

ホローカソードのプラズマ解析に向けた Hybrid-PIC コードの開発

Development of a Hybrid-PIC Code for Plasma Analysis of Hollow Cathode

窪田健一¹, 大塩裕哉¹, 渡邊裕樹², 張科寅¹, 大川恭志¹, 船木一幸¹

¹宇宙航空研究開発機構, ²首都大学東京

1 はじめに

近年、全電化衛星や小惑星捕獲ミッションを念頭に置いた大電力ホールスラストの研究開発が国内外で活発化しており、それに伴い数 10A-100A 級のホローカソード (図 1) の必要性が高まりつつある[1]。JAXA においてもホローカソードの研究開発は実施されてきたが、現状では 15 A 級のものに留まるため、さらなる大電流化が求められる[2]。

大電流ホローカソードの研究では NASA の JPL (Jet Propulsion Laboratory) が世界的に先行しており、高速スキニングプローブを有するカソード専用チャンバで取得された豊富な実験データが存在する[3]。また、数値解析コード (流体モデル) の開発も並行して進められており、実験結果の理解に利用されている[4]。近年はキーパー損耗の原因に関する議論が活発化しており、イオン音波不安定性により生じた高エネルギーイオンがスパッタリングを引き起こしている可能性が高いことが示唆された[5]。

本研究では、流体モデルよりも正確にスパッタリング現象を扱うことができると期待される粒子モデルコードを開発することで、放電特性に関する知見を得ると共に、堅牢で高性能なカソード開発に資することを目指す。中性粒子に関してもカソード内外のクヌッセン数は 0.1 以上であり、希薄気体効果を導入するにあたり粒子モデルが適切であると考えられる。本稿では数値解析モデルの詳細を説明し、放電開始直後のプラズマ挙動について議論する。最後に大電流作動を解析するための課題について述べる。

2 モデリングと解析条件

2.1 モデリング

先述の通り、イオン及び中性粒子は粒子としてモデル化するが、電子については計算負荷低減のために流体モデルで記述する Hybrid-PIC (Particle In Cell) モデルを適用する。イオンは PIC 法により時間発展を追跡し、粒子間の衝突は DSMC (Direct Simulation Monte Carlo) によ

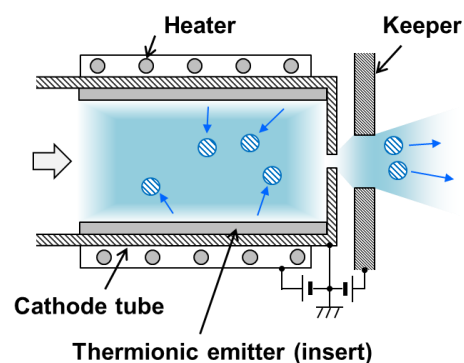


図 1 ホローカソードの概念図

り考慮した。粒子間衝突としては、中性粒子同士、中性粒子-イオン、イオン-イオンの弾性衝突、及び荷電交換衝突 (CEX) を考慮した。

電子の速度 \mathbf{u}_e は drift-diffusion モデルを用いると以下のよう表すことができる。

$$\mathbf{u}_e = -\mu_e \mathbf{E} - \frac{\mu_e}{e} \frac{\nabla p_e}{n_e} \quad (1)$$

ここで、 μ_e 、 \mathbf{E} 、 n_e 、 p_e はそれぞれ移動度、電場、電子数密度、電子圧力を表す。準中性条件を仮定することで、電子数密度はイオン PIC から与える。移動度の算出にあたり必要となる電子の衝突周波数の評価の際には、イオン音波不安定性に起因する異常抵抗モデルを用いた[4]。

$$\mathbf{v}_{eh} = \mathbf{v}_{en} + \mathbf{v}_{ei} + \mathbf{v}_{anm}, \quad \mathbf{v}_{anm} = \alpha \omega_{p,i} \frac{|\mathbf{u}_e|}{a_i} \quad (2)$$

