

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料  
〔令和4（2022）年度 中間評価用〕

令和4年3月31日現在

研究期間	2020年度～2024年度
課題番号	20H01234
研究課題名	宇宙機用次世代ホールスラスタ技術の検証と超高速プラズマジェット生成機構の解明
研究代表者氏名（ローマ字）	船木一幸（FUNAKI Ikkoh）
所属研究機関・部局・職	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙飛翔工学研究系・教授
研究者番号	50311171

研究の概要：

宇宙推進研究の核心は高速なジェットを生成して宇宙機の軌道変換能力を向上させることにある。本研究では、火星圏への往復航行や外惑星到達に求められる40～50km/sの高い排気速度を目指し、過去に実施されたことの無い高い電圧（1～3kV）と強磁場を印加可能なスラスタシステムを実験的に評価して設計最適化を図ることでホールスラスタの新しい動作領域を開拓し、太陽系を自由に航行可能な時代を実現する。

研究分野：航空宇宙工学、プラズマ応用科学

キーワード：宇宙機推進、ホールスラスタ、外惑星探査、ホローカソード

1. 研究開始当初の背景

宇宙推進では推進剤をジェット噴射し、その反力として推進力が得られる。真空の宇宙環境では「排気したジェットの流量」×「速度」が「宇宙機の推進力」である。従って、排気速度を大きくできると燃費が良く、少ない推進剤で宇宙機の数増分を大きくすることができる。宇宙推進機研究の核心は、高速なジェットを生成して軌道変換に必要な速度増分（ $\Delta V$ ）能力を向上させる、この一点にあると言っても過言では無い。このため現在も排気速度を1%でも高めるための研究開発が続いている。ここで着目するホールスラスタは円環状のチャンネルに磁場と電場を印加してプラズマを生成・加速する推進機であり、図1

のように陽極と陰極間に300～400Vを印加することで排気速度15～20km/sを達成することができる。化学燃料を使った宇宙機推進による排気速度が3から5km/sであるのに対し、同一の宇宙機構成における $\Delta V$ 能力が4倍程高い。また、チャンネル下流部の強磁場部位にプラズマ生成を集中させ局所的な電場を形成することで準中性の高密度プラズマ状態でジェットを排気することで、小さな推進機で高排気速度と大推力を両立可能である。こうした利点から、ホールスラスタは従来の化学推進を置き換える形で地球周回ならびに月ミッションへと適用が進んでおり、電気推進の中で最も成果をあげている。その一方、宇宙活動が太陽系内そしてその外の領域へと拡張していくためには、 $\Delta V$ 能力を一層向上させることが求められ、一例として火星圏への往復航行や外惑星への周回ミッションでは、40～50km/sまたはそれ以上の排気速度が必要である。ここまで高い排気速度のホールスラスタは見ることが無いが、太陽系内そしてその外の領域への輸送と活動を実現するため、簡易でコンパクトなホールスラスタを超高排気速化することで宇宙推進技術を飛躍的に発展させられないかと考えた。

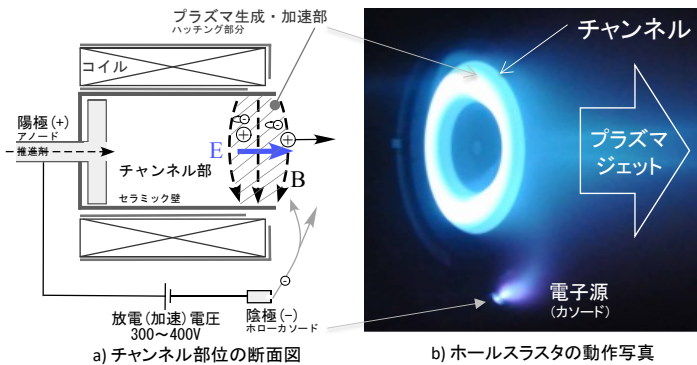


図1 宇宙機用ホールスラスタの構成とその動作写真

2. 研究の目的

本研究では過去には実施されたことの無い高い電圧と強い磁場を印加可能なスラスタシステムを実験的に評価し、 $>40$ km/sの超高排気速度ホールスラスタ可能性を検証する。研究目的は以下の3点である：

1. 放電電圧3kVまでの高排気速度ホールスラスタを設計製作し、達成可能な排気速度上限を、その物理的メカニズムと共に明らかにする。
2. 高排気速度ホールスラスタのチャンネル部とカソード部の設計最適化を行い、達成可能な推進性能、ならびに推進機寿命を明らかにする。
3. 1、2の結果を踏まえて高排気速度ホールスラスタシステムを設計・試作し、寿命を含む評価試験を実施する。この評価結果に基づき、新しいホールスラスタシステムによって実現可能な次世代太陽系探査シナリオを示す。

