

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 23 日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02343

研究課題名（和文）アノードレイヤ型クラスタシステムの干渉物理解明と最適化

研究課題名（英文）Investigation of interference phenomena and optimization of anode-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） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：2基ヘッドから構成されるアノードレイヤSBSシステムにより評価を実施した。外部コイル印加により、推進効率の向上効果が得られた。しかし、単体作動時には50%程度まで向上したものが、SBS作動時には40%にとどまった。これはブルーム干渉による逆流電子特性に起因しているものと考えられる。また、同程度の電力下で強干渉場を得る目的でRacetrack形状ヘッドを導入し、ヘッド間距離の影響、放電電圧、推進剤流量等の基本特性が得られた。また、ヘッド個体差が放電特性に及ぼす知見を得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

外部磁場により推進性能最適化を行うとクラスタ作動時に単体作動時よりも到達推進効率が低くなる可能性を示した。これは磁場設計をクラスタ用に最適化する必要性を示している。また、Racetrack形状ヘッドが円環形状ヘッドよりも同一電力下で強干渉場が得られること、ヘッド個体差について特定のヘッドの放電特性がクラスタ特性として強く表れることを示した。これはクラスタ評価可能範囲を広げ、ヘッド個体差に関する評価知見を与えるものである。これらクラスタ推進性能上限引上げ指針、クラスタ評価環境に関する改善、評価法に関する知見は、今後のクラスタ開発とそれに伴う大電力化システムの構築に強く貢献するものと言える。

研究成果の概要（英文）：The evaluations of anode layer SBS systems composed of two heads were carried out. By applying an external coil, the effect of improving thruster efficiency was obtained. However, what improved to about 50% when operating as a single unit was only 40% when operating SBS. This is considered to be due to the backflow electron characteristics due to plume interference. In addition, a racetrack-shaped head was introduced for the purpose of obtaining a strong interference field under the same power, and fundamental characteristics such as the influence of the distance between the heads, the discharge voltage, and the flow rate of the propellant were obtained. In addition, we were able to obtain information on the discharge characteristics of individual head differences.

研究分野：宇宙工学

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

### 1. 研究開始当初の背景

初のホールスラスタ実用化を経て、今後日本が「オール電化対応の衛星・大型宇宙ミッション」分野をリードするためには、ヘッドが小型化でき、原理的に長寿命、高推進性能が期待できて大電力化に適しているが、未だ国内外で本格実用に至っていない「アノードレイヤ型スラスタ」の開発研究を進めることが期待される。アノードレイヤ型スラスタはマグネチックレイヤ型が有する絶縁壁の加速チャンネルを持たず陽極内の狭い領域で電離加速が行われ、ヘッド小型化が可能である。また、プラズマの絶縁壁への衝突による性能低下や壁損耗に起因する寿命低下がないことで長寿命・高推進性能が期待できる。アノードレイヤ型の研究開発を進める重要性は日本の多くのホールスラスタ研究者の共通認識であり、大電力化を想定したクラスタシステムの研究開発検討が開始されている。

### 2. 研究の目的

(1) アノードレイヤ型クラスタシステム実用化への課題 アノードレイヤ型クラスタシステムの実用化には大きく以下の2つの研究課題が存在する。まずアノードレイヤ型ヘッドの課題として、局所的な電離加速による作動不安定性が挙げられる。応募者のこれまでの単体作動試験においても作動不安定性に伴う安定作動範囲の狭さについては確認されており、限られた印加磁場下でのみの作動を強いられる。これは実ミッションにおける作動不安定化につながる。この安定作動範囲の拡大に関する知見を得ることは、単体作動・クラスタ作動に関わらず国内外の研究者にとりアノードレイヤ型推進機の実用化に向けた重要なテーマである。次に、クラスタ最適設計・作動指針の獲得である。クラスタ化はシステムを複雑化するが、単体大電力作動時の問題となる熱問題の低減効果、複数基による冗長性、スラストベクトルの制御性など、クラスタ化のメリットは数多く存在する。応募者はまず安定作動するマグネチックレイヤ型ヘッドについて、ヘッド2基が1基の中和器を共有するシステム GM-SBS システム(Gifu University magnetic-layer type side-by-side system,)を開発し、クラスタ最適設計・作動指針の導出を目的に科研費研究として評価に取り組んできた。この日本初のクラスタ作動評価の結果、作動安定性、推進性能評価において、「2基作動時（SBS 作動時）には単体作動時と比べて放電電流振動特性が変化する」、「SBS 作動時の推力は単体作動時と異なる他、2基の印加磁場方向組合せにより増減する」等明確なヘッド間干渉効果の存在を明らかにしてきた。アノードレイヤ型クラスタ作動の場合、マグネチックレイヤ型以上の干渉効果が予想され基数倍以上の推進性能向上効果だけでなく安定作動範囲の狭さの改善も期待できる。ただし、そのためには干渉効果とヘッド内部現象間の詳細な関係性評価が不可欠である。

