

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19H01879

研究課題名（和文）新古典・乱流輸送理論シミュレーションによる核融合プラズマ性能の解明と予測

研究課題名（英文）Elucidation and prediction of fusion plasma performance based on neoclassical and turbulent transport theory and simulation

研究代表者

洲鎌 英雄（Hideo, Sugama）

核融合科学研究所・研究部・教授

研究者番号：80202125

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 6,300,000円

研究成果の概要（和文）：高精度の理論モデルとシミュレーションコードの構築・整備・改良を行うことによって、磁場閉じ込め核融合プラズマにおける粒子・熱エネルギー・運動量の輸送現象の物理機構解明とその定量的予測精度の向上に貢献した。基礎理論、大規模シミュレーションコードや輸送解析用乱流モデルのそれぞれの開発・拡張を行い、実験結果との比較による検証および改良が進められた。ドリフトおよびジャイロ運動論的シミュレーションによって、3次元磁場配位中のプラズマにおける新古典・乱流輸送現象の解析を行い、プラズマ閉じ込めに対する背景電場、ゾナルフロー、複数イオン種、水素同位体や捕捉電子等の様々な効果の定性的・定量的理解が進展した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

無尽蔵にある資源や地球温暖化対策の観点から、核融合は究極のエネルギー源として、その早期実現が期待されている。一方、核融合プラズマは乱流輸送などの複雑な物理現象を包含し、その物理機構の解明や定性的・定量的理解は学術的観点からも非常に興味深い研究対象である。本研究によって、核融合プラズマ輸送過程に対する理論モデルやシミュレーションコードの構築・改良が進展し、核融合プラズマ性能の予測精度の向上や、普遍的かつ複雑なプラズマ現象の物理的理解の深化に貢献した。

研究成果の概要（英文）：By constructing and improving theoretical models and simulation codes, we have contributed to elucidating the physical mechanisms of particle, heat energy, and momentum transport phenomena in magnetically confined fusion plasmas and improving their quantitative prediction accuracy. We have developed and extended the basic theory, large-scale simulation codes, and turbulence models for transport analysis. We have also validated and improved the theoretical models and simulation codes by comparing them with experimental results. We have successfully performed simulations based on drift and gyrokinetic models to analyze neoclassical and turbulent transport processes in plasmas in three-dimensional magnetic field configurations, advancing qualitative and quantitative understanding of various effects of background electric fields, zonal flows, multiple ion species, hydrogen isotopes, and trapped electrons on plasma confinement.

研究分野：核融合プラズマ理論シミュレーション

キーワード：核融合プラズマ 新古典輸送 乱流輸送 運動論的シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

トラス磁場に閉じ込められた高温プラズマでは、荷電粒子の平均自由行程が非常に長くなるため、複雑な粒子軌道の構造が、プラズマの安定性や輸送等の集団現象に大きな影響を及ぼす。そのため、核融合プラズマの閉じ込め性能を理論的に正確に予測するためには、従来の流体モデルでは不十分であり、粒子の位相(位置・速度)空間上の分布関数を扱う運動論モデルに基づく解析が必要となる。運動論に基づくトラスプラズマの輸送機構には、ドリフト運動する荷電粒子のクーロン衝突に起因する新古典輸送と、ジャイロ半径程度の波長を持つイオン温度勾配(ITG)モードや捕捉電子モード(TEM)のような微視的不安定性により引き起こされる乱流輸送が存在し、ドリフトおよびジャイロ運動論に基づいた新古典および乱流輸送の理論シミュレーション研究が、国内外において精力的に行われてきた。トカマクプラズマに比べ、大型ヘリカル装置(LHD)のようなヘリカル系プラズマでは、非軸対称3次元磁場配位による複雑な粒子軌道構造のため、より大きな記憶容量・計算時間が必要となり、そのため、運動論的輸送シミュレーション研究がトカマクを対象としたものが主流であったが、ヘリカル系プラズマに対する高度な理論モデルと大規模並列コンピューターを用いたシミュレーション手法が、我々のW7XやHSX等の新たなヘリカル配位装置を有する欧米のプラズマ理論シミュレーション研究グループにより開発されつつある状況にあった。また、乱流輸送に対する単純な理論モデルであるジャイロボーム・スケールに反する乱流輸送の水素イオン質量依存性(水素同位体効果)が観測され、水素同位体効果と並んで、背景電場、ゾーナルフロー、不純物イオンや捕捉電子等がプラズマ閉じ込めにもたらす効果の解明が期待されていた。一方、多数の実験結果の輸送解析、輸送低減のための条件探索や炉設計への応用上の観点からは、大規模ジャイロ運動論的シミュレーションから得られる乱流輸送を短時間で再現・予測するため、輸送解析コードに組み込む簡約化乱流輸送モデルの構築が望まれていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、磁場閉じ込め核融合プラズマにおける粒子・熱エネルギー・運動量の輸送現象の物理機構解明とその定量的予測を行うため、高精度の理論モデルとシミュレーションコードの構築および改良を行うことである。基礎理論、大規模シミュレーションコードや輸送解析用乱流モデルのそれぞれの開発・拡張を行い、また、LHD等の実験結果との比較によって、理論モデル・シミュレーションコードの検証および改良を進め、予測性能の向上を目指す。複雑な3次元磁場配位中のプラズマにおける新古典・乱流輸送現象を扱うために、これまでに我々の研究グループで開発を進めてきたドリフトおよびジャイロ運動論モデルに基づくシミュレーションコードをさらに改良・発展させ、プラズマ閉じ込めに対する背景電場、ゾーナルフロー、複数イオン種、水素同位体や捕捉電子等の様々な効果を明らかにすることを目標とする。

