

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2023

課題番号：17K06991

研究課題名(和文) 高エネルギー粒子輸送へのバルクプラズマ乱流の影響

研究課題名(英文) Impact of turbulence on the transport of energetic particles

研究代表者

石澤 明宏 (Ishizawa, Akihiro)

京都大学・エネルギー科学研究科・教授

研究者番号：30390636

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：磁場閉じ込め型核融合装置において燃焼プラズマを維持するためには、燃焼によって生じた高エネルギー粒子とそれによって加熱される燃料プラズマそれぞれの良好な閉じ込めを両立させることが必要である。本研究は、この燃焼プラズマの閉じ込め悪化を引き起こす主要な原因となる電磁流体不安定性と乱流輸送を、世界最先端である大域的電磁的ジャイロ運動論シミュレーションを用いて評価することに成功した。そして、乱流と電磁流体不安定性のマルチスケール相互作用によって熱および粒子の輸送は増大し、プラズマ閉じ込め悪化が起こることを明らかにした。この成果をIAEA核融合会議およびNulcear Fusion誌に発表した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

乱流を駆動する低周波ミクロスケール電磁的ドリフト波揺動と、高エネルギー粒子輸送を引き起こす高周波マクロスケールトロイダルアルフベン固有モードの新しい非線形結合機構を見いだした。そして、その結果、ポロイダル断面上で乱流が均一化されて揺らぎレベルが増加し、さらにバルクプラズマと高エネルギー粒子の輸送が増加して核融合性能が劣化するという結果を発表した。また、上記の乱流と電磁流体不安定性のマルチスケール相互作用の物理機構を理解するために、乱流を駆動する自由エネルギー(エントロピー)の非線形移送を解析法を確立した。この新しい解析方法により、乱流と巨視的MHDの非線形相互機構の理解が進むと期待できる。

研究成果の概要(英文)：In order to realize high performance burning plasmas in magnetic-confinement fusion device, both bulk plasma transport and that of energetic fusion alpha-particles have to be reduced simultaneously. We investigate nonlinear multi-scale interactions between toroidal Alfvén eigenmode (TAE), which is unstable at low wavenumber, and drift-wave (DW) turbulence, which is driven by micro-instabilities at high wavenumber, by means of the global gyrokinetic simulation code GKNET. We have revealed that TAE suppresses the most unstable DW mode, and the TAE transfers the energy from the most unstable DW mode to lower wavenumber modes to modulate turbulence, because the TAE has a finite wavenumber in contrast to zonal flows. This modulation of DW turbulence by TAE leads to an enhancement of energy flux of bulk ions and particle flux of energetic ions. Hence, TAE and DW turbulence synergistically enhance the transport of both bulk plasma and energetic particles

研究分野：核融合プラズマ

キーワード：核融合 プラズマ 数値シミュレーション 乱流 非線形 電磁流体 燃焼 ジャイロ運動論

1. 研究開始当初の背景

核融合プラズマ閉じ込めの研究は、核融合反応によって高エネルギーアルファ粒子を生成する燃焼プラズマという新しい領域に移行しようとしている。高性能の燃焼プラズマを実現するためには、高エネルギーアルファ粒子輸送とバルクプラズマ輸送の両方を同時に低減する必要があり、そのため、それらを引き起こす揺動を低減する必要がある。前者の輸送は、アルファ粒子との共鳴によって駆動されるせん断アルフェン波であるトロイダルアルフェン固有モード (TAE) などのマクロスケールの磁気流体力学 (MHD) に従う揺動によるものであり、後者は、イオンや電子のドリフト波 (DW) などのバルクプラズマ圧力勾配によって駆動されるマイクロスケールの乱流揺動によるものであることが広く認識されている。このようなマクロスケールの MHD モードとマイクロスケールの DW 乱流は燃焼プラズマ内で共存するため、それらの相互作用は、高エネルギー粒子とバルクプラズマの両方を制御し、全体的な核融合性能を制御する重要な機構として非常に重要である。

