

令和3年度高性能汎用計算機高度利用事業
「富岳」成果創出加速プログラム
「核燃焼プラズマ閉じ込め物理の開拓」
成果報告書

令和4年5月30日
国立大学法人東海国立大学機構
名古屋大学

渡邊智彦

目次

1. 補助事業の目的.....	- 1 -
2. 令和3年度（報告年度）の実施内容	- 1 -
2-1. 当該年度（令和3年度）の事業実施計画	- 1 -
2-2. 実施内容（成果）	- 2 -
2-3. 活動（研究会の活動等）	- 32 -
2-4. 実施体制	- 33 -

補助事業の名称

「富岳」成果創出加速プログラム
核燃焼プラズマ閉じ込め物理の開拓

1. 補助事業の目的

人類初の持続的核融合燃焼プラズマの実現を目指し、国際熱核融合実験炉 ITER の建設がフランスで進められている。ITER などの核燃焼状態の維持には、装置内部のプラズマ密度や温度分布がいかんして形成され、また、電磁場揺らぎをともなって自発的に発生する擾乱に対してプラズマがどのように応答するかを理解することが極めて重要となる。こうした核燃焼プラズマ挙動の本質的理解と予測性能の向上が求められている状況を踏まえ、本課題では以下の4つのサブテーマに関し、「富岳」を活用した超大規模シミュレーションによる研究開発を推進する。

このため、代表機関の国立大学法人東海国立大学機構は、協力機関の国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、大学共同利用機関法人自然科学研究機構核融合科学研究所、国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構、と共同で業務を実施する。

国立大学法人東海国立大学機構は、上記の目的を達成するため、以下の4つのサブテーマ（[1], [2], [3], [4]）に関する研究開発とそのとりまとめを行うとともに、プロジェクトの全体推進を担当する。

2. 令和3年度（報告年度）の実施内容

2-1. 当該年度（令和3年度）の事業実施計画

(1) サブテーマ[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

(1-A) 核燃焼プラズママルチスケール乱流解析

「富岳」において局所乱流輸送解析コード GKV を用いた多粒子種マルチスケールシミュレーション解析を行う。

(1-B) イオンスケール乱流計算による重イオン輸送の数値実験

重イオン成分を導入した GKV コードを用い、イオンの運動スケールに対して分解能を持つプラズマ乱流シミュレーションを実施し、重イオン輸送特性の評価を行う。

(2) サブテーマ[2] 核燃焼プラズマの自発回転と過渡応答

大域的乱流輸送解析コード GT5D を用いたプラズマ自発回転の数値実験<協力機関：国立研究開発法人日本原子力研究開発機構>

ジュール加熱実験におけるプラズマ自発回転のプラズマパラメータ依存性およびそれを形成・維持する運動量輸送機構を解析する。

(3) サブテーマ[3] 核燃焼生成高エネルギー粒子の閉じ込め解析

高エネルギー粒子閉じ込め解析の実証研究と核燃焼プラズマ解析

<協力機関：大学共同利用機関法人自然科学研究機構核融合科学研究所>

高エネルギー粒子閉じ込め解析コード MEGA を用いて、JT-60SA および LHD プラズマを対象とした高エネルギー粒子駆動不安定性と MHD 不安定性に関する数値実験及び ITER と JET の核燃焼プラズマを対象とした高エネルギー粒子閉じ込め解析を実施する。

(4) サブテーマ[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

大規模データの可視化による乱流輸送解析手法の開発<協力機関：国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構>

前年度に開発・整備された機械学習プログラムを応用し、乱流輸送シミュレーションで得られたデータの画像解析と物理描像の抽出を実施する。

(5) プロジェクトの全体推進

本事業を効率的かつ効果的に推進するため、プロジェクト推進会議を適宜開催し、参加各機関の連携・調整を実施する。具体的にはプロジェクト全体の管理・調整業務（会計・総務・連絡・調整等）、全サブテーマに共通的な課題の推進支援業務を行うとともに、成果報告会・シンポジウムを開催する。

2-2. 実施内容（成果）

2-2-1. サブテーマ[1]の成果概要

本サブテーマでは、磁場閉じ込めプラズマ輸送の第一原理となるジャイロ運動論に基づき、5次元位相空間を扱う局所乱流輸送解析コード GKV を用いて、「富岳」を活用したシミュレーションにより、核燃焼を想定した多種粒子からなるプラズマ中におけるマルチスケール乱流輸送の機構解明とその検証に取り組んでいる。あわせて、ITER や先進超伝導トカマク装置(JT-60SA)実験の重要課題である不純物輸送解析を進めている。令和3年度には、以下の成果を達成した。

- (1) 核燃焼プラズマを想定した多粒子種高解像度乱流シミュレーションにより、マルチスケール乱流相互作用過程の詳細解析とともに、総電子熱輸送フラックス低減の電子・イオン温度比依存性を明らかにした。
- (2) マルチスケール乱流において、電子軌道幅スケールの微細乱流揺動が、イオン軌道幅スケールの捕捉電子モード不安定性の成長を抑制する機構を同定した。
- (3) タングステン（重イオン）不純物の輸送過程において、イオン温度勾配乱流による輸送フラックスの非等方性の原因を明らかにするとともに、捕捉電子モード乱流による粒子フラックスの駆動機構を解明した。
- (4) JT-60 トカマク配位における不純物輸送の解析を実施し、イオンおよび電子軌道幅スケールの乱流が駆動する輸送の評価を実施した。

2-2-1-1. 核燃焼プラズママルチスケール乱流シミュレーション

核燃焼プラズマ実験では、核融合生成 α 粒子による電子加熱が主な加熱過程となるため、高電子温度となることが予測されている。電子・イオン温度比 T_e/T_i は微視的不安定性におけるキーパラメータの一つである。Fig.2.2.1-1 は電子・イオン温度比に対する線形不安定性の変化を示したもので、線形理論で知られる通り、 T_e/T_i が高くなるほど波長の長いイオンスケールの不安定性（捕捉電子モード、Trapped

Electron Mode, TEM) は不安定化し、逆に波長の短い電子スケールの不安定性 (電子温度勾配モード, Electron Temperature Gradient mode, ETG モード) は安定化される傾向にある。そのため、高電子温度となる核燃焼プラズマにおいても電子スケール乱流を介したマルチスケール相互作用が生じるかは重要な論点である。そこで、令和 2 年度に開始した核燃焼プラズマのマルチスケール乱流シミュレーション解析を、異なる温度比領域に適用し、その影響を評価した[1-3]。

Fig.2.2.1-2 は「富岳」を用いたマルチスケール乱流シミュレーションによる電子熱輸送フラックスの電子・イオン温度比 T_e/T_i 依存性を示したものである。まず、比較として図示したイオンスケールシミュレーションまたは電子スケールシミュレーションの結果を見ると、 T_e/T_i の上昇に伴い、電子スケールの ETG モードによる輸送 (緑線) は減少し、 T_e/T_i が 2 を超えるとイオンスケールの TEM による輸送 (橙線) が急増している。マルチスケール乱流シミュレーション (青線) では、 $T_e/T_i = 1$ の場合には電子スケールシミュレーションと、 $T_e/T_i = 4$ の場合にはイオンスケールシミュレーションと輸送レベルが同程度となっており、それぞれが支配的な場合にはマルチスケールシミュレーションと単一スケールシミュレーションの一致が見られる。興味深いのは両者が共存している領域で、特に $T_e/T_i = 3$ の場合には、マルチスケールシミュレーションはイオンスケールシミュレーションよりも有意に低い値となっている。つまり、マルチスケール相互作用による総電子熱輸送の低減が生じたことを意味する。

Fig. 2.2.1-3 は、輸送低減が観測された $T_e/T_i = 3$ のケースについて、ジャイロ運動論的エントロピーバランス方程式に基づく非線形相互作用項の働きを解析したものである。定式化の詳細は割愛するが、揺らぎの駆動を示す非線形エントロピー伝達関数を、イオンスケールの寄与と電子スケールの寄与に分離して評価した。その結果、ETG モードが TEM の減衰に働く (緑線が負の値を示す) ことが観測された。すなわち、電子スケール乱流による TEM の安定化効果を、非線形三波結合の詳細解析からも確認することができた。

以上の結果は、核燃焼プラズマの高電子温度領域においてもマルチスケール相互作用が存在しうることを意味している。また、マルチスケール相互作用による総電子熱輸送低減の可能性を示す世界初の成果であり、プラズマ閉じ込め改善が見込める高電子温度領域が存在しうるとして、今後の核融合炉開発への貢献が期待される。

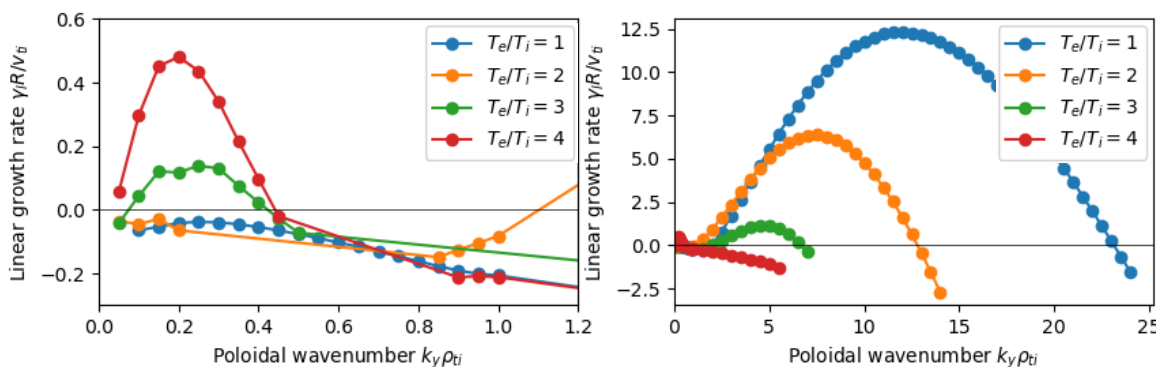


Fig. 2.2.1-1 Linear growth rates as functions of poloidal wave number (left) for ion scale and (right) for electron scale. Blue, orange, green and red dots correspond to the cases of $T_e/T_i = 1, 2, 3$ and 4, respectively.

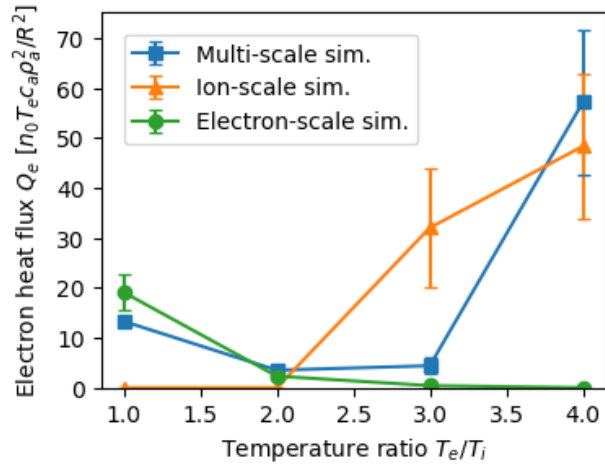


Fig. 2.2.1-2 Electron heat flux as functions of electron-to-ion temperature ratio. Blue, orange and green lines correspond to the results of multi-scale, single ion-scale, and single electron-scale simulations respectively.

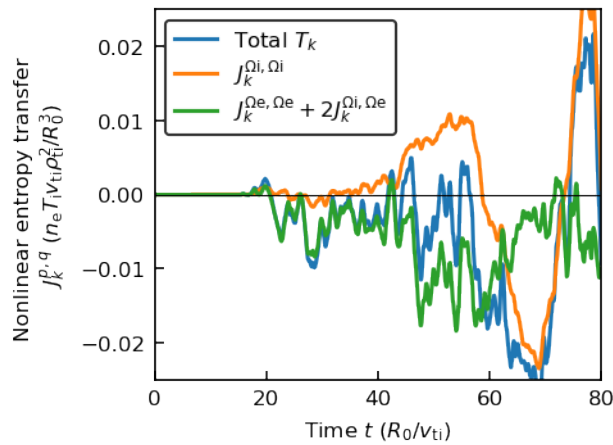


Fig. 2.2.1-3 Time evolution of nonlinear entropy transfer function. Blue, orange, and green lines correspond to total contribution, ion-scale coupling, and contributions from electron scales, respectively.

2-2-1-2. マルチスケール乱流における捕捉電子モード不安定性の成長抑制機構

上記で見出されたマルチスケール乱流相互作用において、イオン軌道幅（ジャイロ半径）スケールの捕捉電子モード(TEM)の成長が、微細な電子軌道幅スケールを持つ電子温度勾配(ETG)乱流により抑制される過程について、詳細な数値および理論解析を行なった[4-10]。ここでは、イオンに水素のみを用いたケースを対象にする。マルチスケールシミュレーションで観測された電場揺動を Fig. 2.2.1-4 左図に、ここで計測された TEM 不安定性の成長率を Fig. 2.2.1-4 右図に示す。左図のカラーマップに見られるように、微細な ETG 乱流とともに、y 方向により長い波長をもつ TEM の揺動成分が成長してくる。しかし、その成長率を計測すると、右図の緑色の四角マークのようにになっている。これは、ETG 乱流のない場合の

成長率（紫線）を大きく下回っており、また両者の差は TEM の波数(k_y)の 2 乗に比例することが確認された（水色線）。この事実は、ETG 乱流による実効的な拡散効果により TEM 不安定性の成長率が低下したことを示している。さらに、ジャイロ運動論を用いた理論解析により、ETG 乱流による拡散モデルを導出し、ここで得られたシミュレーションと整合した結論を得ることができた。これは、核融合プラズマにおけるマルチスケール乱流の理論的理解の深化と、そのモデル化の進展に貢献する成果である。

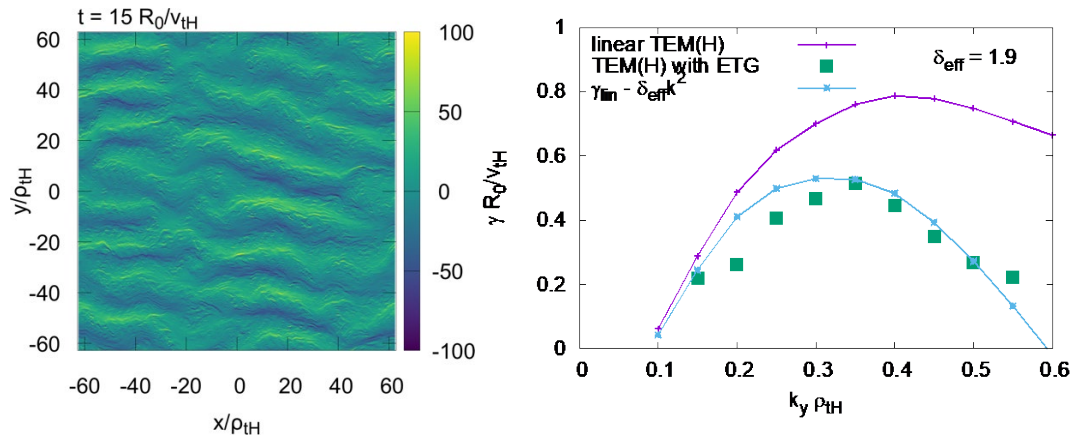


Fig. 2.2.1-4 (left) A snapshot of the electric field fluctuations of the TEM and ETG turbulence, and (right) linear growth rates of the TEM obtained by the linear (purple) and the multi-scale simulation (green squares) where the cyan curve shows the linear growth rate reduced by the effective diffusion.

2-2-1-3. 重イオン不純物輸送フラックスの駆動機構の解析

重イオン不純物がどのように核融合炉内に蓄積し、それをいかにして排出するか、という問題は核融合炉実現に向けて重要な課題である。特に ITER では、炉壁にタングステンが使用されるため、その炉心プラズマへの混入は、放射損失を介したプラズマ温度の低下をもたらすものとして危惧されている。そこで、タングステンをはじめとした重イオン不純物のプラズマ乱流による輸送機構の理解を深めるとともに、その定量的な予測につなげるモデリングへの貢献が、ジャイロ運動論的シミュレーションに期待されている。

本サブテーマでは、令和 2 年度からタングステン不純物輸送のシミュレーションに取り組み、イオン温度勾配(ITG)乱流による輸送への非線形効果[11-13]、捕捉電子モード乱流による輸送フラックスへの圧縮性効果[14-15]、などについて研究を進めてきた。Fig. 2.2.1-5 は、GKV シミュレーションで得られた結果であり、ITG 不安定性の線形（左）および非線形（右）状態において駆動される規格化タングステン粒子束のポロイダル角 (θ) 分布を表示したものである[16]。線形状態では、密度勾配($R/Ln,w$)の増大に伴って、内向きから外向きに粒子束の向きが反転するが、それらはいずれも $\theta = 0$ のトーラス外側でピークしていることがわかる。一方、非線形乱流状態では、輸送フラックスの分布は大きく変化し、 $|\theta| > \pi/2$ のトーラス内側領域でも大きな輸送フラックスが生じることが明らかとなった。

さらに、TEM によるタングステン不純物の輸送へと解析を拡張し、シミュレーションとジャイロ運動論にもとづく理論解析から、粒子フラックスを反転させる鍵となる磁力線平行方向の圧縮性効果が、流体極限に限らずジャイロ運動論が適用されるより広い条件においても重要となることを、輸送フラックスの非等方性ととも明らかにした。

これらの結果は、重イオン不純物の乱流による異常輸送機構の理解に貢献するとともに、簡便な線形固有モード解析にもとづく輸送フラックスのモデル構築にも寄与する成果である。

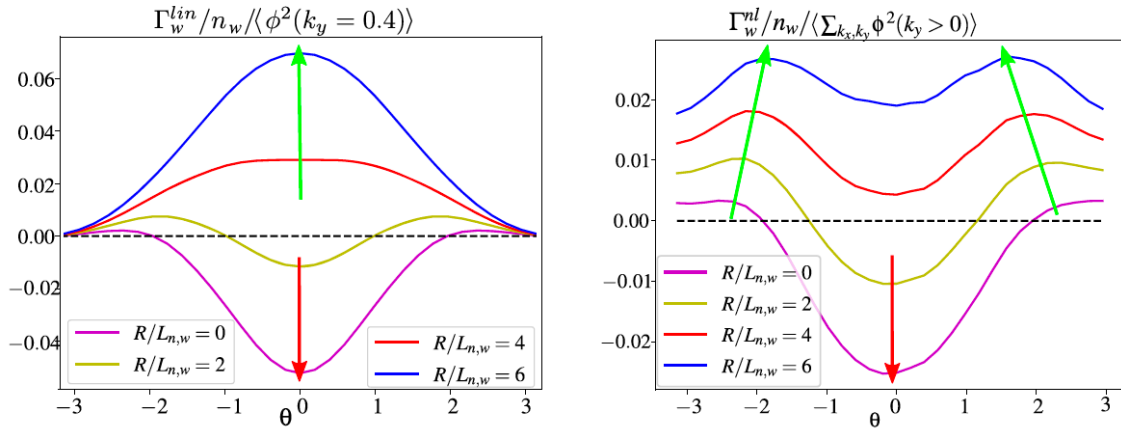


Fig. 2.2.1-5 Poloidal profiles of the tungsten particle flux (normalized) for different density gradient in the linear (left) and nonlinear (right) simulations, where the ion temperature gradient turbulence drives the tungsten transport in the trace particle limit [16].

