

令和 3 年 6 月 18 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03591

研究課題名（和文）電子加熱に対する不純物イオン輸送の過渡的応答に関する研究

研究課題名（英文）Study on transient response of impurity ion transport induced by electron heating

研究代表者

井戸村 泰宏（Idomura, Yasuhiro）

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

研究者番号：00354580

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：様々なプラズマ加熱条件やプラズマパラメータにおける過渡的プラズマ応答や閉じ込め特性の変化を理解するために、大域的full-f gyrokinetic code GT5Dを多種イオン系に拡張し、エクサスケール計算機を用いた大規模数値実験を可能とした。多種イオン系プラズマの数値実験を実施し、イオン温度勾配駆動（ITG）乱流における不純物輸送機構や水素同位体効果を解明した。ジュール加熱実験におけるLOC-SOC遷移を模擬した電子加熱数値実験を実施し、LOC-SOC遷移で捕捉電子モード（TEM）乱流からITG乱流への遷移が発生し、炭素不純物が吐き出される現象を再現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

核反応生成粒子による自己加熱が支配的となるITERや将来の原型炉では中性粒子ビーム入射（NBI）による炉心への粒子補給、運動量入力、エネルギー入力を多用した直接的な炉心制御が困難であることから、プラズマ乱流を介した間接的な炉心制御が重要な課題となっている。本研究により様々なプラズマ加熱条件やプラズマパラメータにおける多種イオン系プラズマの複雑なプラズマ乱流輸送を解析する手法が確立した。また、不純物輸送や水素同位体効果といったITERの重要課題に関する物理機構の解明が進展し、間接的な炉心制御手法の開発に向けた理論的指針が得られた。

研究成果の概要（英文）：In order to understand changes of transient plasma responses and confinement properties in various plasma heating conditions and plasma parameters, we extended the global full-f gyrokinetic code GT5D to a multi-ion species model, and enabled extreme scale numerical experiments on exascale supercomputers. We conducted numerical experiments of multi-ion species plasmas, and clarified mechanisms of impurity transport and hydrogen isotope effects in the ion temperature gradient driven (ITG) turbulence. In electron heating numerical experiments for the LOC-SOC transition in ohmic heating plasmas, we reproduced carbon impurity exhaust due to transition from the trapped electron mode (TEM) turbulence to the ITG turbulence during the LOC-SOC transition.

研究分野：核融合学

キーワード：ITER ジャイロ運動論 エクサスケール計算 イオン温度勾配駆動乱流 捕捉電子モード乱流 水素同位体効果 不純物輸送 LOC-SOC遷移

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

核反応生成 粒子による自己加熱が支配的となる ITER や将来の原型炉では中性粒子ビーム入射 (NBI) による炉心への粒子補給、運動量入力、エネルギー入力を多用した直接的な炉心制御が困難であることから、プラズマ乱流を介した間接的な炉心制御が重要な課題となっている。近年、様々なプラズマ加熱、プラズマパラメータの実験条件においてプラズマ乱流に起因する粒子輸送、不純物輸送、運動量輸送、熱輸送の変化がもたらすプラズマ応答やプラズマ閉じ込め特性の変化が実験的に観測されている。例えば、ASDEX-U (IPP) では、電子サイクロトロン波共鳴加熱 (ECRH) による電子加熱の印加に伴う密度分布の急峻化とプラズマ回転の減少 [McDermott, PPCF2011]あるいはタングステン不純物の吐出し [Neu, JNM2003]が観測されている。また、ECRH による電子加熱と NBI によるイオン加熱の条件でエネルギー閉じ込めの水素同位体効果が異なることも報告されている [Schneider, NF2016]。このような電子・多種イオンの粒子、運動量、エネルギーを含む複数輸送チャネルの相互作用がもたらす複雑なプラズマ輸送現象は長年未解明の問題であったが、5次元ジャイロ運動論モデルに基づく第一原理乱流計算の発展によって、このような問題の理論研究が可能になってきた。

