

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K03912

研究課題名（和文）エルゴディック層における運動論的プラズマダイナミクスの研究

研究課題名（英文）Numerical study on kinetic plasma dynamics in ergodic regions

研究代表者

森高 外征雄（Moritaka, Toseo）

核融合科学研究所・研究部・助教

研究者番号：20554372

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,300,000円

研究成果の概要（和文）：磁場閉じ込め核融合炉では、高温プラズマ状態にある核融合燃料（水素同位体）をトーラス状の磁力線に閉じ込めることで継続的な核融合反応を起こすことを目指している。高温プラズマの振る舞いを精密に計算できるジャイロ運動論モデルを発展させ、らせん状のコイルを用いたヘリカル型核融合炉や外部補助コイルを追加した場合に生成する、複雑な閉じ込め磁場への応用を可能にした。開発した計算コードを使い、大型ヘリカル装置における水素同位体プラズマの閉じ込め性能や、乱れた磁力線によってできる磁気島周辺のプラズマの振る舞いを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

らせん状のコイルで閉じ込め磁場を作るヘリカル方式は、日本で大きく発展したプラズマ閉じ込め方式である。核融合炉で想定される長時間運転が可能な点に優位性があるが、特に閉じ込め容器に近い部分の磁場構造が複雑になり、適用可能なシミュレーションモデルは現象論的な一部のものに限られている。本研究で開発した手法は、プラズマの振る舞いを精密に記述できるジャイロ運動論モデルを元に、複雑な構造を持つ磁場中の閉じ込めプラズマにも応用できるため、ヘリカル型核融合炉周辺領域をはじめ、これまで理論的なアプローチが限られていた領域の閉じ込めプラズマに対する物理的な理解に大きく貢献するものと期待される。

研究成果の概要（英文）：The gyrokinetic simulation model plays a central role in precisely demonstrating fusion plasma dynamics in magnetic confinement systems. We have improved the gyrokinetic model to apply complicated magnetic field structures in the Large Helical Device and other confinement systems using additional magnetic field perturbations. The developed simulation code was employed to clarify the confinement properties of hydrogen isotope plasmas in the Large Helical Device and plasma transport around magnetic islands.

研究分野：核融合科学

キーワード：ヘリカル型核融合炉 ジャイロ運動論シミュレーション 磁気島 水素同位体プラズマ 非構造格子

## 1. 研究開始当初の背景

核融合発電を実現するためには、燃料となる水素同位体を核融合反応を起こすのに十分な温度で維持する必要がある。磁場閉じ込め核融合炉では、高温希薄なプラズマ状態にある燃料を、入れ子状に生成したトーラス状の閉じた磁力線内部に閉じ込めることで、この条件を満たすことを目指している。無数の荷電粒子からなるプラズマのダイナミクスは非常に複雑であり、プラズマ閉じ込め実験の検証や将来的な閉じ込め性能の予測では、大規模数値シミュレーションが大きな役割を担っている。ジャイロ運動論シミュレーションは電磁場揺動やプラズマ乱流を含む詳細なプラズマダイナミクスを再現できるが、モデルの複雑さや必要計算資源の大きさから、比較的簡単な形状を持つトーラス磁場におけるプラズマ輸送解析への応用が主流であり、実際のプラズマ閉じ込め装置が持つ複雑な磁場構造への応用は発展途上である。

## 2. 研究の目的

本研究では、非軸対象なヘリカル(ステラレータ)型核融合炉や、閉じ込め装置周辺部(トーラス磁場外部)で想定される、複雑な磁場構造中のプラズマダイナミクスを扱うジャイロ運動論シミュレーションを実現するための計算手法を開発し、大型ヘリカル装置や関連した磁場配位に応用することを目的としている。大型ヘリカル装置の周辺領域では、らせん状のコイルで作られる磁場が互いに干渉し、入れ子状の磁力線が崩れたエルゴディック層や磁気島構造が形成される。同様の磁場構造は、Wendelstein 7-X といった他のステラレータ型核融合炉のほか、軸対象なトカマク型核融合炉でも外部磁場摂動を印加した場合は類似の磁場構造が形成される。本研究では、このような磁場構造を想定している。

