

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2006年度 ～ 2009年度

課題番号：18340189

研究課題名（和文） ヘリカル型装置におけるアルフベン固有モードの高エネルギー粒子輸送に対する影響

研究課題名（英文） Interaction of Alfvén eigen-mode on energetic-particles in helical systems.

研究代表者

長壁 正樹 (OSAKABE MASAKI)

核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・准教授

研究者番号：90280601

研究成果の概要（和文）：

ヘリカル型装置におけるアルフベン固有モード（AE）と高エネルギー粒子の相互作用を実験的に調べた。AEがバースト状に発生している最中において、高エネルギー粒子のエネルギースペクトルに“孔塊”対が生成され、AE揺動周波数の低周波側への掃引とともに“塊”のエネルギーが下がることを明らかにした。またAE揺動と高エネルギー粒子の相互作用を扱う理論シミュレーションコードを3次元配位へ拡張し、実験データの新たな解釈が得られるようになった。

研究成果の概要（英文）：

The interaction between Alfvén Eigen-mode (AE) and fast-ions are experimentally investigated. The temporal evolutions of fast-ion energy spectra during the bursting activity of AE showed formation of clump and hole pairs in the energy spectra of fast-ions. It was found the energy of the clump decreases with the decrease of the mode frequency. The extension of simulation code MEGA to three dimensional magnetic field was completed with this project. A new simulation code AE3D, which calculates the eigen-function of AE, was also developed. Using these codes, a new interpretation for those experimental data was provided.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
平成18年度	4,800,000	1,440,000	6,240,000
平成19年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
平成20年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
平成21年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
総計	14,100,000	4,230,000	18,330,000

研究分野：数物系科学

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：プラズマ物理、アルフベン固有モード、高エネルギー粒子輸送、磁場閉じ込め核融合

### 1. 研究開始当初の背景

アルフベン固有モード（以後、AE）は、将来の核融合炉において核融合反応の結果生成される高エネルギーのアルファ粒子と相互作用を起し、アルファ粒子加熱の効率の劣化や、真空第一壁の損傷を引き起こすことが懸念され、その発生メカニズムや、それらの高エネルギー粒子との相互作用の解明が求められていた。トカマク型トラス磁場閉じ込め装置においては、高エネルギー粒子がAEを励起し、高エネルギー粒子が自らの輸送を変化させるといったことが報告されていた。しかしながら、トラスプラズマに於ける高エネルギー粒子とAEとの間の相互作用に関する研究は、AEそのものに関する研究が主で、高エネルギー粒子に対する影響に関する研究は、実験・理論ともに充分に行われていなかった。ヘリカル型トラス磁場閉じ込め装置である大型ヘリカル装置（LHD）において、トラス内を周回する高エネルギー粒子によってAEモードが励起され、この時、高エネルギー粒子の輸送が変化している現象が中性粒子分析装置によって、観測されるという報告が、本研究の研究代表者・長壁らによってされはじめ、世界的に見ても、AEと高エネルギー粒子の相互作用に関する研究が進展をみせはじめていた。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、ヘリカル型磁場閉じ込め装置におけるAEと高エネルギー粒子との相互作用を明らかにすることにある。AEは将来の核融合炉において、核融合反応の結果生成される高エネルギーのアルファ粒子と相互作用を起し、アルファ粒子加熱の効率の劣化や、真空第一壁の損傷を引き起こすことが懸念されており、本研究はこのような相互作用に関する基礎的な実験データを提供するものである。対象とする磁場配位をヘリオトロン配位に限定し、AEモードに伴う高エネルギー粒子輸送の変化に焦点をあて、AEモードが高エネルギー粒子輸送に及ぼす影響を実験的に明らかにすることを目的とした。

### 3. 研究の方法

具体的な手法としては、アルフベン固有モード（AE）発生時における高エネルギー粒子の振る舞いの詳細な時間変化を中性粒子分析器（NPA）及びプラズマ周辺部に設置した方向性ハイブリッドプローブ（静電プローブ兼カロリメータ）によって観測し、AE生成時の高速イオンのエネルギーの時間変化及び、粒子束としての振る舞いを計測することとした。また、得られた実験結果をシミュレーションコードなどによって得られた理論予測と比較検討し、AEと高エネルギー粒

子との間の相互作用を明らかにすることとした。

### 4. 研究成果

本研究課題は、実験及び理論の両面から研究を進めている。

実験面においては、AE発生時における高エネルギー粒子の振る舞いを、中性粒子分析器（E//B-NPA）及び方向性ハイブリッドプローブによって計測を行った

E//B-NPAでは、既存のカウンモード計測回路を用いて、0.1msの時間分解能で計測を行い、AEバースト発生中の高エネルギー粒子のエネルギースペクトル上に生成される“塊”と“穴”のエネルギー変化を明確に観測した（図1）。その結果、揺動の周波数減少とともに、“塊”のエネルギー及び、揺動周波数が時間とともに減少していく様子が観測された。スペクトル上の“塊”の生成と同時に“穴”が形成され、“穴”のエネルギーが時間とともに上昇し、中性粒子ビームの入射エネルギーに到達した時点でその上昇を停止することが観測された。

