

## 審査の結果の要旨

氏名 川嶋 嶺

博士（工学）川嶋 嶺 提出の論文は，“A hyperbolic-equation system approach for electron fluid calculation and its application to Hall thruster analyses”（邦題「双曲型方程式系による電子流体計算とホールスラスト解析への応用」）と題し、6章及び付録から構成されている。

電気推進機等で見られる強く磁化されたプラズマ流の解析において、正イオンの流れと、それに比べて質量が桁小さな電子の流れは別々に扱われることが多いが、この際電子の移動度は磁力線に平行な方向に卓越するという特徴があり、その数値計算は容易ではない。さらに、近年ホールスラストで用いられる複雑な形状の磁場が印加されたプラズマの流れを適切に解析するためには、二次元で電子流の保存則を精密に解くことが求められている。本論文の目的は、強く磁化された二次元の電子流保存則を高精度で速く、かつ安定的に計算できる手法を考案することである。

プラズマ中の電子の流れは拡散現象が主体となるため一般的に楕円型方程式を用いて記述されるが、電子が強く磁化された場合には異方性拡散の成分が計算を硬直化し、交差拡散の成分が陰解法における係数行列の対角優位性を損ない、計算を不安定にするという数値計算上の難しさがあった。この難しさを回避するために、本論文では楕円型方程式を、それと等価な双曲型方程式系に変換し、風上差分を適用することで安定に計算するという新しいアプローチを提案している。さらに、風上化を行う際に双曲型方程式系が複雑で流束ヤコビ行列の固有値が求まらないため、各流束を物理的類似性から4種類の流束に分離し、それぞれの流束を異なった手法で風上化するという独創的な計算手法を提案している。磁化電子流体を解析する検証計算やホールスラスト内部プラズマ流解析への応用を通して、提案手法の計算効率、精度、そして実用的なプラズマ流解析への適用性を議論している。

第1章は序論であり、ホールスラスト等に現れる磁化プラズマ流体の特徴について概説し、特に磁化電子流体の多次元数値解析における課題を明確にした上で、本論文の目的を述べている。

第2章は理論であり、準中性プラズマ中の磁化電子流体の基礎方程式を導出している。その際、導出過程に用いる仮定を詳説し、モデルの適用範囲を述べている。

第3章では、異方性の強い拡散方程式の数値計算上の問題点を明らかにした上で、その問題点を解決する手法として、本論文の主題である双曲型方程式系を用いた解法を提案している。磁化電子流体の質量保存式及び運動量保存式からなる異方性拡散問題を解析する検証計算を行い、双曲型方程式系を用いた解法では、異方性拡散項に由来する硬直性の問題及び交差拡散項に起因する数値不安定の問題が解決され、各保存則を満たして安定かつ高速な計算が可能であることを示している。さら

に擬似時間発展を用いた計算手法の妥当性について、非圧縮性流体解析における擬似圧縮性解法とのアナロジーから考察している。

第4章では、磁化電子流体のエネルギーを含めた全保存則に対応する双曲型方程式系を構築した上で、計算安定化と高精度化を実現するため、流束分離法、種々の風上差分法、そして高次精度スキームを統合した独創的な計算手法を提案している。磁化電子流体の全保存式を解析する検証計算を行い、磁場によるプラズマ閉じ込め効果を正確に再現した高精度な計算が可能であることを確認している。

第5章では、前章で提案した双曲型方程式系を用いた磁化電子流体の計算手法をホールスラスト解析に応用し、その実用性を実証している。実在の推進機を対象に、イオンを粒子として運動論的に扱い、磁化電子流体計算と連成させる PIC-Fluid Hybrid 法を用いて解析を行ったところ、ホールスラストにおける主要なプラズマの特徴や壁面シース条件を適切に反映した計算結果が得られ、双曲型方程式系を用いた電子流体の計算手法は、イオン流や壁面シースとの連成解析においても正確な計算が行えることを確認している。

第6章は結論であり、本論文で得られた成果をまとめている。

付録では、論文中で用いられた数値流体力学に関連する計算技法について説明している。

以上要するに、本論文は、異方性拡散現象が主体となる磁化電子流体計算に対して、双曲型方程式系を用いた新しい計算手法を提案し、それを発展させたものであり、提案手法の高い計算効率、計算精度、及び実問題への適用性を実証しており、航空宇宙工学における電気推進分野及びプラズマ流体力学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。