

令和 2 年 6 月 5 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14424

研究課題名（和文）局所構造およびパリティの観点から紐解くプラズマ乱流のマルチスケール相互作用

研究課題名（英文）Multi-scale interactions in plasma turbulence from viewpoints of localized structures and their parity

研究代表者

前山 伸也 (Maeyama, Shinya)

名古屋大学・理学研究科・講師

研究者番号：70634252

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,900,000円

研究成果の概要（和文）：宇宙や核融合装置などで観測される磁場閉じ込めプラズマでは、密度・温度勾配を駆動源とする微視的不安定性が存在し、電磁場の揺らぎを伴う乱流を作り出す。本課題では、大きく質量の異なる電子とイオンの運動に起因する異なるスケールの乱流間のマルチスケール相互作用の物理メカニズムについて理論・数値シミュレーションを用いて研究を行った。その結果、長波長のイオンスケール不安定においても、運動論的電子の効果により短波長の局所構造が作られ、極短波長の電子スケール不安定性と相互作用することが示された。これは、異なるパリティを持つイオンスケール不安定性についても同様であり、マルチスケール相互作用の普遍性が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

プラズマ乱流研究の文脈の下で、電子・イオンスケール乱流間の相互作用はその解析の難しさ故に未解決のまま取り残されてきた。本研究では、乱流を駆動する微視的不安定性の多様性に着目したシミュレーション研究を実施した。イオンスケールの局所電流シート構造を破壊することで極微細スケールの電子スケール乱流が卓越するという、非自明な結果が得られ、申請者らの先行研究との比較からマルチスケール相互作用の普遍的性質が示唆された。その学術的成果は、乱流輸送の予測・評価が装置設計を左右しうる核融合学への貢献、人工衛星観測により多階層・電子スケール物理の研究が進む宇宙物理学への示唆などへの波及効果が期待できる。

研究成果の概要（英文）：In magnetically confined plasma observed in space and fusion devices, density and temperature gradients drive micro-instabilities and turbulence governed by electromagnetic fluctuations. This research studies physical mechanisms of multi-scale interactions between large ion-scale and small electron-scale turbulence by means of theory and numerical simulations. We clarified the generation of short-wavelength localized structures by kinetic electron effects in ion-scale instabilities, which effectively interact with the extremely short-wavelength electron-scale instabilities. It is revealed that the mechanism is valid even in ion-scale instabilities having different parity. The results suggest the commonality and generic features of multi-scale interactions.

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

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

磁化プラズマ中では密度・温度勾配といった熱力学的力を駆動源とする微視的不安定性が存在し、複雑な乱流揺動を作りだす。流体力学とのアナロジーとしてのエネルギーカスケードや、太陽風乱流における加熱問題、核融合プラズマにおける熱輸送問題など、プラズマ乱流は複数の学術分野に関わる興味深い物理現象である。先行研究によれば、電子回旋半径($r_{e} \sim 0.1\text{mm}$)スケールでは電子温度勾配モード乱流[Jenko(2000)]、イオン回旋半径($r_{i} \sim 1\text{cm}$)スケールではイオン温度勾配モード乱流が支配的と考えられており、また JT-60SA や ITER の様な次世代核融合装置ではプラズマの高圧化(高ベータ化)や大型化に伴い、イオンスケールでのマイクロティアリングモード乱流の顕在化が予想されている[Hatch(2016)]。こうした従来の研究はスケール分離の仮定に基づいた単一スケール解析であり、両スケール間の相互作用については長らく保留されてきた。

こうしたスケール分離の仮定を直接に検証しようという動きが、マルチスケール乱流シミュレーション研究である。初期的な試みは8年ほど前に米国と欧州で行われ、計算資源を削減するため“人為的に”低いイオン・電子質量比を用いた数値解析により、イオン温度勾配モード乱流が電子温度勾配モード乱流を抑制する可能性が示唆された[Candy(2007), Gorler(2008)]。近年、申請者らはより現実的なスケールを与える実質量比のマルチスケール乱流シミュレーションを世界に先駆けて実現し[Maeyama(2014)]、大きくスケールの離れた実質量比の場合でもスケール間相互作用が起こること、イオン温度勾配モードが中立安定に近い場合には電子スケール乱流の影響でイオンスケール乱流揺動が増大するなどの革新的な結果を示し、その物理機構を明らかにした[Maeyama(2015)]。また、申請者らと同時期に米国で行われた実験との比較研究では、実験で観測された熱輸送を無矛盾に説明するために、実質量比のマルチスケール乱流解析が不可欠であるとの報告もあり[Howard(2016)]、マルチスケール乱流解析の重要性の認識は急速に高まっている。

