

IFERC-CSC 大型計算機利用報告書(プロジェクト枠)

2019 年度

研究課題名	<i>Gyrokinetic Numerical Experiment of Tokamak with Kinetic Electron</i>
上記の頭文字	GKNET_KE

研究代表者 (PI):

研究代表者名	今寺 賢志
--------	-------

1. 成果の概要 (200字程度)

本研究では、ハイブリッド電子モデルを実装した GKNET を用いて熱源駆動型 ITG/TEM 乱流輸送シミュレーションを行った結果、反転磁気シア配位において外部からの運動量入射を必要としない内部輸送障壁の自発形成に成功した。これはロバストな順方向の自発回転が q_{min} 面に駆動され、力学的平衡を介して径電場とバランスすることで定常的に径電場シアが保持されることに拠るものであり、電子加熱によってそのシアが更に増大されることも併せて明らかとなった。

2. 成果の詳細 (図、表等を含めて A4 で 2~3 ページ程度)

乱流を抑制することで輸送係数を低下させ、断熱層/粒子遮蔽層として作用する「内部輸送障壁(ITB)」の形成は、磁場閉じ込め核融合プラズマプラズマを高性能化する上で重要な鍵を握っているが、第一原理に基づいた乱流輸送シミュレーションでは再現されていなかった。これは、大規模な計算機資源を必要とする大域的乱流輸送コードの開発・実行が容易でないこと、さらには径電場に代表される背景分布と乱流の相互作用が物理的に解明されていないことに起因している。

そこで申請者は、新たに大域的乱流輸送コード「GKNET(GyroKinetic Numerical Experimental Tokamak)」を開発した[1, 2]。本コードでは、外部からの熱ソース/シンク、ならびに衝突効果が適切に導入されており、熱ソースによる温度分布の急峻化によって駆動される乱流(熱源駆動型乱流)に加え、新古典輸送過程を経て形成される径電場も適切に評価することが可能である。このコードを用いて運動量ソースを導入した熱源駆動型イオン温度勾配(ITG)乱流輸送シミュレーションを行った結果、外部からのトロイダル回転によって力学的平衡を介して径電

場が変動し、ITB が形成されることを第一原理シミュレーションで初めて明らかにした[3]。ただし、断熱電子モデルを仮定しており、ITB 形成のためには一定量以上の運動量入射を必要としていた。

そこで本研究では、新たに GKNET に対してハイブリッド電子モデル[4]を実装することで、 ω_H モードと呼ばれる計算量を著しく増大させる数値モードを回避しつつ、捕捉電子軌道や軸対称な通過電子軌道を適切に導入したコードを開発し、そのコードを用いて、外部からの運動量入射を必要としない内部輸送障壁の自発形成を試みた[5]。図 1 は(a)断熱電子を用いた場合の熱源駆動型 ITG 乱流、(b)運動論的電子を用いた場合の熱源駆動型 ITG 乱流、(c)運動論的電子を用いた場合の熱源駆動型 ITG/TEM 乱流における径電場の空間-時間発展を示している。ITG 乱流のケースでは

十分急峻なイオン温度勾配がイオン加熱によって保持されており、ITG/TEM 乱流のケースでは十分急峻なイオン/電子温度勾配がイオン/電子加熱によって保持されている。これらの結果から、いずれの場合も q_{min} 面で径電場が極大値を取る一方、その値は運動論的電子を用いた(b)と(c)の方が相対的に大きいことがわかる。これは、運動論的電子ダイナミクスによって電子密度揺動と静電ポテンシャルの間で位相差が生じることで、ITG/TEM 不安定性が増大し、結果として q_{min} 面近傍の帯状流生成も増大したためと考えられる。

興味深い点としては、図 2(a)に示すように、その際にロバストな順方向のトロイダル自発回転が q_{min} 面で駆動されている点である。運動量輸送理論によると、運動量フラックスの残留応力成分は、 $\Pi_{r\phi}^{RS} \sim \alpha IV'_E + \beta I' + \gamma \langle k_\theta k_\parallel \delta \phi^2 \rangle$ で与えられるが[6]、今回の径電場分布が形成されると第 1 項が運動量拡散を減少させるように作用するため、ロバストなトロイダル自発回転が保持されているものと考えられる。一方、電子温度勾配が急峻な場合、ITG モードの成長率が低い負磁気シア領域において、

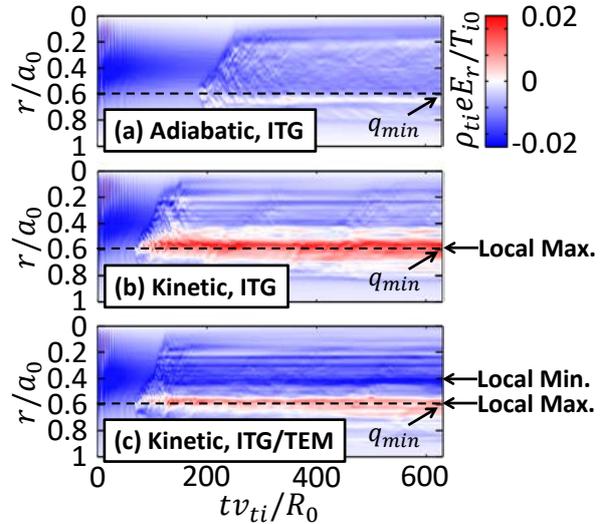


Fig. 1: Time-spatial evolution of E_r in (a) flux-driven ITG turbulence with adiabatic electron, (b) ITG turbulence with kinetic electron and (c) ITG/TEM turbulence with kinetic electron [5].

