

大電流ホローカソードの開発

○横田茂，片岡久志，鶴生知輝，佐宗章弘（名大）
小島康平，木村竜也（三菱重工）

1. はじめに

近年，電気推進機による深宇宙探査や大型宇宙構造物構築のための物資輸送が計画されており¹⁾，電気推進機の大電力化についての研究が進められている。^{2,3)} 中でも，ホールスラスタやMPDスラスタは推力密度が高いため，有望である。このうち，ホールスラスタには放電と中和器を兼ねてホローカソードが使われ，MPDについても，陰極の損耗を防ぐために近年ではホローカソードを用いる研究がなされている。いずれの場合においても，推進機の大出力化とともに，ホローカソード自体も大電子電流放出可能である必要がある。

大電流ホローカソードについては，例えばNASAのJet Propulsion Laboratoryにおいて開発が進められているホローカソードがよく知られている⁴⁾。このホローカソードは電子放出材にLaB₆を用い，カソードボディと，キーパーの双方にグラファイトを用いてプラズマによる損耗の低減を狙った構造となっており，例えば2011年時点の報告では100Aの電子電流を安定に引き出しており⁶⁾，イオンエンジンおよびホールスラスタとのカップリング動作試験も行なわれている。

しかしながら，日本においてはまだ大電流の引き出しに成功したとの報告はなされておらず，開発が急務である。そこで，本研究では，100Aの電流が引き出し可能なホローカソードの開発を行ったので，それについて報告する。

2. ホローカソード

一般的なホローカソードについて，基本構造(図1)と特徴を以下にまとめる。

まず，構成要素としては，大きく3つあり，電子放出部(カソード部)，ヒーター，キーパーである。電子放出部は，その名の通り，電子放出を担う部分である。大電流を取るために，主に熱電子放出による電子放出機構を採用している。ヒーターはその熱電子放出を促す為に電子放出部を加熱するためのものである。キーパーはその電子を外に放出するため，電子放出部に比べて正の電圧が印加されている部分である。

ホローカソードにおいては，この電子放出部が中空(円管)となっており，その中からプラズマ維持用のガスを流す。このため，ホローカソード内部の電子は，このガスと衝突して電離させる等するため，その電子温度は，推進機としての主放

電のプラズマの電子温度よりも低く抑えられる。従って，電子放出材表面に形成されるシーツ電圧が低く，電子放出材へ衝突するイオンのエネルギーが低く抑えられる。これがホローカソードがフィラメントカソードやMPDの棒状カソードよりも長寿命である所以である。