従来の局所的  $f$  ジャイロ運動論コードは、定常プラズマを仮定してプラズマ分布関数  $f$  を巨視的な背景プラズマ分布  $F$  と微視的な乱流揺動  $f$  にスケール分離して後者のみを局所領域で解析するため、両者が無撞着に発展することが本質的な過渡的プラズマ応答の解析が難しく、例えば、ECRH の印加に伴うプラズマ回転の減少は従来の局所的  $f$  モデルに基づくジャイロ運動論コードの解析結果では説明できない未解明の問題であった。この問題を解析する手法として、スケール分離を仮定せず  $f$  全体をそのまま計算する大域的 full- $f$  モデルに基づくジャイロ運動論コード GT5D が開発されてきた。これを用いた数値実験の結果、ECRH の印加に伴う密度分布の急峻化とプラズマ回転の減少は、電子加熱に伴う電子温度分布の急峻化によってイオン温度勾配駆動 (ITG) 乱流から捕捉電子モード (TEM) 乱流への遷移が発生し、乱流遷移によって粒子輸送が外向きから内向きに変化することで密度分布が急峻化し、さらにこのイオン粒子束に起因する  $J \times B$  応力が運動量保存則を介してプラズマ回転を減少させるという、電子・イオンの粒子輸送、運動量輸送、熱輸送が複雑に相互作用する機構が明らかになった [Idomura, POP2017]。

本研究では、GT5D の多種イオン系モデルへの拡張を進めるとともに、最先端のエクサスケール計算機における高速計算アルゴリズムを開発した。これにより多種イオン系プラズマにおける乱流輸送数値実験を実現し、水素同位体効果や不純物輸送といった ITER における重要課題の解明に取り組んだ。

### 2. 研究の目的

#### (1) GT5D におけるエクサスケール計算技術の開発

富岳をはじめとするエクサスケール計算機向けの計算アルゴリズムを開発し、多種イオン系プラズマの大規模数値実験を高速化する。

#### (2) GT5D における多種イオン系モデルの開発と不純物輸送機構の解析

GT5D を多種イオン系モデルに拡張し、開発モデルの精度検証を実施するとともに ITG 乱流における不純物輸送機構を解明する。

#### (3) イオン/電子加熱プラズマにおける水素同位体効果の解析

ASDEX-U における ECRH/NBI 加熱実験で観測された水素同位体効果 [Schneider, NF2016] を数値実験で再現し、その物理機構を解明する。

#### (4) 電子加熱プラズマにおける不純物輸送の解析

ToreSupra (CEA) におけるジュール加熱実験で観測された炭素不純物の吐出し現象 [Citrin, PPCF2017] を数値実験で再現し、その物理機構を解明する。

### 3. 研究の方法

#### (1) GT5D におけるエクサスケール計算技術の開発

GT5D 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、空間離散化として差分法を用いる。時間積分には 2次精度半陰的ルンゲ・クッタ法を採用して磁力線方向の高速な熱運動を含む 4次元線形移流項を陰的に取り扱う。ここで、4次元線形移流項が与える非対称行列の連立一次方程式は 100億自由度規模の超大規模問題となるため、移流項の差分・陰解法ソルバが主要な計算コストを占める。この差分・陰解法ソルバに対してエクサスケール計算向き的高速計算アルゴリズムを開発し、富岳 (理研) や Summit (ORNL) における計算性能を評価した。

#### (2) GT5D における多種イオン系モデルの開発と不純物輸送機構の解析

多種イオン系モデルでは電荷量  $Z$  が異なる複数のイオン種が粒子衝突と電磁場を介して相互作用

用する。これらを記述するために、GT5D の粒子衝突演算子とフィールドソルバを複数粒子種に対応可能となるように拡張した。開発モデルの精度検証に関しては、衝突性輸送を新古典理論と比較した。その後、複数イオン種のトレーサ不純物を含む ITG 乱流の数値実験を実施し、不純物の衝突性輸送と乱流輸送の物理機構を調べた。

