

令和 4 年 6 月 2 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2020

課題番号：16H04086

研究課題名(和文)位相空間揺動スペクトルから探る無衝突プラズマ乱流の非等方混合・散逸過程

研究課題名(英文) Anisotropic mixing and dissipation processes in collisionless plasma turbulence explored in terms of fluctuation spectrum in the phase space

研究代表者

渡邊 智彦 (Watanabe, Tomo-Hiko)

名古屋大学・理学研究科・教授

研究者番号：30260053

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 8,600,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙や核融合の高温プラズマでは衝突が非常に小さくなるため、プラズマ中に生じたさまざまな揺らぎが最終的に熱に変換されるまでに、電磁場や分布関数の微細構造が実空間及び速度空間を合わせた位相空間上に形成される。本研究では、磁場中でのプラズマに発生する乱流を、スーパーコンピュータを用いた数値シミュレーションにより解析し、(1)オーロラにともなう電磁場変動が乱流状態を経て微細構造を生み出すこと、(2)ドリフト波乱流中の分布関数の速度空間スペクトルが冪乗則を持つこと、(3)揺動の伝達率が一定となる小領域が形成され、分布関数の微細構造形成に普遍性が現れること、を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙を構成する主要な物質である電離ガスをプラズマと呼ぶ。そこに現れる様々な構造や揺らぎが最終的に熱に変換されるまでにどのような過程を経るかを明らかにするための研究を実施した。その結果、プラズマ中の揺らぎには、実空間だけでなく様々な速度成分を持つ変動が発達することで効率的な散逸が起きるとともに、その分布には一定の法則性があることが明らかになった。これは宇宙空間や核融合装置でどのように熱が生まれるかという基本的な物理過程の一端を明らかにした成果といえる。

研究成果の概要(英文)：Before fluctuations arising in plasmas are dissipated and transformed into heat, fine structures of the electromagnetic fields and the distribution function are generated on the phase space, that consists of the real and velocity spaces, because of the low collisionality in high-temperature plasmas in space and fusion. In this study, we have analyzed turbulence in magnetized plasmas by means of numerical simulations on supercomputers and have revealed the followings. (1) Fine structures of the auroral electromagnetic fluctuations are generated through turbulence transition. (2) The velocity-space spectrum of the distribution function in the drift wave turbulence shows a power law profile. (3) A subrange with a constant transfer function of fluctuations is formed in the power spectrum, leading to universality in the formation process of fine-scale structures of the distribution function.

研究分野：プラズマ物理学・核融合学・磁気圏物理学

キーワード：プラズマ乱流 シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

高温の宇宙プラズマ・核融合プラズマはほぼ無衝突であり、しばしば、系のスケールと同程度もしくはそれを遥かに越える平均自由行程をもつ。例えば、地球近傍での太陽風プラズマの平均自由行程は1 AU (天文単位) のオーダーであり、核融合炉心プラズマでは数 km に及ぶ。では、この弱衝突性プラズマ (簡単に無衝突プラズマとも呼ばれる) 中の「散逸」はどのような過程を経て生じるのだろうか? また、乱流揺動のエネルギーは、どのような機構で、位相空間のどのスケールへと運ばれ、プラズマの加熱や輸送・混合をもたらすのだろうか?

本課題は、上記のような「学問的問い」から検討を始めた。これは、次のようにも言い換えられよう。宇宙や核融合のプラズマにおける輸送・混合過程の多くは乱流によって支配されている。その一方で、プラズマ中の運動論的乱流において、巨視的スケールと散逸スケールをつなぐ過程がどのような機構で維持されているか、十分に理解されていない。