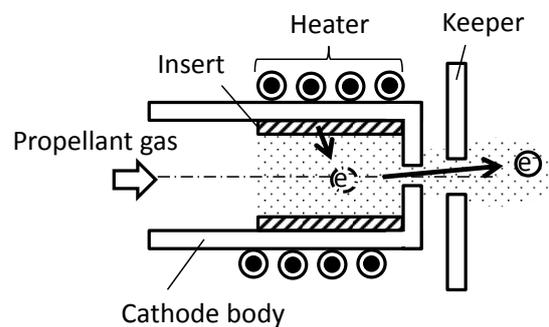


図1 ホローカソード概略図

3. 設計指針

3.1 電子放出部材料選定

物質からの電子放出率は，一般的にRichardson-Dushmanの式で表される。

$$j = AT^2 \exp\left[-\frac{\phi}{kT}\right] \quad (1)$$

ここで， A はリチャードソン係数， T は温度， ϕ は仕事関数， k はボルツマン定数である。この式において物質固有の値は ϕ だけであり，従って，電子

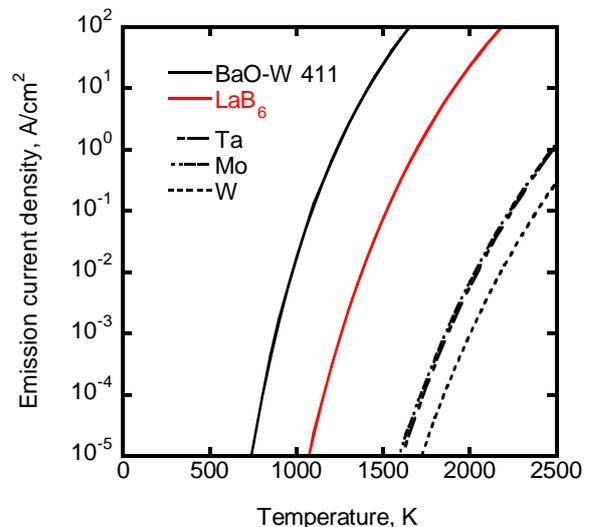


図2 電子放出材料の温度に対する電子電流密度

放出部の材料としては、 ϕ のなるべく小さい物が望ましい。図2に示すのは、仕事関数の低い代表的な物質について、その温度に対する放出される電子電流密度を表したものである。物性値については参考文献(6, 7)を参考にした。BaOをタングステンに含浸させたBaO-W411が、低温で放出電流密度が最も高く、次にLaB₆が高い。しかしながら、BaOは酸素雰囲気中の劣化が大きいことが知られており⁸⁾、一方でLaB₆は酸素雰囲気中の劣化は報告された例は、著者らの知る限りはない。従って、本研究では、取り扱い易く放出電流密度が高いLaB₆を電子放出材料として用いることとした。

3.2 電子放出部形状

前項より、材質をLaB₆と決定した。作動温度を決めることで放出可能な電子電流密度が求まる。大まかな形状と、その他の材料の耐熱性を考慮し、電子放出部材温度を1900 K、放出電子電流密度 $j=10 \text{ A/cm}^2$ を作動点として設定した。目標引き出し電流を $J=100 \text{ A}$ と設定しているため、電子放出部材の内径 R と長さ L を用いて、

$$J = 2\pi RLj \quad (2)$$

と表される。

次に、表面積 $2\pi RL$ のうち、 R と L をどのように配分するかを電子放出部形状は内部のプラズマの簡易的な解析により決定した。以下に用いた解析モデルの概要を述べる。図3に解析部分の概略図を示す。まず、基礎式は、電子の連続の式と運動方程式である。

$$mn \frac{dv}{dt} = qn\mathbf{E} - \nabla \cdot \mathbf{p} - mnv(\mathbf{v} - \mathbf{v}_0) \quad (3)$$

$$\frac{dn}{dt} + \nabla \Gamma = \dot{n} \quad (4)$$

ここで m 、 n 、 q 、 \mathbf{E} 、 \mathbf{p} 、 v 、 \mathbf{v} 、 \mathbf{v}_0 、 Γ および \dot{n} は、それぞれ電子の質量、電子の数密度、電気素量、電場、電子圧力、電子-中性粒子間衝突周波数、電子の速度、中性粒子の速度、電子流速、および電離による電子の生成レートである。運動方程式(3)について、ホローカソード内部のプラズマは定常、温度がほぼ一様、電子の速度は中性粒子速度に比べてはるかに大きい、電場は無視できる、という仮定すると、電場のない電子の拡散方程式

$$\Gamma = -D\nabla n \quad (5)$$

となる。 D は拡散係数である。これを定常状態を仮定した(4)式に代入し、

$$D\nabla^2 n = n_a n \sigma_i \bar{v}_e \quad (6)$$

を得る。これは、ある場所における電子の数密度は、衝突拡散によって周囲に流入流出する分と電離における生成量によって決まる、という式である。これを円柱座標系で境界条件 $n(R, z)=0$ のもとで解くと、電子数密度は

$$n(r, z) = n(0, 0) J_0 \left(\frac{\lambda_{01}}{R} r \right) e^{\alpha |z|} \quad (7)$$

