

平成 26 年 6 月 13 日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2010～2013

課題番号：22686086

研究課題名(和文)核燃焼プラズマ輸送数値実験の開発

研究課題名(英文)Development of numerical experiments on burning plasma transport

研究代表者

井戸村 泰宏 (Idomura, Yasuhiro)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・システム計算科学センター・研究主幹

研究者番号：00354580

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,100,000円、(間接経費) 5,730,000円

研究成果の概要(和文)：full-fジャイロ運動論シミュレーションをペタスケール計算機で効率的に処理するシミュレーション技術を開発し、プラズマ輸送数値実験の時空間スケールを大幅に拡大した。閉じ込め時間スケールの長時間数値実験により自発プラズマ回転分布の形成・維持機構を解明した。ITER規模の数値実験によって大型装置の閉じ込めスケールリングに乱流輸送の加熱パワースケールリングが大きく影響することを示した。

研究成果の概要(英文)：Simulation technologies, which efficiently process full-f gyrokinetic simulations on Peta-scale machines, are developed, and spatio-temporal scales of plasma transport numerical experiments are significantly expanded. Mechanisms to form and sustain intrinsic plasma rotation profiles are clarified by long time numerical experiments over a confinement time. Through ITER-size numerical experiments, it is found that the power scaling of turbulent transport greatly affects confinement scalings in large devices.

研究分野：総合工学

科研費の分科・細目：核融合学

キーワード：ジャイロ運動論 トカマク ITER プラズマ乱流 核融合 運動量輸送 ペタスケール

1. 研究開始当初の背景

国際熱核融合実験炉 ITER における核燃焼プラズマ実験の性能予測や運転シナリオ設計を行う上で、信頼性の高い第一原理プラズマ乱流コードが必要とされている。核融合プラズマの標準的な第一原理モデルである5次元ジャイロ運動論モデルに基づくプラズマ乱流シミュレーションは90年代後半に始まったが、従来のジャイロ運動論シミュレーションは f モデルと呼ばれるスケール分離仮定を導入していた。f モデルはプラズマ乱流と背景プラズマ分布の特徴的な時空間スケールが十分に分離している、すなわち、背景プラズマの圧力勾配等の物理パラメータは定常かつ一様という仮定の下で、微視的なプラズマ乱流を局所領域で計算することによって低コストのシミュレーションを実現した。しかしながら、近年の実験的研究においては、乱流相関長を超えて非局所的に伝搬する熱輸送の雪崩現象等、f モデルでは取り扱いの難しい、非常に幅広い時空間スケールの輸送現象が観測されている。この問題を解析するために、本研究では完全トラス配位においてプラズマ乱流と背景プラズマを5次元ジャイロ運動論モデルで同時に発展させる full-f モデルに基づくジャイロ運動論シミュレーション GT5D を開発し、雪崩現象による非局所的熱輸送やそれによってイオン温度分布が臨界安定な温度勾配付近に拘束される温度分布の硬直性といった実験的観測を定性的に再現することに成功した。

しかしながら、研究開始当初は計算資源の不足から計算コストの大きい full-f ジャイロ運動論シミュレーションで扱える問題規模、時空間スケールは大きく制限されており、実験的に観測されている閉じ込めスケーリングのような基本的な輸送特性を再現し、その物理機構を解析することが難しかった。そこで、本研究では、当時、運用開始が見込まれていた「京」や Helios といったペタスケール計算機を活用して full-f ジャイロ運動論シミュレーションの時空間スケールを飛躍的に拡大し、実験データに対する実証研究や ITER の性能予測に関わる輸送特性の研究を推進することに着想した。

2. 研究の目的

(1) ペタスケールプラズマ乱流コード開発

full-f ジャイロ運動論シミュレーション GT5D をペタスケール計算機で効率的に処理する技術を開発し、シミュレーションの時空間スケールを大幅に拡張する。

(2) プラズマ分布形成機構の研究

上記コードを用いた長時間スケールの数値実験によって温度分布やプラズマ回転分布を決定し、プラズマ分布の形成・維持に関わる輸送特性を調べる。

(3) 閉じ込めスケーリングの研究

上記コードを用いた数値実験によって装置サイズや加熱パワーに対する閉じ込めスケーリングを評価し、その物理機構を調べる。

3. 研究の方法

(1) ペタスケールプラズマ乱流コード開発

full-f ジャイロ運動論シミュレーション GT5D は差分法で5次元ジャイロ運動論モデルを取り扱う CFD コードである。このような CFD コードを「京」に代表されるペタスケール計算機上で効率的に処理する上で必須となるのが数万～数十万台のプロセッサ間の通信処理のオーバーヘッドを極小化することである。この目的のために、本研究ではジャイロ運動論モデルの各演算子の物理的な対称性を活用した多次元領域分割モデル、および、マルチコアプロセッサ上でマスタースレッドを通信専用割り当てて通信と演算を同時処理する技術の開発を進めた。