マルチスケール相互作用が閉じ込めに及ぼす不利な影響の一例として、マクロスケールの MHD 不安定性により、入れ子になった磁束面のトポロジが磁気島のあるトポロジに変化することでドリフト波乱流が影響を受け、乱流輸送が増加するということがある[1]。一方、静的な磁気島の周りに強いせん断流が現れ、DW を抑制する役割を果たす場合、プラズマ閉じ込めにとって好ましい影響が観察される場合もある[2]。一方、マクロスケールの MHD は、準静的または振動的な大規模なシステムサイズの磁場揺動を引き起こし、特にパリティ混合による磁場揺動によって、マイクロスケールの DW 乱流に影響を与えられている[1]。ここで、上で説明した MHD は、磁気島などの周波数がゼロまたは低周波数のものに限定されることに注意する。一方、TAE などははるかに高い周波数のアルフェン波を扱う研究は、燃焼プラズマにおける極めて重要な意味を持つにもかかわらず、これまで行われていない。近年、アルフェン波と乱流の相互作用の研究が始まりつつある。

2. 研究の目的

燃焼プラズマの研究において、燃焼によって生じる高エネルギー粒子と燃焼を起こすバルクプラズマ両方の良好な閉じ込めを同時に達成するためには、高エネルギー粒子によって駆動される電磁流体 (MHD) 不安定性とバルクプラズマに生じるドリフト波乱流の相互作用を理解することが重要である。我々は、高エネルギー粒子によって駆動される MHD 不安定性である TAE (低トロイダルモード数) とドリフト波乱流 (高トロイダルモード数の微視的不安定性によって駆動される) の相互作用を調べ、これらの相互作用が、高エネルギー粒子と燃焼を起こすバルクプラズマ両方の閉じ込めを劣化させるのか改善させるのかを評価する。さらに、その劣化または改善の機構を理解することにより、核融合プラズマの閉じ込め改善を実現する。

3. 研究の方法

電磁的大域的ジャイロ運動論シミュレーションコード GKENT [3,4] を用いて TAE とドリフト波乱流の相互作用を調べる。この目的のために、高エネルギー粒子およびバルクプラズマともに圧力勾配をもつ正磁気シアプラズマを考える。GKNET は、イオンと電子の分布関数の 5 次元位相空間における時間発展をポアソン方程式およびアンペールの式と連立して、オイラー的に解くシミュレーションコードである。分布関数の実空間および速度空間内微分は差分法を用いて実施し、時間発展は 4 次のルンゲクッタ法によって行う。これらの差分について MPI 並列化を行う。

4. 研究成果

4.1. 線形安定性

高エネルギー粒子およびバルクプラズマともに圧力勾配をもつ正磁気シアプラズマは、 $n=2$ モードが TAE に対して不安定であり、その実周波数は Alfvén continuum のギャップ内にある (図 1 左の黄色領域)。また、 $n>5$ モードがドリフト波モードの一種である運動論的バルーニングモード (KBM) に対して不安定である (図 1 左)。TAE ($n=2$) は巨視的なモード構造を持ち、KBM ($n=12$) は微視的なバルーニング構造を持つ (図 1 右)。

