

100A 級大電流ホローカソード

○横田茂（筑波大）
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，MPD スラスタやホールスラスタは推力密度が高いため，有望とされている。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。³⁾いずれの場合においても，推進機の大出力化とともに，ホローカソードも大電子電流放出が求められる。

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（インサート）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 100 A の電子電流を安定に引き出しており⁵⁾，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。

日本においては，筆者らによって大電流が引き出し可能なホローカソードの開発が行われ，100 A の電子電流の引き出しに成功した。⁶⁾このホローカソードを実機搭載するためには，さらなる高効率化や安定作動化が必要である。こうした設計指針を取得するためには作動パラメータや幾何形状による内部のプラズマの状態を明らかにする必要がある。そこで本研究では，ホローカソード内部におけるプラズマの状態を把握する粒子法を用いた数値解析コードの開発を行った。

2. 数値解析

2.1 ホローカソード

本研究の解析対象としたホローカソードを図 1 に示す。電子放出材料は六ホウ化ランタン (LaB₆)，カソードボディは高熱のため高融点かつ加工しやすいタンタル，キーパーは高融点材料のモリブデン，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 SUS を用いた。

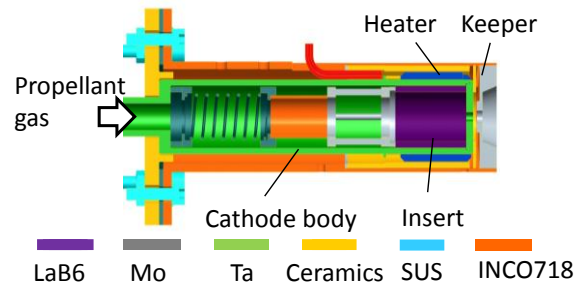


図 1 製作したホローカソード

2.2 数値解析手法

解析領域はホローカソード内部の電子放出材（インサート）部からホローカソード下流に設置した陽極設置場所までとした（図 2 参照）。

数値解析手法としては，中性粒子，イオン，電子をすべて粒子として扱う粒子法を用いた。これは内部の数密度が希薄流体の領域程度と推察されるため，また，内部の壁面近傍のシースの正負が作動状態によって変わる可能性があり⁷⁾，自己完結的に解を得るためである。空間 2 次元，速度空間は 3 次元の円筒座標系を用いた。

衝突は，中性粒子と電子の弾性散乱，電離衝突および励起衝突のみを考慮した。解析手法としては，確率的解法である Direct Simulation Monte Carlo (DSMC)法を用いた。

粒子の運動は，Buneman-Boris の方法を用いた。中性粒子はホローカソード上流より流入させ，電子はインサート部より一様に放出されるものとした。壁面において，中性粒子は壁面温度で乱反射，イオンは再結合して中性粒子に，電子は壁面に吸収されるものとした（図 3 (a)）。

