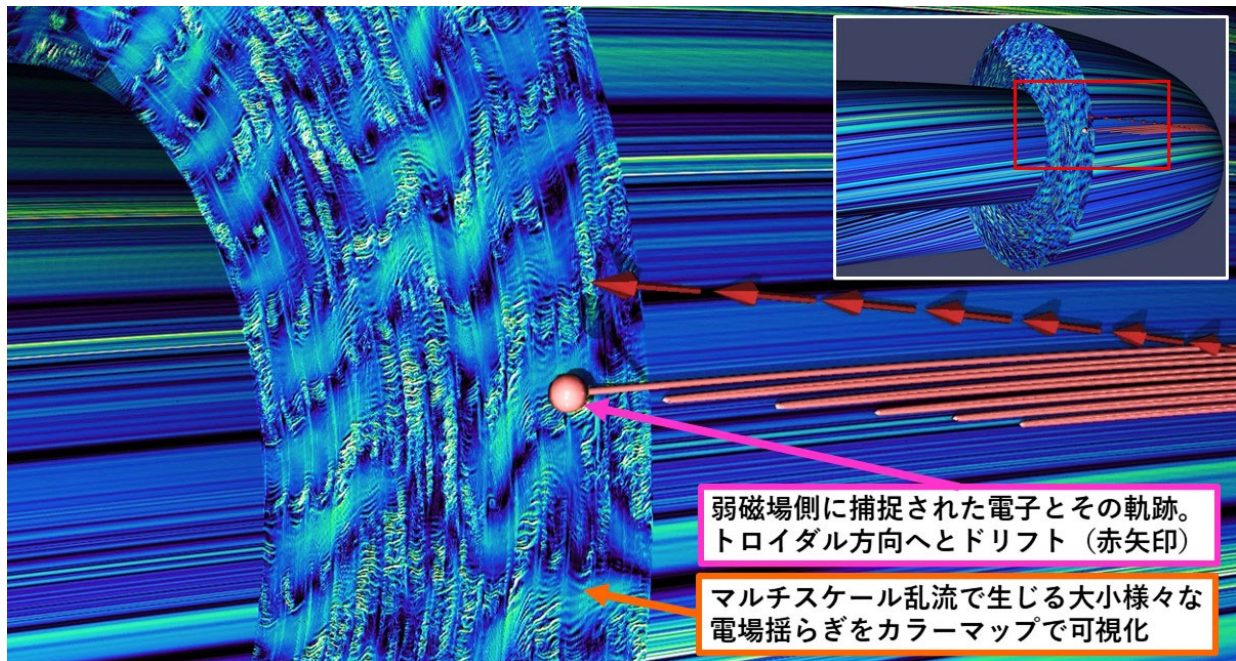




「富岳」により、核燃焼プラズマ閉じ込め改善効果を発見 ～新物理の開拓により核融合炉の実現に貢献～

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の前山 伸也 講師、渡邊 智彦 教授らの研究グループは、核融合科学研究所、日本原子力研究開発機構、京都大学大学院エネルギー科学研究科の研究者らと共同で、スーパーコンピュータ「富岳」^{注1)}を用いた大規模シミュレーションにより、「マルチスケール相互作用」^{注2)}による核燃焼プラズマ^{注3)}閉じ込め改善効果を新たに発見しました。

磁場閉じ込め型核融合炉は、1億度超の高温・高圧のプラズマを強力な磁場により閉じ込め、核融合反応エネルギー^{注4)}を取り出そうという試みで、国際協力の下で盛んに開発が進められています。その中で、閉じ込め性能を左右するプラズマ乱流^{注5)}の物理機構解明は重要な研究課題です。本研究グループは、電子が作る極微細な乱流が、イオンが作る乱流に影響を与える「マルチスケール相互作用」を世界に先駆けて指摘し、米欧の実験装置でも検証が進められてきました。

既存実験を超えた核燃焼プラズマでの新たな閉じ込め改善効果を予見する今回の発見は、将来の核燃焼実験や核融合原型炉開発への貢献が期待されます。

本研究成果は、2022年6月7日付イギリス科学雑誌「Nature Communications」に掲載されました。

本研究は、文部科学省「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」の支援のもとで行われたものです。