2-2-1-4. JT-60 トカマク配位における不純物輸送の解析

本サブテーマでは、我が国で建設されたトカマク型核融合実験装置である JT-60 での実験配位を用いたタングステン不純物を含む異常輸送シミュレーションについても解析を行なった。その初期結果として得られた不安定性の成長率と非線形状態でのタングステン輸送フラックスのスペクトルを Fig. 2.2.1-6 に示す。左図は、イオン軌道幅から電子軌道幅スケールにおける不安定性の成長率を示している。低波数 (k_y) 領域における ITG 不安定性のみならず、微細スケール (高波数領域) の ETG 不安定性もともに発生することがわかる。一方、中央図と右図は、それぞれ、イオンおよび電子軌道幅スケールでの乱流輸送フラックスを示している (ここでは、輸送フラックスはポテンシャル揺動の大きさと規格化されている)。従来は考慮されてこなかった ETG 乱流によっても有限の不純物輸送フラックスが生じることがわかる。一方、(規格化されていない) 輸送フラックスで見ると、ETG に比べ ITG 乱流の寄与が支配的であることがわかる。また、これに先立って解析実施したイオン有限軌道幅効果が ETG 乱流に及ぼす影響についても、ETG 不安定性の増大などの新たな成果が得られており [17-18]、マルチスケール乱流における不純物輸送解析の必要性が確認された。

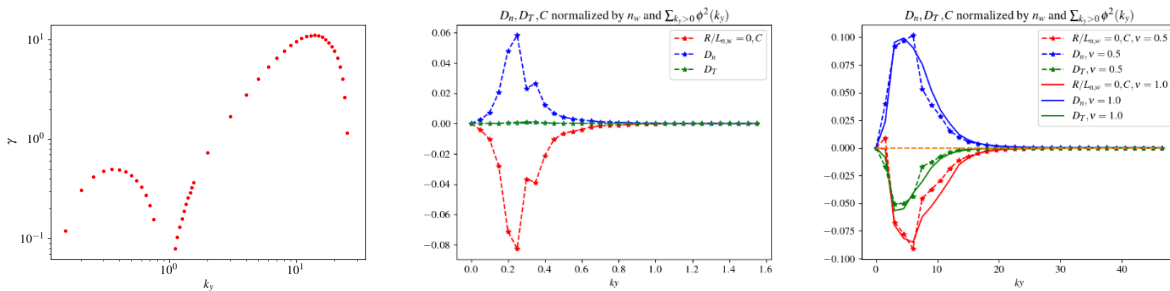


Fig. 2.2.1-6 GKV simulation results for a JT-60 plasma discharge. Linear growth rates of the ITG and ETG instabilities (left), and the tungsten particle fluxes for ion (middle) and electron (right) orbit scales in cases with different collisionality (ν).

【参考文献】

- [1] S. Maeyama, T.-H. Watanabe, M. Nakata, M. Nunami, Y. Asahi, A. Ishizawa, “Gyrokinetic Simulations of Cross-Scale Interactions between Electron Temperature Gradient and Trapped Electron Modes on the Supercomputer Fugaku”, 30th International Toki Conference (ITC30) (Online, November 17, 2021). (国際会議・招待講演)
- [2] S. Maeyama, “Exploring multi-scale turbulent interactions in high electron temperature burning plasma”, 5th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPS-DPP2021), (Online, September 28, 2021). (国際会議・招待講演)
- [3] 前山伸也, “核燃焼プラズマに向けたマルチスケール乱流輸送現象の外挿性”, 日本物理学会第 77 回年次大会 (オンライン, 2022 年 3 月 18 日) .
- [4] T.-H. Watanabe, S. Maeyama, M. Nakata, “Stabilization of trapped electron mode instability due to electron”, The Joint APTWG-TTF meeting (Online July 6-9, 2021).
- [5] T.-H. Watanabe, S. Maeyama, M. Nakata, “Kinetic simulation of multi-scale turbulence interactions and diffusion in magnetized plasma”, XXXI IUPAP Conference on Computational Physics (Online, August 1-5, 2021).
- [6] T.-H. Watanabe, “A role of effective diffusion by ETG turbulence in multi-scale drift wave instabilities”, 15th Japan-Korea Workshop on "Modeling and Simulation of Magnetic Fusion Plasmas" (Online, August 26-27, 2021).
- [7] 渡邊智彦, 前山伸也, 仲田資季, 電子温度勾配乱流中での捕捉電子モードへの実効拡散効果のモデリング, 日本物理学会 2021 年秋季大会 (オンライン, 2021 年 9 月 20 日-23 日) .
- [8] T.-H. Watanabe, Kinetic Simulations for Burning Plasma Physics in Magnetic Fusion, The FIRST INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTATIONAL SCIENCE & DATA ANALYTICS (Online, November 21-24, 2021). (国際会議・招待講演)
- [9] 渡邊智彦, 磁場閉じ込め核融合燃焼プラズマの異常輸送シミュレーション, 第 38 回プラズマ・核融合学会年会 (オンライン, 2021 年 11 月 22 日-25 日)
- [10] T.-H. Watanabe, Y. Idomura, Y. Todo, and M. Honda, “Exploration of burning plasma confinement physics using the supercomputer Fugaku”, 2nd Fusion HPC Workshop (Online, December 2-3, 2021). (国際会議・基調講演)
- [11] Shaokang Xu, S. Maeyama, and T.-H. Watanabe, “Anomalous tungsten transport driven by ion temperature gradient turbulence”, The Joint APTWG-TTF meeting (Online, July 7, 2021) . (国際会議)
- [12] Shaokang Xu, S. Maeyama, and T.-H. Watanabe, “Anomalous tungsten transport driven by ion temperature gradient turbulence”, Japan-Korea JK Workshop on “Modeling and Simulation of Magnetic Fusion Plasma”, (Online, August 27, 2021) . (国際会議)

- [13] Shaokang Xu, S. Maeyama, and T.-H.Watanabe, “Anomalous tungsten transport driven by ion temperature gradient turbulence”, The 30th International Toki Conference on Plasma and Fusion research (Online, November 8, 2021). (国際会議)
- [14] Shaokang Xu, S. Maeyama, and T.-H.Watanabe, “Reversal of heavy impurity pinch velocity in trapped electron mode turbulence by decreasing the magnetic shear”, 19th Burning Plasma Simulation Initiative (BPSI) Meeting (Online, January 6, 2022) . (国際会議)
- [15] Shaokang Xu, S. Maeyama, and T.-H.Watanabe, “Reversal of heavy impurity pinch velocity in trapped electron mode turbulence by decreasing the magnetic shear”, 日本物理学会第 77 回年次大会 (オンライン、2022 年 3 月 16 日) (国内会議)
- [16] Shaokang Xu, S. Maeyama, and T.-H.Watanabe, “Anomalous tungsten transport driven by ion temperature gradient turbulence”, Nuclear Fusion **62** (2002) 064003. (査読付き論文)
- [17] S. Maeyama, S. Kusaka, and T.-H. Watanabe, “Effects of ion polarization and finite-b on heat transport in slab electron-temperature-gradient driven turbulence”, Physics of Plasmas **28** (2021) 052512. (査読付き論文)
- [18] T.-H. Watanabe, S. Kusaka, T. Oguri, and S. Maeyama, “Roles of Kinetic Ion Dynamics on Electron-Scale Turbulent Transport”, 28th IAEA Fusion Energy Conference (Online, May 10-15, 2021).

2-2-2. サブテーマ[2]の成果概要

本サブテーマでは、磁場閉じ込めプラズマの自発回転と過渡応答の解明に挑戦する。磁場閉じ込めプラズマではプラズマ回転による炉心プラズマの安定性向上が閉じ込め性能の向上に大きく影響するため、ITER や将来の原型炉の炉心性能を決定する重要な因子となっている。本研究では既存装置の実験で得られているプラズマ境界からの運動量輸送によって形成される自発プラズマ回転の定常分布、および外部加熱に対するプラズマ回転の過渡応答に関する実験データを大域的乱流輸送解析コード GT5D によって解析し、省エネルギーのプラズマ回転の維持・制御手法の構築に必要な、プラズマ乱流による運動量輸送機構を解明する。令和 3 年度は ToreSupra 装置 (CEA) におけるジュール加熱実験を対象とした数値実験を実施し、実験的に観測された自発プラズマ回転分布のプラズマパラメータ依存性を数値実験で再現することに成功した[5]。この他、GT5D における粒子衝突モデルの高精度化[1]、計算性能の向上[3,6,7]、および GT5D を用いた応用研究[2,4]に関する成果が得られた。

2-2-2-1. 「富岳」における数値実験環境の整備

昨年度までに整備した「富岳」向け GT5D を用いた本格的な数値実験に向けて数値実験環境の整備を実施した。GT5D において、昨年度に「富岳」向けの省通信型行列解法[Idomura,SC20]を開発した。この行列解法は FP16 演算を用いて実装された対称逐次加速緩和法 (SSOR) 前処理と FP64 演算で実装された省通信一般化最小残差法 (CA-GMRES) [Hoemmen,PhD2010]を組合せた混合精度処理によって構築されている。このうち、FP16SSOR 前処理のハイパーパラメータである加速パラメータ ω と SSOR の反復回数が収束特性に大きく影響する。これらのパラメータの最適値は行列に依存するが、GT5D では

上記行列解法を線形移流項の陰解法差分に適用しているため、プラズマパラメータと格子数、時間ステップ幅等の数値パラメータを与えると行列が一意に決まり、時間変化しない。このため、GT5Dの初期化処理にSSOR前処理パラメータの自動最適化を行う機能を実装した。Fig.2.2.2-1にToreSupra装置の数値実験パラメータを用いて「富岳」384ノードで計測した処理性能を示す。昨年度に開発したFP16SSOR前処理付きCA-GMRES (CA-PGMRES) ソルバはITER装置向けにハイパーパラメータを最適化しているが、このソルバを用いても前処理なしCA-GMRESに比べて約半分の計算コスト削減が実現する。これにハイパーパラメータの自動最適化を適用すると、ここからさらに約4割のコスト削減が実現し、オリジナルのCA-GMRESと比較して1/3以下に計算コストを削減することに成功した。

行列解法の性能向上以外にも数値実験データのポスト処理環境を刷新した。GT5Dでは主要なシミュレーションデータをPOSIX-IOによってバイナリデータとして出力し、ポスト処理プログラムによってバイナリデータから解析データを生成する。このポスト処理では、「京」をはじめとする複数のスーパーコンピュータで共通に利用可能なツールとしてPOSIX-IOとgnuplotを採用し、シミュレーション結果の解析および可視化を行ってきた。しかしながら、この処理方式では時系列データに対して膨大なファイル数のデータが出力されるため、数値実験1ショットあたりの生成ファイル数が数10万から100万に達し、「富岳」を用いた長時間スケールの数値実験ではこれをさらに上回るファイル数が生成されるようになってきた。また、生成したファイルはgnuplotで取り扱い可能なASCIIデータとなっており、さらに全てのファイルにプロットの座標データが冗長に格納されているため、データサイズも大きくなる。特に、「富岳」ではファイル数(i-node)の制限が新たに課され、また大規模なファイル数のデータ処理ではストレージが不安定化する等、従来の処理方式において多数の問題が顕在化してきた。この課題を解決するために、ポスト処理にnetcdfとjupyter-labを新たに導入した。気象分野で幅広く利用されているバイナリデータ形式であるnetcdfは多数の種類のバイナリデータを単一のファイルイメージで格納することが可能であり、C、Fortran、Python等のAPIが利用可能である。spackの導入によって「富岳」で標準的に利用可能となったpython環境を組合せ、さらにwebベースのユーザインターフェースであるjupyter-labを用いたクライアント・サーバ処理環境を「富岳」とユーザPC間で構築し、この上でpythonの скрипт作成とデータ可視化を実施することで、データ転送なしに多様なデータ解析を行える環境を構築した。これによりファイル数は数10万から数100まで削減され、データサイズも半分以下に削減できた。

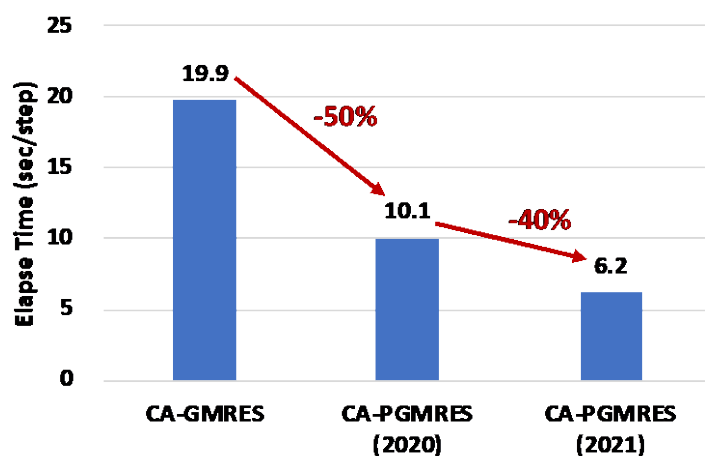


Fig.2.2.2-1: Computational costs of the communication-avoiding GMRES (CA-GMRES) method without preconditioning, the Communication-Avoiding Generalized Minimum RESidual method with FP16 Symmetric Successive Over Relaxation (SSOR) preconditioner (CA-PGMRES) with the original hyperparameters ($\omega=0.005$, $s=8$), and the CA-PGMRES with the optimized hyperparameters ($\omega=0.015$, $s=4$). Here, ω is the acceleration parameter and s is the number of iterations in FP16 SSOR preconditioner. Numerical experiments with ToreSupra parameters were computed using 384 nodes on Fugaku.

2-2-2-2. ToreSupra 装置の数値実験に向けた予備的検討

昨年度に実施した予備的検討により、自発プラズマ回転の遷移現象が観測されている ToreSupra 装置のジュール加熱実験[Bernardo,PPCF2015]を解析対象として選定した。この実験は最も基礎的な誘導電場によるジュール加熱でプラズマを立ち上げる運転方式の放電であるが、放電の初期にプラズマ密度の増大に伴って、低密度の LOC (Liner Ohmic Confinement) フェーズと高密度の SOC (Saturated Ohmic Confinement) フェーズで乱流輸送特性の遷移が観測されている (Fig.2.2.2-2(a))。まず、自発プラズマ回転分布に関しては離散的なトロイダルコイルに起因するリップル摂動磁場がもたらすトロイダル粘性効果によって決まる周辺領域 ($r/a=0.8-0.9$) のプラズマ回転速度を基準として LOC フェーズでは負方向の自発プラズマ回転が形成されるのに対し、SOC フェーズでは正方向の自発プラズマ回転に遷移する (Fig.2.2.2-2(b))。ここで、プラズマ回転の符号はプラズマ電流の方向を基準に定義される。蓄積エネルギー W_{th} の時間発展を見ると、LOC フェーズでは密度の増大に伴い蓄積エネルギーも単調に増加するが、SOC フェーズでは蓄積エネルギーが飽和する。また、不純物輸送に関しては、LOC フェーズと SOC フェーズの間で炭素不純物が吐き出されて燃料純度が向上し、炭素と重水素の比率で決まる実効電荷数が $Z_{eff} \sim 3.1$ から $Z_{eff} \sim 1.3$ に低下する。

昨年度実施した予備的数値実験では、計算コストを削減するために、プラズマ半径を 1/2 にスケールした数値実験用パラメータを作成し、計算コストを約 80 万ノード時間/ケースまで削減した。今年度は、上記の SSOR パラメータ最適化によりこの計算コストを約 50 万ノード時間/ケースまで削減したが、実パラメータの数値実験には 3次元空間2³倍×時間方向2倍=16倍となる約 800 万ノード時間/ケースが必要となるため、本課題の割当資源で実パラメータの数値実験は困難と判断し、本計算でも 1/2 スケールの数値実験を用いることとした。このため、本計算に先立って、1/2 スケールパラメータの妥当性を検討した。

プラズマ閉じ込めを議論する上で 2 つの無次元パラメータ、規格化イオンジャイロ半径 $\rho^* = \rho/a$ と規格化電子衝突周波数 $\nu_e^* = 4qR/(3\pi^{1/2}v_{te}\epsilon^{3/2})v_{ei}$ が重要となる。ここで、 a はプラズマ半径、 R はトーラス半径、 ϵ は逆アスペクト比、 ρ はイオンジャイロ半径、 q は安全係数、 v_{te} は電子熱速度、 v_{ei} は電子-イオン衝突周波数を示す。1/2 スケールパラメータでは ρ^* が 2 倍、 ν_e^* が 1/2 になることから、これらの無次元パラメータのプラズマ乱流への影響を調べた。Fig.2.2.2-3 に実パラメータと 1/2 スケールパラメータを用いた各時刻の線形安定性解析の結果を示す。低密度領域では電子反磁性回転方向の周波数 (負) をもつ捕捉電子モード (TEM) が不安定化し、高密度領域ではイオン反磁性回転方向の周波数 (正) をもつイオン温度勾配駆動モード (ITG) が支配的となる。TEM は電子衝突効果によって安定化されるため、1/2 スケールパラメータで ν_e^* が 1/2 になると成長率が增大する。一方、ITG はこの安定化効果の影響を受けず、1/2 スケールパラメータでも成長率が変化しない。このため、1/2 スケールパラメータでは相対的に TEM

