

宇宙推進機における低温度プラズマの解析

Analysis of low-temperature plasma for space propulsion

研究代表者：西山 和孝（宇宙航空研究開発機構）

研究分担者：月崎 竜童（宇宙航空研究開発機構）

担当：助言

山下 裕介（宇宙航空研究開発機構）

担当：助言

白川 遼（東京大学）

担当：解析

研究目的 (Research Objective):

JAXA が研究開発を行う宇宙用プラズマ推進機である電子サイクロトロン共鳴（ECR）型イオンエンジンは「はやぶさ」、「はやぶさ 2」等の深宇宙探査ミッションの成功に大きく寄与し、将来ミッションである DESTINY+等にも採用が予定されている。この推進機に用いられる低温プラズマは、電磁場中での輸送や化学反応、プラズマ不安定性など複数の物理過程が非線形に結合した複雑な系であり、その理解には数値解析が不可欠である。本研究では、電子サイクロトロン共鳴（ECR）型イオンエンジンの解析を目指し、磁化電子を考慮した低温プラズマの数値モデルの高度化を目的とする。そのため、磁化電子流体モデルの数値安定性の向上と物理モデルの妥当性評価を行う。これにより、宇宙推進機の性能向上および設計指針の高度化に資する知見の獲得を目指す。

計算手法 (Computational Aspects):

本研究では、電子を流体モデル、イオンを粒子モデルとして扱うハイブリッド型プラズマシミュレーションを主眼とし、そのための高精度かつロバストな新たな磁化電子流体モデルを用いる。また、磁場中の電子のサイクロトロン運動とマイクロ波の共鳴による電子加熱（電子サイクロトロン共鳴）を電子流体で表現するため、マイクロ波電磁場を周波数領域で解くヘルムホルツ方程式と電子流体モデルを結合する。

研究成果 (Accomplishments) :

強磁場中では、電子流体モデルにおいて、輸送係数が高度に異方的になり、数値誤差や計算不安定が増すという問題があり、これまでに磁力線メッシュ、Transverse flux method、擬似双曲線法等が提案されてきた。磁力線メッシュはメッシュ生成や境界条件が複雑であり、transverse flux method は数値誤差低減に有効であるが計算安定性が悪化する場合があり、擬似双曲線法は数値誤差低減と計算安定性向上ともに

有効である一方で、空間高精度化する場合には多くの追加の安定化手法が必要となり実装が複雑になるという問題が挙げられる。

そこで本研究グループでは、これらの手法のメリットを併せ持つ新たな計算手法である Predictor-Corrector (PC) method の構築に成功した。本手法の特徴は、フラックスを予測し、それについての修正方程式を解くようにすることで、異方的な拡散方程式を完全に等方化できる点である。収束まで繰り返すことで元の方程式と一致する解を得ることができる。実装が容易かつ、SOR 等の基本的な線型ソルバーでも簡単に解くことができるためロバストであり、軸対称モデル等にも容易に拡張できる点がメリットとして挙げられる。今年度はこちらの手法の詳細な基礎検証について主に実施した。Fig.1 にテスト計算を行った磁場配置および境界条件を示す。これらの系に対しイオン電流を 0、正規化電子密度を 1、電子温度一定を仮定した場合の電流保存則を解き、 $\tilde{x} = 0$ を横切る正規化電子フラックスについて正規化磁場強度 (Reference Hall parameter) を変化させてプロットした結果を Fig.2 に示す。理論的には磁場強度の 2 乗に反比例してフラックスが減少すると考えられるが、方程式を直接離散化して解く場合、数値誤差により過大評価されていることがわかる。一方で、Transverse flux method および PC method では理論通りの結果が正しく得られていることがわかる。次に、Fig.1 (b)のレンジ型磁場の系に注目する。こちらは Fig.1 (a)とは異なり、磁場強度が非一様である。こちらの系において磁場強度を変化させながら収束までのイタレーション数をプロットしたものを Fig.3 (a)に示す。transverse flux method では磁場強度が増加するに従ってイタレーション数が大きく増加するが、PC method では一定の反復回数でほとんど磁場強度に依存せず収束することが確認できる。