### (3) イオン/電子加熱プラズマにおける水素同位体効果の解析

ASDEX-U における ECRH/NBI 加熱実験を模擬したイオン/電子加熱プラズマ数値実験において、水素プラズマと重水素プラズマのエネルギー閉じ込め時間を評価し、閉じ込め性能に対する水素同位体効果を実験と比較した。また、規格化ジャイロ半径  $\rho^* = r/a$  と加熱方式の観点から水素同位体効果をもたらす物理機構を調べた。ここで、 $r$  はイオンジャイロ半径、 $a$  はプラズマ半径を示す。

### (4) 電子加熱プラズマにおける不純物輸送の解析

ToreSupra におけるジュール加熱実験を模擬した電子加熱プラズマ数値実験において、放電初期の低密度領域から高密度領域にかけての ITG 乱流から TEM 乱流への遷移とそこで観測される炭素不純物の吐出し現象を解析した。

## 4. 研究成果

### (1) GT5D におけるエクサスケール計算技術の開発 [Idomura, SC20]

GT5D の差分・陰解法ソルバを対象として、エクサスケール計算向けの省通信型行列解法を開発した。従来の差分・陰解法ソルバで用いられてきた一般化共役残差 (GCR) 法は演算性能と通信性能がバランスした従来の CPU 環境では最適な行列解法の一つであったが、エクサスケール計算機における飛躍的な演算加速により、通信処理がボトルネックとなってきた。この問題を解決するために、本研究では省通信一般化最小残差 (CA-GMRES) 法 [Idomura, ScalA17] を導入し、さらに新たに開発した FP16 (半精度) 省通信型前処理を適用した前

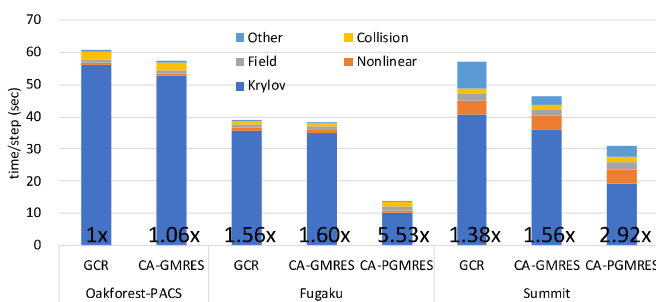


図1: GCR法、CA-GMRES法、CA-PGMRES法を実装したGT5Dの性能評価。約1,000億格子のITER規模問題1時間ステップのコスト分布。Oakforest-PACS (KNL)、富岳 (A64FX)、およびSummit (V100)、それぞれ1,440プロセッサを用いた処理性能を示す。

処理付一般化最小残差 (CA-PGMRES) 法によって収束特性を改善することで通信回数を削減した。開発した各ソルバを実装した GT5D の性能評価を図 1 に示す。性能評価は ITER の炉心プラズマ規模を想定した、実質量比の電子と重水素からなる約 1,000 億格子の 2 成分プラズマに対して行い、コスト分布としては粒子衝突項 (Collision)、フィールドソルバ (Field)、4 次元非線形移流項 (Nonlinear)、4 次元線形移流項 (Krylov)、およびその他の処理 (Other) について 1 ステップあたりの経過時間を計測した。図 1 では Oakforest-PACS (KNL)、富岳 (A64FX)、および Summit (V100)、それぞれ 1,440 プロセッサを用いた処理性能を比較した。ここで、KNL (演算性能: 3.05TFLOPS、メモリバンド幅: 480GB/s) と比べて、A64FX (3.0TFLOPS、1,024GB/s) および V100 (7.8TFLOPS、900GB/s) の演算性能/メモリバンド幅の性能比はそれぞれ 0.98 倍/2.13 倍および 2.62 倍/1.99 倍となる。各環境で比較している GCR 法、CA-GMRES 法、CA-PGMRES 法の反復回数はそれぞれ約 1,500 回、約 1,800 回、約 200 回となり、FP16 前処理によって反復回数が一桁削減された。Oakforest-PACS における GCR 法の処理性能を基準として各ソルバの性能を議論すると、富岳ではメモリバンド幅の向上により GCR 法で 1.56 倍の性能向上が得られたが、CA-GMRES 法では省通信化により 1.6 倍に性能向上が拡大した。さらに CA-PGMRES 法では収束特性の向上により 5.53 倍という飛躍的な性能向上が得られた。Summit でも同様の性能向上が確認され、GCR 法、CA-GMRES 法、CA-PGMRES 法でそれぞれ 1.38 倍、1.89 倍、3.53 倍の性能向上が得られた。このように、CA-PGMRES 法は従来の行列解法に比べてハードウェアの性能比を上回る性能向上を示しており、最先端のメニーコア CPU および GPU に基づくエクサスケール計算機である富岳と Summit で共通に適用できるアルゴリズムとして有効性が示された。