がより不安定になり TEM から ITG への遷移密度が増大し、遷移点を実パラメータの時刻 $t=4.5\sim 5\text{sec}$ から 1/2 スケールパラメータでは $t=5\sim 5.5\text{sec}$ に変化する。これを回避するために v_e^* を実パラメータと同じ値に補正して計算することで実パラメータと同様の TEM の安定性および遷移点を再現することが可能となることがわかった。

次に ρ^* の乱流輸送への影響を検討した。 ρ^* 依存性はプラズマサイズスケールとも呼ばれ、核融合プラズマの閉じ込めを議論する上で最も重要な因子の一つである。実験的な閉じ込めスケールリングの研究 [Rice,NF2020]から SOC フェーズの閉じ込めは、L モードスケールリングと呼ばれる輸送障壁のないプラズマの閉じ込めスケールリングに従うのに対し、LOC フェーズの閉じ込めは Alcator スケールリングと呼ばれる LOC フェーズ特有の依存性を示すことが示された。ここで、L モードスケールリングの ρ^* 依存性は装置サイズに比例して熱輸送係数が増大する、いわゆる Bohm スケールリングを示す。L モードスケールリングはこれまでの GT5D の数値実験でも再現されている [Idomura,POP2014,POP2019]。一方、Alcator スケールリングは熱輸送係数が装置サイズに依存しない、いわゆる gyro-Bohm スケールリングの特徴を示す。数値実験のパラメータ設定の観点からは、Bohm スケールリングに従うプラズマを 1/2 スケールで維持するには加熱パワーも 1/2 に下げる必要があるのに対し、gyro-Bohm スケールリングに従うプラズマの場合には装置サイズによらず一定の加熱パワーを入力することで相似なプラズマ分布を維持することができる。今回解析する ToreSupra 装置のプラズマがどちらの ρ^* 依存性を示すのかは自明ではないことから、LOC フェーズの $t=3.1\text{s}$ および SOC フェーズの $t=6.1\text{s}$ のプラズマパラメータを用いて 1/2 スケール、1/3 スケールの数値実験を実施した (Fig.2.2.2-4)。数値実験の結果、LOC/SOC フェーズ、どちらのケースにおいても gyro-Bohm スケールリングに従うように加熱パワーを実験値 $P_j\sim 600\text{kW}$ で一定にするとパワーバランスが崩れて蓄積エネルギーが増大していくのに対し、Bohm スケールリングに従うように加熱パワーを 1/3 あるいは 1/2 に下げることで、実験データに基づいて与えた初期条件の蓄積エネルギーが維持されることがわかった。SOC フェーズにおける Bohm スケールリングは実験的にも見られる L モードスケールリングと整合する特徴であるが、LOC フェーズにおける Bohm スケールリングは Alcator スケールリングとは整合しておらず、今回解析した ToreSupra 装置特有の結果かどうか、さらなる検証が必要である。以上の検討結果から、今回の解析では 1/2 スケールパラメータにおいて v_e^* を実パラメータと同じ値に補正し、加熱パワーを 1/2 にスケールする計算条件を採用した。

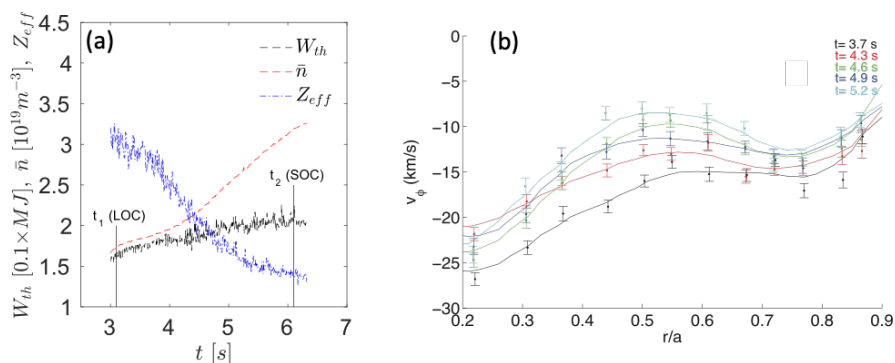


Fig.2.2.2-2: LOC-SOC (Linear and Saturated Ohmic Confinement) transition in the ohmic heating experiment on ToreSupra tokamak. (a) shows the saturation of stored energy W and the exhaust of carbon impurities shown by the effective charge number Z_{eff} along with the increase of electron

density n [Citrin,PPCF2017]. (b) shows variations of the intrinsic rotation during the LOC-SOC transition [Bernardo,PPCF2015].

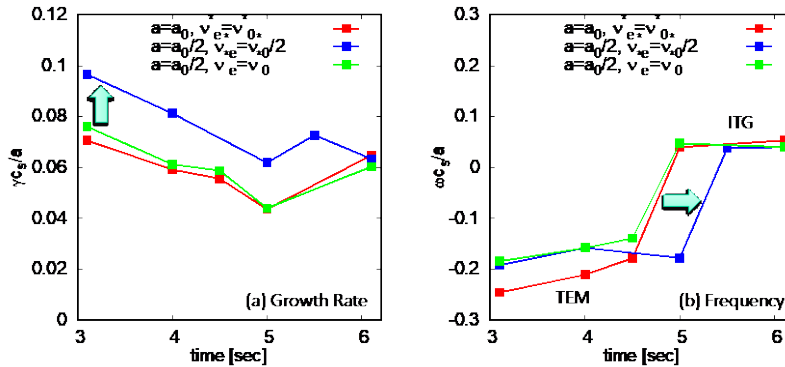


Fig.2.2.2-3: (a) growth rate and (b) frequency of micro-instabilities using plasma parameters at each time slices. The case with the original plasma parameters, $a = a_0$, $v_e^* = v_0^*$, $n = 50$, is compared against the scaled plasma parameters with $a = a_0/2$, $v_e^* = v_0^*/2$, $n = 25$ and with $a = a_0/2$, $v_e^* = v_0^*$, $n = 25$. Here, n is the toroidal mode number.

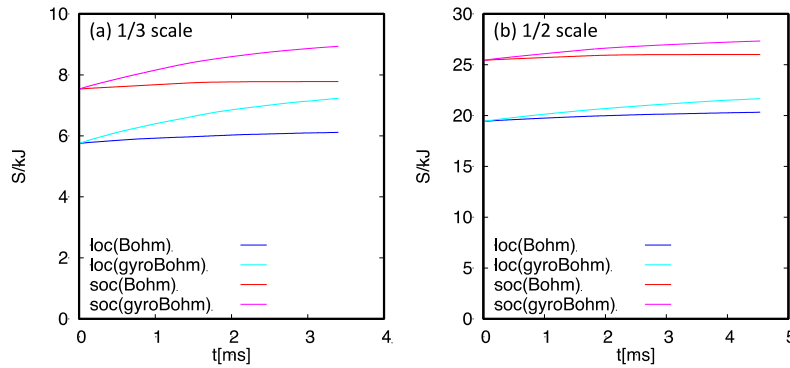


Fig.2.2.2-4: Time evolutions of the stored energy in (a) 1/3 scale and (b) 1/2 scale numerical experiments in LOC and SOC phases with Bohm like and gyro-Bohm like heating conditions.

2-2-2-3. ToreSupra 装置における LOC-SOC 遷移の数値実験

ToreSupra 装置におけるジュール加熱実験の主要パラメータは磁場 $B=3.7T$ 、 $R=2.38m$ 、 $a=0.7m$ 、ジュール加熱パワー $P_j \sim 600kW$ となり、粒子種は重水素 D、炭素 C、電子 e の 3 種類を取り扱った。ここで電子は実質量比 $m_D/m_e=3,672$ を採用した。上記パラメータに基づき、プラズマ半径と加熱パワーを 1/2 にスケールし、LOC フェーズ ($t=3.1s$, $n_e=2.4 \times 10^{19}m^{-3}$, $T_e=3.0keV$, $T_i=1.6keV$, $Z_{eff}=3.1$, $v_e^*=0.04$) および SOC フェーズ ($t=6.1s$, $n_e=4.0 \times 10^{19}m^{-3}$, $T_e=1.7keV$, $T_i=0.96keV$, $Z_{eff}=1.3$, $v_e^*=0.3$) の数値実験を実施した。Fig.2.2.2-5 に数値実験によって得られたプラズマ分布を示す。密度分布(a)、(d)に関しては SOC フェーズでは実験値に基づいて与えた初期条件から大きな変化が見られないが、LOC フェーズでは重水素密度の増大と炭素密度の減少が見られる。今回 LOC フェーズとして採用した $t=3.1s$ はちょうど炭素不純物の吐き出しが始まる時間帯であり、この結果は実験とも整合している。Fig.2.2.2-6 に示す粒子束を見ると、LOC/SOC フェーズのどちらにおいても両極性条件 $\sum q_s \Gamma_s \sim 0$ が満たされているが、その

バランスの内訳は大きく異なることがわかる。SOC フェーズは炭素密度が小さく、その粒子束も小さくなるため、主に電子と重水素イオンの粒子束がバランスする通常の両極性条件が満たされる。一方、LOC フェーズでは、電子の粒子束が小さく、それに比べて大きい重水素イオンと炭素イオンの逆向きの粒子束がバランスするイオン混合現象が発生し、これが炭素不純物の吐き出しをもたらすことを発見した。次に、(b)、(e)に炭素イオンのプラズマ回転分布を示す。ここで、Fig.2.2.2-2(b)に示した実験データは炭素イオンの回転分布であることから、ここでも炭素イオンの回転分布を示す。初期条件は実験データにおけるプラズマ周辺の回転速度を用いた剛体回転分布を与えている。LOC フェーズでは境界条件に対して負方向の回転分布が形成されるのに対し、SOC フェーズでは中心領域で境界条件に対して正方向の回転分布が形成される。数値実験は完全な定常状態に至っておらず、プラズマ回転分布が完全には発展していないが、実験で観測された LOC フェーズで負方向、SOC フェーズで正方向というプラズマ回転の変化を定性的に捉えることに成功した。運動量の乱流輸送は乱流スペクトルの磁力線方向の非対称性によって決まっており、これまでの研究では逆向きの非対称性をもつ ITG と TEM で運動量輸送の向きが逆転することが示されている[Camenen,NF2011]。今回の結果も定性的にはこの特徴を示しているが、詳細な運動量輸送機構の解析は今後の課題である。最後に、温度分布を(c)、(f)に示す。既に Fig.2.2.2-4 に示したように、プラズマ全体の蓄積エネルギーは実験値を維持しているが、温度分布に関しては、プラズマ中心領域で実験値に基づいて与えた初期条件からのずれが見られる。これは、TEM の安定性を実パラメータと揃えるために衝突周波数を 2 倍補正したためである。TEM の安定性の観点からは v_e^* を実パラメータに揃えることが重要であるが、パワーバランスの観点からはこの操作によって v_{ei} が 2 倍になると、電子からイオンへの衝突性エネルギー移行が 2 倍となり、電子とイオンの温度差が実験値に比べて低下する。

以上の数値実験結果から、ITG と TEM のどちらが主要な乱流であるかが自発プラズマ回転分布を決める要因として重要であることがわかった。また、この要因は不純物輸送にも影響することもわかった。

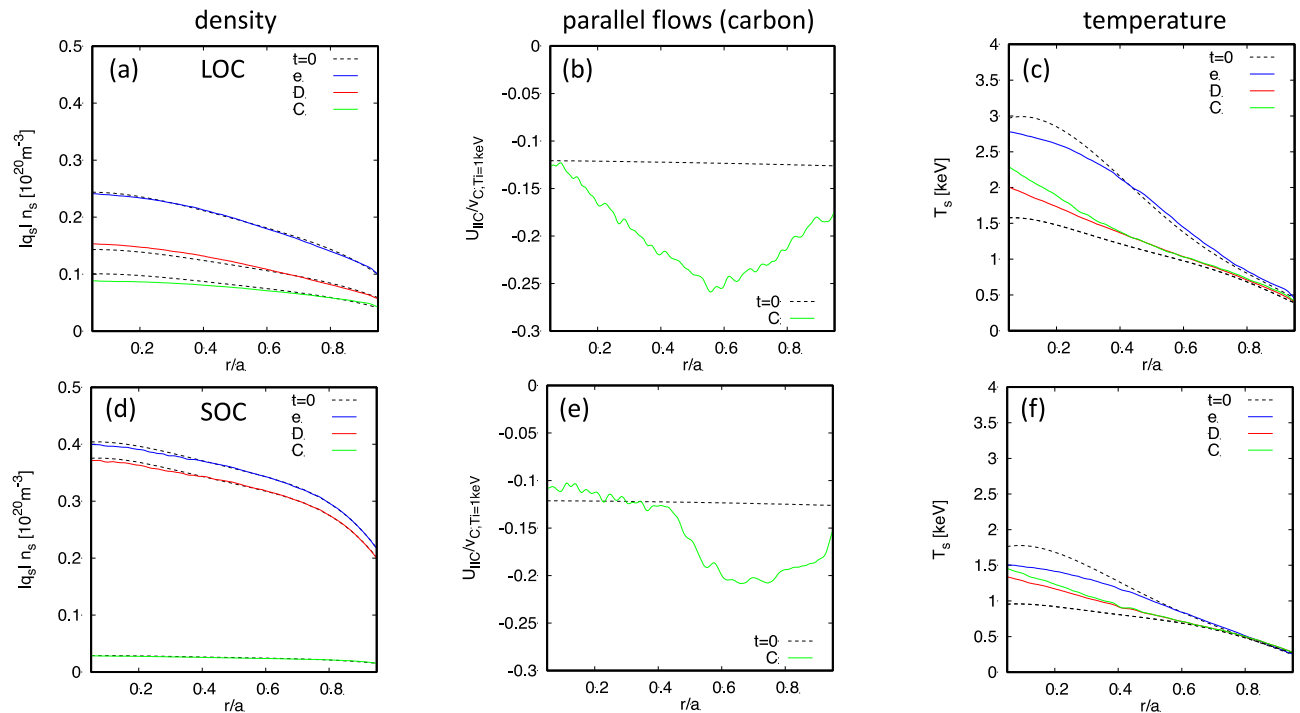


Fig.2.2.2-5: Plasma profiles observed at $t \sim 5$ ms in the numerical experiments of LOC/SOC phases. (a)-(c) and (d)-(f) respectively show the density, the carbon parallel flows, and the temperature obtained for LOC and SOC phases.

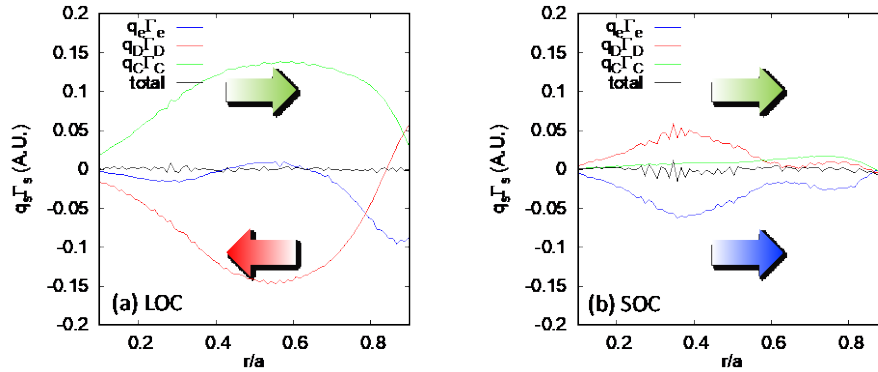


Fig.2.2.2-6: Particle fluxes observed at $t=1 \sim 3$ ms in the numerical experiments of (a) LOC and (b) SOC phases.

