

100A 級ヒーターレスホローカソードの内部診断

Plasma diagnostics in a 100A-class Heater-less Hollow Cathode

○与那覇 萌・山崎 純子・横田 茂(筑波大学)
小島 康平・川又 善博・木村 達也・安井 正明(三菱重工)

○Moyuru Yonaha・Junko Yamasaki・Shigeru Yokota (University of Tsukuba)
Kohei Kojima・Yoshihiro Kawamata・Tatsuya Kimura・Masaaki Yasui (MHI)

Abstract

High current hollow cathode for recent high power electric propulsion system is required, therefore, we develop a 100A-class heater-less hollow cathode. The results of the operation test show the operation stability highly depends on the propellant mass flow rate. In order to find out the cause of the unstable operation, we measured axial electron number density distribution in the hollow cathode by a single probe. As a result, the electron number density becomes larger toward downstream side in the stable operation, while we found a peak of electron number density at several millimeter upstream from the cathode orifice in the unstable operation.

1. はじめに

近年、静止衛星や大型宇宙構造物の物資輸送機に電気推進機の搭載計画が進んでいる。その候補として、ホローカソードを陰極として用いる MPD スラスタ¹⁾や RAIJIN Project²⁾などの大電力ホールスラスタなどが想定されている。電気推進機によってミッションを行う場合、化学推進に比べ推力が小さいことからミッション達成のために長期間を要する。そのため、ミッション期間短縮のため電気推進機の大電力化が必要となる。また、それに伴い、ホローカソードの大電流化が求められる。

ホローカソードの大電流化に関しては様々な研究が行われており、NASA JPL では Goebel らによってホローカソード内部診断やプラズマのモデル化、300A の電子電流の引き引き出しに成功している^{3,4)}。日本国内においても横田らにより 100A 級ホローカソードの開発が行われている⁵⁾。

ホローカソードの作動特性についても研究が行われており、推進剤流量や放電電流などの動作パラメータによってプルーム形状が変化することが知られている⁶⁾。特に、低流量・高電流の場合はプルームに広がりが見られ、高流量・高電流の場合プルームは広がりを持たないことが分かっている。しかし、このような作動モードについて詳細な現象は明らかになっていない。そのため、今後予想される MPD スラスタやホールスラスタなど推進機とのカップリングの際に、それぞれどのような動作モードが最適であるのか把握する必要があることや、推進剤使用量の少流量化などの最適化が課題としてあげられる。そこで本研究では、異なる作動状態におけるホローカソード内部のプラズマ状態を明らかにし、設計の検証および最適化への指針を得ることを目的とする。本稿で

は、100A 級ヒーターレスホローカソードの内部プラズマ診断を行った結果について報告する。

2. 放電実験

2.1 100A 級ヒーターレスホローカソード 本研究で使用した 100A 級ヒーターレスホローカソードについてその構造を図 1 に示す。

本ホローカソードは、電子放出材料であるインサートには LaB₆ を用い、インサート長は 25mm である。またオリフィス径は 3mm である。

ホローカソードを作動するにあたって、キーパーへ 600V 印加し、キーパー - カソードチューブ間で放電を起こすことでプラズマの着火を行っている。このとき、インサートは発生したプラズマからの入熱によって発熱し、熱電子放出する。インサートより放出された熱電子は推進剤との電離衝突によってホローカソード内部のプラズマを維持する。また、発生したプラズマはキーパーとの電位差によってホローカソード外部へと引き出される。その後、カソード - アノードアノード間で放電させる。