### (2) GT5D における多種イオン系モデルの開発と不純物輸送機構の解析 [Idomura, POP2021]

ITER における核燃焼プラズマの性能を予測する上で不純物輸送の理解が必須となっている。従来の不純物輸送解析では新古典理論により記述される衝突性輸送と局所的  $f$  モデルによって記述される乱流輸送を独立に計算し、それらの総和によって不純物輸送を評価してきたが、近年の研究から両者の相互作用の重要性が明らかになってきた。ここで、新古典理論と局所的  $f$  モデルは  $\rho^*$  をオーダーリングパラメータとして大域的 full- $f$  モデルを展開した 0 次、1 次の成分からそれぞれ導かれる。ここで、0 次の新古典理論は磁気ドリフトに起因する衝突性輸送の定常成分を与えるのに対し、1 次の局所的  $f$  モデルでは局所近似を課すことにより磁気ドリフトによる輸送がゼロとなり、ExB ドリフトによる非定常な乱流輸送のみが記述される。この結果、両極



性条件は衝突性輸送  $\Gamma_{s,neo}$  と乱流輸送  $\Gamma_{s,turb}$  でそれぞれ独立に満たされ、 $\sum_s q_s \Gamma_{s,neo} = \sum_s q_s \Gamma_{s,turb}$  が課される。ここで、 $s$  は粒子種、 $q_s$  は電荷を示す。しかしながら、大域的 full-f モデルにおける両極性条件は  $-\sum_s q_s \Gamma_{s,neo} = \sum_s q_s \Gamma_{s,turb}$  となり、径電場  $E_r$  の時間発展が衝突性輸送および乱流輸送とバランスする。ここで、 $E_r$  を介した衝突性輸送と乱流輸送の相互作用の可能性が示唆される。本研究では GT5D を用いてトレーサ不純物を含む ITG 乱流の数値実験を実施し、この点を検証した。この結果、 $E_r$  を介した新たな輸送機構を発見した。図 2 にその概要を示すが、まずパースト的な ITG モードの励起によって非両極性の乱流輸送が駆動され、両極性条件に従って  $E_r$  が急速に成長する。この  $E_r$  による ExB 流はトロイダルプラズマでは圧縮効果があり、上下非対称な摂動密度分布を過渡的に形成する。ここで、摂動密度分布の振幅は全粒子種で共通の ExB 圧縮効果と質量に依存する熱運動による還流電流の競合によって決まるため、質量が大きい高 Z 不純物ほど大きな振幅となる。最後に、この上下非対称な摂動密度分布と磁気ドリフトの結合によって過渡的な新古典輸送が生成される。ここで、非両極性の乱流輸送と過渡的な新古典輸送は逆符号となり、両者の釣り合いによって  $E_r$  の成長が飽和する。また、非両極性の乱流輸送の向きはこのプラズマパラメータにおける ITG モードの特性によって決まるため、過渡的な新古典輸送の向きもそれに対応して一意に決まり、時間平均としても大きな粒子輸送が生成される。この機構をもたらず ExB 圧縮効果は温度には影響しないため、粒子輸送のみを選択的に増大させる。このような粒子のみの選択的輸送は I モードプラズマや摂動磁場印加に伴う密度吐き出し等で観測されており、 $E_r$  が MHD モードや摂動磁場によって形成されれば上記機構がこれらの現象に関係している可能性も示唆される。

