

審査の結果の要旨

氏名 河合 智賀

本論文は「自己組織化により磁化プラズマの電子乱流に生じる構造形成の機構解明に関する研究(The mechanism of structure formation through self-organization in electron-scale magnetized plasma turbulence)」と題し、6章から成っている。

第1章の序論では本研究の背景と位置付けを説明している。核融合炉心プラズマ閉じ込め研究ではイオンや電子の温度勾配に起因した乱流輸送が重要な役割を果たしている。本論文では電子スケール乱流に着目し、ジャイロ運動論シミュレーションを用いて電子温度勾配(Electron Temperature Gradient : ETG)乱流による構造形成機構の解明を目的としている。

第2章ではジャイロ運動論に関する理論的な背景を説明している。核融合プラズマのような無衝突系の磁化プラズマで基礎となるジャイロ運動論オーダリングを取り込んだ5次元位相空間のジャイロ運動論方程式系を説明している。さらに、2次元系プラズマ乱流の基本となる流体モデル Hasegawa-Mima(H-M)方程式を紹介し、自己組織化現象の理論的な枠組みを説明している。

第3章では2次元系乱流における大域的な構造の形成に関して述べている。磁化プラズマでの2次元系乱流は3次元系と異なり、乱流を駆動する波長スケールから系に注入されたエネルギーがより長波長へと輸送される逆カスケードが存在し、これにより大域的な帯状流構造が自発的に形成される。一方、断熱応答項に由来する渦構造の結晶化による等方的乱流も形成される。ここでは帯状流形成に寄与する Rhines スケールや等方的乱流を引き起こす断熱スケールの物理機構を説明している。またこの両者の比を臨界パラメータと定義し ETG 乱流の自己組織化現象を支配するパラメータとして導入している。

第4章ではスラブ配位での ETG 乱流における自己組織化現象をジャイロ運動論シミュレーションで解析した結果をまとめている。ETG 乱流シミュレーションの結果、線形 ETG 不安定性の初期段階において線形モードの持つストリーマ構造が変調不安定性によって破壊され、帯状流が励起されることにより飽和することを示した。一方、この乱流が非線形発展したときの準定常な構造が帯状流か等方的乱流になるかは、ETG モードの不安定性の強弱に依存し、熱輸送に影響する事を示した。核融合プラズマのような無衝突系での乱流は、その励起と減衰のスケールがランダウ減衰や有限軌道幅効果といった運動論的效果に支配されるので、H-M 方程式での双カスケードの描像の成立性や、ETG 乱流が不安定化するスケールと Rhines スケールや断熱スケールの関係は自明ではなかった。この課題に対して、ITG 乱流とは異なり ETG 乱流では双カスケードの描像が成立し、乱流振幅などに依存して帯状流と等方的乱流という全く異なる秩序構造を形成し、これが新たに定義した臨界パラメータによって支配されることを示した。

第5章ではトロイダル配位での ETG 乱流のシミュレーション結果をまとめている。減衰乱流計算と小振幅のトロイダル ETG 乱流計算においてトロイダルモデルでも帯状流が形成され

ることを見出した。さらに乱流振幅およびイオンと電子の温度比を変化させた結果、乱流振幅が小さく温度比も小さい場合に帯状流が形成され、それ以外の場合は等方乱流となることが判った。トロイダル ETG 乱流では、局所的理論の観点からは ETG モードの線形分散は弱く、帯状流形成が期待できないと思われていたが、今回の解析により大域的な温度分布に起因するモード構造の変化を加味した線形分散は局所的理論と異なり、この線形分散と逆カスケードの競合によって帯状流が形成されることが判った。

第 6 章ではスラブ配位およびトロイダル配位での ETG 乱流における計算機シミュレーション結果、およびそれを踏まえた ETG 乱流の自己組織化現象のまとめを述べている。

以上を要するに、本論文では、イオンスケール乱流に比べて微視的なスケールであるために解析が困難な電子スケール乱流の大域的ジャイロ運動論的シミュレーションに挑戦し、これまで未解明であったスラブ/トロイダル ETG 乱流の自己組織化現象を明らかにし、このような自己組織化が熱輸送に大きく影響することを示した点で新規性のある研究と言える。以上のことから、本論文は先端エネルギー工学、特に核融合プラズマ工学の発展に貢献するところが大きい。

本論文の第 4 章および第 5 章は井戸村泰宏氏、前山伸也氏、小川雄一氏、山田弘司氏との共同研究であるが、論文提出者が主体となってコード開発、モデルの妥当性検証を行ったものであり、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

よって、博士(科学)の学位を授与できると認める。

以上 1996 字