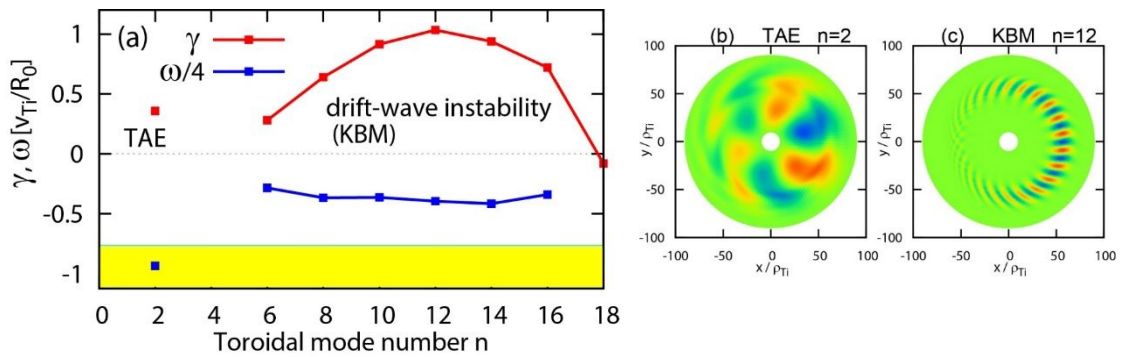


図1 線形成長率と実周波数のトロイダルモード数依存性（左）。黄色領域はAlfvén continuumのギャップを示す。TAE ($n=2$)と KBM ($n=12$)の固有関数の静電ポテンシャル分布（右）。

4.2. 非線形乱流状態

上述の TAE とドリフト波モード (KBM) が共に不安定なプラズマの非線形シミュレーションを行う（このシミュレーションを "TAE+DWT" と呼ぶ、図 2 下図）。また、比較のために、高エネルギー粒子圧力分布が平坦なプラズマにおけるドリフト波乱流のシミュレーション（"only DWT" と呼ぶ、図 2 上図）およびバルクの圧力分布が平坦なプラズマにおける TAE モードのシミュレーション（"only TAE" と呼ぶ）を行い、三者を比較し、TAE モードとドリフト波乱流の相互作用を理解する。

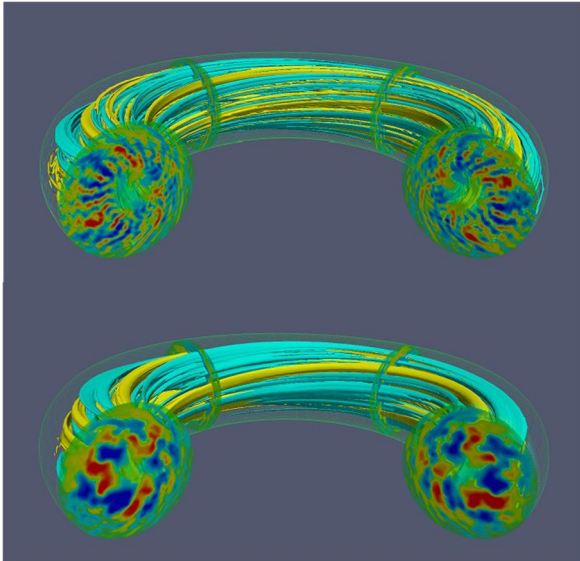


図 2 上図：高エネルギー粒子駆動トロイダルアルフェンモードがない場合の乱流揺動（静電ポテンシャル揺動）。下図：高エネルギー粒子駆動トロイダルアルフェンモードがある場合の乱流揺動（静電ポテンシャル揺動）。

"TAE+DWT" では、初期にゾーナル流を伴ったドリフト波乱流状態 (KBM によって駆動される) が実現する (図 3 の $t=12, 16$)。これは、図 1 に示されたように KBM のほうが TAE より成長率が大きいからである。この乱流状態の中をゆっくりと TAE が成長し飽和する (図 3 の $t=22, 36$)。TAE が飽和した後は準定常状態が得られる。

