

令和元年6月21日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04589

研究課題名(和文) マグネチックレイヤ型クラスタシステムのプラズマ干渉物理の解明と最適化

研究課題名(英文) Elucidation and optimization of plasma interference physics of magnetic-layer type cluster system

研究代表者

宮坂 武志 (MIYASAKA, TAKESHI)

岐阜大学・工学部・教授

研究者番号：60303666

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,100,000円

研究成果の概要(和文)：大電力電気推進システムの実現を目的に、ホールスラストシステムのクラスタ化を念頭にマグネチックレイヤ型ヘッド2基を有するSBSシステムを用いて中和器位置依存性に着目し、評価を行った。その結果、中和器位置が推力等に影響を及ぼすことが明らかになった。これは主にブルーム発散が主要因になっていることが示された。また、磁場引加方向の組み合わせがブルーム発散に与える影響を数値解析により明らかにした。アノードレイヤ型SBSシステムにおいても予備評価を実施し、干渉効果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得られた複数ヘッドを有するホールスラストシステムのヘッド干渉効果に関する知見は、ホールスラストクラスタシステムの最適設計指針、最適作動指針導出の基礎となるものである。本成果を適用することによりクラスタ化が実現すれば大電力電気推進機の達成に結び付き、燃費を意味する比推力の高い電気推進機の大電力が実現することで、長期間、大型宇宙ミッションの可能性が大きく広がるものと期待できる。

研究成果の概要(英文)：To develop cluster systems of Hall thruster for high-power electric propulsion systems, evaluations of SBS systems consisting of two-head system of magnetic-layer head were performed. As a result, it is found that a cathode position influences on the thrust performance. The plume divergence results on the influence. Effects of combination of magnetic field directions on the plume divergence was investigated by numerical analyses. In addition, interference effects of anode-layer SBS system were observed.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：宇宙推進工学 電気推進 ホールスラスト クラスタシステム ブルーム干渉

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

宇宙ミッションでは、打ち上げ用のロケットとして大推力を得る化学推進機が用いられているが、低重力下で用いられる人工衛星の姿勢制御用エンジンや小惑星探査機「はやぶさ」の主エンジンとしては推力よりも燃費に相当する「比推力」がより重要であり、高比推力を特徴とする電気推進機が広く用いられてきた。また、近年の宇宙ミッションの大型化に伴い、火星有人探査ミッションにおける地球低軌道からの輸送用エンジンや宇宙太陽光発電所の建設用エンジン、大型人工衛星用エンジン用として高比推力性に加え大推力が求められるようになってきたことから、電気推進機の大電力化の要請が高まっている。この推力、比推力ともに良好な性能を得られるものとして「ホールスラスト」が有望視されている(図1)。

国外では単体の大電力ホールスラスト開発に加え、アノードレイヤ型(TAL)と呼ばれるホールスラストを複数基束ねたクラスタシステムの研究開発が進められているが、国内はJAXAを中心とした開発検討が始まった段階である。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、大規模輸送ミッションに適用可能な大電力電気推進機開発として複数基のホールスラストによって構成されるクラスタシステムについて、通常検討されている基数倍の推進力を得るといった目的だけでなく、各スラスト間の干渉効果を積極的に利用し、推進性能の向上指針を得る、というものである。

申請者がこれまでにに行った2基システムに関する研究により磁場の干渉効果が推力へ影響を与えることが明らかになった。そこで、本研究では、(1)この干渉効果のメカニズムを実験・数値解析を通じた電磁場及びプラズマ特性評価により明らかにし、(2)実際の2次元配置となる3基によるシステムの構築へ適用し、その有効性を評価する。

### 3. 研究の方法

図1にマグネチックレイヤSBSシステムにおける中和器位置の概念図を示す。中和器位置はヘッド間中央に設置し、軸方向位置としてとしてヘッド先端面を0mmとし基準位置とした。測定ではスライダで0mm~20mmまで変化させた。図2にはアノードレイヤSBSシステムを示す。どちらの測定においても推進剤はキセノンを用い、ヘッド流量、中和器流量はそれぞれ0.92Aeq/head、0.14Aeqとした。

