

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 7日現在

機関番号：63902
 研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2008～2012
 課題番号：20340165
 研究課題名（和文） アルフベン固有モードと高速粒子の相互作用に関するシミュレーション研究
 研究課題名（英文） Simulation Study of Interaction between Alfvén Eigenmodes and Energetic Particles
 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

研究成果の概要（和文）：

核融合プラズマにおけるアルフベン固有モードと高速粒子の相互作用に関するシミュレーション研究を行った。高速粒子-電磁流体連結シミュレーションを実行し、トロイダルアルフベン固有モード(TAEモード)および反転磁気シアアルフベン固有モードと高速イオンの相互作用特性、TAEモード不安定性の時間発展とTAEモードバーストにおける非線形MHD効果、高速粒子駆動型測地的音響モードの線形特性と非線形周波数変調、およびITERにおけるアルフベン固有モードと高速イオン輸送を解明した。

研究成果の概要（英文）：

We studied the interaction between Alfvén eigenmodes and energetic particles in fusion plasmas with the hybrid simulation of energetic particles interacting with a magnetohydrodynamics (MHD) fluid. We clarified the properties of the interaction between toroidal Alfvén eigenmode (TAE mode)/reversed shear Alfvén eigenmode and energetic particles, the nonlinear MHD effects on the evolution of TAE instability and TAE bursts, the linear properties and the nonlinear frequency chirping of the energetic-particle driven geodesic acoustic modes, and the Alfvén eigenmodes and the energetic-particle transport in the ITER plasmas.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| 2008年度 | 1,600,000 | 480,000 | 2,080,000 |
| 2009年度 | 900,000 | 270,000 | 1,170,000 |
| 2010年度 | 900,000 | 270,000 | 1,170,000 |
| 2011年度 | 900,000 | 270,000 | 1,170,000 |
| 2012年度 | 1,000,000 | 300,000 | 1,300,000 |
| 総計 | 5,300,000 | 1,590,000 | 6,890,000 |

研究分野：プラズマ物理・核融合

科研費の分科・細目：プラズマ科学・プラズマ科学

キーワード：アルフベン固有モード、高速粒子、シミュレーション、測地的音響モード、非線形MHD効果、周波数変調、位相空間構造

1. 研究開始当初の背景

アルフベン固有モードは磁場閉じ込め核融合プラズマにおいて観測される電磁流体力学(MHD)的な振動である。ITERなどの核燃焼プラズマにおいては、重水素-三重水素反応から発生する高速アルファ粒子が電磁

流体波動であるアルフベン波と同等の速度を持つため、アルフベン固有モードと高速アルファ粒子の共鳴相互作用によって高速アルファ粒子の輸送・損失が起こる可能性がある。核燃焼プラズマにおいて高速アルファ粒子は粒子間衝突を通してプラズマを加熱す

る役割があるので、その輸送・損失は核融合炉の性能劣化に直結する。このことにより、アルフベン固有モードと高速アルファ粒子の相互作用は核燃焼プラズマの重要な研究課題の一つである。現在のトカマク、ヘリカルおよび球状トカマク装置においても、将来の核燃焼プラズマにおけるこの問題を予測するため、高速アルファ粒子の代わりに中性粒子入射(NBI)加熱や波動(ICRF)加熱による高速イオンを用いた模擬実験が活発に行われている。

2. 研究の目的

核融合プラズマにおけるアルフベン固有モードと高速粒子の相互作用に関するシミュレーションを実行し、以下に挙げる重要な問題を解明する。

- (1)トロイダルアルフベン固有モードと反転磁気シアアルフベン固有モードの高速イオンとの相互作用特性
- (2)アルフベン固有モード不安定性の時間発展における非線形 MHD 効果
- (3)繰り返し発生するアルフベン固有モードバーストにおける非線形 MHD 効果と高速粒子損失特性
- (4)高速粒子駆動型測地的音響モードの線形特性と非線形周波数変調

これらの課題に加えて、

- (5) ITER におけるアルフベン固有モードと高速粒子輸送を予測する。

3. 研究の方法

高速粒子-電磁流体(MHD)連結シミュレーションコード MEGA を使用し、それぞれの課題に必要な拡張を施して、シミュレーション研究を推進した。課題(3)では、粒子源泉・粒子間衝突・粒子損失を MEGA に導入し、アルフベン固有モードバーストのシミュレーションを可能にした。課題(4)(5)では、高速イオンの非等方速度空間分布に、課題(5)では実形状平衡データにそれぞれ対応し、より現実的な計算を実行した。