3. 研究の方法

研究代表者が研究計画の策定および総括を行うとともに、シミュレーションの基礎となる運動論モデルの改良を担当し、各研究分担者が担当するドリフト運動論的新古典輸送シミュレーション、ジャイロ運動論的乱流輸送シミュレーション、輸送係数モデルの開発・応用等の研究の連携に基づき、理論・シミュレーション・実験それぞれの結果の比較を行いながら、プラズマ輸送の物理機構の解明と予測モデルの性能向上を図る。

高精度ドリフト・ジャイロ運動論モデルの定式化：

長時間のグローバル輸送シミュレーションの数値精度の検証や物理機構の理解に役立てるため、正確な粒子・エネルギー・運動量の保存則やエントロピーバランスを満足する高精度ドリフト運動論モデルの変分原理による定式化、運動量保存則の表式やシミュレーション結果の解析手法の提示を行う。

ドリフト・ジャイロ運動論的輸送シミュレーションコードの拡張：

多種イオンと電子からなるヘリカル系プラズマの新古典輸送解析のために、ドリフト運動論コードの拡張を行う。また、グローバルジャイロ運動論的シミュレーションコードの拡張を行い、背景 $E \times B$ シアフロー効果を取り入れた線形ITGモードを行い、水素イオン質量効果を調べる。

簡約化輸送モデルの開発と統合輸送コードへの適用：

ジャイロ運動論的シミュレーションの乱流粒子・熱輸送を再現できる簡約化輸送モデルを開発する。開発した乱流輸送モデルを統合輸送コード(TASK3D)に組み込み、輸送シミュレーション

を実行し、LHD 等の実験結果と比較し、妥当性を検証する。

4. 研究成果

令和元年度：

- ・運動論的シミュレーションに用いる線形衝突演算子の改良：高衝突周波数を含む全ての衝突周波数領域に対する運動論的シミュレーションに適用できるように、線形モデル衝突演算子の改良を行った[H. Sugama, et al., Physics of Plasmas 26, 102108 (2019)]。改良モデル衝突演算子は粒子数・運動量・エネルギー保存則を満足するとともに、線形ランダウ衝突演算子から導かれるものと同じ friction-flow relation を再現することが示された。さらに、ジャイロ運動論的乱流輸送シミュレーションへの応用のため、有限ジャイロ半径効果を保持しながらジャイロ位相平均を施した改良モデル衝突演算子の表式が導かれた。改良モデル演算子は、タングステンのような高電荷数 Z を持つ不純物を含むプラズマの運動論的シミュレーションに役立つ。
- ・GKV コードを用いた LHD プラズマにおける ITG 乱流輸送のジャイロ運動論的シミュレーションに基づいて得られた乱流輸送モデルを組み込んだ統合輸送コード TASK3D によるシミュレーションを実行し、LHD プラズマの電子温度およびイオン温度の小半径方向分布を求めた。
- ・多イオン・多イオン種プラズマに対する新古典輸送シミュレーションを行うため、グローバルモンテカルロコード FORTEC-3D に、多イオン種間の線形衝突演算子モデルを実装し、衝突過程における粒子数・運動量・エネルギー保存則および共役関係式が満足されることが確認された。

