



学位論文審査結果の要旨

博士(工学)申請者 宮崎 洋平

審査委員

主査 北守 一隆
副査 豊田 国昭
副査 太田 佳樹
副査 澤田 孝幸
副査 佐鳥 新

モンテカルロシミュレーションによるイオンスラスターの 弱電離プラズマ制御に関する研究

本論文は、クリティカルな宇宙ミッションにおいて主推進・姿勢制御に用いられるマイクロ波放電型イオンスラスターを対象とした、限られた実験期間内での動作安定性をより確実にするための精緻なシミュレーション技術開発に関するものである。「北海道で設計され、開発され、製造される」小型衛星として注目を集めている北海道衛星一号機「大樹」にも小型マイクロ波エンジンが軌道維持用に搭載されており、これからの小型宇宙用推進機の需要が期待されている。イオンスラスターは高比推力、精密な推力制御に加え、マイクロ波放電型は放電電極を備えていないため放電電極の磨耗が無く、長寿命が期待できると同時に単純なシステム構成で信頼性の確保・向上を目指せる利点を持つ。マイクロ波放電型イオンスラスターの課題として、推進性能が直流放電型に劣ることが挙げられ、性能向上のため改良がなされているが、新規に開発したスラスターの長期安定性能の確認には長い実験期間を要する。宇宙ミッションにおいては、軽微な故障であってもプロジェクト全体の失敗となり多大な損失を生むため、スラスターの安定な性能の確認は実用に際して慎重かつ精緻な検証が不可欠である。精密な数値シミュレーションを基に実験を進めることにより、より短い時間でも安定性能の信頼性を飛躍的に高めることが可能である。主推進・姿勢制御機構の適正な制御は、スラスター内の形状を正確に考慮しマイクロ波による時間変化をともなう局所に集中した電磁界下の弱電離プラズマ生成の構造を明らかにし、起こりうる問題と性能向上のための設計指針を得ることによりなされる。プラズマ構造のシミュレーションとして、粒子モデル・流体モデルおよびそれらの利点を取り入れたハイブリッドモデルが提案されており、粒子モデルにおいては多数の粒子を超粒子として代表させるPIC (Particle-in-Cell) 法が広く用いられている。電磁流体力学モデルにおいては、位置-速度の六次元空間での粒子の流れとして扱うボルツマン方程式による解析、六次元での解析を簡略化するために速度空間で積分をすることにより得られる複数の連続の方程式を連立して数値解を得る方法が用いられている。解の信頼性に大きく影響を与える要因となる境界条件に対してはPIC法、流体モデルおよびハイブリッドモデルは必ずしも適切でない。粒子モデルにおいても、超粒子として扱わず個々の粒子の衝突時間を衝突確率から求め、電磁界中の軌道計算の中で境界の物理条件を考慮するモンテカルロ法のみが厳密な解を導き、本シミュレーションにおいて用いている。しかし追跡に用いるテスト粒子を指定の位置・時間でサンプルするときの統

計変動による解の信頼性低下が問題となるばかりではなく、解の不安定性にまで影響が出てくるため十分な個数が必要となる。このため流体モデルの手法とくらべ数百倍以上の計算時間を要することからPIC法が実用的とされていた。本論文では、計算時間を抑えて精度を保つことが可能なLPWS（ルジャンドル多項式重み付サンプリング）法を適用し、新しくスプライン関数表現を用い精度を高める方法を示した。実用レベルでは欠かせないプラズマ発生時に生ずる荷電粒子による内部電界を、ポアソン方程式を用い高速に計算することにより数値的不安定性を回避する必要があった。優れた業績の一つとして、LPWS法で得られたスプライン関数表現とポアソン方程式の線形性から高速計算法を導き、従来にくらべて飛躍的な精度の向上につながる技法を提案している。

本論文は5つの章からなり、以上の背景に基づき論考している。

第1章は序論で、本論文の背景、イオンスラスタについて実験とシミュレーションに関する従来の研究、本論文の目的と各章の構成について述べられている。

第2章において、モンテカルロ法によるプラズマシミュレーションの方法について述べられている。イオンスラスタにおいて、効率の良い荷電粒子生成を実現するためにプラズマ特性を把握することが重要である。イオンスラスタでは、永久磁石で構成される磁界中へのマイクロ波の進入による相互作用で生ずる電磁界下での、いくつかの正確な位置境界上での物理条件を考慮したプラズマの精密な制御が必要とされ、プラズマの構造を決定づける粒子レベルの運動、反応過程を理解することが重要となる。本章ではシミュレーションモデルの説明、電子の飛行時間の決定方法、Null Collision法を用いた衝突判定方法および電子の散乱に関する計算として軌道の計算方法について述べている。

第3章において、サンプリング法と高速電界計算法について述べられている。プラズマ解析に用いられるモンテカルロシミュレーションは、従来統計変動を抑えるために試行回数を増やさなければならず、計算時間およびメモリの消費量が大きくなり実用上の課題が残されていた。計算時間の短縮とサンプリング精度向上のために、サンプリング時の粒子数による統計変動を抑えることで、計算時間の短縮とサンプリング精度の向上のためにVentzekらが提案している詳細なサンプリング方法であるLPWS法の適用方法を示している。LPWS法は、ルジャンドル多項式により重み付サンプリングすることで、分布関数のルジャンドル直交展開の係数が得られ、統計変動を抑えたサンプリングを示した。さらにLPWS法から得られる区間の情報を満たす形式によりスプライン関数の区間表現とすることで精度を向上させるとともに、スプライン関数とポアソン方程式の線形性による高速電界計算法を示している。その適用により弱電離プラズマシミュレーションに欠かせない荷電粒子の動きによる内部電界の変化を考慮したセルフ・コンシステントシミュレーションを行い、従来の電界計算法と比べ大幅な高速化がなされることを示している。

第4章においては、テストシミュレーションとして電磁界下での荷電粒子の運動に関する考察が行われている。実際のスラスタに対するシミュレーションの準備段階として、リング状の永久磁石が配置されたスラスタの形状を考慮しマイクロ波による時間変化をとまなう局所に集中した電磁界下のイオン生成を決定する電子密度分布を求め十分実用の可能性があることを示した。

第5章は結論であり各章のまとめが述べられている。

以上本論文において、クリティカルな宇宙ミッションを成し遂げるための精緻なシミュレーション技術をマイクロ波放電型イオンスラスタに対して示し、初めて実用段階でのシミュレーションの可能性を切り開いた点が大きく評価される。また、これらの新規性は将来型輸送システムとしての基盤となる宇宙工学およびシミュレーション工学分野に資するところ大である。よって、論文著者は博士（工学）の学位を授与される資格があるものと認める。