

# 論文審査の結果の要旨

氏名 松本 洋介

速度勾配層において成長する Kelvin-Helmholtz (K-H) 不安定性は、大気・海洋現象から天文学的現象に及ぶ幅広い分野において研究がなされてきた。太陽風・地球磁気圏においては、低緯度境界面(LLBL)において K-H 不安定性の発達を観測されている。この K-H 不安定性は渦を介した運動量輸送にとどまらず、太陽風プラズマの磁気圏への輸送・混合にも重要な役割を果たしているとする多くの観測的示唆がある。しかしそれらは「状況証拠」とどまり、それを裏付ける理論的根拠がなかった。この理論的解明の遅れは、K-H不安定性は流体的な不安定性であるにもかかわらず、輸送・混合の解明にはプラズマの粒子性の考慮が必要であることに起因する。

本論文はまさにこの理論的根拠を提供しようとするものであり、プラズマ中での K-H 不安定性を、電磁流体シミュレーションと、プラズマを構成するイオン・電子を全て粒子的に追跡する粒子シミュレーションの両方の手法により扱い、輸送・混合過程について新しい知見を得ている。全体は概要(第一章)、まとめ(第五章)を含む五章構成であり、二つのappendixからなるが、中核となるのは二章から四章であり、以下、各章ごとに内容を述べる。

## (第二章)

まず、基本的な設定の下での K-H 不安定によるプラズマの輸送・混合について理解するため、一様垂直磁場配位の下、粒子シミュレーションによる解析を行った。その結果、イオン、電子共に混合領域の広がりやの時間発展は、K-H 不安定の時間発展による境界線の長さの伸びと境界線に対して垂直方向の古典的拡散の二つのメカニズムの組み合わせによって説明できること示した。さらに、ラーマー半径の小さい電子の混合はイオンに比べて効率が悪いとの予想を覆し、電子混合領域はイオン混合領域を追随するように増加していることを見いだした。そして、その電子の効率的混合はイオンと電子の運動の差によって励起された静電波モード内での電子の拡散が原因であるとする結論を得た。

## (第三章)

密度非一様が大きい場合、その中での K-H 不安定性の発展とそれに伴うプラズマ輸送・混合過程は密度一様な場合とは本質的に異なる可能性がある。論文提出者はこの点に注目し、密度非一様(密度成層)プラズマ中での K-H 不安定性について研究をおこなった。**電磁流体シミュレーション**: 密度成層中の K-H 不安定性の非線形発展は密度比に依存することを示した。密度比が十分大きい場合、K-H 不安定性の渦の周辺においては二次的 K-H 不安定性が成長し、渦の内部においては二次的 Rayleigh-Taylor(R-T)不安定性が成長する。さらにこれら二次的不安定性が種となり強い乱流へと発展する。これまでの K-H 不安定性の流体計算においては、3次元性による2次的不安定が発生し、乱流に移行することが知られていたが、2次元平面内の R-T 不安定性による乱流への移行を示したのは本研究

が初めてである。

**粒子シミュレーション：**電磁流体計算の結果を踏まえて、粒子シミュレーションを行った。その結果、粒子的効果により電磁流体過程よりも早い段階で渦の外側で2次的 R-T 不安定性が成長することを示すとともに、乱流の発生による粒子の輸送・混合の定量的評価を得た。また、乱流エネルギーの高波数への輸送は [イオンのラーマー半径]<sup>-1</sup>のスケールで止められることを明らかにした。

#### (第四章)

第三章で明らかにした密度非一様なプラズマ中での乱流輸送過程についての結果を踏まえ、磁気圏低緯度境界面の構造の朝夕非対称性の可能性について研究を行なった。夕方側境界面は磁場と渦度の内積が正になる正勾配であり、朝側は内積が負となる負勾配であるという違いがある。電磁流体的にはこの正負は物理過程に影響を与えないが、プラズマの粒子性を通じて非線形発展に寄与する可能性がある。粒子シミュレーションによりこの可能性が現実のものであることが示された。すなわち、朝側では二次的 R-T 不安定性がイオンの有限ラーマー半径効果によって妨げられ、太陽風プラズマの混合が抑えられる。一方、夕方側では二次的 R-T 不安定性は妨げられず効率的に混合が促進される。これらの結果は、太陽風プラズマの磁気圏内への輸送・混合において勾配の符号が支配的であるとする新しい知見をもたらした。

以上をまとめるに、本論文提出者は太陽風 — 地球磁気圏相互作用の観点から、密度非一様性を持つプラズマ中での K-H 不安定性の非線形発展について研究を行ない、それに伴う輸送・混合過程について重要な新しい成果を挙げた。本論文には、星野真弘氏との共著論文の内容が含まれるが、本論文提出者が主体となって研究遂行したものであると認められる。

以上により、審査員一同は、博士（理学）の学位を授与するに十分値するものと判定した。