

ホローカソード数値モデルの検討と放電実験

Study on Numerical Model and Discharge Measurement of Hollow Cathode

○窪田 健一(宇宙航空研究開発機構)・大塩 裕哉(農工大)・渡邊 裕樹(首都大)・張 科寅・
大川 恭志・船木一幸(宇宙航空研究開発機構)

○Kenichi Kubota(JAXA)・Yuya Oshio(Tokyo University of Agriculture and Technology)・Hiroki Watanabe (Tokyo Metropolitan University)・Shinatora Cho・Yasushi Ohkawa・Ikkoh Funaki (JAXA)

Abstract (概要)

Voltage-current characteristics of a high-current hollow cathode were measured in the range of 10-50 A, and numerical simulations were conducted based on the experimental results to understand the plasma characteristics. Lanthanum hexaboride was used as an emitter, and a radiative heater was installed instead of the conventional heater to improve thermal endurance. Ignition of the keeper discharge was confirmed for a heater power about 270 W, which demonstrated the feasibility of the radiative heater. The experiment showed that mode transition from plume mode to spot mode occurs between 20 A and 30 A discharge for 40 sccm, and then these conditions were numerically investigated with the hybrid-PIC simulation. Comparisons of the keeper's floating potential between the measured and simulated results suggest that the degree of ion acoustic turbulence for the spot mode is weaker than that for the plume mode.

記号の説明

- C: 熱速度
- L_{em} : 電子放出材(インサート)長さ
- r: 半径方向座標
- u: 速度
- z: 軸方向座標
- α : IAT(ion acoustic turbulence)モデル係数
- v: 衝突周波数
- ω : 振動数

1. はじめに

全電化衛星の推進系としてホールスラスタが有力視されており、各国がその開発にしのぎを削っている¹⁻⁴⁾。日本においても国産ホールスラスタ開発を目指し、JAXA/IHI/IHIエアロスペースにおいて研究開発が進められている⁵⁾。

全電化衛星は軌道制御のみならず軌道遷移も電気推進により達成することでペイロード比の飛躍的向上を図るものであるが、放射線の影響による故障リスクが高い軌道遷移フェーズを可能な限り短期間で終えるためには高い推力電力比を達成する必要がある。そのためには比較的高い流量をスラスタヘッドに流す必要があるため、結果的に数十 A の大電流放電を維持しなければならない。ホールスラスタは中和及び放電維持を担う電子放出源(カソード)を要するが、全電化衛星実現のためにはヘッドのみならずカソードも大電流に対応させる必要がある。要求される電流値は

ミッションにより異なるが、例えば 2 ton クラスの衛星を 6 kW の電力で 3 ヶ月以内に低軌道から静止軌道に遷移させるためには 30 A 以上の放電電流が必要となる。

日本では、JAXA において開発された 150 mN 級イオンエンジンの放電用カソードとして 20 A 級のものが存在し⁶⁾、その耐久試験(15 A で 45,000 時間)も実施されているが⁷⁾、それ以上の電流で耐久性が確認されているカソードは存在せず、その開発が喫緊の課題となっている⁸⁾。そこで本研究では 30 A 以上の電流レベルにおけるカソードの基礎特性を把握するために実験室モデルを製作した。電子放出材(通称インサート)としては上述した JAXA の既存カソードで用いられる BaO-W ではなく、水や酸素などの不純物に対する耐性がより高いことで知られる LaB₆ を採用した⁹⁾。本カソードでは熱応力によるヒーター故障のリスクを除去するために放射加熱ヒーターを導入しており、その動作実証も兼ねて放電試験を行い、電流電圧特性を取得した。また、カソード内外のプラズマに関する知見を得るために開発を進める数値解析コードを用いて、実験で取得した条件下での解析も実施した。代表的な放電条件下での電子密度、ポテンシャル構造を調査し、実験を説明し得るモデルに関する考察に基づき放電場の特性を議論する。

2. 放電実験

2.1 放射加熱式ホローカソード 実験室モデルとして製作したホローカソードの概略図を図 1 に示す。インサートとして用いた LaB₆ は高温で高融点の金属との反応性が