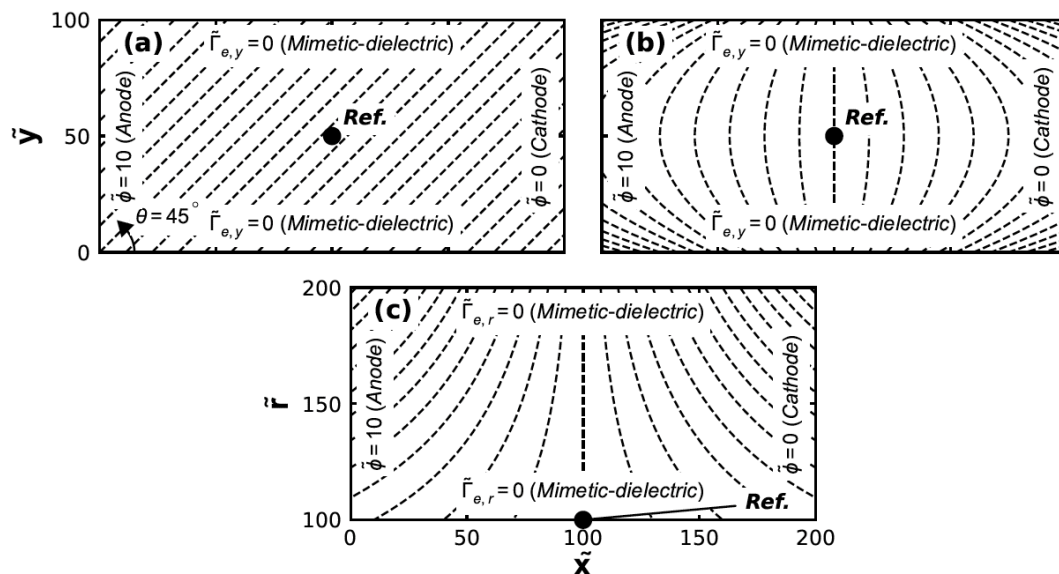


Fig.1 テスト問題の計算領域。(a) デカルト座標における斜め磁場、(b) デカルト座標におけるレンズ型磁場、(c) 円筒座標における曲線磁場。

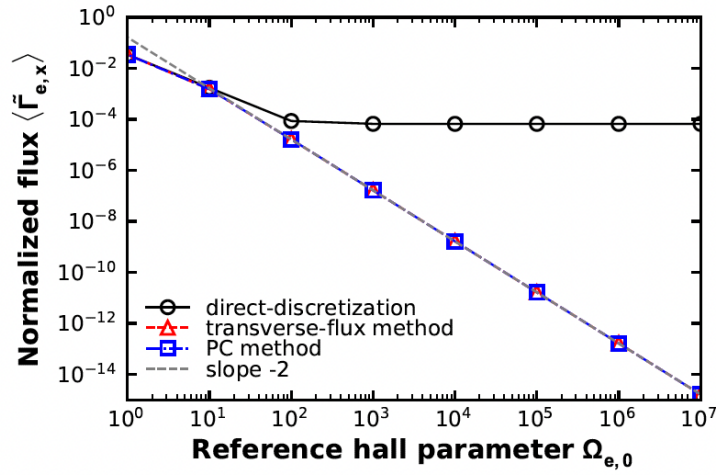


Fig.2 テスト問題 (a) (斜め磁場)における、直接離散化・transverse-flux method・PC methodの規格化電子フラックス $\langle \tilde{\Gamma}_{e,x} \rangle$ のReference Hall parameterに対する変化($\tilde{\chi} = 100$)。

