

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：63902

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26820401

研究課題名（和文）第一原理乱流シミュレーションによる核燃焼プラズマ中の燃料・不純物輸送研究

研究課題名（英文）First-principle based gyrokinetic simulation studies on turbulent transport of fuel and impurity ions in burning plasmas

研究代表者

仲田 資季 (Nakata, Motoki)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教

研究者番号：40709440

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）：本研究では核融合プラズマの第一原理モデルである5次元ジャイロ運動論に基づいた多粒子種乱流シミュレーションにより、核融合炉炉心プラズマ中の燃料および不純物輸送過程の解析を実施した。複数のイオン種で構成される燃焼プラズマの解析を実現する多粒子種シミュレーションモデルを開発し、それらを活用した大規模数値シミュレーションを実施した。一連の研究により、トカマク実験データとの比較によるシミュレーションコードの予測精度の検証が進展するとともに、乱流を駆動する微視的不安定性に対する水素同位体質量の依存性や、燃焼プラズマ乱流における燃料イオンおよびヘリウム灰の輸送特性に関する理論的解明が進展している。

研究成果の概要（英文）：Multi-species turbulent transport of fuel and impurity ions in fusion burning plasmas is explored by means of the first-principle-based five-dimensional gyrokinetic simulations. Towards the burning plasma, which is composed of several kinds of ions, a multi-species simulation model including inter-species collisions is developed, where the verification and validation studies for the prediction capability of the simulation code are carried out. The turbulence simulation studies with the extended multi-species model made a significant research progress through the clarifications of the hydrogen isotope mass dependence of the microinstabilities, and of the transport properties of fuel ions and helium-ash in burning plasma turbulence.

研究分野：プラズマ物理学

キーワード：プラズマ 核融合 ジャイロ運動論 乱流 不純物輸送

1. 研究開始当初の背景

国際熱核融合炉(ITER)において持続的な燃焼状態を有する燃焼プラズマを実現するためには、核融合反応の燃料となる重水素および三重水素イオンの閉じ込めに加え、反応から生じるヘリウム灰や壁などのプラズマ対向機器に由来する金属不純物イオン等の効果的な排気が不可欠となる。なかでも、プラズマ中の乱流現象は熱や粒子の閉じ込め性能を劣化させる重大な要因であるため、燃料イオンやヘリウム灰などの不純物イオンの乱流輸送過程を理論的および実験的に解明することが喫緊の課題となっている。

2. 研究の目的

本研究は、核融合プラズマの第一原理モデルである5次元ジャイロ運動論に基づいた多粒子種乱流シミュレーションにより炉心プラズマ中の燃料および不純物輸送過程の解析を行う。乱流輸送方向やフラックス強度の定量予測に加え、不純物が乱流構造や燃料イオン閉じ込めに影響を及ぼす際の物理機構を明らかにすることにより、燃料輸送の制御方法や不純物排気手法構築の可能性を探索する。

3. 研究の方法

研究代表者らがこれまで開発を行ってきた5次元ジャイロ運動論シミュレーションコードGKVに対して、燃焼プラズマを構成する多粒子種の取扱いを可能とする拡張を施し、イオンジャイロ半径程度の空間スケールを伴うイオン温度勾配(ITG)乱流あるいは捕捉電子モード(TEM)乱流に対する大規模数値シミュレーションを実施する。得られた乱流輸送フラックスのパラメータ依存性の解析や、乱流を抑制する効果を持つゾーナルフローの生成に関する解析を行い、多粒子種乱流輸送過程の解明を目指す。

4. 研究成果

(1) 多粒子種乱流シミュレーションモデルへの拡張と動作検証

平成26年度において、まず多粒子種乱流シミュレーションモデルの構築および高精度化を実施した。燃料同位体や不純物の乱流輸送レベルを予測するには、異種粒子種間衝突過程を正確に取り扱う必要があり、研究代表者らが開発を進めている乱流コードGKVに実装されていた簡約的な同種粒子衝突モデルを多粒子種衝突モデルへと拡張した。さらに、衝突計算に関わる数値誤差を軽減する手法を新たに考案し、時空間スケールの離れたイオン-電子間衝突においても高い精度で粒子・運動量・エネルギーの保存特性が維持されることが確認された。図1(a)および1(b)は新たに考案された衝突モデルを用いたプラズマ中の温度緩和シミュレーションの結果を示してい

る。従来の簡約化モデルでは、保存特性に関する数値誤差の蓄積に伴い、複数のイオン種と電子の間の緩和過程が正しくできていなかったが、新たに考案されたモデルでは健全な物理的振る舞いを再現することに成功している。これらにより、燃焼プラズマ乱流解析に必要な不可欠なシミュレーション基本モデルの開発が完了した。

