

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月20日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K06652

研究課題名(和文) 高速イオン駆動型不安定性における多種粒子の運動論的效果

研究課題名(英文) Kinetic effects of multiple particle species on fast ion driven instabilities

研究代表者

藤堂 泰 (Todo, Yasushi)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授

研究者番号：00249971

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：核融合発電を目的として、核融合反応から発生するアルファ粒子が燃料粒子を加熱することにより核融合反応に必要な高温を自律的に保持する核融合燃焼プラズマの実現が期待されている。アルファ粒子などの高速イオンが駆動する不安定性は、高速イオンの閉じ込めを劣化させる可能性があるため重要な研究課題である。高速イオンと電磁流体のハイブリッドシミュレーションプログラムを、熱イオンや高エネルギー電子も同時に取り扱うことができるように拡張することに成功し、これらの粒子が高速イオン駆動不安定性に及ぼす効果を解明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

将来の核融合炉では核融合反応から発生する高速アルファ粒子が燃料粒子を加熱することにより、核融合反応に必要な高温を自律的に保持することが期待されている。本研究において開発したハイブリッドシミュレーションプログラムにより、将来の核融合炉において重要な高速アルファ粒子分布の予測精度が大きく向上する。これにより、信頼性の高い運転シナリオの提案や核融合炉の設計、さらには核融合発電の早期実現に貢献できる。

研究成果の概要(英文)：The realization of fusion burning plasma, where the fusion-born alpha particles heat the fuel particles to self-sustain the high temperature needed for the fusion reaction, is expected. Instabilities driven by fast ions such as alpha particles are important research subjects because they deteriorate fast ion confinement. We successfully extended the hybrid simulation program for fast ions and a magnetohydrodynamic fluid to deal with thermal ions and energetic electrons simultaneously, and clarified the effects of these particles on fast ion driven instabilities.

研究分野：核融合、プラズマ物理、計算機シミュレーション

キーワード：高速イオン駆動不安定性 シミュレーション 運動論的效果 熱イオン 高エネルギー電子

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

高速アルファ粒子がプラズマ加熱の役割を担う核融合燃焼プラズマでは、高速アルファ粒子の閉じ込めは最重要研究課題の一つである。高速アルファ粒子などが駆動する電磁流体力学 (MHD) 不安定性は高速アルファ粒子の閉じ込めを劣化させるため、シミュレーションによる挙動予測とそれに基づいた制御方法の提案が期待されている。研究開始の時点では、電子サイクロトロン波加熱 (ECH) によるアルフベン固有モード (AE) の安定化が複数の実験装置から報告されるとともに、欧州の理論グループが ITER における AE の不安定化を予測していた。また、核融合科学研究所の大型ヘリカル装置 (LHD) の実験に関連して、高エネルギー粒子駆動測地的音響モード (EGAM) によるイオン加熱が議論されていた。

### 2. 研究の目的

核融合燃焼プラズマの重要研究課題である (1) ECH による AE の制御、(2) ITER における AE の安定性と高速イオン輸送、(3) EGAM によるイオン加熱に関するシミュレーション研究を実施する。さらに、高速イオン駆動不安定性や高速イオンと MHD 不安定性の相互作用に関するシミュレーション研究を行い、各課題の鍵となる物理機構を解明することによりそれぞれの応用に向けた物理基盤を構築する。

### 3. 研究の方法

高速イオン、熱イオン、高エネルギー電子の運動論的效果を考慮した運動論的 MHD シミュレーションモデルを構築する。この新しいモデルを用いて拡張した運動論的 MHD ハイブリッドシミュレーションコード MEGA を用いて高速イオン駆動型不安定性のシミュレーションを実行し、これまでは流体モデルで近似されてきた熱イオンと高エネルギー電子の運動論的效果を明らかにする。