令和2年度：

- ・一般空間座標系を用いたオイラー的変分原理 [H. Sugama et al., Phys. Plasmas 25, 102506 (2018)] を拡張し、静電乱流を記述するジャイロ運動論の定式化を行った[H. Sugama et al., Physics of Plasmas 28, 022312 (2021)]。任意の空間座標変換の下で、ジャイロ運動論系のラグランジアンが不変であることから、ジャイロ運動論方程式系の解として与えられるジャイロ中心分布関数と静電ポテンシャルが満足する局所運動量バランス方程式が導出された。ここで得られた結果は、一般的な非軸対称トロイダル系における新古典輸送・乱流輸送の両輸送過程を調べるためのグローバルジャイロ運動論的シミュレーションの精度検証等に役立つことが期待される。
- ・ヘリカル系における複数のイオン粒子種を含んだプラズマの乱流輸送およびその温度・密度分布依存性を、GKV コードを用いたジャイロ運動論的シミュレーションによって調べた[M. Nunami et al., Physics of Plasmas 27, 052501 (2020)]。多イオン種プラズマでは、各粒子種の熱輸送の温度勾配・密度勾配に対する依存性の差異は比較的に小さいが、粒子輸送の温度勾配・密度勾配に対する依存性は粒子種によって大きく異なる傾向があることが示された。
- ・GKV コードによるシミュレーション結果に基づいて得られた簡約化乱流輸送モデルを用いて、LHD の標準磁場配位と内寄せ磁場配位におけるイオン温度勾配(ITG) 乱流輸送・ゾーナルフロー生成に対する捕捉電子の効果を明らかにした[S. Toda et al., Journal of Plasma Physics 86, 815860304 (2020)]。この簡約化乱流輸送モデルを用いることによって、直接乱流シミュレーションを行うよりも遥かに短い計算時間で、ITG 乱流・ゾーナルフローに対する静電ポテンシャルの揺動振幅および乱流イオン熱輸送を予測することが可能となる。

令和3年度：

- ・厳密な線形化ランダウ衝突演算子に対して成り立つ摩擦力と流速の関係式を満足するように、モデル衝突演算子 [Sugama, et al., Phys. Plasmas 16, 112503 (2009)] を拡張した改良型モデル衝突演算子[Sugama, et al., Phys. Plasmas 26, 102108 (2019)] を、大域的フル f ジャイロ運動論シミュレーションコード GT5D に新しく実装した[S. Matsuoka, et al., Physics of Plasmas 28, 064501 (2021)]。広い衝突周波数領域において、同心円形断面を持つトカマクにおける単一イオン種プラズマの新古典輸送シミュレーションを行った。その結果、低衝突領域よりも高い精度の摩擦流関係が要求されるフィルシュ-シュルター領域において、ブラジンスキーの熱拡散係数が改良型演算子により正確に再現されることが確認された。さらに、すべての衝突領域において、旧モデル演算子を用いた場合に観測された新古典熱拡散率の平行方向流速係数の過大評価は、改良型演算子を用いることで解消されることがわかり、厳密なランダウ衝突演算子で記述される衝突過程が、改良型演算子によって正しく表現されていることが実証された。
- ・分極及び磁化電流を高精度で計算するため、微視的電磁乱流ならびにクーロン衝突の両方の効果を考慮して、荷電粒子の局所的な密度・平均流速をジャイロ中心分布関数から与える表式を導いた。ここで得られた表式は、ジャイロ運動論的シミュレーションにおいて、粒子の密度や流速の空間分布の精密な評価に役立つことが期待される。

令和4年度：

- ・ジャイロ運動論に基づく定式化により、磁場閉じ込めプラズマの巨視的平衡と微視的電磁乱流の両方の効果を含む、分極・磁化の表式を導いた[Sugama, et al., Phys. Plasmas 29, 052509 (2022)]。
- ・ヘリカルプラズマにおいて、運動論的電子およびゾーナルフローの効果を取り入れた 2 種類