となる。ここで、 J_0 は0次の第一種 Bessel 関数、 $\lambda_{01}=0.2405$ である。また、 α は電子温度の関数であ

る。この式から、プラズマの密度はホローカソード内部で上流(図3の $-z$ 方向)に行くに従い、指数関数で減少する。従って、 L を長くしても、上流ではほとんどプラズマの生成に関係しないことがわかる。本研究では、中性粒子密度と電子温度の値を仮定して α の値を算出し、それを基に十分な長さの L の基準を決め、それに対応する R を求めて形状を決定した。

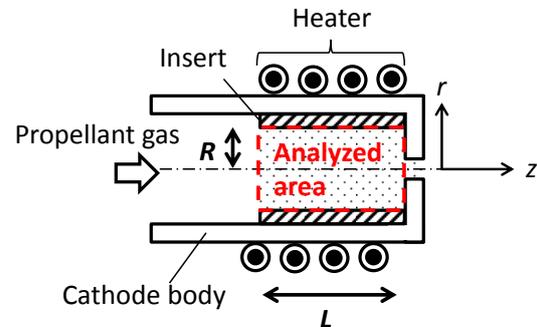


図3 ホローカソード解析領域

3.3 熱設計

熱電子放出部(LaB₆)から熱電子を放出するためには、熱電子放出部を加熱する必要がある。一般的にはシースヒーターと呼ばれるヒーター線が外部と絶縁されているヒーターが用いられることが多い。しかしながら、LaB₆を2000 K程度まで加熱する必要があり、国内で商業的に入手可能な2000 K程度加熱可能なヒーターは存在しない。そこで、今回はカソードボディの回りに絶縁管を取り付け、その絶縁管にヒーター線を巻く構造とした。また、更にその外周を絶縁管でカバーし、キーパー電位との絶縁をとった。

この大まかな構造を決定した後、簡易的な熱設計を行い、ヒーター線の長さ、各 부품の厚み等を決定した。図4に簡易熱解析モデルの概略図を示す。電子放出材には、ヒーターからの入熱とプラズマからの入熱を考慮した。このプラズマからの入熱は、輻射による分は光学的に厚いと仮定して無視し、イオンと電子の入射、熱電子の放出による分のみを考慮した。カソードボディについては、ヒーター及び電子放出材料からの入熱とボディ上

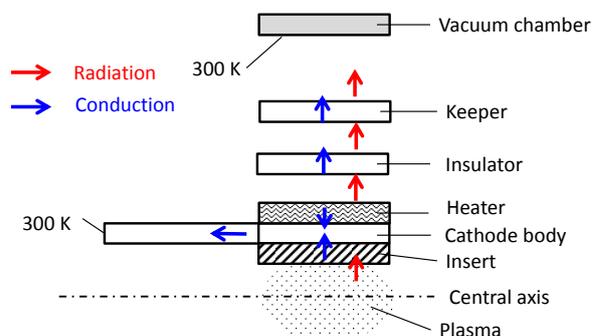


図4 簡易熱解析モデル概略図

流側への伝熱を考慮した。その他の部材については、部材内部の熱伝導と部材間の熱輻射を考慮した。カソードボディ上流端とチャンバの温度については 300 K と仮定した。この熱解析から、電子放出材料が 3000 K を達成し、かつ製作可能な構造を見出した。

3.4 構造

図 5 に設計・製作したホローカソードの概略図を示す。各部材料は、電子放出材料は前述のとおり LaB₆、カソードボディは高熱のため高融点材料かつ加工し易い Ta、キーパーは高融点材料の Mo、キーパーボディは INCO718、その他絶縁部はセラミック、高温にならないと見積もられた場所は INCO718 や SUS304 を用いた。ヒーター線は Ta 線を用いた。尚、オリフィス径については、現存するモデルではレイリー流れと仮定されており（かつてオリフィスプレートが厚く、オリフィス孔が管とみなせていた際に用いられた）、オリフィスプレートの薄い本カソードに適用するのは不合理であると考えられるため、オリフィス径はパラメータとした。