【ポイント】

- ・スーパーコンピュータ「富岳」による核燃焼プラズマ乱流シミュレーションを実現。
- ・核燃焼プラズマにおいて働きうる、電子の作る極微細な乱流とイオンが作る乱流のマルチスケール相互作用を特定。
- ・核融合炉性能向上への貢献が期待される、プラズマ閉じ込め改善効果を新たに発見。

【研究背景と内容】

○研究の背景

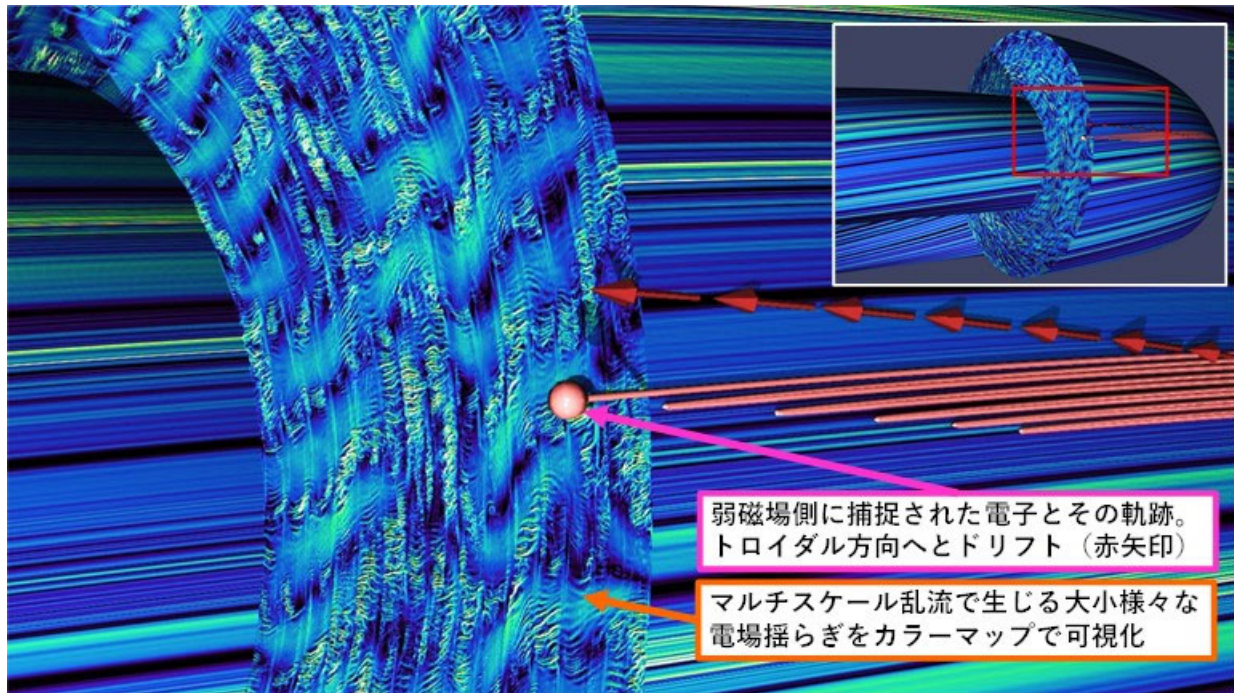
磁場閉じ込め型核融合炉は、超電導コイルによって円環状の強力な磁場（～5T）を作り、高温・高圧のプラズマを閉じ込める装置です。水素同位体である重水素イオンや三重水素イオンを 1 億度超の高温で維持することで核融合反応を引き起こし、そこからエネルギーを取り出そうという試みです。これまでに、日米欧の実験装置で加熱入力エネルギーと核融合出力エネルギーが等しくなるブレーク・イーブン条件を達成しています。現在、核融合炉の工学的実証に向けて 10 倍以上のエネルギー増倍率を目指した国際熱核融合実験炉 ITER の開発が国際協力の下で進められています。