## 3. 研究の方法

多くの運動論シミュレーションコードは、入れ子状の磁力線構造(磁気面構造)に特化した設計になっており、例えば磁気面に沿って定義される磁気座標系が用いられている。トカマク型核融合炉を想定し、磁場の軸対称性を仮定しているものも多い。構造に対する自由度が高いシミュレーション手法としては、非構造格子を使った有限要素法や、メッシュフリーな粒子法が考えられる。これらを組み合わせたジャイロ運動論 Particle-in-Cell (PIC) コードの例として、プリンストンプラズマ物理研究所で開発されている X-point Gyrokinetic Code (XGC) があり、トカマク型核融合炉周辺領域に適用可能なものとしてはほぼ唯一のものになっている。トカマク型核融合炉周辺領域では、容器壁に寸断されているものの軸対称性を持つ滑らかな磁力線構造を定義することができ、これらを前提とする XGC を本研究の対象であるステラレータ型核融合炉やその周辺領域にそのまま適用することは困難である。本研究では、ジャイロ運動論 PIC モデルを、エルゴディック層や磁気島構造を含む、より一般的な磁場配位に適用できるように、非構造格子の生成手法や静電場ソルバーの開発を行う。これらを組み込んだ、非軸対称系向けのジャイロ運動論 Particle-in-Cell コード(XGC-S)を大型ヘリカル装置や磁気島を含む配位における大域的輸送解析に応用する。

## 4. 研究成果

### (1) 大型ヘリカル装置炉心領域における同位体効果の研究

これまでの多くのプラズマ閉じ込め実験は軽水素プラズマが用いられているが、実際の核融合発電装置では水素同位体が使われる。そのため、水素イオンの質量の違いがこれまでに得られた閉じ込め性能にどのような影響をもたらすかは興味深い問題である。近年、大型ヘリカル装置で重水素を用いた閉じ込め実験が始まっており、比較的簡単な次元解析に基づくジャイロ・ボームスケールリングが予測する同位体依存性とは異なる結果(重水素でも閉じ込め性能の劣化が小さい)が得られている。同位体依存性を決めるメカニズムについて、特にステラレータ型核融合装置については、実験・シミュレーション研究の双方が限られているため統一的な見解には至っていない。

大型ヘリカル装置では、非軸対象な磁力線の凹凸に捕捉された荷電粒子が磁力線を横切るように散逸し、これによる新古典輸送が閉じ込め性能を決める要因の一つになっている。このようなヘリカル型核融合炉特有のメカニズムが、閉じ込め性能の同位体依存性にもたらす影響を調べた。ここでは、新古典輸送で生成される大域的な静電場構造と、乱流輸送をもたらす微視的プラズマ不安定性との関係性に注目する。大域的な電場構造と静電揺動の両方を捉えるために、トーラス軸から最外殻に至る閉じ込め磁場の3次元形状に応じた非構造格子をトーラス各断面上に配置し、大型並列計算機「富岳」を用いた大域的ジャイロ運動論シミュレーションを実施した。その結果、新古典輸送によって生じる静電場は、プラズマ不安定性(イオン温度勾配不安定性)の成長率の減少と揺動の長波長化の二つの効果を持つことがわかった。準線形理論に基づいてプラズマの閉じ込めとの関係を調べた結果、成長率の減少による閉じ込めの改善に対し、長波長化による閉じ込めの劣化は軽水素で顕著になるため、閉じ込め性能の同位体依存性は、大域的な

静電場によって小さくなることを見出された。このことは、大型ヘリカル装置における重水素実験の結果を定性的に再現するものである。

同様の格子系を用いて、より現実的な燃料である水素同位体混合プラズマに関するシミュレーションを実施した。水素同位体種の混合比によって決まる水素イオンの(平均)質量に対する、閉じ込め性能の依存性に着目した。プラズマの閉じ込めには主に軽水素の輸送が寄与するが、重水素成分は不安定性の成長率を低減し、揺動を長波長化によって軽水素の輸送に影響を与える。これらは大域的な静電場の下で現れる効果と類似したものであり、重水素成分が混在することによっても同様のイオン質量依存性が得られることが明らかになった。

これらの結果は、イオン温度勾配不安定性の線形シミュレーションと準線形解析に基づいている。今後、新古典輸送と微視的不安定性による乱流輸送の両方を含む非線形シミュレーションを実施することで、両者を自己無撞着に取り入れた解析を行う。そのために、プラズマの初期応答から乱流状態まで扱える direct delta-f 法や、揺動成分と大域構造の両方を含む静電場計算を XGC-S に導入し、ベンチマークを実施した。

