013.10.6～2013.10.10, Washington D.C.(USA).

Naoji Yamamoto, Developments of Robust Anode-layer Intelligent Thruster for Japan IN-space Propulsion System, the 33rd International Electric Propulsion Conference, 2013.10.6～2013.10.10, Washington D.C.(USA).

D. Furuta, Cluster Operation of Hall Thruster, 29th International Symposium on Space Technology and Science, 2013, 名古屋国際会議場(愛知県・名古屋市)。

T. Miyasaka, Overview on Developments of High-Power Anode Layer Thruster in Japan, 29th International Symposium on Space Technology and Science, 2013, 名古屋国際会議場(愛知県・名古屋市)。

K. Kubota, Experiments of Side by Side Hall Thruster System, the 20th Annual Meeting of IAPS, International Workshop, 2013.3.9, Kuala Lumpur (Malaysia).

久保田圭、ホールスラスト Side by side クラスタ作動時の基本特性評価、平成 24 年度宇宙輸送シンポジウム、2013.1.17、宇宙科学研究所(神奈川県・相模原市)。

久保田圭、ホールスラストのクラスタ運転、第 56 回宇宙科学技術連合講演会、2012.11.20、別府国際コンベンションセンター(大分県・別府市)。

〔その他〕

<http://www1.gifu-u.ac.jp/~asatolab/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮坂 武志 (MIYASAKA, Takeshi)

岐阜大学・工学部・准教授

研究者番号：60303666

(2) 研究分担者

安里 勝雄 (ASATO, Katsuo)

岐阜大学・工学部・教授

研究者番号：00021626

(3) 連携研究者

小紫 公也 (KOMURASAKI, Kimiya)

東京大学・新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：9 0 2 4 2 8 2 5

坪井 伸幸 (TSUBOI, Nobuyuki)
九州工業大学・工学研究院・教授
研究者番号：4 0 3 4 2 6 2 0