

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：82645

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K22020

研究課題名（和文）電気推進ロケットの無限寿命化への挑戦：単結晶材料による無損耗電子源の実験研究

研究課題名（英文）Challenge to Infinite Life Time Electric Propulsion using Single Crystals

研究代表者

船木 一幸（Funaki, Ikkoh）

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・教授

研究者番号：50311171

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：イオンエンジンやホールスラストといった電気推進は、プラズマジェットを噴射した反力で加速・航行する宇宙機推進方式を指し、少ない推進剤で大きな宇宙機増速が得られる「低燃費性」を特徴とする。本研究では、電気推進機の寿命を律速している電子源を低損耗化する実験研究を実施した。単結晶素材を用いることでイオン衝突に対して無損耗であることを目指したが、単結晶と多結晶のタングステンで損耗について有意な差は得られなかった。一方、多結晶オリフィスを用いたホローカソードでも、オリフィス径を最適化することでイオンエネルギーを相当量まで低減することが可能であり、数万時間オーダーまで寿命を延ばすことが可能である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

打ち上げから軌道制御までをすべてを燃費の良い電気推進機で実施する次世代衛星は、オール電化衛星と呼ばれ、その優れたペイロード搭載率から、2020年代人工衛星市場の主流になると予想されている。損耗の非常に小さいカソードオリフィス等素材設計が得られたことで、現在のスラスト寿命制約を逃れ、自在な人工衛星運用や、軌道間輸送、惑星間輸送などの長期にわたるミッションの実現へと繋がり、挑戦的な意義を持つ。

研究成果の概要（英文）：Electric space propulsion (EP) such as ion thrusters and Hall thrusters exhausts a plasma jet to propel a spacecraft. EP's feature is high specific impulse, which means larger amount of delta-V is possible with the same propellant mass in comparison with conventional chemical propulsion. In this study, methods to drastically lower the erosion rate of a hollow cathode were tried experimentally. Although the effect of crystal structure on sputtering yield by xenon ion impact was not significant, it was found that the ion energy onto the orifice could be reduced via selecting appropriate orifice diameter and neutral density. By the latter approach life time in the order of several tens of thousand hours is expected.

研究分野：宇宙機推進工学

キーワード：電気推進 ホローカソード スパッタリング 単結晶 長寿命

1. 研究開始当初の背景

- (1) 小惑星探査機「はやぶさ」は、たとえ小規模な打ち上げロケットと小型宇宙機であっても、イオンエンジンを用いることで小惑星への往復航行が可能であることを世界に示した。電気推進は、プラズマを噴射した反力で加速・航行する宇宙機推進方式を指し、少ない推進剤で大きな宇宙機増速が得られる「低燃費性」を特徴とする。惑星探査のみならず商用人工衛星においても電気推進への期待が高まる一方、現在の電気推進機には寿命がある。惑星への往復航行や太陽系脱出など、電気推進が本領を発揮すべき長期航行を実現するためには、寿命の無い推進機の実現が望ましい。
- (2) 図1には、プラズマ生成加速チャンネルと電子源（ホローカソード）とからなるキセノン（Xe）ホールスラストの構成を示した。プラズマと接する材料部位はXeイオンが衝突することで損耗（スパッタリング）するが、プラズマ生成加速チャンネルについては高エネルギーイオンの壁面衝突を抑制するための「磁気遮蔽」と呼ばれる無損耗設計が確立している。従って、課題として残っているのは、ホローカソードの耐久性である。

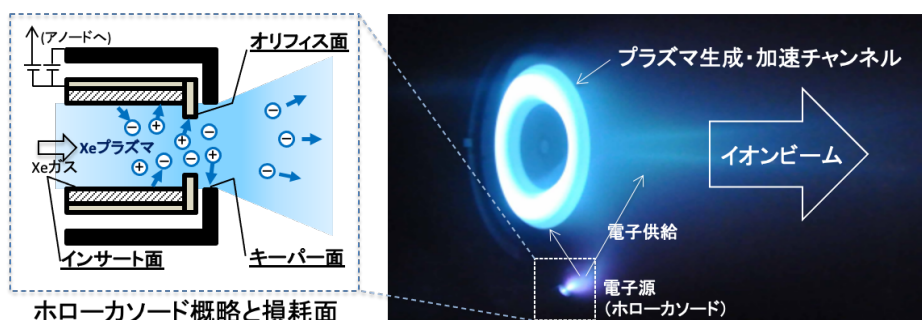


図1 宇宙機用ホールスラストと電子供給を行うホローカソード

2. 研究の目的

宇宙機推進用ホローカソードはプラズマの生成と加速のために必要な電子を供給するデバイスであり、図1左のインサート・オリフィス・キーパーの各部位は高密度プラズマと隣接する。各素材へは20～30Vの低エネルギーイオンが壁面へ持続的に入射するため、一定の損耗が継続することから、一定期間連続運転をすると素材が損耗しきって寿命を迎えることになる。本研究では、素材の単結晶化等によりこの持続的な損耗を極限まで低減し、ホローカソードの損耗を抜本的に低減することを目指す。