ここで、 $\omega_{p,i}$ 、 a_i はそれぞれイオンプラズマ振動数、イオン音波速度を表す。 α は定数である。 \mathbf{v}_{anm} は電子温度とイオン温度の比が係数として掛けて表現されることが一般的だが、JPL の解析に倣いそれらは定数 α に含めた。式(1)と電流保存式を用いることで、電位 ϕ を解くためのポアソン方程式が得られる。

$$\nabla \cdot n_e \mu_e \nabla \phi = \nabla \cdot \left(n_e \mathbf{u}_i + \frac{\mu_e}{e} \nabla p_e \right) \quad (3)$$

ここで、 \mathbf{u}_i はイオン速度を示し、イオン PIC から与えられる。将来的に磁場の効果を含めることを考慮した場合、

電流が放出されることとなる。電子温度の計測データによれば、放電室内では 1-2 eV であり、オリフィス・プルーム領域を通じて下流に向かい上昇し、アノード近くで 3-5 eV となる傾向が見てとれるため[3]、本解析では上流端面で 1 eV、プルーム境界で 3 eV と仮定した計算結果を示す。

表 1 解析条件

作動ガス	Xe
流量	10 sccm
バイアス電圧	20 V
インサート温度最大値	1900 K
異常抵抗係数(α in Eq. 2)	0.01
入口電子温度	1 eV
プルーム境界電子温度	3 eV

3 結果と考察

3.1 初期条件

本解析の初期電子数密度分布及び電子流線を図 4 に示す。中性粒子分布は事前に実施した DSMC 解析結果から与えており、電子数密度は中性粒子密度の 10% と仮定した。ただし放電室内では一様に $1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ とした。電子の流線から、電子はインサート表面からバイアス電圧が印加されている右端境界に向かって想定通り流れていることが確認できる。初期状態での放電電流値は 24 A 程度であった。

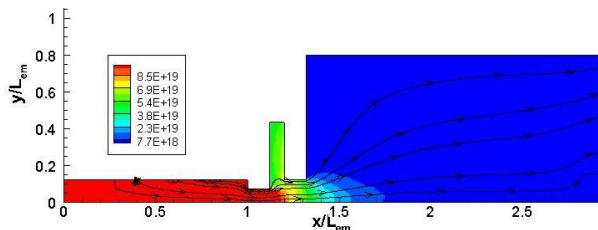
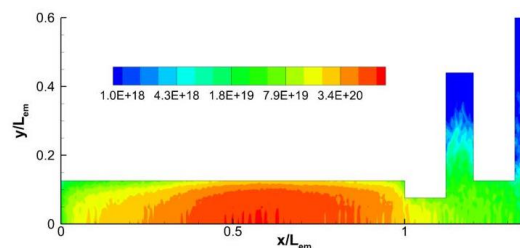


図 4 初期電子数密度分布

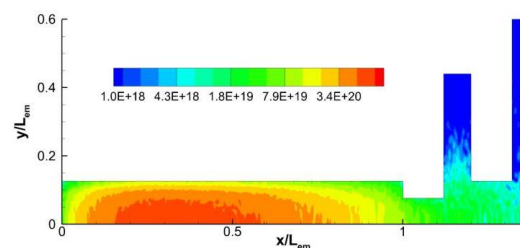
3.2 経時変化

放電開始後、 $t=15 \mu\text{s}$, $27 \mu\text{s}$ 経過したときの電子数密度及びポテンシャル分布を図 5,6 に示す。 $t = 15 \mu\text{s}$ のとき、放電室内中央付近をピークにもつ電子数密度分布となる(図 5-a)。その後、電子数密度分布のピークは上流に移動することが図 5-b からわかる。この理由は図 6-a に示されるように、上流に向かい減少するポテンシャル勾配によりイオンが上流側に押し込まれるためであると考えられる。 $t = 27 \mu\text{s}$ では放電室内のポテンシャルは 7 V 程度でほぼ一様となり、これ以降は多少の変化はあるものの定性的・定量的に大きな変化は見受けられなかった。放電室内に生成されたイオンの初速は中性粒子の速度と