4. 研究成果

- (1)トロイダルアルフベン固有モードと反転磁気シアアルフベン固有モードの高速イオンとの相互作用特性

MEGA コードを用いて、反転磁気シアトカマクプラズマにおけるアルフベン固有モードのシミュレーションを行った。安全係数極小値が時間とともに低下すると、観測されるアルフベン固有モードが反転磁気シアアルフベン固有モード (RSAE モード) からトロイダルアルフベン固有モード (TAE モード) に遷移することを示した。RSAE モードと TAE モードによる高速イオン輸送を比較し、RSAE モードはプラズマ電流に対して順進行

粒子を主として輸送するのに対して、TAE モードは順進行粒子と逆進行粒子の双方を輸送することを明らかにした。

- (2)アルフベン固有モード不安定性の時間発展における非線形 MHD 効果

MHD 方程式を非線形のまま解く通常の高速粒子・MHD 連結シミュレーションに加えて、線形 MHD 方程式を用いたシミュレーションを実行し、両者の時間発展を比較することにより非線形 MHD 効果を明らかにした。線形シミュレーションにおいて TAE モードの磁場揺動振幅が平衡磁場の 1%程度に達する場合には、非線形 MHD シミュレーションの飽和レベルは線形 MHD シミュレーションの 1/2 に抑制されることがわかった。一方で、磁場揺動振幅が 0.1%の場合には、線形 MHD シミュレーションと非線形 MHD シミュレーションの結果はほぼ同じである。

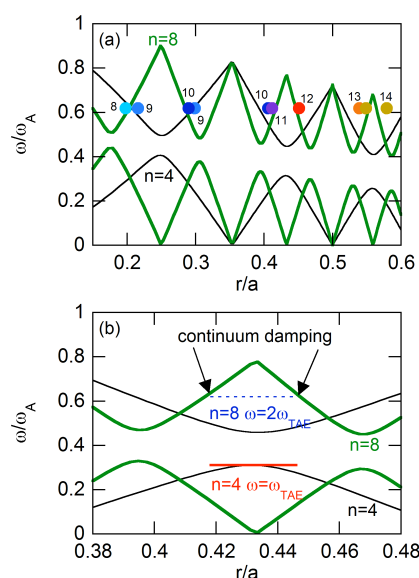


図1 TAE モードの非線形高調波のポロイダルモード数ごとのピーク位置と連続スペクトル (上) とその連続スペクトル減衰の模式図 (下)。

この飽和レベル低減の物理機構を理解するため、各トロイダルモード数のエネルギーとエネルギー散逸を解析し、それらから定義される減衰率の時間発展を解析した。その結果、非線形モードから生じる散逸が増大することにより、減衰率が線形 MHD シミュレーションの場合よりも顕著に大きくなることがわかった。従って非線形モードから生じる散逸が TAE モードの飽和レベルを低減すると結論することができる。非線形高調波の空間分布をポロイダルモード数ごとに解析したところ、図1に示すように連続スペクトル

上で振幅が最大となることがわかった。これは非線形高調波の散逸機構が連続スペクトル減衰であることを示している。

さらに、非線形 MHD シミュレーション結果において、TAE モード不安定性の飽和後、測地的音響モードが励起されることを見出した。

(3) 繰り返し発生するアルフベン固有モードバーストにおける非線形 MHD 効果と高速粒子損失特性

MEGA コードを、中性粒子ビーム入射 (NBI)、高速イオン減速過程および高速イオン損失を取り扱えるように拡張し、米国のトカマク型装置 TFTR の実験に近いパラメータを用いて TAE モードバーストのシミュレーションを行った。複数の TAE モードが同期してバースト的に繰り返し成長し、バースト時には高速イオン損失が発生するという実験と同様の結果が得られた。バースト時間間隔は約 2ms であり、これも実験結果と同程度である。

