

代替推進剤ホールスラストにおけるプラズマ挙動に関する

Full-PIC (Full Particle in Cell) 解析

鈴木巴公

静岡大学大学院総合科学技術研究科 工学専攻

1 諸言

ホールスラストは、高比推力 (1500-3000 s) および高推力密度 (1 mN/cm²) を有するため、深宇宙探査に向けた実用化が進められている。一般的な推進剤としてはキセノン (Xe) が用いられているが、その高いコストが大きな課題となっている。一方で、二酸化炭素 (CO₂) は安価であることに加え、三重点を利用した低压貯蔵が可能であり、火星等での現地資源利用 (ISRU) の観点からも有望な代替推進剤である[1]。しかし、CO₂ 作動は Xe 作動と比較して投入した推進剤の内、電離した割合を示す指標である推進剤利用効率が高い[2]、運転条件やスラスト形状の最適化が不可欠であり、全粒子の運動論的挙動を直接追跡しシース等の非中性領域を厳密に再現できる Full-PIC モデルによるチャンネル内部の CO₂ プラズマ特性解明が求められている。

これまでの研究において、CO₂ の解離プロセスおよびマルチステップ電離を実装することで、イオンビーム組成の再現性を向上させてきた[3]。本研究では、放電電圧 200 V までの実験によりモデルの妥当性を確認済みであり、さらに高電圧域への拡張シミュレーションによって効率改善の要因を調査する。

2 数値モデルと計算条件

図 1 に、解析対象である 100 W 級マグネティックレイヤ型ホールスラストの計算領域および境界条件を示す。シミュレーション条件は表 1 およ

び表 2 にまとめた。計算パラメータは、デバ依長や CFL 条件といった物理的制約に基づいて決定した[4]。解析コードは MPI および PETSc ライブラリを用いた 56 プロセスの並列計算により実行した。各物理量は、定常状態における 30 μ s の期間で時間平均したものを解析に用いた。

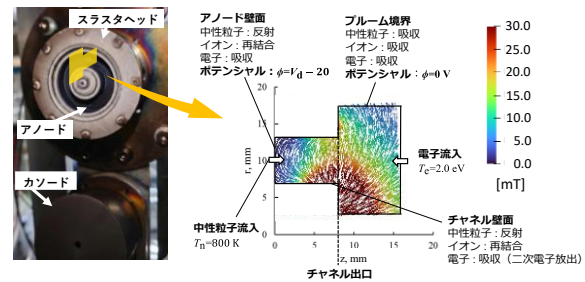


図 1 100 W 級ホールスラストと計算領域および境界条件

表 1 シミュレーション条件

タイムステップ	2.0×10^{-5} μ s
グリッドサイズ	0.10 mm
人工質量比補正係数	$\mathcal{F} = 25$
マクロ粒子サイズ	5.0×10^6

表 2 スラスト作動条件

アノード流量 (CO ₂)	0.98 mg/s
放電電圧	200-300 V
磁場強度	21-25 mT
(チャンネル出口中央)	

3 結果

図 2 に、シミュレーションで得られた性能指標であるアノード効率の推移を示す。あわせて、アノード効率の内訳として電流利用効率と、推進剤利用効率の指標となるイオン種割合を示す。ここで、アノード効率とは投入した電気エネルギーのうち、どれだけが推力に変換されたかを示す指標である。また、電流利用効率は全電流のうち、推力を生むイオン電流としてどれだけ有効利用されたかを意味する。図 2 より、磁場強度 21 mT の条件下において、放電電圧の上昇に伴い全粒子中のイオン割合が増加し、推進剤利用効率が向上していることがわかる。CO₂ 作動においては解離によるエネルギー損失過程が存在するものの、図 3 の電子温度分布に示すように、放電電圧の増加に伴って電子温度が上昇し、電離が促進されるため、結果として推進剤利用効率が増加した。この推進剤利用効率の増加が支配的となるため、放電電圧 250 V まではアノード効率が増加した。しかし、放電電圧 300 V では推進剤利用効率の増加率が鈍化したことに加え、印加磁場強度の不足に起因する電流利用効率の低下が生じたため、最終的なアノード効率は低下する結果となった。一方で、印加磁場強度を 25 mT に増加させた条件では、この電流利用効率の低下が改善され、アノード効率のさらなる向上が確認された。総じて、適切な磁場強度と組み合わせることで、高電圧作動は CO₂ ホールスラスタの性能向上に大きく寄与することが示唆された。

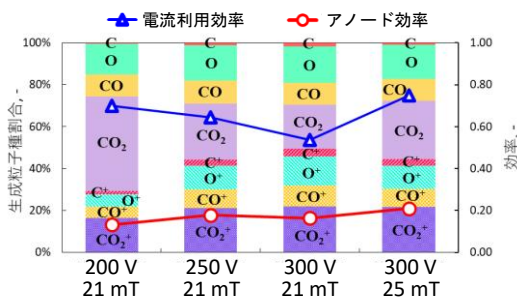


図 2. 生成粒子種割合と各種効率

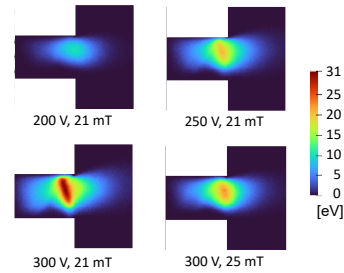


図 3. 各条件における電子温度分布

4 まとめ

本モデルがアノード効率の線形増加という実験傾向を定性的に再現することを確認し、その妥当性を検証したうえで実験の作動範囲を超えた放電電圧条件でのシミュレーションを実施した。シミュレーションの結果、実験未実施の 250 V 以上の高電圧域で効率がさらに向上することが示された。以上の知見から、今後は実験作動範囲を拡張し、これらの傾向を検証する必要がある。

5 謝辞

本研究は JSPS 科研費 (課題番号: JP24K01088) の助成を受けたものである。

また、京都大学学術情報メディアセンターのスーパーコンピュータ (システム B : Laurel 3、パーソナルコース・タイプ B) を利用して実施した。

6 参考文献

- [1] Nosaka S, Cho S, Watanabe H, Gunji K, Matsui M and Kinefuchi K 2025 Hall thruster system using dry ice propellant at the triple point J. Propul. Power **41** 517–21.
- [2] Tsuchikawa S, Nishida S, Tokuda S, Takeuchi K and Matsui M 2024 Performance evaluation of a low power Hall thruster with carbon dioxide propellant Acta Astronaut. **224** 415–26.
- [3] Suzuki H, Tokuda S, Cho S, Watanabe H, Ohkawa Y, Kinefuchi K and Matsui M 2026 Investigation of effects for multi-step

ionization and dissociation in a CO₂ Hall thruster using fully kinetic simulation J. Evolving Space Activities **4** 265.

- [4] Tokuda S, Cho S, Watanabe H, Ohkawa Y, Kinefuchi K, Takeuchi K and Matsui M 2025 Fully kinetic simulation of CO₂ discharge in a 100 W-class Hall thruster Plasma Phys. Control. Fusion **67** 085035