高いため、本モデルではカソードチューブやスリーブには化学的に安定なカーボンを使用した。インサート半径及びインサート長さはJPLの1.5 cm級カソードに合わせ、それぞれ6.3 mm, 25 mmとし¹⁰⁾、カソードチューブのオリフィス径は4 mmとした。ヒーターは上述の通り放射加熱式となっており、カソードチューブ側面とは非接触となるように上流側で支持している。ヒーター周囲に配置されたタンタル薄膜のヒートシールドは、ヒーターからの放射熱を閉じ込める役割を果たす。

インサートからの熱電子電流の特性は電子放出面温度に強く依存するため、カソード内部の温度分布は極めて重要なパラメータである。本モデルではインサート上流部位置においてキーパー側面に熱電対挿入孔を設け、カソードチューブ表面温度を計測できるようにした。この点の温度はインサート温度そのものとは異なるものの、熱解析でカソード内部の温度分布を推測する際に妥当性を確認するための有用な情報として活用できる。

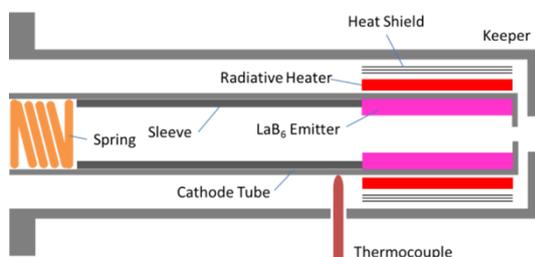


図1 放射加熱式ホローカソードの概略図

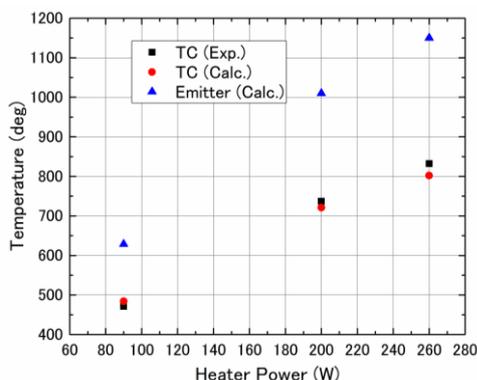


図2 ヒーター電力と温度の関係 (TCは熱電対による温度測定点を示す)

2.2 真空装置 本実験ではJAXA宇宙科学研究所の直径0.6 m, 長さ1 mの真空チャンバを用いた。本装置にはロータリーポンプ(1500 l/min), ターボ分子ポンプ(4300 l/s)それぞれ2基が設置されている。装置内部にはカソード及びバイオンブルームを模擬したリングアノード(内径50 mm, 外径200 mm)をキーパー端面から37 mm下流に設置した。

2.3 ヒーター加熱とキーパー着火 放電試験に先立ち、ヒーター加熱試験を実施した。ヒーター投入電力と熱電対

による温度測定結果を図2に示す。加熱試験ではヒーター電力90 W, 200 W, 260 Wのそれぞれにおいて定常状態における温度計測を実施した。温度計測点では260 Wの熱入力に対し840度程度となったが、その際のインサート温度は実験からは予測できないため、3次元熱解析(Femtet, Murata Software)により内部温度分布を推定することとした。熱解析では上述した各電力において温度計測点の温度が実験値と同程度となるように放射率や接触熱抵抗などをチューニングした。このとき、260 Wの熱入力ではインサート温度は1150度程度であった。

実際のオペレーションではヒーター電力を270 Wまで上昇させるとキーパー放電が着火する傾向が見られた。その際、作動ガスであるキセノンの流量は13 sccmであり、キーパー電圧は50-100 Vであった(実験毎に数十V変動有)。このとき、インサート温度は約1200度程度と予想される。

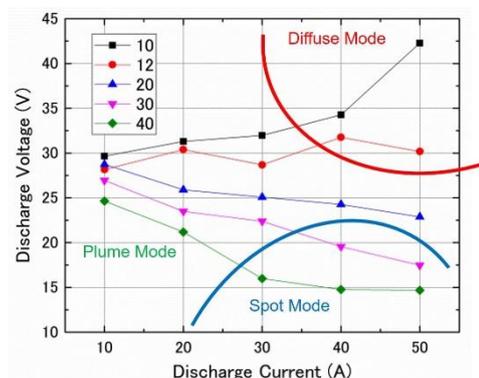


図3 電流電圧特性 (流量10-40 sccm)