課題代表者は、2000年代前半から、ドリフト波乱流中での磁場に沿った速度空間上のカスケード問題に着目して研究を進め、巨視的な密度揺らぎから微細な速度空間スケールへと分布関数揺らぎが速度の波数空間上を伝達され、最終的な散逸にいたる過程を、理論・シミュレーションの両面から明らかにした。その後、Schekochihin, Plunk, Tatsuno 等は、有限ジャイロ半径効果による磁場垂直方向の混合過程の解析を行った。磁気流体乱流のエネルギー散逸やドリフト波乱流による異常輸送において、この二つの過程は、プラズマ混合の素過程をなすと考えられる (図1参照)。ところが Hatch 等は最近、人工粘性を加えたモデルを用い、速度空間上の混合を陽に伴わない散逸過程を議論している。一方、磁場核融合プラズマ研究において、ExB シア流による乱流抑制はこの20数年で確立したパラダイムであるが、ExB シア流と乱流渦の相互作用が波数空間上の乱流揺動のカスケードとどのように関連づけられるか、いまだ十分に理解されているとは言えない。このように、位相空間上の乱流カスケードの問題は、学問的にも、また、応用においても、プラズマ物理の重要な未解決課題として位置づけられる。

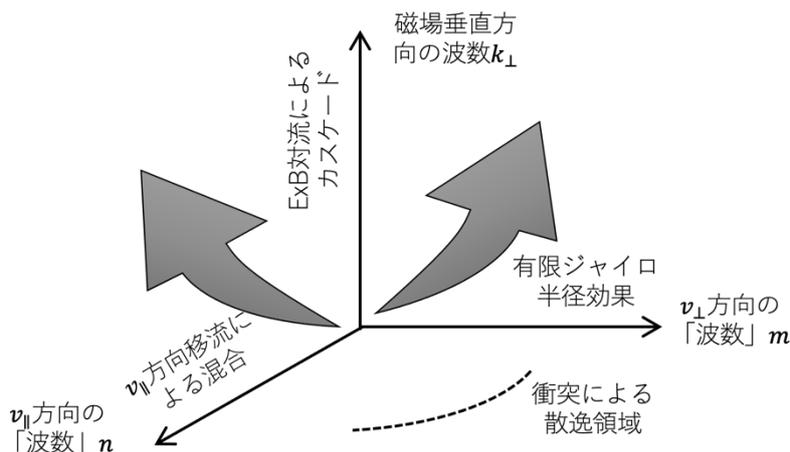


図1:高温プラズマにおける揺らぎの位相空間上のカスケードの模式図

2. 研究の目的

上記の研究背景の下、本課題の目的は、高温磁化プラズマ中に普遍的に観測される電磁乱流揺らぎが、どのような経路を経て非可逆な散逸に至るか、その道程を明らかにし、位相空間上の散逸領域と慣性領域を理論的・数値的に特徴付けること、そこからエネルギー散逸の非等方性を明らかにすることである。その成果を敷衍することで、乱流抑制や輸送の飽和機構の理解への還元が期待される。

より具体的には、電子およびイオン温度勾配(ETG/ITG)乱流に代表されるドリフト波乱流や、磁気流体乱流を対象に、無衝突プラズマ中の乱流揺動カスケードと散逸過程について、以下の点を明らかにすることを目的としている。

- [A] スケーリング理論およびジャイロ運動論的シミュレーションを用い、高温磁化プラズマにおけるカスケード過程を解析する。(位相空間の) スペクトル空間上に形成される慣性領域でのべき乗則や特性長を同定し、乱流混合・カスケード機構の全体像を解明する。
- [B] 磁場に平行および垂直方向速度空間に対応したスペクトル空間において、乱流揺動のカスケードを表現する伝達関数を求め、エネルギー散逸の非等方性を評価する。
- [C] ドリフト波乱流で重要となるゾーナル流や ExB シア流による乱流抑制と、実空間上の微細構造へと向かう揺動伝達機構・揺動スペクトル構造、との関連を明らかにする。

