

ホールスラストにおける異常輸送の解明

Understanding of anomalous transport in Hall thrusters

研究代表者：肥田 愛蘭（九州大学総合理工学府）

研究分担者：張 科寅（国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構）

担当：数値解析の実施，理論検討

山本 直嗣（九州大学総合理工学研究院）

担当：結果の検証，理論検討

山口 侑樹（九州大学工学部）

担当：数値解析の実施，結果の検証

研究目的 (Research Objective):

人工衛星に搭載される電気推進の一種であるホールスラストの物理現象は複雑で未だ完全には解明されていない。なかでも、磁場により周方向にトラップされるべき電子が磁場を横切って過剰に輸送される異常輸送は推進性能を低下させる要因となるため、その物理機構の解明が重要な課題となっている。多くの先行研究により、微小不安定性、特に周方向のプラズマ不均一性によって励起されるドリフト不安定性が乱流を引き起こし、電子拡散を促進する可能性が示唆されている。しかし申請者らがスラスト内部のプラズマ揺動をマイクロ波干渉法で計測した結果、ドリフト不安定性(数十 MHz)と異常輸送には明確な相関関係は見られず、むしろこれまであまり注目を集めてこなかった 100-300 kHz の乱流が異常輸送を促進することが示唆された。

そこで、数値計算を用いて数百 kHz 帯の乱流の時空間構造を解析し、磁場を横切る電子輸送との関係を明らかにすることを本研究の最終目的とした。しかし、本研究のシミュレーションは粒子法を用いた第一原理計算のため計算コストが高く、数百 kHz の時空間構造を解析するのに十分な時間(100 μ s 程度)のデータを取得するには長い時間を要する。そのため、まず研究の第一段階として取得した約 50 μ s 間のデータを用いて数十 MHz から数 MHz 帯のプラズマ解析を行うこととした。加えて、推進剤にクリプトンを採用した場合についても計算を行い、プラズマ分布や推進性能を評価することで、今後クリプトンがキセノンに代わる推進剤として利用可能であるか検討するための基礎的知見を得ることとした。

計算手法 (Computational Aspects):

2D3V Fully kinetic Particle-in-Cell model を用いてシミュレーションを行い、ホールスラスト内外のプラズマを再現した。本研究は小型の 100W 級ホールスラストを想定している[Fig.1]。イオン（一価、二価、三価）および電子は実質量のまま扱い、各々の粒子に対して運動方程式を 4 次のルンゲクッタ法で解くことでその挙動を追跡する。磁場は電磁場解析ソフト FEMM の結果を用いて時間的に一定として扱い、電場はポ

アソン方程式を半陰解法により解くことで計算する。粒子間衝突は弾性衝突、励起衝突、電離衝突、電荷交換衝突およびクーロン衝突を考慮した。本計算コードは MPI を用いた粒子数分割型の並列化を行っている。

本研究では推進剤としてキセノンおよびクリプトンを用いた場合について、それぞれ計算を行った。質量や粒子間衝突に関するパラメータはイオン種に応じて変更する一方で、放電電圧や磁場強度、推進剤質量流量といったスラスタ作動条件に関しては、キセノンとクリプトンとで同一の条件とした。

