

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25800304

研究課題名(和文) 多重拘束マルチモーメント法によるプラズマ遷移現象の再現とその動的制御方法の開拓

研究課題名(英文) Dynamic control of plasma transition phenomena in flux-driven gyrokinetic turbulence simulation based on multi-moment scheme

研究代表者

今寺 賢志 (Imadera, Kenji)

京都大学・エネルギー科学研究科・助教

研究者番号：90607839

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：断熱層/粒子遮蔽層として作用する「内部輸送障壁」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。そこで本研究では、大域的乱流輸送コード「GKNET (GyroKinetic Numerical Experimental Tokamak)」を新たに開発し、このコードを用いて非線形シミュレーションを行った。その結果、運動量を外部から入射することで力学的平衡を介して径電場が変調し、内部輸送障壁が形成されることを世界で初めて実証した。

研究成果の概要(英文)：The formation of Internal Transport barrier (ITB) has a crucial key to achieve high-performance magnetically confined fusion plasmas, however, such a phenomena had not been reproduced by turbulent transport simulations based on the first principle. In this work, we have newly developed global toroidal gyrokinetic code GKNET (GyroKinetic Numerical Experimental Tokamak) and performed nonlinear flux-driven turbulence simulation with an external momentum source. As a result, we found that the radial mean electric field can be modulated by external momentum source, leading to ITB formation in which the ion thermal diffusivity decreases to the neoclassical transport level.

研究分野：数物系科学

キーワード：プラズマ・核融合 ジャイロ運動論 乱流輸送 内部輸送障壁 運動量輸送

1. 研究開始当初の背景

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」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説明されていないことに起因していた。

2. 研究の目的

そこで本研究の目的として、以下の3つの課題を設定した。

- (1) 内部輸送障壁を含む大域的な分布形成を解析可能な第一原理に沿った乱流輸送コードの開発
- (2) 内部輸送障壁が形成されない場合における分布形成メカニズムの理解
- (3) 内部輸送障壁形成の再現とその物理メカニズムの理解

3. 研究の方法

コード開発については、日本原子力機構プラズマ理論シミュレーショングループ、および京都大学学術情報メディアセンターと共同研究の枠組みを利用して連携することで進めていった。またシミュレーションについては、大規模な計算機資源を必要としたため、国際核融合エネルギー研究センターの大型計算機である Helios(4,500 ノード, Linpack 性能 1.237 [PFLOPS])を主に使用した。

4. 研究成果

本研究ではまず、大域的トロイダルジャイロ運動論コード GKNET (GyroKinetic Numerical Experiment of Tokamak)を新たに開発した。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、乱流輸送だけではなく、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できる。また本コードの特徴としては、有限ラーマー半径効果を近似なしに厳密に取り扱っている点が挙げられ、様々な磁場配位を直接的に導入可能であり、任意の座標系(直交座標系、円柱座標系)を用いることができるなど、その利点が多い。図1は、そのコードを用いて行った D-III D Cyclone base caseにおける線形トロイダルITG不安定性のベンチマークテストの結果を示しており、他の文献とよい一致を見せている。また並列化に関しても、日本原子力機構プラズマ理論シミュレーショングループ、および京都大学学術情報メディアセンターとの共同研究の結果、4096 ノードを用いた場合で、1.33

倍程度の速度向上が得られた。

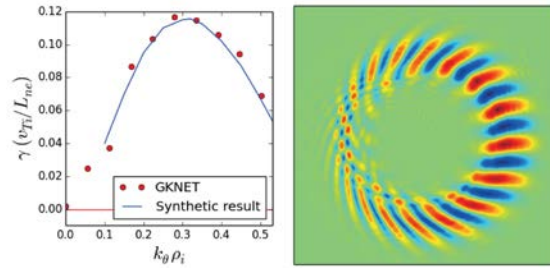


図1: 線形トロイダルITG不安定のベンチマークテストによって得られた(左)分散関係と(右)最も不安定なモード(n=15)のバルーニング構造

次に、そのGKNETコードを用いて非線形シミュレーションを行った結果、力学的平衡によってもたらされる径電場は、イオン温度勾配(ITG)モードと呼ばれるイオン系乱流のポロイダル対称性を回復させる方向に作用し、その安定化効果は弱いことが明らかとなった。その結果、外部からの入力パワーを増加させても、温度分布は臨界勾配を超えて大きく変化せず、いわゆる温度分布の「硬化化」が起きるものと考えられる。