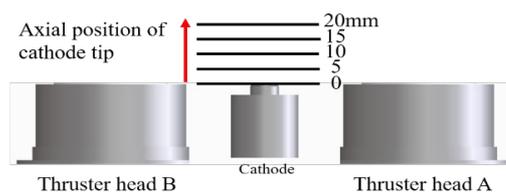


図1 中和器軸方向位置の概念図



図2 アノードレイヤSBSシステム

### 4. 研究成果

マグネチックレイヤヘッド2基を有するSBSシステムの中和器軸方向位置依存性評価結果を図3~図7に示す。図3は放電電圧を150Vに固定した場合の放電電流値を示している。ここで、図3にはSBS作動時の2種類の磁場印加方向組み合わせ(同方向印加, 逆方向印加)の結果に加え、単体作動時の2基の結果の和についても示している。これらの結果から放電電流値は最大で約2%の増加であり、強い位置依存性は確認されなかった。

図4は放電電圧を150Vに固定した場合の推力測定結果である。これらの結果から、どの作動においても中和器位置が下流に移動するにしたがって推力は減少していることがわかる。単体作動時には20mmの位置で基準から約30%低下するのに対して、SBS作動時には約10%であり、ブルーム干渉により推力減少が抑制される結果が得られた。図5にはSBS作動において異なる放電電圧下での基準位置0mmに対する位置20mmでの変化量を示している。この図から、放電電圧の上昇に伴い推力減少は抑制されること、190Vにおいて依然として20%以上の減少がみられることがわかる。図6はイオン電流値の測定結果である。イオン電流は中和器位置20mmで最大約4%の増加であり、推力減少に寄与

していないことがわかる。

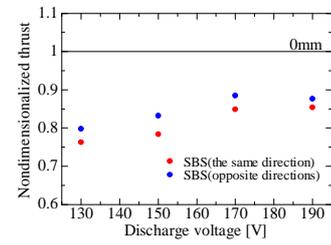
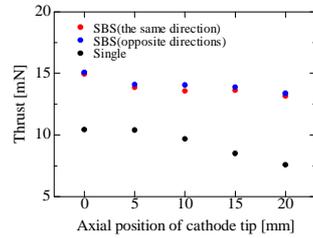
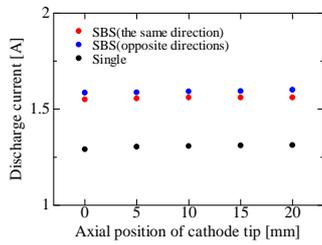


図3 放電電流の中和器位置依存性 図4 推力の中和器位置依存性 図5 推力の放電電圧依存性

図4のようにSBS作動時、単体作動時ともに中和器位置を軸方向下流に移動するに伴い推力が減少し、反面、イオン電流、エネルギー自体はほとんど変化しない傾向がとらえられている。これはプルーム発散角が中和器位置に依存し推力に影響を及ぼしていることを間接的に示している。そこで、本年度はプルーム発散角の測定を目的に中和器位置とプルームのイオン流束分布の評価を実施した。図6には中和器位置0mmと20mmにおけるSBS同方向印加時のヘッド下流50mmのイオン流束の半径方向分布の測定結果を示す。ヘッド流量、中和器流量はそれぞれ0.92 Aeq/head、0.14 Aeq、放電電圧は150Vとした。また、図7には同様に単体作動時の結果を示す。これらの結果は、0mmと20mmでは同様の分布を示すことを表している。しかし、プルームピーク近傍では形状の違いが確認できる。この違いを定量的に評価する目的で、図8に示すようにイオン流束ピーク値で無次元化し、ピーク値に対する割合についてプルームの幅を評価した。その結果を図9に示す。この結果から、全体で20mmの場合にプルーム幅が増加している様子が確認できる。次に、この結果を0mmの値で無次元化した結果を図10に示す。図10から、すべての作動で20mmの方が0mmに比べてプルーム幅が増加していることがわかる。また、単体作動時よりもSBS作動時にその増加が強くなり、また、磁場印加方向の組み合わせにも影響を受けている。この結果はプルーム干渉がプルーム幅に影響を及ぼしていることを示しており、20mmの場合にプルーム幅が増加することは、中和器位置を下流に移動した場合の推力の減少傾向と一致している。