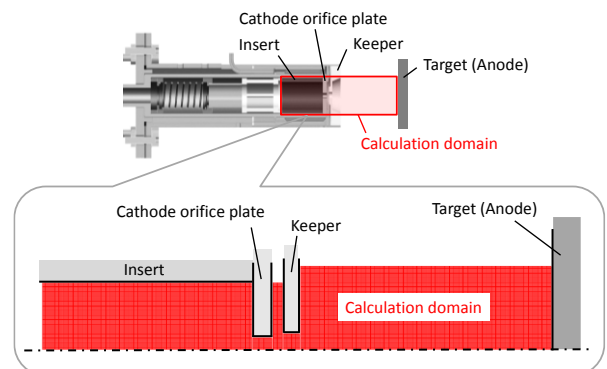


図 2 数値解析領域

電場は Poisson 方程式を用いた。境界条件は，カ

ソード電位部を 0V で固定，キーパー電位と陽極電位は電流値によって変動するものとした．それ以外の場所については，ノイマン条件とした (図 3 (b))．

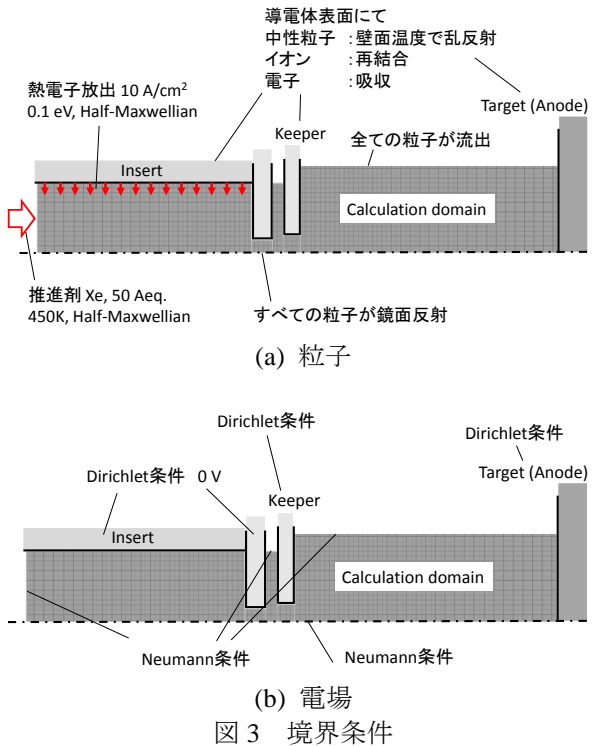


図 3 境界条件

3. 結果および考察

3.1 電流値

典型的な陽極電流の計算結果の時間履歴を図 4 に示す．時刻幅 4×10^{-11} s に対して，少なくとも図に示すだけの時間において平均電流が 100 A 程度で落ち着いていることから，計算がほぼ収束していると判定した．尚，平均 100 A の電流値に対して，約 40 A の振動が見られるが，これは物理的な現象よりも，粒子法特有の粒子を超粒子として扱うことに起因する計算上のノイズであると考えられ，超粒子の含む実際の粒子の数によってある程度軽減されるであろうと考えられる．

各部における平均電流値は表 1 のようになった．インサートから放出される電子電流を 40 A と設定したところ，ホローカソード内部のプラズマよりインサートへ入射する電子及びイオンが表の通りとなり，結果として，約 100 A 程度の電流が流れていることがわかる．一方，陽極における電流値は 40 A 程度であり，陰極における電流と一致しない．これは計算領域の問題でホローカソードより放出された電子を計算上の陽極がすべて回収できていない可能性がある．

また，キーパーにおける電流値も負の値をとっており，キーパーがイオンを跳ね返す電位を十分に出していないことになる．

これらは今後検討すべき課題である．

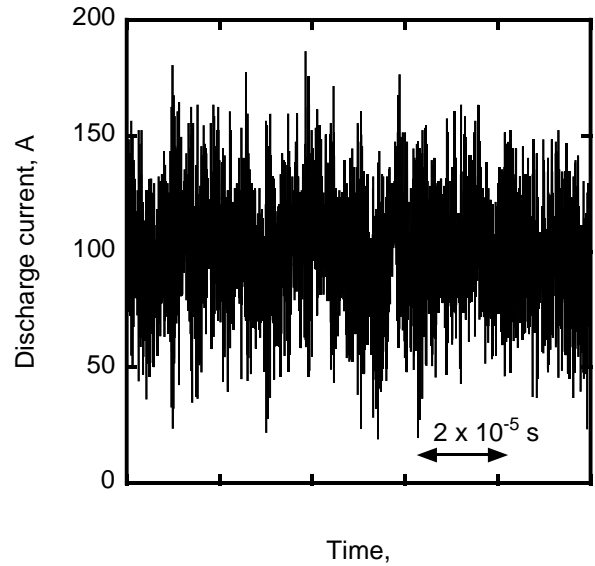


図 4 陽極電流の時間履歴

表 1 各電極における平均電流値の内訳

Cathode current, A	(total)	9.98×10^1
	(emission)	4.00×10^1
	(electron)	2.53×10^4
	(ion)	2.53×10^4
Anode current, A	(total)	3.57×10^1
	(electron)	3.67×10^1
	(ion)	1.00×10^0
Keeper current, A	(total)	-3.89×10^0
	(electron)	2.42×10^2
	(ion)	2.46×10^2

3.2 電子数密度分布

電子数密度分布については図 5 に示す通りである．ホローカソード内部において，概ね中心軸付近にて最大となり，壁面に向かうに従って減少する分布となっている．これは，参考文献 4 などに見られる理論的な解析による分布と定性的に一致している．

ホローカソード外部においては，陽極まで電子が到達していることが見て取れ，電子が引き出されていることがわかる．一方で，電子はキーパー-陽極間の空間に広がっていることもわかり，引き出された電流が本解析上では陽極に到達していないため，陽極電流としてカウントされておらず，陽極電流が陰極電流よりも低い値を示していると考えられ，今後検証すべき課題である．

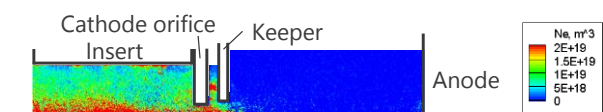


図 5 電子数密度分布

4. まとめ

大電力電気推進機用として試作した大電流ホローカソードの改善指針を得るべく、内部のプラズマの状態を調べるため、粒子法を用いた数値解析コードの開発を行っている。

開発中のコードの検証のため、100 A の放電電流が流れた際を模擬したところ、陽極には 40A しかなかったことがわかった。電子分布によるとキーパー陽極間で外に逃げていく電子があることがわかったため、正確な電流値の検証のためには、これらの外部に逃げた電子を引き出し電流にカウントできるような工夫が必要となろう。

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) 横田茂, 片岡久志, 鶴生知輝, 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.
- 7) D. G. Courtney, “Development and Characterization of a Diverging Cusped Field Thruster and a Lanthanum Hexaboride Hollow Cathode,” MIT thesis, 2008.
- 8) Birdsall, C. K. & Langdon, A. B., “Plasma Physics via Computer Simulation,” IOP Pub., 1991.