3. 研究の方法

- (1) 30A級ホローカソードの動作特性とその材料損耗特性を評価可能な試験系を整備し、動作特性等を取得する。
- (2) キセノンイオン入射エネルギーに対するホローカソード用オリフィス材料の損耗特性を計測する。この計測によって単結晶素材の損耗特性が多結晶材料に対して優位かどうかを確認する。
- (3) (2)の結果を踏まえてオリフィス材料を選定する。そして、選定された材料を適用したホローカソード実験を行い、一定時間の連続試験から損耗特性を評価する。
- (4) 無損耗あるいは極限まで低損耗化したホローカソードの実現性と課題について考察を行う。

4. 研究成果

- (1) 図2左のホローカソードの単体動作試験により、図2右の放電モードマップが得られた。単体試験ではホローカソードからの放出電子電流を評価するため、ホローカソードの下流域に陽極（アノード）を配置した。試験系は図に記されたように動作時の放電電流・放電電圧を評価する真空チャンバーと電源・計測系から構成される。作動ガスにはホールスラスト等で用いられるキセノンを利用した。ホローカソードは安定動作時にスポットモードという放電電圧の低いモードが現れるが、図2の放電マップから、安定な動作は20scm以上のキセノン流量と20から30Aあるいはそれ以上の大電流動作時に限定されることが読み

取れる。その一方、キセノン流量 10sccm 以下の低流量では放電電流・電圧が振動するブルームモードと呼ばれる不安定モードで動作し、10sccm 以下で 30A 以上の領域では低周波の大振幅振動が発生した。

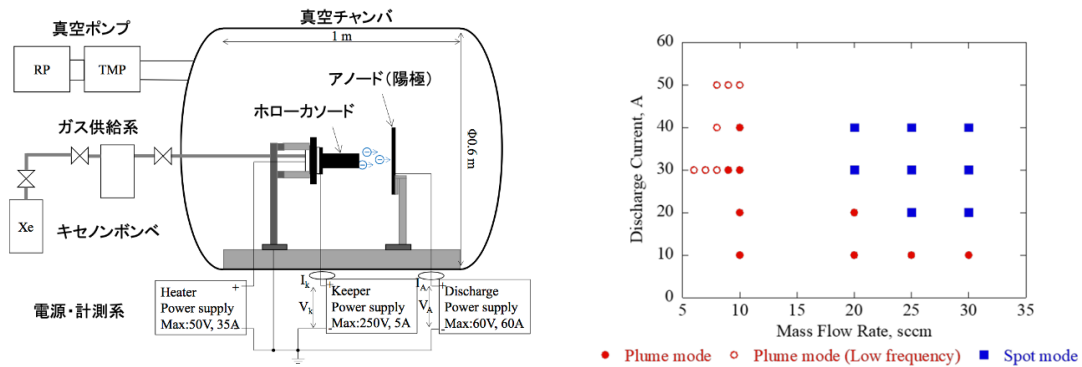


図 2 ホローカソード単体試験装置とホローカソードの動作マップ

- (2) オリフィス材料の損耗特性の評価にあたっては、キセノンプラズマ装置中にタングステンのテストピースを置き、テストピースに-10 から-40V の一定電圧を印加した状態で一定時間保持する実験を実施した。この試験期間前後にテストピースが受ける重量変化を測定することで、キセノン低エネルギーイオン入射領域における単位時間あたりの損耗量とスパッタ収量を取得した。しかし、タングステン結晶構造の違いによるスパッタ収量の有意な違いは確認できなかった。このため、多結晶タングステンをを用いた実験にて(3)以下の実験を実施した。
- (3) ホローカソードの 200 時間単体連続試験により、オリフィスの損耗率を評価した。オリフィス径を適正化することで $10\mu\text{m}/\text{hr}$ (1000 時間あたりの損耗量が 10 ミクロン) 程度に低損耗化できた。これは、ホローカソードを 1 万時間連続運転しても 0.1mm の損耗しか生じない条件であり、実質的には数万時間と電気推進には十分な寿命が確保できる見通しが得られた。
- (4) 損耗の少ないホローカソードの条件についての考察を行うため、ホローカソードから放出されるイオンの平均エネルギーを計測した。図 3 左に計測結果を示したように、放出されるイオンエネルギーはキセノンガス流量に強く依存し、流量を増やすことでイオンエネルギーを低減することができる。30V 以上のイオンエネルギー衝突でオリフィス損耗が進行すると考えると、安定なスポットモードを 30V 以下の低電圧にて実現する必要がある。ただし、放電電圧振動とこれによる高エネルギーイオンの発生があることを考えると、エネルギー 30V を超えるイオンを完全に無くするのは難しい。長寿命化を図る場合は、揺動を含めた電圧の低減を図り高エネルギーイオン量を低減する必要があることが明らかになった。

