

電気推進機放出プラズマ環境中の宇宙機周辺電位構造解析

Analysis of Potential Structure near Spacecraft in Electric Propulsion Plasmas

研究代表者：村中 崇信

(中京大学工学部・大学院工学研究科)

muranaka@sist.chukyo-u.ac.jp

研究分担者：波多野 裕大

(中京大学大学院工学研究科)

t22507m@m.chukyo-u.ac.jp

担当：3次元静電ハイブリッドPICコードによる計算機実験

研究目的 (Research Objective):

電気推進機 (Electric Propulsion: EP) は、従来の化学推進と比較して極めて高い比推力を有し、深宇宙探査機の主推進系から商用衛星の軌道制御まで幅広く利用が拡大している。しかし、スラスタ作動時に放出されるプラズマプルームが宇宙機構体へ逆流・衝突することで、表面損耗や帯電などの干渉現象を引き起こし、宇宙機の寿命や機能に直接的な影響を及ぼす可能性がある。例えば、小惑星探査機「はやぶさ2」に搭載された $\mu 10$ イオンスラスタにおいても、プルーム干渉の定量的評価は機体信頼性の観点から重要な解析課題となっている。このような現象の評価には地上実験が広く用いられているが、完全な宇宙空間環境を再現することは困難であり、数値シミュレーションによる定量的かつ高精度な評価が不可欠となる。特に、プルーム中で生成される電荷交換 (Charge Exchange: CEX) イオンの生成および逆流挙動を評価する際には、スラスタ出口近傍の高密度領域における物理過程のモデル化が重要となる。プルーム全体では平均自由行程 λ はスラスタ代表長より十分に長く、希薄流として扱うことができる。しかし、出口近傍では粒子密度の急激な増加により λ が大幅に短縮し、Knudsen 数 $K_n \approx O(1)$ の遷移領域が形成される。この領域では連続体近似が成立せず、粒子衝突がプルーム挙動に大きな影響を与える。本研究の目的は、スラスタ近傍の極端な密度勾配と強電位勾配が共存する領域において、粒子衝突過程と非線形電位構造を自己無撞着に再現可能な3次元Hybrid-PIC解析モデルを構築することである。本年度は、大規模解析に向けたコードの高度化と、スラスタプルーム再現条件における計算手法の妥当性確認を実施した。

計算手法 (Computational Aspects) :

本研究では、エンジニアリング用途を想定して開発された3次元静電Hybrid-PICコードを用いる。本手法ではイオンおよび中性粒子をマクロ粒子としてParticle-In-Cell法により追跡し、電子については時間スケールの短さを考慮して流体近似を採用する。電子は熱平衡状態にあると仮定し、Boltzmann分布に従うものとする。

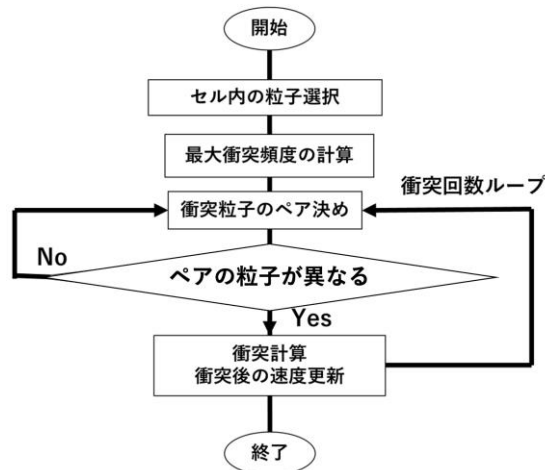


Fig. 1 衝突計算のフローチャート

静電場は Boltzmann 電子モデルに基づく非線形 Poisson 方程式を 反復解法により線形化し、その線形化方程式を SOR 法による反復計算によって求解する。本年度は、実用規模の高密度プルーム解析に向けて、以下の 2 点においてアルゴリズムの拡張を行った。

従来モデル(マクロ生成率モデル)の課題と DSMC モデルの実装： 従来の解析モデルでは、CEX イオンの生成を連続体近似に基づくマクロな生成率モデルによって処理していた。具体的には、各計算セルにおいてビームイオンおよび中性粒子の数密度を評価し、電荷交換断面積を用いた反応速度式から局所的な CEX イオン生成率を算出する。その後、各時間ステップにおいて算出された生成率に基づき、該当セル内に新たな CEX イオンを空間的に一様配置し、中性ガス温度に対応する Maxwell-Boltzmann 分布に従う初期速度を付与して放出するアルゴリズムを用いていた。しかし、このマクロな体積生成手法では、粒子レベルでの微視的衝突過程(衝突位置、散乱挙動、速度変化など)を直接表現することが困難である。そこで本年度は、スラスト近傍の高密度領域における微視的衝突過程をより忠実に再現するため、DSMC (Direct Simulation Monte Carlo) 法による粒子衝突モデルをコードに統合した。セル内の衝突回数は最大衝突数法によって評価し、粒子ペアの相対速度に基づく確率的な受理判定により衝突の有無を決定する微視的アルゴリズムを実装した。Fig.1 に衝突計算アルゴリズムのフローチャートを示す。