3. 研究の方法

本研究では、磁化プラズマ中に生じる乱流揺動を扱うため、簡約化磁気流体方程式及びジャイロ運動論的方程式をもとにした数値シミュレーションを実施した。前者は、宇宙プラズマにおける不安定性が駆動する乱流として、磁気圏-電離圏結合系におけるフィードバック不安定性による磁気流体乱流(Alfven 乱流)に着目し、その乱流特性の解析を実施した(上記項目[A]に該当)。ジャイロ運動論的シミュレーションとしては、直線磁場を用いた場合と、核融合プラズマをモデル化したトーラス磁場配位を用いた場合の2通りについて研究を進めた。トーラス配位を扱う場合には、課題代表者を中心としたグループで開発を進めてきた局所ジャイロ運動論的シミュレーションコードGKVを活用し、ゾーナルフローとドリフト波乱流の相互作用を中心に研究を行った(上記項目[C]に該当)。一方、直線磁場を用いた場合には、速度空間を低減し、磁場平行成分または垂直成分の一方に限定した3次元または4次元シミュレーションを実施した(上記項目[A, B]に該当)。

シミュレーションの実施には、核融合科学研究所、名古屋大学、九州大学などのスーパーコンピュータを利用した。

4. 研究成果

以下では、「2. 研究目的」に挙げた項目に関連して得られた研究成果の概要をまとめる。

[A-1] ドリフト波乱流におけるエントロピーカスケード

Watanabe & Sugama によるイオン温度勾配乱流中の分布関数の微細構造形成に関する研究では、空間を2次元に低減し、磁場平行方向の波数はドリフト波の伝搬方向波数に比例するとしたモデルが使われていた。そのため、磁場平行方向速度(v_{\parallel})空間における微細構造発達に密接に関連する磁場平行方向の高波数成分がどのようにして作られ、摂動分布関数の2乗積分量で定義されるエントロピー揺動の伝達やその位相空間スペクトルがどのように影響を受けるかは定かではなかった。ここでは、直線磁場モデルを用いて、実空間3次元と磁場平行方向の速度空間を合わせた4次元位相空間上のエントロピーカスケード過程を調査した。

図2は、シミュレーションで得られたポテンシャル揺動の波数空間スペクトルである。磁場に対して垂直(k_{\perp})及び平行(k_{\parallel})方向の波数成分がなす空間上で非等方な揺動スペクトル分布となっていることがよくわかる。乱流の非線形結合を介して、高い k_{\perp} を持つ成分と同時に高い k_{\parallel} の成分が作られていることが確かめられ、図中の青線は、 $k_{\parallel} \propto k_{\perp}^{5/3}$ の関係を表している。

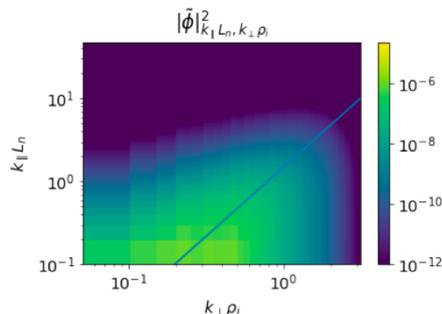


図2: ドリフト波乱流中のポテンシャル揺動の2次元波数スペクトル

[A-2] Alfven 乱流の自発的励起と乱流スペクトル

磁気圏と電離圏プラズマが結合した系では、大規模なプラズマ対流電場のエネルギーが散逸されるが、その一部を取り出して磁気流体波が増幅されオーロラとして成長することが指摘されている。これはフィードバック不安定性と呼ばれる。本研究では、簡約化磁気流体方程式を用いた直接シミュレーションにより、フィードバック不安定性によって成長した Alfven 波が Kelvin-Helmholtz 型の2次的不安定性を介して乱流へと遷移し、その結果、Alfven 乱流へと発展することを明らかにした。この時、電磁場のエネルギースペクトルは、Goldreich-Sridahr による Alfven 乱流の理論と整合した $\propto k_{\perp}^{-5/3}$ の冪乗則を示している。これは、FAST 衛星によるオーロラ領域上空での電磁場揺動のスペクトルとも良い対応を示している。