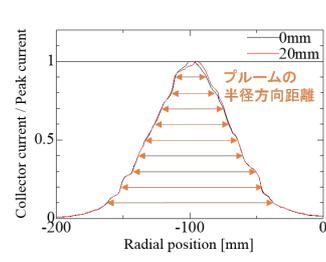
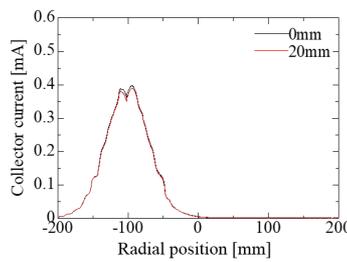
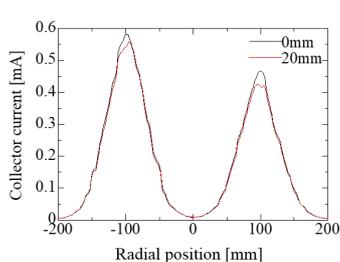


図6 イオン流束:SBS同方向印加時 図7イオン流束:単体作動 図8 無次元イオン流束分布 (SBS同方向引加)

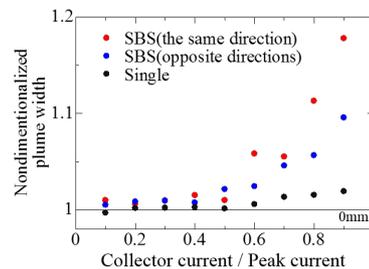
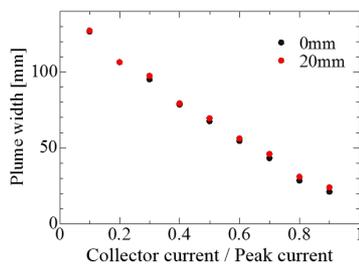


図9 SBS同方向印加時のプルーム幅 図10 中和器軸方向位置0mmに対する無次元プルーム幅

これまでに得られたマグネチックレイヤ SBS の成果をアノードレイヤヘッドを有するクラスシステムへの適用する際の予備評価を目的とし、アノードレイヤヘッド2基を有するSBSシステムについて、単体作動時との作動特性、推進性能の違いを評価した。ヘッド流量、中和器流量はそれぞれ 1.07 Aeq/head、0.14 Aeq、放電電圧は 170V とした。図 1 1 には、ヘッドに印加する磁束密度を変化させた場合の放電電流評価結果を示す。アノードレイヤ型ヘッドは電子拡散モードの違いによりモードが I から III まで変化する。ここで、モード I から II に遷移する遷移点である放電電流最小値を与える磁束密度に着目すると、SBS 同方向作動時には単体作動時に比べ明らかに高い値にシフトしている。これはヘッド間の干渉効果を表している。次に、作動特性のもう一つの特徴である放電電流振幅の増加点に着目し評価した結果を図 1 2 に示す。振幅の評価式は (1) を用いた。この振幅増加点についても SBS 同方向作動時には単体作動時に比べ明らかに高い値にシフトする様子が捉えられている。作動はこの振幅増加点の磁束密度よりも低い条件下で行うことが求められるが、図 1 3 に示すようにこの領域では磁束密度低下に伴い放電電流が増加し、推進効率は低下する。そこで、振動が増加する点から推進効率が最大値よりも 10% 低下し、90% になるまでの磁束密度を作動領域とし、単体作動時と SBS 作動時で比較を行った。その結果を図 1 4 に示す。磁束密度に関して振幅増加点も推進効率 90% 点も明らかに SBS 作動時に増加している。また、振幅増加点よりも推進効率 90% 点の SBS 作動時の増加率が高く、結果として作動領域は SBS 作動時で減少していた。この SBS 作動のヘッド干渉効果においてどの干渉が主に効いているのか、を調べるために単体作動時に磁場干渉のみを加えた Solo 作動について評価を行った。その結果を図 1 4 に示した。この結果から磁場干渉のみの場合でも明らかに SBS 作動時と同様な効果が得られており、SBS 作動時の干渉効果には磁場干渉が主に効いていることがわかった。

$$\Delta = \frac{1}{\bar{I}_d} \sqrt{\frac{\int_0^\tau (I_d - \bar{I}_d)^2}{\tau}}$$