(2) プルーム干渉場が逆流電子を通じてヘッド内電離・加速過程に影響を及ぼす物理機構」を明らかにし、「ヘッド内の電離・加速過程の最適化に対する知見を得る。これには干渉場評価に加え、「ヘッド内電離・加速領域」の評価が重要であり、  
①基本性能・作動特性の評価【放電特性、作動安定性、推進性能】  
②プルーム干渉場の評価【電位分布、イオン流束】  
を実施した。また、ヘッド内電離過程の評価を目的に数値解析コードの作成、同一電力化でより強い、つまり明確な干渉効果を得るための改良を行った。

### 3. 研究の方法

(1) アノードレイヤ SBS システムの高効率化と干渉効果評価 円環加速チャンネル形状を有するヘッド2基からなるアノードレイヤ SBS システムを改良し、外部磁場の印加により推進効率50%を目指す。高効率化により、プルーム干渉効果が増加すること、より実機に近い干渉効果が得られることが期待できる。実験は、JAXA 宇宙科学研究所大型スペースサイエンスチェンバを用いて行った。直径は2.5m、全長5mである。放電特性は、電流プローブにより放電電流を測定することにより評価した。推進性能は、振り子式スラストスタンドを用いて測定した推力を基に評価を行った。プルーム中のイオン流束分布は、RPA を使い、イオンヘッド下流100mの位置を径方向に掃引し取得した。ヘッド2基はホローカソード1基を挟むように設置され、ヘッド中心間距離は200mmである。測定は、2基への磁場の印加方向の組み合わせを同方向、逆方向と2通りにした場合と単体作動の場合について実施した。



図1 アノードレイヤ SBS 作動の様子

(2) 強干渉化システムの検討と数値解析コード構築 背圧の影響を考慮すると、実機で想定している電力化での実験は難しい。そこで、同一電力下でより強い干渉場を生成することを目的に、Racetrack 加速チャンネル形状を有するヘッドを開発し、強干渉効果の確認と基本評価を実施した。測定は放電電流特性、推進性能に加え、下流 100m の位置でイオン流束および電位の一円分布について行った。イオン流束はイオンコレクタ、電位はエミッシブプローブを用いた。強干渉場の確認として、直線部同士近づけた（縦置き）測定と半円部同士を向かい合わせた（横置き）円環形状に近い測定との比較を行った。また、縦置きの場合に中心面上を 2 次元モデルで模擬した場合について、2 次元粒子解析コードの構築を行った。

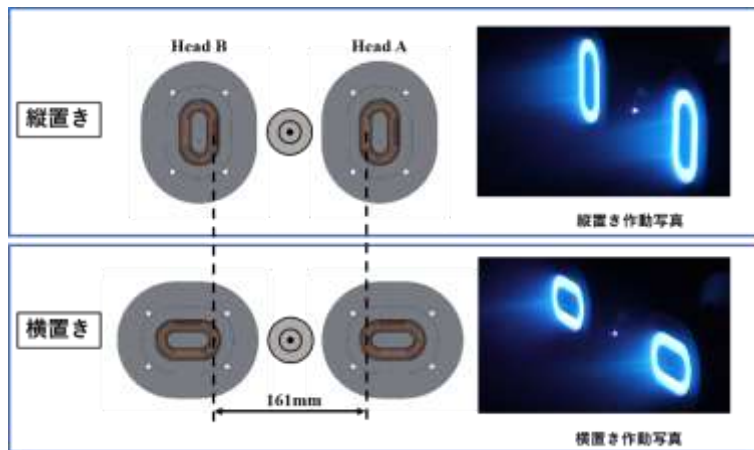


図2 縦置きと横置きの場合の比較

(3) アノードレイヤ SBS システムの放電特性へのヘッド固体差が及ぼす影響評価 複数のヘッドを有するクラスタシステム作動の干渉効果の評価を行う場合に、ヘッドの固体差を完全になくすることはできない。そこで、放電特性がヘッド特性の平均を表しているものなのか、もしくはあるヘッドの特性が表れているのか、について確認を行った。