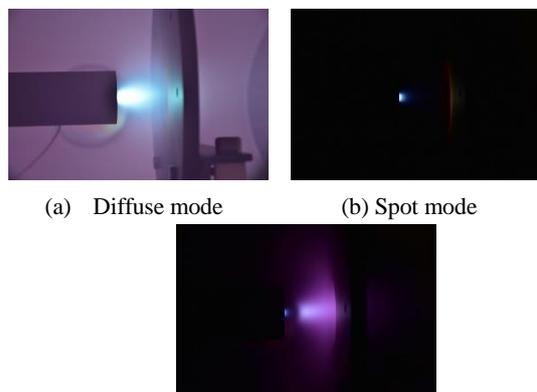


図4 放電モード

2.4 電流電圧特性とキーパー電圧 アノードとの放電における電流電圧特性を図3に示す。測定時には、キーパー放電及びヒーター加熱はオフとした。キセノン流量10-40 sccmに対し、放電電流を10-50 Aで変化させた(定電流作動)。図3からわかる通り、10 sccmでは放電電流に対し単調に放電電圧が増加するが、12 sccmでは単調性が失われる結果となった。一方、20 sccm以上に流量を上げると単調減少する特性に変化した。一連の試験条件では各種の

放電モードが観測されており、低流量・高電流ではチャンバ内全体に発光が見られる Diffuse mode、高流量・高電流ではカソード出口のみに発光が見られる Spot mode、それ以外の多くの条件下ではブルーム領域に強い発光が見られる Plume mode であった。Diffuse mode は先行研究でも確認されており¹¹⁾、カソードから引き出し得る電子電流以上の電流がアノードに流入する状況にあると考えられているが、その詳細は明らかになっていない。チャンバアノード間での放電が生じているとの仮説もあるが、本試験で放電回路をチャンバから浮遊させた条件で試験しても同様のモードが確認されたことから、チャンバアノード間での放電である可能性は低く、その現象解明は今後の課題である。Spot mode は大電流を低電圧で抽出できることから理想的な放電モードと言える。より広域な作動領域で Spot mode で作動するように設計するべきであるが、本モデルでは比較的大流量を流さなければ Spot mode は観測されなかった。これはオリフィス径に大きく依存するものと考えられ、より小径のものを使うことでオリフィス近傍の密度が増加し、Spot mode に遷移しやすい条件になるものと推察される。

放電試験中のキーパー電極の浮遊電位を図5に示す。図中には Plume mode から Spot mode への遷移が観測された 30, 40 sccm の結果のみ示している。この結果から Plume mode から Spot mode に遷移するにつれキーパー電位が 6 V 程度に漸近することが確認された。原因の詳細は今後考察する必要があるが、本データは流れ場のデータとして参照できる有益な情報であり、次節に記述する数値解析の妥当性評価に利用することとする。

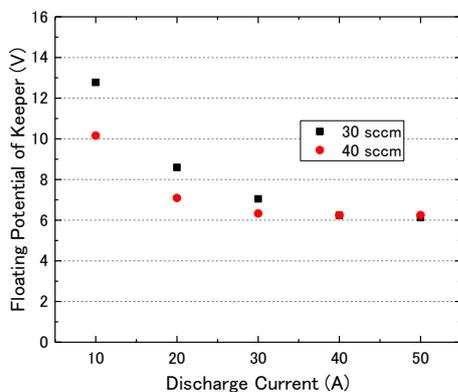


図5 キーパー浮遊電位

3. 数値解析

実験で得られた電流電圧特性に基づき、同条件での放電場を数値解析により調査する。

3.1 解析モデル 本解析では軸対称の流れ場を仮定し、重粒子（中性粒子、イオン）は粒子、電子は流体でモデル化する Hybrid-PIC(Particle In Cell)モデルを用いた¹²⁾。重粒子間の弾性衝突、荷電交換衝突は DSMC(Direct Simulation Monte Carlo)モデルによって実装している。プラズマは準中性条件を満たすとし、電子速度は drift-diffusion モデルで近似した。電子の衝突周波数を評価する際には、中性粒子、