そこで、外部からの運動量ソースによって上述の径電場を変調させることで、温度分布形成に与える影響について評価した。図2(A)は外部から順回転、および逆回転の運動量を入射した場合の準定常状態における温度分布を示している。順回転の場合のみ内部輸送障壁が形成され、図2(B)が示すようにイオン乱流熱輸送係数が新古典レベルまで低下し

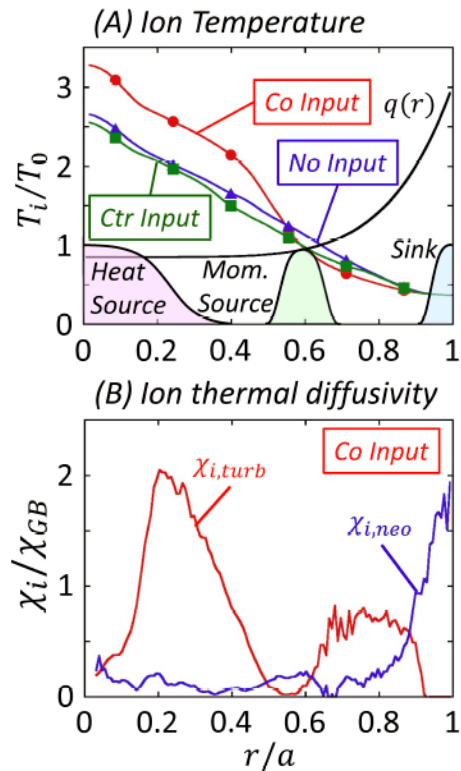


図2: 外部から順回転、および逆回転の運動量を入射した場合の準定常状態における(A)温度分布、および(B)イオン熱輸送係数

ていることがわかる。この傾向は JET における実験の観測結果と定性的に一致している [P. Mantica *et al.*, Phys. Rev. Lett. **107**, 135004 (2011)]。

また図 3 は(A)順回転、および(B)逆回転の運動量を入射した場合の力学的平衡における各項の空間分布を示している。この結果から、運動量入射によって力学的平衡を介して強い径電場シアが形成され、内部輸送障壁が形成されたものと考えられる。