しかしながら、計算コストが極めて高いマルチスケール乱流解析は事例が少なく、現在のところイオン温度勾配モードと電子温度勾配モードの間の相互作用解析のみに留まっており、異なる不安定性の場合にマルチスケール相互作用の有無は報告されていなかった。また、申請者らの成果[Maeyama(2015)]により、物理機構の一端は明らかとなったが、マルチスケール相互作用の包括的理解は未だ不十分であった。こうした背景を受けて、新たにマイクロティアリングモードと電子温度勾配モードのスケール間相互作用の解析を行うことで、マルチスケール乱流解析の適用事例を拡張するとともにスケール間相互作用の多角的理解が得られるとの着想を得た。

2. 研究の目的

本研究課題では、第一に、マイクロティアリングモードと電子温度勾配モードのマルチスケール乱流解析を行い、その物理機構の解明と、マルチスケール相互作用の普遍的性質を見出すことを目的とした。第二に、簡易モデルの構築や新規解析手法の開発を通じて、マルチスケール相互作用の包括的理解を目指して研究を進めた。

3. 研究の方法

代表者らは、非常に高解像度・高精度の大規模数値シミュレーションを必要とする磁化プラズマ乱流のマルチスケールシミュレーションを実施するために、ジャイロ運動論シミュレーションコード GKV[Watanabe(2006)]の高並列化や通信と演算のパイプラインオーバーラップ[Maeyama(2015)]などの先進的な超並列計算手法を開発した。また、マルチスケール相互作用解析に重要となる非線形性を介した三波結合をジャイロ運動論モデルに拡張したジャイロ運動論的三波結合伝達関数[Nakata(2012)]や、部分空間伝達解析[Maeyama(2017)]などの詳細解析手法を用いることで、乱流シミュレーションデータの直接解析を行った。

4. 研究成果

(1) 極微細な電子スケール乱流がイオンスケール乱流を抑制する非自明なマルチスケール相互作用の発見

これまでのマルチスケール乱流解析で調べられてきたイオン温度勾配モードは、バルーニング(偶)パリティの構造をもつ静電的な不安定性であるが、本課題で取り上げるマイクロティアリングモードはティアリング(奇)パリティの構造を持つ電磁的な不安定性であり、その性質は大きく異なっている。核融合プラズマの中心部ではイオン温度勾配モードが支配的であるが、近年、プラズマ周辺領域では、マイクロティアリングモードや電子温度勾配モードといった不安定性により駆動される乱流がプラズマ周辺部の輸送を支配するという結果が議論されている[Hatch(2016)]。しかしながら、この先行研究はイオン Larmor 半径程度のマイクロティアリングモードと電子 Larmor 半径程度の電子温度勾配モードの間のスケール分離を仮定した単一スケール乱流シミュレーションに限定された解析であった。

本課題では、申請者らのマルチスケール乱流相互作用に対する知見から、プラズマ半径方向に

局在した電流シート構造を持つマイクロティアリングモードは電子温度勾配モードと相互作用しうるとの着想に基づき、周辺部におけるプラズマ乱流の解析を行った。図 1(a)は解析に用いたプラズマパラメータにおける線形分散関係を示したもので、約 40 倍離れたスケールに異なる不安定モードが存在することが分かる。低波数側がマイクロティアリングモード、高波数側が電子温度勾配モードに対応する。マルチスケール相互作用の影響を解析するため、両者を同時に扱うマルチスケール乱流の直接数値シミュレーションを実施した。図 1(b)に電子熱輸送の時間発展を示す。比較のために行った低解像度のマイクロティアリングモード単一スケール乱流シミュレーションでは、磁場揺動による電子熱輸送が支配的であったのに対し、高解像度マルチスケール乱流シミュレーションでは、電子温度勾配モードによる静電揺動が作り出す電子熱輸送が卓越し、マイクロティアリングモードは抑制されることが発見された。このことは図 1(c)のエネルギースペクトルにおいても顕著にみられる。

