

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 7 月 3 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2019

課題番号：16K06941

研究課題名（和文）核融合プラズマ新古典・乱流輸送に対する予測性能の高度化

研究課題名（英文）Improvement of predictability of neoclassical and turbulent transport in fusion plasmas

研究代表者

洲鎌 英雄 (Sugama, Hideo)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授

研究者番号：80202125

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：ドリフト運動論およびジャイロ運動論とよばれる理論モデルの改良とそれに基づくシミュレーションコードの開発およびシミュレーション解析により、磁場閉じ込め核融合プラズマの閉じ込め性能を決定づける新古典・乱流輸送過程の予測精度が向上した。LHD等のプラズマ実験装置における観測結果と理論シミュレーション解析との比較により、同位体効果や不純物輸送の物理機構等の重要課題に対する知見が深まった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

核融合プラズマは将来の基幹エネルギー源として期待され、核融合炉の早期実現にとって、核融合プラズマの輸送過程の理論的解明、予測および制御は極めて重要な研究課題である。本研究で得られた成果は、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精度を向上させ、プラズマ実験結果の解析・予測や高性能プラズマ条件の発見に寄与し、核融合炉の実現に貢献するものである。

研究成果の概要（英文）：Accuracy of simulation analysis for predicting neoclassical and turbulent transport, which determines plasma confinement performance, has been improved by advancing theoretical models called drift kinetics and gyrokinetics and by developing simulation codes based on the models. Comparisons between theoretical and simulation analyses and experimental observations in LHD and other plasma devices have deepened our understanding of critical issues such as physical mechanisms of isotope effects and impurity transport.

研究分野：核融合プラズマ理論

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

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 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、トラス磁場下で荷電粒子が描く複雑な軌道の構造が、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用いた、いわゆる運動論的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、長距離の平均自由行程を持つ荷電粒子のクーロン散乱に起因する新古典輸送と、イオン温度勾配(ITG)モード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する。トラス磁気面を横切る粒子・熱の輸送現象には、乱流機構がより重要であるが、トラス磁気面に沿ったプラズマ回転やブートストラップ電流の決定には新古典機構が重要となり、ドリフトおよびジャイロ運動論[参考文献:洲鎌・渡邊、日本物理学会誌 解説記事(2013年5月)]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。大型ヘリカル装置(LHD)に代表されるヘリカル系プラズマにおける複雑な3次元磁場構造と粒子軌道を扱うため、高度な理論モデルと大規模並列コンピュータを用いたシミュレーション手法が、我々や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てきた。また、本来、軸対称性を有するトカマクや逆転磁場配位プラズマ(RFP)の研究においても、外部摂動や不安定性による非軸対称3次元磁場構造が、プラズマ輸送現象に大きな影響をもたらすことが知られ、摂動磁場により誘起されるトロイダル粘性の計算例のように、ヘリカル系プラズマの理論シミュレーション手法がトカマク等へ応用されるようになってきている[Satake et al., Phys.Rev.Lett (2011)]。我々は、これまでの理論シミュレーション研究により、新古典輸送が低減される磁場配位では、微視的な  $E \times B$  ゾーナルフローが生成されやすくなることによりイオン温度勾配(ITG)乱流輸送が抑制されることを示し[Sugama & Watanabe, Phys.Rev.Lett.(2005); Watanabe et al., Phys.Rev.Lett(2008)]、またジャイロ運動論的ITG乱流シミュレーションによる高イオン温度LHDプラズマ実験における異常イオン熱輸送係数を再現する[Nunami et al., Phys.Plasmas (2013)]等の注目を集める成果を上げてきた。また新古典粒子輸送の両極性条件により決定される巨視的電場が増大することによっても、乱流輸送の低減をもたらすゾーナルフローの生成が促進されること、その結果、輸送係数に対して好ましいイオン同位体効果が現れることを明らかにし[Sugama & Watanabe, Phys.Plasmas (2009); Watanabe et al., IAEA-FEC (2012)]、輸送現象全体を正確に取り扱うためには、電場やプラズマ流等を通して互いに関係しあう新古典輸送機構および乱流輸送機構を同時に考慮した理論シミュレーション研究が重要であることを深く認識したことが、本研究の大きな動機となっている。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、磁場閉じ込め核融合研究の最重要課題の一つであるプラズマ粒子・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・シミュレーションコードを開発することにある。本研究では、複雑な3次元構造を持つ磁場に閉じ込められた高温プラズマにおいてクーロン衝突や微視的不安定性により引き起こされる新古典輸送・乱流輸送現象を扱うため、ドリフトおよびジャイロ運動論を第一原理とする理論シミュレーション解析手法を構築・改良し、理論解析、シミュレーションと実験結果との比較・検証により、その手法・モデリングの高度化を進め、プラズマ性能の改善条件の発見や将来の核融合炉の設計に貢献することを目標とする。