### 4. 研究成果

#### (1) 高エネルギー電子とアルフベン固有モードの相互作用

電子サイクロトロン波加熱 (ECH) のアルフベン固有モード (AE) に対する影響を理解するため、ECH によって生成される高エネルギー電子と AE の相互作用を研究した。まず、国際トカマク物理活動 (ITPA) 高エネルギー粒子物理トピカルグループで実施したトロイダルアルフベン固有モード (TAE) に関するコード検証課題[1]について、高速イオンを高エネルギー電子に置き換えてシミュレーションを実行した。この検証問題はトロイダルモード数  $n=6$  の TAE を対象としている。シミュレーションの結果、高エネルギー電子を用いた場合にも TAE が不安定となることが確認できた。高速イオンによって不安定化した TAE と高エネルギー電子によって不安定化した TAE の空間分布を比較すると、両者のポロイダルモード数は同じであるが、高エネルギー電子が不安定化した TAE の分布は半径方向に比較的広がっていた。アルフベン周波数で規格化した周波数は、高速イオン駆動の場合が 0.28 であるのに対して、高エネルギー電子駆動の場合は 0.18 であった。また、TAE の伝播方向は、トロイダル方向とポロイダル方向の双方について高エネルギー電子の場合と高速イオンの場合では逆である。この結果は、高エネルギー粒子の空間勾配によって TAE が不安定化する際の一般的な性質である。

次に、高速イオンと高エネルギー電子が共存する場合の TAE のシミュレーション研究を実施した。高速イオンが不安定化する TAE を高エネルギー電子が安定化する場合があることが確認できた。高エネルギー電子の圧力分布をバルクプラズマ圧力分布で置き換えた場合でも同様の安定化効果を確認することができたので、安定化効果は圧力分布から生じていると考えられる。本課題の終了後も安定化物理機構の解析を継続して進める。

[1] A. Könies *et al.*, Nuclear Fusion **58** (2018) 126027.

#### (2) ITER におけるアルフベン固有モード

ITER 標準運転シナリオにおいて、トロイダルモード数  $n=15-30$  のアルフベン固有モード (AE) が弱く不安定であることが報告されている[2]。このシナリオについては MEGA を用いた解析を過去に行い、1) AE は安定となる、2)  $n=3$  の強い MHD 不安定性が存在するが、安全係数 (磁力線のピッチ) が  $q=1$  となる磁気面が存在しなければこの MHD 不安定性は安定化される、従って、3) 高エネルギー粒子輸送は無視できるという結論を得ていた[3]。両者の結論の違いは初期平衡データが異なること、および、高エネルギー粒子の軌道半径効果の有無が最大の原因であると考えられたため、文献[2]と同じ ITER 標準運転シナリオ平衡データを用いて、格子点数が  $n=30$  モードの解析に十分かどうか注意しながら MEGA による解析を実施した。

特定のトロイダルモード数  $n$  に着目して線形成長率を調べることとし、円柱座標系  $(R, \varphi, z)$  に対して格子点数を  $(512, 16, 1024)$  とした。ここで、 $\varphi$  はトロイダル角を示し、 $(R, z)$  がトーラス断面となるが、断面上の格子点数については文献[3]での計算から倍増している。トロイダル角方向のシミュレーション領域は  $0 \leq \varphi < 2\pi/n$  としているので、線形解析に限定すればトロイダル角方向の格子点数は 16 で十分である。

トロイダルモード数  $n=15$  と  $n=30$  に着目して調査を行った。トロイダルモード数  $n=15$  の不安定モードは、その周波数が連続スペクトルと交差していることから高エネルギー粒子モード

(EPM)と呼ばれる不安定モードであると判定した。このEPMの周波数は73kHz、成長率は $9.0 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ であった。次にトロイダルモード数 $n=30$ の不安定モードの空間分布を図1に示す。図1は $n=30$ のアルフベン連続スペクトルおよび不安定モードの周波数と半径方向位置を示している。不安定モードの周波数が連続スペクトルのギャップ中にあり、連続スペクトルの極大値よりも少し高い値をとっていることから、このモードはトロイダルアルフベン固有モード(TAE)であると判定した。このTAEの主要ポロイダルモード(トーラス断面を周回する方向の方位角をポロイダル角という)は $m=30$ と31のみであり、典型的な炉心局在TAEである。周波数は93kHz、成長率は $9.5 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ であった。