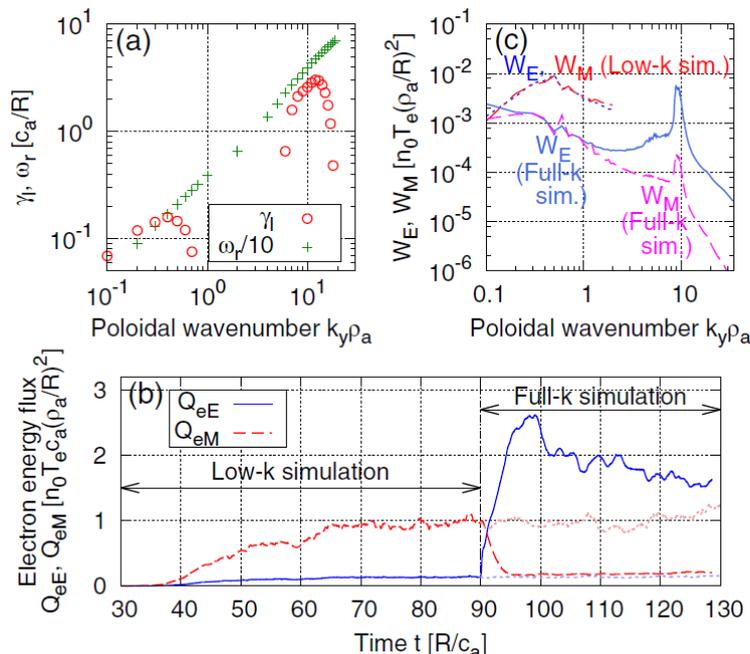


図 1: (a)線形成長率 と実周波数 のポロイダル方向波数依存性。(b)静電・磁場揺動による電子熱輸送フラックス Q_{eE} , Q_{eM} の時間発展。 $t < 90R/c_a$ までは低解像度(Low-k)のマイクロティアリングモード単一スケール乱流シミュレーション、 $t > 90/c_a$ 以降は高解像度(Full-k)のマイクロティアリングモード・電子温度勾配モードマルチスケール乱流シミュレーション。(c)Low-k または Full-k シミュレーションにおける静電・磁場揺動エネルギー W_E , W_M のポロイダル方向波数依存性。 [Maeyama(2017)より引用]

電子温度勾配モードとの相互作用の影響を調べるため、マイクロティアリングモードを作り出す電子電流揺動の変化を調べた結果を図 2 に示す。マイクロティアリングモード単一スケール乱流シミュレーションでは、線形モードと同様の構造を維持し、その半径方向の広がりには電子の磁力線方向に対する共鳴条件による線形理論見積もりと同程度であった。一方、電子温度勾配モードが存在する場合、電子電流揺動の振幅は減衰し、半径方向の相関長も広がることを判明した。このことは、マイクロティアリングモードの持つ半径方向に局在した電流シート構造が、電子温度勾配モードにより破壊されることを示唆する。

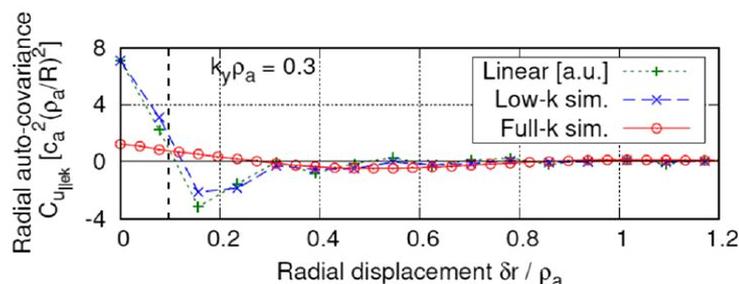


図 2: マイクロティアリングモード(代表的なモードとして $k_y a = 0.3$ モード)による電子電流の半径方向自己相関。線形固有モード(緑)、低解像度単一スケール乱流シミュレーション(青)、高解像度マルチスケール乱流シミュレーション(赤)の結果を示す。線形理論見積り値 $r = 0.096 a$ も合わせてプロットする。 [Maeyama(2017)より引用]