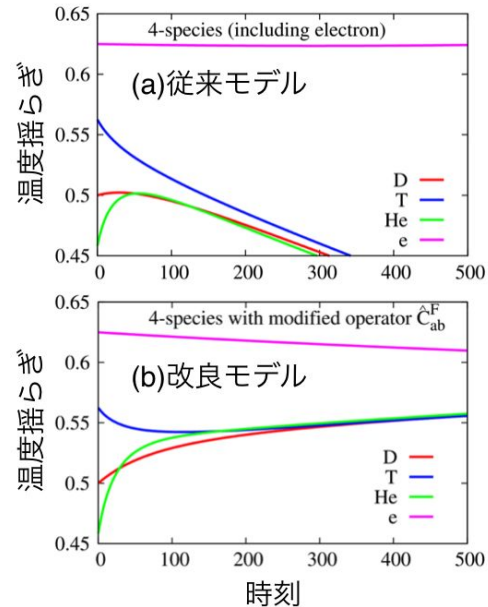


図1: 多粒子種プラズマ中の温度緩和。

(2) JT-60Uトカマク実験データに基づく乱流シミュレーションコードの予測精度検証

拡張されたシミュレーションモデルを用いて、実際のJT-60Uトカマク実験データに基づいた乱流輸送シミュレーション解析を実施し、イオンおよび電子熱輸送レベルに関するシミュレーションコードの定量予測性能の検証を行った。図2(a)および2(b)に示すように、プラズマ周辺領域におけるイオン熱輸送レベルについては実験結果からの幾分の差異が見られたものの、炉心内部領域ではイオン・電子ともに、実験結果と同程度の輸送レベルを示され、GKVの良好な予測性能が確認された。また、ヘリウム、炭素、アルゴン等の軽不純物の影響を線形安定性解析によって調べ、輸送を駆動するITG-TEM不安定性の成長率が不純物印可によって減少することを明らかにした。これらはトカマク装置におけるアルゴン入射実験で観測されている閉じ込め特性を定性的に再現していることから、構築した多粒子種乱流シミュレーションモデルの有効性が確認された。

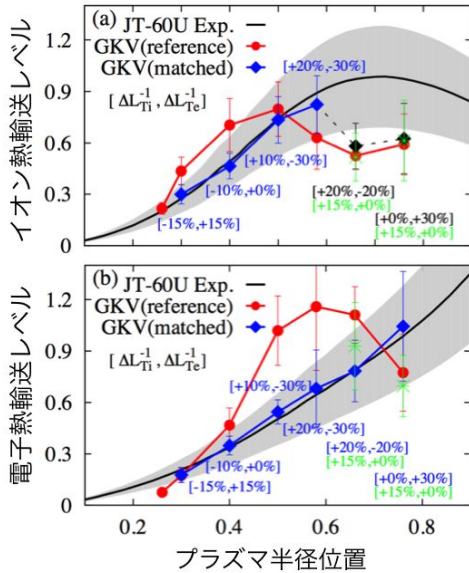


図2: GKVによる乱流輸送シミュレーションとJT-60U実験との比較

(3) 3次元ヘリカルプラズマにおける微視的不安定性の水素同位体質量効果

燃焼プラズマを構成する燃料は軽水素(H)の同位体である重水素(D)および三重水素(T)イオンが混在したものであるため、水素同位体の質量がプラズマ全体の質量の大部分を決める。プラズマの質量が乱流輸送あるいは乱流を引き起こす微視的不安定性に対してどのような影響を持つかは、核融合研究当初からの重要課題のひとつである。ここでは大型ヘリカル装置(LHD)において平成29年から開始される重水素プラズマ実験に対する予測解析として、3次元ヘリカルプラズマにおけるITGおよびTEM不安定性等に関する質量依存性の解析を実施した。GKVを用いて、様々なプラズマ温度・密度勾配分布条件に対応する系統的なシミュレーション解析を行った結果、図3に示されるようなITGおよびTEM不安定性成長率に関して異なる質量依存性が現れることを明らかにした。TEM不安定性における顕著な質量依存性は電子-イオン間の衝突過程における質量依存性を介したものであることが解析によって明らかとなっている。