このように軌道半径効果を無視すると $n=15$ と $n=30$ の不安定モードが存在することが確認できたが、この結果は高エネルギー粒子の軌道半径効果に依存する可能性があるため、その効果を調べた。 $n=15$ のEPMの計算では、軌道半径効果が成長率を $3 \sim 4 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ 低下させることがわかった。一方で、 $n=30$ のTAEに対して軌道半径効果はさらに強く、軌道半径効果の有効化によってTAEは完全に安定化した。文献[2]の計算では現実のプラズマには含まれている軌道半径効果が含まれていなかったため、この効果によってTAEが安定化されるという本研究の結果は重要である。以上の成果をウィーンで開催された「高エネルギー粒子物理」に関するITPA課題グループ会合で報告し、特に、ITERの解析を行う上で軌道半径効果を含む高エネルギー粒子駆動MHD解析が必要であることを指摘した[4]。

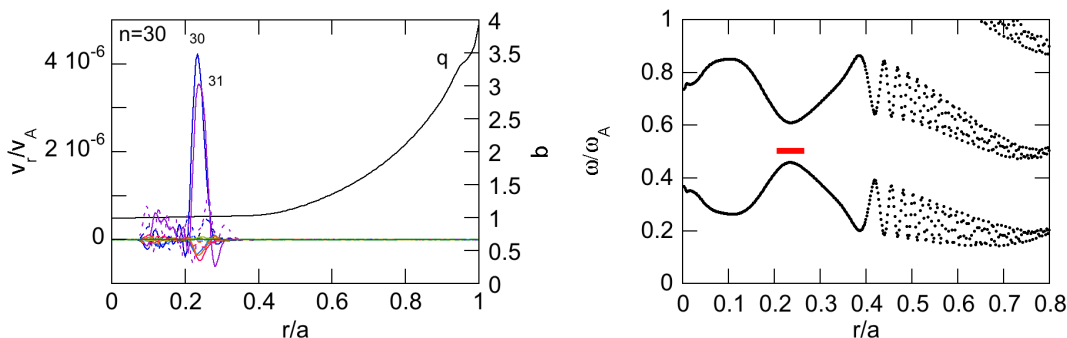


図1 (a) トロイダルモード数 $n=30$ のトロイダルアルフベン固有モード(TAE)の半径方向速度分布と (b) アルフベン連続スペクトル。TAEの位置と周波数が赤線で示されている。

[2] S. D. Pinches *et al.*, *Physics of Plasmas* 22, 021807 (2015).

[3] Y. Todo and A. Bierwage, *Plasma and Fusion Research* 9, 3403068 (2014).

[4] Y. Todo, “Magnetohydrodynamic hybrid simulations of Alfvén eigenmodes in the ITER 15MA scenario”, 15th International Tokamak Physics Activity (ITPA) Energetic Particle Physics Topical Group Meeting (September 7-9, 2015, Vienna, Austria).

### (3) 高エネルギー粒子駆動測地的音響モード(EGAM)によるイオン加熱

高エネルギー粒子駆動測地的音響モード(EGAM)はトカマク型装置やヘリカル型装置の環状プラズマにおいて高速イオンが引き起こす不安定性の一種である。EGAMはトロイダル方向に対称な空間構造を持つので粒子の半径方向輸送に寄与しない。EGAMとの相互作用によってエネルギーを与える粒子種とエネルギーを受け取る粒子種が存在するとき、粒子の半径方向分布を乱すことなくEGAMを媒介とする粒子種間のエネルギー移送が可能となる。高エネルギー粒子がEGAMを不安定化する際に、EGAMから熱イオンにエネルギーが受け渡されれば、EGAMを媒介として高エネルギー粒子から熱イオンへのエネルギー移送が可能となる。この機構はGAMチャネリングと呼ばれ、核融合反応によって生じる高エネルギーアルファ粒子がプラズマ加熱の役割を担う核融合燃焼プラズマでの実現が期待されている。現在の核融合燃焼プラズマの想定では、アルファ粒子は粒子間衝突によって熱イオンと電子を加熱するが、特に高エネルギーのアルファ粒子の衝突は電子との衝突が支配的であり、核融合反応の燃料である熱イオンの加熱効率は低い。GAMチャネリングは高エネルギーアルファ粒子による熱イオンの効率的な加熱を可能とするため、核融合エネルギーの実現に向けて大きな貢献が期待される物理機構であるが、現実的な物理条件下での解析はこれまでに行われていなかった。