#### 4. 研究成果

(1) アノードレイヤ SBS システムの高効率化と干渉効果評価 アノードレイヤ型 SBS システムにおいて、単体作動時と同様に外部磁場を印加することにより推力、推進効率の向上効果が確認できた。単体作動時、SBS 作動時ともに外部磁場がある値を過ぎると向上効果が抑えられてほぼ一定の値となったが、到達値は単体作動時の方が高く、推進効率については単体作動時で約 50%、SBS 作動時で約 40%であった。また、磁場印加方向の組み合わせによる違いとしては同方向に印加した場合に逆方向印加に比べてわずかに高い値となった。プルーム中のイオン流束測定から外部磁場印加による推力増加は電離の促進効果が一因であることが示された。一方で外部磁場印加により放電特性が影響を受けることが示され、クラスタ時の作動条件に関して最適化が求められることが明らかになった。

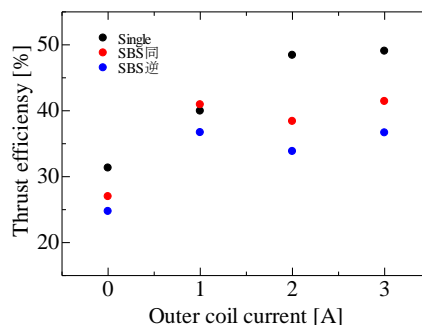


図3 推進効率の外部コイル電流依存性

(2) アノードレイヤ SBS システムの高効率化と干渉効果評価 強干渉化システムの検討と数値解析コード構築 アノードレイヤ型 SBS システムの強干渉化を目的に Racetrack 形状を有するヘッドによるシステムを開発し、測定を実施した。半円部を向かい合わせた横置きの場合と比べて、直線部を向かい合わせた縦置きの場合に、干渉領域中でプルーム中のイオン電流密度の増加、プラズマ電位の上昇がみられた。この結果は強干渉化が達成されたことを示している。また、推進性能においても横置きと縦置きの違いが表れており、干渉効果の強い縦置きの場合に効率の向上が見込まれる可能性を示した。ここで、放電電圧、推進剤流量、ヘッド間距離について基本的評価を実施した。また、縦置きの場合の簡略化解析モデルとして、直線部中心面上を 2 次元で模擬し、2 次元 Full-PIC 法によるヘッド内解析コードの構築、2 次元 Hybrid-PIC 法によるプルーム解析コードの構築を進めた。

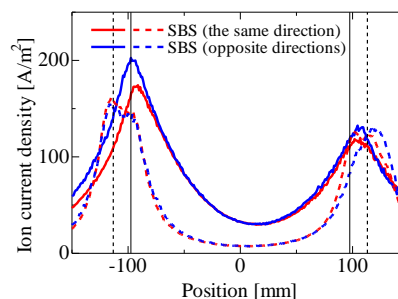


図4 イオン電流密度径方向分布

(3) アノードレイヤ SBS システムの放電特性へのヘッド固体差が及ぼす影響評価 ヘッドの個体差が 2 基作動時の放電特性に与える影響を評価した結果、急激な放電振動振幅増加が起きる磁束密度、つまり振幅増加値は、一方のヘッドの値と合計電流の振幅増加値とほぼ一致した。磁場印加方向の組み合わせに関わらず一致する傾向がみられた。この結果は、クラスタシステム

