

渡邊 智彦 (名古屋大学·大学院理学研究科)

「富岳」成果創出加速プログラム (2020.12.2改訂)

■ 代表機関

名大: ◎渡邊智彦 他

■ 協力機関

JAEA: 〇井戸村泰宏 他

NIFS: O藤堂泰 他

QST: O本多充 他

■ 連携機関(国内)

理研, 京大

■ 連携機関(海外)

Princeton Univ. (米国), ORNL (米国), CEA (フランス), DIFFER (オランダ), IST (ポルトガル)

http://p.phys.nagoya-u.ac.jp/bpp/index.html



■本課題の背景・目的

- 核融合エネルギーの実現
 - 人類の普遍的課題への挑戦と未来開拓
 - 核融合炉実用化に向けた核燃焼プラズマ物理の探求
- 制御熱核融合
 - 水素同位体(重水素D・三重水素T)の原子核を融合さ せて発生するエネルギーを利用



- 既存実験:JT-60(日、1985-2008)、JET(欧、1982-)
 - 重水素プラズマの模擬実験で臨界条件を達成
- 国際熱核融合実験炉ITER(日米欧露中韓印、2025-)
 - 人類初の核燃焼プラズマ状態を実現し、核融合炉の科学的・工学的可能性を実証
 - => 核燃焼プラズマ閉じ込め物理の解明が重要







ITER (2025-)



■本課題の目的・概要

- 重点課題⑥サブ課題Dでのこれまでの取り組み
 - 計算規模・物理スケールの増大に向けたアプリ性能向上
 - マルチスケール・マルチフィジックスを含むモデル拡張
 - LHD, JT-60U実験を対象とした実証研究によるコード検証
 - 超大規模シミュレーションのための基盤技術開発
 - => 核融合研究におけるエクサスケール計算基盤構築
 - 本課題の目的:

「富岳」で初めて可能な超大規模計算・解析を実現

多次元位相空間上でのスケール間相互作用をともなう乱流・構造形成・場と粒子相互作用と輸送現象の解明

- 核燃焼プラズマのマルチスケール乱流輸送
- 核燃焼プラズマの自発回転と過渡応答
- 核燃焼生成高エネルギー粒子の閉じ込め
- 核融合大規模シミュレーションとAI/データ科学の融合
- => 核燃焼プラズマ研究におけるブレークスルー









JT-60SA [QST] (2020-)

ターゲットアプリの概要



[1] 核燃焼プラズマのマルチスケール乱流輸送シミュレーション

(アプリケーション: GKV 主担当:名大, QST, NIFS)

核燃焼プラズマ:e, D, T, 不純物イオンなど異なる質量・電荷をもつ多成分系;流体近似を超えた運動論が必要

多粒子種がもたらす粒子運動論的マルチスケール乱流 による輸送機構への理解が不可欠

=> 核燃焼プラズマの閉じ込め特性解明と性能予測

 電子からイオン・スケールまでをカバーしたプラズマのマルチ スケール乱流シミュレーション

=> スケール間乱流相互作用発見 [Maeyama, PRL 2015]

 LHD重水素実験(2018-)に先駆けて重水素の閉じ込め 改善を予測 [Nakata, PRL 2017]

=> その後LHD重水素実験により予測が検証された

- 「富岳」により取り組む課題
 - 多成分核燃焼プラズマ乱流相互作用の超大規模
 5D-DNS (10¹²格子点規模の解析を実現)
 - マルチスケール・プラズマ乱流の5D-DNSの実験検証と JT-60SA実験に向けた予測
 - ITER, JT-60SA実験で重要となる不純物(W)の乱流輸
 送シミュレーション



マルチスケール乱流シミュレーション



LHD水素/重水素プラズマの乱流輸送解析

[2] 核燃焼プラズマの自発回転と過渡応答

(アプリケーション: GT5D 主担当:QST, JAEA)

- プラズマの回転:プラズマの巨視的安定性と閉じ込め特性の双方に大きく影響
 - 核燃焼プラズマでは外部から回転駆動はできずプラズマの自発回転が重要
 - プラズマの自発回転機構は長年の謎; 天体プラズマとの共通点 =>プラズマの自発回転を生じる角運動量輸送機構解明が必要
- ASDEX-U装置における電子変調加熱実験の複雑な過渡的プラズマ応答を20msec(~百 万時間ステップ)にわたる乱流数値実験で再現 [Idomura, Phys. Plasmas 2017]
 - 電子加熱によるイオン系乱流から電子系乱流への遷移
 - イオン電流(粒子束)のJxBトルクによる回転変化(角運動量輸送)

GT5Dによる数値実験

=> 乱流の非線形現象を活用した新たな炉心 制御手法につながる理論的指針

「富岳」により取り組む課題

- 自発回転を形成・維持する定常的な角運 動量輸送機構の解明
- 外部加熱に対する回転特性の過渡的な非 線形応答の解析

「富岳」数万ノードでの高性能計算準備完了 (メニーコア最適化・省通信手法)

10¹²格子点規模の超大規模計算



[3] 核燃焼生成高エネルギー粒子閉じ込めのハイブリッド シミュレーション: MEGA 主担当: NIFS, QST)

核燃焼生成粒子:核融合反応生成高エネルギーα粒子はプラズマの自己加熱に必須

- 高速のヘリウムイオン(α粒子)の効率的な閉じ込めと分布制御が必要
- プラズマ(MHD)波動を励起し, α粒子の損失・自己加熱の劣化が生じる恐れ
 >ハイブリッドシミュレーションによる高エネルギー粒子閉じ込め解析
- 高エネルギー粒子駆動によるプラズマの大域的振動を再現 [Wang+, PRL 2018; NF2019]
- JT-60Uにおける長時間のMHDバーストを再現 [Bierwage+, Nature Comm. 2018]
 => 運動論的熱イオンと高速粒子を取り入れた非線形解析を世界に先駆けて実現
- 「富岳」により取り組む課題
 - ITER核燃焼プラズマを想定しα粒子閉じ込めの超大規模解析実現(10¹²粒子量)
 - 国際連携によるJET DT実験のシミュレーションの実現とその検証
 - LHDおよびJT-60SA実験を対象とした非線形波動粒子相互作用過程の解明



[4] 核融合大規模シミュレーションへのAI/データ科学の 融合的アプローチ (アプリケーション: GKV 主担当: QST, NIFS)

核融合大規模シミュレーション: プラズマ物理学の第一原理にもとづく高い信頼性

- 6次元状態空間における膨大なデータが生成されポスト処理が困難
- 超大規模シミュレーションのため計算コスト大 => 代理モデルの必要性
 > AI/データ科学手法との融合により「富岳」を用いた解析の高効率化
- 輸送シミュレーション結果の同化とモデル構築 [Narita+, PPCF2018; Nunami+, PoP2018]
- 輸送コードとの動的結合を実現(GOTRESS/TRESS+GKVを開発)[Honda+, PoP2019]
 => 核融合大規模シミュレーションとAI/データ科学の協働を実現
- 「富岳」により取り組む課題
 - 画像解析・機械学習・データ探索による分布関数構造抽出 => 理論・モデル改良
 - GOTRESS/TRESS+GKVの生成データを用いたTensorFlowによる代理モデル構築
 ニ> 広範な実験解析への適用・普及



「核燃焼プラズマ閉じ込め物理の開拓」実施体制



■ 国際的な計算科学拠点とも連携(理研, ORNL, CEA/MDLS)