

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 7 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420861

研究課題名(和文)ペタスケール乱流シミュレーションによる異常輸送の同位体効果に関する研究

研究課題名(英文)Study of isotope effects on anomalous transport based on peta-scale turbulence simulations

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・研究主幹

研究者番号：00354580

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,800,000円

研究成果の概要(和文)：Full-fジャイロ運動論シミュレーションの新しい運動論的電子モデルを開発した。水素プラズマと重水素プラズマにおけるイオン温度勾配駆動(ITG)乱流及びイオン温度勾配駆動捕捉電子モード(ITG-TEM)乱流の数値実験を実施し、プラズマ閉じ込めの同位体効果を解析した。断熱的電子モデルのITG乱流では、装置サイズ依存性を通して間接的な同位体効果が確認できるが、質量依存性は再現できないことがわかった。運動論的電子モデルのITG-TEM乱流では捕捉電子モードの衝突安定化効果として質量依存性が現れるが、数値実験では実験的な質量依存性を説明できるほどの効果は確認できなかった。

研究成果の概要(英文)：A new kinetic electron model is developed for full-f gyrokinetic simulations. Isotope effects on plasma confinement are analyzed by conducting numerical experiments of ion temperature gradient driven (ITG) turbulence and ion temperature gradient driven trapped electron mode (ITG-TEM) turbulence in hydrogen and deuterium plasmas. It is found that in ITG turbulence with adiabatic electrons, isotope mass dependency is not reproduced, while an indirect plasma size effect is confirmed through plasma size dependency. In ITG-TEM turbulence with kinetic electrons, isotope mass dependency appears as a collisional stabilization effect on trapped electron modes. However, its impact on numerical experiments is not large enough to explain experimental isotope mass dependency.

研究分野：核融合プラズマ乱流シミュレーション

キーワード：ジャイロ運動論 トカマク ITER プラズマ乱流 同位体効果 異常輸送

1. 研究開始当初の背景

ITERにおける核燃焼プラズマの閉じ込め性能を評価する上で、異常輸送の同位体効果が重要な課題となっている。最近のJT-60U実験データにおいて、水素プラズマと重水素プラズマの閉じ込め性能とプラズマ分布の詳細な比較が行われ、1)ほぼ相似な密度・温度分布の水素プラズマは重水素プラズマの約2倍(半分)のイオン熱輸送係数(エネルギー閉じ込め時間)を示すこと、2)同一の加熱パワーの水素プラズマは重水素プラズマより2割程度低い温度勾配を示すことが系統的な加熱パワーのスキャンによって示された。しかしながら、その物理機構は明らかになっていない。例えば、乱流場の相関長をラーマー半径 ρ_i ($M^{0.5}$)、相関時間を音速 $c_s = (T_e/m_i)^{0.5}$ ($M^{0.5}$)とプラズマ半径の比 c_s/a としてランダムウォークによる拡散を仮定すると得られるジャイロボーム則の拡散係数 $\sim \rho_i^2 c_s/a$ は最も基本的な乱流輸送モデルであるが、その質量比 $M = m_i/m_H$ (m_i :イオン質量、 m_H :水素イオン質量)に対する依存性は $M^{0.5}$ となり、重水素プラズマの閉じ込めが悪い、すなわち、実験とは逆の特性を予測する。一方、Lモードプラズマの実験的な閉じ込め時間スケール $\tau_{ion} \sim M^{1.67} P_{in}^{-1.85} M^{0.75}$ (ρ_i/a :規格化ラーマー半径)においては、ボーム則 $\tau_{ion} \sim B^{-2}$ に近い τ_{ion} 依存性に加えてM依存性が存在し、重水素プラズマは水素プラズマの約1.7倍の閉じ込め時間となる。この依存性は実験と定性的に一致するが、M依存性の物理機構は依然として明らかになっていなかった。

同位体効果は理論的には様々な要因と関連している。 τ_{ion} の変化がもたらす乱流輸送のプラズマサイズ依存性は、プラズマの密度・温度分布が決める反磁性回転シア、あるいは、平衡径電場による $E \times B$ 回転シアといったシア回転による乱流抑制効果が本質的であることがわかってきた。一方、閉じ込め時間スケールにおける強いM依存性の理論的背景は未解明であった。以上のような背景から、本研究では τ_{ion} 依存性とM依存性、両方の完全な取り扱いを可能とする大域的乱流シミュレーションによって同位体効果の検証に取り組んだ。