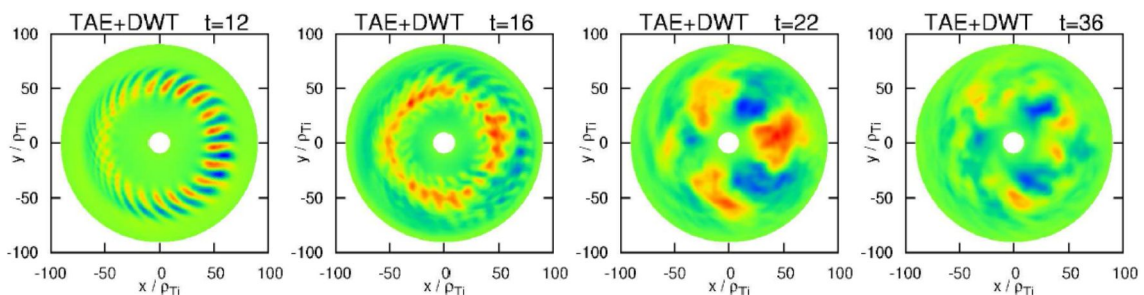


図 3 TAE と KBM に駆動されたドリフト波乱流が混在する場合 "TAE+DWT" の静電ポテンシャル

のカラーマップの時間発展。

この TAE とドリフト波乱流の相互作用によって生じた乱流状態では、低 n の TAE とゾーナル流が卓越することを、図 4 (左) の "TAE+DWT" のスペクトルが示す。"TAE+DWT" と "only DWT" のスペクトルを比較すると、"TAE+DWT" の最も不安定なドリフト波モード ($n=12$) は "only DWT" の $n=12$ より小さく、"TAE+DWT" の $n=10$ モードは "only DWT" の $n=10$ モードより大きいことがわかる (図 4 左)。したがって、TAE ($n=2$) とドリフト波乱流の相互作用は、最も不安定なドリフト波モードを抑制し、このモードより低波数のモードを強めることが示された。そして、この相互作用により、この低波数モードを通じて、バルクイオンのエネルギー輸送は増大する (図 4 右)。また、そのスペクトルのピークはドリフト波乱流のみの場合 ("only DWT") の $n=12$ から相互作用がある場合 ("TAE+DWT") の $n=10$ に移ることが示された (図 4 右)。さらに、高エネルギー粒子輸送も、この相互作用により TAE のみがある場合 ("only TAE") と比較して、相互作用がある場合 ("TAE+DWT") は増大する (図 4 右)。

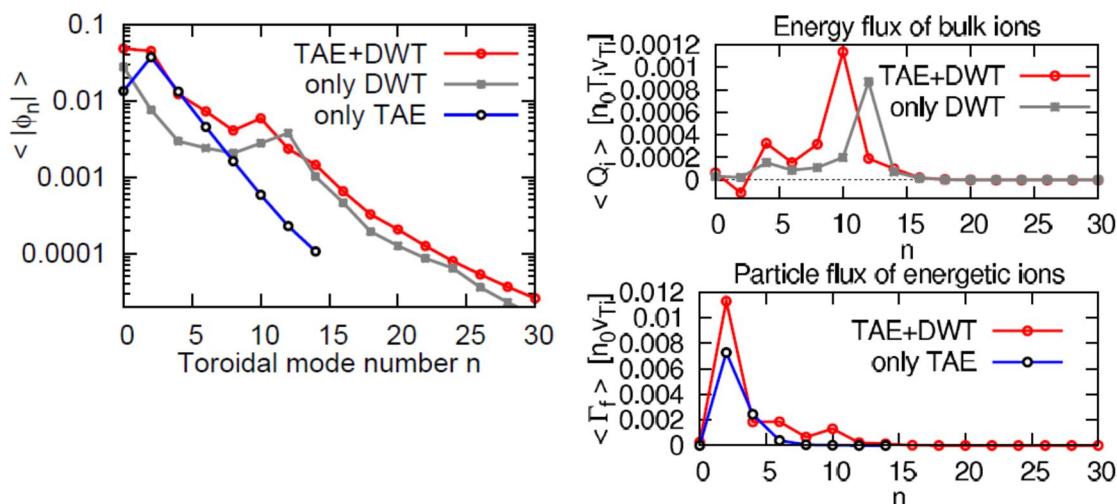


図 4 静電ポテンシャル のトロイダルモードスペクトル(左)、TAE とドリフト波乱流が混在する場合 "TAE+DWT"、ドリフト波乱流のみの場合 "only DWT"、TAE のみの場合 "only TAE" をそれぞれ示す。時間平均したバルクイオンのエネルギー束 Q_i と高エネルギー粒子の粒子束 Γ_f (右)。