### 3. 研究の方法

本研究では、実験的手法により高電圧ホールスラスタの排気速度と特性を評価し、排気速度 40~50km/s が可能かどうかを直接的に検証する。初の高電圧ホールスラスタ実験を行う「初期試験フェーズ」、チャンネルとカソード設計の最適化を行う「設計最適化フェーズ」、そして最終評価と高排気速度ホールスラスタで切り拓く宇宙探査を提示する「最終評価・システム提案フェーズ」の、3ステップにて着実な進展を図る。まず初期試験フェーズでは、高排気速度作動に特化したホールスラスタの実験室モデルを製作し、40km/s 以上の高い排気速度が可能であることを実験的に直接検証する。

### 4. これまでの成果

これまでにホールスラスタ試験システムとホローカソード試験システムの2つの試験系整備を終え、高電圧ホールスラスタ実験とホローカソード実験を実施している。初期試験フェーズ研究では、現在までに a) ベース形状スラスタと b) 狭窄化形状スラスタの2つのスラスタを新規製作し、高電圧動作を目指した特性取得実験を続けている。試験で得られている特性例を図2に示した。通常の高電圧動作である 200-300V での特性（排気速度で 13-14 km/s 程度）と、高電圧動作として 700V（最大で 20 km/s）までの特性が得られており、狭窄化形状チャンネルによる従来のホールスラスタとは異なる設計コンセプトの検証に成功し、高電圧時における高い排気速度が得られている。今後は 1kV 超えの高電圧動作を目指す。一方、ホローカソードについては、低電流域で動作可能なカソードの新規開発をおこなっている。30A 級の大型カソードでは安定動作領域が放電電流で 20A 以上までと制約されており、低電流域では数から数十 kHz の大きな放電振動が生じていた。一方、今回開発した新しい 5A 級カソードでは当該領域で安定動作が可能であり、高電圧スラスタに適した優れた特性を示している。以上の実験研究に加えて、外惑星探査のためのシステム検討にも着手しており、地球から火星、木星への大規模輸送や、火星等への往復航行でも、ホールスラスタの利用が適しているとする初期結果が得られている。化学推進を用いた軌道間輸送に対してホールスラスタでは2倍の輸送能力が発揮できるなど期待が高い。

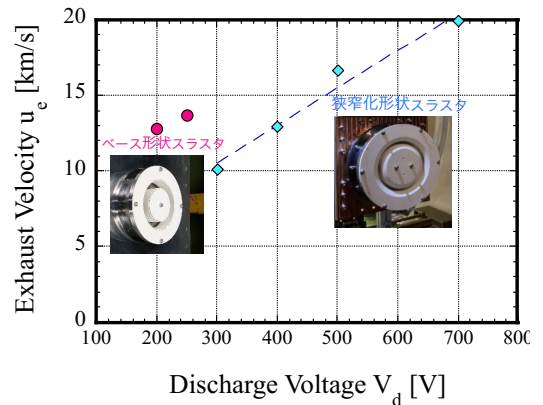


図2 ベース形状と狭窄化形状ホールスラスタの排気速度特性の比較

### 5. 今後の計画

高電圧ホールスラスタ実験を行う「初期試験フェーズ」を当面継続し、排気速度特性と動作条件を照合することで、40~50km/s へと高排気速度化することはできるのか、あるいは、排気速度が制約されるとすればこれほどどのような物理に基づくかについて結論を出す。また、続く最適化フェーズでは、プラズマジェットの前速度は、動作条件、チャンネル形状や、カソード形態へ依存すると予想されることから、複数の形態で比較検討しながら最適動作点と形状を探る試験を実施して設計最適化を行う。もし排気速度限界があればその物理的解釈をまとめ、推進機の損耗による寿命についても検証する。これらの結果を元に本格的なスラスタの設計製作を行い、性能寿命とサブシステム全体の試作評価を進める。

### 6. これまでの発表論文等（受賞等も含む）

Yuto Matsumoto, Ikkoh Funaki, Hiroki Watanabe, Yuya Oshio, Hideyuki Horisawa, Scaling Laws for the design of High-voltage Hall Thrusters, 33rd International Symposium on Space Technology and Science, 2022-b-20, pp.1-7, 査読無し, Feb.-Mar. 2022.

Daisuke Imaguchi, Yuya Oshio, Hiroki Watanabe, Shun Imai, Ikkoh Funaki, Yoshiki Yamagiwa, The Fluctuation Characteristics in the Hollow Cathode with Magnetic Fields, 33rd International Symposium on Space Technology and Science, 2022-b-05, pp.1-9, 査読無し, Feb.-Mar. 2022.

船木一幸, 大電力ホールスラスタの研究開発-ETS-9 実験から将来探査へ-, 宇宙輸送シンポジウム, STEP-2021-044, 2022年1月(基調講演)。

天野耕希, 船木一幸, 山極芳樹, 国産ホールスラスタ搭載のソーラー電力セイルを想定した地球-木星間輸送ミッション解析, 宇宙輸送シンポジウム, STEP-2021-015, 2022年1月(口頭発表)。

船木一幸, 宇宙機用次世代ホールスラスタの研究開発, プラズマ核融合学会年会, 22Ba01, 2021年11月(招待講演)。

### 7. ホームページ等

無し。