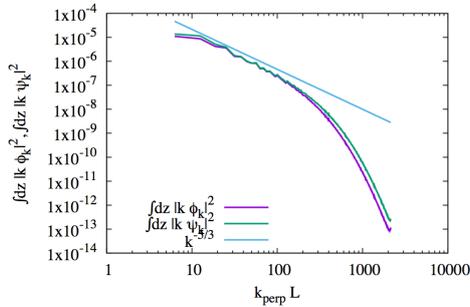


図 3: フィードバック不安定性で駆動された Alfvén 乱流のエネルギースペクトル

[B-1] 外部駆動定常乱流におけるエントロピーカスケードと分布関数の微細構造形成

磁場垂直方向の速度(v_{\perp})差、すなわち、ジャイロ半径の違いによる位相混合と微細揺動生成過程は、FLR phase mixing として知られ、Tatsuno 等による研究がなされてきたが、従来の解析は減衰乱流によるものであった。本研究では、Ornstein-Uhlenbeck(OU)過程に基づく乱雑な外部駆動力をジャイロ運動論的方程式に導入し、2次元の外部駆動定常乱流を実現した上で、 v_{\perp} によるラゲール多項式展開で分布関数の揺動スペクトルを評価した。この手法により、従来では困難であった定常的なエントロピー揺動のスペクトル分布を求めることができた。

[B-2] ドリフト波乱流における分布関数の微細構造形成

上記の項目[A-1]で示した高い k_{\parallel} を持つ成分は、速度空間 v_{\parallel} において分布関数の微細構造を効率的に生成する。分布関数を v_{\parallel} に関するエルミート多項式展開し、その次数 n についてのスペクトルをエントロピー揺動($\delta S_{n,k_{\parallel}}$)として図 4 に示す。高い次数 n を持つ v_{\parallel} 空間の微細揺動が、高 k_{\parallel} 成分と相関して現れていることがわかる。

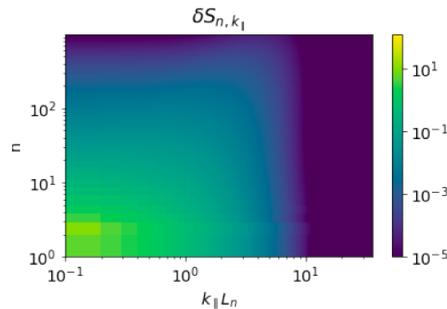


図 4: ドリフト波乱流中の分布関数揺動の 2 次元位相空間スペクトル

さらに、図 4 のスペクトルを波数 k_{\parallel} 空間で積分して、平均的な速度空間スペクトルを求め、異なる衝突周波数について比較した結果を図 5 に示す。衝突周波数が十分に低い赤線の結果では、エントロピー揺動 δS_n は、 n^{-1} にほぼ比例した冪乗スペクトルの領域を持つこと、さらに高い次数 n では、衝突による散逸領域を持つことがわかる。この冪乗スペクトルの領域は、エントロピー生成・散逸がともに働かない、自己相似的なエントロピーカスケードをとともなう慣性小領域であり、規格化エントロピー伝達関数がほぼ 1 となることを確認した。さらに興味深いことに、次数 n の揺動を作り出す実効的な波数の大きさ $\langle |k_{\parallel}| \rangle_n$ を評価すると、慣性小領域では、 $n^{1/2}$ にほぼ比例する結果が得られた。これは、パッシブスカラーの乱流混合理論との類推から、Watanabe & Sugama により示唆された結果と整合しており、ドリフト波乱流中での分布関数の微細構造形成過程の普遍的な性質を示している。

