

令和 4 年 6 月 17 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02337

研究課題名(和文)大電流電子源と電気推進機とのカップリング時における作動安定化

研究課題名(英文)Stabilization of operation during coupling tests between electron source and propulsion system

研究代表者

横田 茂 (Yokota, Shigeru)

筑波大学・システム情報系・准教授

研究者番号：30545778

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙用電気推進機の電子源は、単体試験では安定作動する条件でも、推進機とのカップリング試験では安定状態が維持できない場合があることが問題であった。そこで、まずカップリング試験時の放電状態を観測し、この不安定現象が、単体試験で見られる複数の作動モードが交互にあらわれている状態であることを明らかにした。その上で、電子源内部のプラズマ状態の実験的な観測と理論的な考察から、モード変化が推進機-電子源間のプラズマの状態、すなわち、電子源の外部環境が電子源内部のプラズマに影響を与え、引き起こしていることを明らかにした。作動安定化には、電子源内部における十分な拡散による輸送が必要である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在、宇宙開発は大量物資輸送時代を迎えつつある。従って、輸送コスト削減が重要課題であり、高い比推力(燃費の指標)を有する電気推進機(プラズマ排気型エンジン)の搭載が不可欠である。この宇宙での大量の物資輸送に使うべく、この電気推進機の大電力化が一つのトレンドとなっている。本研究対象の電子源は、その大電力電気推進機に必要なものであり、本研究成果は、推進機と電子源の噛み合わせの際の放電安定化の指針を示すものであり、将来の宇宙における物資輸送へ貢献するものであると言える。

研究成果の概要(英文)：The problem is that the electron source of an electric propulsion system for space applications sometimes fails to maintain a stable state during coupling tests with the propulsion system, even under conditions of stable operation in stand-alone tests. First, the discharge state during the coupling test was observed, and it was clarified that this unstable phenomenon was a state in which the multiple operation modes seen in the stand-alone test appeared alternately. Experimental observations and theoretical considerations of the plasma state inside the electron source revealed that the mode change is caused by the plasma state between the propulsor and the electron source, i.e., the external environment of the electron source influences the plasma inside the source. Sufficient transport by diffusion inside the electron source is necessary for operational stabilization.

研究分野：宇宙推進工学

キーワード：宇宙推進 電気推進 ホローカソード 電子源 カップリング

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、大型宇宙構造物向け物資輸送機や深宇宙への有人探査などが計画され、宇宙開発は大量物資輸送時代を迎えつつある。従って、輸送コスト削減が重要課題であり、高い比推力(燃費の指標)を有する電気推進機の搭載が不可欠となってきた。

この電気推進とは、推進剤をプラズマ化し、電磁的に加速・排出することで推力を得るもので、化学反応(燃焼反応)を利用した化学推進に比べて比推力が1桁以上も大きく、大幅な推進剤の低減、すなわち打上げコストの大幅削減が可能である。近年では、宇宙での大量の物資輸送に使うべく、この電気推進機の大電力化が一つのトレンドとなっている。

一般に、この電機推進機では、推進剤に電子を衝突させてプラズマ化するため、電子源が必要である。電気推進機の大出力化が進む昨今、この電子源の大電流化も進められ、申請者らの他にも、NASA や、JAXA など研究開発が進められている。この電子源は、

- (A) ブルームモード：放電が不安定で電子源にダメージを与えてしまうモード。
- (B) スポットモード：小電流時に放電が安定なモード。
- (C) ジェットモード：大電流電子源でのみ観測される安定な作動モード。

の3つの作動モードがある。

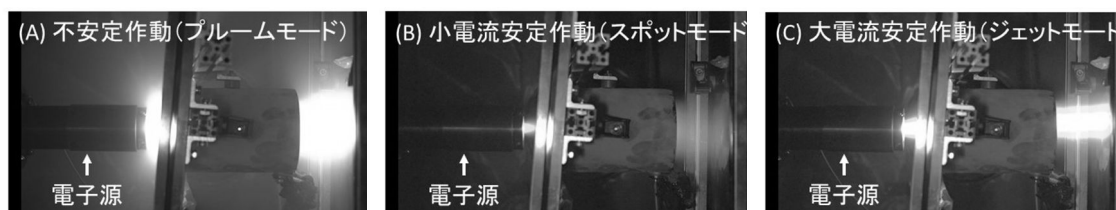


図1 電子源の3つの作動モード)

現在の電気推進は、推進機側からの要求電流値が大きいいため、モード(B)で作動させているが、電気推進機の大電力化が進むと、更に安定なモード(C)で駆動することが期待されている。