電流シート構造の観測からの示唆を裏付けるため、波の非線形性による三波伝達関数に基づき、電子温度勾配モードとマイクロティアリングモードのマルチスケール相互作用を定量的に評価した。その結果を図3に示す。電子温度勾配モードとの結合により、マイクロティアリングモードの持つ径方向高波数成分が効果的に減衰されることが示された(図3中の $1 < |k_x - a| < 7$, $k_y - a < 1$ 付近に三波結合による減衰を表す負の値が見られる)。言い換えれば、電子温度勾配モードが作り出す電子スケールの流れにより、マイクロティアリングモードの電流シート構造に対応する半径方向に局在した構造が乱され、より細かな揺らぎへと引きちぎられていくことを意味する。

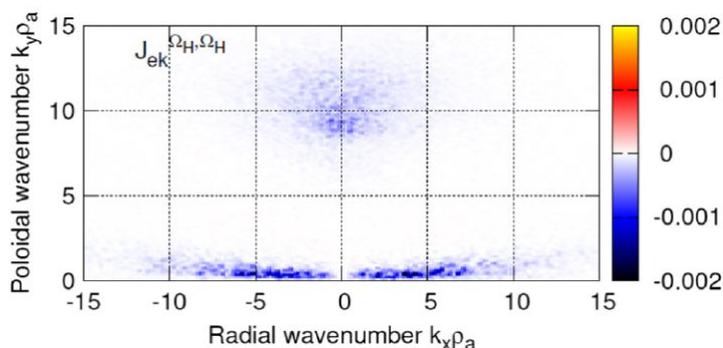


図3: 電子スケール乱流との相互作用による三波伝達関数の2次元スペクトル(マイクロティアリングモードの減衰が起こる $t=92.0R/ca$ でのスナップショット)。[Maeyama(2017)より引用]

(2) 多粒子種衝突項モデルの実用化のための高効率時間積分法の開発

マイクロティアリングモードは、スラブモデルでは無衝突の場合には安定化されることが理論的に示される[Drake(1977)]。トロイダルモデルでは無衝突マイクロティアリングモード[Dickinson(2013)]の存在が議論されているが、やはり衝突項の影響は大きい。

GKVでは、ジャイロ運動論における多粒子種衝突項モデルとして洲鎌衝突項[Sugama(2009)]を実装している。これは、粒子・運動量・エネルギーの保存性や、演算子の自己随伴性などを保つ高精度の衝突項モデルとなっている。しかしながら、Coulomb衝突周波数が速度の-3乗に比例することに起因し、速度空間解像度を上げると衝突項の CFL 条件が数値シミュレーションの時間刻み幅を律速してしまう。そこで、衝突項に依る時間刻み幅の制約を受けない数値解法として、作用素分割法・陰的時間積分法・Krylov部分空間法を用いた衝突項の陰解法を新たに開発した。ここで、5次元位相空間における衝突項の実空間に対する独立性を利用し、Krylov部分空間法における反復計算はMPI通信フリーの実装とすることで、解法全体のMPI通信量の削減を図った。

図4(a)に時間刻み幅に対する誤差の依存性を示す。従来の陽解法(4次精度Runge-Kutta-Gill法)では時間刻み幅に対して4次精度となっているが、衝突項による時間刻み幅律速により 8×10^{-5} 程度の時間刻み幅で数値発散が起こっている。一方、新開発の陰解法を用いた場合はそれよりも大きな時間刻み幅をとっても安定に計算でき、その精度は設計通り時間刻み幅について2次精度となっていることが確認された。また、図4(b)では、線形成長率の波数依存性を確認した。新開発の陰解法では、従来の陽解法に比べて20倍大きな時間刻み幅を取っても正しい成長率が得られていることが確認できた。さらに、計算全体の性能評価試験を行い、演算効率の向上と求解時間の短縮の両方の実現が示された。