においてヘッド個体差を有する場合に、安定作動条件がある1つのヘッドの放電特性によって決まってくることを意味している。これら得られた結果は、作動前、または作動中に個体差が生じた場合の作動条件の設定やそれに伴う性能予測について重要な知見を有しているといえる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 MIYASAKA Takeshi, NAGAO Ryo, FUKAGAWA Kohei, NAGAMINE Mitsuhiro, MAEDA Naoto, KATO Akane, ASAHARA Makoto	4. 巻 9
2. 論文標題 Plume interference effects of the racetrack-shaped anode-layer Hall thruster system	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Mechanical Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/mej.21-00347	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計15件（うち招待講演 0件/うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Mitsuhiro Nagamine, Akane Kato, Takeshi Miyasaka, Makoto Asahara
2. 発表標題 Investigation of Plume Interference Effects on Racetrack Anode-layer SBS System
3. 学会等名 33rd International Symposium on Space Technology and Science（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 長嶺光博, 加藤茜, 宮坂武志, 朝原誠
2. 発表標題 Racetrackアノードレイヤスラストの基本特性評価とブルーム干渉効果の検討
3. 学会等名 第65回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 加藤 茜, 長嶺 光博, 宮坂 武志, 浅井 雅信, 伊藤 淳之介, 朝原 誠
2. 発表標題 Racetrack形状ヘッド導入によるアノードレイヤクラスタの強干渉化
3. 学会等名 第58回 日本航空宇宙学会 関西・中部支部合同秋期大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 加藤茜、宮坂武志、長嶺光博、浅井雅信、伊藤淳之介、朝原誠
2. 発表標題 レーストラック形状チャンネルを有するアノードレイヤスラストのプルーム干渉評価
3. 学会等名 令和3年度宇宙輸送シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 宮坂武志、長嶺光博、加藤茜、浅井雅信、伊藤淳之介、朝原誠、山本直嗣、渡邊裕樹、船木一幸、竹ヶ原春貴、各務聡
2. 発表標題 ホールスラスト2基ヘッドシステムの強干渉化評価
3. 学会等名 令和3年度宇宙科学に関する室内実験シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Mitsuhiro NAGAMINE, Akane KATO, Takeshi MIYASAKA, Masanobu ASAI, Jyunnosuke ITO, and Makoto ASAHARA
2. 発表標題 Effect of Plume Interference on Racetrack Anode-Layer Thruster Operation
3. 学会等名 The 29th Annual Meeting of IAPs and the 15th International Workshop on Plasma Application and Hybrid Functionally Materials (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 長尾諒、深川晃平、長嶺光博、宮坂武志、朝原誠
2. 発表標題 アノードレイヤ スラストの2基作動評価
3. 学会等名 令和2年度宇宙輸送シンポジウム
4. 発表年 2021年

1 . 発表者名 Akane KATO, Ryo NAGAO, Kohei FUKAGAWA, Naoto MAEDA, Takeshi MIYASAKA, Makoto ASAHARA
2 . 発表標題 Plume Interference Evaluation of Racetrack Anode-layer System
3 . 学会等名 IAPS Meeting 2021 / International Workshop ' 21 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Noriyuki Isaji, Daiki Ishida, Ryo Nagao, Kohei Fukagawa, Naoto Maeda, Takeshi Miyasaka, Makoto Asahara
2 . 発表標題 Development of a Racetrack Shaped Anode-layer Thruster
3 . 学会等名 The 10th Asian Joint Conference on Propulsion and Power ( 国際学会 )
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Daiki Ishida, Noriyuki Isaji, Ryo Nagao, Kohei Fukagawa, Naoto Maeda, Takeshi Miyasaka, Makoto Asahara
2 . 発表標題 Outer Magnetic Circuit Effects on Anode-layer SBS Operation
3 . 学会等名 The 10th Asian Joint Conference on Propulsion and Power ( 国際学会 )
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Noriyuki Isaji, Daiki Ishida, Ryo Kato, Kouhei Fukagawa, Naoto Maeda, Takeshi Miyasaka, Makoto Asahara
2 . 発表標題 Plume Interference Evaluation of Anode-layer SBS System
3 . 学会等名 the 11th Asia-Pacific International Symposium on the Basics and Applications of Plasma Technology ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 Daiki Ishida, Noriyuki Isaji, Ryo Kato, Kouhei Fukagawa, Takeshi Miyasaka, Makoto Asahara
2. 発表標題 Effects of Magnetic Field of Outer Coil on Anode-Layer SBS System
3. 学会等名 the 12th International Symposium on Applied Plasma Science (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 2) 深川晃平, 伊佐地範之, 石田大貴, 長尾諒, 前田直人, 宮坂武志, 朝原誠
2. 発表標題 Racetrack 型アノードレイヤスラストの基本性能評価
3. 学会等名 令和元年度宇宙輸送シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 4) 石田大貴, 宮坂武志, 伊佐地範之, 長尾諒, 深川晃平, 朝原誠
2. 発表標題 ホールスラスタクラスタシステムの性能及び作動特性
3. 学会等名 第5回宇宙太陽発電(SSPS)シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 8) 加藤諒, 伊佐地範之, 石田大貴, 宮坂武志, 朝原誠, 深川晃平, 長嶺光博, 山田拓実
2. 発表標題 アノードレイヤ型2基ヘッドシステムのヘッド間干渉の放電電圧依存性
3. 学会等名 第63回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2019年



〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

岐阜大学 宮坂・朝原研究室HP  
<https://www1.gifu-u.ac.jp/~asatolab/>  
岐阜大学 宮坂・朝原研究室ホームページ  
<https://www1.gifu-u.ac.jp/~asatolab/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	朝原 誠  (ASAHARA MAKOTO)  (40633045)	岐阜大学・工学部・助教    (13701)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------