## (2) ヘリカル型核融合炉周辺領域に向けたシミュレーション手法開発

上記の計算は大型ヘリカル装置の炉心領域を想定した非軸対称な磁気面構造を仮定しているが、周辺領域にはエルゴディック層のように磁気面が定義できない領域が存在する。このような領域では、磁力線に沿った輸送と磁力線を跨いだ輸送が絡み合った形でプラズマが散逸していくため、炉心領域とは大きく異なる特性があると考えられる。エルゴディック層を含むヘリカル核融合炉周辺領域に適用可能なジャイロ運動論 PIC シミュレーション向けの計算スキームを開発した。メッシュフリーな粒子軌道計算に対し、空間格子を用いる電磁揺動の計算は平衡磁場構造の影響を強く受ける。開発した計算スキームはこの部分に関係している。

静電場の支配方程式であるジャイロ運動論的ポアソン方程式には、電子の断熱応答に関する項が磁力線平均オペレータを伴うかたちで含まれている。そのため、磁力線構造が複雑になるにつれて多くの格子点をまたいだ平均操作が必要になり、これは密行列で表される線型方程式を解くことに対応する。軸対称性や磁気面構造を仮定しない場合、この方程式を解く計算が時間ステップサイクルの大半を占めるようになる可能性がある。この問題を解決するために、磁力線平均した電荷分布と静電ポテンシャルの関係を前処理として計算しておき、磁力線平均した静電ポテンシャルの線型結合とそこからの変動成分に分けて計算することで、時間ステップサイクル中は数回の疎行列計算で正確な解が得られる手法を開発した。

ヘリカル型核融合炉周辺領域に適用可能な格子生成手法を開発した。トカマク型核融合炉やヘリカル型核融合炉の炉心領域と異なり、この領域の磁力線構造は磁束関数や磁気座標系を使って解析的に与えることは困難である。そのため、数値的な磁力線トレースを行い、格子を生成する面上の磁力線の通過点に応じて格子点を生成する。磁力線が多く通過する部分は、炉心領域と核融合炉の炉壁(ダイバータ)を繋ぐ長い磁力線が存在し、エルゴディック層も含まれる。本格子生成手法では、この領域が自然に細分化される。また、大型ヘリカル装置のように螺旋状のコイルで磁場を作る場合、周辺領域の磁力線はトーラスに巻きつくような形状を持つため、トーラス断面状に生成した格子系では、磁力線に垂直な勾配演算子を含むジャイロ運動論的ポアソン方程式を解くのは困難である。数値最適化により磁力線に垂直な自由曲面を生成し、その曲面上に投影した格子系を用いることで、勾配演算子を正しく取り扱うことを可能にした。

このような格子生成手法に対応し、自由曲面上の階層格子を使ったポアソンソルバーを開発した。曲面の三次元情報をヤコビアンで行列に組み込み、マルチグリッド法と双共役傾斜安定化法を併用した緩和法で解を求める。単位球面上のモデル関数を使ったテスト計算で、得られた解の妥当性と高い計算効率を確認した。

これらの手法を組み合わせ、大型ヘリカル装置周辺領域における電荷密度と静電場の計算に成功した。シミュレーションの残りの部分であるジャイロ中心軌道の追跡計算はすでに可能となっているため、ヘリカル型核融合炉周辺領域に対するジャイロ運動論モデルの適用に向けて大きく前進したと考えられる。