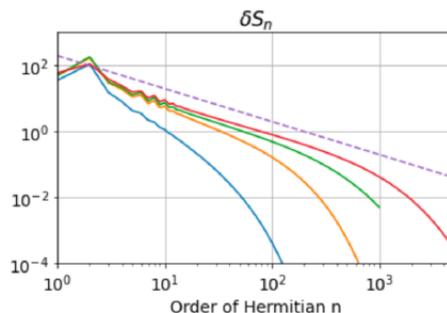


図 5: 異なる衝突周波数でのドリフト波乱流中の分布関数揺動の速度空間スペクトル

[C] ズーナルフローと乱流の相互作用におけるエントロピー伝達

磁場閉じ込め核融合プラズマの乱流輸送を抑制する機構として、ズーナルフローが広く注目を集めている。ここで、イオン温度勾配(ITG)乱流が駆動するズーナルフローとそれによる ITG 乱流輸送の抑制過程を、5次元位相空間を扱う GKV シミュレーションを用いて、エントロピー伝達の観点から解析した。イオン温度勾配を変化させた複数のジャイロ運動論的シミュレーションを行い、生成されたズーナルフローによる剪断率とエントロピー伝達率の比較を行った結果を図 6 に示す。イオン温度勾配が中程度か、やや低い場合には、両者はよく一致していること、すなわち、ズーナル流を介したエントロピー伝達過程は、実空間では乱流渦のズーナルフローによる剪断・変形として観測されること、を示す結果が得られた。

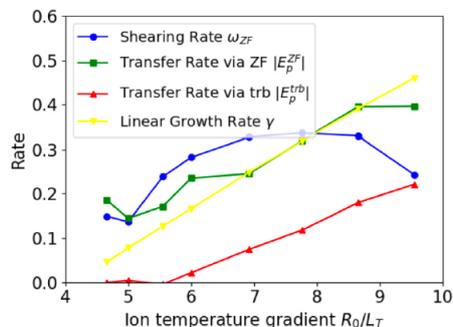


図 6 : ズーナルフローによる剪断率とエントロピー伝達率の比較
[Miura et al., Physics of Plasmas **26**, 082304 (2019).]

[その他]

本課題による支援を得ることで、上記[A]-[C]の研究を進める過程における波及効果として、関連したいくつかの研究トピックについても以下の成果が得られた。

- ・ 分散性 Alfvén 波の運動論的シミュレーションにおける効率的な解法：電子分布関数から 0 次と 1 次の流体モーメント量を分離することで、Alfvén 波の高速な伝搬と電子の熱運動を分離して扱うことを可能とし、効率的な陰解法を考案・実現した。[Nishioka et al., Journal of Computational Physics **432**, 110167 (2021).]
- ・ 等高線力学法を用いた Vlasov 方程式の数値解法：実空間 1 次元・速度空間 1 次元の位相空間において、実空間に周期境界条件を持つ Vlasov-Poisson 方程式系に対して、分布関数の等高線を追跡するシミュレーション手法を新たに開発した。[Sato et al., Journal of Computational Physics **445**, 110626 (2021).]
- ・ 無衝突磁気リコネクションにおける電子ビームによる運動論的 Alfvén 波の励起：ジャイロ運動論的シミュレーションと理論解析により、磁気リコネクションにともなう運動論的 Alfvén 波励起の可能性を指摘した。[Shimomura et al., Plasma and Fusion Research **15**, 1401084 (2020).]
- ・ 磁気圏-電離圏結合系における磁気流体不安定性の競合過程：上記[A-2]の研究を進める過程で、フィードバック不安定性とパルニング不安定性の統一的な記述を導くことに成功し、両者の競合的成長過程とオーロラのビーズ状構造について議論した。[Watanabe, Geophysical Research Letters **47**, e2020GL088233 (2020).]

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 9件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 2件）