イオンとの衝突に加え、イオン音波不安定性 (IAT, ion acoustic turbulence) に起因する異常抵抗を考慮した¹³⁾。

$$v_{IAT} = \alpha \omega_{ip} \frac{u_e}{C_i} \quad (1)$$

ここで α は経験的に与える定数、 ω_{ip} はイオンプラズマ周波数、 C_i はイオン音波速度、 u_e は電子速度を表す。

Drift-diffusion モデルと電流保存式から得られるポアソン方程式を解くことで静電ポテンシャルは与えられる。また、電子温度は定常電子エネルギー保存式を解くことで与えている。

3.2 境界条件と解析条件 バルク領域では準中性条件を課しているため、壁面におけるシース領域は無限に薄いとしてモデル化した。インサート表面の熱電子は Richardson-Dushman の公式に則って放出されるとし、インサートの軸方向温度分布は JPL によって計測された分布を仮定した¹³⁾。温度の絶対値は最大温度の値で規格化されており、分布は維持する一方で最大温度の値を可変とすることで全体の温度を調整することとした。本解析では放電電流を入力条件とし、放電電流が入力条件に近づくようにインサート最大温度を時々刻々と調整した。また、放電電圧も入力条件として与えており、これをアノード表面でのポテンシャルとした。キーパー電極は実験に合わせた浮遊条件とするために、電極に流入する電流がゼロに近づくように表面電位を調整した。壁面への電子熱流束もシースモデルにより与え、ガス流入面及び流出面での電子温度は一定値を仮定した。また、ガス流出面では仮定した背圧以下になると背圧を維持するだけの中性粒子を補充した。

表1に本解析条件を示す。ホローカソードの代表的な放電モードである Plume mode 及び Spot mode の両者が明確に表れた条件である 40 sccm を流量として選び、モード遷移が現れた 20/30 A の2条件を放電電流として仮定した。放電電圧もそれぞれの条件で実験で得られた値に固定した。また、IAT モデル係数 (α) は経験的な値として 1×10^{-3} とした。

表1 解析条件

作動ガス	キセノン
インサート	LaB ₆ (仕事関数:2.67 eV)
流量	40 sccm
放電電流	20/30 A
放電電圧	22/16 V
入口電子温度	1.0 eV
出口電子温度	4.0 eV
背圧	5.0×10^{-2} Pa
キーパー	浮遊条件
IAT モデル係数 (α)	1×10^{-3}

3.3 電子密度とポテンシャル

図6に電子密度分布とポテンシャル分布を示す。電子密度分布には電子流線、ポテンシャル分布にはイオン流線も合わせて示した。電流の増加によりカソード内部の電子密度は上昇し、30 A では $5.2 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ ほどの高密度プラズマ

が生成された。20/30 A ともに $z/L_{em}=0.4$ 付近でピーク位置をとる点は JPL によるプローブ計測結果と定性的に一致している。ブルーム領域における電子密度は中心軸上で見るとキーパー出口付近で約 $1.0/3.0 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、アノード位置付近で約 $1.0/1.2 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ であった（それぞれ 20 A/30 A の値）。なお、プローブ計測は未実施のため実験との定量的な比較は現状不可能であり、今後の課題とする。

ポテンシャル分布には 20 A/30 A で定量的な違いが明確に見て取れるが、両条件でアノード電位が異なるため注意する必要がある。とは言え、カソードからブルームにかけてポテンシャルは単調に増加し、アノード手前にてピークを持つという定性的な傾向は一致している。20 A ではピークにて約 29 V、アノード付近で 24 V であるのに対し、30 A ではそれぞれ 19 V、17V 程度であった。したがって、30 A の条件 (Spot mode) の方がブルーム中における電位分布が比較的一様であると言える。これらの妥当性はプローブ計測との比較により検証する必要があるが上述の通り現状不可能である。ただし、キーパー浮遊電位データは取得されており、その比較は可能であるため表 2 に示した。20 A の結果については実験値よりも計算結果の方が高く、一方 30 A では逆の傾向を示し、実験値との差も大きいことがわかる。