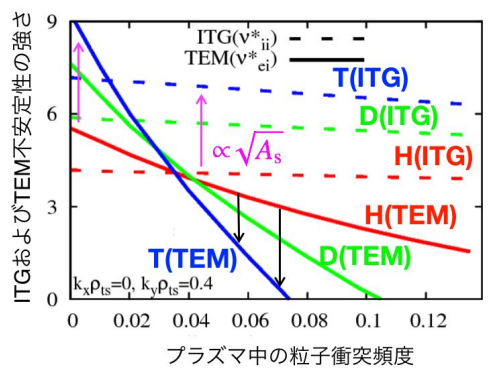


図3: ヘリカルプラズマにおけるITGおよびTEM不安定性特性の質量依存性

(4) トカマク燃焼プラズマ中の燃料イオン輸送特性と定常燃焼条件の解析

拡張された多粒子種シミュレーションモデルを用いて、ITERトカマクにおける燃焼プラズマ乱流シミュレーション解析を実施した。重水素および三重水素の燃料イオンに加え、燃焼反応から生じるヘリウム灰、さらには実質量の運動論的電子の合計4粒子種から構成されるプラズマに対して、ジャイロ運動論的ITG-TEM乱流シミュレーションを実行し、それぞれの粒子種に関する乱流輸送特性を解析した。その結果、図4(a)に示されるような粒子輸送のバランスが燃料比率やヘリウム灰の蓄積率に強く依存することを明らかにした。さらに、密度や温度分布勾配パラメータに関する依存性を大規模な数値シミュレーションにより探索することにより、図4(b)に示されるように、炉心プラズマの定常燃焼条件が成立する熱・粒子輸送および分布条件を第一原理モデルに立脚したシミュレーション解析の見地から同定することに成功した。

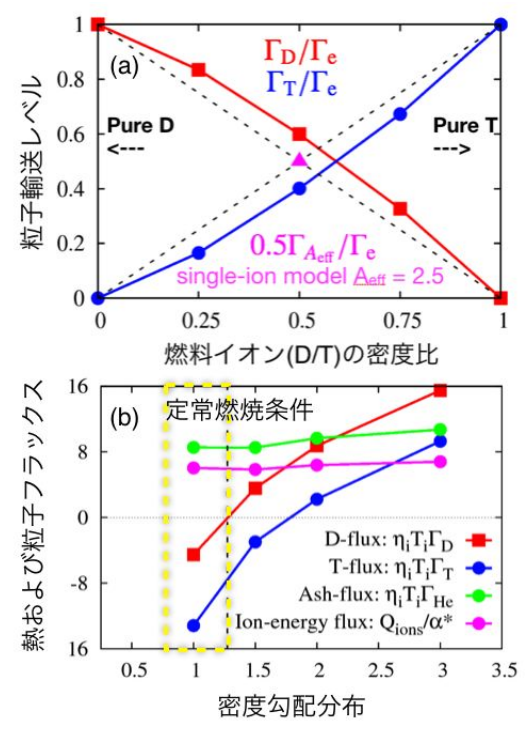


図4: 燃焼プラズマ中における(a)燃料イオンの粒子輸送特性および(b)定常燃焼条件の成立範囲

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計12件)
M. Nakata, M. Honda et al.,
“Validation studies of gyrokinetic ITG and TEM turbulence in a JT-60U tokamak using multiple flux matching”,
Nuclear Fusion Vol.56, 086010, 2016,
査読有

M. Nakata, M. Nunami et al., “ Impacts of hydrogen isotope species on microinstabilities in helical plasmas ”, Plasma Physics and Controlled Fusion Vol.58, 075008, 2016, 査読有

M. Nakata, M. Nunami et al., “ Improved collision operator for plasma kinetic simulation with multi-species ions and electrons ”, Computer Physics Communications Vol.197, 61, 2015, 査読有

M. Nunami, M. Nakata et al., “ Development of Linearized Collision Operator for Multiple Ion Species in Gyrokinetic Flux-tube Simulations ”, Plasma and Fusion Research Vol.10, 1402058, 2015, 査読有

H. Urano, M. Nakata et al., “ Roles of argon seeding in energy confinement and pedestal structure in JT-60U ”, Nuclear Fusion Vol.55, 033010, 2015, 査読有

他

〔学会発表〕(計 14 件)

M. Nakata, “ Multi-species gyrokinetic Vlasov simulations of ITG and TEM driven turbulence and zonal flows in tokamak and helical plasmas ”, APPC-AIP2016, Dec. 4th, 2016, Brisbane, Australia

M. Nakata, “ Multi-species ITG-TEM driven turbulent transport of D-T ions and He-ash in ITER burning plasmas ”, IAEA-FEC2016, Oct. 13th, 2016, 国立京都国際会館(京都府・京都市)

M. Nakata, “ Impact of isotope species and collisionality on ITG and TEM instabilities in helical plasmas ”, 20th International Stellarator-Heliotron Workshop, Oct. 5th, 2015, Greifswald, Germany

他

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕
特になし。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

仲田 資季 (NAKATA Motoki)

自然科学研究機構 核融合科学研究所・助教
研究者番号 : 40709440

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし