

ITG-TEM乱流の電子変調加熱数値実験における 粒子輸送と運動量輸送の解析

Analyses of particle and momentum transport in electron heating modulation numerical experiments of ITG-TEM turbulence

井戸村 泰宏
Yasuhiro IDOMURA

原子力機構
JAEA

多くのトカマク装置の電子サイクロトロン波加熱 (ECH) 変調加熱実験において電子温度だけでなく密度分布やプラズマ回転が変化することが報告されている。特に、本研究で着目したASDEX-U実験[McDermott,PPCF11]では、ECH印加後、数msで電子温度が上昇し、その後、数十msの時間スケールで密度勾配の上昇とプラズマ回転の減少が発生することが報告されている。粒子源と運動量入力を含まないECHによる密度とプラズマ回転の過渡的応答は、これまで電子温度勾配やイオン・電子温度比の変化によるイオン温度勾配駆動 (ITG) 乱流から捕捉電子モード (TEM) 乱流への遷移が関係していると考えられてきた。上記実験におけるECH印加前後の分布を用いた微視的不安定性の線形解析では主要な不安定性がITGからTEMに変化し、粒子輸送がバランスする密度勾配が上昇することが示された[Angioni,NF11]。しかしながら、プラズマ回転の変化をもたらす運動量輸送機構はこれまで明らかになっていなかった。

本研究では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,NF09]を用いた数値実験によってこの問題を解析した。GT5Dでは新しいハイブリッド電子モデルの開発によって、従来の断熱的電子モデルの約10倍の計算コストで電子新古典輸送やTEM乱流の計算を可能とし、電子系乱流を含むfull-fモデルの長時間乱流計算を実現した[Idomura,JCP16]。また、GT5Dは運動量輸送の解析に必須となるトロイダル角運動量保存則[Idomura,CSD12]を厳密に満たす。この運動量保存則は δf モデルで計算される乱流輸送による応力以外に新古典輸送による応力、トロイダル電場による応力、粒子輸送による応力を含むため、full-fモデルが必要不可欠である。

図1はGT5Dを用いて実施した変調電子加熱数値実験の時間発展を示す。この数値実験では、

初期にイオン加熱を印加し、ITG乱流とそれに伴う自発プラズマ回転形成が飽和する約7msに加熱源を電子加熱に切り替えて密度勾配の上昇とプラズマ回転の減少という過渡的応答を定性的に再現することに成功した。電子加熱の印加によって電子温度勾配と温度比がTEM不安定な領域に変化し、乱流周波数スペクトルのピークがITG ($\omega < 0$) からTEM ($\omega > 0$) に遷移する。TEM乱流においてもITG乱流と同様に径方向に伝搬する非局所的輸送が観測されるが、粒子輸送の向きが逆転する。運動量輸送機構に関しては運動量保存則を解析し、準定常乱流状態では乱流輸送と新古典輸送による応力はトロイダル電場による応力とほぼキャンセルし、トルクへの主要な寄与はITGとTEMで向きが反転する粒子輸送による応力であることが分かった。このように、過渡的プラズマ応答の理解には複数輸送チャンネルの相互作用が極めて重要になることが明らかになった。

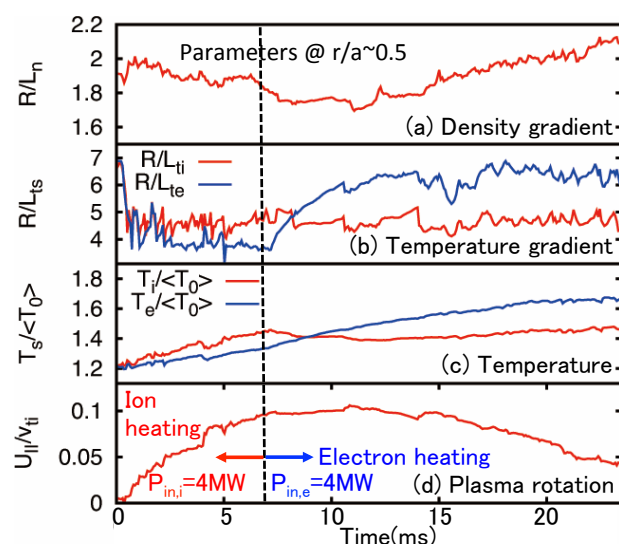


図1: GT5Dによる電子変調加熱数値実験で観測した (a)密度勾配特性長、(b)温度勾配特性長、(c)温度、(d)プラズマ回転の時間発展。