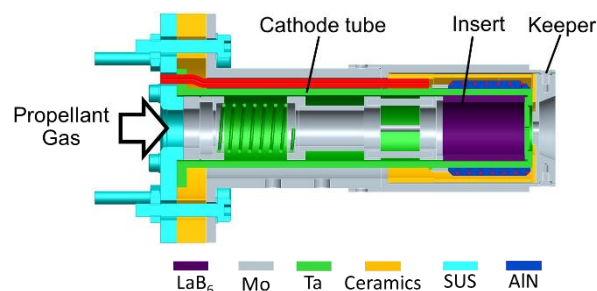


図 1 ホローカソード概略図

2.2 実験装置 ホローカソード放電実験時の実験系概略図を図2に示す。放電実験は直径1m、長さ1mの真空チャンバ内で行った。

ホローカソード作動時、ロータリーポンプ(排気量1500 L/min)、ターボ分子ポンプ(排気量3000 L/s)をそれぞれ1台ずつ使用し真空引きを行っており、その際、真空度は 2.3×10^{-4} Pa程度であった。

ホローカソードは推進剤としてXe, Arを用いておりマスフローコントローラーを用いて流量を調節し、ホローカソード上流より流入させた。

カソードからのプラズマは、出口付近で滞留しないよう円筒型のアノードを用いて下流へと流すようにしている。さらにブルーームの伸びを考慮し、平板型のアノードを背後に設置し測定を行った。また、このときカソード-アノード間距離は30mmとした。

内部プラズマの測定は、シングルプローブを用いて行っており、測定点の移動はプローブをアクチュエータに取り付けることで外部より行った。その際にプローブは、プラズマ密度の低い上流部で待機させ、50mm/sで測定位置へと移動し待機位置へ戻ることによって、測定時のプラズマからの入熱による焼損防ぎ機構とした。測定時に用いたプローブは、 $\phi 2.5$ mmのセラミック管へ $\phi 1.2$ mmのタングステンワイヤを挿入することで作製した。

電気系統は電源としてキーパー電源、アノード電源、プローブ測定用電源を用いている。キーパー電源は前節でも述べたが、プラズマ着火のため600V印加している。

実験条件を表1に示す。

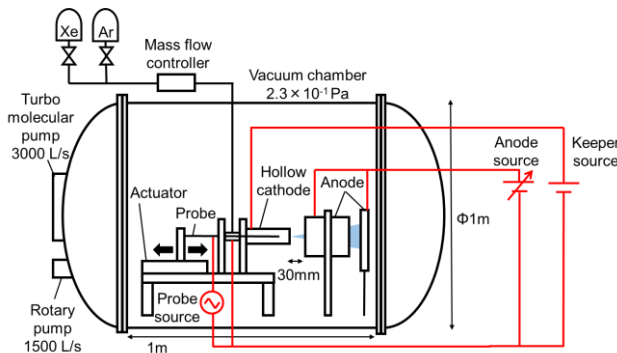


図2 実験系

表1 実験条件

Gas Species	Mass Flow Rate [Aeq.]	Discharge Current [A]
Xe	0.5, 1.0, 2.0	40, 60, 80, 100
Ar	2.0	40, 50

3. 実験結果

3.1 定常動作時のブルーーム形状 本実験でみられたパラメータ変化によるブルーーム形状の違いをまとめたものを図3に示す。左列より、推進剤流量0.5Aeq, 1.0Aeq, 2.0Aeqと

なっており、上段より放電電流40A, 60A, 80A, 100Aとパラメータを振った場合のブルーームの様子となっている。

推進剤流量が低流量(0.5Aeq)の場合、ブルーームは広がりが見られるが、推進剤流量を高流量としていくにつれブルーームは広がりを持たなくなり、直線的なブルーーム形状となるのが確認された。また、放電電流に着目すると40Aから電流値を上昇させていくにつれブルーームの発光が強まっていくことも確認された。

次に、特にブルーームの形状について違いがみられた放電電流100Aの場合について流量0.5Aeq, 1.0Aeqの放電電圧の時間履歴を図4に示す。ブルーームが広がらず直線的になった1.0Aeqの場合、放電電圧は定常動作を確認した。一方、ブルーームに広がりが見られた0.5Aeqの場合、放電電圧に振動が見られた。このように、ブルーーム形状の違いによって放電電圧に違いが見られることが分かった。