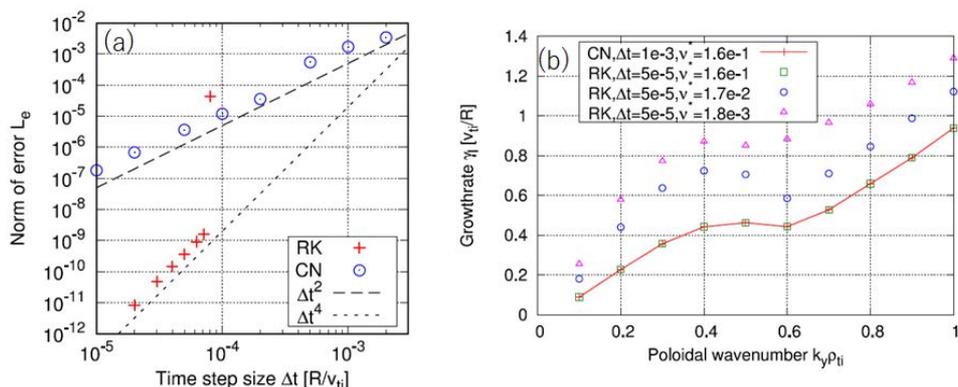


図4: (a)従来の陽解法(RK)を用いた場合と新開発の陰解法(CN)を用いた場合の時間刻み幅と誤差の関係。(b)従来の陽解法(RK)を用いた場合と新開発の陰解法(CN)を用いた場合の線形成長率の波数依存性。陰解法では時間刻み幅を大きくとっても正しく計算できている。また、衝突周波数を変えた影響も併せてプロットしている。[Maeyama(2019)より引用。一部改変。]

(3) マルチスケール相互作用の包括的理解に向けた新解析手法の定式化と実践

申請者の先行研究[Maeyama(2015)]および本研究課題での成果[Maeyama(2017)]により、イオン温度勾配モードやマイクロティアリングモードといったイオンスケール微視的不安定性の性質・パリティなどに依らずにマルチスケール相互作用が起こること、その際、イオンスケール乱流の作り出す比較的短波長の構造（イオン温度勾配モードの場合には短波長帯状流やイオンスケール乱流渦、マイクロティアリングモードの場合には局所電流シート構造）が極短波長の電子スケール乱流と効果的に相互作用することが示された。また、異なる乱流は排他的なものではないか（イオン温度勾配乱流渦による電子温度勾配モードのせん断や、電子温度勾配モード乱流によるイオンスケール短波長帯状流の減衰、あるいは電子温度勾配モード乱流によるマイクロティアリングモードの局所電流シート構造の破壊）といったマルチスケール相互作用の一般性に関する示唆が得られた。

マルチスケール相互作用の普遍的性質の理解に向けて、多数の解析を可能とする簡約スラブモデルを開発し、その波数・周波数スペクトル特性、ローパスフィルタを用いた短波長モードから長波長モードへの影響の抽出、およびその統計的性質について調べた結果、短波長モードが長波長モードに与える寄与は低周波のコヒーレント成分と広帯域のノイズ的成分からなることが観測された。

こうした解析データから着想を得て、非平衡統計力学の分野で開発された森の射影演算子法を利用したマルチスケール相互作用の抽出とモデル化のための方法論を構築した。電子・イオンスケール乱流間の相互作用を、異なるスケールの乱流間の相関問題として捉えなおし、射影演算子法を適用することで、興味変数(=大スケール流れ)の支配方程式に対する、その他の変数(=小スケール揺らぎ)の寄与を興味変数に相関を持つコヒーレント項とノイズ的な無相関項に分離する手法を本研究のために新たに考案した。

散逸系(定常開放系)乱流の問題として蔵本-Sivashinsky 方程式を例に、射影演算子法の適用性を検討した。図5は乱流 DNS データに対して、ある閾値波数より長波長の揺動に対する短波長揺動の寄与を分離した結果を示したもので、記憶関数とノイズ項の時間相関が関係するという(拡張された)一般化第2種揺動散逸定理が数値的に成立していることを示す。さらに、DNS データに基づいて得られた記憶関数およびノイズ項モデルを取り入れた長波長揺動の低解像度シミュレーションを行い、乱流 DNS データのエネルギースペクトルを定性的に再現することが確認され、解析手法の有効性が示された。