高エネルギー粒子と熱イオンの双方を運動論的に取り扱うシミュレーションを適用し、LHD実験に基づいた3次元実形状平衡とプラズマ分布を用いて、LHDにおけるEGAMのシミュレーションを実行した[5,6]。図2はEGAMと各粒子種エネルギーの時間発展を示している。EGAMの振幅は成長後に飽和し、周波数変調を伴ってほぼ一定レベルに保たれている。各粒子種エネルギーの時間発展を見ると、高エネルギー粒子のエネルギーが減少して熱イオンのエネルギーが増加しており、GAMチャネリングが実現していることがわかる。興味深い点は、EGAMの飽和後の周波数変調の期間にもエネルギー移送が続いていることである。周波数変調は、高エネルギー粒子と熱イオンの位相空間分布においてEGAMの静電ポテンシャルに捕捉された粒子群によって構成される島状構造が自発的に形成されて、EGAMのエネルギー散逸と釣り合うように島状構造の軌道周回周波数が変化することにより実現することが理論的に提案

されている。高エネルギー粒子と熱イオンの位相空間分布関数を解析したところ、分布関数揺動の周回周波数が EGAM の周波数に同調して時間変化していることを確認し、周波数変調の理論との整合性を確認した。

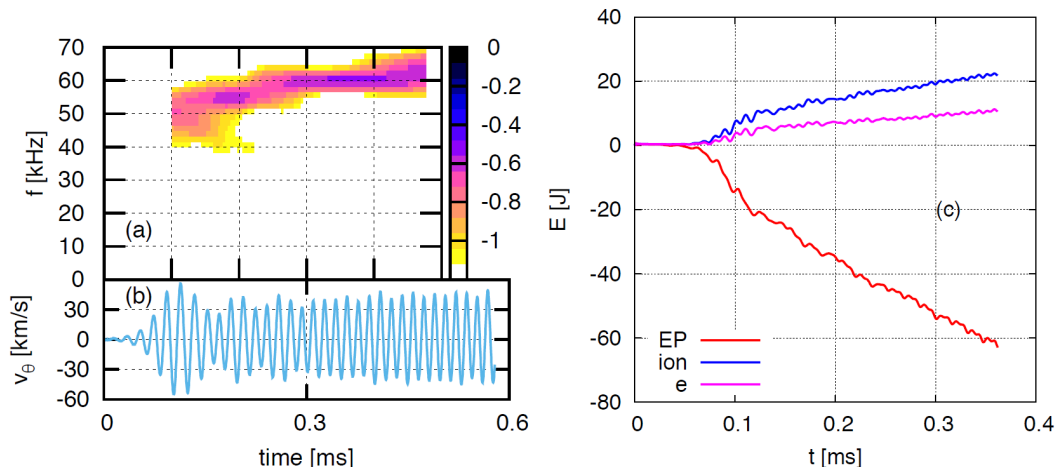


図2 (a)と(b)はEGAMのポロイダル流について周波数スペクトルと振幅の時間発展をそれぞれ示している。(c)は各粒子種のエネルギーの時間発展を示しており、高エネルギー粒子(赤)のエネルギーが熱イオン(青)に移送されていることがわかる。

[5] H. Wang *et al.*, “Simulations of two types of energetic particle driven geodesic acoustic modes and the energy channeling in the Large Helical Device plasmas”, Proc. 27th IAEA-FEC (Ahmedabad, India, 22–27 October 2018) [TH/P2-11].

[6] H. Wang *et al.*, “Simulation of energetic particle driven geodesic acoustic modes and the energy channeling in the Large Helical Device plasmas”, to appear in Nuclear Fusion.