(2) プラズマ分布形成機構の研究

full-f ジャイロ運動論シミュレーションで定常プラズマ分布を決定するには、原理的には閉じ込め時間スケールの長時間シミュレーションが必要となる。本研究ではイオン温度勾配駆動 (ITG) 乱流の長時間シミュレーションを実施し、定常プラズマ分布への時間的な収束性の初期条件依存性等の検証を行った。また、長時間シミュレーションにおける5次元ジャイロ運動論モデルの精度検証を行うためにジャイロ運動論のオーダリングパラメータ $\epsilon = r_s/\alpha$ (r_s : イオン軌道半径、 α : プラズマ半径) について3次精度のジャイロ運動論を GT5D に実装し、 ϵ に関する計算結果の収束性も調べた。さらに、上記の検証の結果得られたイオン温度分布とプラズマ回転分布の形成・維持機構を詳細に調べた。

(3) 閉じ込めスケーリングの研究

十分に精度検証を行った full-f ジャイロ運動論シミュレーションを用いて、ITER の性能予測において最も重要な課題の一つとなっている乱流輸送の装置サイズスケーリングを ITG 乱流について調べた。ここで、温度勾配を固定する従来の f シミュレーションでは陽に議論されていなかった乱流輸送の加熱パワーに着目し、最初に加熱パワースケーリングを明らかにした。その上で、装置サイズスケーリングの議論における加熱パワーの影響を調べた。

4. 研究成果

(1) ペタスケールプラズマ乱流コード開発

開発した多次元領域分割モデルを複数の MPI コミュニケータと OpenMP によるスレッド並列化を組み合わせた階層的ネットワークに実装することで、通信コストを大幅に削減した。さらに、通信スレッドを用いて通信と演算を同時処理する技術によって通信処理のオーバーヘッドを飛躍的に削減し、「京」

フルシステム規模となる約 60 万コアまで処理性能のストロングスケーリングを拡張した(図 1)。これにより、研究開始当初に比べて約 256 倍(空間 4³ 倍×時間 4 倍)となる ITER 規模の ITG 乱流シミュレーションを実現した。

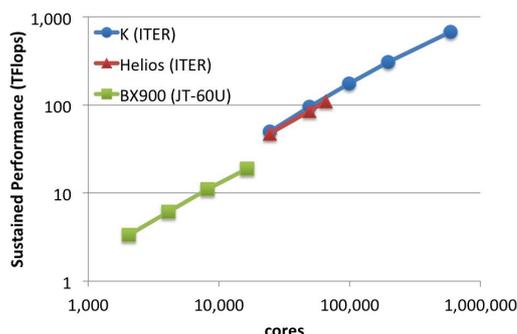


図 1: full-f ジャイロ運動論シミュレーション GT5D の京、Helios、BX900 におけるストロングスケーリング。問題サイズは ITER (768 x 768 x 64 x 128 x 32)、JT-60U (240 x 240 x 64 x 128 x 32)。

(2) プラズマ分布形成機構の研究

閉じ込め時間スケールの full-f ジャイロ運動論シミュレーションにより、得られた定常プラズマ分布が時間的に収束することを示した。さらに、初期条件として定常状態の蓄積エネルギーに近く、かつ、線形不安定な温度勾配を与えることで定常プラズマ分布への緩和速度を一桁程度加速できることを示した。

ジャイロ運動論モデルの計算精度に関しては、特に、運動量輸送の収束性を詳細に調べ、比較的長波長の ITG 乱流に関しては標準的な 1 次精度のジャイロ運動論で計算結果が十分に収束していることを示した。これは、ジャイロ運動論における高次精度補正項の波数依存性のために、長波長スペクトルが主要な ITG 乱流では高次精度補正項をほぼ無視できることに関係している。近年、運動量輸送が注目されるようになってから、運動量輸送の計算精度の問題は核融合分野で大きな論争となってきたが、本成果は従来の 1 次精度ジャイロ運動論に基づく多くの研究成果の妥当性を裏付けるものとして、各国の研究グループから引用されている。