今後さらに、マルチスケール乱流相互作用に対して射影演算子を適用した解析を進めることで、これまでの乱流シミュレーションの経験則を超えて、マルチスケール乱流相互作用をコヒーレントな抗力と確率的駆動として表す一般化 Langevin 描像によって定式化・体系化することが期待される。

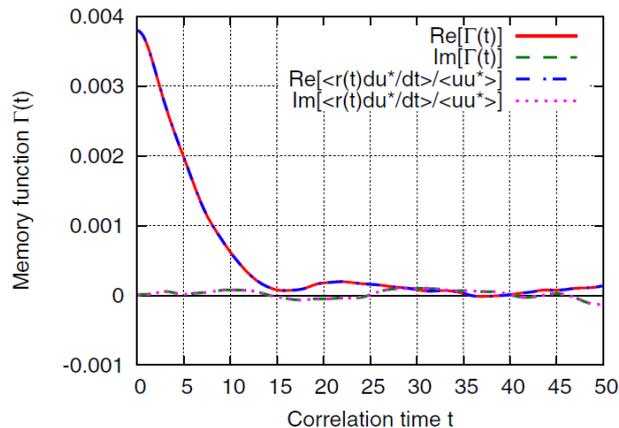


図5: 蔵本-Sivashinsky 乱流の DNS データから評価した記憶関数 とノイズ項 r の時間相関

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6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 Maeyama S., Watanabe T.-H., Idomura Y., Nakata M., Nunami M.	4. 巻 235
2. 論文標題 Implementation of a gyrokinetic collision operator with an implicit time integration scheme and its computational performance	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Computer Physics Communications	6. 最初と最後の頁 9~15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cpc.2018.07.015	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. Maeyama, T.-H. Watanabe, A. Ishizawa	4. 巻 119
2. 論文標題 Suppression of Ion-Scale Microtearing Modes by Electron-Scale Turbulence via Cross-Scale Nonlinear Interactions in Tokamak Plasmas	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 195002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.119.195002	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, Watanabe Tomo-Hiko	4. 巻 89
2. 論文標題 Extracting and Modeling the Effects of Small-Scale Fluctuations on Large-Scale Fluctuations by Mori-Zwanzig Projection Operator Method	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 024401~024401
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.7566/JPSJ.89.024401	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 Asahi Yuuichi, Latu Guillaume, Bigot Julien, Maeyama Shinya, Grandgirard Virginie, Idomura Yasuhiro	4. 巻 32
2. 論文標題 Overlapping communications in gyrokinetic codes on accelerator based platforms	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Concurrency and Computation: Practice and Experience	6. 最初と最後の頁 5551
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1002/cpe.5551	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 Miura T., Watanabe T.-H., Maeyama S., Nakata M.	4. 巻 26
2. 論文標題 Correlation between zonal flow shearing and entropy transfer rates in toroidal ion temperature gradient turbulence	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 082304 ~ 082304
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1063/1.5109476	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 Ishizawa A., Urano D., Nakamura Y., Maeyama S., Watanabe T.-H.	4. 巻 123
2. 論文標題 Persistence of Ion Temperature Gradient Turbulent Transport at Finite Normalized Pressure	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 25003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.123.025003	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24件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 前山伸也
2. 発表標題 射影演算子法による小スケール揺動が大スケール揺動に与える寄与の抽出
3. 学会等名 令和元年度MHD研究会「プラズマの複雑現象を対象としたデータマイニングの活用」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 前山伸也, 渡邊智彦
2. 発表標題 電子・イオンスケール乱流相互作用の抽出とモデル化
3. 学会等名 第36回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Maeyama, and T.-H. Watanabe
2. 発表標題 Methodology for extracting and modeling electron-scale effects in multi-scale plasma turbulence
3. 学会等名 3rd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPS-DPP2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Maeyama
2. 発表標題 Current status of GKV code
3. 学会等名 Joint US-Japan Workshop on PostK-ECP Collaboration and JIFT Exascale Computing Collaboration (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 前山伸也
2. 発表標題 射影演算子法によるプラズマ乱流マルチスケール相互作用の抽出
3. 学会等名 プラズマシミュレーションポジウム2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 前山伸也, 渡邊智彦
2. 発表標題 森-Zwanzigの射影演算子法を利用した小スケールから大スケールへの寄与の抽出とモデル化