核融合プラズマ中では、急峻な密度・温度勾配によって生じる乱流がプラズマ閉じ込め性能を劣化させてしまう問題が知られています。プラズマ乱流の起源として、磁場中のイオン・電子のジャイロ半径^{注6)}に応じて、それぞれに特徴的な大・小異なるスケールの不安定性が存在します（イオン：～1cm、電子：～0.1mm 程度）。従来は、階層分離されると考えられてきたこれら異なるスケールの乱流について、本研究グループをはじめとする近年の数値シミュレーション研究からは、両者の間のマルチスケール相互作用が存在し、プラズマ閉じ込め性能に影響を与えうることが示されていました。これは従来の単一スケール乱流描像を超えた新たなマルチスケール乱流物理を開拓する現象として、プラズマ物理学上も興味深い研究対象です。米欧の大型装置実験からも、プラズマ乱流マルチスケール相互作用の存在を支持する結果が報告されており、世界的に検証の機運が高まりつつあります。

一方で、現在建設が進められる ITER や今後の核融合原型炉開発を見据えると、将来の核燃焼プラズマは電子、重水素・三重水素燃料イオン、ヘリウム核燃焼灰などから構成される多粒子種混合プラズマであること、核融合生成アルファ粒子^{注7)}による電子加熱が支配的な高電子温度プラズマであることといった、既存実験装置とは異なるプラズマパラメータで特徴づけられます。将来の核燃焼プラズマにおいてもマルチスケール相互作用が働きうるか否かを明らかにすることは、プラズマ閉じ込め性能の外挿性・予測性を議論していく上で重要な物理課題であり、スーパーコンピュータ「富岳」の持つ高い演算性能・豊富な並列計算性により、今まさに挑戦できるようになってきました。

○スーパーコンピュータ「富岳」を用いた核燃焼プラズママルチスケール乱流シミュレーション

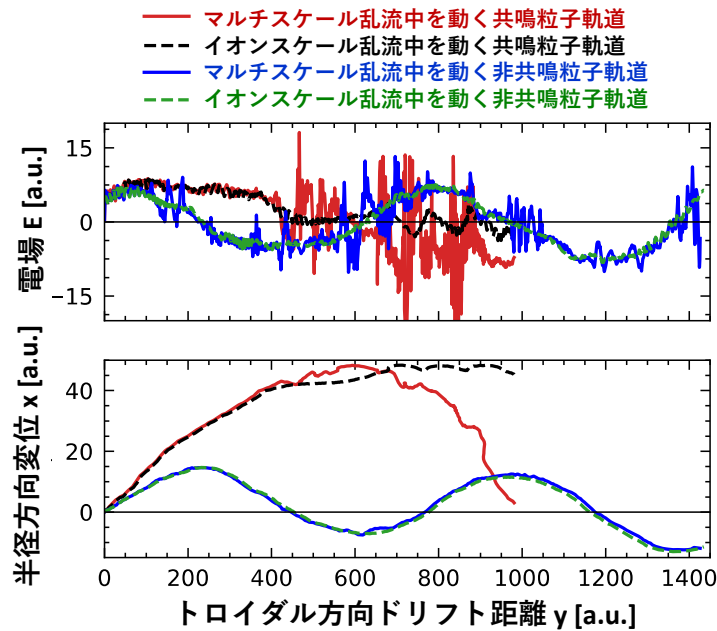
本研究では、名古屋大学・核融合科学研究所・日本原子力研究開発機構・京都大学などが共同で開発を進めてきたジャイロ運動論的シミュレーションコード GKV^{注8)}を用いました。核燃焼プラズマを想定した高電子温度・多粒子種混合プラズマにおけるマルチスケール乱流シミュレーションを「富岳」上で実行しました。シミュレーションでは、比較的大きなイオンスケールの乱流揺らぎと、極微細な電子スケールの揺らぎが共存している様子が見て取れます（図1）。



Credit: Maeyama, et al., Nature Communications (2022) より、一部改変。

図1：マルチスケールプラズマ乱流シミュレーションの3次元可視化。トーラス形状の核融合プラズマの断面（右上縮小図）を拡大し、色でマルチスケール乱流中の電場揺らぎを表している。併せて、イオンスケール乱流と関与する捕捉電子の軌道を描画している。