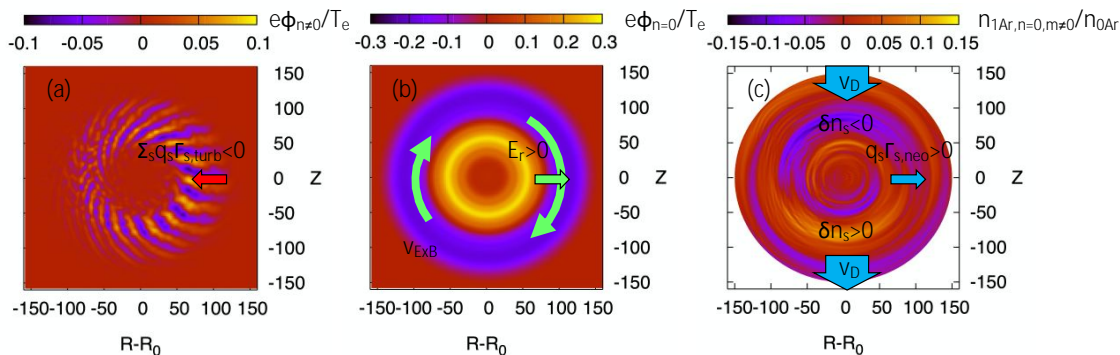


図2: ITG乱流における不純物輸送機構。(a)パースト的なITGモードの励起によって発生する(b)径電場 $E_r$ 、(c)アルゴン不純物の摂動密度分布、および関連する乱流輸送  $\Gamma_{s,turb}$  と新古典輸送  $\Gamma_{s,neo}$  の関係を示す。

### (3) イオン/電子加熱プラズマにおける水素同位体効果の解析 [Idomura, POP2019]

古典的な乱流理論では、水素に比べて原子量  $A$  が 2 倍の重水素の方が軌道半径  $A^{1/2}$  が約 1.4 倍大きくなり、乱流の相関長もそれに比例するため、ジャイロボームスケール  $\rho_{GB} \propto A^{-0.5}$  に従って重水素プラズマの方が乱流輸送が大きくなると予想されるが、実験はそれと逆の結果  $\tau_s \propto A^{0.2}$  を示す。近年の理論的研究から、捕捉電子モード (TEM) 乱流に関しては、TEM の衝突安定化等が議論されてきたが、ITG 乱流の水素同位体効果を再現した例はほとんどなく、その物理機構は長年の未解決課題となっていた。また、ASDEX-U では、プラズマ加熱方式の違いによって水素同位体効果に違いが出ることが示されており、ECRH による電子加熱では水素同位体効果が顕著に現れ、重水素プラズマの閉じ込めが改善するのに対し、NBI によるイオン加熱では水素同位体効果が弱まり、水素プラズマと重水素プラズマでほぼ同じ閉じ込め時間となることが示された。このような ITG 乱流の水素同位体効果とその加熱方式に対する依存性を検証するために、GT5D を用いて水素プラズマと重水素プラズマのイオン/電子加熱数値実験を実施した。最初に、大域的な背景シア流や雪崩現象による非局所的輸送を特徴づける  $\tau_s$  の違いに着目して  $\tau_s$  と  $A$  を独立に変化させたイオン加熱数値実験を実施した。この結果、水素プラズマと重水素プラズマでほぼ同じ閉じ込め時間を再現した。さらに重水素プラズマで  $a$  を変化させた場合と  $a$  を固定して粒子種を水素から重水素に変化させた場合に同様のボームスケール  $\rho_{GB} \propto A^0$  が得られることを示した。これにより、従来は独立な問題として捉えられてきた水素同位体効果と装置サイズスケールが同じ物理効果によって支配されており、大域的乱流解析では閉じ込めスケールのベースラインが局所的乱流理論のジャイロボームスケールからボームスケール

