

大域的乱流シミュレーション Global turbulence simulation

井戸村 泰宏
Yasuhiro Idomura

日本原子力研究開発機構システム計算科学センター
Center for Computational Science and e-Systems, Japan Atomic Energy Agency

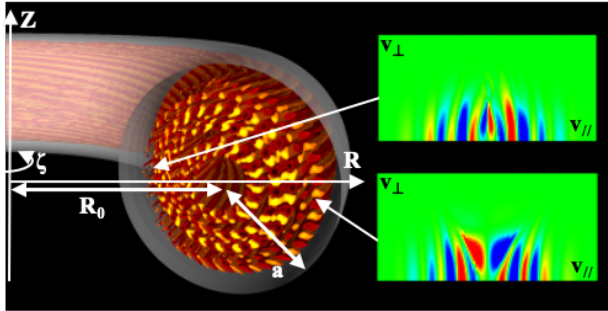


Fig. 1: 5次元位相空間の大域的乱流解析。

1 はじめに

磁場閉じ込め核融合炉における炉心プラズマ乱流の第一原理モデルは5次元ジャイロ運動論によって与えられる。これまで、磁力線に沿った局所領域をモデル化した局所的モデルに基づく乱流シミュレーションが普及し、実験解析や炉設計等に使われるようになってきた。一方、局所的モデルで仮定するスケール分離やオーダーリングにおいて無視されている、大域的分布シフト効果等の有限 ρ^* 効果、新古典輸送と乱流輸送の相互作用、背景分布の過渡的变化といった現象を解析する上で大域的乱流シミュレーションが必要とされている。しかしながら、大域的モデルでは炉心プラズマ全体を5次元空間で記述するために膨大な計算量が必要となり、実パラメータを用いた長時間スケールの解析が難しかった。この制約を克服するために、本研究では「富岳」において大域的プラズマ乱流解析コード GT5D [1, 2] の開発に取り組んできた。本講演では、「富岳」向けに開発した新しい計算技術と「富岳」を活用して得られた最新のシミュレーション研究について概説する。

2 GT5D コード

GT5D は Full-f モデルの静電的5次元ジャイロ運動論方程式に基づいて大域的なプラズマ輸送数値実験を行う (Fig.1)。Full-f モデルではプラズマ分布とプラズマ乱流のスケール分離を仮定せずに両者を同じ第一原理モデルで取り扱う。これにより、1) 乱流輸送と衝

突性輸送の無同着な取り扱い、2) プラズマ分布とプラズマ乱流の相互作用によって発生する雪崩的な非局所輸送現象、3) 粒子、運動量、イオン/電子熱輸送を含む複数輸送チャンネルのプラズマ分布を介した相互作用といったマルチフィジクス、マルチスケールのプラズマ乱流輸送現象の解析が可能となる。数値計算法は5次元位相空間を格子で分割する Euler 型解法に基づいており、時間積分には半陰的ルンゲ・クッタ法を採用して磁力線方向の高速な熱運動を含む線形移流項を陰的に取り扱う。ここで、線形移流項が与える非対称行列の連立一次方程式は並列処理を必要とする大規模問題となり、主要な計算コストを占める。この差分・陰解法ソルバをクリロフ部分空間法によって計算する。並列化には MPI と OpenMP を用いたハイブリッド並列処理を採用しており、5次元位相空間に対する4次元の領域分割モデルをノード内通信とノード間通信を意識した階層的なネットワークで構築することによって通信コストを最小化し、さらに OpenMP によって通信隠蔽処理を実装している。これに加えて、「富岳」で新たに利用可能となった16ビットSIMD処理を活用した混合精度前処理付省通信型クリロフ部分空間法 [3] の開発によって電子の陰解法ソルバを加速し、1,440~5,760 ノードを用いた ITER 規模 (約1,000億格子) の強スケーリングおよびピーク性能比14.5~18.9%の処理性能を達成した。これにより、実質量比の運動論的電子の計算を可能とした。

3 富岳における数値実験例

本研究では、「富岳」を活用してエネルギー閉じ込め、自発プラズマ回転、不純物輸送等の物理を理解する上で重要な LOC-SOC (Linear and Saturated Ohmic Confinement) 遷移 [4] の解析を行った。解析対象となる Tore Supra 装置のジュール加熱放電 #48102 における主要パラメータは磁場 $B = 3.7\text{T}$ ($q_{95} \sim 4$)、大半径 $R_0 = 2.43\text{m}$ 、小半径 $a = 0.7\text{m}$ 、規格化プラズマ半径 $a/\rho_i \sim 500$ 、ジュール加熱 $P_j \sim 600\text{kW}$ となる。LOC フェーズ ($t \sim 3.1\text{s}$, $n_e \sim 2.4 \times 10^{19}\text{m}^{-3}$ 、

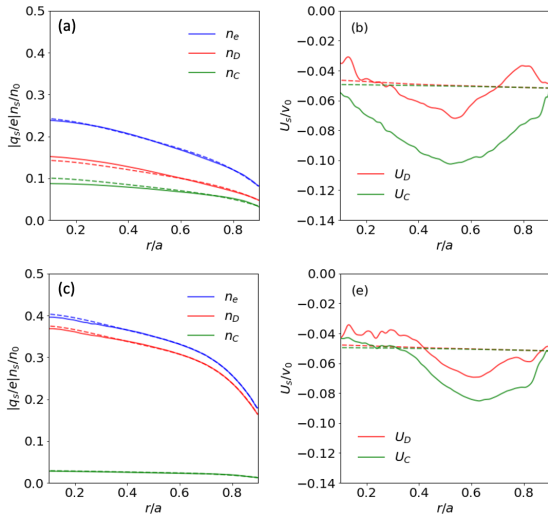


Fig. 2: 数値実験によって得られた LOC フェーズ (a)、(b)、SOC フェーズ (c)、(d) の密度分布 (a)、(c) およびプラズマ回転分布 (b)、(d)。破線は初期条件を示し、添字は粒子種を示す。