4.3. まとめ

我々は、TAE (低トロイダルモード数) とドリフト波乱流 (高トロイダルモード数の微視的不安定性によって駆動される) の相互作用を、電磁的大域的ジャイロ運動論シミュレーションコード (GKENT [3,4]) を用いて調べた。その結果、以下のことを明らかにした。(i) TAE とドリフト波乱流の相互作用は、最も不安定なドリフト波モードを低減し、より低波数なモードを増大させる。(ii) この相互作用は、この「より低波数なモード」を通じて、バルクイオンのエネルギー輸送を増大させるとともに、高エネルギー粒子の粒子輸送を増大させる [5]。

さらに、乱流のマルチスケール相互作用を定量的に評価するために、非線形エントロピー (自由エネルギー) 移送を調べた。その結果、イオン温度勾配乱流は、実空間における $E \times B$ 乱流対流によるグローバルなエントロピー移動に起因する新たなメカニズムによって飽和することを明らかにした。乱流に付随するエントロピーの径方向への移動は、磁場揺動の影響を避けるために乱流の最も活発な領域の両側でグローバルな帯状流を生成し、その結果グローバルな帯状流の励起が抑制されず、乱流の定常状態を導く [6]。

- [1] A. Ishizawa, Y. Kishimoto, and Y. Nakamura, Plasma Phys. Control. Fusion, 054006 (2019).
- [2] K. Ida, K. Kamiya, A. Isayama and Y. Sakamoto (JT-60 Team), Phys. Rev. Lett. 109 065001 (2012).
- [3] K. Imadera, Y. Kishimoto, K. Obrejan, T. Kobiki and J. Q. Li, IAEA-FEC, TH/P5-8 (2014).
- [4] A. Ishizawa, K. Imadera, Y. Nakamura, and Y. Kishimoto, Phys. Plasmas, 082301 (2019).
- [5] A. Ishizawa, K. Imadera, Y. Nakamura and Y. Kishimoto, Nuclear Fusion 61, 114002 (2021).
- [6] H. Masui, A. Ishizawa, K. Imadera, Y. Kishimoto, Y. Nakamura, Nuclear Fusion 62, 074001 (2022).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計20件（うち査読付論文 20件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Masui H., Ishizawa A., Imadera K., Kishimoto Y., Nakamura Y.	4. 巻 62
2. 論文標題 Global saturation physics of ion temperature gradient turbulence in finite normalized pressure tokamaks	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 074001 ~ 074001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/ac667f	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 Kawagoe S, Ishizawa A, Aiba N, Nakamura Y	4. 巻 64
2. 論文標題 Two types of helical-core equilibrium states in tokamak plasmas	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Plasma Physics and Controlled Fusion	6. 最初と最後の頁 105004 ~ 105004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6587/ac828c	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, 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 1-8
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 Kishimoto Y., Imadera K., Ishizawa A., Wang W., Li J. Q.	4. 巻 381
2. 論文標題 Characteristics of constrained turbulent transport in flux-driven toroidal plasmas	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences	6. 最初と最後の頁 1-20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1098/rsta.2021.0231	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., Imadera K., Nakamura Y., Kishimoto Y.	4. 巻 61
2. 論文標題 Multi-scale interactions between turbulence and magnetohydrodynamic instability driven by energetic particles	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 114002 ~ 114002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/ac1f61	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 McKinney I.J., Pueschel M.J., Faber B.J., Hegna C.C., Ishizawa A., Terry P.W.	4. 巻 87
2. 論文標題 Kinetic-ballooning-mode turbulence in low-average-magnetic-shear equilibria	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Plasma Physics	6. 最初と最後の頁 905870311
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/s0022377821000581	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 Ishida Y., Ishizawa A., Imadera K., Kishimoto Y., Nakamura Y.	4. 巻 27
2. 論文標題 Global gyrokinetic nonlinear simulations of kinetic infernal modes in reversed shear tokamaks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 092302 ~ 092302
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0013349	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 Nakamura Y., Ishizawa A., Ishida Y.	4. 巻 27
2. 論文標題 Influence of plasma boundary shape on helical core/long-lived mode in tokamak plasmas	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 092509 ~ 092509
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0013652	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 Pueschel M.J., Hatch D.R., Kotschenreuther M., Ishizawa A., Merlo G.	4. 巻 60
2. 論文標題 Multi-scale interactions of microtearing turbulence in the tokamak pedestal	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 124005 ~ 124005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/abba49	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 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) 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 -

