

令和 6 年 6 月 14 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：20K03892

研究課題名（和文）プラズマ乱流マルチスケール相互作用の一般化Langevin描像

研究課題名（英文）Generalized Langevin description of multi-scale interactions in plasma turbulence

研究代表者

前山 伸也（Maeyama, Shinya）

核融合科学研究所・研究部・准教授

研究者番号：70634252

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、大規模数値シミュレーションや国際共同ベンチマークを通じて、異なるスケール間の乱流非線形相互作用のメカニズムを明らかにした。特に、磁場閉じ込め核融合プラズマにおける乱流輸送抑制効果を発見するとともに、異なるスケールの乱流間の相互阻害性や実効的非等方散逸としての電子スケール効果などを解明した。さらに、統計的データ解析手法としての射影演算子法を開発し、コヒーレントな相関項と無相関項による確率的駆動という一般化Langevin描像を示した。乱流・帯状流間相互作用解析に応用することで数値シミュレーションデータに基づく裏付けを示した。開発したコードはオープンソースとして公開した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、プラズマ乱流のマルチスケール相互作用を詳細に解明し、統計的データ解析手法としての射影演算子法を開発・応用したことにより、プラズマ物理学の理解を進展させた。特に、磁場閉じ込め核融合プラズマにおける乱流輸送抑制効果や、異なるスケールの乱流間の相互阻害性を明らかにしたことは、核融合研究におけるブレークスルーである。これにより、将来的な核融合炉の設計や運用における乱流制御技術の向上が期待される。さらに、開発された射影演算子法のオープンソース化により、多くの研究者が利用可能となり、プラズマ乱流研究のさらなる発展が促進されることが期待される。

研究成果の概要（英文）：This study elucidated the mechanisms of nonlinear interactions between different scales of turbulence through large-scale numerical simulations and international benchmarks. Specifically, it discovered turbulence transport suppression effects in magnetically confined fusion plasmas and clarified the mutually exclusive nature and anisotropic dissipation effects at different scales. Additionally, the projection operator method was developed as a statistical data analysis tool. The method was applied to turbulence-zonal flow interaction analysis, demonstrating the generalized Langevin description with correlated and uncorrelated terms. The developed code was released as open-source.

研究分野：プラズマ物理

キーワード：プラズマ乱流 マルチスケール相互作用 射影演算子法 一般化Langevinモデル 磁場閉じ込め核融合

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

プラズマ乱流は、核融合研究において重要な課題の一つであり、プラズマ中で発生する乱流が熱や粒子の輸送に大きな影響を与えることが知られている。特に、大小様々なスケールの乱流が相互作用し、プラズマの安定性や閉じ込め効率を左右することが近年の研究で明らかになってきた。従来の研究では、個々のスケールでの乱流の挙動は詳細に研究されていたが、異なるスケール間の相互作用についてはまだ十分に解明されていなかった。スーパーコンピュータを用いた大規模数値シミュレーションの進展により、広範なスケールにわたる乱流の相互作用を解析することが可能となり、新たな知見が得られるようになってきた。

本研究課題では、プラズマ物理学、非平衡統計力学、およびデータ科学を組み合わせたアプローチを用いた。独自の着眼点として、プラズマ乱流のマルチスケール相互作用を異なるスケールの乱流間の相関問題として捉え、先行研究で開発された射影演算子法を応用・拡張することで、マルチスケール相互作用をコヒーレントな相関項と確率的な無相関項として表現する一般化 Langevin 描像として体系化することを目指して研究を行った。

2. 研究の目的

本研究の目的は、プラズマ乱流のマルチスケール相互作用を詳細に解明し、そのメカニズムを一般化 Langevin 描像として体系化することである。具体的には、以下の目標を達成することを目指した。