## (3) 磁気島を含む配位における輸送解析

トカマク型核融合炉でも外部から共鳴磁場摂動(RMP)を印加した場合は、磁気面構造が壊れてエルゴディック層や磁気島が生成する。入れ子状の磁気面を表すフラックスラベルを磁気島内外の磁力線構造を含むように拡張し、磁気島を含むトカマク配位の輸送解析を行なった。このフラックスラベルは非軸対称な構造を持ち、これを用いることで磁気島に沿った背景温度分布や輸送係数を扱うことができる。磁気島内部で一様に緩和した温度分布に対する線形シミュレーションでは、磁力線が圧縮された磁気島周辺で温度勾配が大きくなり、イオン温度勾配不安定性の線形成長率が高くなる結果が得られた。非線形シミュレーションでは磁気島周辺の電場構造により成長率が小さくなる一方、乱流レベルは比較的高い状態が維持されるといった興味深い非線形効果が確認された。また、新古典輸送シミュレーションでは、磁気島内外の磁力線ごとにエネルギーフラックスを調べることで、磁気島の内部(0点)と磁気島同士の接触点(X点)それぞれの輸送特性を明らかにした。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 T. Moritaka, H. Sugama, M. Cole, R. Hager, S. Ku, C.S. Chang and S. Ishiguro	4. 巻 62
2. 論文標題 Isotope effects under the influence of global radial electric fields in a helical configuration	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 126059
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/ac95ab	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Toseo MORITAKA, Michael COLE, Robert HAGER, Seung-Hoe KU, C. S. CHANG and Seiji ISHIGURO	4. 巻 16
2. 論文標題 Improving Gyrokinetic Field Solvers toward Whole-Volume Modeling of Stellarators	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 2403054
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.16.2403054	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 M. D. J. Cole, T. Moritaka, R. Hager, J. Dominski, S. Ku, and C. S. Chang	4. 巻 27
2. 論文標題 Nonlinear global gyrokinetic delta-f turbulence simulations in a quasi-axisymmetric stellarator	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 44501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5140232	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 Trang LE, Yasuhiro SUZUKI, Hiroki HASEGAWA, Toseo MORITAKA, Hiroaki OHTANI	4. 巻 16
2. 論文標題 Particle Simulation of Controlling Particle and Heat Flux by Magnetic Field	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1401103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.16.1401103	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Trang LE, Yasuhiro SUZUKI, Hiroki HASEGAWA, Toseo MORITAKA, Hiroaki OHTANI	4. 巻 13
2. 論文標題 High heat flux reduction to materials using current filaments	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 8300
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-023-35109-4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計11件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 Toseo Moritaka
2. 発表標題 Recent progress on numerical development toward core-edge modeling of stellarators
3. 学会等名 6th Asia Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Toseo Moritaka
2. 発表標題 Electrostatic field calculation in the edge region of a helical fusion device using the gyrokinetic model
3. 学会等名 The 31st International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Toseo MORITAKA, Michael COLE, Robert HAGER, Seung-Hoe KU, C. S. CHANG and Seiji ISHIGURO
2. 発表標題 Electrostatic potential calculations for whole-volume gyrokinetic modeling of stellarators
3. 学会等名 47th European Physical Society Virtual Conference on Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Toseo MORITAKA, Hideo SUGAMA, Michael COLE, Robert HAGER, C. S. CHANG and Seiji ISHIGURO
2. 発表標題 Isotope effects on ion temperature gradient mode with radial electric field in Large Helical Device
3. 学会等名 30th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 森高 外征雄 Michael COLE, Robert HAGER, Seung-Hoe KU, C. S. CHANG and Seiji ISHIGURO
2. 発表標題 様々なプラズマ環境への応用に向けたジャイロ運動論 PIC 法の開発
3. 学会等名 第37回プラズマ・核融合学会年会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 森高外征雄, M. Cole, R. Hager, S. Lazerson, 佐竹真介, 松岡清吉, 沼波政倫, C-S.Chang, 石黒静児, 洲鎌英雄
2. 発表標題 ヘリカル核融合炉全系輸送解析のためのジャイロ運動論粒子コードの開発
3. 学会等名 日本物理学会 秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Toseo MORITAKA, Michael COLE, Robert HAGER, Seung-Hoe KU, C. S. CHANG and Seiji ISHIGURO
2. 発表標題 Improved Field Solver for Gyrokinetic Simulation in Stellarator Edge Region
3. 学会等名 The 29th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Toseo Moritaka, Michael Cole, Robert Hager, Seung-Hoe Ku, C. S. Chang, Masanori Nunami, Seiji Ishiguro, Hideo Sugama
2. 発表標題 Isotope effects in ion temperature gradient modes with radial electric field in the large helical device
3. 学会等名 28th IAEA Fusion Energy Conference (FEC2020) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Toseo Moritaka, Robert Hager, Seung-Hoe Ku, C.S. Chang and Suguru Masuzaki
2. 発表標題 Electrostatic field calculation in the edge region of helical confinement devices based on the gyrokinetic model
3. 学会等名 34th IUPAP Conference on Computational Physics (CCP2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Toseo Moritaka, Robert Hager, Seung-Hoe Ku, C.S. Chang and Suguru Masuzaki
2. 発表標題 Development of a gyrokinetic simulation model toward whole-volume modeling of stellarators
3. 学会等名 The 42nd JSST Annual International Conference on Simulation Technology (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Toseo Moritaka, Robert Hager, Seung-Hoe Ku and C.S. Chang
2. 発表標題 Electrostatic field calculation on a curved surface for gyrokinetic modeling of stellarator edge plasmas
3. 学会等名 Global Plasma Forum in Aomori (国際学会)
4. 発表年 2023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
--	---------------------------	-----------------------	----

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		
米国	プリンストンプラズマ物理研究 所		