

令和 5 年 6 月 10 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18H01202

研究課題名（和文）拡張MHDコードを取り入れた革新的不純物輸送解析スキームの開発と実験的検証

研究課題名（英文）Development and validation of innovative impurity transport analysis scheme by extended MHD code

研究代表者

鈴木 康浩（SUZUKI, Yasuhiro）

広島大学・先進理工系科学研究科（工）・教授

研究者番号：20397558

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,600,000円

研究成果の概要（和文）：これまで、不純物輸送に関して多くの理論的研究・大規模数値シミュレーションが行われたが、輸送された不純物がどのようにプラズマ中に蓄積されるかは明らかになっていない。また、実験でしばしば観測される、磁場構造に依存する不純物蓄積の増大や遮蔽のメカニズムも明らかになっていない。そこで本研究では、不純物分布を考慮した拡張MHDコードとジャイロ運動論・新古典輸送理論に基づく局所輸送コードを統合して反復的に解を求める革新的スキームを開発し、プラズマ中の不純物輸送を考察した。また、不純物分布を2次元で考察できる輻射計測器を開発し、実験的検証を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、プラズマ中に蓄積する不純物の挙動を拡張MHDコードで考察することが最大の特徴である。しかし、拡張MHDコードはある程度の運動論効果を取り入れているが、本研究が対象とするような大規模な不純物の蓄積をそのまま追跡することは難しい。そこで、局所的にしか解けないが、より正確な不純物輸送を考察できるジャイロ運動論コードと結合することで、この問題に取り組む。

本研究で取り組んだ、時間・空間スケールがことなる物理現象を解く2つのコードを結合するスキームは、他分野（例えば異相間結合など）でも大いに役立つ技術と言える。

研究成果の概要（英文）：Although many theoretical studies and large-scale numerical simulations have been performed for impurity transport, it is not clear how impurities transport and accumulate in the plasma core. The mechanisms of impurity accumulation and shielding, which are often observed in experiments and depend on the magnetic field structure, are also not clear. In this study, we developed an innovative scheme to iteratively solve the impurity transport by integrating an extended MHD code considering impurity distribution and a local transport code based on gyrokinetic theory and neoclassical transport theory. In addition, we developed a radiation measurement device that can consider impurity distribution in two dimensions, and verified it experimentally.

研究分野：プラズマ科学

キーワード：核融合プラズマ 不純物輸送 拡張MHD

## 1. 研究開始当初の背景

プラズマ中に不純物が存在すると、輻射によって温度が下がり、燃料が希釈されるために、プラズマ中の不純物は核融合反応出力を低下させる要因として挙げられている。そのため、エネルギー閉じ込めの改善と不純物の排出が同時に達成されることが、核融合炉を実現するために必要である。

欧州の JET トカマク装置では、実験開始初期からダイバータ材として炭素を用いていたが、近年、国際熱核融合炉 (ITER) で利用予定のタングステンモノブロックを用いたダイバータに転換した。その結果、ITER H モードスケリング則から予測されたプラズマ蓄積エネルギーに対する観測値を考察したところ、炭素材とタングステン材を比べた場合、タングステン材の方が正味の蓄積エネルギーが低くなることが分かった。このことは、ダイバータ構造材に起因する不純物が、プラズマコア部の性能に大きく影響することを意味する。一方、大型ヘリカル装置 (LHD) をはじめとするステラレータ装置では、周辺の特徴ある磁力線構造が不純物の蓄積を左右することが知られている。プラズマ周辺部の磁気島構造やストカスティックな磁力線構造が不純物の侵入を遮蔽する場合があることが明らかになった。このことから、本研究の背景として、

1. 不純物はプラズマ中でどのように輸送され、どこに蓄積されるのか？
  2. 輸送され蓄積された不純物が、どのように背景プラズマ分布を変化させるのか？
  3. 閉じ込め磁場構造は、不純物の輸送と蓄積過程にどのような影響を与えるのか？
- が、あげられる。

## 2. 研究の目的

前述の背景を踏まえ、これまで、プラズマに侵入した不純物の振る舞いを解明するために、ジャイロ運動論・新古典輸送理論に基づく理論的解析と大規模数値シミュレーションが行われてきた。しかし、多くの計算リソースを用いて大規模数値シミュレーションが行われているが、プラズマ中の不純物の輸送過程・蓄積状況を十分に説明できていない。一例は、LHD 実験で観測された不純物ホールである。内部輸送障壁 (ITB) 形成に伴う熱輸送の閉じ込め改善が達成された場合、プラズマコア部から不純物の掃き出しが観測された。このとき、ジャイロ運動論・新古典輸送理論に基づく理論予測・シミュレーション結果は常に不純物が蓄積される傾向を示す。このことは、理論・シミュレーションモデルがまだ不十分であることを示しており、新しく革新的な不純物輸送・蓄積モデルを開発しなければならないことを意味する。