マルチタイムスケール積分(サブサイクル法)：DSMC 法の導入に伴い、複数粒子を時間発展的に同時追跡する必要が生じた。しかし、数 km/s の速度を持つビームイオンと、熱的速度を持つ中性粒子や CEX イオンでは要求される時間スケールが大きく異なる。これらを単一の時間刻みで計算することは膨大な計算コストを要する。そこで本研究では、時間刻みを

$$\Delta t_{neut} = K \Delta t_{beam}$$

と設定した。本解析では $K \approx 336$ とし、 K ステップごとに中性粒子の位置および速度を更新する手法を採用した。これにより中性粒子密度の非物理的減少を防ぎつつ、計算コストを大

幅に削減しながら物理的整合性を維持することが可能となった。主要な計算条件を Table 1 および Table 2 に示す。

研究成果および数値的課題の抽出 (Accomplishments)

前述の高度化を施したコードを用い、スラスト近傍を模擬したテスト解析を実施した。Fig.2 に CEX イオン分布を示す。本図は DSMC 衝突モデル導入による粒子衝突過程の再現性向上を確認するための結果である。DSMC モデルを用いた計算では粒子分布に空間粗さが見られるが、分布傾向は従来計算とおよそ一致する結果を得た。一方で、解析結果からプラズマ挙動に関する重要な数値的課題も明らかとなった。Fig. 3 にビームイオン分布を示す。本来、ビームイオンは電場に従ってほぼ直進的に輸送されるが、DSMC モデルを用いた計算ではビーム分布に非物理的な広がりが確認された。Fig. 4 に電位の空間分布を示す。電位分布は両計算結果で顕著な差がないが、詳細な数値検証の結果、この挙動は粒子衝突そのものによる物理的散乱ではなく、電位計算過程で生じる数値的不安定性に起因することが示唆された。特に、スラスト近傍の高密度かつ強電位勾配領域において、非線形 Poisson 方程式の求解過程における数値誤差が累積することが主要因であると考えられる。本コードでは電位計算において、Boltzmann 電子モデルに基づく非線形 Poisson 方程式を 反復解法により線形化し、その線形化方程式を SOR 法による反復計算によって求解している。しかし、高密度領域では電子密度が電位に対して指数関数的に依存するため、反復解法による線形化で得られるヤコビアン の勾配が急峻となり、SOR 反復計算の収束性が著しく低下する。この結果、局所的な電位計算に数値誤差が生じ、それに伴い電場分布にも数値的な誤差が発生する。従来モデルでは、ビームイオンを準定常と仮定し、まずビーム分布を得た後に数回の PIC 計算によって軌道修正を行っていた。一方、本研究で導入した DSMC モデルでは、衝突過程を取り扱うため、ビームイオンが準定常状態に至る過程においても PIC 計算を繰り返し実行する必要がある。その結果、電位・電場計算が実行される回数が従来モデルに比べて大幅に増加し、各ステップで生じる数値誤差が時間発展の過程で累積しやすくなる。さらに、準定常仮定に基づく従来モデルでは計算対象とならなかったビームフロント近傍の急峻な密度勾配領域においても電位計算を行う必要が生じるため、非線形 Poisson 方程式の収束性が一層悪化している可能性がある。この電場誤差がビームイオン軌道に影響を与え、最終的にビーム分布の過度な広がり(数値的異常拡散挙動)として現れていると解釈される。以上より、スラスト近傍の極端な密度勾配条件下では、従来の Poisson ソルバ体系では数値的ロバスト性が十分ではないことが示唆された。

まとめと今後の展望 (Summary and Future Prospects)

本年度の研究により、DSMC 衝突モデルおよびサブサイクル法を Hybrid-PIC コードへ統合し、高密度プルーム領域を対象とした粒子衝突過程の数値解析が可能となった。一方で、スラスト近傍の高密度・強電位勾配領域では、非線形 Poisson 方程式の求解過程に起因する数値的不安定性が顕在化することが明らかとなった。今後

は、基準電位シフトによる指数項の安定化、SOR 緩和係数の最適化、および収束判定条件の再設計などの数値安定化手法を導入し、Poisson ソルバのロバスト性向上を図る予定である。これらの改良により数値的安定性が確立された後、大規模計算機を用いた宇宙機全体系の 3 次元プルーム干渉解析へと展開する予定である。