### 3. 研究の方法

本研究では、高精度の運動論モデル、シミュレーションコードおよび解析手法の開発、多種イオンを含むプラズマの新古典輸送過程に対するドリフト運動論的シミュレーションによる巨視的電場、磁気面内の各イオン・電子の流速分布や新古典粘性等の計算、ならびに、多種の不安定モードにより駆動される電子・多種イオン乱流輸送のジャイロ運動論的乱流輸送シミュレーションによる定量的評価を行う。また、乱流輸送シミュレーション結果に基づいて、簡約化輸送モデルを導出し、統合輸送コードへ組み込む。粒子・熱輸送、電場・運動量分布や乱流揺動スペクトル等に関する実験結果との比較により、シミュレーション結果の妥当性を検証し、輸送機構の物理的解釈や理論モデルの改良を進める。

研究代表者(洲鎌)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高度化の研究を担当し、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・応用および実験とシミュレーションの比較を担当する各研究分担者との連携に基づき、理論・シミュレーション・実験結果の比較・検証によるプラズマ輸送機構の解明と予測性能の高度化に向け、研究計画を遂行していく。

### 4. 研究成果

平成28年度:ヘリカル系プラズマにおける新古典輸送に大きな影響を与える  $E \times B$  ドリフトや磁気勾配ドリフトの磁気面接線方向成分を考慮し、シミュレーション時間の短縮に適した保存形局所近似ドリフト運動論的方程式を新たに導出した。高速のトロイダル流が存在するトーラ

スプラズマにおける古典・新古典・乱流輸送を記述するジャイロ運動論に対する新しい定式化を行った。LHD や W7X 等のヘリカル磁場配位に対して、幾つかの異なる局所近似モデルを用いた新古典輸送シミュレーションを行い、新古典輸送に対する ExB ドリフトの効果や各モデルの妥当性を明らかにした。また、高精度の局所近似モデルを用いた新古典輸送シミュレーションにより、LHD 型ヘリカル炉 FFHR-d1 におけるブートストラップ電流分布を予測することに成功した。LHD のようなヘリカル磁場配位およびトカマク配位における捕捉電子不安定モード (TEM) に対する水素イオン同位体効果を調べ、衝突による TEM の安定化および TEM 乱流輸送の抑制が、軽水素に比べて重水素プラズマにおいてより効果的に起こることを明らかにした。JT-60U トカマクや LHD・ヘリオトロン J 等のヘリカル型装置における乱流輸送の解析を行い、それぞれの磁場配位における不安定モード構造やゾーナルフロー生成の差異を明らかにした。複数イオン種 (水素・ヘリウム・炭素) と電子からなる LHD プラズマに対して線形ジャイロ運動論的シミュレーションを実行し、得られた線形成長率と混合長理論を用いてイオン熱輸送係数の評価を行い、ヘリウム濃度の高い場合にイオン熱輸送が小さくなるという実験結果と一致する傾向が確認された。LHD プラズマにおけるイオン温度勾配 (ITG) 乱流のジャイロ運動論的シミュレーション結果に基づくイオン熱輸送係数モデルの拡張を行うことにより、運動論的電子の効果を取り入れた。

平成 29 年度: 変分原理 (ジャイロ運動論的場の理論) に基づき、イオン熱速度程度のトロイダルフローの存在する軸対称トーラスプラズマにおける粒子分布関数と電磁場の支配方程式を導き、拡張されたネーターの定理を用いて衝突の効果を含めた場合の粒子・熱・運動量保存則を導き、それらの保存則には、従来の古典・新古典および乱流輸送フラックスが含まれていることを示した。また新たに非軸対称トーラス系を含む一般的な磁場配位に対するドリフト運動論的方程式が満足する運動量保存則を変分原理により導出した。LHD における多イオン種プラズマ中の不純物イオン粒子輸送過程を新古典輸送シミュレーションにより調べた。準線形ジャイロ運動論解析による不純物イオンの乱流粒子輸送は小半径方向内向きであるが、十分大きな外部モーメントソースが存在すると、両極性粒子拡散条件により、正の小半径方向電場 (電子ルート) が生じ、不純物イオンの新古典粒子輸送が、小半径方向外向きになることが明らかになった。イオン温度勾配 (ITG) モードが不安定な高イオン温度 LHD プラズマに対して、運動論的電子の効果を含めた非線形ジャイロ運動論的シミュレーションを実行し、乱流イオン熱拡散係数を計算した。捕捉電子の効果のため、周辺領域において、ゾーナルフローの減衰時間が減少し、乱流イオン熱輸送は増加することが確認された。乱流イオン熱拡散係数を求めるための計算コストを減らすため、ITG モードの線形不安定解析とゾーナルフローの線形応答解析の結果を用いた乱流イオン熱拡散係数の簡約化モデルを、運動論的電子の効果を含めた場合に拡張した。