【参考文献】

- [1] S. Matsuoka, H. Sugama, Y. Idomura, "Neoclassical transport simulations with an improved model collision operator", Physics of Plasmas, Vol. 28, 064501 (2021). (査読付き論文) .
- [2] Y. Idomura, "Isotope and Plasma Size Scaling in Ion Temperature Gradient Driven Turbulence", 47th EPS Plasma Physics Conference (6/21-25, Online). (国際会議)
- [3] Y. Idomura, "Development of exascale full-f gyrokinetic simulation on Summit and FUGAKU", The Platform for Advanced Scientific Computing (PASC21) Conference (7/5-9, Online). (国際会議)
- [4] Y. Idomura, "A new synergy effect between neoclassical and turbulent particle transport in ion temperature gradient driven turbulence", AAPPS-DPP2021 (Division of Plasma Physics, Association of Asia-Pacific Physical Societies, 9/26-10/1, Online, Topical Plenary Talk). (国際会議招待講演)
- [5] Y. Idomura, G. Dif-Pradalier, X. Garbet, Y. Sarazin and ToreSupra team, "Full-f gyrokinetic simulations of LOC-SOC transition", 第38回 プラズマ・核融合学会 年会 (11/22-15、オンライン). (国内会議)
- [6] Y. Idomura, "Acceleration of full-f gyrokinetic Eulerian code GT5D on Fugaku and Summit", Joint US-Japan Workshop on Exascale Computing Collaboration and 6th workshop of US-Japan Joint Institute for Fusion Theory (JIFT) program (1/17-18, Online). (国際会議)
- [7] 井戸村 泰宏, "「富岳」における核融合プラズマ流体解析の最適化", 「富岳」成果創出加速プログラム 研究交流会 (3/14-15、オンライン) . (国内会議)

2-2-3. サブテーマ[3]の成果概要

本サブテーマでは、高エネルギー粒子・磁気流体(MHD)ハイブリッドシミュレーションコードMEGAを用いて核燃焼プラズマにおける α 粒子に代表される高エネルギー粒子挙動解析を実施する。高エネルギー粒子は燃料プラズマを加熱して核融合反応に必要な高温状態を維持する役割を担う一方、プラズマのMHD的な振動との相互作用によってプラズマ外部へ損失する可能性がある。このため、核燃焼で発生する高エネルギー α 粒子の閉じ込め性能評価、ならびに α 粒子損失の物理機構解明は、核融合エネルギー実現を目指す上で重要な研究課題である。MEGAは高エネルギー粒子駆動MHD現象の実証研究において、独自に開発したマルチフェーズ法を用いた長時間計算により、JT-60U、LHD、DIII-Dを対象として世界で唯一と言える優れた実績を上げてきた。

本課題では「富岳」でのMEGAの達成指標として、 10^{12} 粒子物理量を用いた計算を目標としている。令和3年度には、円柱座標系(R, ϕ , z)の格子点数を(512, 384, 512)とし、1格子1粒子種あたりの計算粒子数を1024とした2粒子種の計算を実施した。49,152ノードを利用して、各ノードでは12スレッド並列のMPIプロセスを4本実行し、全体で196,608MPIプロセス、2,359,296コアを使用した。この全粒子数 2.06×10^{11} 、粒子物理量 1.03×10^{12} の計算を実行できたことにより、達成指標の実現に成功した。

この達成指標の実現に加えて、令和3年度には、事業実施計画に沿って研究を推進し、ITERとJETにおける核燃焼生成高エネルギー粒子の閉じ込め解析として以下に挙げる(1)および(2)、大型ヘリカル装置(LHD)における高エネルギー粒子駆動不安定性とMHD不安定性に関する数値実験として(3)および(4)、JT-60SAにおける高エネルギー粒子駆動不安定性とMHD不安定性に関する数値実験として(6)の成果をそれぞれ達成した。(5)および(7)もトカマクプラズマの重要な課題に関する成果であり、JT-60SAに対しても有用な知見が得られた。

- (1) ITER核燃焼プラズマにおける高エネルギー粒子閉じ込め解析を実施し、熱イオンの運動論的効果による高エネルギー粒子駆動不安定性の安定化を見いだした。
- (2) トカマク型装置JETの核燃焼プラズマにおける高エネルギー粒子閉じ込め解析をポルトガルの研究機関ISTと協力して実施した。
- (3) LHDにおける高エネルギー粒子駆動不安定性のシミュレーション研究を実施し、捕提高エネルギー粒子の輸送過程を解明した。
- (4) LHDにおけるMHD不安定性に対する熱イオンの運動論的効果をシミュレーションによって解明した。
- (5) トカマクプラズマにおけるMHD不安定性に対するベンチマークテストを実施し、MEGAと線形安定性解析コードMINERVAの良好な一致を確認した。
- (6) JT-60SAにおける内部キックモードに対する高エネルギー粒子の運動論的効果を調査した。
- (7) トカマクプラズマにおける軸外れフィッシュボーンモードのシミュレーションを実施し、高エネルギー粒子の共鳴条件や分布関数の緩和を明らかにした。

2-2-3-1. ITER核燃焼プラズマにおける高エネルギー粒子閉じ込め解析

ITER核燃焼プラズマの定常運転シナリオについて、熱イオン(重水素および三重水素)の運動論的効果を考慮した高エネルギー粒子閉じ込め解析を実施した[1]。対象としたプラズマに対しては「京」を用いて解析した実績があり、今回の「富岳」での計算では格子点あたりの粒子数を8~32倍に増加すると

ともに、熱イオンにも粒子法を適用する新しいシミュレーションモデル[2]を適用して計算の予測信頼性を向上させた。「京」での計算では格子点あたりの粒子数を 1/2 または 2 としていたが、「富岳」では 16 に増加した。高エネルギー α 粒子と高速ビームイオンの 2 粒子種のみを考慮した「京」での計算から、「富岳」では重水素と三重水素にも粒子法を適用することにより 4 粒子種の運動論的效果を取り入れた。

ITER の定常運転シナリオに関する「京」の計算では、バルクプラズマ（熱イオンと電子）を MHD 流体として近似するモデルを採用しており、線形段階ではトロイダルモード数 $n \sim 15$ のトロイダルアルフベン固有モード（TAE）が最も不安定であるが、非線形段階では $n=3, 5$ の高プラズマ圧力（ベータ）誘起アルフベン固有モード（BAE）が支配的になるという結果を得ていた。令和 3 年度にはバルクプラズマを MHD 流体として取り扱う計算を最初に「富岳」で実施し、格子点あたりの粒子数を増加しても「京」と同様の結果が得られることを確認した。これにより、この計算結果は粒子数に関して良好に収束していると判断した。この MHD 流体モデルの計算結果における MHD 揺動エネルギーの時間発展をトロイダルモード数ごとに Fig. 2.2.3-1(a), (b) に示す。Fig. 2.2.3-1(b) では $n \sim 15$ の揺動が成長していることがわかる。これらは高エネルギー α 粒子と高速ビームイオンによって励起された TAE である。Fig. 2.2.3-1(a) では、 $n \sim 15$ の TAE に少し遅れて $n=3, 5$ の揺動（BAE）が支配的になっている。次に、重水素と三重水素にも粒子法を適用して熱イオンの運動論的效果を考慮した計算結果を Fig. 2.2.3-1(c), (d) に示す。Fig. 2.2.3-1(d) では、MHD 流体モデルの場合[Fig. 2.2.3-1(b)]と比較して $n \sim 15$ の TAE の成長が遅れ、不安定モードの個数や飽和レベルが抑制されていることがわかる。より詳しい解析により、MHD 流体の場合と比較して $n \sim 15$ の TAE の線形成長率が減少していることを確認した。これは熱イオンのランダウ減衰による安定化効果が原因であると考えられる。さらに Fig. 2.2.3-1(c) では、 $n=1-10$ の揺動が強く抑制されており、MHD 流体モデルの場合[Fig. 2.2.3-1(a)]に見られた $n=3, 5$ の BAE の安定化が確認できる。

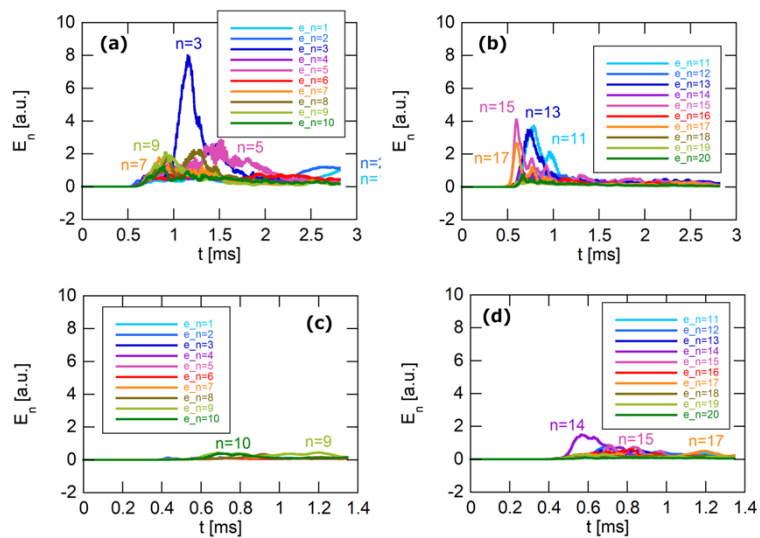


Fig. 2.2.3-1: Time evolution of MHD fluctuation energy for (a) (c) toroidal mode number $n=1-10$ and (b) (d) $n=11-20$ in the kinetic-MHD hybrid simulations of an ITER steady state operation scenario. Simulation result of kinetic-MHD hybrid simulation without kinetic thermal ions is shown in (a) and (b) while panels (c) and (d) show the results with kinetic thermal ions.

2-2-3-2. トカマク型装置 JET の核燃焼プラズマにおける高エネルギー粒子閉じ込め解析

欧州のトカマク型実験装置 JET における核燃焼プラズマに相当する重水素-三重水素 (D-T) プラズマを対象とした高エネルギー粒子閉じ込め解析を実施した。JET において核燃焼プラズマ実験は実施されているが、高エネルギー α 粒子が駆動する不安定性は観測されていない。そこで、ポルトガルの研究機関 IST と協力して、JET の重水素実験#92416 に基づき、実形状 MHD 平衡データ、電子密度分布、電子温度分布を用いて、重水素を 50:50 の比で重水素と三重水素に置き換えたシミュレーションを実施した。この重水素実験#92416 ではトロイダルモード数 $n=4, 5, 6$ のトロイダルアルフベン固有モード (TAE) が観測されており、この実験に基づいて高エネルギー α 粒子駆動不安定性の D-T 実験シナリオが構築されている。従って、D-T 実験に向けた適切な解析対象として重水素実験#92416 を採用した。最も不安定な $n=4$ の TAE の空間分布について、IST のグループが線形安定性解析コード MISHKA を用いて解析した結果と MEGA の結果を Fig. 2.2.3-2 に比較する。TAE の空間分布について、トロイダルモード数を含む両者の整合性が確認できた。このアルフベン固有モードの周波数は MEGA の方がやや高い値を与えるが、両者の違いは、MISHKA が非圧縮 MHD を仮定しているのに対して、MEGA が圧縮性 MHD を採用していることが原因であると解釈される。

2-2-3-1 で報告した ITER と同様にバルクプラズマを MHD 流体で近似した場合と熱イオン (重水素および三重水素) に粒子法を適用した場合を比較した。両者の MHD 揺動エネルギー時間発展をトロイダルモード数ごとに Fig. 2.2.3-3 に比較する。最も不安定な $n=4, 5$ の TAE の成長率に大きな違いはないが、(a)に示した熱イオンの運動論的効果を考慮していない MHD 流体モデルの計算では非線形段階において $n=1$ モードが支配的となるのに対して、(b)に示した熱イオンの運動論的効果を考慮した計算では $n=1$ モードの揺動エネルギーは低く、全体的に揺動レベルが低く抑制されることがわかった。非線形段階において低 n のモードが支配的になることや、それらのモードに対する熱イオンの抑制効果が現れることは 2-2-3-1 に報告した ITER と共通の結果であり、核燃焼プラズマの一般的な性質である可能性がある。

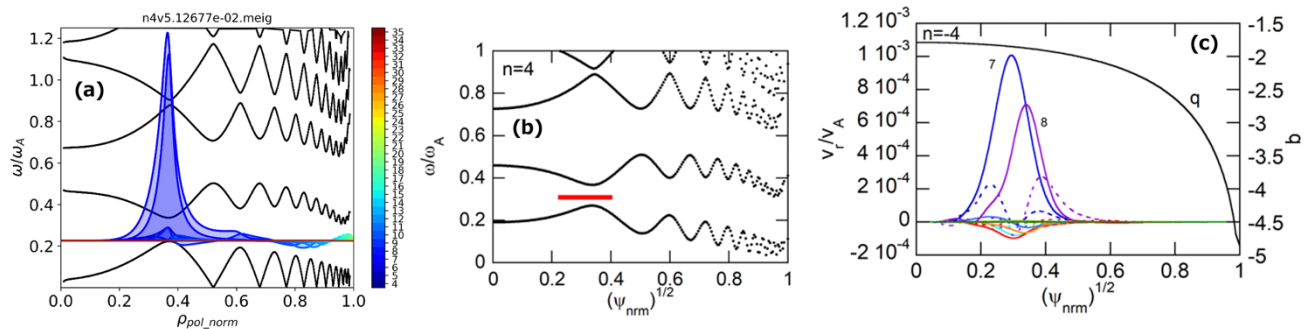


Fig. 2.2.3-2: Comparison of radial MHD velocity fluctuations of an Alfvén eigenmode (AE) between (a) MISHKA and (c) MEGA. The toroidal mode number is $n=4$. The shear Alfvén continuous spectra and the AE frequencies are shown for (a) MISHKA and (b) MEGA. The safety factor profile is shown in (c).

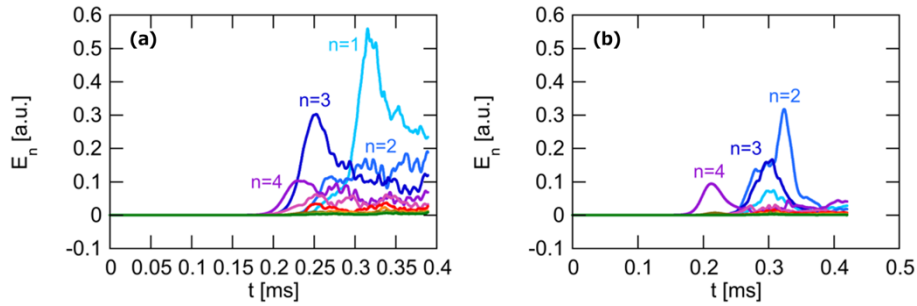


Fig. 2.2.3-3: Time evolution of MHD fluctuation energy for each toroidal mode number n in (a) kinetic-MHD hybrid simulation without kinetic thermal ions and (b) with kinetic thermal ions.

2-2-3-3. 大型ヘリカル型装置 (LHD) における高エネルギー粒子駆動不安定性のシミュレーション研究

核融合科学研究所の大型ヘリカル装置 (LHD) プラズマにおいて捕捉高速イオンが励起する MHD 不安定性のシミュレーションを MEGA コードを用いて実施した[3, 4]。実験では捕捉高速イオンは磁場に対して垂直方向に入射される中性粒子ビームによって生成される。シミュレーションにおいてポロイダルモード数 $m=2$ 、トロイダルモード数 $n=1$ の MHD 不安定性が急速に成長し、プラズマ中心部において高速イオン垂直圧力が大幅に減少することを観測した。不安定性の周波数は非線形飽和局面において急速に下方変調し、符号が反転した。これは MHD モードの伝播方向が反転したことを意味している。この伝播方向反転と同時に、MHD モードと強く相互作用しているヘリカル捕捉高速イオンの歳差ドリフト方向が反転することを見出した。これらのヘリカル捕捉粒子の歳差ドリフト方向は、MHD モードとの相互作用が終了すると本来の方向を回復するが、歳差ドリフト方向が反転している期間中に半径方向外側へ向かって急速に輸送される。Fig. 2.2.3-4(a)は不安定性によって輸送される捕捉高速イオンの軌道と磁気面を示している。この捕捉高速イオンの軌道は、青色→緑色→赤色の順に変遷し、緑色の軌道は歳差ドリフトの方向が反転している。この歳差ドリフト反転の期間に、捕捉高速イオンは半径方向外側に輸送される。個々の粒子軌道に沿った電磁場の解析により、歳差ドリフト反転と外向きの輸送は MHD モードの電場との相互作用によってもたらされることがわかった。その結果を Fig. 2.2.3-4(b)に示す。歳差ドリフトが反転している期間を縦の破線で示している。この期間では、赤色で示したポロイダル角方向の $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトが青色で示した $\mathbf{grad} \cdot \mathbf{B}$ ドリフトと反対方向に大きな値を有している。元々の歳差ドリフト方向は $\mathbf{grad} \cdot \mathbf{B}$ ドリフトによって決定されており、 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトが歳差ドリフトの方向を反転させていることがわかる。また、この期間には緑色で示した半径方向の $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトが外向きに発生しており、これが半径方向外側への輸送をもたらしている。MHD モードと強く相互作用するヘリカル捕捉高速イオンの大部分が、歳差ドリフト方向を反転して外向きに輸送されることにより、中心部の高速イオン垂直圧力が大幅に減少することがわかった。Fig. 2.2.3-4(a)は Physics of Plasmas の表紙に掲載された[3]。

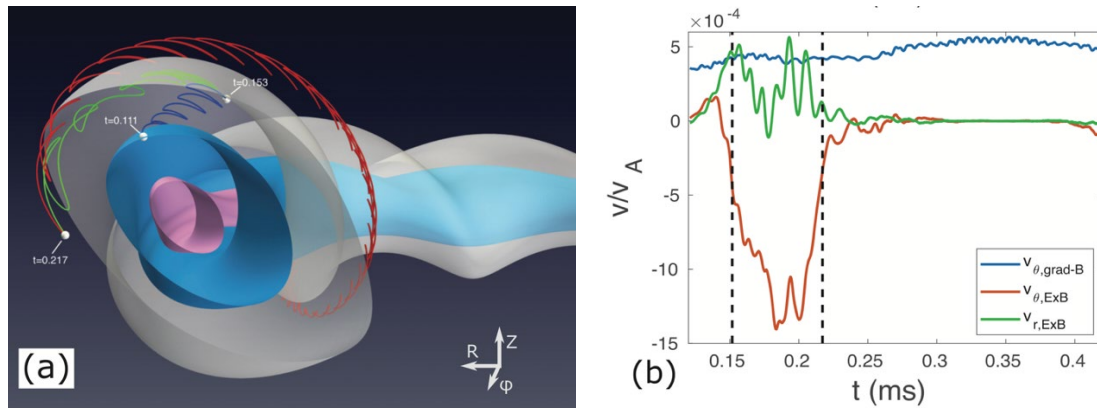


Fig. 2.2.3-4: (a) Three-dimensional representation of a typical particle trajectory, with magnetic flux surfaces shown for context. Magnetic flux surfaces' radii: $r/a=0.2$ for pink, $r/a=0.5$ for blue, $r/a=0.85$ for gray. The colored line is the particle trajectory. (b) Blue: averaged θ -direction grad-B drift velocity of the particle whose trajectory is shown in (a). Red: θ -direction $E \times B$ drift velocity. Green: radial $E \times B$ drift velocity. In the time period between the two vertical dashed lines, the precession drift direction is reversed. [3]

2-2-3-4. 大型ヘリカル装置 (LHD) における MHD 不安定性に対する熱イオンの運動論的効果

大型ヘリカル装置 (LHD) では、体積平均ベータ値 (プラズマ圧力と磁気圧の比) が約 5% の安定な高ベータプラズマが得られている。これまでに行なってきた熱イオンの運動論的効果を含んだ運動論的 MHD シミュレーション解析から、ヘリカルリップルに捕捉された熱イオンが、圧力勾配駆動型 MHD 不安定性を抑制する効果を有し、高圧力状態を維持する上で重要な役割をすることを示してきた [5, 6]。[5, 6] の解析では、中心ベータ値 $\beta_0=7.5\%$ の平衡に対して解析を行ったが、この平衡の磁気軸は、LHD 実験で得られている高ベータプラズマの磁気軸よりも外側に位置していた。令和 3 年度においては、より実験に即した平衡に対する解析を目的として、LHD 実験で得られた 4.8% の体積平均ベータ値を持つプラズマの磁気軸と同じ位置に磁気軸を持つ平衡 ($\beta_0=6.3\%$) に対して解析を行った [7]。Fig. 2.2.3-5(a),(b) に、運動論的 MHD シミュレーションから得られた、 $\beta_0=7.5\%$ と $\beta_0=6.3\%$ の平衡に対する電子圧力揺動のトロイダルモード数 (n) ごとの振幅の時間発展を示す。Fig. 2.2.3-5 (c) および (d) では、飽和状態における $(m,n)=(0,0)$ モードの圧力分布を赤線で示している。ここで、 m はポロイダルモード数である。Fig. 2.2.3-5 (c), (d) では、比較のため、MHD モデルによるシミュレーションから得られた飽和状態における圧力分布を緑線で示している。どちらの平衡に対しても、MHD モデルでは中心圧力が大きく減少しているのに対し、運動論的 MHD モデルでは中心部の圧力低下が抑えられている。以上の解析から、熱イオンの運動論的効果を考慮すると、 $\beta_0=7.5\%$ の時と同様に、 $\beta_0=6.3\%$ においても高ベータプラズマが維持されることがわかった。

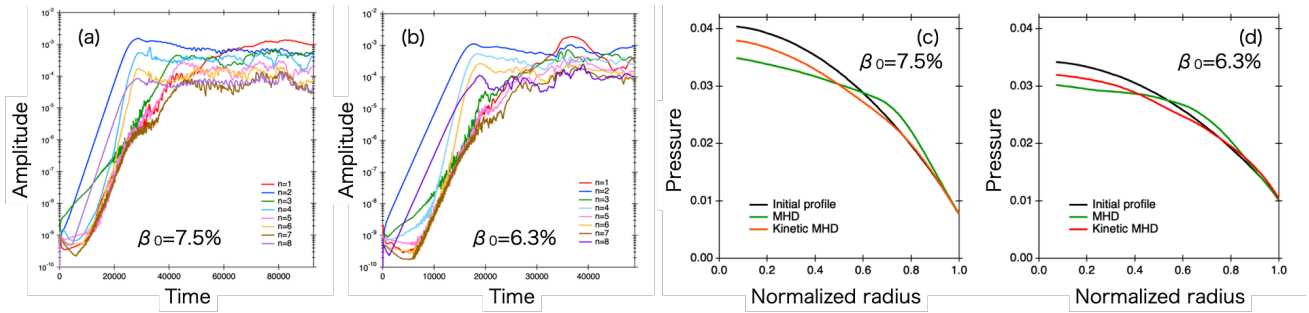


Fig. 2.2.3-5: Time evolution of the perturbed pressure amplitude for each toroidal mode n for (a) $\beta_0 = 7.5\%$ and (b) $\beta_0 = 6.3\%$. Panels (c) and (d) show the total averaged pressure of the $(m,n)=(0,0)$ mode at the saturated state for $\beta_0 = 7.5\%$ and $\beta_0 = 6.3\%$, respectively. Both the results of MHD simulation and kinetic-MHD hybrid simulation are shown for comparison in (c) and (d).