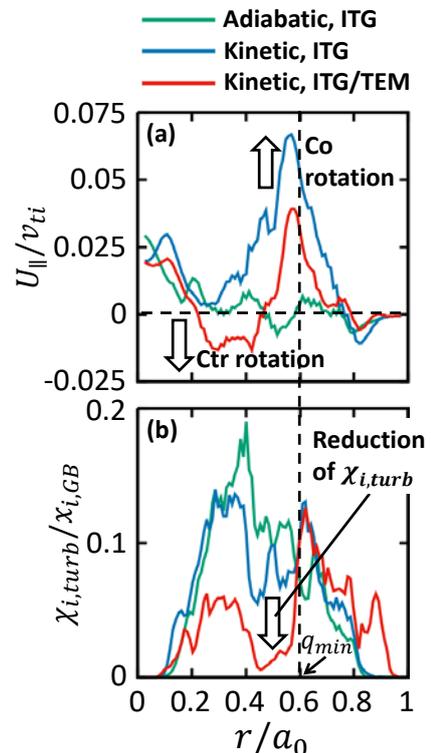


Fig. 2: Radial profile of (a) toroidal rotation and (b) ion turbulent thermal diffusivity normalized by gyro-Bohm one in flux-driven turbulences [5].

選択的に TEM が励起されることで、反対方向のトロイダル自発回転が形成されている(図 2 の $0.2a_0 < r < 0.4a_0$ における赤線参照)。これはバルーニング角の符号が ITG モードは正であるのに対して、TEM は負であることに起因している。

このような自発回転分布の違いは、径電場の保持に異なる影響を与えており、図 3 に示すように、(b)運動論的電子を用いた場合の熱源駆動型 ITG 乱流では、ロバストな順方向のトロイダル自発回転によって q_{min} 面のやや内側において強い径電場シアが形成される一方、(c)運動論的電子を用いた場合の熱源駆動型 ITG/TEM 乱流では、 $0.2a_0 < r < 0.4a_0$ における反対方向のトロイダル自発回転によって、径電場シアが更に増大していることがわかる。その結果、図 2(b)に示すように、 $0.4a_0 < r < 0.6a_0$ における(c)のイオン乱流熱輸送係数が、新古典輸送係数と同レベルまで低下することが明らかとなった。これは、 q_{min} 面近傍を境界として異なるモードが励起されることで、自発的な ITB が形成されることを示唆している。

以上から、電子ダイナミクスは q_{min} 面近傍において径電場とロバストな自発回転を励起することで ITB の自発形成に本質的な役割を果たしており、ITB を制御する上で、イオン加熱だけでなく、電子加熱も重要であることが明らかとなった。これらの結果は、JT60-SA や ITER、DEMO における ITB の制御に資するものと言える。

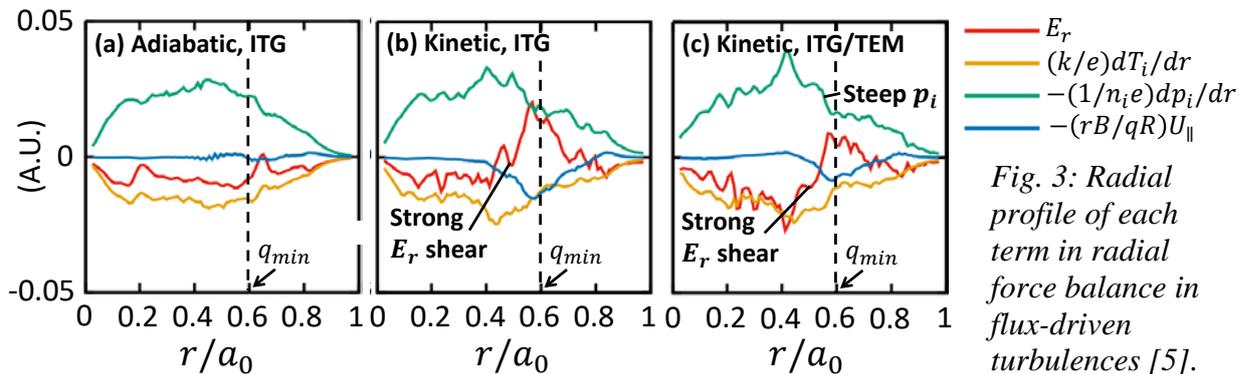


Fig. 3: Radial profile of each term in radial force balance in flux-driven turbulences [5].

- [1] K. Imadera *et al.*, 25th IAEA-FEC, TH/P5-8 (2014).
- [2] K. Obrejan *et al.*, Comput. Phys. Comm. **216**, 8 (2017).
- [3] K. Imadera *et al.*, 26th IAEA-FEC, TH/P3-3 (2016).
- [4] E. Lanti *et al.*, Journal of Physics **1125**, 012014 (2018).
- [5] K. Imadera *et al.*, will be presented in 28th IAEA-FEC (2021).
- [6] J. M. Kwon *et al.*, Nucl. Fusion **52** 013004 (2012).

3. 研究のキーワード

1. ジャイロ運動論	2. 大域的モデル	3. 内部輸送障壁	4. 自発回転	5. TEM 乱流
------------	-----------	-----------	---------	-----------