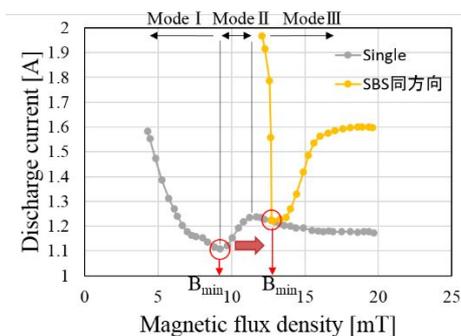


図 1 1 放電電流の磁束密度依存性

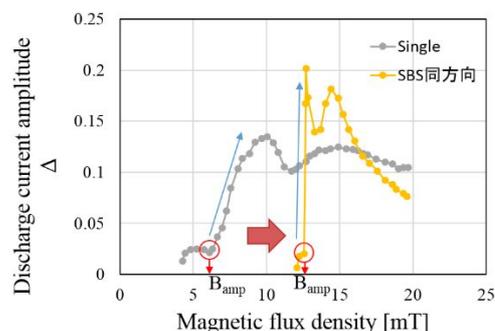


図 1 2 放電電流振幅の磁束密度依存性

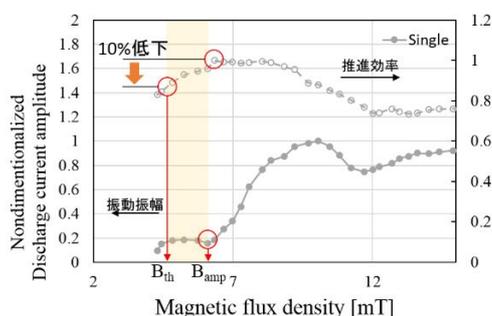


図 1 3 放電電流の磁束密度依存性

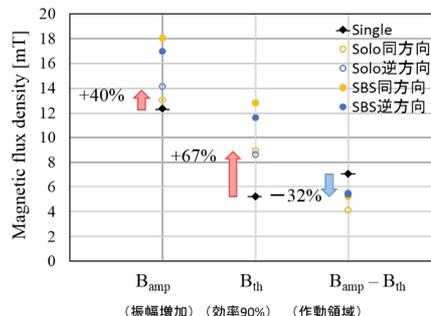
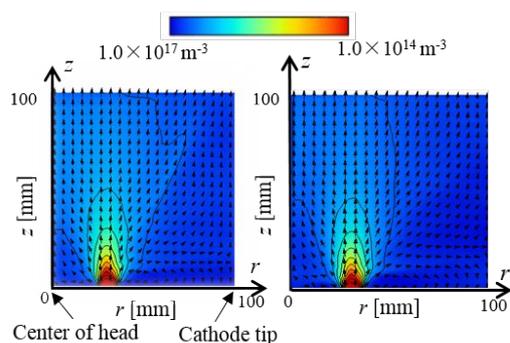


図 1 4 放電電流振幅の磁束密度依存性

マグネチックレイヤ SBS システムの磁場引加方向の組み合わせによるプルーム発散への影響のメカニズムを理解するために Hybrid-PIC 法を用いて解析を行った。ここで、本来は 3 次元であるプルーム領域を中和器周りにヘッドが存在するものとして ( 干渉効果を強調し ) 軸対称モデルで解析を行った。その結果を図 15 に示す。磁場干渉の違いが電子密度分布に影響を与え電位分布に差が見られ、その結果、同方向引加の場合にプルーム発散角が増加する結果が見られた。



(a) 同方向引加 (b) 逆方向引加

図 15 イオンの速度ベクトルと数密度分布

## 5 . 主な発表論文等

[ 雑誌論文 ] ( 計 1 件 )

1. Takeshi Miyasaka, Tomohiro Kita, Makoto Asahara, Kazuya Oishi, Masahiro Sakoda, Yuki Mamiya, Hiroki Kanie, Influences of cathode position on operations and thrust performance of side by side Hall thruster system, vacuum, in print, 10.1016/j-vacuum.2018.12.056, 査読有

[ 学会発表 ] ( 計 17 件 )