この3つのモードについて、我々はこれまでに、作動モードの安定・不安定は、電子源の電子供給可能量に対して外部から電子を引き出そうとする量のバランスによって決まることを明らかにした。すなわち、電子源からの供給可能量以上に無理に電子を引き出そうとすると放電が不安定なモード(A)になり、十分に供給されていれば安定な作動モードとなり、小電流放出時はモード(B)、大電流放出時はモード(C)になることがわかった。

一方で、電子源単体の試験では大電流放出時に最も安定な作動をするモード(C)だが、このモードで電気推進機を駆動させようとしたところ、放電が安定しなかった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、電子源を電気推進機とカップリング作動させた際の放電不安定性の原因を探ること、および、その要因の除去法を検討することである。前述の通り、モード(C)で作動を試みても、推進機とのカップリング時は放電が安定しない。過去の研究から、モードごとの違いは、電子源からの電子供給可能量に対し、外部(推進機側)からの電子の要求量のバランスの不整合に起因すると考えられる。したがって、本研究の目的は、このバランスを崩す原因を探ることである。

3. 研究の方法

次章の通り、まずは不安定作動の現象を理解すべく、観測を行うことにした。次に、観測した不安定現象を引き起こすきっかけとなる原因を探るために、電子源内部のプラズマパラメータの計測を行い、理論解析と合わせて現象の説明を試みた。最後に、その理論的に得られた条件が、電子源外部の環境によって引き起こされうるものであることを実験的に示すことにした。

4. 研究成果

4.1 不安定作動の観測

まず、不安定作動の現象自体の理解のため、作動時の電子源 - 推進機間のプラズマを観測した。その結果、図 2 に示す通り、(A)~(C)の3つのモードが交互に高速で変化している様子が観測された。前述の通り、過去の研究から、モードごとの違いは、電子源からの電子供給可能量に対し、外部（推進機側）からの電子の要求量のバランスの不整合に起因することがわかっているため、このモードの遷移は、推進機とカップリングすることで電子源からの電子供給量と、外部（推進機側）の必要とする電子量のバランスが崩れたり戻ったりしているという仮説が正しかったことがわかった。

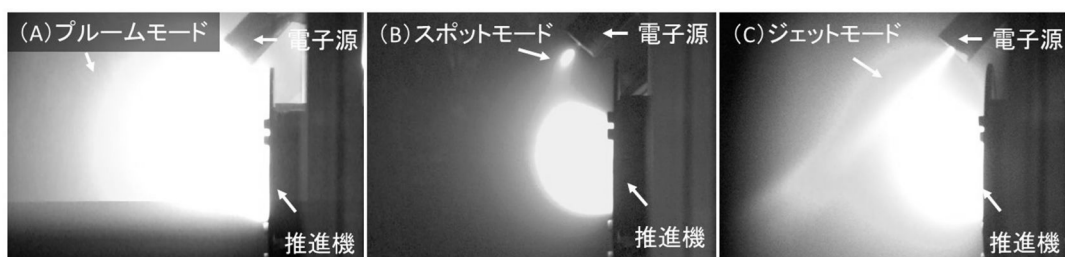


図 2 電子源と推進機のカップリング作動。3つのモードが高速で切り替わり安定しない。

4.2 モード遷移の原因となる現象追求

このモード遷移の原因となる現象が何かを調べるために、各モードにおいて、電子源内部の電子数密度分布をプローブ法によって計測した。その結果、図 3 に示す通り、安定作動時には上流から下流にかけて指数関数的に増加する分布になるが、不安定作動時には内部でピークを持つことがわかった。