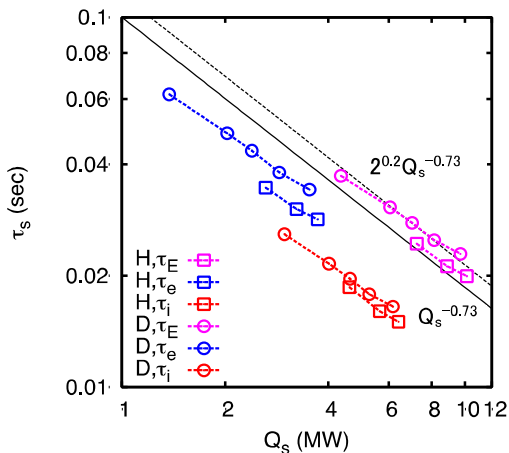


図3: 電子加熱数値実験における水素プラズマ (H, □) と重水素プラズマ (D, ○) のエネルギー閉じ込め時間 ( $\tau_E$ : 全体,  $\tau_i$ : イオン,  $\tau_e$ : 電子) の熱流束  $Q_s$  依存性。黒の実線と破線は H と D の実験的スケールリング  $\tau_{EXP} \propto A^{0.2} Q_s^{-0.73}$  を示す。

に変わることを明らかにした。次に、電子加熱数値実験を実施し、重水素プラズマで閉じ込めが改善する水素同位体効果  $_{GTSD} A^{0.15}$  を再現することに成功した (図 3)。このプラズマでは ITG 乱流が支配的であるが、粒子衝突効果による電子からイオンへのエネルギー移行が水素と重水素で異なることにより、イオン系への実質的な加熱パワーが水素プラズマで増大し、ITG 乱流がより強く駆動されることでバースト的な非局所的輸送が増大していることがわかった。本研究では ITG 乱流の水素同位体効果を加熱方式の依存性まで含めてはじめて再現し、その物理機構を解明することに成功した。この成果をまとめた論文は Physics of Plasmas 誌の featured article に選出された。

#### (4) 電子加熱プラズマにおける不純物輸送の解析

不純物輸送が関連する解析対象として ToreSupra におけるジュール加熱実験の放電初期に観測される LOC-SOC (linear and saturated ohmic confinement) 遷移に着目した。この実験では放電初期の低密度な LOC フェーズではエネルギー閉じ込め時間が単調に増大するが、密度の増大に伴って高密度の SOC フェーズへ遷移するとエネルギー閉じ込め時間が飽和する。LOC フェーズでは炭素不純物の密度が大きく実効電荷が  $Z_{eff}=3.1$  程度となるが、SOC フェーズへの遷移に伴い炭素不純物が吐き出されて実効電荷が  $Z_{eff}=1.3$  程度まで低下する。このような LOC-SOC 遷移に伴う不純物輸送の変化を調べるために LOC フェーズと SOC フェーズの実験データを用いて重水素と炭素不純物を含む電子加熱数値実験を実施した。最初に線形解析を実施し、プラズマ乱流を駆動する支配的な微視的不安定性を確認した。この結果、低密度で電子衝突周波数が小さく、かつ不純物の比率が大きく燃料希釈効果が強い LOC フェーズにおいては TEM 乱流が支配的となり、高密度で燃料純度が高い SOC フェーズでは ITG 乱流が支配的となることがわかった。次に、LOC/SOC フェーズの数値実験を実施した。この結果、エネルギー閉じ込め時間に関しては、LOC/SOC フェーズの実験データのエネルギー閉じ込め時間の比を再現した。また、LOC フェーズの TEM 乱流では電子熱流束が支配的かつイオン熱流束に関しても炭素不純物が無視できない寄与をしているのに対し、SOC フェーズの ITG 乱流では重水素のイオン熱輸送が支配的となることがわかった。粒子輸送に関しては、SOC フェーズでは炭素不純物の寄与は小さく、電子と重水素の小さい両極性輸送が観測されたが、LOC フェーズでは炭素不純物の大きな外向き輸送が観測された。ここで、炉心領域の電子輸送は小さく、炭素不純物の外向き輸送と重水素の内向き輸送が釣り合うイオン混合現象を発見した。今後、この TEM 乱流におけるイオン混合現象の詳細な物理機構の解明に向けて数値実験データの解析をさらに進める。