平成 30 年度: 一般化空間座標を用いたオイラー的変分原理に基づき、運動論的プラズマの支配方程式系 (Vlasov-Poisson-Ampere system) の導出を行い、空間座標変換に対する作用積分の不変性から、従来の方法よりも直接的に、対称圧力テンソルを含んだ運動量保存則を導いた [H. Sugama, et al., Physics of Plasmas 25, 102506 (2018)]。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より、乱流輸送係数のイオン温度勾配依存性を明らかにした [M. Nunami, et al., Physics of Plasmas 25, 082504 (2018)]。LHD 実験において観測される背景イオン温度分布は ITG モード不安定性の臨界イオン温度勾配値を若干超えたものとなっていることが確認された。運動論的電子の効果を取り入れたジャイロ運動論的シミュレーションの解析結果に基づき、ヘリカル系プラズマにおける乱流粒子輸送およびイオン・電子熱輸送のモデリングを行った [S. Toda, et al., Physics of Plasmas 26, 012510 (2019)]。高イオン温度および低イオン温度の LHD プラズマ放電に対する非線形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フラックスを、少ない計算コストで予測するため、2 種類のモデルを構築した。一方のモデルは、不安定性とゾーナルフロー応答の線形ジャイロ運動論解析結果を用いて、イオンと電子の乱流熱拡散係数を与えるものである (ただし、LHD で観測される平坦な密度分布に対して、粒子輸送係数モデルは誤差が大きくなるため、採用しなかった)。他方のモデルは、線形ジャイロ運動論解析結果より予測されたポテンシャル揺動振幅を用いて準線形フラックスを与えるものであり、イオンと電子の乱流熱フラックスとともに乱流粒子フラックスも予測できる。両モデルの妥当性が、ジャイロ運動論的乱流輸送シミュレーション結果との比較により検証された。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計16件（うち査読付論文 16件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Sugama H., Nunami M., Satake S., Watanabe T.-H.	4. 巻 25
2. 論文標題 Eulerian variational formulations and momentum conservation laws for kinetic plasma systems	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 102506 ~ 102506
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5031155	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 Masanori, Nakata Motoki, Toda Shinichiro, Ishizawa Akihiro, Kanno Ryutaro, Sugama Hideo	4. 巻 25
2. 論文標題 Simulation studies on temperature profile stiffness in ITG turbulent transport of helical plasmas for flux-matching technique	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 082504 ~ 082504
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5036564	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., Nakata M., Nunami M., Ishizawa A., Watanabe T.-H., Sugama H.	4. 巻 26
2. 論文標題 Modeling of turbulent particle and heat transport in helical plasmas based on gyrokinetic analysis	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 012510 ~ 012510
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5058720	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 Shinichiro, NAKATA Motoki, NUNAMI Masanori, ISHIZAWA Akihiro, WATANABE Tomo-Hiko, SUGAMA Hideo	4. 巻 14
2. 論文標題 Transport Simulation for Helical Plasmas by use of Gyrokinetic Transport Model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 3403061 ~ 3403061
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.14.3403061	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 SUGAMA Hideo, the Numerical Simulation Reactor Research Project Group	4. 巻 14
2. 論文標題 Recent Progress in the Numerical Simulation Reactor Research Project	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 3503059 ~ 3503059
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.14.3503059	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 1:9
2. 論文標題 Modern gyrokinetic formulation of collisional and turbulent transport in toroidally rotating plasmas	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Reviews of Modern Plasma Physics	6. 最初と最後の頁 1-73
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s41614-017-0010-5	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 M. Nunami, M. Sato, M. Nakata, S. Toda, H. Sugama, M. Yokoyama, H. Yamaguchi	4. 巻 12
2. 論文標題 Impacts of External Momentum Torque on Impurity Particle Transport in LHD	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1203039-1-3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.12.1203039	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 S. Toda, M. Nakata, M. Nunami, A. Ishizawa, T.-H. Watanabe, H. Sugama	4. 巻 12