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 S. Maeyama
2. 発表標題 Multi-scale simulation of electron/ion-scale turbulence in Tokamak plasmas
3. 学会等名 US-Japan JIFT Workshop on Multi-scale Simulations in Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Maeyama
2. 発表標題 Effects of electron-scale turbulence on ion-scale turbulence in Tokamak plasmas
3. 学会等名 2nd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPs-DPP2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Maeyama
2. 発表標題 Roles of sub-ion-scale structures on cross-scale interactions in Tokamak plasma turbulence
3. 学会等名 11th Plasma Kinetics Working Meeting (WPI2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 前山伸也, 渡邊智彦
2. 発表標題 電子スケール乱流がイオンスケール乱流に及ぼす影響の抽出
3. 学会等名 第74回日本物理学会年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 前山伸也
2. 発表標題 原型炉およびJT-60SAに向けた微視的不安定性の電磁的ジャイロ運動論的解析
3. 学会等名 第8回IFERC-CSC研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Maeyama, T.-H. Watanabe
2. 発表標題 Application of Mori-Zwanzig projection operator method to multi-scale turbulence problems
3. 学会等名 Max Planck Princeton Center Workshop 2019 (MPPC2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 前山伸也
2. 発表標題 プラズマ乱流マルチスケール相互作用の抽出とモデル化
3. 学会等名 プラズマシミュレーションポジウム2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 前山伸也
2. 発表標題 JT-60SA・原型炉に向けた微視的電磁不安定性解析
3. 学会等名 第24回NEXT研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 前山伸也
2. 発表標題 マイクロティアリングモードが乱流輸送に与える影響
3. 学会等名 第23回NEXT研究会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Maeyama
2. 発表標題 Cross-Scale interactions between electron and ion scale plasma turbulence via sub-ion-scale structures
3. 学会等名 25th International Conference on Numerical Simulation of Plasmas (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 前山伸也
2. 発表標題 電子・イオンスケール乱流間のマルチスケール相互作用に関する研究 (若手奨励賞受賞記念講演)
3. 学会等名 第73回日本物理学会年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 前山伸也, 國成希浩, 渡邊智彦
2. 発表標題 Fourier-Laguerre展開による磁化プラズマ乱流中の位相空間カスケードの解析
3. 学会等名 第73回日本物理学会年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 前山伸也
2. 発表標題 Cross-scale interactions between electron and ion scale plasma turbulence via sub-ion-scale structures
3. 学会等名 平成29年度閉じ込め・輸送研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 前山伸也
2. 発表標題 Effects of electron-scale turbulence in magnetic fusion plasma
3. 学会等名 実験室・宇宙プラズマ研究会「乱流・輸送・粒子加速」
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 前山伸也，渡邊智彦，石澤明宏
2. 発表標題 Multi-scale interactions between electron-temperature-gradient-mode and micro-tearing-mode turbulence
3. 学会等名 Plasma Conference 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 前山伸也
2. 発表標題 Suppression of micro-tearing modes by electron temperature gradient modes
3. 学会等名 プラズマシミュレーションポジウム2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Maeyama
2. 発表標題 Multi-scale turbulence simulations of micro-tearing modes and electron-temperature-gradient modes
3. 学会等名 US-Japan JIFT Exascale Computing Workshop 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Maeyama, T.-H. Watanabe, A. Ishizawa
2. 発表標題 Effects of electron-scale turbulence on micro-tearing modes
3. 学会等名 7th APTWG International Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>Shinya Maeyama's website http://www.p.phys.nagoya-u.ac.jp/~smaeyama/ 名古屋大学教員データベース http://profs.provost.nagoya-u.ac.jp/view/html/100008165_ja.html GyroKinetic Vlasov simulation code: GKV http://www.p.phys.nagoya-u.ac.jp/gkv/ Shinya Maeyama's website http://www.p.phys.nagoya-u.ac.jp/~smaeyama/ 名古屋大学教員データベース http://profs.provost.nagoya-u.ac.jp/view/html/100008165_ja.html GyroKinetic Vlasov simulation code: GKV http://www.p.phys.nagoya-u.ac.jp/gkv/</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