の簡約化乱流熱輸送モデル(熱拡散係数モデルおよび準線形輸送フラックスモデル)を組み込んだ統合輸送シミュレーションを実行した[Toda, et al., *Pladms Phys. Control. Fusion* 64, 085001 (2022)].これらのモデルは、線形ジャイロ運動論的シミュレーションから得られる結果を用いて、非線形乱流ジャイロ運動論的シミュレーションの結果を短時間で正確に再現するものであり、統合輸送シミュレーションに適用され、LHD のイオン温度勾配(ITG)乱流プラズマにおけるイオン温度・電子温度の定常分布を求めることに成功した。

・最適可数理手法を適用し、数少ない回数の非線形シミュレーション結果を参照することによって、簡約化乱流輸送モデルをより高精度化することが可能となった [Nunami, et al., *Phys. Plasmas* 29, 102505 (2022)]. さらに、小半径方向の背景電場の存在する LHD プラズマにおける線形 ITG モードの大域的ジャイロ運動論的シミュレーションを実行し、準線形輸送フラックスに対する水素イオン同位体効果の評価を行ない、水素イオン同位体質量に対する乱流輸送の依存性が、従来のジャイロボームスケール則よりも実験観測結果に近づくことが確認された [Moritaka, Sugamai, et al., *Nucl. Fusion* 62, 126059 (2022)].

令和5年度：

・ジャイロ運動論的プラズマ電磁乱流の支配方程式を与えるラグランジアン、任意の空間座標変換に対する不変性から、系の局所的な運動量バランス方程式が導出を行った[H. Sugama, *Phys. Plasmas* 31, 042303 (2024)].導出された運動量バランスには、衝突や外部ソースの効果も含まれる。衝突および乱流による運動量輸送を表す対称圧力テンソルが、計量テンソルに対するラグランジアンの汎関数微分によって導かれ、トロイダル磁場の軸対称性や準軸対称性と局所運動量バランス方程式の保存形との関係が明らかにされた。また、WKB 表現を用いて、微視的乱流による運動量輸送を記述する圧力テンソルを詳細に表現し、軸対称系に対して過去の研究で導出されたトロイダル運動量輸送を再現することを確認した。本研究で得られた局所運動量バランス方程式と圧力テンソルは、ジャイロ運動論的シミュレーションによる運動量輸送の定量的評価や精度検証に活用できる。

・ジャイロ運動論的シミュレーションにより、トカマクプラズマにおける ITG 乱流による電子・イオン間のエネルギー交換の定量的評価を行い、ITG 乱流によって、低温のイオンから高温の電子へエネルギーが移されることを示した。

・Contour Dynamics とばれる手法を用いたシミュレーションにより、プラズマ振動のランダウ減衰過程における電場の時間変化と位相空間上の分布関数の構造を解析し、線形解析解との比較を行い、良い一致を確認した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Sugama H.	4. 巻 31
2. 論文標題 Local momentum balance in electromagnetic gyrokinetic systems	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 42303
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0192513	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 H. Sugama	4. 巻 99
2. 論文標題 Trapped Electron Mode	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 J. Plasma Fusion Res.	6. 最初と最後の頁 346-355
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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 Sugama H.、Matsuoka S.、Nunami M.	4. 巻 29
2. 論文標題 Polarization and magnetization in collisional and turbulent transport processes	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 052509 ~ 052509
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0080636	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 Nunami M.、Toda S.、Nakata M.、Sugama H.	4. 巻 29
2. 論文標題 Improved prediction scheme for ion heat turbulent transport	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 102505 ~ 102505
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0103447	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 Toda S, Nunami M, Sugama H	4. 巻 64
2. 論文標題 Prediction of temperature profiles in helical plasmas by integrated code coupled with gyrokinetic transport models	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Plasma Physics and Controlled Fusion	6. 最初と最後の頁 085001 ~ 085001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6587/ac77b8	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 Moritaka T., Sugama H., Cole M.D.J., Hager R., Ku S., Chang C.S., Ishiguro S.	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 ~ 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 S. Matsuoka, H. Sugama, and Y. Idomura	4. 巻 28
2. 論文標題 Neoclassical transport simulations with an improved model collision operator	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 064501-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0047204	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 Sugama H., Matsuoka S., Nunami M., Satake S.	4. 巻 28
2. 論文標題 The Eulerian variational formulation of the gyrokinetic system in general spatial coordinates	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 022312 ~ 022312
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0027905	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 Satake Shinsuke, Nataka Motoki, Pianpanit Theerasarn, Sugama Hideo, Nunami Masanori, Matsuoka Seikichi, Ishiguro Seiji, Kanno Ryutaro	4. 巻 255
2. 論文標題 Benchmark of a new multi-ion-species collision operator for Monte Carlo neoclassical simulation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Computer Physics Communications	6. 最初と最後の頁 107249 ~ 107249
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cpc.2020.107249	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 Nunami M., Nakata M., Toda S., Sugama H.	4. 巻 27
2. 論文標題 Gyrokinetic simulations for turbulent transport of multi-ion-species plasmas in helical systems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 052501 ~ 052501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5142405	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 Toda S., Nunami M., Sugama H.	4. 巻 86
2. 論文標題 Reduced models of turbulent transport in helical plasmas including effects of zonal flows and trapped electrons	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Plasma Physics	6. 最初と最後の頁 1 ~ 16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/S0022377820000495	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 Sugama H., Matsuoka S., Satake S., Nunami M., Watanabe T.-H.	4. 巻 26
2. 論文標題 Improved linearized model collision operator for the highly collisional regime	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 102108 ~ 102108
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5115440	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38件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 22件）