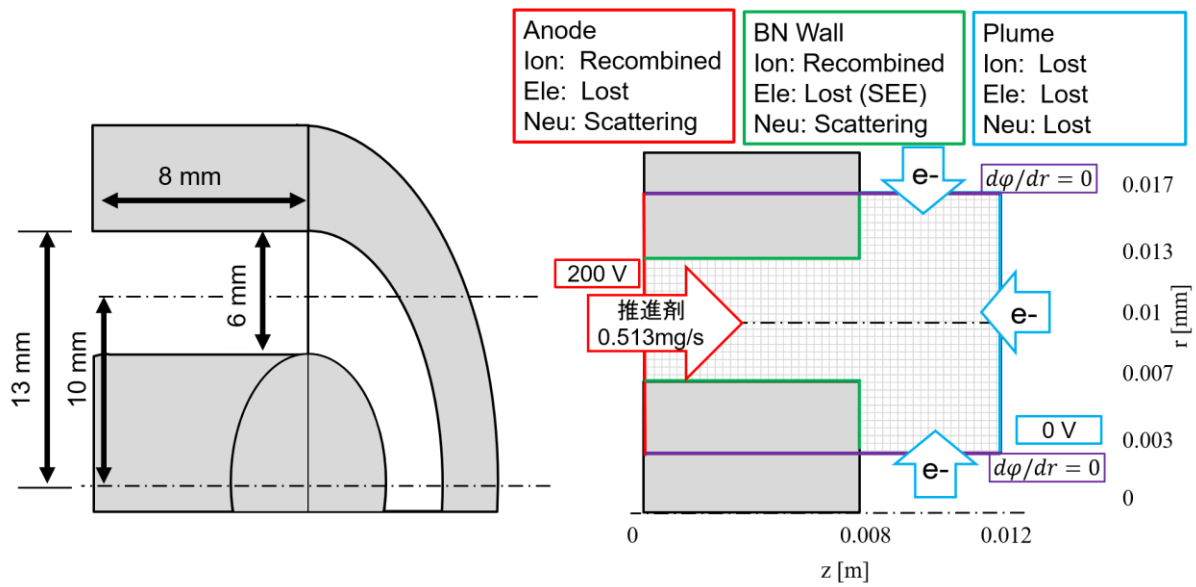


Fig.1 100W 級ホールスラスタの計算体系

研究成果 (Accomplishments) :

まず、推進剤にキセノンを用いて数十 MHz から数 MHz 帯のプラズマ揺動を解析した結果を示す。Fig.2 に示す一価イオンの軸方向速度分布関数より、速度の異なる二つの流れ成分が共存する二峰性の分布をとることが確認された。この二峰性の主要因として、電離衝突によるイオン生成が盛んに起こる領域が、加速チャンネル内部 ($z=6\text{mm}$ 付近) とチャンネル出口 ($z=8\text{mm}$ 付近) の 2 箇所が存在することが挙げられる [Fig.3(a)]。加速チャンネル内部で生成されたイオンは、下流へ伝搬する過程でチャンネル内部 ($z=7\text{mm}$ 付近) およびチャンネル外部 ($z=10\text{mm}$) に形成されている 2 つの強電場領域 (Fig.3(b) 参照) を通過するため 2 段階で加速され、最終的に約 17km/s で計算領域端に到達する。一方チャンネル出口付近で生成されたイオンはチャンネル出口の電場ピークで主に加速されるのみであり、最終的なバルク速度は約 16km/s となる。

Fig.2 に示した二峰性の速度分布関数はビームプラズマ不安定性でみられる典型的な形状である。そこで、一価イオンの低速流と高速流の相対速度に起因する二流体不安定性について線形理論に基づいて成長率を算出したところ、流体近似モデルでは 10^6 オーダー、ランダウ減衰を考慮した運動論モデルでは 10^4 オーダーの正の成長率が得られた。すなわち、本計算条件下では一価イオンのみであっても二流体不安定性が

励起・成長し得ることが示唆された。

一方、ホールスラストでは一般に電場で加速されるイオンの速度が価数によって異なるため、一価イオンと二価イオンの間に速度差が生じる。この速度差によって励起される二流体不安定性については多くの先行研究で報告されており、この軸方向の不安定性と周方向の不安定性が非線形結合することで電子輸送に影響を及ぼすことも明らかとなっている。

そこで、本研究でも多価イオンの存在がプラズマ揺動や磁場を横切る電子輸送に与える影響を議論するため、既存の一価・二価・三価の全てを考慮した計算に加えて、多価電離を無視して計算領域中に一価イオンのみが存在する条件でも計算を行った。しかし、現時点の解析時間（約 $15\mu\text{s}$ ）の範囲では、チャンネル外部における電子輸送について多価イオンの有無に依る明確な差異は確認されなかった。したがって計算を継続し、不安定性の飽和・減衰過程まで含めた長い時間スケールでプラズマ揺動と電子輸送を比較・検討する必要がある。