得られた定常プラズマ分布を解析した結果、温度分布については、炉心に与えた加熱パワー入力と温度勾配が駆動する ITG 乱流輸送の熱流束がバランスするように定常状態が決まることを示した。一方、プラズマ回転分布については、炉心に運動量入力が無い状態でも ITG 乱流輸送による有限の運動量束が存在し、それが従来の f モデルでは無視されていた衝突性輸送による運動量束とバランスしていわゆる自発プラズマ回転分布が決まっていることを示した。また、ITG 乱流輸送による運動量束は運動量勾配に依存し

ない非拡散的な特性を示し、これがプラズマ中の密度、温度分布や径電場のシアがもたらす乱流場の磁力線方向スペクトルの非対称性によって決まることも明らかにした。

(3) 閉じ込めスケーリングの研究

full-f ジャイロ運動論シミュレーションによって ITG 乱流の加熱パワー P_{in} 依存性を調べ、実験的に観測されている閉じ込め時間の加熱パワースケーリング $P_{in}^{-0.7}$ を再現することに成功した。さらに、この加熱パワーによる閉じ込め劣化現象が温度分布の硬直性と関係しており、熱流束の雪崩的な伝搬を伴う間欠的なバーストが加熱パワーとともに増大し、温度上昇を妨げることを示した。加熱パワースケーリングは初期のトカマク実験から観測されている長年の未解決問題であり、本研究ではこれを初めて第一原理計算で再現することに成功した。

温度勾配を固定した従来の f ジャイロ運動論シミュレーションでは大型装置になると規格化した熱輸送係数 χ_i / χ_{GB} (χ_{GB} : ジャイロボーム係数) が装置サイズ $1/\rho^*$ によらず一定になることが示されたが、パワーバランスの観点からは、この結果は加熱パワー入力が装置サイズによらず一定となる状況を示唆している。一方、ITER では既存実験装置に比べて装置サイズだけでなく加熱パワーも数倍に増大することから、装置サイズと加熱パワーを同時にスケールさせて閉じ込めスケーリングを議論する必要がある。そこで、本研究では full-f ジャイロ運動論シミュレーションで両者を同時にスケールさせて ITG 乱流の輸送特性を調べた。その結果、f モデルが一定の χ_i / χ_{GB} を与える大型装置パラメータでも加熱パワーをスケールすると装置サイズに依存して輸送係数が増大することがわかった。この装置サイズスケーリングについても加熱パワースケーリングと同様の温度分布の硬直性をもたらす閉じ込め劣化現象が観測され、大型装置の閉じ込めスケーリングに加熱パワースケーリングが重要な影響を与えることがわかった。

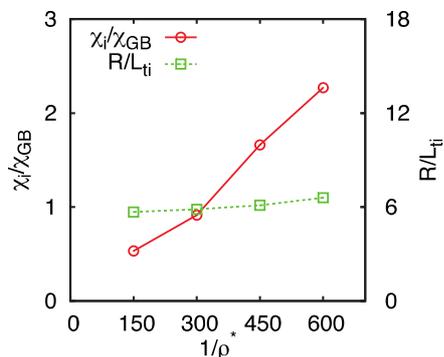


図 2: 装置サイズ $1/\rho^*$ と加熱パワーを同時にスケールしたシミュレーションで観測した熱輸送係数 χ_i / χ_{GB} (χ_{GB} : ジャイロボーム係数) とイオン温度 T_i の温度勾配パラメータ R/L_{ti} (R : 大半径、 $L_{ti} = |T_i / \nabla T_i|$)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 17 件)

“Communication overlap techniques for improved strong scaling of gyrokinetic Eulerian code beyond 100k cores on the K-computer”, Y. Idomura, M. Nakata, S. Yamada, M. Machida, T. Imamura, T.-H. Watanabe, M. Nunami, H. Inoue, S. Tsutsumi, I. Miyoshi, and N. Shida, *International Journal of High Performance Computing Application*, 査読有, 28, 73-86 (2014), doi: 10.1088/0029-5515/53/11/113039.

“Full-f gyrokinetic simulation over a confinement time”, Y. Idomura, *Phys. Plasmas*, 査読有, 21, 022517 (2014), doi: 10.1063/1.4867180.