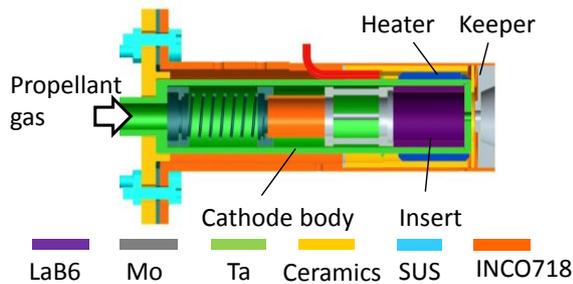


図 5 製作したホローカソード

4. 作動試験

上述の開発したホローカソードが 100 A 程度の電子電流を放出できるかを実証するため、作動試験を行った。

4.1 試験装置

試験装置の概略を図 6 に示す。作動試験は直径 2m 長さ 3m の真空チャンバの中で行った。この真空チャンバは、ターボ分子ポンプ（排気量 3.2×10^3 L/s）1 台と補助ポンプである油回転ポンプ（排気量 33 L/s）1 台によって排気され、最高真空到達度は 1.0×10^{-3} Pa 程度であった。

ホローカソードを真空チャンバの中に設置、ヒーターには定電流電源にて電流を流した。キーパーは、最初に着火（絶縁破壊）を促すために 300V を印加しておき、着火後、放電を維持するために 2A 流れるように設定した。出口から下流のある一定の位置に 300 mm × 300 mm の陽極（銅板）を設置して、電子電流を捕集した。カソード-銅板間は電流制御電源にて電流値をコントロールした。

試験条件を表 1 に示す。

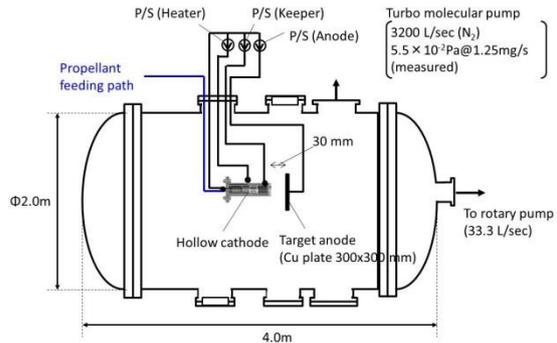


図 6 試験装置概略図

表 1 作動条件

| Parameters | Values |
|------------------------------|----------|
| Gas species | Ar, Xe |
| Propellant flow rate, Aeq. | 1, 5 |
| Heater current, A | 17 ~ 19 |
| Keeper current, A | 1 |
| Anode current, A | 40 ~ 100 |
| Cathode orifice diameter, mm | 1, 3 |

4.2 試験結果および考察

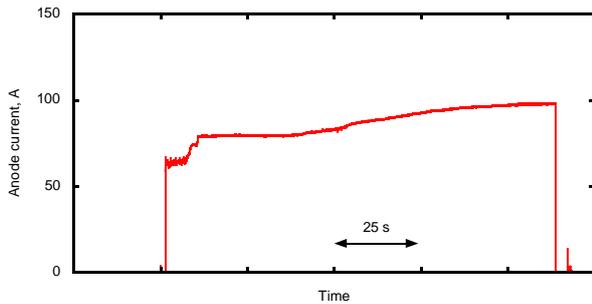
図 7 に示すのが、試験時のホローカソードの放電時の写真である。ホローカソード-陽極銅板間で放電されている様子が見られる。

図 8 に示すのが、作動中の電流(a)及び電圧(b)の時間履歴の一例である。作動開始時直後は 100A に到達しないが、作動を維持することで 100A まで到達している様子が見られる。これは、プラズマによる熱が電子放出材料に入り、より高電流密度の電子が引き出されたからと考えられる。