1. 著者名 Ishizawa A., Imadera K., Nakamura Y., Kishimoto Y.	4. 巻 26
2. 論文標題 Global gyrokinetic simulation of turbulence driven by kinetic ballooning mode	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 082301 ~ 082301
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5100308	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, Kishimoto Y, Nakamura Y	4. 巻 61
2. 論文標題 Multi-scale interactions between turbulence and magnetic islands and parity mixture - a review	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Plasma Physics and Controlled Fusion	6. 最初と最後の頁 054006 ~ 054006
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6587/ab06a8	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 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 Ishizawa A., Kishimoto Y., Watanabe T.-H., Sugama H., Tanaka K., Satake S., Kobayashi S., Nagasaki K., Nakamura Y.	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 ~ 066010
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/aa6603	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 M., Ishizawa A.	4. 巻 24
2. 論文標題 Nonlinear parity mixtures controlling the propagation of interchange modes	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 082501 ~ 082501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.4993472	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 S., Watanabe T.-H., Ishizawa A.	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 195002-195002
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 Ishizawa A., Kishimoto Y., Imadera K., Nakamura Y., Maeyama S.	4. 巻 64
2. 論文標題 Plasma beta dependence of turbulent transport suggesting an advantage of weak magnetic shear from local and global gyrokinetic simulations	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 066008 ~ 066008
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/ad3d6d	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 Niino M, Ishizawa A, Nakamura Y, Maeyama S, Watanabe T-H	4. 巻 65
2. 論文標題 Plasma beta dependence of ion temperature gradient driven turbulence influenced by Shafranov shift	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Plasma Physics and Controlled Fusion	6. 最初と最後の頁 065004 ~ 065004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6587/acc8fc	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 Adulsiriswad P., Todo Y., Yamamoto S., Kado S., Kobayashi S., Ohshima S., Okada H., Minami T., Nakamura Y., Ishizawa A., Konoshima S., Mizuuchi T., Nagasaki K.	4. 巻 64
2. 論文標題 Effects of the resonance modification by electron cyclotron current drive on the linear and nonlinear dynamics of energetic particle driven magnetohydrodynamics modes in Heliotron J	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 016036 ~ 016036
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/ad0a0c	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 6件 / うち国際学会 16件）