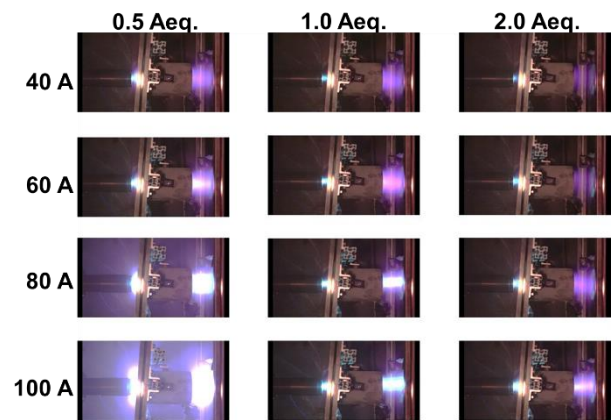


図3 作動パラメータによるブルーーム形状の違い

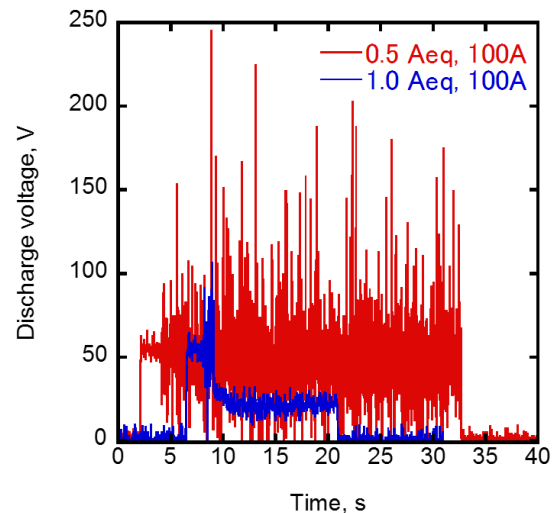


図4 放電電流の時間履歴 ($I_d = 100$ A, Xe, $q = 0.5, 1.0$ Aeq.)

3.2 内部プラズマ診断

3.2.1 放電電流による電子数密度の変化 放電電流を変えた場合の電子数密度変化の結果を図5に示す。このときガス種はXe, 推進剤流量は1.0Aeqで固定している。

この結果、オリフィス出口に向かい下流に行くほど電子数

密度は上昇することが分かった。これは NASA の先行研究におけるプラズマモデルと同様の結果となっている。また、放電電流の増加に伴って電子数密度も増加し 40A で最も低く、100A で最も高い値が得られた。

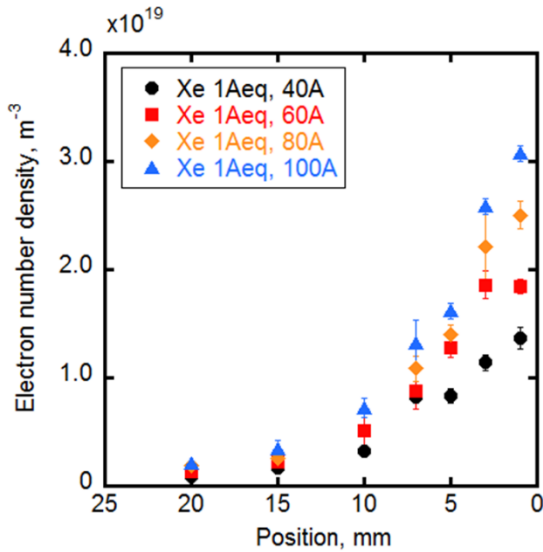
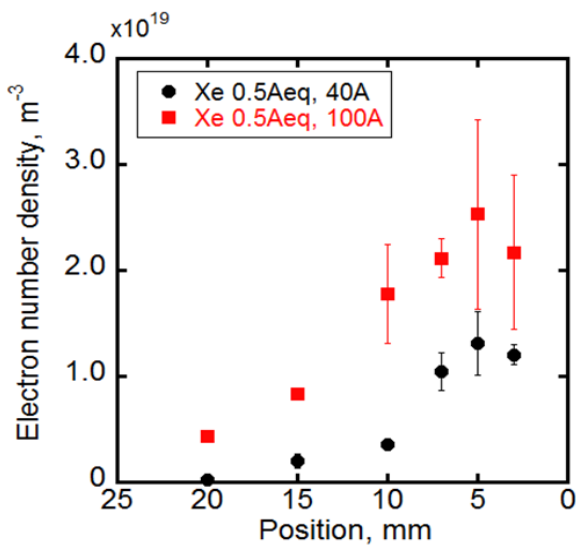