“Plasma Size and Power Scaling of Ion Temperature Gradient Driven Turbulence”, Y. Idomura and M. Nakata, *Phys. Plasmas*, 査読有, 21, 020706 (2014), doi: 10.1063/1.4867379.

“Progress of full-f gyrokinetic simulation toward reactor relevant numerical experiments”, Y. Idomura, M. Nakata, and S. Jolliet, *Plasma Fusion Res.*, 査読有, 9, 3503028 (2014), doi: 10.1585/pfr.9.3503028.

“Plasma size and collisionality scaling of ion-temperature-gradient-driven turbulence”, M. Nakata and Y. Idomura, *Nucl. Fusion*, 査読有, 53, 113039 (2013), doi: 10.1088/0029-5515/53/11/113039.

“Accuracy of momentum transport calculations in full-f gyrokinetic simulations”, Y. Idomura, *Comput. Sci. Disc.*, 査読有, 5, 014018 (2012), doi:10.1088/1749-4699/5/1/014018.

“Plasma size scaling of avalanche-like heat transport in tokamaks”, S. Jolliet and Y. Idomura, *Nucl. Fusion*, 査読有, 52, 023026 (2012), doi:10.1016/j.jcp.2011.01.029.

“Parallel filtering in global gyrokinetic simulations”, S. Jolliet, B. F. McMillan, L. Villard, T. Vernay, P. Angelino, T. M. Tran, S. Brunner, A. Bottino, and Y. Idomura, *J. Comput. Phys.*, 査読有, 231, 745-758 (2012), doi:10.1016/j.jcp.2011.01.029.

“Performance evaluations of gyrokinetic Eulerian code GT5D on massively parallel multi-core

platforms”, Y. Idomura and S. Jolliet, *Proceedings of SC11*, 査読有, (2011).

“Consequences of profile shearing on toroidal momentum transport”, Y. Camenen, Y. Idomura, S. Jolliet, and A. G. Peeters, *Nucl. Fusion*, 査読有, 51, 073039 (2011), doi:10.1088/0029-5515/51/7/073039.

“Overview of toroidal momentum transport”, A.G. Peeters, C. Angioni, A. Bortolon, Y. Camenen, F.J. Casson, B. Duval, L. Fiederspiel, W.A. Hornsby, Y. Idomura, T. Hein, N. Kluy, P. Mantica, F.I. Parra, A.P. Snodin, G. Szepesi, D. Strintzi, T. Tala, G. Tardini, P. de Vries and J. Weiland, *Nucl. Fusion*, 査読有, 51, 094027 (2011), doi:10.1088/0029-5515/51/9/094027.

[学会発表](計 37 件)

“Progress of full-f gyrokinetic simulation toward reactor relevant numerical experiments”, Y. Idomura, 23rd International Toki Conference on Large-scale Simulation and Fusion Science, 18-21 November 2013, Toki, Japan (invited).

“ペタスケール計算機における核融合プラズマ乱流コードの最適化”, 井戸村泰宏, プラズマシミュレーションシンポジウム 2013, 2013 年 9 月 11 日~12 日, 土岐(invited).

“大域及び局所ジャイロ運動論モデルに基づく固定勾配/固定熱流駆動 ITG 乱流シミュレーション”, 仲田資季, 井戸村泰宏, プラズマシミュレーションシンポジウム 2013, 2013 年 9 月 11 日~12 日, 土岐(invited).

“Computational challenges in petascale fusion plasma simulations”, Y. Idomura, CCP2012 Conference on Computational Physics, 14-18 October 2012, Kobe, Japan (invited).

“Influence of plasma size on heat and momentum transport in global steady-state ITG simulations”, S. Jolliet and Y. Idomura, 17th Joint EU-US TTF meeting and 4th EFDA TTF meeting, 3-6 September 2012, Padova, Italy (invited).

“ペタスケール計算機における核融合プラズマ乱流シミュレーション”, 井戸村泰宏, 第 9 回核融合エネルギー連合講演会, 2012 年 6 月 29 日, 神戸(invited).

“Momentum transport in full-f gyrokinetic simulations”, Y. Idomura and S. Jolliet, 22nd International Conference on

Numerical Simulations of Plasmas, 7-9
September 2011, Long Beach, USA
(invited).

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

井戸村 泰宏 (IDOMURA, Yasuhiro)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・シ

ステム計算科学センター・研究主幹

研究者番号：00354580