2. 研究の目的

(1) ITG乱流における同位体効果

断熱的電子モデルを用いたイオン温度勾配駆動(ITG)乱流の数値実験により同位体効果を検証する。

(2) 運動論的電子モデルの開発

イオン温度勾配駆動捕捉電子モード(ITG-TEM)乱流の計算を可能とする運動論的電子モデルを開発する。

(3) ITG-TEM乱流における同位体効果

運動論的電子モデルを用いたITG-TEM乱流の数値実験により同位体効果を検証する。

3. 研究の方法

(1) ITG乱流における同位体効果

full-f ジャイロ運動論コードGT5Dを用いて水素プラズマと重水素プラズマにおけるITG乱流の数値実験を実施する。ここで、 ρ_i/a とMを独立に変化させることによって、ITG乱流の閉じ込め時間スケールにおける τ_{ion} 依存性とM依存性を明らかにする。

(2) 運動論的電子モデルの開発

同位体効果への電子系乱流の影響を調べるために、GT5Dにおける運動論的電子モデルを開発する。モデル開発にあたっては、運動論的電子を含む静電的モデルで問題となる高周波ノイズの回避手法を構築する。

(3) ITG-TEM乱流における同位体効果

運動論的電子モデルを拡張したGT5Dを用いて水素プラズマと重水素プラズマにおけるITG-TEM乱流の数値実験を実施する。これにより電子・イオン質量比として陽に現れるM依存性を検証する。

4. 研究成果

(1) ITG乱流における同位体効果

GT5Dを用いて $(M, 1/\rho_i/a) = (2, 225), (2, 150), (1, 212)$ という3種類のプラズマパラメータの数値実験において加熱パワーのスキャンを実施し、図1に示す閉じ込め時間スケールを得た。加熱パワー P_{in} を増大すると閉じ込め時間 τ_{ion} が減少する依存性が見られるが、同位体質量や規格化装置サイズに依存せず、実験的なスケール則 $\tau_{ion} \sim P_{in}^{-0.73}$ に近い依存性が得られることがわかった。また、矢印でつながれた3点ではほぼ相似な温度分布が得られているが、これらの点における閉じ込め時間の評価から $\tau_{ion} \sim M^{1.05} P_{in}^{-2.29} M^{-0.1}$ というスケールが得られた。上記のLモードプラズマの実験的スケールに比べると、ボーム則 $\tau_{ion} \sim B^{-2}$ に近い τ_{ion} 依存性は数値実験で再現できているが、M依存性が弱いことがわかった。断熱的電子モデルのジャイロ運動論方程式を規格化すると、M依存性は衝突演算子のみに陽に現れるが、十分に不安定なパラメータ領域のITG乱流では衝突効果の影響が弱く、同位体効果のM依存性を再現できないことがわかった。

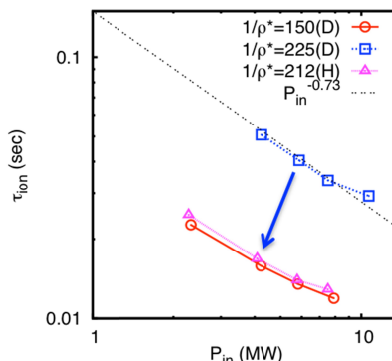


図1 規格化装置サイズ $1/\rho_i/a$ が異なる水素プラズマ(H)、及び、重水素プラズマ(D)における閉じ

込め時間 τ_{ion} の加熱パワー P_{in} 依存性。

(2) 運動論的電子モデルの開発

断熱的電子モデルでは同位体効果を再現できないという結果を受けて、当初の研究計画には含まれていなかった運動論的電子モデルの開発を実施した。GT5D は静電的モデルを採用しているが、静電的モデルで運動論的電子を計算すると、アルフベン波の静電的極限で発生する高周波ノイズの存在によって、時間ステップ幅が制限され計算コストが増大するという問題がある。この高周波ノイズは通過電子によって励起されるのに対し、解析対象である低周波乱流は捕捉電子によって励起される。この特徴を利用し、捕捉電子のみを運動論モデルで計算する捕捉電子モデルが従来開発されていたが、このモデルでは速度空間における通過電子と捕捉電子の境界条件を適切に取り扱えず、電子の衝突演算子や関連する保存則を正しく計算できないという問題があった。この問題を解決するために、本研究では新たなハイブリッド電子モデルを開発した。このモデルでは、捕捉電子と通過電子の両方の運動論方程式、衝突演算子を矛盾なく計算するが、乱流場の計算において通過電子の断熱的応答と捕捉電子の運動論的応答を用いる。これにより、電子の衝突性輸送現象や捕捉電子モードを正しく計算しつつ、高周波ノイズを回避することが可能になった(図2)。