(1) 数値シミュレーションによるマルチスケール相互作用の検証

(2) プラズマ乱流の一般化 Langevin 描像の構築

異なるスケール間での乱流非線形相互作用のメカニズムを明らかにし、射影演算子法を用いてコヒーレントな相関項と確率的な無相関項に分離して解析する。

(3) 射影演算子法の応用と拡張

3. 研究の方法

本研究では、プラズマ乱流のマルチスケール相互作用を解明するために、以下の方法を用いた。

(1) 数値シミュレーションによるマルチスケール相互作用の詳細分析

① スーパーコンピュータを用いた大規模数値シミュレーションを実施し、磁場閉じ込め核融合プラズマにおけるマルチスケール乱流の研究を行った。

② 国際共同研究を通じて、マルチスケール相互作用のベンチマークを行い、その整合性を確認した。

(2) プラズマ乱流の一般化 Langevin 描像の構築と解析

① マルチスケール相互作用に関する理論モデルの構築を行った。

② 蔵本-Sivashinsky 乱流や、長谷川-若谷ドリフト波乱流系における乱流非線形相互作用の数値データを用い、射影演算子法に基づく一般化 Langevin 描像の適用性を検証した。

(3) 射影演算子法の応用と拡張

① 1対1射影に基づく従来の手法を改良し、多変数射影演算子法を開発した。

② 射影演算子法と自己回帰分析との比較研究を行い、統計的データ解析手法としての有効性を評価した。

③ 統計的データ解析手法としての射影演算子法を整理し、オープンソースコードとして公開した。

4. 研究成果

本研究プロジェクト得られた主要な研究成果について、研究項目別に記載する。

(1) 数値シミュレーションによるマルチスケール相互作用の詳細分析

① 大規模数値シミュレーション:

スーパーコンピュータを用いて磁場閉じ込め核融合プラズマにおけるマルチスケール乱流の詳細な研究を実施し、乱流の輸送抑制効果を発見した。図 1 に大規模数値シミュレーションにおける電子熱輸送フラックスと電子・イオン温度比依存性を示す。この解析においては、長波長および短波長側に捕捉電子モードおよび電子温度勾配不安定性と呼ばれる微視的不安定性が存在し、これによって自発的に乱流揺らぎが駆動される。線形理論に基づく不安定性の性質から、電子温度が低い側では短波長の電子温度勾配不安定性が支配的となり、温度が高くなると長波長の捕捉電子モードが支配的となる。そのため、 $T_e/T_i = 1$ ではマルチスケール計

算と電子スケール計算が一致し、逆に $T_e/T_i=4$ ではマルチスケール計算とイオンスケール計算が一致していることが見て取れる。興味深いことに、両者が共存する $T_e/T_i=3$ でマルチスケール相互作用の影響が見られ、イオンスケール計算に比べてマルチスケールシミュレーションにおける輸送が低減されていることが分かる。このことは、電子スケール乱流との相互作用によりイオンスケール乱流が抑制されていることを示しており、電子熱輸送が低減される温度領域が存在することを発見された[Maeyama (2022)]。さらに、こうしたマルチスケール相互作用による乱流輸送抑制効果が実際の実験的平衡配位においても存在していることを示した[Xu (2024)]。

② 国際共同研究とベンチマーク

マルチスケール解析では、その数値シミュレーションコストの高さからベンチマークはこれまで行われていなかった。しかし、欧州との国際共同研究を通じてマルチスケール乱流のベンチマークを行い、マルチスケール乱流による電子スケール乱流の抑制効果の高品質シミュレーションにおける整合性を確認した[Citrin (2022)]。さらに、これまでのマルチスケール乱流研究を包括的にレビューし、異なるスケールの乱流間の相互阻害性という理解を新たに提案するオーバービュー論文を国際共著でまとめた[Maeyama (2024)]。

(2) プラズマ乱流の一般化 Langevin 描像の構築と解析

① マルチスケール相互作用に関する理論モデルの構築

マルチスケール乱流相互作用、特にイオンスケール乱流に対する電子スケール乱流の寄与のモデル化に取り組み、準線形理論に基づいて電子スケールからの効果を実効的非等方拡散過程としてモデル化する理論を構築した。さらに、シミュレーションデータに基づいて、電子スケール乱流存在下でのイオンスケール乱流の成長率の低減からこの拡散係数を見積もり、拡散モデルとしてイオンスケール乱流シミュレーションに組み込むことで、イオンスケール乱流の低減が定性的に再現されることを確認した[Xu (2024)]。