同程度であり、その値は高々数十から数百 m/s であるため数 V の電位差を乗り越えることはできず上流に移動するものと考えられる。なお、JPL の電子数密度計測結果でも同様の傾向、すなわちインサート上流部にてピークを持つ傾向が見て取れる[1]。放電室内で生成されたイオンは下流に排出されるわけではなく、壁面に向かって形成される電場によって壁面に向かって移動し、壁面上で電子と再結合して中性粒子に戻り、その後再び電離に費やされるサイクルを繰り返す。

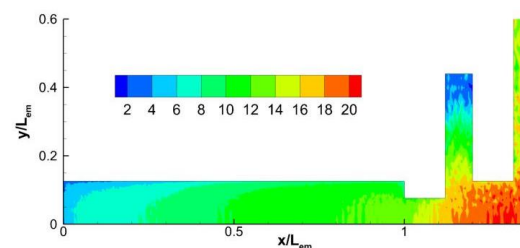


(a) $t = 15 \mu\text{s}$

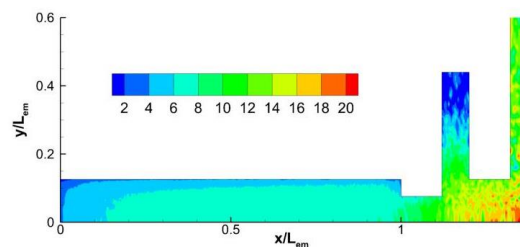


(b) $t = 27 \mu\text{s}$

図 5 電子数密度分布, m^{-3}



(a) $t = 15 \mu\text{s}$



(b) $t = 27 \mu\text{s}$

図 6 ポテンシャル, V

3.3 インサート表面電流

インサート表面に流れる電流には、熱電子、バルクからのプラズマ電子、壁面に衝突するイオンの3種の寄与がある。それぞれを $t=15 \mu\text{s}$, $27 \mu\text{s}$ で比較したものを図7に示す。ここで、放電室内からインサート表面に向かう電流値を正として表示した。3種それぞれの寄与の和が放電電流に等しくなり、その値は $t=15 \mu\text{s}$, $27 \mu\text{s}$ でそれぞれ 31 A, 14 A であった。各時刻における内訳を見ると、熱電子電流はインサート温度から見積もられた通り約 40 A の電流が維持されているものの、バルクからのプラズマ電子の損失による電流（絶対値）が $t=15 \mu\text{s}$ から $t=27 \mu\text{s}$ で約 11 A 増大することで、正味の電流が減少したことがわかる。これは、図6に示されるように $t=15 \mu\text{s}$ から $t=27 \mu\text{s}$ にかけてポテンシャルが放電室内で減少し、それに伴い壁面シース電圧も減少するため、電子の損失に拍車がかかったことに起因すると考えられる。

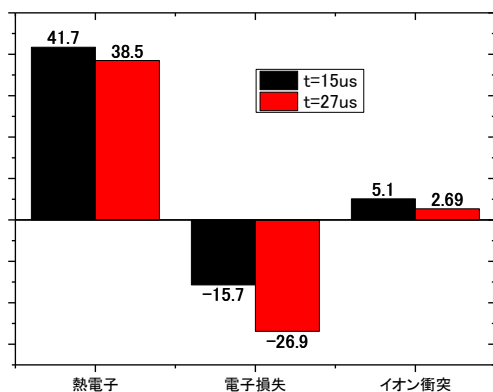


図7 インサート表面電流の内訳

3.4 大電流作動の解析に向けて

インサート表面電流の減少の理由として考えられる放電室内部のポテンシャルの減少の原因について考える。図6-bからポテンシャルはオリフィスの下流部において急激に減少しており、この付近における電子が受ける抵抗が電位差を生む原因だと考えられる。そこで、図8に式(2)に示した電子の衝突周波数の内訳を示す。オリフィス入口では異常抵抗と電子-イオン間の衝突が支配的であるが、下流に進むにつれ異常抵抗が支配的となることがわかる。従って、仮定した異常抵抗係数が過大である可能性があり、より低い値を用いることでポテンシャルの勾配は緩和されるものと期待される。