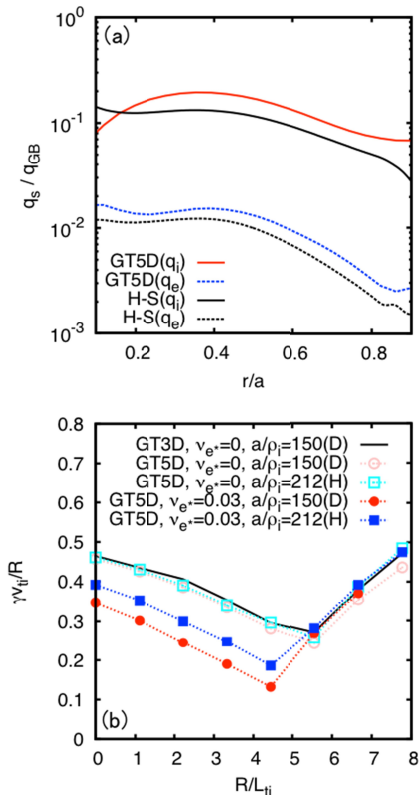


図2 ハイブリッド電子モデルを用いたベンチマーク計算。(a)衝突性熱輸送のGT5Dと理論(H-S)の比較。(b)ITG-TEM成長率のイオン温度勾配 R/L_{ti} 依存性のGT5Dと粒子コードGT5D比較。温度勾配の減少により不安定モードがITGからTEMに遷移し、TEMは衝突効果により安定化される。

(3) ITG-TEM乱流における同位体効果

図2(b)に示すように捕捉電子モードはイオン-電子間の衝突効果によって安定化される。これは捕捉電子モードを励起する捕捉電子軌道が衝突効果によって散乱されるためである。この安定化効果は捕捉電子モードの成長率を特徴付ける周回周波数 v_{ti}/R (v_{ti} :熱速度、 R :トーラス半径)とイオン-電子衝突周波数 ν_{ei} の比で決定される。図2(b)では水素プラズマと重水素プラズマでこの安定化効果の比較を行ったが、電子とイオンの質量比が大きい重水素プラズマでより強い安定化効果が存在することを確認した。

この線形解析結果を背景として、ITG-TEM乱流の数値実験を実施した。数値実験では同位体効果を観測したJT-60U実験データを用い、計算コスト削減のために装置サイズを1/2にスケールした。図3は同じプラズマ半径、加熱パワーの水素プラズマと重水素プラズマにおける数値実験で観測した温度分布を示す。捕捉電子が多く分布する周辺プラズマ領域において、重水素プラズマの電子温度勾配が大きくなり、さらにイオン-電子間の衝突相互作用がもたらすエネルギー移行によりイオン温度勾配も高く維持されることがわかった。この結果は、捕捉電子モードの衝突安定化に関係していると考えられる。大域的な温度分布は臨界安定な温度勾配パラメータ付近に拘束される分布硬直性を示すため、周辺温度勾配の違いが炉心温度に影響することを確認した。しかしながら、エネルギー閉じ込め時間に関しては上記の実験的スケールで観測されたM依存性を説明できるほどの違いが見られなかった。今回の解析により同位体効果における周辺プラズマの重要性が確認できたため、今後、境界条件の改良や周辺プラズマの乱流輸送を含む数値実験に取り組む。

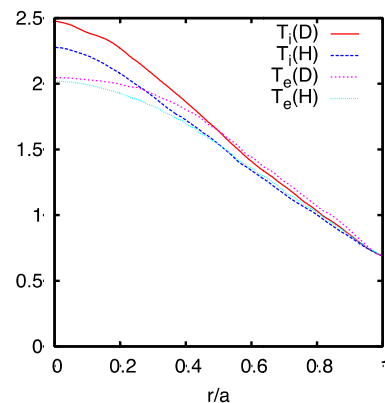


図3 JT-60U実験データを1/2規模にスケールしたパラメータを用いた水素プラズマ(H)と重水素プラズマ(D)におけるITG-TEM乱流の数値実験で観測した温度分布(時刻 $t v_{ti}/R=1600$)の比較。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計2件)

Y. Idomura, "Saturation mechanism of decaying ion temperature gradient driven turbulence with kinetic electrons", Plasma and Fusion Research, 査読有, 11, 2403006 (2016), doi: 10.1585/pfr.11.2403006.

Y. Idomura, "A new hybrid kinetic electron model for full-f gyrokinetic simulations", Journal of Computational Physics, 査読有, 313, 511-531, (2016), doi: 10.1016/j.jcp.2016.02.057.

[学会発表](計22件)

Y. Idomura, "Development of Gyrokinetic Toroidal 5D full-f Eulerian code GT5D on Helios and K-computer", The 5th IFERC-CSC Review Meeting, 2017年3月22日, 量子科学技術研究開発機構(青森県・六ヶ所村).

井戸村泰宏, "イオン温度勾配駆動捕捉電子モード乱流の電子変調加熱数値実験", 日本物理学会第72回年次大会, 2017年3月17日~20日, 大阪大学(大阪府・吹田市).

Y. Idomura, "Progress of full-f gyrokinetic simulations including kinetic electrons", 13th Asia Pacific Physics Conference (APPC13) (招待講演), 2016年12月4日~8日, ブリスベン(オーストラリア).

