

イオンスラストダイナミクスの向上：アルゴン推進イオンエンジンの 2 次元円筒 PIC シミュレーション解析

Improving Ion Thrust Dynamics: 2D Cylindrical PIC Simulation Analysis of an Argon-Propelled Ion Engine

研究代表者： Hu Zefeng（九州大学大学院総合理工学府総合理工学専攻プラズマ・量子メイジャー）

研究分担者： 山本直嗣（九州大学大学院総合理工学研究院エネルギー科学部門）
担当：二次元円筒座標系を用いて新しいアルゴリズム開発、計算機実験及び計算結果の理論的検討

研究目的 (Research Objective):

本研究の目的は、宇宙探査におけるイオンエンジン用推進剤としてアルゴンの有効性を評価し、そのイオン化過程およびプラズマ特性を詳細に解析することにあります。これまで、イオンエンジンには高価で希少なキセノンが主に使用されてきましたが、そのコストと供給の制限は長期間の宇宙ミッションにおける課題となっています。アルゴンはその代替候補として注目されており、豊富かつ安価であることから、経済的かつ持続可能な推進剤としての可能性を秘めています。

本研究では、イオンエンジンの放電室内におけるアルゴンのイオン化過程を数値シミュレーションにより再現し、そのプラズマ挙動を定量的に分析します。また、得られた結果をキセノン推進剤と比較することで、アルゴンの性能と適応可能性を明らかにすることを目的としています。これにより、アルゴンを用いたイオン推進システムの実現性とその利点を科学的に検証し、火星探査などの長距離宇宙ミッションへの応用可能性を探ります。

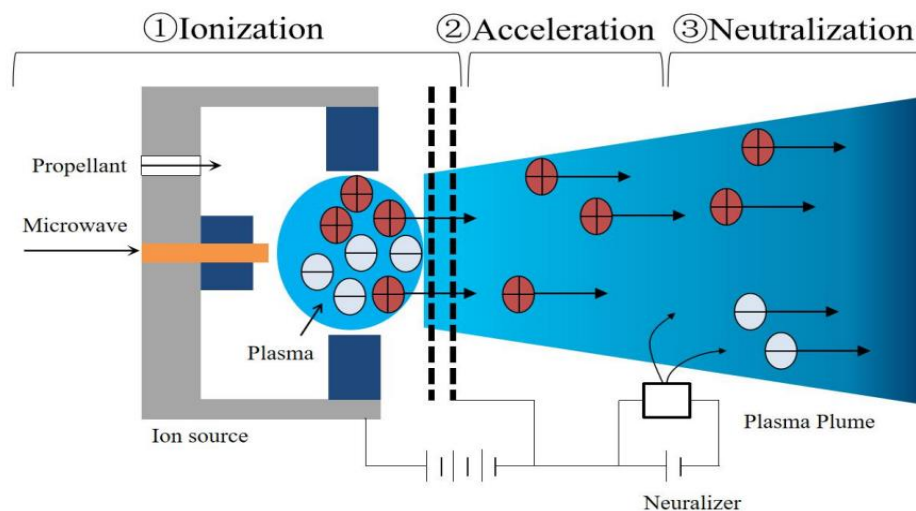


Fig.1 イオンエンジン放電室の概略図

計算手法 (Computational Aspects):

本研究では、イオンエンジンの複雑なプラズマ物理現象を高精度で再現するために、有限差分時間領域法 (FDTD) とパーティクル・イン・セル法 (PIC) を組み合わせたシミュレーション手法を採用しています。従来の 3 次元モデルは高い再現性を持つ一方で、膨大な計算リソースが必要となるため、現在は計算効率と精度のバランスを考慮し、2 次元軸対称 (RZ) 座標系に基づく FDTD-PIC コードを開発・使用しています。

この手法は、円筒形状を持つイオンエンジン構造を効率的に模擬することができ、プラズマの空間的および時間的な挙動を高精度で解析可能です。また、アダプティブメッシュリファインメント (AMR) 技術を用いて、重要領域における計算精度を確保しつつ、全体の計算負荷を削減しています。

スーパーコンピュータ A-KDK の並列処理機能を最大限活用し、複数ノードへの計算タスクの分散処理を行うことで、計算時間の大幅な短縮を実現しています。データ管理については、効率的なフォーマットと定期的なバックアップにより、大容量のシミュレーションデータを安全かつ効果的に管理しています。