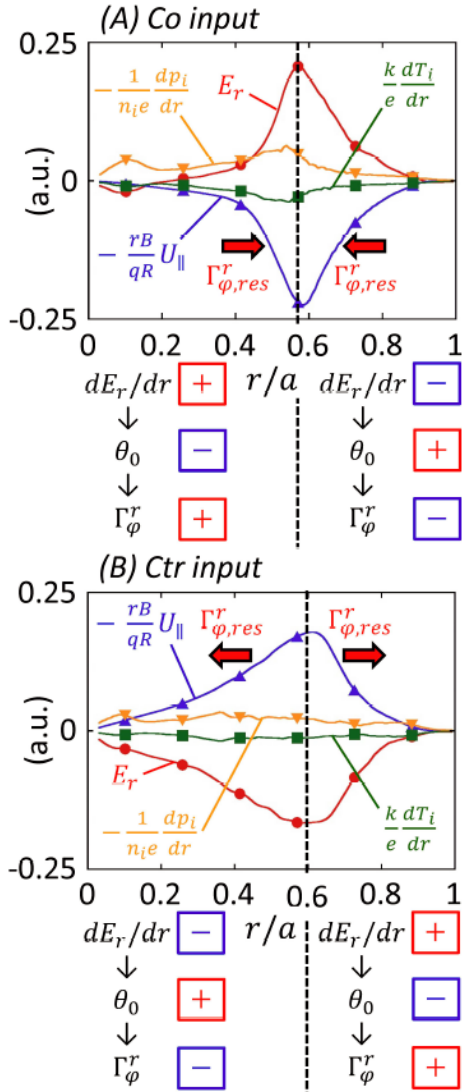


図 3 : 外部から(A)順回転、および(B)逆回転の運動量を入射した場合の力学的平衡に現れる各項の空間分布

順トロイダル回転が輸送障壁形成に有効である物理メカニズムは、非局所バルーニング理論 [Y. Kishimoto *et al.*, Plasma Phys. Controlled Fusion **40**, A66 (1998)] と運動量輸送理論 [Y. Camenen *et al.*, Nucl. Fusion **51**, 073039 (2011)] から説明することが可能である。非局所バルーニング理論によると、正(負)の径電場シアは負(正)のバルーニング角を与える。一方、運動量輸送の残留応力成分の係数は、負(正)のバルーニング角の場合に正(負)の運動量輸送をもたらすことことから、図 3(A)

に示す様に、順回転の場合のみ運動量ピンチが発生し、運動量分布が急峻化した結果、強い径電場シアが保持されたものと考えられ、運動量輸送と径電場シアの間での正のフィードバックループが重要な役割を果たしていることが明らかとなった。

以上の物理メカニズムを図 4 にまとめる。運動量ソースがない場合、径電場は ITG 乱流のポロイダル対称性を回復させる方向に作用するため、乱流の不安定化に寄与していたが、外部から運動量を入射することで、その効果を逆転させ、運動量輸送と径電場シアの間での正のフィードバックループが起きることによって内部輸送障壁が形成されることが新たに明らかとなった。この結果は、外部からの運動量/エネルギー入力方法を適切に選択することによって内部輸送障壁形成を制御できることを示唆しており、その学術的・工学的インパクトは非常に大きいと言える。

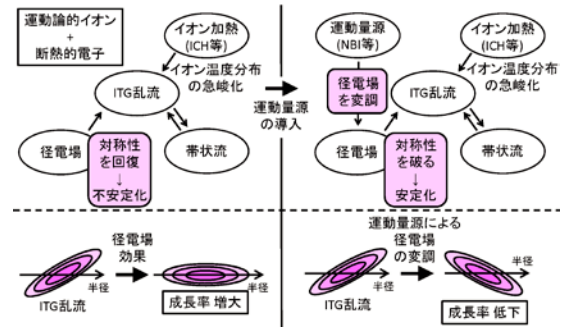


図 4: 本研究で明らかとなった乱流構造の対称性による ITG 乱流の安定化/不安定化メカニズム

今後は、GKNET を 10^5 コア規模の並列計算に最適化し、従来の断熱電子モデルをより現実的に則した運動論的電子モデルに拡張することで、捕捉電子モード(TEM)乱流と呼ばれる電子ダイナミクスが深く関与した乱流を取り入れ、自発的な内部輸送障壁の形成を目指す。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

[1] Kevin Obrejan, Kenji Imadera, Jiquan Li and Yasuaki Kishimoto, “Development of a global toroidal gyrokinetic Vlasov code with new real space field solver”, *Plasma and Fusion Research*, **10**, 3403042_1-3403042_4 (2015), with referee, http://www.jspf.or.jp/PFR/PDF/pfr2015_10-3403042.pdf

[2] Paul P. Hilscher, Kenji Imadera, Jiquan Li and Yasuaki Kishimoto, “The effect of weak collisionality on damped modes and its contribution to linear mode coupling in gyrokinetic simulation”, *Physics of Plasmas*,

20, 082127_1-082127_14 (2013), with referee,
<http://scitation.aip.org/docserver/fulltext/aip/journal/pop/20/8/1.4819033.pdf?expires=1465285206&id=id&accname=2111653&checksum=6CD65A6867AA1649D0EE37D816DFF3E8>