Table 1 スラスタパラメータ

イオン種	Xe+
イオン源/電子源 直径, cm	10
イオン源/電子源 流量, sccm	3.0
イオン源電離度, %	90
ビーム電流, mA	170
ビーム加速電圧, V	1500
ビーム発散角, deg	24
中性ガス温度, K	500
電子温度, eV	3.0

Table 2 計算パラメータ

計算領域, cm	$500 \times 250 \times 250$
格子長, cm	5
計算格子数	$100 \times 50 \times 50$
衛星サイズ, cm	$50 \times 50 \times 50$
超粒子 1 個の実粒子数	1.0×10^8
基本時間幅, s	0.017×10^{-6}
サブサイクル比	336
時間幅, 10^{-6} s	0.017 / 7.2
ビーム/CEX・中性粒子	

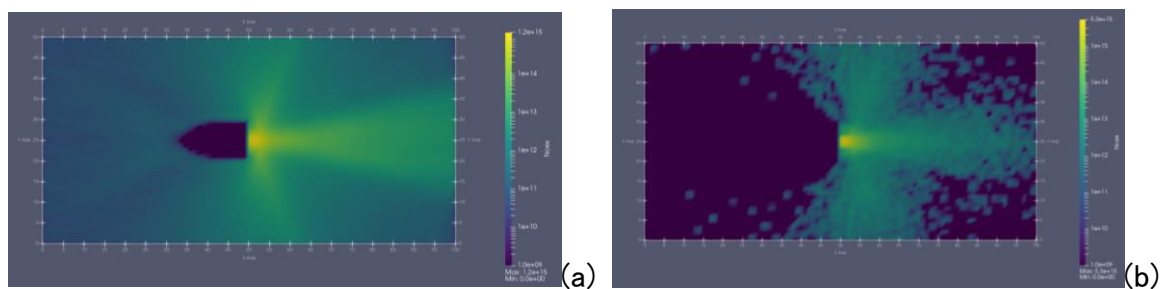


Fig. 2 CEX イオン分布の計算結果. (a)従来モデル、(b)衝突モデル

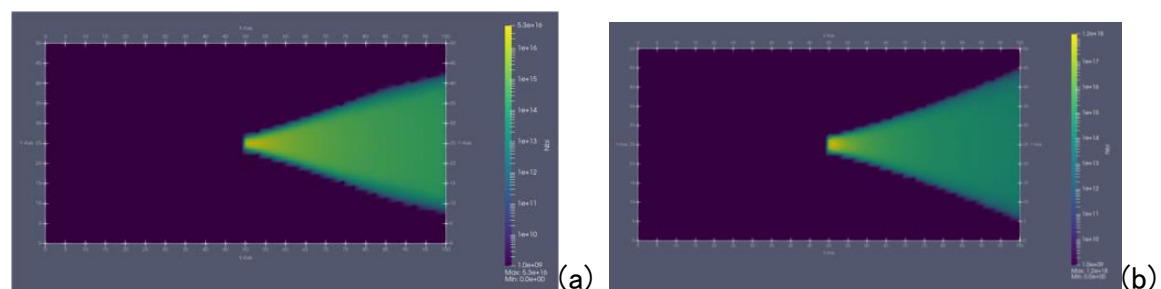


Fig. 3 ビームイオン分布の計算結果. (a)従来モデル、(b)衝突モデル

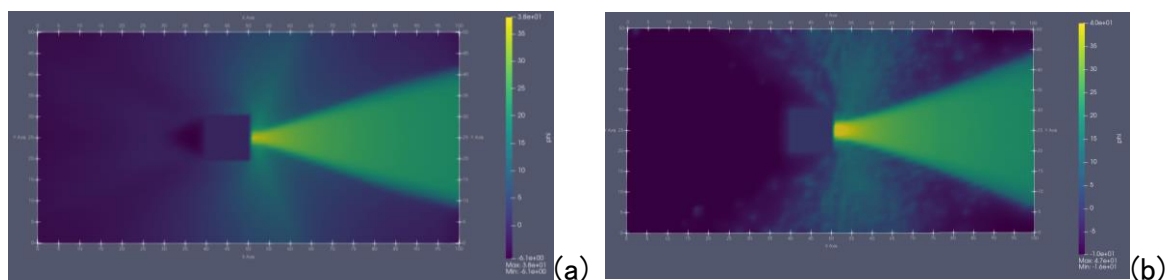


Fig. 4 電位分布の計算結果. (a)従来モデル、(b)衝突モデル