#### (4) アルファベン固有モードの共鳴の重なりによる高速イオン分布硬直性

本課題の実施前に、高エネルギー粒子の分布形成過程を粒子衝突時間スケールで計算可能とするマルチフェーズ・ハイブリッドシミュレーションを開発し[7]、米国のDIII-Dトカマクで観測された定常的に小振幅を保つ多数のアルファベン固有モード(AE)とそれらによる高速イオン分布の顕著な平坦化をシミュレーションによって再現した[8]。本課題では同じDIII-Dの実験データを用いて、ビーム吸収パワーのみが1.56MWから15.6MWの範囲で異なる8つの場合のシミュレーションを実行し、高速イオン分布と高速イオン輸送束を比較した。その結果、多数のAEとの相互作用によって決定される高速イオン分布について以下の結論を得た[9]。

1. ビームパワーの上昇とともに高速イオン閉じ込めが劣化する(図3)。
2. 高速イオン圧力勾配が臨界勾配を超えると輸送束が急激に増加し、高速イオン圧力分布の硬直性をもたらす(図4)。臨界勾配は場所に依存する。
3. 高速イオン圧力分布は、臨界勾配付近の勾配を保ちながらビームが入射されているプラズマ中心付近から外側へ向かって広がっていく。
4. 運動論的ポアンカレ断面図解析により、輸送束の急激な増加の原因は複数のAEの共鳴の重なり(Resonance Overlap)であることがわかった。

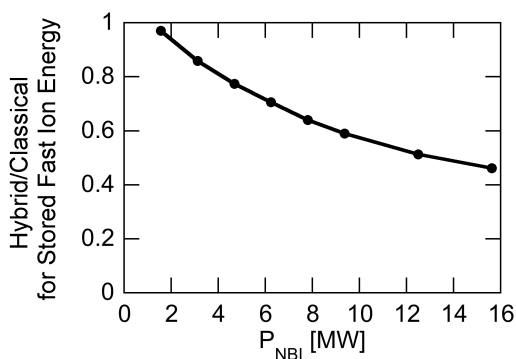


図3 蓄積高速イオンエネルギーに関するハイブリッド計算と古典計算の比。ビームパワーの上昇に伴って、高速イオンの閉じ込めが劣化している。

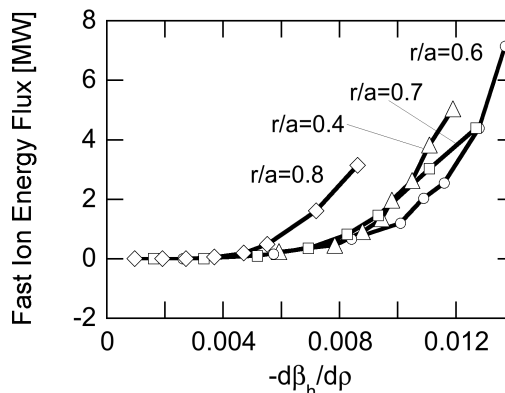


図4 規格化高速イオン圧力勾配に対する高速イオン輸送束。輸送束が急速に増大を始める臨界勾配値は場所ごとに異なっている。

- [7] Y. Todo *et al.*, Nuclear Fusion **54**, 104012 (2014).  
 [8] Y. Todo *et al.*, Nuclear Fusion **55**, 073020 (2015).  
 [9] Y. Todo *et al.*, Nuclear Fusion **56**, 112008 (2016).

(5) トカマク型装置と大型ヘリカル装置 (LHD) におけるアルフベン固有モードバースト  
 MEGAコードを用いたマルチフェーズ計算法[7-9]をトカマクプラズマ実験に適用し、異なる中性粒子ビーム入射 (NBI) パワーと高速イオン減速時間に対する時間発展を調べた。その結果、物理条件に依存して定常的な時間発展とバースト的な時間発展が現れること、NBIパワーがある一定値を超えるとそれ以上NBIパワーを強くしても高速イオン分布が増加せずば一定の分布となることを実証した [10]。

