

# 学位論文内容の要旨

北海道工業大学大学院工学研究科

機械システム工学専攻

博士課程

機械システム制御部門

申請者氏名 宮崎 洋平

## 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

近年、小型衛星の主推進・姿勢制御として従来よりも小さな宇宙用推進機の需要があり、PPT(Pulsed Plasma Thruster)や FEED(Field Emission Electric Propulsion)などの小型電気推進機とともに小型マイクロ波放電型イオンスラスターの研究開発が進められており、「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いる。イオンスラスターは高比推力、精密な推力制御が行え、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・向上において有利である。長期安定性は、すでに小惑星探査機「はやぶさ(MUSES-C)」に搭載されたイオンスラスターにおいて 18,000 時間以上の耐久試験と宇宙空間での運用から実証されている。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期間を要する。スラスターの安定な性能の確認は、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、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できる。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ま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・流体モデルが代表的なものとして提案されており、粒子モデルによるシミュレーションでは追跡する粒子数が少ないと統計変動の影響を強く受け望む精度の解が得られにくい。PIC 法では多数の粒子を超粒子として代表させている。電磁流体力学モデルにおいては、粒子の多体問題と捉え現象を近似している。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、境界上での適正な物理条件を設定できるモンテカルロ法を本研究では用い、精度を保つための LPWS 法を適用することで問題となる統計変動を抑えている。また、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の変化を常に考慮するため、ポアソン方程式による高速な電界計算法が必要となり、本研究ではスプライン関数表現を組み込んだ LPWS をポアソン方程式に適用することにより

高速な電界計算法を提案している。

本論文は5つの章からなり、各章の概要は以下の通りである。

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ている。

第2章においては、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ている。イオンスラスタにおいて、効率の良いイオン生成を実現した設計の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、電界及び永久磁石から形成される磁界が組み合わさった複雑な体系であるため、プラズマの精緻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り、本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章においては、サンプリング法と高速電界計算法について述べる。プラズマ解析の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計算が困難とされており、計算時間減少とサンプリング精度向上が求められる。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、計算時間の減少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けサンプリングすることで、ルジャンドル直交展開の形式による分布関数として結果が得られ、区間分割によらずサンプリングが行えるため、粒子数が少なくとも統計変動を抑えたサンプリングを可能としている。さらに、LPWS 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、その適用により精緻な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り常に変化する内部電界の考慮に関して、従来の電界計算法と比べ大幅な高速化がなされた。

第4章においては、電磁界での荷電粒子の運動を取り上げた。磁界を考慮したプラズマ現象を明らかにするために必要とされる電界と磁界が任意の角度で交差する場でのシミュレーションを、特にイオンスラスタの推進剤に用いられることが多い Ar、Xe ガスについて行い、シミュレーション結果となる荷電粒子の輸送パラメータとして、0~90 度に至るまでの  $x$ ,  $y$ ,  $z$  軸方向の平均速度、平均エネルギー、平均衝突周波数および LPWS 法を用いエネルギー分布について考察した。また、マイクロ波放電型イオンスラスタのプラズマ生成のシミュレーションとして、スラスタ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まなう局所に集中した電磁界下の弱電離プラズマシミュレーションを行いその結果について報告を行った。

第5章は結論であり各章のまとめを行った。

以上本論文において、イオンスラスタのさらなる性能向上、改良のためにプラズマ生成シミュレーションについて放電室内の磁場形状及び放電室壁について物理的境界を精緻に考慮し、LPWS により統計変動を抑える方法を示すとともに、より実用的なシミュレーションへの発展の布石として、LPWS による分布のスプライン関数表現とポアソン方程式との連携によりサンプリング結果から高速に内部電界を計算する方法を示した。本研究で示された高精度化及び高速化に寄与するシミュレーション技法は、実験との連携によりイオンスラスタの性能向上に大いに役立つと考えられる。