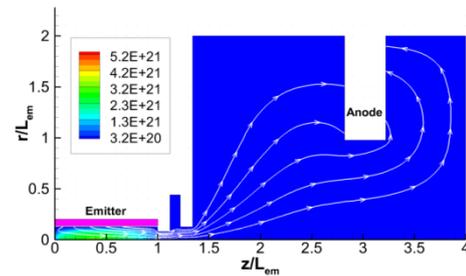
この原因を考察するにあたり、ここでは空間電位の観点から議論する。30 A の条件において、キーパー付近の空間電位が実際よりも低く見積もられているとすれば、アノードからキーパーにかけての電位勾配が過大評価されていることとなる。そこでブルーム中における電位勾配を支配する物理を調べるために、電位勾配の程度を決定づけると考えられる電子の衝突周波数を図 7 に示した。キーパー出口位置は $z/L_{em}=1.3$ 付近であることから、ブルーム中での電気抵抗を決定づける物理としては IAT が支配的であることがわかる。したがって、30 A のケースでは IAT の効果を過大に評価していた可能性があり、一方で 20 A では逆に過小評価している可能性が高い。そこで、式(1)に示す IAT モデルに掛かる係数 α を変化させることで、キーパー浮遊電位がどのように変化するか調査した。本稿では 30 A のケースにおいて $\alpha=5 \times 10^{-4}$ とした結果のみ表 2 に示す。表からわかる通り、依然として実験値との差異が存在するが、 α を小さくすることによりキーパー浮遊電位は実験値に近づく傾向を示す。したがって、本結果は Spot mode では Plume mode に比べ IAT が緩和していることを示唆する結果と言える。

4. まとめ

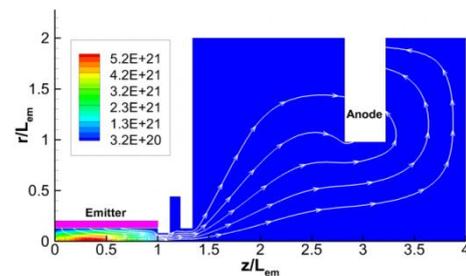
大電流ホローカソードの基礎特性把握を目的として実験室モデルを製作し、10-50 A の電流領域で電流電圧特性を取得した。本カソードでは LaB_6 をインサートとして用い、また高い耐久性が期待される放射加熱方式のヒーターを採用した。本試験では約 270 W の熱入力でキーパー放電が着火することが確認され (キセノン流量 13sccm)、また電子抽出時も目立った異常放電は観測されなかったことから、放射加熱式ホローカソードの作動が実証されたと言える。流量を 10-40 sccm の範囲で変化させた結果、30 sccm 以上

で Plume mode から Spot mode への遷移が確認された。

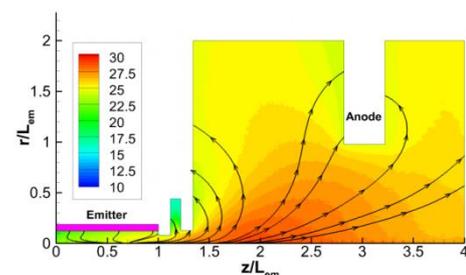
さらに、両モードでの放電場の特性を調査するために、Hybrid-PIC 解析を実施した (流量: 40 sccm, 放電電流: 20/30 A)。その結果、Plume mode (20 A) と比べ Spot mode (30 A) ではブルーム領域におけるポテンシャル分布が比較的一様となる結果を得た。妥当性検証のためにキーパー浮遊電位を実験値と比較した結果、Plume mode では過大評価、Spot mode では過小評価する傾向が見られ、その一因は IAT (ion acoustic turbulence) モデルであると推察された。Spot mode で疑似的に IAT を抑制させた結果、キーパー電位が実験値に近づくという結果が得られたことから、Spot mode では Plume mode に比べ IAT が抑制されていることが示唆された。