大型ヘリカル装置 (LHD) に対してもマルチフェーズ計算法を適用し、不安定なアルフベン固有モード (AE) とその時間発展を研究した[11]。計算結果においてトロイダルモード数 $n=1$ の複数のAEが突発的に現れることを見出した。複数のAEは振動周波数が約50kHzと約70kHzのグループに分かれており、それぞれはプラズマ中心付近に存在するグローバルアルフベン固有モード (GAE) と規格化プラズマ半径0.7付近に存在するトロイダルアルフベン固有モード (TAE) である。これらのAEの周波数は実験での観測値とよく対応している。シミュレーション結果におけるAEの時間発展では、TAEが先に成長し、TAEが減衰し始める頃にGAEが成長した。このような二つのAEが交互に成長する時間発展も研究対象のLHD実験の結果をよく再現した。

- [10] Y. Todo, New J. Phys. **18**, 115005 (2016).  
 [11] Y. Todo *et al.*, Phys. Plasmas **24**, 081203 (2017).

(6) アルフベン固有モードバーストに関する高速イオン臨界分布

トカマクプラズマにおけるAEバーストの大規模シミュレーションを実施し、複数AEの共鳴の重なりによる高速イオン輸送束と高速イオン分布関数の時間発展を詳細に解析した[12, 13]。この研究ではTFTR実験に基づいた物理条件を使用した。実験と同様のNBIパワー10MW、減速時間100msの場合には、複数AEのバースト的な成長と減衰が2-3msの時間間隔で繰り返し発生し、アルフベン速度で規格化したMHD速度揺動の最大振幅は $3 \times 10^{-3}$ であった。これらは実験結果とよく一致している。AEバーストの発生直前には、複数のAEが不安定化して小振幅に成長している。これらの小振幅AEは徐々に高速イオン分布関数を局所的に平坦化し、位相空間において階段状の分布関数を形成する。この階段状分布は、さらにビーム入射を行うとAEの振幅が増大して分布平坦化領域が重なり、複数のAEが同期して突然成長するAEバーストをもたらす臨界分布である。AEバーストは大域的な高速イオン輸送と高速イオン分布の飽和をもたらす。バースト直前の高速イオン分布関数をNBIパワーが異なる場合について比較したところ、高速イオン分布関数はNBIパワーが異なってもほぼ同じであり、分布関数にも復元性があることを発見した。高速イオン分布はこの臨界分布を超えて増加することができない。これは核融合燃焼プラズマにおけるアルファ粒子分布に関する重要な知見である。

- [12] Y. Todo, "Critical fast ion distribution in phase space for the synchronized sudden growth of multiple Alfvén eigenmodes and the global transport of fast ions", Proc. 27th IAEA-FEC (Ahmedabad, India, 22-27 October 2018) [TH/1-2].  
 [13] Y. Todo, "Critical energetic particle distribution in phase space for Alfvén eigenmode burst with global resonance overlap", submitted to Nuclear Fusion.

(7) 高エネルギー粒子とアルフベン固有モードの相互作用に関するレビュー論文

本課題をはじめとして、高エネルギー粒子駆動不安定性に関するこれまでの研究成果に基づいて、環状プラズマにおける高エネルギー粒子とアルフベン固有モードの相互作用に関するレビュー論文を国際学術誌に発表した [14]。

- [14] Y. Todo, Reviews of Modern Plasma Physics **3**, 1 (2019).

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計9件)

- [1] Y. Todo, "Introduction to the interaction between energetic particles and Alfvén eigenmodes in toroidal plasmas", Reviews of Modern Plasma Physics **3** (2019) 1 (33pp) 査読有 doi: 10.1007/s41614-018-0022-9  
 [2] J. Pinon, Y. Todo, H. Wang, "Effects of fast ions on interchange modes in the Large Helical Device plasmas", Plasma Physics and Controlled Fusion **60** (2018) 075007 (12pp) 査読有 doi: 10.1088/1361-6587/aac0dd  
 [3] B. Roidl, Y. Todo, Y. Takase, N. Tsujii, A. Ejiri, Y. Yoshida, S. Yajima, T. Shinya, "A simulation environment to simulate lower-hybrid-wave-driven plasmas efficiently",