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) 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 Borovsky Joseph E., Birn Joachim, Echim Marius M., Fujita Shigeru, Lysak Robert L., Knudsen David J., Marghitu Octav, Otto Antonius, Watanabe Tomo-Hiko, Tanaka Takashi	4. 巻 216
2. 論文標題 Quiescent Discrete Auroral Arcs: A Review of Magnetospheric Generator Mechanisms	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Space Science Reviews	6. 最初と最後の頁 1-39
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11214-019-0619-5	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 渡邊智彦	4. 巻 73
2. 論文標題 プラズマ乱流－電磁場と粒子が紡ぐ渦	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本物理学会誌	6. 最初と最後の頁 479-482
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 渡邊智彦	4. 巻 93
2. 論文標題 磁気圏 電離圏結合におけるオーロラの構造形成とダイナミクス	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 J. Plasma Fusion Res.	6. 最初と最後の頁 401-411
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 Tomo-Hiko Watanabe, Hiroaki Kurata and Shinya Maeyama	4. 巻 18
2. 論文標題 Generation of auroral turbulence through the magnetosphere-ionosphere coupling	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 New Journal of Physics	6. 最初と最後の頁 125010-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1367-2630/aa532a	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 Kataoka Ryuho, Chaston Christopher C., Knudsen David, Lynch Kristina A., Lysak Robert L., Song Yan, Rankin Robert, Murase Kiyoka, Sakanoi Takeshi, Semeter Joshua, Watanabe Tomo-Hiko, Whiter Daniel	4. 巻 217
2. 論文標題 Small-Scale Dynamic Aurora	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Space Science Reviews	6. 最初と最後の頁 17-1-32
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11214-021-00796-w	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 Nishioka Kenji, Watanabe Tomo-Hiko, Maeyama Shinya	4. 巻 432
2. 論文標題 Moment extract method for drift kinetic simulation of magnetized plasma	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Computational Physics	6. 最初と最後の頁 110167 ~ 110167
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jcp.2021.110167	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 Sato Hiroki, Watanabe T.-H., Maeyama S.	4. 巻 445
2. 論文標題 Contour dynamics for one-dimensional Vlasov-Poisson plasma with the periodic boundary	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Computational Physics	6. 最初と最後の頁 110626 ~ 110626
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jcp.2021.110626	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 Lysak R., Echim M., Karlsson T., Marghitu O., Rankin R., Song Y., Watanabe T.-H.	4. 巻 216
2. 論文標題 Quiet, Discrete Auroral Arcs: Acceleration Mechanisms	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Space Science Reviews	6. 最初と最後の頁 92-1-31
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11214-020-00715-5	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 -

1. 著者名 Watanabe T. H.	4. 巻 47
2. 論文標題 Feedback and Ballooning Instabilities in the Magnetosphere Ionosphere Coupling	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 088233-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2020GL088233	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52件 (うち招待講演 10件 / うち国際学会 27件)