1. 間宮 悠貴, 蟹江 裕基, 伊佐地 範之, 石田 大貴, 宮坂 武志, 朝原 誠, アノードレイヤ SBS システムにおけるプルーム干渉評価, 平成 30 年度宇宙輸送シンポジウム, 2019
2. 宮坂武志, 山本直嗣, 竹ヶ原春貴, 渡邊裕樹, 船木一幸, ホールスラスタシステムの放電特性及び推進性能評価, 平成 30 年度宇宙科学に関する室内実験シンポジウム, 2019
3. Ryo KATO, Yuki MAMIYA, Hiroki KANIE, Noriyuki ISAJI, Daiki ISHIDA, Takeshi MIYASAKA, and Makoto ASAHARA, Experimental and Numerical Investigations of Multi-Head Hall Thruster Operation, The 12th International Workshop on Plasma Application and Hybrid Functionally Materials, 2019
4. 間宮 悠貴, 宮坂 武志, 朝原 誠, 蟹江 裕基, 伊佐地 範之, 石田 大貴, ホールスラスタクラスタシステムのプルーム干渉と電離過程, 第 62 回宇宙科学技術連合講演会, 2018
5. 喜多 智大, 宮坂 武志, 大石 和哉, 蟹江 裕基, 間宮 悠貴, 朝原 誠, クラスタシステムにおけるプルーム干渉効果評価, 平成 29 年度宇宙輸送シンポジウム, 2018
6. Tomohiro Kita, Takeshi Miyasaka, Masahiro Sakoda, Yoshimi Miyake, Kazuya Oishi, Ryo Kawamura, Yuki Mamiya, Kohei Kurita, Hiroki Kanie, Makoto Asahara, Two-Head Operations of Hall Thruster, 31st International Symposium on Space Technology and science, 2017
7. Takeshi Miyasaka, Ryo Kawamura, Yoshimi Miyake, Kazuya Oishi, Tomohiro Kita, Makoto Asahara, et al., Research and Development of Hall Thruster Cluster System at Gifu University, The 11th International Symposium on Applied Plasma Science, 2017
8. Tomohiro kita, Takeshi Miyasaka, Masahiro Sakoda, Kazuya Oishi, Kohei Kurita, Yuki Mamiya and Makoto Asahara, Influences of Cathode Position on Operations of Side by Side Hall Thruster System, The 11th International Symposium on Applied Plasma Science, 2017
9. Kazuya Oishi, Takeshi Miyasaka, Tomohiro Kita, Masahiro Sakoda, Ryo Kawamura, Makoto Asahara et al., Investigation of Plume Interference in Hall Thruster Cluster Operation, 35th International Electric Propulsion Conference, 2017.
10. 宮坂武志, 山本直嗣, 竹ヶ原春貴, 渡邊裕樹, 船木一幸, 長寿命・高効率ホールスラスタシステムの作動及び推進性能評価, 平成 29 年度宇宙科学に関する室内実験シンポジウム, 2018

11. 宮坂武志, プラズマ推進システムにおける性能・寿命予測, 第 48 回 中部化学関係学協会支部連合秋季大会 (招待講演), 2017
12. 迫田 将拓, 喜多 智大, 宮坂 武志, 三宅 諠, 大石 和哉, 朝原 誠, ホールスラストプルーム干渉領域の評価, 平成 28 年度宇宙輸送シンポジウム, 2017
13. 渡邊 裕樹, 竹ヶ原 春樹, 宮坂 武志, 山本 直嗣, 船木 一幸, 長寿命・高効率ホールスラストシステムの作動評価, 平成 28 年度宇宙科学に関する室内実験シンポジウム, 2017
14. Yoshimi Miyake, Takeshi Miyasaka, Masahiro Sakoda, Makoto Asahara, et al, Measurements of Plume of Two-head Magnetic-layer System, The 10th International Workshop on Plasma Application and Hybrid Functionally Materials, 2017
15. 宮坂武志, 河村燎, 朝原誠, 迫田将拓, 三宅諠, 喜多智大, 大石和哉, ホールスラスト 2 基ヘッドシステムの作動特性, 第 57 回航空原動機・宇宙推進講演会, 2017
16. 迫田将拓, 宮坂 武志, 三宅諠, 大石和哉, 喜多智大, 朝原誠, ホールスラストクラスタ作動時のプルーム干渉効果の検討, 第 53 回日本航空宇宙学会中部・関西支部合同秋期大会, 2016
17. 三宅 諠, 宮坂 武志, 迫田 将拓, 大石 和哉, 喜多 智大, ヘッド干渉がホールスラスト作動に及ぼす影響評価, 第 60 回宇宙科学技術連合講演会, 2106

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年：  
国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

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

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：朝原 誠

ローマ字氏名：Makoto Asahara

所属研究機関名：岐阜大学

部局名：工学部

職名：助教

研究者番号 (8 桁)：40633045

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。