1. 発表者名 H. Sugama
2. 発表標題 Simulation Studies on Neoclassical and Turbulent Transport in Helical Systems
3. 学会等名 20th International Congress on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Sugama
2. 発表標題 Momentum transport in electromagnetic gyrokinetic turbulence
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 洲鎌英雄
2. 発表標題 電磁ジャイロ運動論的プラズマ乱流における圧力テンソルの導出
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第39回年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Nunami
2. 発表標題 Improved Prediction Scheme for Turbulent Transport by Combining Machine Learning and First-Principle Simulation
3. 学会等名 28th IAEA Fusion Energy Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Sugama
2. 発表標題 Polarization and magnetization laws in collisional and turbulent transport processes
3. 学会等名 The 63rd Annual Meeting of the Division of Plasma Physics of the American Physical Society (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Sugama
2. 発表標題 Polarization and magnetization in electromagnetic gyrokinetic turbulence
3. 学会等名 The 30th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Nunami
2. 発表標題 Recent Progress of Simulation Studies on Turbulent Transport of Helical Plasmas
3. 学会等名 The 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 洲鎌英雄
2. 発表標題 一般空間座標における電磁ジャイロ運動論の定式化と運動量バランス
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 洲鎌英雄
2. 発表標題 電磁的プラズマ乱流における分極と磁化のジャイロ運動論的定式化
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第38回年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Sugama
2. 発表標題 The Eulerian variational formulation of the gyrokinetic system in general spatial coordinates
3. 学会等名 The 62nd Annual Meeting of the Division of Plasma Physics of the American Physical Society (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Sugama
2. 発表標題 Derivation of the momentum balance equation for the gyrokinetic system based on the Eulerian variational principle
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 S. Toda
2. 発表標題 Transport simulation directly coupled with gyrokinetic transport models for helical plasmas
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 M. Nunami
2. 発表標題 Pinpoint gyrokinetic simulation for turbulent transport prediction assisted by machine-learning and transport model
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 M. Nunami
2. 発表標題 Turbulence Simulations for Stellarator Plasma Transport
3. 学会等名 30th Summer School and International Symposium on the Physics of Ionized Gases (SPIG2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 洲鎌英雄
2. 発表標題 一般空間座標を用いたジャイロ運動論の変分原理を用いた定式化
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第37回年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 洲鎌英雄
2. 発表標題 静電ジャイロ運動論のオイラー的変分原理による定式化とエネルギー・運動量バランスの導出
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Sugama
2. 発表標題 Improved Linearized Model Collision Operator for Kinetic Plasma Simulation
3. 学会等名 28th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Sugama
2. 発表標題 Improved Linearized Model Collision Operator
3. 学会等名 22nd International Stellarator-Heliotron Workshop (ISHW2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Toda
2. 発表標題 Study on Effects of Zonal Flows and Trapped Electrons on Turbulent Transport by Reduced Models for Helical Plasmas
3. 学会等名 28th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Nunami
2. 発表標題 Particle Balance in Turbulent and Neoclassical Transport of Helical Plasmas
3. 学会等名 22nd International Stellarator-Heliotron Workshop (ISHW2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Toda
2. 発表標題 Reduced Model of Turbulent Transport in Helical Plasmas Including Effects of Zonal Flows and Trapped Electrons