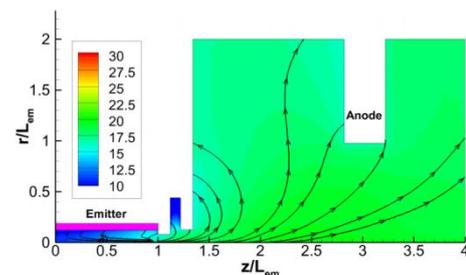
a. 電子密度 (20 A), m^{-3}



b. 電子密度 (30 A), m^{-3}



c. ポテンシャル (20 A), V



d. ポテンシャル (30 A), V

図 6 電子密度分布 (a,b) とポテンシャル (c,d) (40 sccm, $\alpha=1 \times 10^{-3}$): 白線は電子流線, 黒線はイオン流線を表す。

表 2 キーパー浮遊電位 (40 sccm)

	20 A	30 A
実験値	7.1	6.3
計算値 ($\alpha=1 \times 10^{-3}$)	9.4	2.4
計算値 ($\alpha=5 \times 10^{-4}$)	NA	3.3

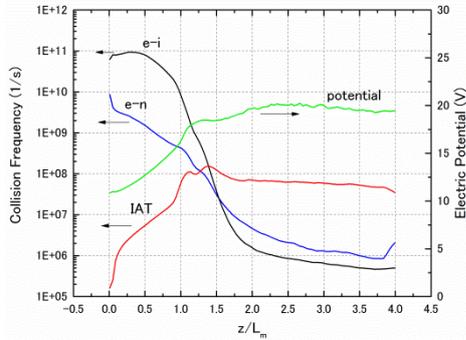


図 7 中心軸上における電子の衝突周波数
(30 A, $\alpha=1 \times 10^{-3}$)

謝辞

本研究は JSPS 科研費 (若手研究 B, 26820377) の助成を受けております。

参考文献

- 1) Duchemin, O. et al.: End-to-End Testing of the PPS@5000 Hall Thruster System With a 5-kW Power Processing Unit, Proceedings of 34th IEPC, IEPC-2015-127 (2015).
- 2) Hoskins, W. A. et al.: 30 Years of Electric Propulsion Flight Experience at Aerojet Rocketdyne, Proceedings of 33rd IEPC, IEPC-2013-439 (2013).
- 3) Delgado, J. J. et al: Qualification of the SPT-140 for use on Western Spacecraft, Proceedings of 50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, AIAA-2014-3606 (2014).
- 4) Ducci, C. et al.: Development and performance characterization of a 5 kW class Hall-Effect thruster, Proceedings of 34th IEPC, IEPC-2015-215 (2015).
- 5) 船木一幸, 他:デュアルユース・ホールスラスタの研究開発状況, 第 59 回宇宙科学技術連合講演会, 1C12 (2015).
- 6) Hayakawa, Y. et al.: Graphite Orificed Hollow Cathodes for Xenon Ion Thrusters, Proceedings of 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, AIAA-2007-5173 (2007).
- 7) Ohkawa, Y. et al.: Observation and Analysis of Graphite Hollow Cathode after 45,000-Hour Life Test, Proceedings of 33rd IEPC, IEPC-2013-364 (2013).
- 8) Yokota, S. et al.: 100 A Class Hollow Cathode, Proceedings of 34th IEPC, IEPC-2015-192 (2015).
- 9) Goebel, D. M. et al.: LaB6 Hollow Cathodes for Ion and Hall Thrusters, Proceedings of 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, AIAA-2005-4239 (2005).
- 10) Goebel, D. M. et al.: High Current Lanthanum Hexaboride Hollow Cathodes for High Power Hall Thrusters, Proceedings of 32nd IEPC, IEPC-2011-053 (2011).
- 11) Sakai, S. et al.: Discharge Modes and Characteristics of Hollow Cathode, Proceedings of 30th IEPC, IEPC-2007-215 (2007).
- 12) Kubota, K. et al.: Hybrid-PIC Simulation on Plasma Flow

of Hollow Cathode, Proceedings of 34th IEPC, IEPC-2015-15 (2015).

- 13) Mikellides, I. G. et al.: Numerical Simulations of the Partially-ionized Gas in a 100-A LaB6 Hollow Cathode, Proceedings of 33rd IEPC, IEPC-2013-142 (2013).