NBI を連続的に入射する条件下で MHD 散逸係数 (粘性、電気抵抗、拡散) が異なる場合について、TAE モードの時間発展を比較した。散逸係数が小さい場合には TAE モードの振幅は時間的にほぼ一定となるが、散逸係数が大きい場合には TAE モードのバースト的な成長と減衰が繰り返し発生した。TAE バーストの磁場揺動振幅はプラズマ内部のピーク位置においてトロイダル磁場の 0.5% 程度であり、バーストごとに 10% 程度的高速イオンが損失する。このとき的高速イオン損失率が磁場揺動振幅の 2 乗に比例することを、図 2 に示すように明らかにした。

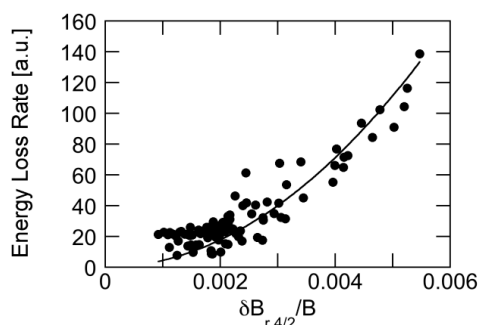


図 2 高エネルギー粒子損失率の TAE モード磁場揺動振幅への依存性。実線は磁場揺動振幅の 2 乗の回帰曲線である。

(4) 高速粒子駆動型測地的音響モードの線形特性と非線形周波数変調

大型ヘリカル装置 (LHD) における高速粒子駆動型測地的音響モード (EGAM) の線形成長局面での特性と非線形周波数変調を解明し

た。EGAM の線形成長局面の特性として、空間的に一定の周波数を有する大局的モードであることを確認した。EGAM の各揺動成分のポロイダルモード数は、ポロイダル流が $m=0$ 、密度と圧力揺動が $m=1$ 、磁場揺動が $m=2$ である。EGAM の非線形時間発展では、実験結果と同様の周波数変調が起こることを実証した。図 3 に示すように周波数は上方と下方の両側に変調する。ピッチ角変数とエネルギーの 2 次元速度空間における高速粒子分布関数の解析により、2 組の hole-clump 対が形成されることが明らかになった。1 組は EGAM を不安定化する速度空間領域に形成され、もう 1 組は安定化領域に形成される。不安定化領域では hole の軌道周回周波数が上昇し clump の軌道周回周波数が下降するのに対して、安定化領域では振舞が逆となる。hole と clump を構成する粒子の軌道周回周波数は図 3 に示すように EGAM の周波数とよく一致しており、周波数変調の期間においてもこれらの粒子が EGAM と共鳴し続けることがわかった。この結果は、波動の自発的周波数変調において、位相空間の不安定化領域から安定化領域へエネルギーが持続的に伝達されることを示している。

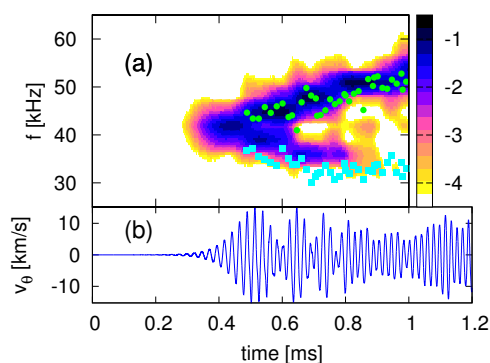


図 3 EGAM のポロイダル流 (下) とその周波数スペクトルの時間発展 (上)。上図には hole と clump の周回周波数がそれぞれ緑と青の点で示されている。

(5) ITER におけるアルフベン固有モードと高速粒子輸送

ITER におけるアルフベン固有モードと高速粒子輸送を調べた。ITER の定常運転プラズマのシミュレーション結果では、多数の TAE モードと低波数のベータアルフベン固有モードが不安定であることを見出した。TAE モードの空間分布を図 4 に示す。それらのアルフベン固有モードによって高速アルファ粒子と高速ビームイオンが輸送され、それぞれの圧力がプラズマ中心での値と比較して 10% 程度変化することを明らかにした。