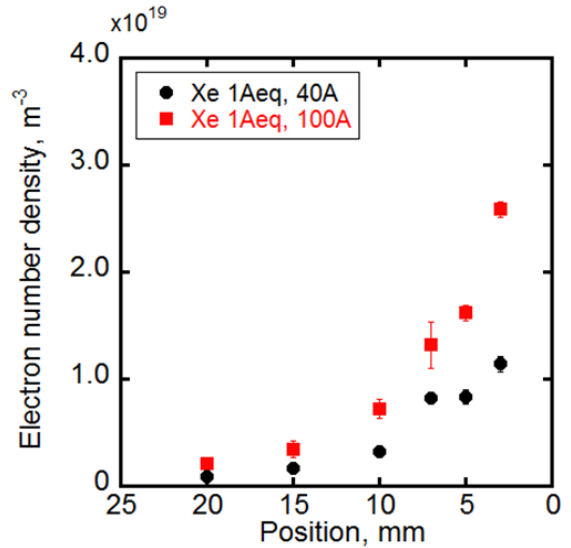
図5 ホローカソード内部中心軸上軸方向電子数密度分布 (Xe, $q=1.0 \text{ Aeq}$, $I_d=40-100 \text{ A}$)

3.2.2 推進剤流量による電子数密度の変化 推進剤流量を変えた場合の電子数密度変化の結果を図 6(a)-(c)に示す。このときガス種は Xe である。

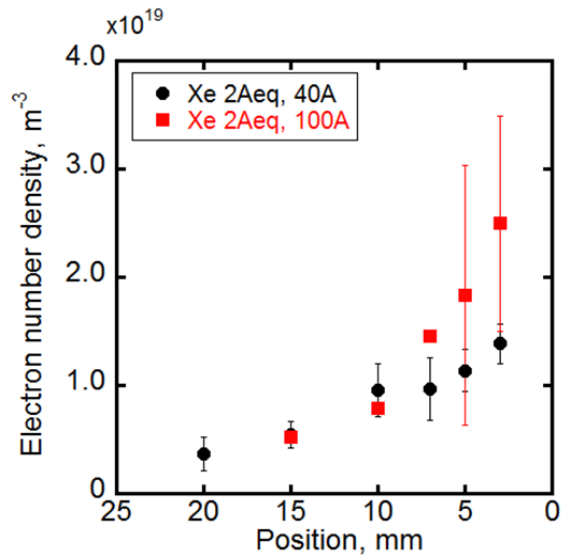
前章でも述べた通り、プルームの広がりが見られた低流量 (0.5Aeq) の場合は、オリフィスより上流 5mm 付近に電子数密度のピークを持つことが確認された。一方、プルームに広がりのみならず直線的なプルーム形状となった 1.0, 2.0 Aeq の場合は、内部にピークは確認されずオリフィス付近で密度のピークを持つことが分かった。また、中心軸上においてどの流量条件の場合でも同程度の数密度を得られた。



(a) $q = 0.5 \text{ Aeq}$.



(b) $q = 1.0 \text{ Aeq}$.



(c) $q = 2.0 \text{ Aeq}$.