2-2-3-5. トカマクプラズマにおける MHD 不安定性に対するベンチマークテスト

本研究では、トカマクプラズマにおける圧力勾配駆動型 MHD 不安定性の一つであるインファナルモードに対し、熱イオンの運動論的效果が及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。本年度においては、計算コードの信頼性を検証するため、量子科学技術研究開発機構で開発された MINERVA コードを用いて、MEGA コードの MHD モデル MIPS についてベンチマークテストを実施した。今回行ったベンチマークテストでは、簡単のために円形断面トカマクを用いた。Fig. 2.2.3-6(a)に MEGA コード(MIPS と表記)で得られた $n=3$ のインファナルモードの線形成長率に対する磁気レイノルズ数(S)依存性を示す。磁気レイノルズ数が大きくなるにつれて、MEGA コードから得られた線形成長率が、MINERVA コードで得られた線形成長率に近づいていることを確認できる。Fig. 2.2.3-6 (b), (c)は、MEGA コードから得られた径方向速度のモード構造と MINERVA コードから得られた変位ベクトルの径方向成分のモード構造を示している。Fig. 2.2.3-6 (b), (c)が示すように、MEGA コードから得られたモード構造は、MINERVA コードから得られたモード構造にほぼ一致している。このベンチマークテストにより、インファナルモードの線形安定性に対して計算コードの信頼性が確認できた。今後は、イオンの運動論的效果を含む解析を実施し、インファナルモードの線形、非線形発展に対するイオンの運動論的效果を明らかにしていく予定である。

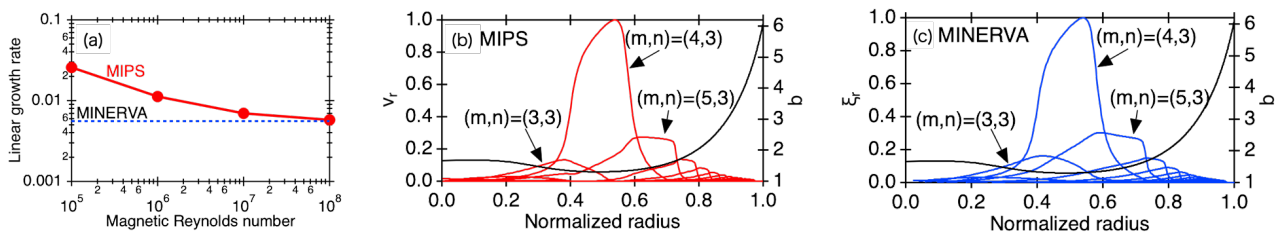


Fig. 2.2.3-6: (a) Comparison of the linear growth rate obtained from the MEGA code (MIPS) (red) and the MINERVA code (blue). (b) and (c) show the eigenmode structure obtained from the MEGA code and the MINERVA code, respectively. The results with MEGA are labeled as MIPS which is the MHD part of MEGA.

2-2-3-6. JT-60SA における内部キックモードに対する高エネルギー粒子の運動論的效果

トカマク型装置 JT-60SA において計画されている高度に整形された配位（シナリオ 2）では、プラズマ中心部において安全係数 $q=1$ の有理面を有する平坦な q 分布が想定されている。シナリオ 2 は H モードプラズマを想定した JT-60SA の標準的な運転シナリオである。シナリオ 2 における磁場強度とプラズマ電流はそれぞれ 2.25 T と 5.5 MA であり、10 MW 負イオン中性粒子ビーム入射（N-NBI）と 24 MW 正イオン中性粒子ビーム入射（P-NBI）および 7 MW の電子サイクロトロン共鳴加熱が実施される。線形安定性解析により内部キックモードが不安定であることが予測されており、目標プラズマ電流値の達成に影響を与える可能性が懸念されている。高エネルギー粒子が内部キックモードを安定化する場合と不安定化する場合の両方が知られているが、JT-60SA において高エネルギー粒子が内部キックモードに与える影響はこれまでに調査されていない。本研究では、運動論的 MHD ハイブリッドコード MEGA を用いて、JT-60SA シナリオ 2 のプラズマにおける内部キックモードに対する高エネルギー粒子の効果を調査した。

最初に高エネルギー粒子を無視した MHD シミュレーションを実行し、 $q=1$ 有理面内で $n/m=1/1$ の内部キックモードを観測した。バルクプラズマのベータ値が高いため、このモードはバルクプラズマの圧力勾配によって駆動される。負イオン中性粒子ビーム入射（N-NBI）による高エネルギー粒子を考慮したシミュレーションでは、軸上加熱の場合と軸外加熱の場合を調査した。内部キックモードの線形成長率 (γ/ω_A) は、軸外加熱の場合は大きくなり、軸上加熱の場合は弱くなった [Fig. 2.2.3-7(a) 参照]。バルクプラズマ圧力と高エネルギー粒子圧力の合計分布を同一として比較しているため、軸上加熱の場合の安定化の主な原因は高エネルギー粒子によるバルクプラズマ圧力の希釈である。さらに、プラズマ中心領域での高エネルギー粒子圧力勾配の違いに起因して、軸上加熱の場合にはバルクプラズマ圧力勾配が弱まるため安定化効果があるが、軸外加熱ではバルクプラズマ圧力勾配が強まるため不安定化効果がある。高エネルギー粒子の運動論効果に関しては、どちらの場合でも高エネルギー粒子が内部キックモードにエネルギーを与えていることがわかった。

非線形段階では、内部キックモードが $q=1$ 面内の高エネルギー粒子圧力を減少させる [Fig. 2.2.3-7(b) 参照]。これは、中性粒子ビーム電流駆動(NBCD)に影響を与える可能性がある。また、捕捉高エネルギー粒子による内部キックモードの安定化効果についても検討した。JT-60SA では、磁場に対して垂直に入射される正イオン中性粒子ビーム（P-NBI）により捕捉高エネルギー粒子を発生させる。シミュレーションの結果、P-NBI の生成する高エネルギー粒子は歳差フィッシュボーン不安定性を駆動することがわかった。

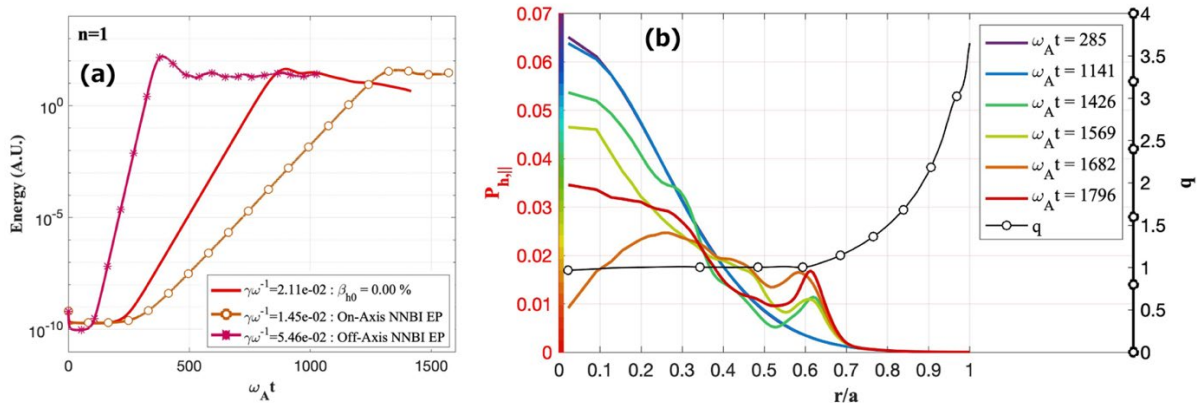


Fig. 2.2.3-7: (a) Time evolution of $n=1$ MHD fluctuation energy in MHD simulation and kinetic-MHD hybrid simulations with on-axis NNBI and off-axis NNBI. (b) Energetic particle parallel pressure redistribution by the internal kink mode for the on-axis NNBI.

2-2-3-7. トカマクプラズマにおける軸外れフィッシュボーンモードのシミュレーション

安全係数 $q=2$ の磁気面を有するトカマクプラズマにおける軸外れフィッシュボーン不安定性 (OFM) のシミュレーション研究を実施した[8]。磁場に対して垂直方向の中性粒子ビーム入射によって生成する高速イオン分布を想定し、非等方的高速イオン速度空間分布を設定した。シミュレーション結果において、OFM の空間分布は $q=2$ 磁気面の内側では $m/n=2/1$ モードが支配的であるのに対して、外側では $m/n=3/1$ モードが主要成分であることがわかった。ポロイダル面内において OFM の空間分布は強く捻られた構造を有している。主要な共鳴粒子は歳差ドリフト周波数が OFM の周波数と一致する捕捉粒子であるが、一部の共鳴粒子は歳差ドリフト周波数とポロイダル反復周波数の和が OFM の周波数と一致していた。これらの共鳴粒子の速度空間での分布とポロイダル面に投影した典型的な軌道を Fig. 2.2.3-8 に示す。OFM の周波数は、線形成長局面では捕捉高速イオンの歳差ドリフト周波数とよく一致するのに対して、非線形局面では実験と同様に下方変調した。共鳴捕捉粒子の歳差ドリフト周波数とポロイダル方向の反復周波数および共鳴モード数から、OFM との共鳴周波数を定義することができる。非線形局面における各粒子の共鳴周波数を解析したところ、OFM にエネルギーを与える粒子群の共鳴周波数が下方変調していることがわかった。これが OFM 周波数の下方変調の原因であることが示唆される。さらに、位相空間における高速イオン分布関数を解析し、波動粒子相互作用の保存量=一定の直線に沿って分布関数が平坦化することにより、不安定性が飽和することを明らかにした。

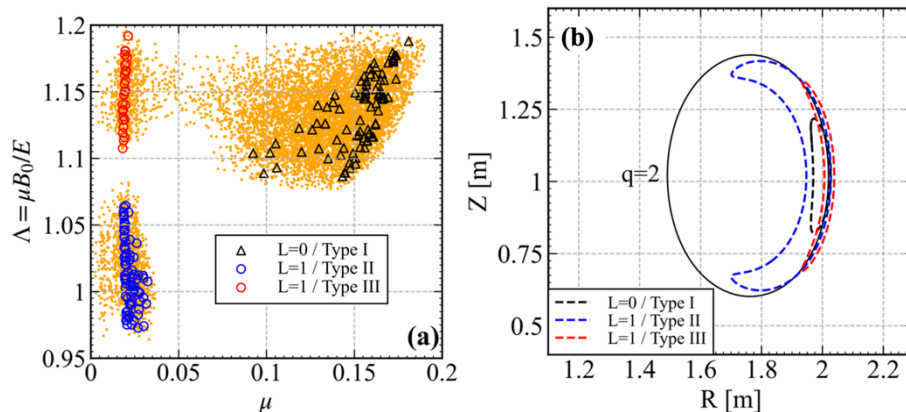


Fig. 2.2.3-8: (a) Resonant particle distribution in velocity space (μ, Λ) , where μ is normalized by $m_h v_A^2 / B_0$. Black triangles, blue circles, and red circles represent types I-III particles, respectively. (b) Typical orbits of the three types of resonant particles and the $q = 2$ magnetic flux surface. [8]

【参考文献】

- [1] Y. Todo, "Validation and extension of kinetic-magnetohydrodynamics hybrid simulation for the prediction of burning plasmas", AAPPs-DPP2021 (Online, 26 Sept. - 1 Oct. 2021) (国際会議・基調講演)
- [2] Y. Todo, M. Sato, H. Wang, M. Iduakass, and R. Seki, "Magnetohydrodynamic hybrid simulation

model with kinetic thermal ions and energetic particles”, Plasma Physics and Controlled Fusion 63 (2021) 075018 (査読付き論文)

- [3] M. Idouakass, Y. Todo, H. Wang, J. Wang, R. Seki, M. Sato, “Precession drift reversal and rapid transport of trapped energetic particles due to an energetic particle driven instability in the Large Helical Device”, Physics of Plasmas 28 (2021) 080701 (査読付き論文)
- [4] M. Idouakass, Y. Todo, H. Wang, J. Wang, R. Seki, “Precession drift reversal and strong redistribution of energetic particles during energetic-particle driven magnetohydrodynamics instability in a Large Helical Device plasma”, AAPPS-DPP2021 (Online, 26 Sept. - 1 Oct. 2021) (国際会議・招待講演)
- [5] M. Sato and Y. Todo, “Supercritical stability of the Large Helical Device plasmas due to the kinetic thermal ion effects”, 28th IAEA Fusion Energy Conference (Online, 10-15 May 2021) (国際会議・招待講演)
- [6] M. Sato and Y. Todo, “Kinetic thermal ion effects on maintaining high beta plasmas above the Mercier criterion in the Large Helical Device”, Nuclear Fusion 61 (2021) 116012 (査読付き論文)
- [7] 佐藤雅彦, 藤堂泰, 「運動論的 MHD シミュレーション解析による LHD プラズマの圧力駆動型不安定性のベータ値依存性」, 第 38 回プラズマ・核融合学会年会 (オンライン開催, 2021 年 11 月 22 日～25 日) (国内会議)
- [8] H. Li, Y. Todo, H. Wang, M. Idouakass, and J. Wang, “Simulation study of energetic-particle driven off-axis fishbone instabilities in tokamak plasmas”, Nuclear Fusion 62 (2022) 026013 (査読付き論文)

2-2-4. サブテーマ[4]の成果概要

5次元位相空間の情報を扱う核融合プラズマの第一原理シミュレーションは、スーパーコンピュータによる長時間計算を必要とする。プラズマの初期状態に擾乱を与え、ジャイロ運動論方程式に従う時間発展をプラズマの揺動レベルが平均的に定常となる飽和状態に至るまで続ける事で、乱流が生み出す流束を算出している。スーパーコンピュータであっても飽和に至るまでに長時間を要する上に、一般にいつ飽和に至るかを計算前もしくは計算の初期段階で得られる情報から推定する方法は知られていない。

長時間を要するジャイロ運動論シミュレーションは必然的に飽和に至るまでの過程で膨大なデータを生み出すことから、そのデータを活用したモデル構築が可能となるはずであり、そこにデータ科学の応用の場があるのではないかと着想した。データ科学的手法である機械学習は、解析・予測手法の新たな地平を切り開く方法として近年広く取り組まれてきている。本サブテーマでは、「富岳」を用いた大規模計算結果の効率的な解析と計算効率の向上を目指し、核融合プラズマの大規模シミュレーションと AI/データ科学の融合的アプローチを開発し、応用する。モデル開発は複合的に進め、代理モデルの構築による高速化[1-5]と、畳み込みニューラルネットワーク (CNN) を用いた画像解析手法[6-10]の両面からアプローチしている。

令和 3 年度には、以下の成果を達成した。

- (1) 令和2年度に開発した畳み込み CNN を用いた機械学習プログラムとデータの前処理を組み合わせ、未知データに対する時刻予測能力を獲得した。
- (2) 画像データと数値データを入力とし、時刻と電子、イオンの熱流束を出力とするマルチモーダルモデルを構築し、テストデータに対する十分な予測能力を示した。
また、上記に加え、ジャイロ運動論的乱流輸送シミュレーションの輸送モデリングとデータ解析手法に関する以下の成果を得た。
- (3) 時系列シミュレーションデータに対する輸送モデリングに用いる非線形目的関数の新たな評価手法を開発した。
- (4) 5次元位相空間上の分布関数データの可視化とデータクラスタリングを組み合わせた解析手法を考案し、ジャイロ運動論的シミュレーションに適用した。

2-2-4-1. データ前処理と CNN モデルを組み合わせた未知データに対する時刻予測

令和2年度に開発した EfficientNet ベースの CNN モデルは、JT-60U のパラメータに対する GKV シミュレーションデータによって訓練された。初期に与える揺動振幅の大きさによって飽和に至る過程や必要な所要時間が異なるが、標準的な揺動振幅を与えた場合のデータで構築した CNN モデルは、揺動振幅を千倍、あるいは千分の一にした両ケースに対して、初期段階において飽和時刻を適切に予測する事に成功した。確かに初期揺動が異なるそれらのデータセットは予測に用いた CNN モデルの学習には用いられていないが、初期揺動以外の GKV 入力パラメータは標準的なケースと同じであった。全く異なる GKV 入力パラメータから得られるデータセットに対する CNN モデルの予測能力は未知であった。