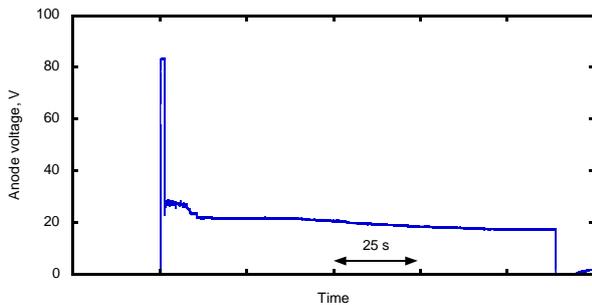
図 9 にこのホローカソードの電流電圧特性を示す。作動ガスを Ar とした際は、Xe を作動ガスとした際よりも電圧が高く、また 50A 以上にて作動しなかった。同一作動ガスの場合、流量によるアノード電圧の差異として、大きな有意差が見られなかった。また、カソードのオリフィス径についてもアノード電圧に大きな有意差が見られなかった。



図 7 作動試験時のホローカソード (Xe、オリフィス $\phi 3$ 、10sccm)



(a) 電流



(b) 電圧

図8 作動時の電流・電圧の時間履歴 (Xe, 5 Aeq, 100 A で作動時)

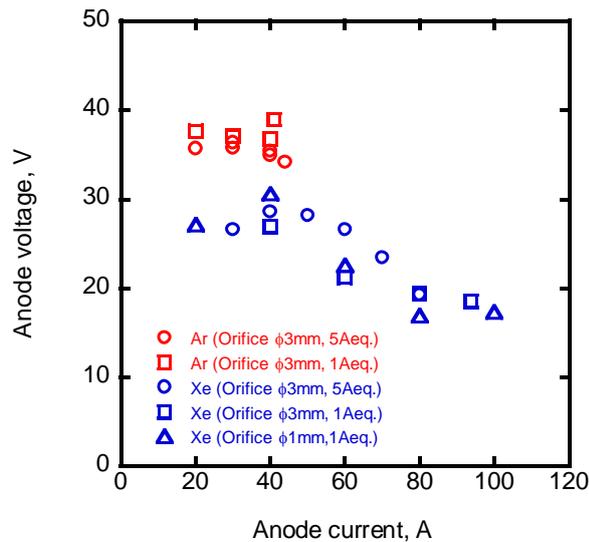


図9 放電電流・電圧特性

5. まとめ

今後の大電力化電気推進機に用いるための大電流ホローカソードの設計・製作を行った。設計に際しては、内部のプラズマの簡単なモデルおよび簡易熱設計をもとに寸法を決定した。

製作したホローカソードの作動試験を行い、100Aの電子電流の引き出しに成功した。

参考文献

- 1) <http://www.globalspaceexploration.org/wordpress/>

- 2) N. Yamamoto, T. Miyasaka, et.al. "Developments of Robust Anode-layer Intelligent Thruster for Japan IN-space propulsion system," IEPC Paper 2013-244 (2013).
- 3) S. Yokota, D. Ichihara, H. Kataoka, S. Harada, A. Sasoh, "Steady-State, Applied-Field, Rectangular MPD Thrusters," IEPC Paper 2013-246 (2013).
- 4) D. Goebel, I. Katz, "Fundamental of Electric Propulsion, Wiley, pp.243-324 (2008).
- 5) D. Goebel, E. Chu, "High Current Lanthanum Hexaboride Hollow Cathodes for High Power Hall Thrusters, IEPC Paper 2011-053 (2011).
- 6) J.L.Cronin, "Modern Dispenser Cathodes," IEE Proceedings, vol.128, no.19 (1981).
- 7) W. H. Kohl, "Handbook of Materials and Techniques for Vacuum Devices," American Institute of Physics (1995).
- 8) J. L. Cronin, "Practical Aspects of Modern Dispenser Cathodes," Microwave Journal, vol. 22, pp.57-62 (1979).
- 9) M. Domonkos, A. Gallimore, G. Williams, Jr, "Low-Current Hollow Cathode Evaluation," AIAA Paper 99-2757 (1997).