井戸村泰宏, "ITG-TEM乱流の電子変調加熱数値実験における粒子輸送と運動量輸送の解析", 第33回プラズマ・核融合学会年会, 2016年11月29日~12月2日, 東北大学(宮城県・仙台市).

Y. Idomura, "Full-f gyrokinetic simulations on rotation changes induced by electron heating modulation", 17th ITPA Transport and Confinement Topical Group Meeting, 2016年10月24日~26日, 量子科学技術研究開発機構(茨城県・那珂市).

Y. Idomura, Y. Asahi, N. Hayashi, H. Urano, "Full-f gyrokinetic simulation including kinetic electrons", 26th IAEA Fusion Energy Conference, 2016年10月17日~22日, 国立京都国際会館(京都府・京都市).

Y. Idomura, "Full-f gyrokinetic simulations on rotation changes induced by electron heating modulation", 21st EU-US Transport

Task Force Meeting, 2016年9月5日~8日, レザン(スイス).

Y. Idomura, Y. Asahi, T. Ina, S. Matsuoka, "Computational challenges towards Exa-scale fusion plasma turbulence simulations", 24th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (ICTAM2016) (招待講演), 2016年8月22日~26日, モントリオール(カナダ).

Y. Idomura, "Status of the GT5D total-f continuum simulation", US-Japan Joint Institute for Fusion Theory Workshop on Innovations and co-designs of fusion simulations towards extreme scale computing, 2016年8月18日~19日, オークリッジ(米国).

井戸村泰宏, "イオン温度勾配駆動乱流の運動量輸送における運動論的電子の影響", 日本物理学会第71回年次大会, 2016年3月19日~22日, 東北学院大学(宮城県・仙台市).

井戸村泰宏, "イオン温度勾配駆動捕捉電子モード乱流における臨界温度勾配と径電場形成", 第32回プラズマ・核融合学会, 2015年11月24日~27日, 名古屋大学(愛知県・名古屋市).

Y. Idomura, "Saturation mechanism of ion temperature gradient driven trapped electron mode turbulence", 25th International Toki Conference (ITC-25), 2015年11月3日~6日, セラトピア土岐(岐阜県・土岐市).

Y. Idomura, "Testing momentum transport theories on full-f gyrokinetic simulations", 15th ITPA Transport and Confinement Topical Group Meeting, 2015年10月22日~23日, ガルヒンク(ドイツ).

Y. Idomura, "Full-f gyrokinetic simulation including kinetic electrons", 15th H-mode workshop, 2015年10月19日~21日, ガルヒンク(ドイツ).

井戸村泰宏, "Full-f ジャイロ運動論シミュレーションにおける運動論的電子モデルの開発", 日本物理学会2015年秋季大会, 2015年9月16日~19日, 関西大学(大阪府・吹田市).

Y. Idomura, "Full-f gyrokinetic simulations at the Exa-scale", US-Japan Joint Institute for Fusion Theory Workshop on Innovations and co-designs of fusion simulations towards extreme scale computing, 2015年8月20日~21日, 名古屋大学(愛知県・名古屋市).

Y. Idomura, S. Maeyama, M. Nakata, M.

Nunami, A. Ishizawa, T.-H. Watanabe, "Optimization of extreme scale fusion plasma turbulence code for improved strong scaling toward million cores", The ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2015 (招待講演), 2015年7月26日～31日, ソウル(韓国).

Y. Idomura, "Isotope effects in ion temperature gradient driven turbulence", PLASMA Conference 2014, 2014年11月18日～21日, 朱鷺メッセ(新潟県・新潟市).

Y. Idomura, "Interactions between neoclassical effects and turbulence in toroidal momentum transport, and comparison between flux driven and gradient driven simulations", 19th Joint EU-US Transport Task Force Meeting (招待講演), 2014年9月8日～11日, カラム(英国).

Y. Idomura, "Extreme scale fusion plasma simulations for ITER", 2014 Smoky Mountains Computational Sciences and Engineering Conference and U.S./Japan Exascale Applications Workshop, 2014年9月5日～6日, ガトリンバーグ(米国).

⑳ 井戸村泰宏, "イオン温度勾配駆動乱流の装置サイズ・加熱パワー・同位体依存性", 平成26年度閉じ込め・輸送研究会「高自律燃焼プラズマ中の輸送の理解に向けたトロイダルプラズマにおける閉じ込め・輸送の体系的研究」(招待講演), 2014年7月17日～18日, 核融合科学研究所(岐阜県・土岐市).

㉑ Y. Idomura, "Extreme scale fusion plasma simulations for ITER", Extreme Performance Computational Science French-Japanese Conference, 2014年4月14日, フランス大使館(東京都・港区).

6. 研究組織

(1) 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・研究主幹

研究者番号: 00354580