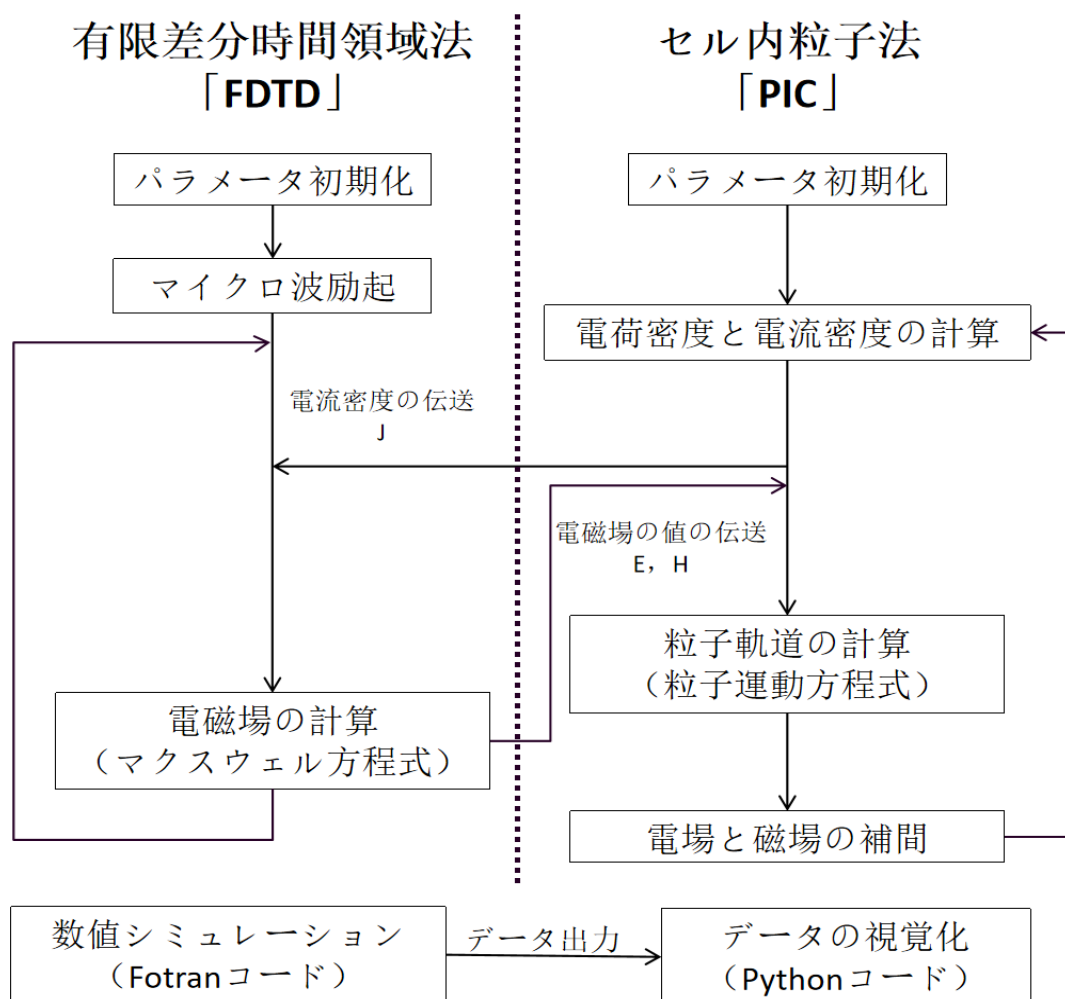


Fig.2 FDTD-PIC アルゴリズムの全体構造

研究成果（Accomplishments）：

本研究では、従来の 3 次元モデルから、より効率的な 2 次元軸対称モデルへの移行を成功させました。これにより、計算リソースの制約下でもプラズマの本質的な挙動を精度高く再現することが可能となりました。特に、アルゴンを用いた放電室内のプラズマ生成およびイオン化過程の数値的再現において、有意義なシミュレーション結果が得られつつあります。

本研究では、イオンエンジンの放電室モデルにおいて、2 次元 FDTD-PIC シミュレーションを実施し、プラズマ挙動の定量的かつ定性的な解析を行いました。電子数密度分布および電場強度分布については、既存の実験結果および他のシミュレーション結果との比較により、定性的な妥当性が確認されました（図 3・図 4）。

さらに、シミュレーションコードの精度検証の一環として、エネルギー保存性のテストを実施しました。特定領域（赤枠）を対象とし、エネルギーフラックス、電子の運動エネルギーの変化、および電場エネルギーの変化を用いて瞬時電力を算出し、エネルギー保存が定量的に検証されました（図 5）。この検証により、本シミュレーションコードの物理的信頼性が確認されました。