② 射影演算子法に基づく一般化 Langevin 描像

射影演算子法の磁化プラズマ乱流への利用例として、長谷川-若谷ドリフト波乱流への適用を行った。乱流から帯状流に対する非線形相互作用項に射影演算子法を適用することで、帯状流に対して相関・無相関部分に分離した。図2に、帯状流 Fourier 係数の時間発展に対する非線形項の相関的寄与を記述する記憶関数を示す。記憶関数は正の実数であり、帯状流の変動に比べて短い記憶時間を持つことから、実効的には減衰項として機能することが示された。加えて、無相関項が帯状流の確率的駆動として働くことが揺動振幅の再現性テストにより確認された。さらに、プラズマパラメータを変えた記憶項の評価を多数実施し、記憶関数の振幅は非線形項の振幅（～乱流揺動振幅）に依存し、記憶関数の時定数は帯状流と乱流の特徴時間からの見積もりと同程度のスケールリングとなることを見出した。以上の結果は、乱流と帯状流が共存する準定常乱流において、両者の相互作用を一般化 Langevin 描像として捉える新しい見方を提供する成果である。

超大規模計算を必要とする電子・イオンマルチスケール乱流シミュレーションへの射影演算子法の適用までは至らなかったが、前述の実効的非等方拡散過程としてのマルチスケール相互作用のモデル化と、後述の射影演算子法に基づく記憶項の働きは対応しており、両者は整合的にプラズマ乱流マルチスケール相互作用の一般化 Langevin 描像を支持する。

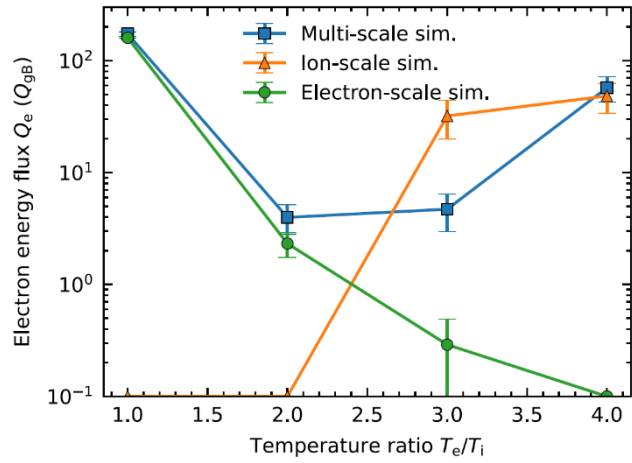


図1. 電子熱輸送フラックス Q_e の電子・イオン温度比 T_e/T_i 依存性。四角青点、三角橙点、丸緑点はそれぞれマルチスケール、イオン単一スケール、電子単一スケールの数値シミュレーション結果。[Maeyama (2022)より引用]

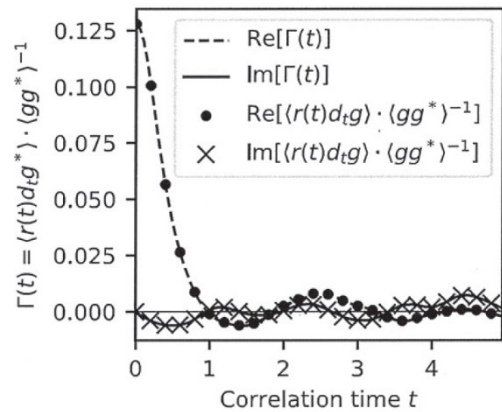


図2. 乱流-帯状流非線形相互作用に対して射影演算子法を適用して得られた記憶関数 $\Gamma(t)$ を示す。同時に、一般化第二種揺動散逸定理として成り立つ関係式を丸およびバツ印でプロットしている。[Maeyama (2023)より引用]

(3) 射影演算子法の応用と拡張

① 射影演算子法解析手法の拡張

1対1射影に基づく従来の手法を拡張し、多変数射影および離散時間射影についても解析が行えるように新たに拡張を行った。特に、任意の説明変数に対しても成り立つ形での定式化を整理し、解析コードの検証にも用いられる形での一般化第2種揺動散逸定理を新たに示した。