3. 学会等名 22nd International Stellarator-Heliotron Workshop (ISHW2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Nunami
2. 発表標題 Gyrokinetic Simulations for Turbulent Particle Transport of Multi-Species Plasmas in Toroidal Systems
3. 学会等名 9th East-Asia School and Workshop on Laboratory, Space, and Astrophysical Plasmas (EASW9) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Nunami
2. 発表標題 Gyrokinetic turbulence simulation studies on stellarator plasmas
3. 学会等名 11th International Conference on Computational Physics (ICCP11) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 洲鎌英雄
2. 発表標題 変分原理による静電的ジャイロ運動論における運動量バランス方程式の導出
3. 学会等名 日本物理学会, 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 沼波政倫
2. 発表標題 機械学習と第一原理シミュレーションに基づく定量的なプラズマ分布予測
3. 学会等名 日本物理学会, 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 沼波政倫
2. 発表標題 プラズマ分布予測に向けた乱流シミュレーションにおけるフラックスマッチングの研究
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第36回年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐竹真介
2. 発表標題 新古典輸送シミュレーションコードの多粒子プラズマへの拡張
3. 学会等名 日本物理学会, 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Sugama
2. 発表標題 Local Momentum Balance in Electromagnetic Gyrokinetic Turbulence
3. 学会等名 7th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 洲鎌英雄
2. 発表標題 電磁ジャイロ運動論的プラズマ乱流におけるエネルギー・運動量の局所バランス則
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第40回年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Kato, H. Sugama, T.-H. Watanabe, M. Nunami
2. 発表標題 Energy exchange induced by ITG turbulence in weakly collisional plasmas
3. 学会等名 65th Annual Meeting of the Division of Plasma Physics of the American Physical Society (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Kato, H. Sugama, T.-H. Watanabe, M. Nunami
2. 発表標題 Comparison of collisional and turbulent energy exchanges between ions and electrons in tokamak plasmas
3. 学会等名 7th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 K. Maekaku, H. Sugama, T.-H. Watanabe
2. 発表標題 Analysis of the Distribution Function in the Landau Damping Process
3. 学会等名 7th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 加藤鉄志, 洲鎌英雄, 渡邊智彦, 沼波政倫
2. 発表標題 乱流エネルギー交換のジャイロ運動論的非線形・線形シミュレーション結果の相関
3. 学会等名 日本物理学会, 第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 前角弘毅, 洲鎌英雄, 渡邊智彦
2. 発表標題 ランダウ減衰過程における位相空間分布関数の解析
3. 学会等名 日本物理学会, 第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 加藤鉄志, 洲鎌英雄, 渡邊智彦, 沼波政倫
2. 発表標題 微視的乱流のエントロピーバランスと準線形予測の関係
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第40回年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 前角弘毅, 洲鎌英雄, 渡邊智彦
2. 発表標題 ランダウ減衰の Contour Dynamics シミュレーションと線形解析解との比較
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第40回年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 加藤鉄志, 洲鎌英雄, 渡邊智彦, 沼波政倫
2. 発表標題 ITG・TEM乱流による電子イオン間のエネルギー交換
3. 学会等名 日本物理学会, 2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 前角弘毅, 洲鎌英雄, 渡邊智彦
2. 発表標題 ランダウ減衰過程における準線形理論の検証
3. 学会等名 日本物理学会, 2024年春季大会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>研究者情報 https://unit.nifs.ac.jp/research/archives/staff/staff-749?lang=jpn&unit=unit08&paper=SugamaHideo 数値実験炉研究プロジェクト 研究活動 新古典・乱流輸送シミュレーショングループ https://nsrp.nifs.ac.jp/activity/activity04.html</p>

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	松岡 清吉 (Matsuoka Seikichi) (10609986)	核融合科学研究所・研究部・助教 (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	沼波 政倫 (Nunami Masanori) (40397203)	核融合科学研究所・研究部・教授 (63902)	
研究分担者	仲田 資季 (Nakata Motoki) (40709440)	核融合科学研究所・研究部・准教授 (63902)	
研究分担者	登田 慎一郎 (Toda Shinichiro) (60332186)	核融合科学研究所・研究部・准教授 (63902)	
研究分担者	佐竹 真介 (Satake Shinsuke) (70390630)	核融合科学研究所・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	カン ビョンジュン (Kang Byungjun)		
研究協力者	前角 弘毅 (Maekaku Koki)		
研究協力者	加藤 鉄志 (Kato Tetsuji)		

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
---------	---------