そこで、JT-60U とは全く異なるパラメータとなる、Cyclone Base Case(CBC)と呼ばれるパラメータセットで GKV シミュレーションを行うことにした。CBC ケースはジャイロ運動論シミュレーションのベンチマークテストに用いる最も標準的なパラメータセットであり、あらゆるジャイロ運動論コードはこのパラメータセットでシミュレーションを実施済みであると言っても過言ではなく、そこで得られる結果を比較しあうことで互いのコードの健全性を確認している。CBC ケースから得られるデータセットで学習した CNN モデルを、基幹モデルとして据えるのは自然なことである。

線形から非線形成長フェーズへと移行するタイミングや、飽和状態へと遷移する時刻は、CBC とこれまで用いてきた JT-60U #45072@ $\rho=0.76$ データセット（データセット U1 と呼称する）で大きく異なっている。ここで、JT-60U #45072@ $\rho=0.76$ データセットとは、JT-60U 装置の放電番号 45072 実験における、規格化小半径 ρ が 0.76 の位置におけるプラズマパラメータで GKV シミュレーションを実施したデータセット、という意味である。以下に現れる類似表現も同様である。CNN モデルのネットワーク構造はこれまでと変更せず、CBC データセット（データセット C1）を用いて新たに CNN モデルを訓練した。テストデータに対する予測結果は従来同様極めて良好であり、決定係数は $R^2 = 0.9945$ であった。この CBC で訓練した CNN モデルに対して、従来の JT-60U データセットを与え、その画像から予測される時刻と真値を比較した。重要な点は、CNN モデルは入力されるデータセットのことを何も知らず、データ生成の基礎となる GKV シミュレーションの入力パラメータセットも全く異なることである。モデルによって得られた予測結果の決定係数は $R^2 = 0.7136$ であり、実用に耐えられるレベルでの予測性能を示した。次の検証として、JT-60U #45072@ $\rho=0.50$ データセット（データセット U2）を CBC 訓練モデルに与えると、 $R^2 = 0.8090$ となった。一方で、JT-60U #45072@ $\rho=0.26$ データセット（データセット U3）

をやはり CBC 訓練モデルに与えると、 $R^2 = 0.4812$ となり、良好な結果とは言えない状況となった (Fig. 2.2.4-1)。この予測性能の違いを生んだ原因を探ると、各ケースでプラズマの線形安定性が異なることが分かった。データセット C1 の線形分散関係は Fig. 2.2.4-2 に示したとおりで、波数領域においてどの不安定性が主となっているかを示したグラフであり、CBC は典型的な ITG/TEM/ETG 不安定性が表れる様態を示している。ここで、ITG はイオン温度勾配、TEM は捕捉電子モード、ETG は電子温度勾配を意味しており、 $k_y \rho_{tp} = 0.6$ 近傍で、主たる線形不安定性が ITG から TEM/ETG に切り替わっていることが見て取れる。CBC の線形分散関係を念頭に、Fig. 2.2.4-2 (a)-(c)に示す JT-60U の各ケースの線形分散関係を見ると、(a)(b)は比較的類似している一方で、(c)については形状も横軸の範囲も大きく異なっていることが分かる。(c)は ITG だけが不安定であり、TEM や ETG 不安定性は存在しない。データセット C1 で CNN モデルが学習した TEM/ETG によるプラズマの非線形発展のパターンがデータセット U3 には含まれていないため、モデルが知らないパターンを上手く予測できないことが予測性能の劣化を招いたと考えられる。

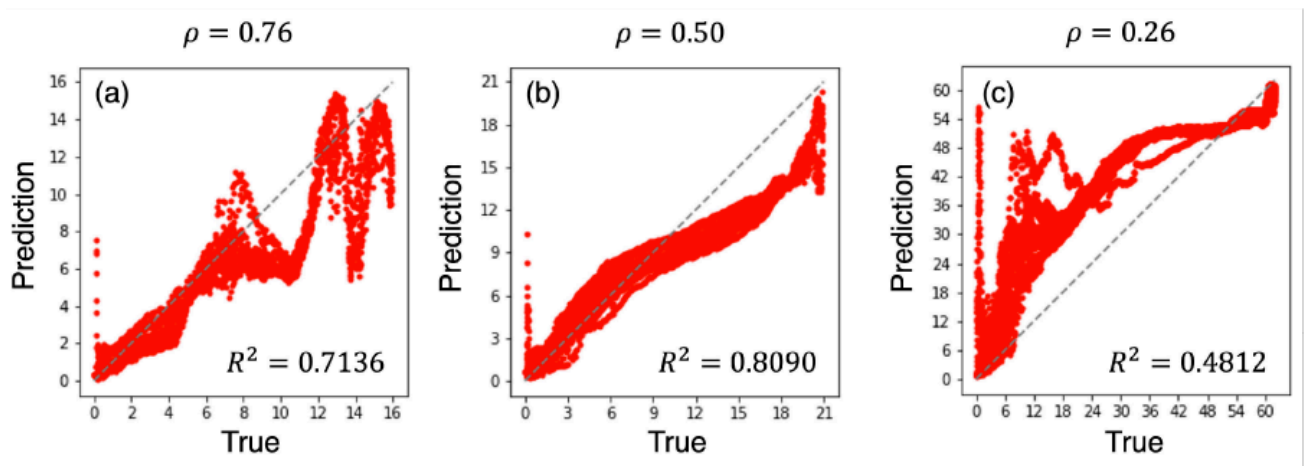


Fig. 2.2.4-1 Time predictions and their coefficients of determination for the CNN model trained on the data set U2 for (a) the dataset U1, (b) the dataset U2 and (c) the dataset U3.

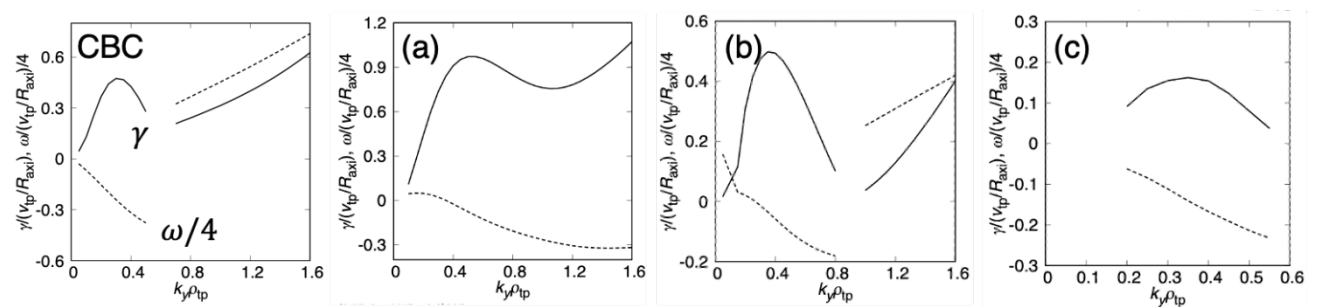


Fig. 2.2.4-2 Linear dispersion relations of CBC (the dataset C1), (a) the dataset U1, (b) the dataset U2, (c) the dataset U3. Here, γ (solid lines) is the linear growth rate and ω (broken lines) the mode frequency.

線形安定性の計算は少ない計算資源で高速に実行できるため、主たる不安定性が異なる複数のケースに対する予測モデルを事前に構築しておき、モデルにとって未知のデータセットの線形安定性に従って適切な予測モデルを選択することで、高い予測性能を得ることができるのではないかと着想した。標準的

な CBC の主たる不安定性は ITG/TEM であったため、GKV に入力するパラメータセットを変更し、ITG 不安定性しか発現しないデータセット C2、TEM しか発現しないデータセット C3 を用意し、それらに対して CNN モデルを構築した。そして、ITG しか発現していないデータセット U3 に対して、同じく ITG のみのデータセット C2 で学習した CNN モデルを用いて予測したところ、Fig. 2.2.4-3 のように $R^2 = 0.8912$ と高い予測性能を示した[6,8-10]。このことは、複数のパターンに対応する予測モデルを準備し、簡単な前処理によって適用するモデルを選別することによって、未知のデータセットに対しても高い予測性能が得られることを示している。

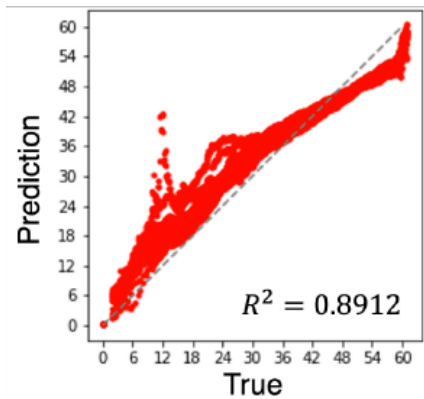


Fig. 2.2.4-3 Time predictions of the model trained on the data set C2 for the data set U3.

2-2-4-2. マルチモーダルモデルによる熱流束と時刻の予測

これまでの研究により、CNN モデルによって、ジャイロ運動論シミュレーションの現在時刻や飽和時刻の予測が可能となった。一方、ジャイロ運動論シミュレーションを実行する主目的の一つは最終的な飽和状態における乱流熱流束の値を知ることであり、シミュレーションの初期段階のデータから乱流熱流束をある程度予測する事ができれば、計算の大幅な省力化に加え、機械学習による代理モデルの構築に繋がり、ニューラルネットワークモデルによるジャイロ運動論コードのシミュレータをプラズマ統合モデルと結合した連成シミュレーションが可能となる。一方で、現在のスキームのままでは妥当な乱流熱流束の予測モデルの構築は困難であることが分かっている。試みに既存のモデルの出力(すなわちラベルデータ)を時刻から熱流束に変更してみたところ、同じデータセットのテストデータに対しては比較的良好な予測性能を示すものの、未知のデータセットに対する予測性能は極めて低かった。詳細を検討したところ、原因として以下のことが考えられた。時刻予測が成功したのは、波数空間における振幅が相対的に高強度な箇所の発現パターンの遷移を見ることによって、その画像が全体の道程の中の何合目であるということを知ることができるためである。一方で、熱流束は、データセットごとにオーダレベルで値が違うこと、電子とイオンで熱流束は大きく異なりうること、さらに飽和時の熱流束は飽和に至るまでの過程の中で必ずしも最大値とならないことなどから、時刻とは性質が大きく異なる事がわかる。そもそも、入力に用いた画像は各時刻の中で強度を正規化していることから、入力に絶対値の情報は全く含まれていない。それにも係わらず、ラベルデータに含まれた情報のみから様々なケースに適用可能な絶対値を予測する事は、事実上不可能であると言わざるを得ない。

そこで、CNN モデルをマルチモーダルモデルへと拡張することにした。このモデルの目的は、与えられた入力から電子熱流束 Q_e 、イオン熱流束 Q_i と時刻 t を出力することである。これまでの CNN モデルで

はイオンの分布関数の揺動強度画像 $\tilde{f}_i^2(k_x, k_y)$ を入力としていたが、そこから電子の熱流束を算出することはできないため、新たに電子の揺動強度画像 $\tilde{f}_e^2(k_x, k_y)$ と静電揺動強度画像 $\tilde{\phi}^2(k_x, k_y)$ を入力として加えることにした。更に、絶対値の情報をモデルに付加するために、 $\sum_{k_x, k_y} \tilde{\phi}^2(k_x, k_y)$ の数値データも画像と同時に入力することにした。画像入力に着目すると、画像の種類ごとに CNN モデルを構築する（すなわち、本ケースだと 3 つの CNN モデルを繋げる）ことは可能であるが、モデルが大きくなりすぎる。ここでは、揺動強度画像は強度の 2 次元分布であることから本質的にモノクロで処理できるため、 \tilde{f}_e^2 , \tilde{f}_i^2 , $\tilde{\phi}^2$ の各画像をモノクロ（グレイスケール）にして色のチャンネル情報を落とし、それを重畳することにする。さらにそのモノクロ画像を深さ方向にコピーして擬似的なカラー画像と同じテンソルを作成した。深さ方向に 3 チャンネル同画像を重ねて擬似的なカラー画像にしたのは、EfficientNet が 3 次元テンソルで事前学習されているからである。ここで、各画像を重畳せずに \tilde{f}_e^2 , \tilde{f}_i^2 , $\tilde{\phi}^2$ をそれぞれ RGB に対応させたカラー画像にすることも考えられるかもしれないが、色のチャンネルごとに異なる輪郭を持つ画像は通常あり得ず、ImageNet で事前学習された EfficientNet に入力した場合、まともな結果は得られない（但し、転移学習ではなく一から学習を始めた場合はその限りではない）。結果として、入力された画像には \tilde{f}_e^2 , \tilde{f}_i^2 , $\tilde{\phi}^2$ の全ての情報が区別なく載っていることになる。

学習を高速化するため、データ供給を全て TensorFlow Dataset を用いて行った。Numpy 配列を使う時と比べ、4 倍程度の学習の高速化を達成した。熱流束は StandardScaler により標準化し、多層パーセプトロンに用いる活性化関数は Swish、熱流束の出力活性化関数は線形とした。また、損失関数は LogCosh とし、LayerNormalization による正規化を実施した。

構築したマルチモーダルモデルを、データセット U1 で学習させた。テストデータに対する (Q_e, Q_i, t) の決定係数は $(0.9850, 0.9924, 0.9702)$ となった。Fig. 2.2.4-4 に示すとおり、全時刻に渡って良好な時刻予測能力を示し、熱流束も同様に全ての箇所において良好な予測能力を示している。このモデルにとって未知データとなるデータセット C1 に対して適用した結果が Fig. 2.2.4-5 に示されており、時刻の予測能力は比較的高い事が分かる。しかし、熱流束の予測を示した Fig. 2.2.4-5 (b)(c) では、決定係数はいずれも 0.4 に満たず、特にイオン熱流束 Q_i に関しては真値と予測値で 5 倍程度の乖離があるため、改善の余地は大きい。一方で、熱流束の予測に関しては特筆すべき点も多い。予測値は真値の増加に対して単調増加しており、全体の傾向はどちらのモデルも掴んでいる。また、Fig. 2.2.4-4 (b)(c) から分かる通り、データセット U1 はシミュレーションの全時間にわたって $Q_e \approx Q_i$ となっており、マルチモーダルモデルは電子とイオンの熱流束がほぼ同値であるケースしか学習していない（モデルは熱流束をラベルデータでしか知らない点に留意する）。一方、データセット C1 は Fig. 2.2.4-5 (b)(c) から分かる通り $3Q_e \approx Q_i$ となっており、両者には絶対値で大きな乖離がある。モデルは $Q_e \approx Q_i$ のケースで訓練され、データセット C1 の熱流束は一切与えられておらず、画像データと粒子種に依存しない $\sum_{k_x, k_y} \tilde{\phi}^2(k_x, k_y)$ データのみが与えられているにも関わらず、データセット C1 ではイオンの熱流束が電子の熱流束よりも大きい事を予測できている。これはモデルの予測能力を語る上で特筆すべき点であり、今後は絶対値を含めた予測精度の向上に努めていく予定である。

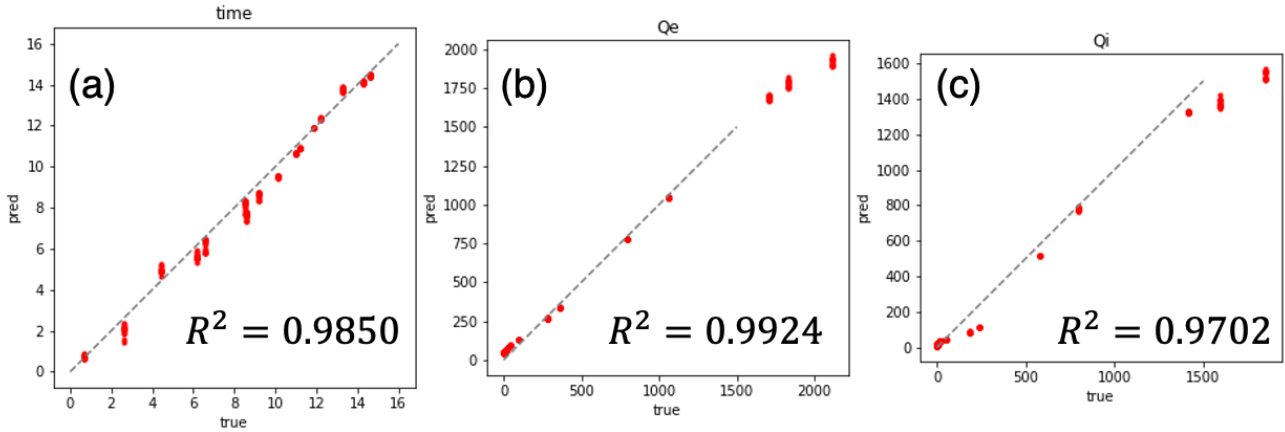


Fig. 2.2.4-4 Predictions and coefficients of determination of (a) the electron heat flux Q_e , (b) the ion heat flux Q_i , (c) the time t for the multimodal model trained on the data set U1 for its test data.

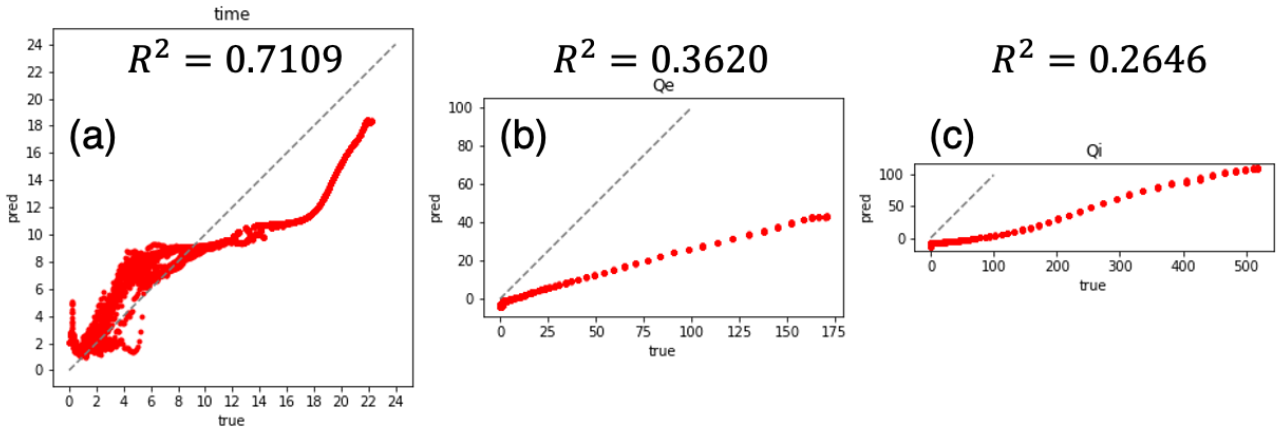


Fig. 2.2.4-5 Predictions and coefficients of determination of (a) the electron heat flux Q_e , (b) the ion heat flux Q_i , (c) the time t for the multimodal model trained on the data set U1 for the data set C1.

