

イオン温度勾配駆動捕捉電子モード乱流における
臨界温度勾配と径電場形成

Formations of radial electric fields and critical temperature gradients
in ion temperature gradient driven trapped electron mode turbulence

井戸村 泰宏
Yasuhiro IDOMURA

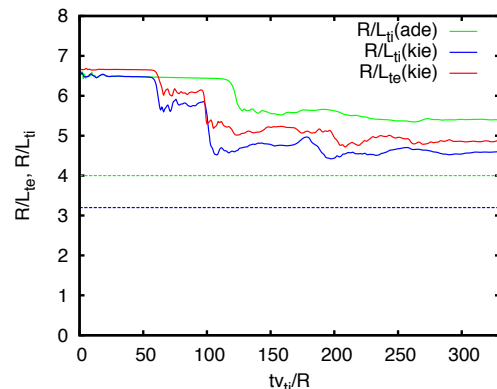
原子力機構
JAEA

full-fジャイロ運動論シミュレーションは非局所的輸送がもたらす温度分布の硬直性、自発プラズマ回転を形成する非拡散的運動量輸送、新古典輸送と乱流輸送の相互作用、乱流輸送の装置サイズ依存性といった問題を研究する上で重要なツールとなっている[Idomura, PFR14]。しかしながら、従来のfull-fジャイロ運動論シミュレーションの多くは断熱的電子応答近似を用いた静電的イオン温度勾配駆動乱流シミュレーションに限定されており、電子輸送の問題は未解決であった。本研究では、静電的イオン温度勾配駆動-捕捉電子モード (ITG-TEM) 乱流シミュレーションのための運動論的電子モデルをジャイロ運動論的トロイダル5次元full-fオイラーコードGT5D[Idomura, CPC08,NF09]において開発する。

本モデルは捕捉電子と通過電子を含む完全電子モデルを用いてジャイロ運動論的方程式を計算する。ここで、衝突項には0次の等分配演算子と異種粒子線形フォッカー・プランク衝突項[Sugama, POP09]を用いる。静電ポテンシャルの計算には新しいハイブリッドモデルを用いる。まず、トロイダルモード数 $n=0$ の計算では、捕捉電子と通過電子の両方を含む完全な電子応答を用いることにより、粒子輸送や運動量輸送を考える上で重要な両極性条件を満たす径電場を決定する。径電場を含む軸対称シミュレーションにおいてfull-fモデルの運動論的な平衡を与える新古典理論を検証し、粒子輸送、イオンと電子の熱輸送、径電場、ブートストラップ電流等がモーメント法[Hirshman, NF87]による標準的な新古典計算に一致することを確認した。一方、 $n>0$ の乱流場については捕捉電子応答のみを用い、通過電子については断熱応答を仮定することにより、運動論的アルフベン波の静電的極限で現れる ω_H モードと呼ばれる

非物理的な高周波揺動の発生を回避する。ITG-TEMの線形計算を行い、 δf 粒子コードGT3Dの計算結果[Rewoldt, CPC07]を再現した。

上記モデル検証後に減衰ITG乱流シミュレーションを実施し、従来の断熱電子モデルと本モデルを用いた計算結果の比較を行った。この結果、ITG乱流においても運動論的電子応答による乱流輸送が存在し、密度分布と電子温度分布が変化することを確認し、特に、電子の共鳴条件を満たす共鳴面近傍で通過電子の寄与が重要となることがわかった。減衰乱流シミュレーションではイオン温度が非線形の臨界勾配まで緩和すると輸送が止まり定常状態に達するが、両方の電子モデルで非線形臨界温度勾配が線形臨界温度勾配を上回ることを確認した(図参照)。ここで、断熱電子モデルの場合には乱流から生成する帯状流がITGモードを抑制する。一方、運動論的電子モデルの場合には共鳴面近傍の通過電子の輸送が形成する波状の密度分布との力のバランス関係を満たす微視的な径電場がITGモードを抑制するという新しい飽和機構が明らかになった。



図：断熱電子モデル (ade) と運動論的電子モデル (kie) の減衰ITG乱流における臨界イオン温度勾配は線形の臨界温度勾配 (破線) を上回る。