ジャイロ運動論・新古典輸送理論に基づく解析が実験結果をうまく再現できない理由の一つは、多くの場合、磁気面を基準座標とした局所モデルに基づくためである。実験では、不純物が磁気面形状と大きく異なる分布で観測されることがある。一般に、不純物イオンは価数が大きく、質量も水素に比べ重い。不純物イオンの軌道特性は水素、ヘリウムイオンと比べても軌道効果が大きく、磁気面との「ずれ」が大きい。不純物イオンが、背景プラズマの水素イオンとは異なる輸送過程を経て、プラズマ中に蓄積することは想像に難くない。加えて、局所モデルでは背景プラズマ分布の影響を含めることが難しい。もし、不純物分布が磁気面形状と大きく異なるならば、不純物がもたらす背景プラズマ分布の変化を矛盾なく取り込む必要があるが、磁気面を基準座標とした局所モデルでは不可能である。近年、ジャイロ運動論・新古典輸送理論をプラズマ全体に拡張した、グローバルモデルの開発が盛んに行われている。しかし、現実的な磁場配位上で、背景プラズマの分布の変化、特に不純物がもたらす局所的な温度・密度変化を取り込みつつシミュレーションを行うことは、現存のスーパーコンピュータを最大限に活用しても非現実的である。さらに、磁場構造が不純物輸送と与える影響を系統的に考察することは、全く行われていない。

そこで本研究では、グローバルな背景プラズマ分布の変化と磁場構造の影響を、拡張 MHD コードに不純物分布を取り込むことにより世界で初めて再現し、拡張 MHD コードの結果を初期値としてジャイロ運動論・新古典輸送理論の局所モデルシミュレーションを行う、新しい革新的なマルチスケール反復スキームを開発する。新しい革新的な反復スキームで得られたシミュレーション結果は、LHD 実験と詳細に比較し検証と妥当性確認を行う。不純物分布が、磁気面形状と大きく離れることも考慮し、2 次元輻射分布計測器を 2 台、新しく開発し、不純物入射装置を活用した不純物輸送実験を行う。

## 3. 研究の方法

本研究では、これまで述べた背景と目的を踏まえ、以下の点を具体的に考察する。

1. これまで LHD プラズマの不安定性計算に用いられてきた非線形 3 次元 (3D) 拡張 MHD コード MIPS を、不純物分布の寄与を含めるよう改良する。具体的には、

- (1) 連続の式を電子、イオン、不純物に分け、質量密度に不純物の寄与を含める。このとき、電子、イオンの式にはそれぞれ、イオン化、再結合の影響をソース項に繰り込む。
  - (2) 原子・分子データベースをもとに、不純物輻射モデルを開発する。そして、不純物による輻射の効果を冷却ソースとして電子温度の式に含め、不純物が背景プラズマの温度分布に与える影響を取り込む、
  - (3) 電気抵抗の式に、改良した連続の式から得られる $Z_{\text{eff}}$ の効果と電子温度に対する不純物の影響を取り込み、磁場構造の変化を考察する。
2. 実験結果をよく再現した初期平衡から、改良版 MIPS コードによる非線形計算を行い、非線形飽和解を得る。このとき、不純物の分布と輸送係数は現実的なものを、初期推量として入力する。
  3. 改良版 MIPS コードから得られた磁場構造と背景プラズマ分布を用いて、ジャイロ運動論コード GKV・新古典輸送理論コード PENTA による局所不純物輸送計算を行う。これまでの計算では、背景プラズマ分布は磁気面量として与えていたが、本研究では改良版 MIPS コードの結果を輸送コードの座標磁気面上に直接マッピングする。このことにより、従来の局所モデル計算では得られなかった、現実的な背景プラズマ分布を取り込んだ不純物輸送計算を行う。
  4. 局所不純物輸送計算から得られた輸送係数は、改良版 MIPS コードの入力として使用し、背景プラズマ及び不純物分布が定常になるまで反復計算を行う。
  5. LHD 実験において、準定常プラズマに不純物を入射し輸送実験を行う。高時間・空間分解 2 次元輻射分布計測装置を新しく開発し、磁気面形状と大きく異なる不純物分布も観測できるようにする。磁場配位を変化させ、不純物の輸送および蓄積過程がどのように変化するかを詳細に考察する。また、電子サイクロトロン共鳴加熱 (ECRH) を活用して局所過熱を行い、ITB 形成などを閉じ込め改善を模擬し、不純物輸送の変化を考察する。
  6. 新しい革新的反復スキームで得られた不純物輸送過程と LHD の実験結果を検討し、革新的スキームの検証と妥当性確認を行う。検証として、定性的性質の一致をまず確認する。定性的性質が一致しない場合は、モデルの妥当性確認として反復スキームの改良を行う。その後、定量性の確認を目指す。
- 以上のステップを順に実施する。