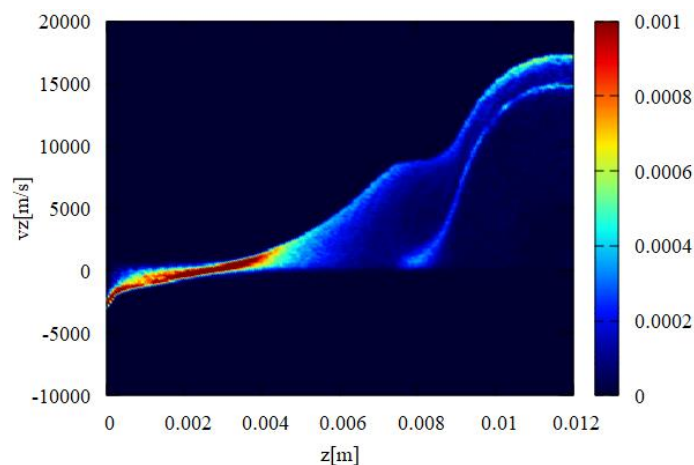


Fig.2 1 価イオン軸方向速度分布関数

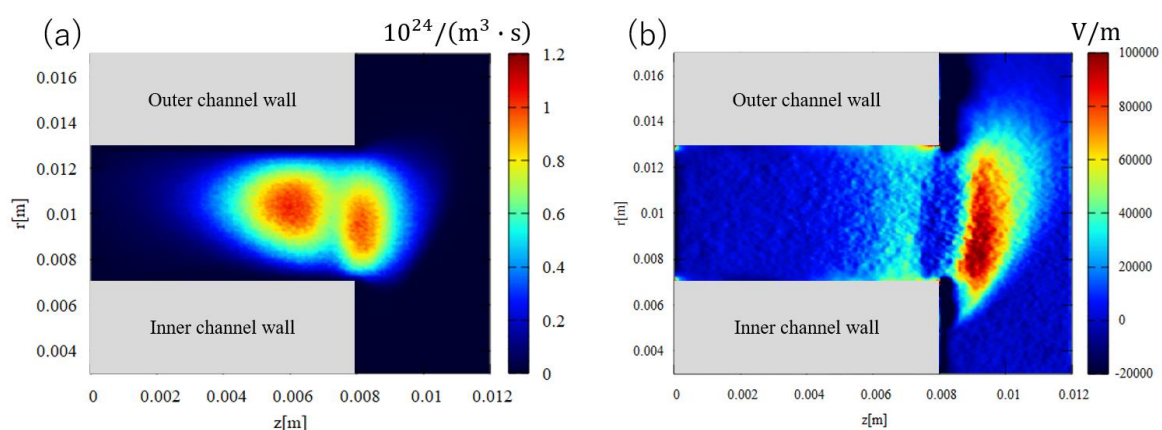


Fig.3 プラズマ分布 [(a) 1 価電離衝突頻度, (b)軸方向電場]

次に、これまで電気推進の推進剤として広く利用されてきたキセノンに代わる推進剤の検討として、クリプトンを用いた場合の計算結果を示す。プラズマが定常状態に

達したか判断するために、まず放電電流の時間変化を評価した[Fig.4]。クリプトンの計算を開始するにあたり、初期条件としてキセノンで計算を回したあとのプラズマ分布を与えたこともあり、計算開始直後は放電電流が増加する傾向がみられた。その後10 μ s程度経過すると約200kHzの周波数で振動する様子が観測され、この時点で定常に至ったと判断した。しかし放電電流振動の周波数について、同一のスラスタを用いた実験で観測された周波数よりも大きい結果となっている。