1. 発表者名 石澤明宏, 今寺賢志, 中村祐司, 岸本泰明
2. 発表標題 エントロピー対流によるドリフト波乱流の飽和
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 Akihiro Ishizawa
2. 発表標題 Lecture on Parity of MHD fluctuations
3. 学会等名 US-Japan MHD Workshop on "MHD activity measurement and control in long-pulse operations towards DEMO" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 A. Ishizawa, H. Masui, K. Imadera, Y. Kishimoto, Y. Nakamura
2. 発表標題 Saturation mechanism of ion temperature gradient driven turbulence in finite beta tokamaks studied by global gyrokinetic simulation
3. 学会等名 the 27th International Conference on Numerical Simulation of Plasmas (ICNSP2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石澤明宏
2. 発表標題 乱流輸送の電磁ジャイロ運動論シミュレーション
3. 学会等名 第27回数値トカマク実験 (NEXT) 研究会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石澤明宏 , 今寺賢志 , 中村祐司 , 岸本泰明
2. 発表標題 乱流輸送のベータ値依存性の大域的ジャイロ運動論シミュレーション
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 増井英陽, 石澤明宏, 今寺賢志, 岸本泰明, 中村祐司
2. 発表標題 有限ベータプラズマにおけるドリフト波乱流の飽和機構
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 伊藤幹也, 石澤明宏, 今寺賢志, 岸本泰明, 中村祐司
2. 発表標題 トカマクプラズマのトロイダルアルフェン固有モードにおける運動論効果
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 A. Ishizawa, K. Imadera, Y. Nakamura, Y. Kishimoto
2. 発表標題 Multi-scale interaction between toroidal Alfvén eigenmode and drift-wave turbulence
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 Hideaki Masui, Akihiro Ishizawa, Kenji Imadera, Yasuaki Kishimoto, Yuji Nakamura
2. 発表標題 Saturation mechanism of drift-wave turbulence in finite-beta plasmas
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 石澤明宏, 今寺賢志, 中村祐司, 岸本泰明
2. 発表標題 大域的ジャイロ運動論シミュレーションによる乱流輸送のベータ値依存性
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 K. Nakatani, A. Ishizawa, Y. Nakamura, S. Maeyama, T. -H. Watanabe
2. 発表標題 Normalized pressure dependence of turbulent transport influenced by the Shafranov shift
3. 学会等名 47th European Physical Society Conference on Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 A. Ishizawa, K. Imadera, Y. Nakamura, Y. Kishimoto
2. 発表標題 Interaction Between Energetic-Particle-Driven MHD Mode and Drift-Wave Turbulence Based on Global Gyrokinetic 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 Akihiro Ishizawa
2. 発表標題 Interaction between Energetic- Particle-Driven MHD Mode and Drift-Wave Turbulence
3. 学会等名 2021 Max-Planck Princeton Center Annual Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石澤明宏, 今寺賢志, 中村祐司, 岸本泰明
2. 発表標題 高エネルギー粒子駆動MHDモードとドリフト波乱流の相互作用
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 石澤明宏, 今寺賢志, 中村祐司, 岸本泰明
2. 発表標題 トロイダルアルフェン固有モードとドリフト波乱流の相互作用
3. 学会等名 プラズマ核融合学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石澤明宏, 今寺賢志, 中村祐司, 岸本泰明
2. 発表標題 トロイダルアルフェン固有モードに影響された乱流輸送
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 中谷滉平, 石澤明宏, 中村祐司, 前山伸也, 渡邊智彦
2. 発表標題 シャフラノフシフトに影響された乱流輸送の磁気シア依存性
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 石澤 明宏
2. 発表標題 シンポジウム トロイダルプラズマにおける揺らぎの大域特性と分布形成：MHDによる磁場構造が揺動および輸送へ与える影響
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 石澤明宏, 今寺賢志, 中村祐司, 岸本泰明
2. 発表標題 運動論的バルーニングモードの非線形ジャイロ運動論シミュレーション
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 Akihiro Ishizawa
2. 発表標題 Interaction between MHD and turbulence and helical core
3. 学会等名 5th UNIST- Kyoto Univ. Workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石田祐太郎, 石澤明宏, 今寺賢志, 岸本泰明, 中村祐司
2. 発表標題 反転磁気シアトカマクにおける運動論的MHD不安定性の非線形飽和機構
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 石田祐太郎, 石澤明宏, 今寺賢志, 岸本泰明, 中村祐司