1. 発表者名 T.-H. Watanabe
2. 発表標題 Generation of dispersive Alfvénic turbulence in magnetosphere-ionosphere feedback coupling
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T.-H. Watanabe
2. 発表標題 Evaluation of entropy transfer rate in interactions of zonal flows and turbulence
3. 学会等名 APTWG Mini-workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T.-H. Watanabe
2. 発表標題 Effects of kinetic ions on the electron temperature gradient turbulence
3. 学会等名 14th Japan-Korea Workshop on ‘ ‘ Modeling and Simulation of Magnetic Fusion Plasmas ’ ’ (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T.-H. Watanabe
2. 発表標題 Auroral Growth and Transition to Alfvénic Turbulence in the Magnetosphere-Ionosphere
3. 学会等名 9th East-Asia School and Workshop on Laboratory, Space, and Astrophysical Plasmas (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T.-H. Watanabe
2. 発表標題 Effects of Kinetic Ions on Electron Temperature Gradient Turbulent Transport
3. 学会等名 第25回NEXT (数値トカマク) 研究会 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T.-H. Watanabe
2. 発表標題 Moment extract method and its application to a semi-Lagrangian scheme for drift kinetic equations
3. 学会等名 2019 International Conference on Numerical Simulation of Plasmas (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T.-H. Watanabe
2. 発表標題 Generation of Alfvénic turbulence through the feedback magnetosphere-ionosphere
3. 学会等名 14th International Conference on Substorms (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T.-H. Watanabe
2. 発表標題 Spontaneous excitation of auroral structures and Alfvénic turbulence
3. 学会等名 3rd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 渡邊智彦
2. 発表標題 トロイダル電子温度勾配乱流への運動論的イオンの効果
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 T.-H. Watanabe
2. 発表標題 Effects of kinetic ions on electron temperature gradient turbulence
3. 学会等名 Max Planck Princeton Center Workshop (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 渡邊智彦
2. 発表標題 トロイダル電子温度勾配不安定性への運動論的イオンの影響
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 T.-H. Watanabe
2. 発表標題 Phase Space Entropy Transfer Analysis for Gyrokinetic Turbulence
3. 学会等名 Max-Planck/Princeton Center for Plasma Physics Workshop (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T.-H. Watanabe
2. 発表標題 Feedback instability in the magnetosphere-ionosphere coupling with collision-induced velocity shear
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T.-H. Watanabe
2. 発表標題 Structural formation and transition to Alfvénic turbulence in auroral plasma
3. 学会等名 19th International Congress on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 渡邊智彦
2. 発表標題 核融合プラズマ乱流輸送 シミュレーション研究の進展
3. 学会等名 第12回核融合エネルギー連合講演会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T.-H. Watanabe
2. 発表標題 Structural formation and arc dynamics in the feedback M-I coupling
3. 学会等名 ISSI workshop on Auroral Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T.-H. Watanabe
2. 発表標題 Multi-Scale and Multi-Directional Kinetic Plasma Turbulence
3. 学会等名 Chengdu Theory Festival (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 渡邊智彦, 前山伸也, 兼山将寿
2. 発表標題 磁気圏-電離圏結合系における磁気流体乱流の発生とその特性
3. 学会等名 第144回 SGEPS 総会および講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 渡邊智彦, 兼山将寿, 前山伸也
2. 発表標題 オーロラ乱流の発生とそのスペクトル特性
3. 学会等名 第35回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T.-H. Watanabe, M. Kaneyama, and S. Maeyama
2. 発表標題 Cross-scale energy transfer in the feedback magnetosphere-ionosphere coupling
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T.-H. Watanabe
2. 発表標題 Generation of Alfvénic turbulence and implication to auroral particle acceleration
3. 学会等名 ISEE symposium "Recent progress in heliospheric physics by direct measurements of unexplored space plasmas" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 渡邊智彦, 前山伸也, 西岡賢二, 仲田資季
2. 発表標題 捕捉電子モードと電子温度勾配乱流の競合過程
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 S. Kusaka, T.-H. Watanabe, and S. Maeyama
2. 発表標題 Effects of kinetic ions on electron temperature gradient turbulence
3. 学会等名 24th Joint US-EU Transport Task Force Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Kusaka, T.-H. Watanabe, and S. Maeyama
2. 発表標題 Effect of Kinetic Ions on the Electron Temperature Gradient Turbulence in Slab and Toroidal Geometries
3. 学会等名 AAPPS-DPP2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Kaneyama, T.-H. Watanabe, and S. Maeyama
2. 発表標題 Electron inertia effects on Alfvénic turbulence in the feedback magnetosphere-ionosphere coupling