2-2-4-3. 時系列シミュレーションデータに対する輸送モデリング

乱流輸送係数をモデル化し、輸送予測に応用することはジャイロ運動論シミュレーションの高い計算コストを削減する上で非常に有用な手法である。一方で、乱流シミュレーションから求められる輸送係数に対して、モデル予測の再現性を定量的に評価する上で、シミュレーションのデータそのものが有する特性をできる限りモデルに反映させることは極めて重要である。特にこれまでの研究においては[11]、乱流振幅とゾーナルフロー（帯状流）振幅を用いた乱流輸送係数に対する非線形関数が存在し、その関数によりシミュレーションの結果を非常に高精度で再現できることが明らかになっている。これまでの研究では、様々な条件下で実行されたシミュレーションデータの時間平均された物理量で表現された非線形関数を用いていた。ここでは、シミュレーションの時系列データを1ケースごとに解析し直すことで、それぞれのケースで形成し得る関数について解析した結果、Fig. 2.2.4-6のように、時間平均量で表現されていたものと同様の関数が、時系列データごとに対しても独立して存在していることがわかった。次に、異なるシミュレーション条件ごとに非線形関数の評価を試みた。特に、イオン温度勾配を変化させた ITG モード乱流輸送に注目し、各イオン温度勾配ごとに関数を同定した。同一の小半径位置において解析を進

め、その際の平均回帰誤差が $\sigma=0.017$ から $\sigma=0.010$ へと 40%程度改善されることが分かった。一方で、誤差評価において相対誤差を用いることは、時系列データを対象にしていることを考慮した場合には適切ではないため、絶対誤差に基づく目的関数を定義し直し、改めて数理最適化を行った。結果は、 $\sigma=5.2 \times 10^{-4}$ というさらに大幅な改善を確認できた。これは、時系列データごとにモデリングを行うことで、輸送モデル構築の基礎となる非線形関数そのものをさらに高精度化できることを示している[12]。

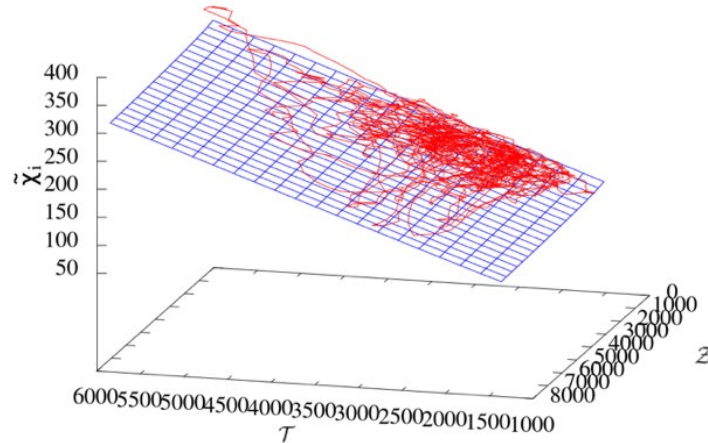


Fig. 2.2.4-6 Spatial structure of a time series data (red curve) of gyrokinetic simulation for ITG turbulent transport in the parameter space of the ion heat diffusivity χ_i , the turbulent fluctuation T , and the zonal flow amplitude Z . The blue surface represents the function obtained from the nonlinear fitting analysis.

2-2-4-4. 5次元位相空間上の分布関数データの可視化とデータクラスタリング

ジャイロ運動論的シミュレーションから得られるデータは、5次元分布関数の時系列データであるため、データが高次元かつ巨大なものになり、乱流輸送現象の物理を完全に把握することは容易ではない。実際の解析においては、扱うデータ量が1ケースで数テラバイトという巨大かつ豊富な情報量を含むシミュレーションデータを効率的に解析できる手法開発が強く求められている。特に、高次元データの可視化の困難もあり、5次元位相空間上の分布関数の構造を直接的に解析することは殆ど行われていない。これまでは主に、実3次元空間上の1点に注目した上で、2次元の速度空間構造を解析する他、分布関数を速度空間上で積分した3次元流体量に対する解析が進められてきた。しかし当然ながら、これらのアプローチは解析範囲が限定されることになり、やはりシミュレーションデータ全体から全ての物理を把握することは難しい。そこで本研究では、5次元データ全体を俯瞰する包括的な可視化・解析手法を提案した。まず、ジャイロ運動論的シミュレーションデータを効率的に解析するために、2次元の速度空間 (v_{\parallel}, v_{\perp}) の分布関数を、磁場に垂直な波数空間 (k_x, k_y) 上、および、磁力線に沿った空間座標 z を固定してマッピングした(Fig. 2.2.4-7)。この可視化方法により、各速度空間分布関数の特徴や高次元波数空間分布関数の特徴を容易に捉えることができるようになった。また、2次元速度分布関数が波数空間上および実空間上に特徴的な構造を伴って分布していることが新たに分かった。次に、上述の5次元分布関数データのマッピング結果を用いた新しいデータ解析手法について検討した。これまでの研究で、プラズマの乱流輸送を低減させるためには帯状流の存在が重要であることが示されている。波数空間における帯状流領域 ($k_y = 0$) での分布関数が類似的な構造を持つのであれば、その構造が出現する領域やタイミングを特定するこ

とで、帯状流生成が支配的となる実空間座標に注目し、重要な解析範囲に焦点を当てることができる。そこで、上記のマッピング結果を画像ファイル化し、画像処理で用いられる類似性解析手法を採用することで解析を試みた。ここで用いた手法では、速度空間分布関数プロットの輪郭などの画像特徴を抽出して、プロット間の類似度を判定する。解析の結果、帯状流領域には、類似性の高い速度分布関数構造が長時間、存在し続けることが明らかになった。さらに、同一のシミュレーションデータに対して、クラスタリング解析も適用した。クラスタリング手法は、上述の類似度判定で議論したような類似性の高い領域を複数のクラスターで分類し、そのクラスター分布を解析するものがある。これにより波数空間における類似構造の捕捉がさらに容易になる。また、クラスターに割り当てられた領域の存在時間を計算することで、類似構造の持続時間も定量化することができる。ここでは、**k-means** アルゴリズムによるクラスタリング手法を適用し、2次元速度空間分布関数形状の類似性が、波数空間にわたって特定の構造を保持・発展していく様子を捉えることができた (Fig. 2.2.4-8)[13]。

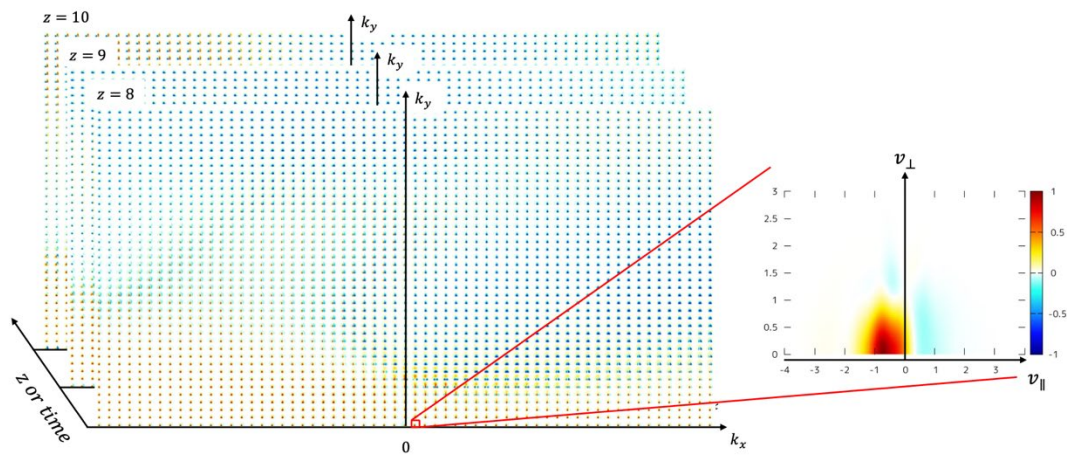


Fig. 2.2.4-7 An example of mapping the velocity space distribution function into the wavenumber space [13]

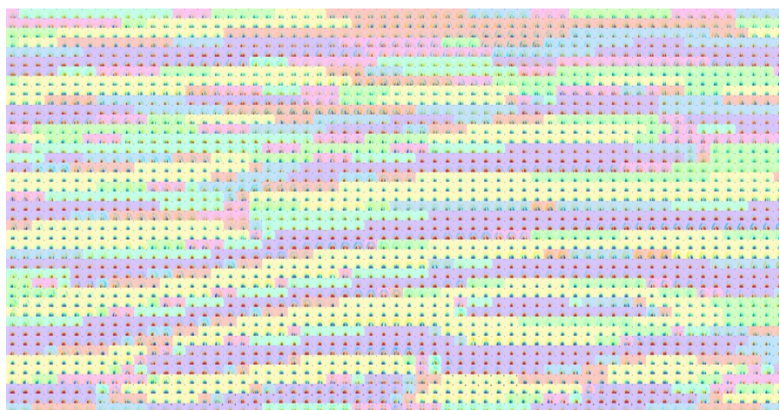


Fig. 2.2.4-8 Visualization of the result of the cluster analysis of a velocity space distribution function [13].

【参考文献】

- [1] M. Honda and E. Narita, “Development of the framework to cope with advanced transport models using parallel computing and deep learning techniques”, Joint Asia-Pacific Transport Working Group (APTWG) meeting and US-EU Transport Task Force Meeting 2021, 8 Jul. 2021, online. (国際会議)
- [2] E. Narita, M. Honda, M. Nakata, M. Yoshida and N. Hayashi “Neural-network-based turbulent transport modeling with development of saturation rules based on gyrokinetic analysis of JT-60U plasmas”, Joint Asia-Pacific Transport Working Group (APTWG) meeting and US-EU Transport Task Force Meeting 2021, 8 Jul. 2021, online. (国際会議)
- [3] 成田絵美、本多充、仲田資季、林伸彦、「機械学習を利用した半経験的乱流輸送モデルの汎用性改善に向けた拡張」、第77回日本物理学会年次大会、2022年3月16日、オンライン。(国内会議)
- [4] 成田絵美、本多充、「機械学習による核融合プラズマの輸送モデリング」、第38回プラズマ・核融合学会年会、2021年11月24日、オンライン。(招待講演・国内会議)
- [5] E. Narita, M. Honda, M. Nakata, M. Yoshida and N. Hayashi, “Quasilinear turbulent particle and heat transport modelling with a neural-network-based approach founded on gyrokinetic calculations and experimental data”, Nuclear Fusion **61** (2021) 116041 (査読付き論文)
- [6] M. Honda, E. Narita, S. Maeyama and T.-H. Watanabe, “A deep-learning approach to analyze wavenumber-space images of gyrokinetic simulations for faster calculations”, 4th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPS-DPP2021), 28 Sep. 2021, online. (国際会議・招待講演)
- [7] T.-H. Watanabe, Y. Idomura, Y. Todo and M. Honda, “Kinetic Simulations for Burning Plasma Physics in Magnetic Fusion”, 1st International Conference on Computational Science and Data Analytics (COMDATA2021), 22 Nov. 2021, online. (国際会議・招待講演)
- [8] E. Narita, M. Honda, S. Maeyama and T.-H. Watanabe, “Improvements in efficiency of gyrokinetic simulation runs with convolutional neural network models analyzing nonlinear saturation processes”, 4th IAEA Technical Meeting on Fusion Data Processing, Validation and Analysis, 30 Nov. 2021, online. (国際会議・口頭講演)
- [9] 成田絵美、本多充、前山伸也、渡邊智彦、「乱流輸送シミュレーションの高効率な実行に向けた波数空間画像解析モデルの開発」、スーパーコンピュータ「富岳」成果創出加速プログラム研究交流会、2022年3月14日、オンライン。(国内会議)
- [10] E. Narita, M. Honda, S. Maeyama and T.-H. Watanabe, “Toward efficient runs of nonlinear gyrokinetic simulations assisted by a convolutional neural network model recognizing wavenumber-space images”, to appear in Nuclear Fusion. (査読付き論文)
- [11] M. Nunami, T.-H. Watanabe and H. Sugama, “A reduced model for ion temperature gradient turbulent transport in helical plasmas”, Physics of Plasmas **20**, 092307 (2013).
- [12] K. Fujii, and M. Nunami, “Relations among Turbulent Fluctuations, Zonal Flows, and Transport Coefficients in Time Series Data of Gyrokinetic Simulations”, Plasma and Fusion Research **17**, 2403030 (2022). (査読付き論文)
- [13] T. Sadakata, S. Kitazawa, M. Nunami, T. Katagiri, S. Ohsima and T. Nagai, “A Novel Approach

for Data Analysis Based on Visualization of Phase Space Distribution Function in Plasma Turbulence Simulations”, to appear in Plasma and Fusion Research. (査読付き論文)

2-2-5. プロジェクトの全体推進

本課題では、各サブテーマの推進状況の確認及び課題全体の調整のため、各サブテーマのリーダーによる幹事会、並びに、課題参加者による課題推進会議を下表のようにオンラインにて開催した。

日程	会議・会合名
2021年4月16日	令和3年度第1回幹事会
2021年5月20日	令和3年度第1回課題推進会議
2021年11月11日	令和3年度第2回幹事会
2021年12月10日	令和3年度第2回課題推進会議
2022年2月3日	令和3年度第3回幹事会
2022年3月25日	令和3年度成果報告会

2-3. 活動（研究会の活動等）

一般社会への広報活動として、あいちサイエンス・フェスティバルにおいてサイエンス・トークを行なった（2021年10月28日；<https://aichi-science.jp/about/index.html?id=25>）。その動画はYouTubeでも配信されている(<https://www.youtube.com/watch?v=fLouz1VWJQI>)。

また、磁場閉じ込め核融合プラズマシミュレーションに関する国際共同研究推進のため日米間でワークショップを開催した。

さらに、本課題のサブテーマ[1]で研究開発を進めている局所乱流輸送シミュレーション・コードGKVの普及活動の一環として、大学院生及び研究者を対象とした利用講習会をオンラインで開催した。加えて、GKVコードでの結果を解析するためのpythonライブラリの最新版をGithubにおいて公開した(<https://github.com/GKV-developers>)。

日程	会議・会合名
2022年1月18日-19日	日米核融合理論ワークショップ
2022年3月31日	第6回GKV講習会

2-4. 実施体制

業務項目	担当機関	担当責任者
(1) サブテーマ[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	愛知県名古屋市千種区不老町 国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学大学院理学研究科	教授 渡邊 智彦
(2) サブテーマ[2] 核燃焼 プラズマの自発回転と過渡応 答	千葉県柏市若柴 178-4 柏の葉キャ ンパス 148-4 国立研究開発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	室長 井戸村 泰宏
(3) サブテーマ[3] 核燃焼 生成高エネルギー粒子の閉じ 込め解析	岐阜県土岐市下石町 322-6 大学共同利用機関法人自然科学研究 機構核融合科学研究所 ヘリカル研究部	教授 藤堂 泰
(4) サブテーマ[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	茨城県那珂市向山801-1 国立研究開発法人量子科学技術研究 開発機構那珂核融合研究所 先進プ ラズマ研究部	上席研究員 Bierwage Andreas
(5) プロジェクトの全体推 進	愛知県名古屋市千種区不老町 国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学大学院理学研究科	教授 渡邊 智彦

別添1 学会等発表実績

- [1] S. Maeyama, T.-H. Watanabe, M. Nakata, M. Nunami, Y. Asahi, A. Ishizawa, “Gyrokinetic Simulations of Cross-Scale Interactions between Electron Temperature Gradient and Trapped Electron Modes on the Supercomputer Fugaku”, 30th International Toki Conference (ITC30) (Online, November 17, 2021). (国際会議・招待講演)
- [2] S. Maeyama, “Exploring multi-scale turbulent interactions in high electron temperature burning plasma”, 5th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPS-DPP2021), (Online, September 28, 2021). (国際会議・招待講演)
- [3] 前山伸也, “核燃焼プラズマに向けたマルチスケール乱流輸送現象の外挿性”, 日本物理学会第77回年次大会 (オンライン, 2022年3月18日) .
- [4] T.-H. Watanabe, S. Maeyama, M. Nakata, “Stabilization of trapped electron mode instability due to electron”, The Joint APTWG-TTF meeting (Online July 6-9, 2021).
- [5] T.-H. Watanabe, S. Maeyama, M. Nakata, “Kinetic simulation of multi-scale turbulence interactions and diffusion in magnetized plasma”, XXXI IUPAP Conference on Computational Physics (Online, August 1-5, 2021).
- [6] T.-H. Watanabe, “A role of effective diffusion by ETG turbulence in multi-scale drift wave instabilities”, 15th Japan-Korea Workshop on "Modeling and Simulation of Magnetic Fusion Plasmas" (Online, August 26-27, 2021).
- [7] 渡邊智彦, 前山伸也, 仲田資季, 電子温度勾配乱流中での捕捉電子モードへの実効拡散効果のモデリング, 日本物理学会2021年秋季大会 (オンライン, 2021年9月20日-23日) .
- [8] T.-H. Watanabe, Kinetic Simulations for Burning Plasma Physics in Magnetic Fusion, The FIRST INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTATIONAL SCIENCE & DATA ANALYTICS (Online, November 21-24, 2021). (国際会議・招待講演)
- [9] 渡邊智彦, 磁場閉じ込め核融合燃焼プラズマの異常輸送シミュレーション, 第38回プラズマ・核融合学会年会 (オンライン, 2021年11月22日-25日)
- [10] T.-H. Watanabe, Y. Idomura, Y. Todo, and M. Honda, “Exploration of burning plasma confinement physics using the supercomputer Fugaku”, 2nd Fusion HPC Workshop (Online, December 2-3, 2021). (国際会議・基調講演)
- [11] Shaokang Xu, S. Maeyama, and T.-H. Watanabe, “Anomalous tungsten transport driven by ion temperature gradient turbulence”, The Joint APTWG-TTF meeting (Online, July 7, 2021). (国際会議)
- [12] Shaokang Xu, S. Maeyama, and T.-H. Watanabe, “Anomalous tungsten transport driven by ion temperature gradient turbulence”, Japan-Korea JK Workshop on “Modeling and Simulation of Magnetic Fusion Plasma”, (Online, August 27, 2021). (国際会議)
- [13] Shaokang Xu, S. Maeyama, and T.-H. Watanabe, “Anomalous tungsten transport driven by ion temperature gradient turbulence”, The 30th International Toki Conference on Plasma and Fusion