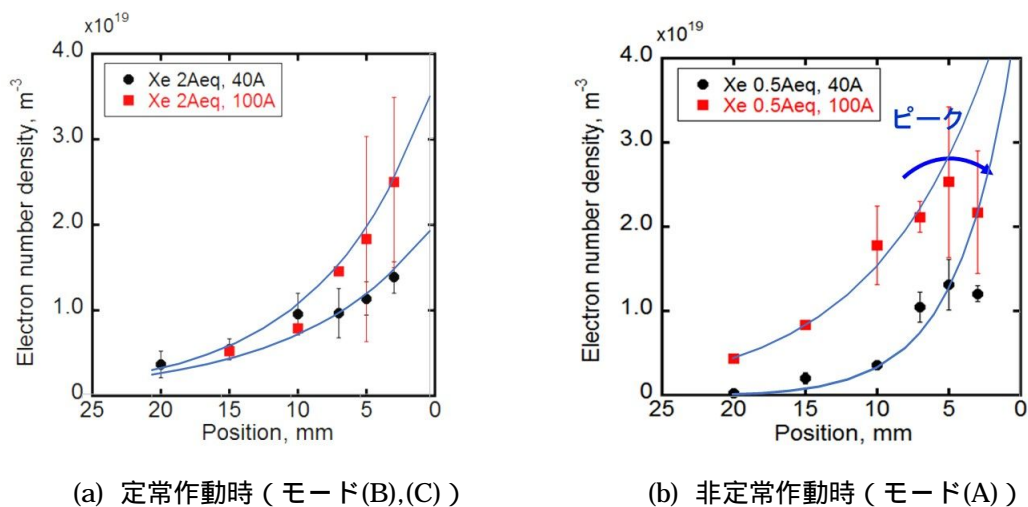


図 3 電子源内部の電子数密度分布

過去の研究より、理論的には、電子の運動方程式および連続の式から、定常かつ電場を無視す

ると、電離による電子が拡散によって輸送されることを意味する拡散方程式が得られ、これを解析的に解くと軸方向電子数密度分布は指数関数的になることが明らかになっており、モード(B)、(C)と一致する。

したがって、反対に、その分布から外れるモード(A)は、電場が無視できない状態であることを示唆しており、拡散だけで電子を引き出せず、電場による移動度が電子の引き出しに必要であることがわかる。不安定作動時は、このモード(A)～(C)が遷移しているため、電子源外部の状態が変わることによって、電子源内部に電場を作り出す形で影響を及ぼして無理やり電子を引き出そうとしていることが原因となっていることが示唆された。

4.3 外部環境の変化が電子源内部に与える影響

4.2 において、外部環境が電子源内部に影響を与えることを実証するため、陽極位置を変化させて電子源の単体試験を行い、その際の電子源内部の電位分布をエミッシブプローブを用いて計測した。

その結果、図4に示す通り、外部の陽極位置が変わることで、内部の電位分布が変わることが証明された。

以上のことから、電子源内部にて生成された電子が、中性粒子との衝突による拡散によって外部まで必要量を供給できる外的環境が整っている場合は安定に作動するが、その条件を満たさない場合は、定常に至ろうとしても、内部まで電場が入り込み、モードチェンジが起きることが明らかになった。

このことから、放電安定化のためには、生成した電子を安定的に十分に外部に供給できるようにするには、電子源内部において拡散による電子の輸送が支配的な状況を作り出す工夫をすればよいという指針が得られた。

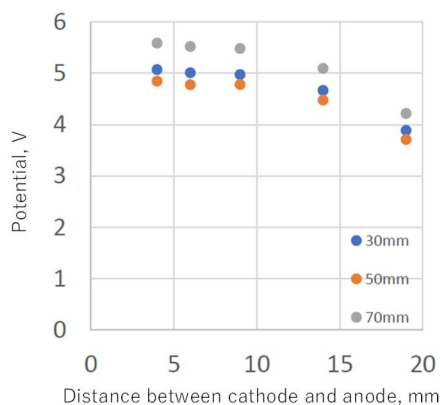


図4 電極内部の電位分布

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 横田茂	4. 巻 68
2. 論文標題 電気推進の電子源	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本航空宇宙学会誌	6. 最初と最後の頁 257
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14822/kjsass.68.8_257	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 -

1. 著者名 Kohei KOJIMA, Shigeru YOKOTA, Junko YAMASAKI, Moyuru YONAHA, Tatsuya KIMURA, Yoshihiro KAWAMATA, Masaaki YASUI	4. 巻 17
2. 論文標題 Plasma Diagnostics in High Current Hollow Cathode	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 90-95
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2322/tastj.17.90	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3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Junko Yamasaki, Kenshiro Nasu, Shigeru Yokota, Kohei Shimamura
2. 発表標題 Plasma Structure in the High Current Hollow Cathode
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 Junko Yamasaki, Takeshi Nakatani, Shigeru Yokota and Kohei Shimamura
2. 発表標題 Hollow Cathode Position Effect on Hall Thruster Performance
3. 学会等名 The 11st International Workshop on Plasma Application and Hybrid Functionally Material (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kenshiro Nasu, Junko Yamasaki, Shigeru Yokota, Kohei Shimamura
2. 発表標題 Plasma Structure In and Out A Hollow Cathode
3. 学会等名 The 32nd International Symposium on Space Technology and Science (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
研究分担者	嶋村 耕平 (Shimamura Kohei) (90736183)	筑波大学・システム情報系・助教 (12102)	

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
---------	---------