#### 4. 研究成果

まず、これまで開発してきた拡張 MHD コードの改良を行った。プラズマ中の不純物は、放射冷却によりプラズマを冷却するため、拡張 MHD の方程式に、不純物がプラズマを冷却する効果をモデル化した項を追加した。次に、拡張 MHD はプラズマを一流体として取り扱う。その場合、実効電荷数は背景プラズマのイオンと電子で釣り合うように定義される。そこで、背景プラズマイオン+不純物イオンとしてイオン電荷を取り扱い、実効電荷数を定義できるようにコードを改良した。一方、不純物輸送シミュレーションについては、拡張 MHD コードで得られた磁気面量として定義されない不純物分布や温度・密度分布を初期値として計算できる改良を施した。ジャイロ運動論・新古典輸送理論のコードに磁気面上で温度・密度を一定として与える代わりに、座標磁気面上に拡張 MHD コードから得られた温度・密度分布を直接マッピングすることで、磁気面量として定義されない温度・密度分布を入力する改良を行った。しかし、電気抵抗の分布は磁気面量の関数として与えてきたため、計算が収束しなかった。そこで、磁気面から大きくずれた分布を持つ不純物輻射による局所的な温度変化を考慮し、3次元グリッド上で定義された温度の関数として電気抵抗を取り込めるよう改良を進めた。しかし、場合によっては電気抵抗値が小さい領域で正しく計算ができない状態が発現した。そこで、不純物分布を反映した電気抵抗の3次元分布も考慮しつつ、計算が完全に終了するよう電気抵抗に調整を加える機能を追加した。ところが、急峻な抵抗値の変化が計算に与える影響を完全に除去できなかった。そこで、電気抵抗による拡散部分のみを、より早い時間スケールかつ陰解法で解けるように半陰解法スキームの開発に着手した。3次元拡散方程式を陰解法で解くことは、巨大な行列計算を必要とすることもあり、容易ではない。そこで、性能よりも並列化効率が高い SOR 法をあえて採用することで、効率よく並列行列計算を出来るスキームを開発した。この並列スキームを MIPS コードに組み込むことはできなかったが、今後の発展性に期待できる。

開発した反復スキームは、大型ヘリカル装置実験の結果と比較する。そのため、プラズマ中の不純物分布を 2次元で計測できるよう、プラズマの輻射損失分布を計測する軟 X 線計測機の改良を行った。当初、AXUV フォトダイオードを用いて輻射分布を計測する予定であったが、ノイズに対する影響が大きいと判断されたため、シンチレータ式の軟 X 線検出器を用いることとした。プラズマからの輻射損失分布を詳細に計測するために、新しいシンチレータと多チャンネルの光ファイバーを整備した。

LHD 実験において、不純物入射実験を行い、磁気面から大きくずれた不純物分布を持つ不純物スネークを LHD 実験で発現させる事を目指したが、不純物スネークを実験的に観測することは出来なかった。これは、温度が低いなど実験条件が悪いことに起因する。また、他の装置で実験