システム開発面では、格子間隔 0.00001 m の高精度メッシュを用いたシミュレーション系を構築し、すべての機能モジュールが正常に動作し、所望の物理パラメータを出力することを確認しました。ポテンシャル給電および境界条件に関する問題も、コードの継続的な見直しと検出点の設定により解決しました。特に、高次 PML（Perfectly Matched Layer）境界条件を導入し、従来の Mur 吸収境界条件に代えて電磁波吸収能力を大幅に向上させました。給電方式に関しても多様な方法を試行し、FDTD における給電メカニズムの理解が深まりました。

これにより、本研究で開発された 2 次元 FDTD-PIC シミュレーションシステムは有効に機能し、その妥当性が実証されました。現在の 20 ns までのシミュレーションでは、プラズマは定常状態には達していないため、さらなる計算を通じて定常状態の達成を目指しています。A-KDK 上での最適化された MPI 並列化により、20 ns のシミュレーションは 34 時間で完了可能であり、100 ns のシミュレーションは約 168 時間（1 週間）で完了できると見積もられています。

今後の展望としては、以下の異なる運転条件下での比較解析を予定しています：

使用ガスの違い（キセノン、アルゴン、ヘリウム）

質量流量の違い（0.05 sccm ～ 0.25 sccm）

入力電力の違い（1.00 W ～ 5.00 W）

また、アンテナ付近、磁場管内部、放出口付近といった異なる領域における電子エネルギー分布関数（EEDF）および電子獲得エネルギー分布関数（EEGF）を解析することで、放電室内のプラズマ挙動に関する理解をさらに深める予定です。

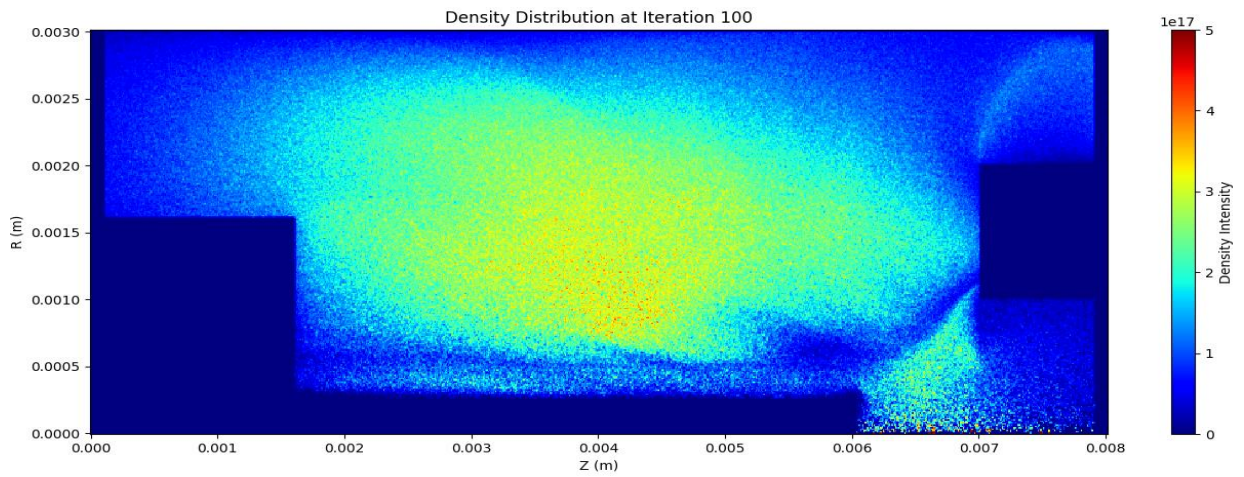


Fig.3 電子数密度分布スナップショット[4.00 ns]