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 兼山将寿, 渡邊智彦, 前山伸也
2. 発表標題 電子慣性効果を含むオーロラ発達における沿磁力線電場形成
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 T.-H. Watanabe
2. 発表標題 Generation of auroral turbulence in the magnetosphere-ionosphere coupling
3. 学会等名 JpGu-AGU Joint Meeting 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 T. Miura, T. -H. Watanabe, S. Maeyama, M. Nakata
2. 発表標題 Entropy transfer function and zonal flow shearing in ion temperature gradient turbulence
3. 学会等名 7th APTWG International Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 T. Miura, S. Maeyama, and T.-H. Watanabe
2. 発表標題 Entropy transfer and zonal flow shearing in ITG turbulence
3. 学会等名 12th Japan-Korea Workshop on ``Modeling and Simulation of Magnetic Fusion Plasmas'' (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 T.-H. Watanabe, M. Kaneyama, and S. Maeyama
2. 発表標題 Alfvenic turbulence in auroral magnetosphere-ionosphere coupling
3. 学会等名 13th International Conference on Substorms (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 三浦辰典, 渡邊智彦, 前山伸也, 仲田資季
2. 発表標題 イオン温度勾配乱流中で起こるエントロピー伝達過程と帯状流シアリング
3. 学会等名 Plasma Conference 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 國成希浩, 渡邊智彦, 前山信也
2. 発表標題 定常ジャイロ運動論的プラズマ乱流における分布関数のスペクトル解析
3. 学会等名 Plasma Conference 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 三浦辰典, 渡邊智彦, 前山伸也, 仲田資季
2. 発表標題 イオン温度勾配乱流でのエントロピー伝達過程と帯状流シアリング
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, 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 T.-H. Watanabe
2. 発表標題 Gyrokinetic simulation of fusion and space plasmas
3. 学会等名 6th East-Asia School and Workshop on Laboratory, Space, Astrophysical Plasmas (招待講演) (国際学会)
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, 石澤明宏
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 第33回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 T.-H. Watanabe
2. 発表標題 Auroral structural formation and transition to turbulence
3. 学会等名 Max Planck Princeton Center Workshop 2016 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 三浦辰典, 渡邊智彦, 前山伸也, 仲田資季
2. 発表標題 磁場閉じ込めプラズマ中のイオン温度勾配乱流におけるエントロピー伝達関数の定量的評価
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 國成希浩, 渡邊智彦, 前山伸也
2. 発表標題 定常ジャイロ運動論的プラズマ乱流における位相空間スペクトル構造
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 村上広暉, 渡邊智彦, 前山伸也
2. 発表標題 3次元スラブITG乱流における微細構造形成のジャイロ運動論的シミュレーション
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 佐藤大樹, 渡邊智彦, 前山伸也
2. 発表標題 Application of Contour Dynamics to Vlasov-Poisson Plasma in 1-D Periodic System
3. 学会等名 The 29th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 村上広暉、渡邊智彦、前山伸也
2. 発表標題 3次元スラブITG乱流シミュレーションにおける速度分布関数構造
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 村上広暉、渡邊智彦、前山伸也
2. 発表標題 3次元ドリフト波乱流中でのエントロピー揺動の位相空間伝達過程
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 T.-H. Watanabe, S. Maeyama, and H. Sato
2. 発表標題 Multi-scale and multi-directional turbulence simulation of fusion plasma
3. 学会等名 Space-time topology behind formation of micro-macro magneto-vortical structure manifested by Nambu mechanics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T.-H. Watanabe, J. Hiwatari, S. Maeyama
2. 発表標題 Feedback instability theory extended to the magnetosphere-ionosphere coupling with field-aligned inhomogeneity
3. 学会等名 JpgU-AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 渡邊智彦、樋渡淳也、前山伸也
2. 発表標題 沿磁力線方向の磁気圏・電離圏不均一性を考慮したフィードバック不安定性理論
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会第148 回総会・講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T.-H. Watanabe, H. Sato, and S. Maeyama
2. 発表標題 Contour dynamics simulation of Vlasov-Poisson plasma
3. 学会等名 JpGU Meeting 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T.-H. Watanabe
2. 発表標題 Auroral growth and self-excitation of kinetic Alfvén waves: a cross-disciplinary study for space and fusion plasmas
3. 学会等名 5th Asia Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渡邊智彦, 佐藤大樹, 前山伸也
2. 発表標題 非線形ランダウ減衰への等高線力学法の適用
3. 学会等名 第150回SGEPSS総会および講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渡邊智彦
2. 発表標題 磁場閉じ込め核融合研究からのオーロラ乱流と粒子加速への理論的アプローチ
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 渡邊智彦
2. 発表標題 シンポジウム「プラズマの位相空間ダイナミクスとエネルギー移送」まとめ
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 渡邊智彦、前山伸也
2. 発表標題 モーメント分離法を用いたドリフト運動論的方程式のセミラグランジアン解法
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022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	前山 伸也 (Maeyama Shinya) (70634252)	名古屋大学・理学研究科・講師 (13901)	

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	ミネソタ大学			