また、実際の放電は、定電流回路により維持されていることにも注意する必要がある。所定の電流より放電電流が下回った場合、バイアス電圧が上昇することで所定の電流を維持する制御機構が備わっており、それと同様の制御を解析上でも実装する必要があると考えられる。

その際、電流値の変動に追従してインサートの温度も変化するはずであるが、インサート温度はカソードチューブ周囲のヒーター及びヒートシールドの熱設計とも関連するため、正確には熱解析との連成が必要となると考えられる。

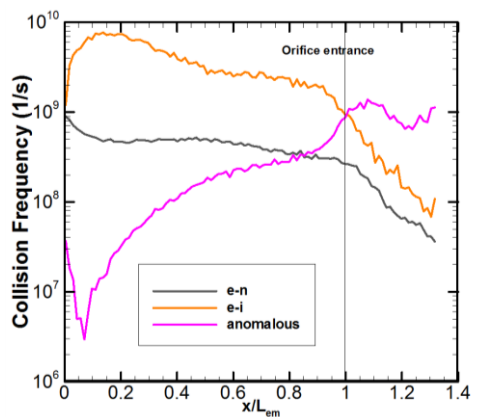


図8 電子の衝突周波数内訳

4 まとめ

ホローカソード内外のプラズマ解析のための Hybrid-PIC コードを開発した。本稿ではインサート温度、バイアス電圧をそれぞれ 1900 K, 20 V に固定したときの放電開始直後のプラズマ挙動について議論した。放電室内では下流ほどポテンシャルが高くなるため、放電開始直後にイオンは上流向きに移動する。その後、放電室内の電位は 7 V 程度まで低下してしまい、その結果バルクプラズマ電子の損失が増大し、放電開始直後 31 A 程度あった放電電流が 14 A 程度まで減少した。オリフィス下流におけるポテンシャルの急激な変化は異常抵抗に起因すると考えられ、今後異常抵抗係数の影響を調べる必要がある。また、実際の放電は定電流回路によって維持されており、同様の制御を解析でも模擬する必要があると考えられる。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 (26820377) の助成を受けております。

参考文献

1. D. M. Goebel and E. Chu, "High Current Lanthanum Hexaboride Hollow Cathodes for High Power Hall Thrusters," IEPC-2011-053, 2011.
2. Yasushi Ohkawa, Toshiharu Higuchi, Yukio Hayakawa, Katsuhiko Miyazaki, and Hiroshi Nagano, "Observation and Analysis of Graphite Hollow Cathode after 45,000-Hour Life Test," IEPC-2013-364, 2013.
3. Dan M. Goebel, Kristina K. Jameson, Ron M. Watkins,

- Ira Katz, and Ioannis G. Mikellides, "Hollow cathode theory and experiment. I. Plasma characterization using fast miniature scanning probes," *Journal of Applied Physics*, Vol. 98, No. 11, 113302, 2005.
4. I. G. Mikellides, D. M. Goebel, B. A. Jorns, J. E. Polk and P. Guerrero, "Numerical Simulations of the Partially-ionized Gas in a 100-A LaB₆ Hollow Cathode," IEPC-2013-142, 2013.
 5. B. A. Jorns, I. G. Mikellides, and D. M. Goebel, "Investigation of Energetic Ions in a 100-A Hollow Cathode," AIAA-2014-3826, 2014.
 6. I. G. Mikellides, I. Katz, D. M. Goebel, and J. E. Polk, "Hollow cathode theory and experiment. II. A two-dimensional theoretical model of the emitter region," *Journal of Applied Physics*, Vol. 98, No. 11, 113303, 2005.
 7. K. K. Jameson, D. M. Goebel, I. G. Mikellides and R. M. Watkins, "Local Neutral Density and Plasma Parameter Measurements in a Hollow Cathode Plume," AIAA-2006-4490, 2006.