を行うことも検討したが、新型コロナの感染状況により断念した。残念ながら、本研究で目標とした、数値シミュレーションと実験結果の定量的評価は未完に終わった。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件／うち国際共著 7件／うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Suzuki Yasuhiro, Futatani Shimpei, Geiger Joachim	4. 巻 63
2. 論文標題 Nonlinear MHD simulation of core plasma collapse events in Wendelstein 7-X	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Plasma Physics and Controlled Fusion	6. 最初と最後の頁 124009 ~ 124009
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6587/ac3499	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 Suzuki Yasuhiro	4. 巻 62
2. 論文標題 Effect of pressure profile on stochasticity of magnetic field in a conventional stellarator	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Plasma Physics and Controlled Fusion	6. 最初と最後の頁 104001 ~ 104001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6587/ab9a13	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 Suzuki Y., Watanabe K. Y., Sakakibara S.	4. 巻 27
2. 論文標題 Theoretical studies of equilibrium beta limit in LHD plasmas	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 102502 ~ 102502
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0015106	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 SUZUKI Yasuhiro, PUROHIT Shishir, OHDACHI Satoshi, YAMAMOTO Satoshi, NAGASAKI Kazunobu	4. 巻 22
2. 論文標題 New tomographic reconstruction technique based on Laplacian eigenfunction	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Plasma Science and Technology	6. 最初と最後の頁 102002 ~ 102002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/2058-6272/aba185	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 Du X. D., Shafer M. W., Hu Q. M., Evans T. E., Strait E. J., Ohdachi S., Suzuki Y.	4. 巻 26
2. 論文標題 Direct measurements of internal structures of born-locked modes and the key role in triggering tokamak disruptions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 042505 ~ 042505
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5085329	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 HUANG Jie, SUZUKI Yasuhiro, LIANG Yunfeng, JIA Manni, SUN Youwen, CHU Nan, XU Jichan, WU Muqian, EAST team	4. 巻 21
2. 論文標題 Magnetic field topology modeling under resonant magnetic perturbations on EAST	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Plasma Science and Technology	6. 最初と最後の頁 065105 ~ 065105
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/2058-6272/ab0d35	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 Futatani Shimpei, Suzuki Yasuhiro	4. 巻 61
2. 論文標題 Non-linear magnetohydrodynamic simulations of plasma instabilities from pellet injection in Large Helical Device plasma	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Plasma Physics and Controlled Fusion	6. 最初と最後の頁 095014 ~ 095014
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6587/ab34aa	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 PUROHIT S, SUZUKI Y, OHDACHI S, YAMAMOTO S	4. 巻 21
2. 論文標題 Soft x-ray tomographic reconstruction of Heliotron J plasma for the study of magnetohydrodynamic equilibrium and stability	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Plasma Science and Technology	6. 最初と最後の頁 065102 ~ 065102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/2058-6272/ab0846	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 OHDACHI Satoshi、YAMAMOTO Satoshi、SUZUKI Yasuhiro、PUROHIT Shishir、IWAMA Naofumi	4. 巻 14
2. 論文標題 Tomographic Inversion Technique Using Orthogonal Basis Patterns	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 3402087 ~ 3402087
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.14.3402087	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 Auriemma F.、Lopez-Bruna D.、Lorenzini R.、Momo B.、Predebon I.、Suzuki Y.、Lopez-Fraguas A.、Narushima Y.、Sattin F.、Terranova D.、Zhang Y.	4. 巻 58
2. 論文標題 A novel approach to studying transport in plasmas with magnetic islands	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 096037 ~ 096037
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/aad13f	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 Lopez-Bruna D.、Momo B.、Predebon I.、Lopez-Fraguas A.、Auriemma F.、Suzuki Y.、Lorenzini R.	4. 巻 58
2. 論文標題 Flux-surface averaged radial transport in toroidal plasmas with magnetic islands	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 106031 ~ 106031
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/aad701	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 Purohit S.、Suzuki Y.、Ohdachi S.、Yamamoto S.	4. 巻 89
2. 論文標題 Improved design for Heliotron J soft X-ray diagnostic for tomographic reconstruction studies	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 10G102 ~ 10G102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5038953	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 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 5件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Yasuhiro Suzuki
2. 発表標題 Development of 3D equilibrium and advanced magnetic configurations
3. 学会等名 Stochasticity in Fusion Plasma (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yasuhiro Suzuki
2. 発表標題 Spontaneous transition improving particle confinement in high-beta plasmas of Large Helical Device
3. 学会等名 47th EPS Conference on Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yasuhiro Suzuki
2. 発表標題 Improved particle confinement in the L-H transition in the 3D magnetic field
3. 学会等名 AAPPS-DPP2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yasuhiro Suzuki
2. 発表標題 Development of 3D equilibrium code and its application to stellarators
3. 学会等名 2nd Fusion HPC Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 Yasuhiro Suzuki
2. 発表標題 Nonlinear MHD simulation of core plasma collapse events in stellarators
3. 学会等名 1st Spanish Fusion HPC Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yasuhiro Suzuki
2. 発表標題 Design of New Tokamak-Stellarator Hybrid
3. 学会等名 9th Stochasticity in Fusion Plasmas (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Suzuki Yasuhiro
2. 発表標題 Anisotropic heat diffusion on stochastic magnetic fields
3. 学会等名 45th European Physical Society Conference on Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2018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
研究 分担 者	沼波 政倫  (NUNAMI Masanori)  (40397203)	核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授    (63902)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究 分担者	田村 直樹  (TAMURA Naoki)  (80390631)	核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授    (63902)	

	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
研究 協力者	大館 暁  (OHDACHI Satoshi)		

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	ジェネラルアトミクス社	ウィスコンシン州立大学マディソン校	
ドイツ	マックスプランク・プラズマ物理研究所	ユーリッヒ中央研究機構	
イタリア	RFXコンソーシアム		
スペイン	エネルギー環境技術センター	カタルーニャ工科大学	