2. 論文標題 A Reduced Transport Model for Ion Heat Diffusivity by Gyro-Kinetic Analysis with Kinetic Electrons in Helical Plasmas	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1303035-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.12.1303035	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, M. Nunami, M. Nakata, T.-H. Watanabe	4. 巻 24
2. 論文標題 Conservation laws for collisional and turbulent transport processes in toroidal plasmas with large mean flows	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 020701-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="http://dx.doi.org/10.1063/1.4975075">http://dx.doi.org/10.1063/1.4975075</a>	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 M. Nakata, M. Nunami, H. Sugama, T.-H. Watanabe	4. 巻 118
2. 論文標題 Isotope Effects on Trapped-Electron-Mode Driven Turbulence and Zonal Flows in Helical and Tokamak Plasmas	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 16002-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.118.165002">https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.118.165002</a>	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 M. Nunami, M. Nakata, H. Sugama, K. Tanaka, S. Toda	4. 巻 59
2. 論文標題 Microinstabilities in hydrogen- and helium-dominated multi-ion-species plasmas in LHD	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Plasma Physics and Controlled Fusion	6. 最初と最後の頁 044013-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1088/1361-6587/aa5aa6">https://doi.org/10.1088/1361-6587/aa5aa6</a>	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 A. Ishizawa, Y. Kishimoto, T.-H. Watanabe, H. Sugama, K. Tanaka, S. Satake, S. Kobayashi, K. Nagasaki, Y. Nakamura	4. 巻 57
2. 論文標題 Multi-machine analysis of turbulent transport in helical systems via gyrokinetic simulation	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 066010-1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa6603">https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa6603</a>	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 B. Huang, S. Satake, R. Kanno, H. Sugama, S. Matsuoka	4. 巻 24
2. 論文標題 Benchmark of the local drift-kinetic models for neoclassical transport simulation in helical plasmas	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 022503-1-19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="http://dx.doi.org/10.1063/1.4975611">http://dx.doi.org/10.1063/1.4975611</a>	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 Huang, S. Satake, R. Kanno, H. Sugama, T. Goto	4. 巻 12
2. 論文標題 Benchmark of the Bootstrap Current Simulation in Helical Plasmas	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1203004-1-3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="http://doi.org/10.1585/pfr.12.1203004">http://doi.org/10.1585/pfr.12.1203004</a>	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 J.L. Velasco, I. Calvo, S. Satake, A. Alonso, M. Nunami, M. Yokoyama, M. Sato, T. Estrada, J.M. Fontdecaba, M. Liniers, K.J. McCarthy, F. Medina, B. Ph Van Milligen, M. Ochando, F. Parra, H. Sugama, A. Zhezhera, The LHD Experimental Team, The TJ-II Team	4. 巻 57
2. 論文標題 Moderation of neoclassical impurity accumulation in high temperature plasmas of helical devices	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 016016-1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi:10.1088/0029-5515/57/1/016016	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 M. Nakata, M. Honda, M. Yoshida, H. Urano, M. Nunami, S. Maeyama, T.-H. Watanabe, H. Sugama	4. 巻 56
2. 論文標題 Validation studies of gyrokinetic ITG and TEM turbulence simulations in JT-60U tokamak using multiple flux matching	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 086010-1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi:10.1088/0029-5515/56/8/086010	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35件(うち招待講演 7件/うち国際学会 22件)