② 統計的データ解析手法の評価

統計数理分野で用いられる類似した時系列データ解析手法である構造ベクトル自己回帰モデルとの比較を行った。射影演算子法は任意の説明変数に対する定式化が可能であり、構造ベクトル自己回帰モデルよりも広い適用範囲を持つことを示した。また、説明変数として自己回帰型を用いた場合は、構造ベクトル自己回帰モデルと同等の相関を抽出可能であることを示した[Maeyama (2023)]。

③ オープンソースコードの公開

本研究課題で開発された多変数および連続時間または離散時間に対する射影演算子法の統計的時系列データ解析コードをオープンソースとして公開した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件 / うち国際共著 5件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 前山伸也, 三分一史和	4. 巻 71
2. 論文標題 射影演算子法による統計的時系列データ解析とその応用	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 統計数理	6. 最初と最後の頁 25-45
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 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 Xu Shaokang, Maeyama S., Watanabe T.-H.	4. 巻 64
2. 論文標題 Multi-scale gyrokinetic simulations of JT-60U L-mode plasma: reduction of the ion scale energy loss due to the nonlinear coupling with the electron scale turbulence	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 036014 - 036014
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/ad1f0c	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 Maeyama Shinya, Tokuzawa Tokihiko, Howard Nathan T, Citrin Jonathan, Watanabe Tomo-Hiko	4. 巻 -
2. 論文標題 Overview of multiscale turbulence studies covering ion-to-electron scales in magnetically confined fusion plasma	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/ad34e1	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 Maeyama Shinya, Watanabe Tomo-Hiko, Nakata Motoki, Nunami Masanori, Asahi Yuuichi, Ishizawa Akihiro	4. 巻 13
2. 論文標題 Multi-scale turbulence simulation suggesting improvement of electron heated plasma confinement	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 3166
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-022-30852-0	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 Citrin J., Maeyama S., Angioni C., Bonanomi N., Bourdelle C., Casson F.J., Fable E., Goerler T., Mantica P., Mariani A., Sertoli M., Staebler G., Watanabe T.	4. 巻 62
2. 論文標題 Integrated modelling and multiscale gyrokinetic validation study of ETG turbulence in a JET hybrid H-mode scenario	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 086025 ~ 086025
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/ac7535	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 Maeyama S., Kusaka S., Watanabe T.-H.	4. 巻 28
2. 論文標題 Effects of ion polarization and finite- on heat transport in slab electron-temperature-gradient driven turbulence	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 052512 ~ 052512
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0044435	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 Maeyama Shinya, Sasaki Makoto, Fujii Keisuke, Kobayashi Tatsuya, Dendy Richard O, Kawachi Yuichi, Arakawa Hiroyuki, Inagaki Shigeru	4. 巻 23
2. 論文標題 On the triad transfer analysis of plasma turbulence: symmetrization, coarse graining, and directional representation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 New Journal of Physics	6. 最初と最後の頁 43049
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1367-2630/abeffc	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 Asahi Yuuichi, Fujii Keisuke, Heim Dennis Manuel, Maeyama Shinya, Garbet Xavier, Grandgirard Virginie, Sarazin Yanick, Dif-Pradalier Guilhem, Idomura Yasuhiro, Yagi Masatoshi	4. 巻 28
2. 論文標題 Compressing the time series of five dimensional distribution function data from gyrokinetic simulation using principal component analysis	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 012304 ~ 012304
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0023166	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 SHIMOMURA Kazuya、WATANABE Tomohiko、MAEYAMA Shinya、ISHIZAWA Akihiro	4. 巻 15
2. 論文標題 Structure of the Electron Distribution Function and Induced Beam Instability in Collisionless Magnetic Reconnection with a Strong Guide Field	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1401084 ~ 1401084
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.15.1401084	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39件 (うち招待講演 7件 / うち国際学会 15件)