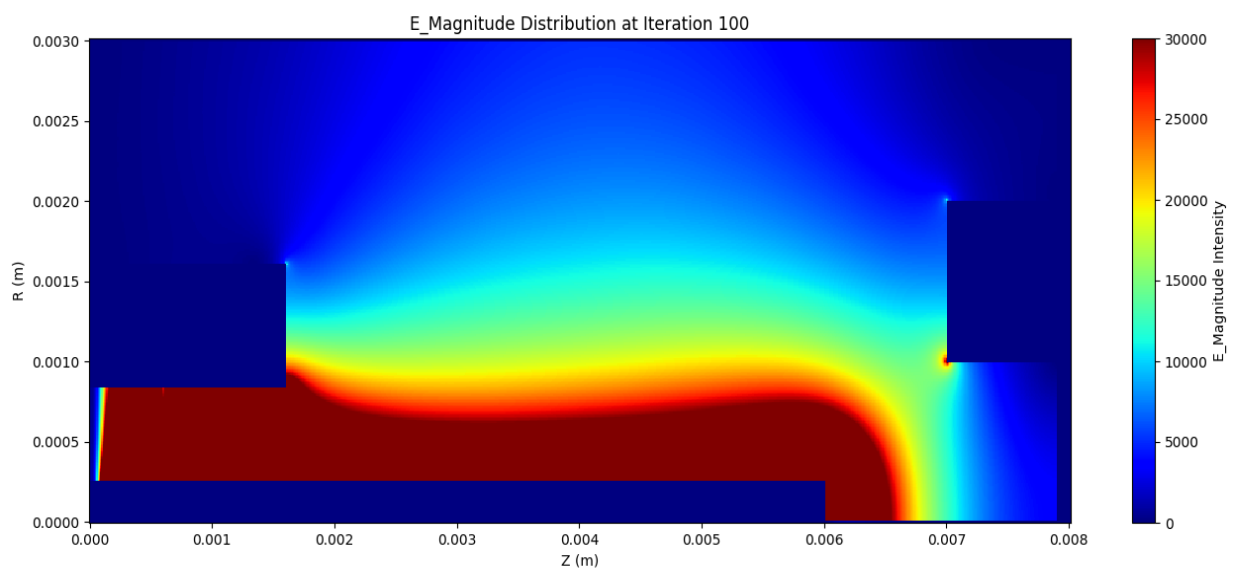


Fig.4 電場強度分布スナップショット[4.00 ns]

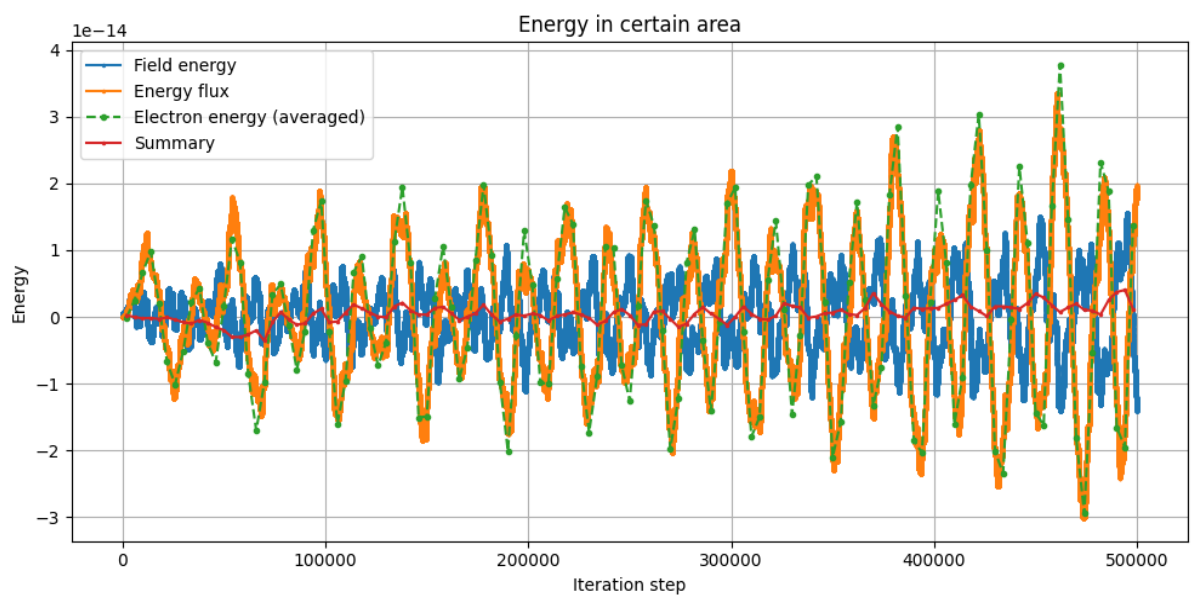


Fig.5 エネルギー保存曲線（粒子付け）

公表状況 (Publications) :

(論文) [Proceeding][33rd ISTS]

MS.No. : 220114

Title : Research on Ion Engine Alternative Propellants Based on Numerical Simulation

Authors : ZEFENG HU, Naruya Hiroike, Naoji Yamamoto, Taichi Morita, Yuji Koide

Corresponding Author: ZEFENG HU

(口頭)