2. 発表標題 負磁気シアトカマクにおける運動論的MHD不安定性の非線形飽和機構
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 石田祐太郎, 石澤明宏, 今寺賢志, 岸本泰明, 中村祐司
2. 発表標題 ゼロ磁気シア領域を持つトカマクプラズマにおけるMHD不安定性の大域的ジャイロ運動論解析
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 浦野大介, 石澤明宏, 中村祐司, 渡邊智彦
2. 発表標題 微視的乱流のベータ値依存性へのローカルシアの影響
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 石田祐太郎, 石澤明宏, 中村祐司, 今寺賢志, 岸本泰明
2. 発表標題 ゼロ磁気シア領域を持つトカマクプラズマにおけるMHD不安定性の大域的ジャイロ運動論解析
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 Akihiro Ishizawa
2. 発表標題 Multi-scale interaction and parity mixture between turbulence and magnetic islands
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 Akihiro Ishizawa
2. 発表標題 The study of multi-scale interaction and parity in turbulence/MHD system based on global flux driven simulation
3. 学会等名 THEORY OF FUSION PLASMAS (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 A. Ishizawa, K. Imadera, Y. Nakamura, Y. Kishimoto
2. 発表標題 Electromagnetic global gyrokinetic simulation for the analysis of MHD instabilities and turbulence
3. 学会等名 The 45th European Physical Society Conference on Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石澤明宏, 今寺賢志, 中村祐司, 岸本泰明
2. 発表標題 電磁的不安定性の大域的ジャイロ運動論解析
3. 学会等名 第12回核融合エネルギー連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石澤明宏, 今寺賢志, 中村祐司, 岸本泰明
2. 発表標題 電磁的微視的不安定性およびMHD不安定性の大域的ジャイロ運動論解析
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 Akihiro Ishizawa, Kenji Imadera, Yuji Nakamura, Yasuaki Kishimoto
2. 発表標題 Code development of global electromagnetic gyrokinetic simulation
3. 学会等名 Plasma Conference 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 A. Ishizawa, Y. Kishimoto, T.-H. Watanabe, H. Sugama, K. Tanaka, S. Satake, S. Kobayashi, K. Nagasaki and Y. Nakamura
2. 発表標題 Gyrokinetic analysis of turbulent transport in LHD and Heliotron J plasmas
3. 学会等名 21st International Stellarator-Heliotron Workshop (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Akihiro Ishizawa
2. 発表標題 Multi-scale interaction between magnetic island and 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 A. Ishizawa, Y. Kishimoto, T.-H. Watanabe, H. Sugama, K. Tanaka, S. Satake, S. Kobayashi, K. Nagasaki and Y. Nakamura
2. 発表標題 Turbulent transport in LHD and Heliotron J plasmas
3. 学会等名 Asia-Pacific Transport Working Group Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Akihiro Ishizawa
2. 発表標題 Multi-scale interaction between island and turbulence
3. 学会等名 3rd UNIST- Kyoto Univ. Workshop on "Physics validation and control of turbulent transport and MHD in fusion plasmas"
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 浦野大介, 栞田健太, 石澤明宏, 中村祐司, 渡邊智彦
2. 発表標題 微視的不安定性のベータ値依存性へのローカルシアの影響
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 A. Ishizawa, Y. Kishimoto, K. Imadera, Y. Nakamura, S. Maeyama
2. 発表標題 Plasma beta dependence of turbulent transport suggesting an advantage of weak magnetic shear
3. 学会等名 29th IAEA Fusion Energy Conference (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 石澤明宏, 今寺賢志, 中村祐司, 岸本泰明
2. 発表標題 運動論的バルーニングモード乱流の飽和機構
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〕

石澤明宏のホームページ http://www.em-energy.energy.kyoto-u.ac.jp/ishizawa/ 京都大学電磁エネルギー学分野 http://www.em-energy.energy.kyoto-u.ac.jp/

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			
米国	University of Texas at Austin			
米国	University of Texas at Austin			
米国	University of Texas at Austin			
米国	University of Texas at Austin			