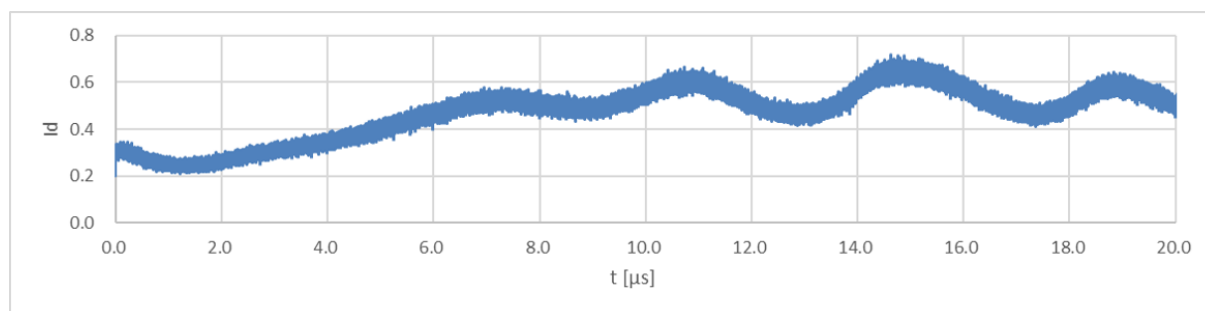


Fig.4 放電電流の時間変化

次に、キセノンとクリプトンの推進性能の比較を表1に示す。本研究では推進剤質量流量と放電電圧をイオン種に依らず同一条件で計算しているため、推力と比推力は主に排出されるイオンの速度に依存する。そのため理論上は原子量の小さいクリプトンの方が $\sqrt{(M_{Xe} / M_{Kr})} = 1.25$ 倍程度高い値をとると考えられる。実際に、表1よりクリプトンの比推力はキセノンの1.23倍となっており、この理論値と概ね一致した。しかし、推力に関してはクリプトンがキセノンの約1.8倍大きい結果を示した。これは初期条件として計算領域内に配置した中性粒子が依然として電離して推力に寄与しているためと考えられる。実際に、推力に寄与する排出流量が0.7mg/sと、アノード境界からの推進剤流入量0.5mg/sより大きい値を示していた。したがって、初期中性粒子の影響が消えるまで十分長い時間計算を回したうえで、推進性能や放電電流振動を再評価する必要があるといえる。一方、推力電力比とアノード効率に関しては、クリプトンはキセノンに劣るという結果が得られた。これは、クリプトンはキセノンに比べて電離エネルギーが大きく、プラズマの維持に必要な電力が増加するためである。

以上のように計算条件を変えた結果の比較や、本来の研究目的である数百kHz帯のプラズマ揺動を解析するためには、より長時間のデータ取得が必要である。しかし、本研究で用いる第一原理計算は計算コストが高く、データ取得に時間を要することが課題となっている。今後は並列化効率を評価しながら並列数を増やしてデータ取得に要する時間の短縮を図るとともに、粒子数分割に加えて領域分割型の並列計算の導入についても検討する必要がある。

Table 1 推進性能

	推力 [mN]	比推力 [s]	放電電力 [W]	推力電力比 [mN/kW]	アノード効率
Xe	3.55	746	46.8	75.9	27.8
Kr	6.42	921	117	55.0	24.9

公表状況 (Publications) :

(論文)

1. A. Koeda, S. Cho, Y. Yamashita, Y. Kosuga, H. Watanabe, and N. Yamamoto, Numerical Simulation of Plasma Perturbations and Electron Transport in Hall Thrusters, Transactions of JSASS, Vol.68 (2) pp.114-121, 2025, doi:10.2322/tjsass.68.114

(口頭)

1. A. Koeda, N. Yamamoto, Y. Kosuga, S. Cho, and H. Watanabe, Ion-ion two stream instability in a 100-W class Hall thruster using Particle-In-Cell method, The 39th International Electric Propulsion Conference, Imperial College London, United Kingdom, 14-19 September 2025
2. 肥田 愛蘭, 小菅 佑輔, 山本 直嗣, ホールスラスタ内部におけるイオン二流体不安定性の非線形解析, 第 42 回プラズマ・核融合学会年会, 京都, 2025 年 12 月