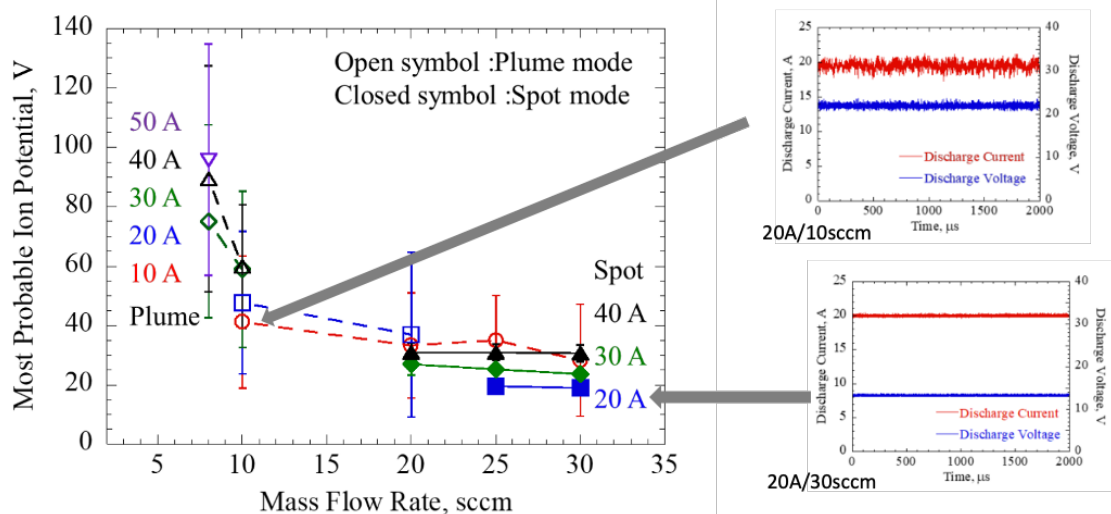


図 3 ホローカソードから放出されるイオンの平均エネルギー（左図）と代表点における放電電流と電圧の振動状況（20A/ Xe-10sccm と 20A/ Xe-30sccm の場合）

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 0件）

1. 著者名 OSHIO Yuya, KUBOTA Kenichi, WATANABE Hiroki, CHO Shinatora, OHKAWA Yasushi, FUNAKI Ikkoh	4. 巻 17
2. 論文標題 Experimental Investigation of LaB6 Hollow Cathode with Radiative Heater	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES, AEROSPACE TECHNOLOGY JAPAN	6. 最初と最後の頁 203 ~ 210
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2322/tastj.17.203	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 1件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Ikkoh Funaki
2. 発表標題 An Overview of Electric Propulsion Activities in Japan
3. 学会等名 10th Asian Joint Conference on Propulsion and Power（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shun Imai, Kenichi Kubota, Shinatora Cho, Ikkoh Funaki, Daisuke Imaguchi, Hiroki Watanabe, Yuya Oshio
2. 発表標題 Measurement and Observation on Spot-plume Mode Plasmas of LaB6 Hollow Cathode
3. 学会等名 10th Asian Joint Conference on Propulsion and Power（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ikkoh Funaki, Shinatora Cho, Tadahiko Sano, Tsutomu Fukatsu, Hiroki Watanabe, Yoshiki Matsunaga, Daisuke Goto, Yosuke Tashiro, Yuya Hirano and Taizo Shiiki
2. 発表標題 Life Test of a 6-kW-class Hall Thrusters Breadboard Model
3. 学会等名 AIAA Propulsion and Energy Forum（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 今井駿, 渡邊裕樹, 松永芳樹, 今口大輔, 窪田健一, 張科寅, 大塩裕哉, 船木一幸
2. 発表標題 LaB6ホローカソードの耐久性能向上に向けたプラズマ特性評価
3. 学会等名 2020年度宇宙輸送シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 今口大輔, 渡邊裕樹, 今井駿, 船木一幸, 山極芳樹
2. 発表標題 磁場中におけるホローカソードブルームプラズマのイオンエネルギー計測
3. 学会等名 2020年度宇宙輸送シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 船木一幸
2. 発表標題 大電力電気推進システムの研究
3. 学会等名 令和元年度航空宇宙空力シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 今井 駿, 今口 大輔, 渡邊 裕樹, 窪田 健一, 張 科寅, 大塩 裕哉, 船木 一幸
2. 発表標題 ホローカソードプラズマのイオンエネルギーおよび放電モードに関する研究
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 Yuya Oshio, Kensho Torii, Kenichi Kubota, Ikkoh Funaki, Yoshihiro Okuno
2. 発表標題 Plasma Measurement in the Plume Region of a Lanthanum Hexaboride Hollow Cathode
3. 学会等名 Joint Symposium: 32nd ISTS & 9th NSAT (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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

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