- research (Online, November 8, 2021). (国際会議)
- [14] Shaokang Xu, S. Maeyama, and T.-H. Watanabe, "Reversal of heavy impurity pinch velocity in trapped electron mode turbulence by decreasing the magnetic shear", 19th Burning Plasma Simulation Initiative (BPSI) Meeting (Online, January 6, 2022). (国際会議)
- [15] Shaokang Xu, S. Maeyama, and T.-H. Watanabe, "Reversal of heavy impurity pinch velocity in trapped electron mode turbulence by decreasing the magnetic shear", 日本物理学会第 77 回年次大会 (オンライン、2022 年 3 月 16 日) (国内会議)
- [16] Shaokang Xu, S. Maeyama, and T.-H. Watanabe, "Anomalous tungsten transport driven by ion temperature gradient turbulence", *Nuclear Fusion* **62** (2002) 064003. (査読付き論文)
- [17] S. Maeyama, S. Kusaka, and T.-H. Watanabe, "Effects of ion polarization and finite- b on heat transport in slab electron-temperature-gradient driven turbulence", *Physics of Plasmas* **28** (2021) 052512. (査読付き論文)
- [18] T.-H. Watanabe, S. Kusaka, T. Oguri, and S. Maeyama, "Roles of Kinetic Ion Dynamics on Electron-Scale Turbulent Transport", 28th IAEA Fusion Energy Conference (Online, May 10-15, 2021).
- [19] 前山伸也, 渡邊智彦, 仲田資季, 沼波政倫, 石澤明宏, 朝比祐一, "回転フラックスチューブによる背景シア流下の局所乱流シミュレーション", 日本物理学会第 77 回年次大会 (オンライン、2022 年 3 月 14 日). (国内会議)
- [20] 前山伸也, 渡邊智彦, 仲田資季, 沼波政倫, 石澤明宏, 朝比祐一, 局所ジャイロ運動論シミュレーションにおける背景シア流の新数値解法, 第 38 回プラズマ核融合学会年会 (オンライン、2021 年 11 月 24 日). (国内会議)
- [21] 前山伸也, 渡邊智彦, スーパーコンピュータ「富岳」を用いた補足電子モードと電子温度勾配モードのマルチスケール乱流シミュレーション, 日本物理学会 2021 年秋季大会 (オンライン、2021 年 9 月 22 日). (国内会議)
- [22] S. Maeyama, T.-H. Watanabe, "Multi-scale simulations of trapped electron mode and electron temperature gradient mode turbulence on the supercomputer Fugaku", Joint workshop of Asia-Pacific Transport Working Group and US-EU Transport Task Force 2021 (Online, July 7, 2021). (国際会議)
- [23] S. Maeyama, T.-H. Watanabe, "Cross-Scale Interactions Between Trapped-Electron-Mode and Electron-Temperature-Gradient-Mode Turbulence", 28th IAEA Fusion Energy Conference (Online, May 14, 2021). (国際会議)
- [24] S. Matsuoka, H. Sugama, Y. Idomura, "Neoclassical transport simulations with an improved model collision operator", *Physics of Plasmas*, Vol. 28, 064501 (2021). (査読付き論文)
- [25] Y. Asahi, G. Latu, J. Bigot, and V. Grandgirard, "Optimization strategy for a performance portable Vlasov code", Proceedings of 2021 International Workshop on Performance, Portability, and Productivity in HPC (P3HPC) (査読付き論文)
- [26] Y. Idomura, "Isotope and Plasma Size Scaling in Ion Temperature Gradient Driven Turbulence", 47th EPS Plasma Physics Conference (6/21-25, Online) (国際会議)

- [27] Y. Idomura, "Development of exascale full-f gyrokinetic simulation on Summit and FUGAKU", The Platform for Advanced Scientific Computing (PASC21) Conference (7/5-9, Online) (国際会議)
- [28] Y. Idomura, "A new synergy effect between neoclassical and turbulent particle transport in ion temperature gradient driven turbulence", AAPPS-DPP2021 (Division of Plasma Physics, Association of Asia-Pacific Physical Societies, 9/26-10/1, Online, Topical Plenary Talk) (国際会議招待講演)
- [29] Y. Asahi, G. Latu, J. Bigot, and V. Grandgirard, "Optimization strategy for a performance portable Vlasov code", 2021 International Workshop on Performance, Portability, and Productivity in HPC (P3HPC,11/14, Online) (国際会議)
- [30] Y. Asahi, K. Fujii, S. Maeyama, Y. Idomura, "Phase-Space Pattern Extraction from 5D GyroKinetic simulation data", The 30th International Toki Conference (11/16-11/19, Online). (国際会議)
- [31] Y. Idomura, G. Dif-Pradalier, X. Garbet, Y. Sarazin and ToreSupra team, "Full-f gyrokinetic simulations of LOC-SOC transition", 第38回 プラズマ・核融合学会 年会 (11/22-15、オンライン) (国内会議)
- [32] Y. Idomura, "Acceleration of full-f gyrokinetic Eulerian code GT5D on Fugaku and Summit", Joint US-Japan Workshop on Exascale Computing Collaboration and 6th workshop of US-Japan Joint Institute for Fusion Theory (JIFT) program (1/17-18, Online) (国際会議)
- [33] 井戸村 泰宏, "「富岳」における核融合プラズマ流体解析の最適化", 「富岳」成果創出加速プログラム研究交流会 (3/14-15、オンライン) (国内会議)
- [34] Y. Todo, M. Sato, H. Wang, M. Idouakass, and R. Seki, "Magnetohydrodynamic hybrid simulation model with kinetic thermal ions and energetic particles", Plasma Physics and Controlled Fusion 63 (2021) 075018 (査読付き論文)
- [35] M. Idouakass, Y. Todo, H. Wang, J. Wang, R. Seki, M. Sato, "Precession drift reversal and rapid transport of trapped energetic particles due to an energetic particle driven instability in the Large Helical Device", Physics of Plasmas 28 (2021) 080701 (査読付き論文)
- [36] M. Sato and Y. Todo, "Kinetic thermal ion effects on maintaining high beta plasmas above the Mercier criterion in the Large Helical Device", Nuclear Fusion 61 (2021) 116012 (査読付き論文)
- [37] H. Li, Y. Todo, H. Wang, M. Idouakass, and J. Wang, "Simulation study of energetic-particle driven off-axis fishbone instabilities in tokamak plasmas", Nuclear Fusion 62 (2022) 026013 (査読付き論文)
- [38] M. Idouakass, "Nonlinear simulations of MHD modes with a strong energetic particle pressure redistribution in the LHD", 第10回 IFERC-CSC 研究会 (オンライン開催, 2021年4月5日~6日) (国内会議)
- [39] H. Wang, "Simulations of Alfvén eigenmodes in the quasi-axisymmetric plasmas", 第10回 IFERC-CSC 研究会 (オンライン開催, 2021年4月5日~6日) (国内会議)
- [40] M. Sato and Y. Todo, "Supercritical stability of the Large Helical Device plasmas due to the kinetic thermal ion effects", 28th IAEA Fusion Energy Conference (Online, 10-15 May 2021) (国際会議)

議・招待講演)

- [41] R. Seki, “Hybrid simulations of fast ion transport and losses due to the fast ion driven instabilities in the Large Helical Device” 28th IAEA Fusion Energy Conference (Online, 10-15 May 2021) (国際会議)
- [42] Y. Todo, “Kinetic-MHD hybrid simulation of off-axis fishbone instability in tokamak plasmas”, 25th International Tokamak Physics Activity (ITPA) Energetic Particle Physics Topical Group Meeting (Online, 17-21 May 2021) (国際会議)
- [43] H. Wang, “Numerical simulations of Alfvén eigenmodes in CFQS”, Asia-Pacific Transport Working Group Meeting (Online, 6-9 June 2021) (国際会議)
- [44] Y. Todo, “Distribution function analysis of fast ions during the frequency chirping of Alfvén eigenmodes”, 47th European Physical Society Conference on Plasma Physics (Online, 21-25 June 2021) (国際会議)
- [45] M. Idouakass, “Numerical simulations of a strongly pressure redistributing mode in LHD plasmas driven by energetic particles”, 47th European Physical Society Conference on Plasma Physics (Online, 21-25 June 2021) (国際会議)
- [46] H. Wang, “Simulations of Alfvén eigenmodes in CFQS”, 47th European Physical Society Conference on Plasma Physics (Online, 21-25 June 2021) (国際会議)
- [47] Y. Todo, “Energetic particle dynamics in fusion plasma”, 10th East-Asia School and Workshop on Laboratory, Space, and Astrophysical Plasmas (Online, 11-16 August 2021) (国際会議・招待講演)
- [48] Y. Todo, “Introduction to the energetic-particle driven instabilities”, 15th Japan-Korea Workshop on "Modeling and Simulation of Magnetic Fusion Plasmas" (Online, 26-27 August 2021) (国際会議)
- [49] M. Idouakass, “Precession drift reversal and energetic particle pressure redistribution due to an energetic-particle driven instability in the Large Helical Device”, プラズマシミュレータシンポジウム 2021 (オンライン開催, 2021年9月16日~17日) (国内会議・招待講演)
- [50] 藤堂泰, 「運動論的 MHD シミュレーションの最近の進展」, プラズマシミュレータシンポジウム 2021 (オンライン開催, 2021年9月16日~17日) (国内会議)
- [51] 佐藤雅彦, 「圧力勾配駆動型 MHD 不安定性に対する運動論的 MHD シミュレーション研究の進展」, プラズマシミュレータシンポジウム 2021 (オンライン開催, 2021年9月16日~17日) (国内会議)
- [52] H. Wang, “Simulations of Alfvén eigenmodes in CFQS plasmas”, プラズマシミュレータシンポジウム 2021 (オンライン開催, 2021年9月16日~17日) (国内会議)
- [53] J. Wang, “Simulation of ICRF heating in the Large Helical Device using MEGA code”, プラズマシミュレータシンポジウム 2021 (オンライン開催, 2021年9月16日~17日) (国内会議)
- [54] H. Wang, “Nonlinear simulations of Alfvén eigenmodes in the quasi-axisymmetric plasmas”, 日本物理学会 2021年秋季大会 (オンライン開催, 2021年9月20日~23日) (国内会議)
- [55] Y. Todo, “Validation and extension of kinetic-magnetohydrodynamics hybrid simulation for the prediction of burning plasmas”, AAPPs-DPP2021 (Online, 26 Sept. - 1 Oct. 2021) (国際会議・基調講演)

- [56] M. Idouakass, Y. Todo, H. Wang, J. Wang, R. Seki, “Precession drift reversal and strong redistribution of energetic particles during energetic-particle driven magnetohydrodynamics instability in a Large Helical Device plasma”, AAPPS-DPP2021 (Online, 26 Sept. - 1 Oct. 2021) (国際会議・招待講演)
- [57] Y. Todo, “Kinetic-MHD hybrid simulations of ITER steady state scenarios”, 26th International Tokamak Physics Activity (ITPA) Energetic Particle Physics Topical Group Meeting (Online, 2-5 November 2021) (国際会議)
- [58] M. Idouakass, “Precession Drift Reversal and Strong Energetic Particle Redistribution due to an Energetic Particle Driven Instability in the Large Helical Device”, 30th International Toki Conference (Online, 16-19 November 2021) (国際会議)
- [59] J. Wang, “Implementation of ion cyclotron resonance frequency heating in a kinetic-MHD hybrid code: MEGA”, 30th International Toki Conference (Online, 16-19 November 2021) (国際会議)
- [60] H. Wang, “Simulations of Alfvén eigenmodes in CFQS using MEGA code”, 30th International Toki Conference (Online, 16-19 November 2021) (国際会議)
- [61] P. Adulsiriswad, “First Achievement of Free-Boundary Kinetic-Magnetohydrodynamic Hybrid Simulation of Energetic-Particle Driven Modes in Heliotron J”, 第 38 回プラズマ・核融合学会年会 (オンライン開催, 2021 年 11 月 22 日～25 日) (国内会議・招待講演)
- [62] 佐藤雅彦, 藤堂泰, 「運動論的 MHD シミュレーション解析による LHD プラズマの圧力駆動型不安定性のベータ値依存性」, 第 38 回プラズマ・核融合学会年会 (オンライン開催, 2021 年 11 月 22 日～25 日) (国内会議)
- [63] H. Wang, “Nonlinear simulations of Alfvén eigenmodes in CFQS plasmas”, 17th IAEA Technical Meeting on Energetic Particles and Theory of Plasma Instabilities (Online, 6-9 December 2021) (国際会議)
- [64] M. Idouakass, “Numerical study of an energetic particle driven fast growing mode causing rapid energetic particle transport in the Large Helical Device”, 17th IAEA Technical Meeting on Energetic Particles and Theory of Plasma Instabilities (Online, 6-9 December 2021) (国際会議)
- [65] J. Wang, “Implementation of ion cyclotron resonance frequency heating in a kinetic-MHD hybrid code: MEGA”, 17th IAEA Technical Meeting on Energetic Particles and Theory of Plasma Instabilities (Online, 6-9 December 2021) (国際会議)
- [66] Y. Todo, "Progress of MEGA simulations on Fugaku", US-Japan Workshop on Exascale Computing Collaboration (Online, 18-19 January 2022) (国際会議)
- [67] M. Honda and E. Narita, “Development of the framework to cope with advanced transport models using parallel computing and deep learning techniques”, Joint Asia-Pacific Transport Working Group (APTWG) meeting and US-EU Transport Task Force Meeting 2021, 8 Jul. 2021, online. (国際会議)
- [68] E. Narita, M. Honda, M. Nakata, M. Yoshida and N. Hayashi “Neural-network-based turbulent transport modeling with development of saturation rules based on gyrokinetic analysis of JT-60U plasmas”, Joint Asia-Pacific Transport Working Group (APTWG) meeting and US-EU Transport

Task Force Meeting 2021, 8 Jul. 2021, online. (国際会議)

- [69] 成田絵美、本多充、仲田資季、林伸彦、「機械学習を利用した半経験的乱流輸送モデルの汎用性改善に向けた拡張」、第77回日本物理学会年次大会、2022年3月16日、オンライン。(国内会議)
- [70] 成田絵美、本多充、「機械学習による核融合プラズマの輸送モデリング」、第38回プラズマ・核融合学会年会、2021年11月24日、オンライン。(招待講演・国内会議)
- [71] E. Narita, M. Honda, M. Nakata, M. Yoshida and N. Hayashi, “Quasilinear turbulent particle and heat transport modelling with a neural-network-based approach founded on gyrokinetic calculations and experimental data”, *Nuclear Fusion* **61** (2021) 116041 (査読付き論文)
- [72] M. Honda, E. Narita, S. Maeyama and T.-H. Watanabe, “A deep-learning approach to analyze wavenumber-space images of gyrokinetic simulations for faster calculations”, 4th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPS-DPP2021), 28 Sep. 2021, online. (国際会議・招待講演)
- [73] T.-H. Watanabe, Y. Idomura, Y. Todo and M. Honda, “Kinetic Simulations for Burning Plasma Physics in Magnetic Fusion”, 1st International Conference on Computational Science and Data Analytics (COMDATA2021), 22 Nov. 2021, online. (国際会議・招待講演)
- [74] E. Narita, M. Honda, S. Maeyama and T.-H. Watanabe, “Improvements in efficiency of gyrokinetic simulation runs with convolutional neural network models analyzing nonlinear saturation processes”, 4th IAEA Technical Meeting on Fusion Data Processing, Validation and Analysis, 30 Nov. 2021, online. (国際会議・口頭講演)
- [75] 成田絵美、本多充、前山伸也、渡邊智彦、「乱流輸送シミュレーションの高効率な実行に向けた波数空間画像解析モデルの開発」、スーパーコンピュータ「富岳」成果創出加速プログラム研究交流会、2022年3月14日、オンライン。(国内会議)
- [76] E. Narita, M. Honda, S. Maeyama and T.-H. Watanabe, “Toward efficient runs of nonlinear gyrokinetic simulations assisted by a convolutional neural network model recognizing wavenumber-space images”, to appear in *Nuclear Fusion*. (査読付き論文)
- [77] E. Narita, M. Honda, M. Nakata, M. Yoshida and N. Hayashi “Quasilinear Turbulent Particle and Heat Transport Modeling with Development of Unique Saturation Rules for Insights into Profile Formation Mechanisms”, 28th IAEA Fusion Energy Conference, 14 May 2021, online. (国際会議)
- [78] E. Narita, M. Honda, M. Nakata, N. Hayashi and T. Nakayama “Modification of a turbulence saturation model applied in DeKANIS”, 28th ITPA Transport and Confinement Topical Group Meeting, 1 April 2022, online. (国際会議・口頭講演)
- [79] K. Fujii, and M. Nunami, “Relations among Turbulent Fluctuations, Zonal Flows, and Transport Coefficients in Time Series Data of Gyrokinetic Simulations”, *Plasma and Fusion Research* **17**, 2403030 (2022). (査読付き論文)
- [80] T. Sadakata, S. Kitazawa, M. Nunami, T. Katagiri, S. Ohsima and T. Nagai, “A Novel Approach for Data Analysis Based on Visualization of Phase Space Distribution Function in Plasma Turbulence Simulations”, to appear in *Plasma and Fusion Research*. (査読付き論文)