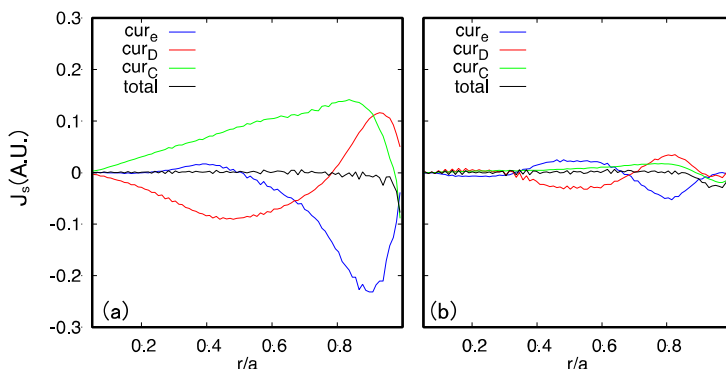


図4: ジュール加熱実験におけるLOC-SOC遷移を模擬した電子加熱数値実験における粒子輸送。図は(a)LOCフェーズおよび(b)SOCフェーズにおける電子、重水素、炭素不純物の径方向電流 $J_s$ の分布を示す。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 C. Kawai, Y. Idomura, Y. Ogawa, H. Yamada	4. 巻 27
2. 論文標題 Self-organization of zonal flows and isotropic eddies in toroidal electron temperature gradient driven turbulence	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 82302
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0027484	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Y. Idomura, T. Ina, Y. Ali, T. Imamura	4. 巻 -
2. 論文標題 Acceleration of Fusion Plasma Turbulence Simulations using the Mixed-Precision Communication-Avoiding Krylov Method	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 SC20: International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis (SC), Atlanta, GA, US, 2020	6. 最初と最後の頁 1318-1330
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-6587/ab0972	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Y. Idomura, K. Obrejan, Y. Asahi, M. Honda	4. 巻 28
2. 論文標題 Dynamics of enhanced neoclassical particle transport of tracer impurity ions in ion temperature gradient driven turbulence	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 12501
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/SC41405.2020.00097	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Y. Idomura, T. Ina, Y. Ali, T. Imamura	4. 巻 -
2. 論文標題 Communication-avoiding Krylov solvers for extreme scale nuclear CFD simulations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of SNA+MC2020	6. 最初と最後の頁 218-224
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Y. Idomura	4. 巻 26
2. 論文標題 Isotope and Plasma Size Scaling in Ion Temperature Gradient Driven Turbulence	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 120703
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5133084	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yuuichi Asahi, Virginie Grandgirard, Yanick Sarazin, Peter Donnel, Xavier Garbet, Yasuhiro Idomura, Guilhem Dif-Pradalier, Guillaume Latu	4. 巻 61
2. 論文標題 Synergy of turbulent and neoclassical transport through poloidal convective cells	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Plasma Physics and Controlled Fusion	6. 最初と最後の頁 65015
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6587/ab0972	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 井戸村泰宏、渡邊智彦、藤堂泰	4. 巻 38
2. 論文標題 核融合プラズマのエクサスケールシミュレーション	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 シミュレーション	6. 最初と最後の頁 79-86
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計25件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 14件)