1. 発表者名 H. Sugama
2. 発表標題 Gyrokinetic formulation of collisional and turbulent transport processes in toroidal plasmas with large mean flows
3. 学会等名 Max Planck Princeton Center (MPPC) Workshop 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Sugama
2. 発表標題 Recent Progresses in the Numerical Simulation Reactor Research Project
3. 学会等名 The 27th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research & The 13th Asia Pacific Plasma Theory Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Sugama, M. Nunami, S. Satake, and T.-H. Watanabe
2. 発表標題 Eulerian variational formulations and momentum balance equations for kinetic plasma systems
3. 学会等名 The 60th Annual Meeting of the Division of Plasma Physics of the American Physical Society (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Satake, K. Fujita, S. Matsuoka, H. Sugama, and Y. Idomura
2. 発表標題 Development of a Global Neoclassical Transport Simulation for Multi Species Plasmas in Helical Configuration
3. 学会等名 The 27th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research & The 13th Asia Pacific Plasma Theory Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年



1 . 発表者名 S. Toda, M. Nakata, M. Nunami, A. Ishizawa, T.-H. Watanabe, and H. Sugama
2 . 発表標題 Transport simulation in helical plasmas by use of gyrokinetic transport model
3 . 学会等名 The 27th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research & The 13th Asia Pacific Plasma Theory Conference ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 S. Toda, M. Nakata, M. Nunami, A. Ishizawa, T.-H. Watanabe, H. Sugama
2 . 発表標題 Modeling of gyrokinetic turbulent transport in helical plasmas
3 . 学会等名 2nd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics ( 招待講演 ) ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 S. Satake, K. Fujita, S. Matsuoka, Y. Idomura, and H. Sugama
2 . 発表標題 Development of a global neoclassical transport simulation for multi species plasmas in helical configuration
3 . 学会等名 2nd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 M. Nunami, M. Nakata, H. Sugama, M. Yokoyama, M. Sato, S. Toda, and H. Yamaguchi
2 . 発表標題 Kinetic Simulation Studies on Multi-ion-species Plasma Transport in Helical Systems
3 . 学会等名 27th IAEA Fusion Energy Conference ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 洲鎌英雄, 松岡清吉, 佐竹真介, 沼波政倫, 渡邊智彦
2. 発表標題 運動論的シミュレーションに用いる衝突演算子の改良
3. 学会等名 日本物理学会, 第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Sugama
2. 発表標題 Gyrokinetic formulation to derive conservation laws for collisional and turbulent transport of particles, energy, and toroidal momentum
3. 学会等名 7th Asia Pacific Transport Working Group (APTWG2017) International Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Nunami
2. 発表標題 Microinstability and Turbulent Transport of Multi-ion-species Plasmas in Helical System
3. 学会等名 7th Asia Pacific Transport Working Group (APTWG2017) International Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Toda
2. 発表標題 Reduced transport models for the dynamical simulation by the gyro-kinetic analysis with kinetic electrons in helical plasmas
3. 学会等名 7th Asia Pacific Transport Working Group (APTWG2017) International Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 H. Sugama
2. 発表標題 Extension of gyrokinetic field theory
3. 学会等名 1st Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 H. Sugama
2. 発表標題 Pressure Tensors in Magnetized Plasmas
3. 学会等名 21st International Stellarator-Heliotron Workshop (ISHW2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Nunami
2. 発表標題 Simulation studies for neoclassical and turbulent transport of impurities in LHD plasmas
3. 学会等名 21st International Stellarator-Heliotron Workshop (ISHW2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Satake, S. Satake, M. Sato, M. Yokoyama, H. Sugama, S. Nishimura, K. Nishioka, Y. Nakamura, J. L. Velasco, I. Calvo, and the LHD team
2. 発表標題 Benchmark of bootstrap current calculations in multi-ion species helical plasmas
3. 学会等名 21st International Stellarator-Heliotron Workshop (ISHW2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1 . 発表者名 S. Toda
2 . 発表標題 Reduced model for electron and ion heat diffusivities by gyro-kinetic simulation with kinetic electrons in helical plasmas
3 . 学会等名 59th Annual Meeting of the Division of Plasma Physics of the American Physical Society (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 H. Sugama
2 . 発表標題 Derivation of pressure tensors based on the variational principle