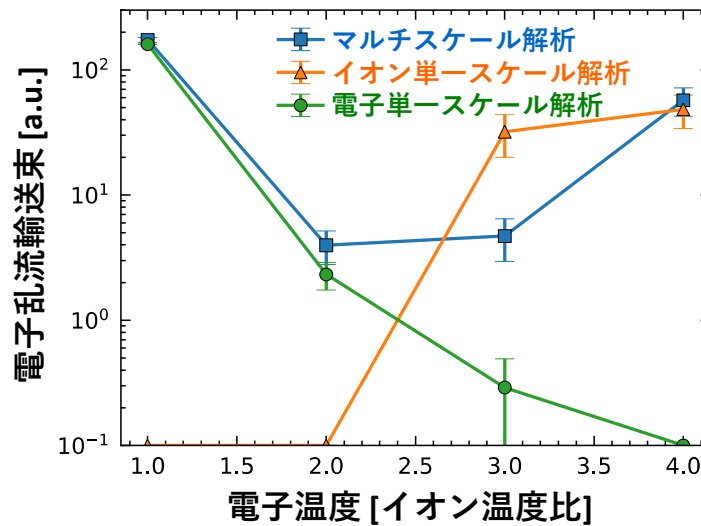
今回解析したケースでは、イオンスケールの揺らぎを作り出す不安定性において、弱磁場側を運動する捕捉電子^{注9)}との粒子・波動共鳴^{注10)}が重要となることが分かりました。この共鳴粒子の軌道をマルチスケール乱流場中でも解析したところ、電子スケール乱流が作り出す極微細な電場揺らぎによって共鳴粒子軌道が乱され、時に大きな半径方向変位のずれを生むことが明らかになりました（図2）。



Credit: Maeyama, et al., Nature Communications (2022) Fig. 2 より、一部改変。

図 2：捕捉電子の軌道の比較。共鳴速度をもつ粒子はイオンスケール乱流の伝搬とともに移動するため、一定方向の電場を受け続け、結果的に半径方向へ大きく変位する（黒線）。一方、マルチスケール乱流場中では、電子スケール乱流の作る微細な電場構造（図中では急峻な電場のスパイクとして現れる）により、共鳴粒子の軌道が乱されている（赤線）。

こうしたマルチスケール相互作用が正味の乱流輸送束^{注 11)}にどの程度影響を及ぼすか、また、高電子温度となる将来の核燃焼プラズマで影響しうるかを明らかにするために、乱流輸送束の電子温度依存性を解析しました（図 3）。この際、従来のイオンまたは電子単一スケールシミュレーションと比較を行いました。その結果、電子温度が高くなるにつれて電子スケール乱流の寄与は減少していき、逆にイオンスケール乱流の寄与は増大していくという、線形理論と一致する傾向が得られました。さらに興味深いことに、両者が共存する電子温度領域では、電子スケール乱流が作り出す極微細な電場揺らぎがイオンスケール不安定性を乱すことで、イオンスケール乱流を抑制する働きがあることが分かりました。マルチスケール相互作用を介して、電子スケール乱流をもってイオンスケール乱流を制する状況が存在することが発見されたのです。



Credit: Maeyama, et al., Nature Communications (2022) Fig. 6 より、一部改変。

図 3：電子乱流輸送束の電子温度依存性。電子・イオン温度比 3 付近では、マルチスケール解析においてイオン単一スケール解析よりも低い乱流輸送束が得られており、マルチスケール相互作用によるプラズマ閉じ込め改善を意味している。

【成果の意義】

今回の成果を含む研究グループの一連の研究は、スケールが離れた乱流の間の相互阻害性という新たなプラズマ物理学的知見を示唆しています。また、核融合工学の観点からは、核燃焼プラズマで想定される電子・イオン温度比 1 を超える高電子温度領域でも電子スケール乱流が影響を与えうること、特に、電子スケール乱流によるイオンスケール乱流の安定化により、乱流輸送束が低減されるパラメータ領域が存在することを明らかにしました。これは、マルチスケール相互作用によるプラズマ閉じ込め性能改善の可能性を世界で初めて指摘した成果であり、将来の核燃焼プラズマ実験や核融合原型炉開発への貢献が期待されます。

