

審査の結果の要旨

氏名 王 哲旭

修士（工学）王 哲旭 提出の論文は、**High-order semi-Lagrangian type Vlasov solver for ion flow simulation in Hall thrusters**（ホールスラスタにおけるイオン流れの計算のための高次精度セミラグランジュ型ブラソフ解法）と題し、5章から構成されている。

電気推進機内部でみられる希薄プラズマ流の数値シミュレーションにおいて、ほぼ無衝突のイオンの流れは粒子モデルに基づく **Particle-in-cell (PIC)** 法を用いて計算されることが多いが、PIC 法では限られた計算粒子数による統計的ノイズが生じ、計算精度や収束性を悪化させるなどの問題があった。一方、無衝突ボルツマン方程式であるブラソフ方程式を連続体モデルで計算する解法では、統計的ノイズを生じることなく希薄気体流れを計算可能なため、これをイオン流れの計算に用いることで、例えば放電振動現象などを高精度かつ短時間で計算できる可能性があった。

本研究では、イオンの流れをブラソフ方程式で記述し、電子の流れを拡散方程式で記述するハイブリッドモデルを開発し、このモデルに高次精度の計算手法を適用することで、ホールスラスタにおける放電電流振動について高精度かつ短時間で数値シミュレーションを実現することを目的としている。

イオンに関するブラソフ方程式に対しては、質量保存型セミラグランジュ法と4次精度 WENO 法を組み合わせた解法を提案し、開発したブラソフ方程式解法が高次精度でありながらも数値振動や統計的ノイズを生じないことを、種々のテストケースについて検証計算を行って示している。さらに、イオンの高次精度ブラソフ方程式計算と、電子流体計算を連成させた独自のハイブリッドブラソフモデルによってホールスラスタ内部の放電プラズマの1次元シミュレーションを行い、実験で見られる放電電流振動を再現している。さらに、このハイブリッドブラソフモデルは、従来の PIC 法と電子流体計算を組み合わせたハイブリッドモデルと比較して、統計的ノイズのない放電プラズマ解析を実現し、定常的な電流振動の波形を短時間で計算可能であることを示している。

第 1 章は序論であり、ホールスラストのプラズマに代表されるようなクヌッセン数が 1 前後の流れに適用される各種数値シミュレーション手法を概説するとともに、ホールスラストに見られる放電振動現象に関する数値シミュレーションについて先行研究をレビューし、その問題点を指摘しつつ、本研究では、速度分布関数の変化を連続体近似で表現するブラソフ方程式の解法として、高次精度で、統計ノイズが無く、広範な密度変化があっても適用可能な計算スキームを開発することを目的とすると述べている。

第 2 章では、ブラソフ方程式の解法として、質量保存型セミラグランジュ法である 3 次精度 Constrained Interpolation Profiles Conservative Semi-Lagrangian (CIPCSL3)法の優位性を述べ、その流束計算において 4 次精度 WENO リミッタを組み入れた CIPCSL3 法を提案し、2 次精度 TVDCW リミッタを組み合わせた方法と併せて定式化を行っている。

第 3 章では、前章で開発した CIPCSL3 法を、解析解が存在する、あるいは従来の多くの研究により検証されている様々なケースについて適用し、手法の計算精度、格子収束性、不連続面の追従性を検証し、さらに従来の PIC 法と比較することによって、PIC 法では取り除くことができない統計ノイズがほぼ完全に除去できることを示している。

第 4 章では、提案した計算スキームのホールスラスト放電振動現象の 1 次元解析への適用を試みている。イオンと中性粒子の流れについては CIPCSL3 法を適用し、電子の流れについては 2 次精度流体モデルを用いて計算した結果、PIC 法と 2 次精度電子流体モデルを組み合わせたハイブリッド法と比較して、統計ノイズが除去されただけでなく、同じ時間刻みに必要な CPU 時間に大きな差は生じないものの、仮定した初期状態から定常振動状態に収束するまでの時間が大幅に短縮され、さらに放電振動の最中に粒子密度が大きく減少するタイミングでも計算が壊れることが無く、広い作動パラメーター（例えば印加磁場の磁束密度）の範囲で計算が可能であることを示している。

第 5 章は結論であり、本研究で得られた成果をまとめている。

以上要するに本論文は、従来の粒子法と比較して統計ノイズの無い質量保存型セミラグランジュ法を高次精度化し、ホールスラストの放電振動問題に適用して、高次精度電子流体計算との連成によって高速かつ高精度なプラズマ流解析を実現したもので、今後の推進機開発における有用性も高く、航空宇宙工学、特に電気推進分野に貢献するところが大きい。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。