3 . 学会等名 26th International Toki Conference - New era in Plasma and Fusion Research - and 11th Asia Plasma and Fusion Association Conference (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 M. Nunami
2 . 発表標題 Simulation studies for neoclassical and turbulent transport of impurities in LHD plasmas
3 . 学会等名 26th International Toki Conference - New era in Plasma and Fusion Research - and 11th Asia Plasma and Fusion Association Conference (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 S. Satake, M. Sato, M. Yokoyama, H. Sugama, S. Nishimura, K. Nishioka, Y. Nakamura, J. L. Velasco, and I. Calvo
2 . 発表標題 Benchmark of bootstrap current calculations in multi-ion species helical plasmas
3 . 学会等名 26th International Toki Conference - New era in Plasma and Fusion Research - and 11th Asia Plasma and Fusion Association Conference (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Toda
2. 発表標題 Reduced models for turbulent transport by gyro-kinetic simulation with kinetic electron in helical plasmas
3. 学会等名 26th International Toki Conference - New era in Plasma and Fusion Research - and 11th Asia Plasma and Fusion Association Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 洲鎌英雄
2. 発表標題 新古典乱流輸送の理論シミュレーション研究
3. 学会等名 Plasma Conference 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 沼波政倫, 仲田資季, 佐藤雅彦, 登田慎一郎, 洲鎌英雄, 横山雅之, 山口裕之
2. 発表標題 複数粒子種プラズマ輸送の運動論的シミュレーション研究
3. 学会等名 Plasma Conference 2017 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 洲鎌英雄, 沼波政倫, 仲田資季, 佐竹真介, 菅野龍太郎, 渡邊智彦
2. 発表標題 ドリフト運動論における運動量バランス方程式の変分原理による導出
3. 学会等名 日本物理学会, 第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 沼波政倫, 仲田資季, 登田慎一郎, 洲鎌英雄
2. 発表標題 不純物粒子輸送のジャイロ運動論的シミュレーション研究
3. 学会等名 日本物理学会, 第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Sugama
2. 発表標題 Gyrokinetic theory of collisional and turbulent transport in toroidal plasmas
3. 学会等名 Joint 13th Asia Pacific Physics Conference and 22nd Australian Institute of Physics Congress (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 M. Nunami
2. 発表標題 Anomalous and Neoclassical Transport of Hydrogen Isotope and Impurity Ions in LHD Plasmas
3. 学会等名 26th IAEA Fusion Energy Conference (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 洲鎌英雄, 沼波政倫, 仲田資季, 渡邊智彦
2. 発表標題 ジャイロ運動論的場の理論に基づく衝突・乱流輸送過程におけるトロイダル運動量保存則の導出
3. 学会等名 日本物理学会, 第72回年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 仲田資季, 沼波政倫, 洲鎌英雄, 渡邊智彦
2. 発表標題 ヘリカルおよびトカマクプラズマにおける捕捉電子モード駆動乱流輸送の同位体質量効果
3. 学会等名 日本物理学会, 第72回年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 沼波政倫, 仲田資季, 佐藤雅彦, 洲鎌英雄, 横山雅之
2. 発表標題 不純物イオンを含むヘリカル・プラズマの運動論的輸送シミュレーション
3. 学会等名 日本物理学会, 第72回年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Botsz HUANG, 佐竹真介, 菅野龍太郎, 洲鎌英雄, 後藤拓也
2. 発表標題 Benchmark of the bootstrap current simulation in helical plasmas
3. 学会等名 日本物理学会, 第72回年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 登田慎一郎, 仲田資季, 沼波政倫, 石澤明宏, 渡邊智彦, 洲鎌英雄
2. 発表標題 ヘリカルプラズマにおける運動論的電子を用いたジャイロ運動論解析による簡約化輸送モデル構築
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第33回年会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 渡邊智彦, 前山伸也, 西岡賢二, 仲田資季, 沼波政倫, 洲鎌英雄
2. 発表標題 ジャイロ運動論的シミュレーション・コードGKVの現況と今後の拡張
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第33回年会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 沼波政倫, 仲田資季, 洲鎌英雄
2. 発表標題 ヘリカル系における多イオン種プラズマの乱流輸送シミュレーション
3. 学会等名 日本物理学会, 2016年秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 登田慎一郎, 仲田資季, 沼波政倫, 石澤明宏, 渡邊智彦, 洲鎌英雄
2. 発表標題 ヘリカルプラズマにおける電磁的ジャイロ運動論解析による簡約化輸送モデル構築
3. 学会等名 第11回核融合エネルギー連合講演会
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

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 <a href="http://nsrp.nifs.ac.jp/activity/activity04.html">http://nsrp.nifs.ac.jp/activity/activity04.html</a> 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 <a href="http://nsrp.nifs.ac.jp/activity/activity04.html">http://nsrp.nifs.ac.jp/activity/activity04.html</a> プレスリリース：イオン質量による乱流抑制のメカニズムを解明 <a href="http://www.nifs.ac.jp/press/170410.html">http://www.nifs.ac.jp/press/170410.html</a> 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 <a href="http://nsrp.nifs.ac.jp/activity/activity04.html">http://nsrp.nifs.ac.jp/activity/activity04.html</a>
--



## 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	佐竹 真介  (Satake Shinsuke)  (70390630)	核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授    (63902)	
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)	
研究分担者	登田 慎一郎  (Toda Shinichiro)  (60332186)	核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授    (63902)	