$Z_{eff} \sim 3.1$, $\nu_e^* \sim 0.04$) は低密度、炭素不純物による高い実効電荷 Z_{eff} 、密度に比例したエネルギー閉じ込め時間 τ_E の増大、およびコヒーレントなピークを伴う乱流スペクトル (QCM: Quasi-Coherent Mode) という特徴を示すのに対し、SOC フェーズ ($t \sim 6.1s$, $n_e \sim 3.7 \times 10^{19} m^{-3}$, $Z_{eff} \sim 1.4$, $\nu_e^* \sim 0.3$) は高密度、低 Z_{eff} 、 τ_E の飽和、および広帯域の乱流スペクトルという特徴を示す [5]。また、LOC-SOC 遷移の過程で炭素不純物の吐き出し、および自発プラズマ回転分布のプラズマ電流方向への変化が観測されている。初期条件と境界条件は上記 2 時刻のプラズマ分布によって与えたが、プラズマ回転分布についてはリップル磁場によって決まる反電流方向の境界回転速度で剛体回転を設定し、炉心領域の自発プラズマ回転の発展を追跡した (Fig.2)。

線形解析の結果、低密度かつ高 Z_{eff} の LOC フェーズでは希釈効果によってイオン温度勾配駆動モード (ITG) が安定化され、捕捉電子モード (TEM) が支配的となるのに対し、高密度かつ低 Z_{eff} の SOC フェーズでは粒子衝突効果によって TEM が安定化され、ITG が支配的となることがわかった。数値実験の結果、LOC-SOC 遷移の輸送特性を定性的に再現し、以下の点を明らかにした。第一に、粒子輸送に関しては炭素不純物の吐き出しが炭素と重水素の速いイオン混合によって発生し (Fig.2(a))、この粒子束に伴う $J \times B$ トルクは密度揺動とトロイダル電場揺動の位相関係によって決まるトロイダル電場応力とバランスすることがわかった。第二に、自発プラズマ回転は境界

回転速度に対して LOC フェーズで大域的に反電流方向、SOC フェーズの炉心領域で僅かに電流方向に発展し (Fig.2(b)、(d))、これは LOC/SOC フェーズの TEM/ITG に対する径電場 E_r の影響によって決まる磁力線方向スペクトルの非対称性がもたらす分布シア応力 [6] に関係していることがわかった。第三に、実験的に観測された 2 時刻のエネルギー閉じ込め時間の比を数値実験でも定量的に再現し、TEM が支配的な LOC フェーズでは電子熱流束が大きく、ITG が支配的な SOC フェーズではイオン熱輸送が大きくなることがわかった。最後に、LOC/SOC フェーズの乱流周波数スペクトルはそれぞれ QCM/広帯域の特徴を示し、これは位相速度が電子/イオン反磁性回転方向となる TEM/ITG に対する電子反磁性回転方向の $E_r \times B$ 流によるドップラーシフトが各トロイダルモードのスペクトルのピークを分離/融合させる方向に働くことが関係していることがわかった。

4 まとめ

「富岳」を活用することで、これまで解析が困難であった乱流輸送の過渡的現象の数値実験が可能となり、初期のトカマク実験から未解決であった LOC-SOC 遷移の複雑な物理機構が明らかになってきた。今後、このような数値実験を変調加熱、ペレット入射等の過渡的現象の解析に適用することで新たなアクチュエータの開発も可能になると期待される。

References

- [1] Y. Idomura, H. Urano, N. Aiba, and S. Tokuda. Study of ion turbulent transport and profile formations using global gyrokinetic full- f Vlasov simulation. *Nucl. Fusion*, Vol. 49, No. 6, p. 065029, June 2009.
- [2] Y. Idomura. A new hybrid kinetic electron model for full- f gyrokinetic simulations. *Journal of Computational Physics*, Vol. 313, pp. 511–531, May 2016.
- [3] Yasuhiro Idomura, Takuya Ina, Yussuf Ali, and Toshiyuki Imamura. Acceleration of Fusion Plasma Turbulence Simulations using the Mixed-Precision Communication-Avoiding Krylov Method. In *SC20: International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis*, pp. 1–13, Atlanta, GA, USA, November 2020. IEEE.
- [4] J.E. Rice, J. Citrin, N.M. Cao, P.H. Diamond, M. Greenwald, and B.A. Grierson. Understanding LOC/SOC phenomenology in tokamaks. *Nucl. Fusion*, Vol. 60, No. 10, p. 105001, October 2020.
- [5] J Citrin, H Arnichand, J Bernardo, C Bourdelle, X Garbet, F Jenko, S Hacquin, M J Pueschel, and R Sabot. Comparison between measured and predicted turbulence frequency spectra in ITG and TEM regimes. *Plasma Phys. Control. Fusion*, Vol. 59, No. 6, p. 064010, June 2017.
- [6] Y. Camenen, Y. Idomura, S. Jolliet, and A.G. Peeters. Consequences of profile shearing on toroidal momentum transport. *Nucl. Fusion*, Vol. 51, No. 7, p. 073039, July 2011.