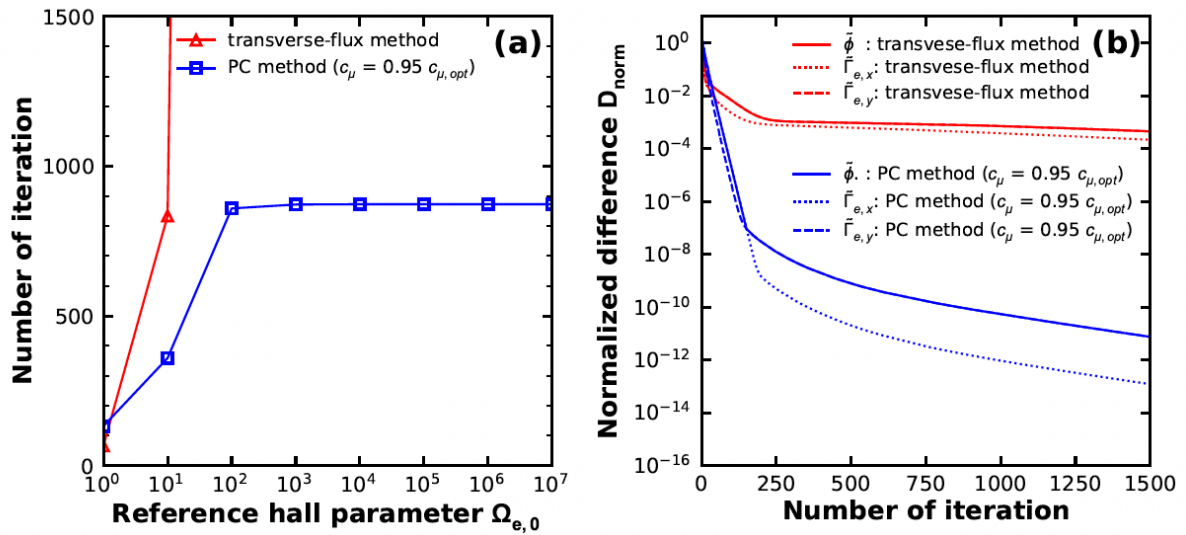


Fig.3 テスト問題 (b) (レンズ型磁場)における transverse-flux method と PC method の収束特性。(a) 各 Reference Hall parameter に対して収束に要するイタレーション数 (収束条件: $D_{norm} < 10^{-10}$) の比較。(b) Reference Hall parameter が $\Omega_{e,0}$ のときの D_{norm} が $\Omega_{e,0} = 100$ のときの収束履歴。

PC method の有効性をより現実的なプラズマ系で検証するため、ECR プラズマに関する benchmark 計算を実施した。本計算では、非中性 drift-diffusion (DD) モデル ($n_e \neq n_i$) に対して PC method を適用し、直接離散化と比較した。その結果、Fig.4 に示すように、PC method は異方性が強くなる低圧領域においてもロバストに解が得られ、かつ磁場閉じ込めを物理的に正しく表現できることが確認された。

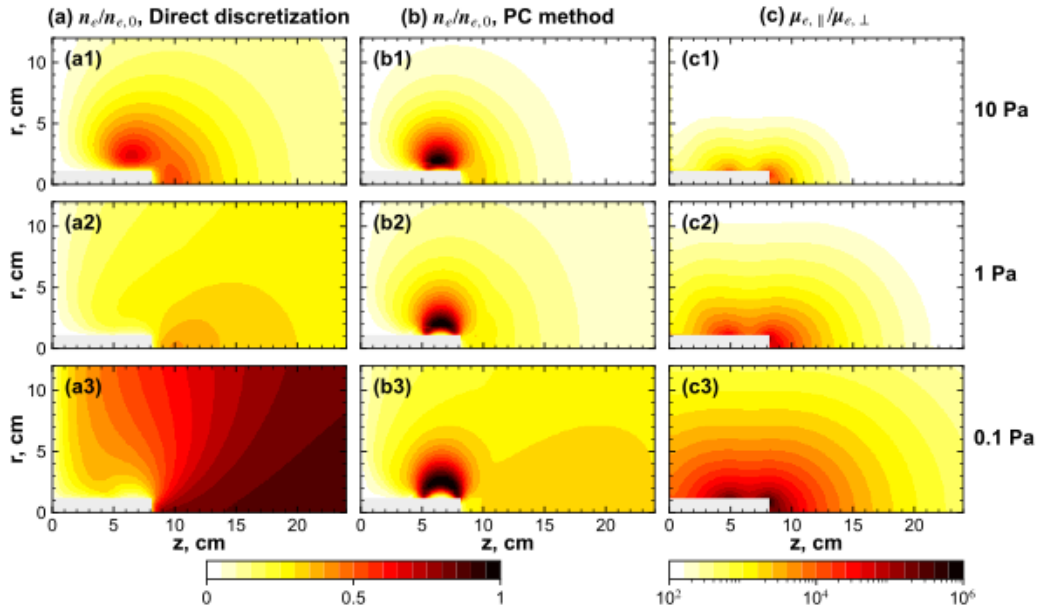


Fig.4 ECR プラズマにおける PC method の benchmark 結果。(a) 直接離散化、(b) PC method による規格化電子密度 $n_e/n_{e,0}$ の 2 次元分布、および (c) 移動度の異方性比 $\mu_{e,||}/\mu_{e,\perp}$ の分布 (圧力 : 10 Pa、1 Pa、0.1 Pa)。