Computer Physics Communications **230** (2018) 38-49 査読有 doi:  
10.1016/j.cpc.2018.04.018

- [4] Wang Hao, Todo Yasushi, Ido Takeshi, Suzuki Yasuhiro, “Chirping and Sudden Excitation of Energetic-Particle-Driven Geodesic Acoustic Modes in a Large Helical Device Experiment”, Physical Review Letters **120** (2018) 175001 (5pp) 査読有 doi: 10.1103/PhysRevLett.120.175001
- [5] Todo Y., Seki R., Spong D. A., Wang H., Suzuki Y., Yamamoto S., Nakajima N., Osakabe M., “Comprehensive magnetohydrodynamic hybrid simulations of fast ion driven instabilities in a Large Helical Device experiment”, Physics of Plasmas **24** (2017) 081203 (8pp) 査読有 doi: 10.1063/1.4997529
- [6] Y. Todo, “Multi-phase hybrid simulation of energetic particle driven magnetohydrodynamic instabilities in tokamak plasmas”, New Journal of Physics **18** (2016) 115005 (17pp) 査読有 doi: 10.1088/1367-2630/18/11/115005
- [7] Y. Todo, M.A. Van Zeeland, W. W. Heidbrink, “Fast ion profile stiffness due to the resonance overlap of multiple Alfvén Eigenmodes”, Nuclear Fusion **56** (2016) 112008 (11pp) 査読有 doi: 10.1088/0029-5515/56/11/112008
- [8] Y. Todo, M. A. Van Zeeland, A. Bierwage, W. W. Heidbrink, and M. E. Austin, “Validation of comprehensive magnetohydrodynamic simulations for Alfvén eigenmode induced energetic particle transport in DIII-D plasmas”, Nuclear Fusion **55** (2015) 073020 (8pp) 査読有 doi: 10.1088/0029-5515/55/7/073020
- [9] H. Wang, Y. Todo, T. Ido, and M. Osakabe, “Simulation study of high-frequency energetic particle driven geodesic acoustic mode”, Physics of Plasmas **22** (2015) 092507 (7pp) 査読有 doi: 10.1063/1.4930130

〔学会発表〕(計7件)

- [1] Y. Todo, “Energetic particle physics in fusion plasmas through computer simulation”, 2nd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (基調講演)(国際学会) 2018年
- [2] Y. Todo, “Critical fast ion distribution in phase space for the synchronized sudden growth of multiple Alfvén eigenmodes and the global transport of fast ions”, 27th IAEA Fusion Energy Conference (国際学会) 2018年
- [3] Y. Todo, “Global transport of energetic particles due to the synchronization of multiple Alfvén eigenmodes brings about the profile resiliency”, 15th IAEA Technical Meeting on Energetic Particles in Magnetic Confinement Systems (招待講演)(国際学会) 2017年
- [4] Y. Todo, “Energetic Particles in Fusion Plasmas”, 7th East-Asia School and Workshop on Laboratory, Space, and Astrophysical Plasmas (招待講演)(国際学会) 2017年
- [5] Y. Todo, “Recent progress of kinetic MHD hybrid simulations of energetic-particle driven instabilities”, Gyrokinetic Particle Simulation: A Symposium in Honor of Wei-li Lee (招待講演)(国際学会) 2016年
- [6] Y. Todo, “Fast ion profile stiffness due to the resonance overlap of multiple Alfvén eigenmodes”, 10th West Lake International Symposium and 12th APPTC (招待講演)(国際学会) 2016年
- [7] H. Wang, Y. Todo, C. C. Kim, T. Ido, and M. Osakabe, “Simulation study of energetic particle driven geodesic acoustic modes in LHD”, 9th West Lake International Symposium (招待講演)(国際学会) 2015年

## 6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

研究協力者氏名: WANG, Hao

ローマ字氏名: (WANG, hao)

研究協力者氏名: 關 良輔

ローマ字氏名: (SEKI, ryosuke)

研究協力者氏名: 佐藤 雅彦

ローマ字氏名: (SATO, masahiko)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。