本研究は、文部科学省「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」(JPMXP1020200103)の一環として実施されたものです。また、本研究の一部は、スーパーコンピュータ「富岳」の計算資源の提供を受け、実施しました(課題番号: hp200127, hp210178)。加えて、日本学術振興会科学研究費の支援(前山:JP20K03892)、および、学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点の支援(朝比:jh210049-NAH)を受けました。また、計算の一部は、原型炉設計合同特別チーム共同研究、核融合科学研究所共同研究(渡邊:NIFS20KNST162、前山:NIFS21KNST181)の下、JFRS-1(IFERC-CSC)およびプラズマシミュレータ(核融合研)の計算資源の提供を受け、実施しました。

【用語説明】

注 1) スーパーコンピュータ「富岳」:

「京」の後継として開発された日本のフラグシップスーパーコンピュータ。令和 2 年 6 月から令和 3 年 11 月にかけてスーパーコンピュータの性能ランキング 4 部門で 4 期連続第 1 位を獲得するなど、世界最高峰の性能を持つ。

注 2) マルチスケール相互作用：

スケール（時間の長さや空間の大きさ）が異なる現象の間に生じる相互作用。本文中では特に、イオンのジャイロ半径程度の大きさを持つイオンスケール乱流と、電子のジャイロ半径程度の大きさを持つ電子スケール乱流との相互作用を指す。

注 3) 核燃焼プラズマ：

磁場閉じ込め型核融合装置において、閉じ込められたプラズマが十分に高温・高密度状態で維持され、核融合反応が起こっている状態のこと。

注 4) 核融合反応エネルギー：

二つの原子核が融合し、一つの原子核になる反応を核融合反応という。水素などの軽い原子核同士の核融合反応では質量がわずかに減少し、エネルギーに変わる。

注 5) プラズマ乱流：

流速や圧力が不規則に変動する流れを乱流という。プラズマ中では、電磁場の揺らぎがプラズマの不規則な流れを作り、乱流として発達する。

注 6) ジャイロ半径：

運動する荷電粒子は磁場により曲げられ、磁場に垂直方向に旋回する。この旋回運動をジャイロ運動またはサイクロトロン運動といい、その半径を Larmor 半径またはジャイロ半径という。

注 7) 核融合生成アルファ粒子：

重水素と三重水素の核融合反応により生成される高エネルギーのヘリウム原子核のこと。

注 8) ジャイロ運動論的シミュレーションコード GKV：

プラズマ乱流を記述する第一原理的理論として知られるジャイロ運動論に基づくプラズマ乱流シミュレーションコード。GitHub 上でオープンソースコードとして公開されており、名古屋大学が中心となって機能拡張が進められている。

注 9) 捕捉電子：

荷電粒子は磁気ミラー力と呼ばれる弱磁場側に向かう力を感じ、その影響は荷電粒子の速度ベクトルと磁場ベクトルのなす角（ピッチ角）で特徴づけられる。ピッチ角の大きな粒子は磁場が強い領域に近づくと反射され、弱磁場側を往復運動する。これを捕捉粒子という。

注 10) 粒子・波動共鳴：

波動が伝わる位相速度と同程度の速度で運動する荷電粒子は、波動と効果的にエネルギーをやり取りする。これを粒子・波動共鳴という。

注 11) 乱流輸送束：

電磁場の揺らぎが作る流れが正味の熱輸送を作るには、プラズマ中の熱揺らぎとの相関が必要である。ちょうど高温の揺らぎを外側へ、低温の揺らぎを内側へ伝えるような流れが発生したとき、内外の実効的な熱のやり取りが生じ、これを乱流（熱）輸送束という。

【論文情報】

雑誌名：Nature Communications

論文タイトル：Multi-scale turbulence simulation suggesting improvement of electron heated plasma confinement

著者：前山伸也、渡邊智彦、仲田資季、沼波政倫、朝比祐一、石澤明宏

※本学関係教員は下線

DOI：10.1038/s41467-022-30852-0

URL：<https://www.nature.com/articles/s41467-022-30852-0>