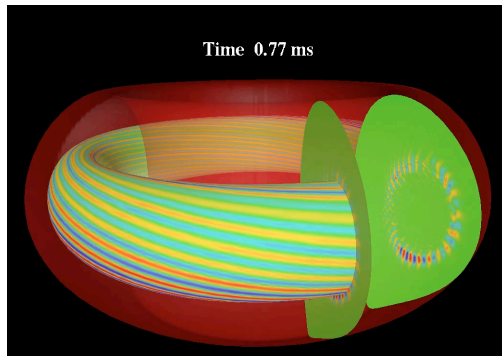


図4 ITERにおけるTAEモードの空間分布。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計14件)

- [1] H. Wang, Y. Todo, and C. C. Kim, *Hole-clump pair creation in the evolution of energetic-particle-driven geodesic acoustic modes*, Physical Review Letters, Vol. 110 (2013) 155006-1-155006-5. DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.155006 (査読有)
- [2] H. Wang and Y. Todo, *Linear properties of energetic particle driven geodesic acoustic mode*, Physics of Plasmas, Vol. 20 (2013) 012506-1 - 012506-8. DOI:10.1063/1.4774410 (査読有)
- [3] Y. Todo, H. L. Berk, and B. N. Breizman, *Saturation of a toroidal Alfvén eigenmode due to enhanced damping of nonlinear sidebands*, Nuclear Fusion, Vol. 52 (2012) 094018-1 - 094018-8. DOI:10.1088/0029-5515/52/9/094018 (査読有)
- [4] N. Mizuguchi, A. Sanpei, S. Fujita, K. Oki, H. Himura, S. Masamune, and K. Ichiguchi, *Modeling of Formation of Helical Structures in Reversed-Field Pinch*, Plasma and Fusion Research, Vol. 7 (2012) 2403117-1-2403117-4. DOI: 10.1585/pfr.7.2403117 (査読有)
- [5] A. Bierwage, N. Aiba, Y. Todo, W. Deng, M. Ishikawa, G. Matsunaga, K. Shinohara, and M. Yagi, *Nonlinear simulation of energetic particle modes in high-beta tokamak plasma*, Plasma and Fusion Research, Vol. 7 (2012) 2403081-4 - 2403081-4. DOI:10.1585/pfr.7.2403081 (査読有)
- [6] Y. Todo, H. L. Berk, and B. N. Breizman, *Simulation of Alfvén eigenmode bursts using a hybrid code for nonlinear magnetohydrodynamics and energetic particles*, Nuclear Fusion, Vol. 52 (2012) 033003-1 - 033003-10. DOI: 10.1088/0029-5515/52/3/033003 (査読有)
- [7] A. Bierwage, Y. Todo, N. Aiba, K. Shinohara, M. Ishikawa, and M. Yagi, *Nonlinear hybrid simulations of energetic particle modes in realistic tokamak flux surface geometry*, Plasma and Fusion Research, Vol. 6 (2011) 2403109-1 - 2403109-5. DOI:10.1585/pfr.6.2403109 (査読有)
- [8] H. Wang and Y. Todo, *Interaction between energetic particles and Alfvén eigenmodes in reversed shear plasmas*, Journal of the Physical Society of Japan, Vol. 80 (2011) 094501-1 - 094501-7. DOI: 10.1143/JPSJ.80.094501 (査読有)
- [9] Y. Todo, N. Nakajima, M. Sato, and H. Miura, *Simulation study of ballooning modes in LHD*, Plasma and Fusion Research, Vol. 5 (2010) S2062-1 - S2062-4. DOI: 10.1585/pfr.5.S2062 (査読有)
- [10] Y. Todo, H. L. Berk, and B. N. Breizman, *Nonlinear magnetohydrodynamic effects on Alfvén eigenmode evolution and zonal flow generation*, Nuclear Fusion, Vol. 50 (2010) pp. 084016-1 - 084016-9. DOI: 10.1088/0029-5515/50/8/084016 (査読有)
- [11] Y. Todo, S. Murakami, T. Yamamoto, A. Fukuyama, D. A. Spong, S. Yamamoto, M. Osakabe, and N. Nakajima, *Numerical Analyses of Energetic Particles in LHD*, Fusion Science and Technology, Vol. 58 (2010) pp. 277-288. <http://epubs.ans.org/?a=10814> (査読有)
- [12] D. A. Spong, E. D'Azevedo, and Y. Todo, *Clustered frequency analysis of shear Alfvén modes in stellarators*, Physics of Plasmas, Vol. 17 (2010) 022106-1 - 022106-12. DOI: 10.1063/1.3313818 (査読有)
- [13] Y. Todo, N. Nakajima, M. Osakabe, S. Yamamoto, D. A. Spong, *Simulation study of energetic ion transport due to Alfvén eigenmodes in LHD plasma*, Plasma and Fusion Research, Vol. 3 (2008) S1074-1 - S1074-4. DOI: 10.1585/pfr.3.S1074 (査読有)
- [14] T.-H. Watanabe, Y. Todo, and W. Horton, *Benchmark Tests of Fusion Plasma Simulation Codes for Studying Microturbulence and Energetic-Particle Dynamics*, Plasma and Fusion Research, Vol. 3 (2008) 061-1 - 061-6. DOI: 10.1585/pfr.3.061 (査読有)