1. 発表者名 井戸村泰宏、伊奈拓哉、Y. Ali、今村俊幸
2. 発表標題 富岳およびSummitにおける核融合プラズマ流体解析の高速化
3. 学会等名 第34回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Idomura
2. 発表標題 Global Full-f Gyrokinetic Simulations of Isotope Scaling in Ion Temperature Gradient Driven Turbulence
3. 学会等名 4th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 井戸村泰宏、Kevin Obrejan、朝比祐一、本多充
2. 発表標題 イオン温度勾配駆動乱流と新古典粒子輸送の相互作用機構
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Idomura
2. 発表標題 Dynamics of enhanced neoclassical particle transport of tracer impurity ions in ion temperature gradient driven turbulence
3. 学会等名 26th ITPA Transport and Confinement Topical Group Meeting (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Idomura, T. Ina, Y. Ali, T. Imamura
2. 発表標題 Acceleration of Fusion Plasma Turbulence Simulations using the Mixed-Precision Communication-Avoiding Krylov Method
3. 学会等名 SC20 (国際学会)
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 井戸村泰宏
2. 発表標題 核融合プラズマのジャイロ運動論シミュレーション
3. 学会等名 STEシミュレーション研究会2019 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Idomura
2. 発表標題 Computational Challenges Towards Exascale Fusion Plasma Turbulence Simulations
3. 学会等名 9th East-Asia School and Workshop on Laboratory, Space, and Astrophysical Plasmas (EASW9) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Idomura, T. Ina, Y. Ali, T. Imamura
2. 発表標題 Optimization of Fusion Plasma Turbulence Code GT5D on FUGAKU and SUMMIT
3. 学会等名 2nd R-CCS international symposium (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Idomura
2. 発表標題 Status of GT5D
3. 学会等名 Joint US-Japan Workshop on PostK-ECP Collaboration and JIFT Exascale Computing Collaboration (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Obrejan, Y. Idomura, M. Honda
2. 発表標題 Influence of the normalised gyroradius on neoclassical transport in global gyrokinetic simulations using the code GT5D
3. 学会等名 18th European Fusion Theory Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 井戸村泰宏、K.Obrejan、本多充
2. 発表標題 タングステン不純物の大域的新古典輸送解析
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 井戸村泰宏
2. 発表標題 イオン温度勾配駆動乱流における水素同位体効果の解析
3. 学会等名 第36回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Obrejan、井戸村泰宏、本多充
2. 発表標題 大域的ジャイロ運動論的シミュレーションにおける衝突輸送に対する規格化ジャイロ半径の影響
3. 学会等名 第36回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Obrejan、井戸村泰宏、本多充
2. 発表標題 Influence of the normalised ion gyroradius on collisional transport of impurities in GT5D simulations
3. 学会等名 プラズマシミュレーションシンポジウム2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 井戸村泰宏
2. 発表標題 ITG 乱流における水素同位体効果の full-f ジャイロ運動論シミュレーション
3. 学会等名 プラズマシミュレーションシンポジウム2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Idomura
2. 発表標題 Enhancement of neoclassical impurity transport by a geodesic compression effect in full-f gyrokinetic simulations
3. 学会等名 20th ITPA Transport and Confinement Topical Group Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Idomura
2. 発表標題 Computational Challenges Towards Exascale Fusion Plasma Turbulence Simulations
3. 学会等名 13th World Congress in Computational Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 Y. Idomura
2 . 発表標題 Status of GT5D
3 . 学会等名 4th US-Japan Joint Institute for Fusion Theory Workshop on innovations and co-designs of fusion simulations towards extreme scale computing ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Y. Idomura, T. Ina, K. Obrejan, Y. Asahi, S. Matsuoka, T. Imamura
2 . 発表標題 Development of Exascale Fusion Plasma Turbulence Simulations for Post-K
3 . 学会等名 1st R-CCS International Symposium ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Obrejan, Y. Idomura, M. Honda
2 . 発表標題 Introduction of multi-species collision operator in GT5D and its application to heavy impurity transport
3 . 学会等名 Numerical Methods for the Kinetic Equations of Plasma Physics (Numkin2018) workshop ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 K. Obrejan, Y. Idomura, M. Honda
2 . 発表標題 Numerical study of the influence of higher order flows in neoclassical transport of high-Z impurities
3 . 学会等名 24th US-EU Transport Task Force Meeting ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Obrejan, Y. Idomura, M. Honda
2. 発表標題 Numerical study of neoclassical impurity transport using the code GT5D
3. 学会等名 22nd ITPA Transport and Confinement Topical Group Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 井戸村泰宏
2. 発表標題 ポスト京に向けた核融合プラズマ乱流コードのエクサスケール計算技術開発
3. 学会等名 第24回NEXT (数値トカマク) 研究会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 井戸村泰宏、K. Obrejan
2. 発表標題 イオン温度勾配駆動乱流における不純物輸送解析
3. 学会等名 第35回プラズマ・核融合学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 井戸村泰宏、K. Obrejan、朝比祐一、松岡清吉
2. 発表標題 実験解析に向けた準局所的full-fジャイロ運動論シミュレーションの開発
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年



〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	林 伸彦  (Hayashi Nobuhiko)  (10354573)	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   (82502)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
フランス	CEA		