図6 ホローカソード内部中心軸上軸方向電子数密度分布 (Xe, $I_d=40, 100 \text{ A}$)

3.2.3 アルゴン作動時の電子数密度の変化 推進剤を Ar とした場合の電子数密度変化を図 7 に示す。

推進剤を Ar とした場合、推進剤流量を 2.0Aeq とした場合でもホローカソード内部に密度のピークが見られた。このことから、同条件下の場合でも、推進剤の違いによって内部のプラズマ構造が変化することが分かった。

また、Xe, 2Aeq と比較すると、電子数密度に大きな違いはみられないことを確認した。

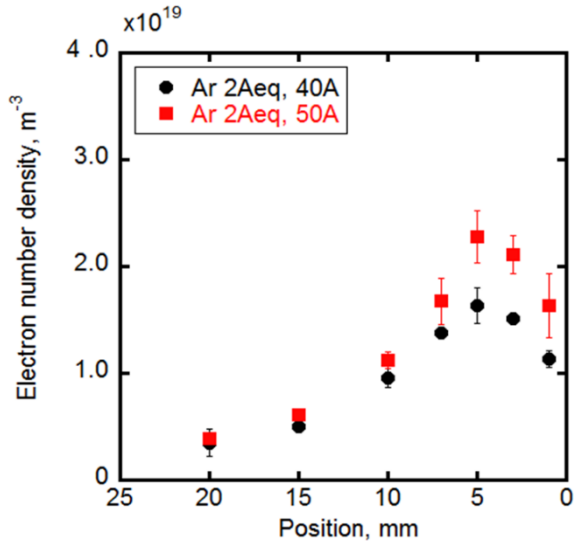


図7 ホローカソード内部中心軸上軸方向電子数密度分布 (Ar, $q = 2 A_{eq}$, $I_d = 40, 50 A$)

3. まとめ

本研究では、大電流ホローカソードの最適な設計条件を模索すべく、作動状態がどのように決まるのかを知るため、ホローカソード内のプラズマ診断を行った。その結果、次のような結果が得られた。

1. ホローカソード内部の電子数密度はどの作動パラメータにおいても基本的に出口に向かい指数関数的に上昇することが分かった。
2. 推進剤流量が低流量の場合はオリフィス付近にて電子数密度が減少し、内部に密度のピークを持つことが分かった。また、その際、ブルームが広がりを持つことを確認した。
3. Ar を推進剤として用いた場合は、推進剤流量を $2 A_{eq}$ とした場合でも内部に密度のピークが見られた。

参考文献

- 1) 市原大輔, 原田翔太, 片岡久志, 横田茂, 佐宗章宏, “矩形断面形状を有する定常・外部磁場印加 MPD スラスタの作動特性,” 日本航空宇宙学会誌論文集, Vol.63, No.2, pp.33-44 (2016).
- 2) N. Yamamoto, K. Takase, Y. Hirano, K. Komurasaki, A. Kakami, R. Tsukizaki, S. Hosoda, H. Kuninaka and S. Yokota, “Thrust Performance in a 5 kW Class Anode Layer Type Hall Thruster,” Transaction of JSASS Aerospace Technology Japan, Vol. 14, No. ists30, Pb183-Pb187 (2016).
- 3) Goebel. D. M, Katz. I, “Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters,” Wiley, pp.243-314.
- 4) Goebel. D. M, Chu. E, “High Current Lanthanum Hexaboride Hollow cathode for 20-to-100 kW Class Hall Thrusters, AIAA Paper 2012-4079.
- 5) 横田茂, 片岡久志, 鶴生知輝, 鄭裁勲, 佐宗章弘, 小島康平, 木村竜也, “大電流ホローカソードの開発,” STEP-2013-013.
- 6) 大塩裕哉, 窪田健一, 渡邊裕樹, 張科寅, 大川恭志, 船木一幸, “LaB6 を使用した大電流ホローカソードのオリフィス径が性能に与える影響の実験的調査,” JSASS-2016-4648.