1. 発表者名 S. Maeyama
2. 発表標題 Cross-scale interactions between trapped electron mode and electron-temperature-gradient driven turbulence
3. 学会等名 7th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPs-DPP2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 S. Maeyama, N.T. Howard, J. Citrin, T.-H. Watanabe, T. Tokuzawa
2. 発表標題 Overview of multi-scale turbulence studies covering ion to electron scales in magnetically confined fusion plasma
3. 学会等名 29th IAEA Fusion Energy Conference (FEC2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 前山伸也
2. 発表標題 核燃焼プラズマにおけるマルチスケール乱流相互作用
3. 学会等名 プラズマシミュレーションポジウム2023 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 前山伸也, 本多充, 成田絵美, 登田慎一郎
2. 発表標題 マルチフィデリティデータ融合手法を用いた乱流輸送モデリング
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 前山伸也
2. 発表標題 マルチフィデリティガウス過程回帰のプラズマ輸送モデリングへの応用
3. 学会等名 統計数理研究所共同研究集会「諸科学における統計思考」
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 前山伸也
2. 発表標題 非線形自己回帰ガウス過程回帰を用いたプラズマ乱流輸送モデリング
3. 学会等名 情報・システム研究機構 (ROIS) 戦略的研究プログラム2023年度シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 前山伸也
2. 発表標題 原型炉級プラズマにおけるマルチスケール乱流輸送シミュレーション
3. 学会等名 第40回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 前山伸也, 本多充, 成田絵美
2. 発表標題 非線形自己回帰Gauss過程回帰の乱流輸送モデリングへの応用
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 弓削武龍, 前山伸也, 渡邊智彦
2. 発表標題 ドリフト波乱流 - 帯状流の相互作用の2成分射影演算子法による解析
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 弓削武龍, 前山伸也, 渡邊智彦
2. 発表標題 帯状流からドリフト波乱流への動的寄与の射影演算子法による解析
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 S. Maeyama
2. 発表標題 Multi-scale plasma turbulence simulations with the gyrokinetic simulation code GKV
3. 学会等名 The Platform for Advanced Scientific Computing Conference 2022 (PASC22) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 前山伸也, 渡邊智彦
2. 発表標題 電子温度勾配不安定性に対するイオンBernstein波の影響の検討
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 前山伸也, 渡邊智彦
2. 発表標題 電子・イオン系マルチスケール乱流シミュレーション
3. 学会等名 第39回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 前山伸也
2. 発表標題 多変数射影演算子法に基づくサブグリッドスケール項の評価とモデリング
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Maeyama, T.-H. Watanabe
2. 発表標題 New algorithm for solving sheared flows in local flux-tube gyrokinetic simulations
3. 学会等名 27th International Conference on Numerical Simulations of Plasmas (ICNSP2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 前山伸也, 三分一史和
2. 発表標題 射影演算子法による統計的時系列データ解析とその応用
3. 学会等名 統計数理研究所共同研究集会「諸科学における統計思考」
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Maeyama
2. 発表標題 Cross-scale interactions between ion and electron-scale turbulence in magnetized plasmas
3. 学会等名 JPP Frontiers of Plasma Physics Colloquium (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Maeyama, T.-H. Watanabe, M. Nakata, M. Nunami, Y. Asahi, A. Ishizawa
2. 発表標題 Gyrokinetic Simulations of Cross-Scale Interactions between Electron Temperature Gradient and Trapped Electron Modes on the Supercomputer Fugaku
3. 学会等名 30th International Toki Conference (ITC30) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Maeyama
2. 発表標題 Exploring multi-scale turbulent interactions in high electron temperature burning plasma
3. 学会等名 5th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPs-DPP2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1 . 発表者名 S. Maeyama, and T.-H. Watanabe
2 . 発表標題 Cross-Scale Interactions Between Trapped-Electron-Mode and Electron-Temperature-Gradient-Mode Turbulence
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 S. Maeyama
2 . 発表標題 Gyrokinetic simulations of multi scale turbulence on the supercomputer Fugaku
3 . 学会等名 IFERC Workshop on GPU Programming 2021 (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 S. Maeyama, and T.-H. Watanabe