- [3] Paul P. Hilscher, Kenji Imadera, Jiquan Li and Yasuaki Kishimoto, “Role of Stable Modes in the ITG-Driven Instability in a Mode-Coupled System”, *Plasma and Fusion Research*, **8**, 1303151_1-1303151_3 (2013), with referee,
http://www.jspf.or.jp/PFR/PDF/pfr2013_08-1303151.pdf
- [4] Paul P. Hilscher, Kenji Imadera, Jiquan Li and Yasuaki Kishimoto, “Gyrokinetic Simulations of Short-Wavelength ITG Instability in the Presence of a Static Magnetic Island”, *Plasma and Fusion Research*, **8**, 2403040_1-2403040_4 (2013), with referee,
http://www.jspf.or.jp/PFR/PDF/pfr2013_08-2403040.pdf

〔学会発表〕（計 31 件）

（以下、国際学会における申請者が筆頭発表者の発表 8 件を記載）

- [1] Kenji Imadera, Yuji Katsuki, Jiquan Li and Yasuaki Kishimoto, “Effect of zonal flows on flux-driven non-diffusive turbulent transport and profile stiffness”, *The 12th Asia Pacific Physics Conference of AAPPs*, Chiba, Japan, July 16th, 2013. (Poster)
- [2] Kenji Imadera, Yasuaki Kishimoto, Kevin Obrejan, Takuya Kobiki and Jiquan Li, “Non-local profile relaxation coupled with E×B staircase in toroidal flux-driven ITG turbulence”, *4th Asia Pacific Transport Working Group (APTWG) International Conference*, Fukuoka, Japan, June 12th, 2014. (Oral)
- [3] Kenji Imadera, Yasuaki Kishimoto, Kevin Obrejan Takuya Kobiki and Jiquan Li, “Global profile relaxation coupled with E×B staircase in toroidal flux-driven ITG turbulence”, *25th Fusion Energy Conference (FEC 2014)*, Saint Petersburg, Russia, October 16th, 2014. (Poster)
- [4] Kenji Imadera, Yasuaki Kishimoto, Kevin Obrejan Takuya Kobiki and Jiquan Li, “Non-local structure and transport in toroidal flux-driven ITG turbulence”, *JIFT Workshop on Progress in Kinetic Plasma Simulation*, New Orleans, USA, October 31th, 2014. (Oral)
- [5] Kenji Imadera, Yasuaki Kishimoto, Kevin Obrejan, Takuya Kobiki and Jiquan Li, “Non-local profile relaxation and barrier formation in toroidal flux-driven

turbulence”, *The 7th IAEA Technical Meeting on Theory of Plasma Instabilities*, Frascati, Italy, March 4th, 2015. (Invited)

- [6] Kenji Imadera, Obrejan Kevin, Jiquan Li and Yasuaki Kishimoto, “Flux driven gyro-kinetic simulation including neo-classical effects and the control of turbulence”, *Transport and MHD workshop on Physics validation and control of turbulent transport and MHD in fusion plasmas*, Kyoto, Japan, April 13th, 2015. (Oral)
- [7] Kenji Imadera, Jiquan Li and Yasuaki Kishimoto, “ITB formation in gyrokinetic flux-driven ITG turbulence with toroidal momentum injection”, *14th H-mode Workshop*, Garching, Germany, October 19th, 2015. (Poster)
- [8] Kenji Imadera, Jiquan Li and Yasuaki Kishimoto, “Non-local profile relaxation and barrier formation in toroidal flux-driven gyrokinetic turbulence”, *ITPA T&C meetings 2016*, Garching, Germany, October 22th, 2015. (Oral)

〔その他〕

ホームページ

<http://www.center.iae.kyoto-u.ac.jp/kishi/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

今寺 賢志 (IMADERA KENJI)

京都大学大学院 エネルギー科学研究科 助教

研究者番号 : 90607839