[学会発表] (計12件)

- [1] Y. Todo and A. Bierwage, *Alfvén eigenmodes and energetic particle transport in ITER steady state scenario*, 22nd International Toki Conference (19-22 November 2012, Toki).
- [2] N. Mizuguchi and P. Zhu, *MHD simulation study on the evolution of filament structures on the edge-localized modes*, 22nd International Toki Conference (19-22 November 2012, Toki).

- [3] H. Wang, Y. Todo, and C. C. Kim, *Linear properties and nonlinear frequency chirping of energetic particle driven geodesic acoustic mode in LHD*, 24th IAEA Fusion Energy Conference (8-13 October 2012, San Diego, USA), TH/P6-20.
- [4] N. Mizuguchi, A. Sanpei, K. Oki, S. Masamune, H. Himura, K. Ichiguchi and Y. Todo, *Numerical Modeling of Formation of Helical Structures in Reversed-Field-Pinch Plasma*, 24th IAEA Fusion Energy Conference (8-13 October 2012, San Diego, USA).
- [5] Y. Todo, H. L. Berk, and B. N. Breizman, *Nonlinear MHD effects on Alfvén eigenmode bursts*, 8th General Scientific Assembly of the Asia Plasma and Fusion Association in 2011 (1-4 November 2011, Guilin, China).
- [6] Y. Todo, H. L. Berk, and B. N. Breizman, *Nonlinear MHD and energetic particles hybrid simulation of Alfvén eigenmode bursts*, 12th IAEA Technical Meeting on Energetic Particles in Magnetic Confinement Systems (7-10 September 2011, Austin, USA).
- [7] Y. Todo, H. L. Berk, and B. N. Breizman, *Computer Simulation of Alfvén Eigenmode Bursts Driven by Energetic Particles in Fusion Plasmas*, 11st Asia Pacific Physics Conference (15-18 November 2010, Shanghai, China).
- [8] Y. Todo, H. L. Berk, and B. N. Breizman, *Simulation Study of Nonlinear Magnetohydrodynamic Effects on Alfvén Eigenmode Evolution and Zonal Flow Generation*, 23rd IAEA Fusion Energy Conference (11-16 October 2010, Daejeon, Korea), THW/2-3Ra.
- [9] Y. Todo, N. Nakajima, M. Sato, and H. Miura, *Simulation study of ballooning modes in LHD*, 19th International Toki Conference (8-11 December 2009, Toki).
- [10] Y. Todo, H. L. Berk, and B. N. Breizman, *Interaction of energetic particles, Alfvén eigenmode, and zonal flow and fields*, 11th IAEA Technical Meeting on Energetic Particles in Magnetic Confinement Systems (21-23 September 2009, Kiev, Ukraine).
- [11] Y. Todo, H. L. Berk, and B. N. Breizman, *Nonlinear evolution of Alfvén eigenmode and excitation of geodesic acoustic mode*, 4th IAEA Technical Meeting on Theory of Plasma Instabilities (18-20 May 2009, Kyoto).
- [12] Y. Todo, N. Nakajima, M. Osakabe, S. Yamamoto, D. A. Spong, *Simulation study of interaction between energetic ions and Alfvén eigenmodes in LHD*, 22nd IAEA Fusion Energy Conference (13-18 October 2008, Geneva, Switzerland), TH/P3-9.

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

水口 直紀 (MIZUGUCHI NAOKI)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

研究者番号：70332187

(3) 連携研究者

()

研究者番号：