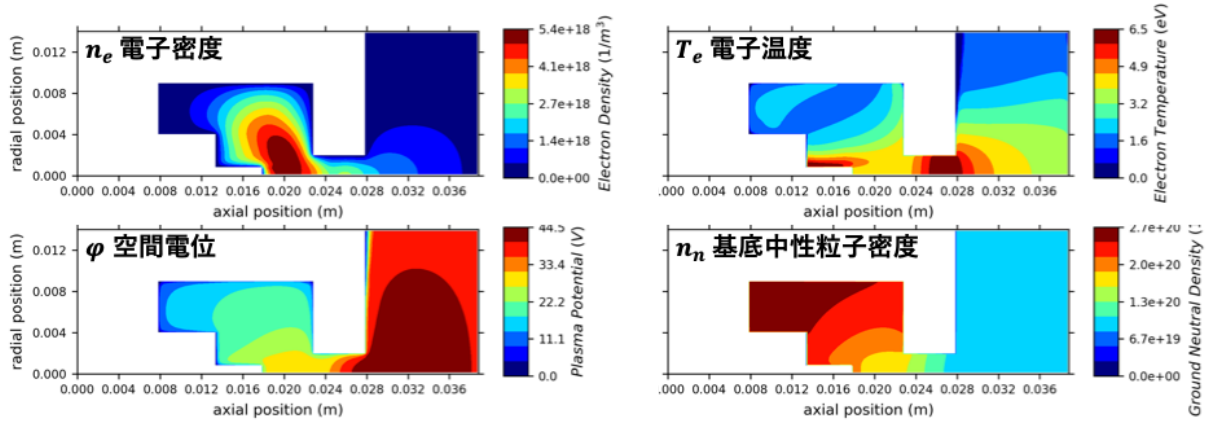


Fig.5 マイクロ波カソード計算の速報結果 (流量 0.7 sccm、マイクロ波電力 8 W、アノード電圧 35 V)。

さらに、PC method をマイクロ波カソードの流体モデルへ適用した計算を実施した (速報結果)。本計算モデルでは、内部からアノードまでを一括した 2 次元軸対称モデルを採用し、イオン・電子・中性粒子 (基底・準安定) を全て流体として取り扱う (セルサイズ 0.2 mm、マイクロ波周波数 4.25 GHz、ECR 領域 0.15 T)。電子は先ほどと同様の PC method を用いた非中性 DD モデル、マイクロ波電場はヘルムホルツ方程式 (周波数領域) でそれぞれ解く。また、ボーム型拡散と Sagdeev-Galeev モデルによる異常拡散および二次電子放出を考慮した。計算の結果、古典拡散のみのモデルでは実験と大きく異なる IV カーブが得られた一方で、異常拡散 (Bohm 拡散 +

Sagdeev-Galeev モデル) を考慮することで実験値とよく一致する IV カーブが得られた。また、Fig.5 に示す、電子密度および電子温度、空間電位、基底中性粒子密度についても、実験計測結果と概ね良好な一致が確認された。

今回、有用性を示すことができた本手法を用いる磁化電子流体モデルを用いて、今後、ECR 型イオンエンジンおよびカソードのハイブリッドモデルを構築し詳細な解析を実施していく予定である。

公表状況 (Publications) :

(論文)

1. R. Shirakawa, Y. Yamashita, R. Tsukizaki, and K. Nishiyama, Predictor-corrector method for solving anisotropic diffusion equation in magnetized plasmas, Journal of Computational Physics, under review.

(口頭)

1. R. Shirakawa, Y. Yamashita, R. Tsukizaki, and K. Nishiyama, Development of fluid model for electron cyclotron resonance (ECR) plasma, Gaseous Electronics Conference, Seoul, October 2025
2. 白川 遼, 山下 裕介, 月崎 竜童, 西山 和孝, 強磁場下の高精度流束計算によるマイクロ波カソードのプラズマ流体モデリング, 2025 年度 宇宙輸送シンポジウム, 東京, 2026 年 2 月
3. 白川 遼, 山下 裕介, 月崎 竜童, 西山 和孝, 強磁場中の高精度流束計算によるマイクロ波型電子源のプラズマ流体モデリング, 第 65 回航空原動機・宇宙推進講演会, 東京, 2026 年 3 月