2 . 発表標題 Generalized Langevin picture of turbulence and zonal flow interactions by means of the projection operator method
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 S. Maeyama, and T.-H. Watanabe
2 . 発表標題 Multi-scale simulations of trapped electron mode and electron temperature gradient mode turbulence on the supercomputer Fugaku
3 . 学会等名 Joint workshop of Asia-Pacific Transport Working Group and US-EU Transport Task Force 2021 (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Maeyama, M. Sasaki, K. Fujii, T. Kobayashi, R. O. Dendy, Y. Kawachi, H. Arakawa, S. Inagaki
2. 発表標題 Symmetrization and directional representation of nonlinear triad interactions in plasma turbulence
3. 学会等名 25th Joint EU-US Transport Task Force (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 前山伸也, 美澤めぐみ, 渡邊智彦
2. 発表標題 射影演算子法によるプラズマ乱流相互作用の抽出
3. 学会等名 プラズマシミュレーションシンポジウム2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 前山伸也, 渡邊智彦
2. 発表標題 スーパーコンピュータ「富岳」を用いた補足電子モードと電子温度勾配モードのマルチスケール乱流シミュレーション
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 前山伸也
2. 発表標題 三波エネルギー伝達関数の対称化と有向表現
3. 学会等名 日本流体力学会年会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 前山伸也, 渡邊智彦, 仲田資季, 沼波政倫, 石澤明宏, 朝比祐一
2. 発表標題 局所ジャイロ運動論シミュレーションにおける背景シア流の新数値解法
3. 学会等名 第38回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Maeyama, M. Misawa, T.-H. Watanabe
2. 発表標題 Mori-Zwanzig projection operator method as a statistical correlation analysis of time-series data
3. 学会等名 4th IAEA Technical Meeting on Fusion Data Processing, Validation and Analysis (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Maeyama
2. 発表標題 Mori-Zwanzig projection operator method as a statistical analysis of multivariate time-series data
3. 学会等名 PiAI seminar: Physics informed AI in Plasma Science (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 前山伸也, 渡邊智彦, 仲田資季, 沼波政倫, 朝比祐一, 石澤明宏
2. 発表標題 核燃焼プラズマにおける乱流輸送現象のマルチスケール性
3. 学会等名 「富岳」成果創出プログラム研究交流会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 前山伸也, 渡邊智彦, 仲田資季, 沼波政倫, 石澤明宏, 朝比祐一
2. 発表標題 回転フラックスチューブによる背景シア流下の局所乱流シミュレーション
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 前山伸也
2. 発表標題 核燃焼プラズマに向けたマルチスケール乱流輸送現象の外挿性
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 前山伸也, 渡邊智彦, 仲田資季, 沼波政倫, 石澤明宏, 朝比祐一
2. 発表標題 回転フラックスチューブ座標を用いたGKVシミュレーション
3. 学会等名 「富岳」成果創出加速プログラム核燃焼プラズマ閉じ込め物理の開拓2021年度成果報告会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Maeyama
2. 発表標題 Toward a systematic understanding of multi-scale interactions between ion and electron-scale turbulence
3. 学会等名 4th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPs-DPP2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 前山伸也, 佐々木真, 藤井恵介, 小林達哉, R. O. Dendy, 河内裕一, 荒川弘之, 稲垣滋
2. 発表標題 三つ組み相互作用によるエネルギー伝達の対称化と有向表現
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 前山伸也, 渡邊智彦
2. 発表標題 射影演算子法を用いた長谷川 - 若谷プラズマ乱流相互作用の解析
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 前山伸也
2. 発表標題 射影演算子法による時系列データ統計解析とその一般化Langevin描像
3. 学会等名 統計数理研究所共同研究会「諸科学における大規模データと統計数理モデリング」
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 美澤めぐみ, 前山伸也, 渡邊智彦
2. 発表標題 射影演算子法による帯状流とドリフト波乱流の相互作用に関する解析
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Shinya Maeyama's homepage https://smaeyama.net/ GitHub - smaeyama/triadgraph https://github.com/smaeyama/triadgraph GitHub - smaeyama/mzprojection https://github.com/smaeyama/mzprojection GyroKinetic Vlasov simulation code: GKV https://www.p.phys.nagoya-u.ac.jp/gkv/ BPP 核燃焼プラズマ閉じ込め物理の開拓 「富岳」成果創出加速プログラム https://www.p.phys.nagoya-u.ac.jp/bpp/

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			
オランダ	DIFFER			
イタリア	University of Milano-Bicocca			
ドイツ	Max Planck Institute for Plasma Physics			
フランス	フランス原子力庁			
米国	Massachusetts Institute of Technology			
中国	Southwestern Institute of Physics			