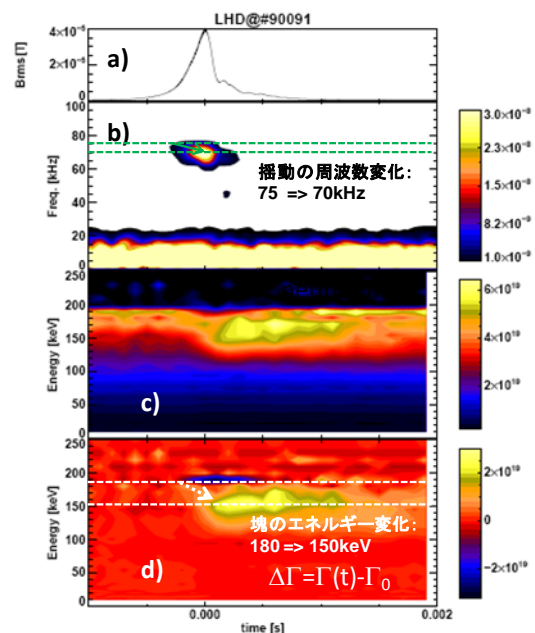


図1 AEバースト発生時の(a)AE揺動の揺動強度の時間発展、(b)揺動周波数の時間変化、(c)接線NPAで観測された高速イオンのエネルギースペクトル( $\Gamma(t)$ )の時間変化、(d)同スペクトルの $t=0.001\sim 0.00075$ [s]の間の平均スペクトル( $\Gamma_0$ )からの差分。

また、新たにE//B-NPAに対して電流計測用の回路を増設し、1 $\mu$ sの時間分解能でエネルギー弁別された中性粒子フラックスの計測が行える様にし、最終的には1keV-200keVの範囲のエネルギーを6個のチャンネル数で

計測が行えるようになった。この結果、ミルノフコイルによって観測されたAEバースト信号とともに振動する高速イオン束の信号をエネルギー弁別した状態で観測することが出来るようになった。解析の結果、“塊穴”対が生成した初期のエネルギーにおいて、高速イオン束の振動が先行し、イオン束の振動が高エネルギー側及び低エネルギー側へと伝搬していくことが明確になった。

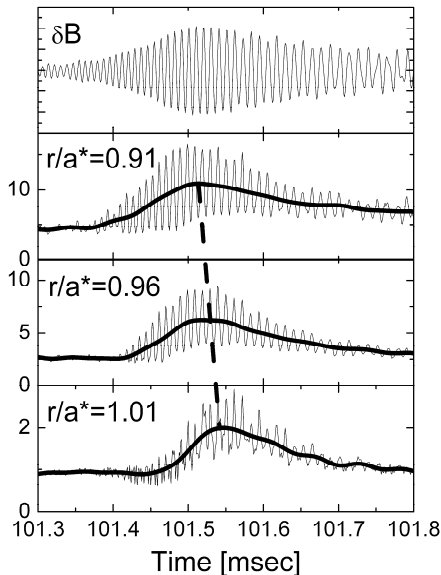


図2 HDLPによって計測されたバースト的振る舞いを示す磁場揺動信号と損失粒子束の典型的な波形。(a)HDLPに設置されたミルノフコイルによって計測された磁場揺動信号。(b) $r/a=0.91$ の場所にHDLPを設置した時に計測された損失粒子束、(c) $r/a=0.96$ 及び(d) $r/a=1.01$ に設置した時の同損失粒子束。

方向性ハイブリッドプローブによる計測については、プラズマ中を co. 方向及び counter 方向に周回する粒子の比較を行い、それらの粒子軌道の磁気面からのズレが、粒子の進行方向及びエネルギーに依存することを利用して、高エネルギーの co. 方向粒子の計測を行った。また、方向性プローブに取り付けたミルノフコイルによる揺動信号の計測にも成功し、揺動発生時に於ける高エネルギー粒子の損失イオン束と揺動の同一地点での同時計測に成功した。実験結果によると、揺動によって影響を受け損失する粒子束には、(1)揺動周波数と同一周波数で振動する成分と(2)揺動の振動強度の崩落線にそって変化する遅い時定数を持つ成分が存在することが判明した(図2)。前者は、損失粒子束が揺動強度とリニアな相関を示すことから対流的な損失が示唆される(図3(a))。この現象は、揺動によって磁力線が振動し、

その振動した磁力線に巻き付いた高速イオン束の振る舞いをとらえているものと考えられる。後者は、損失粒子束が揺動強度の2乗に比例し、拡散的な損失であることが示唆された(図3(b))。揺動及び損失粒子束の詳細な解析から、この遅い時定数を持つ損失粒子束は、揺動と相互作用によって、径方向輸送を受けた高速イオンの集団であることが判明した。

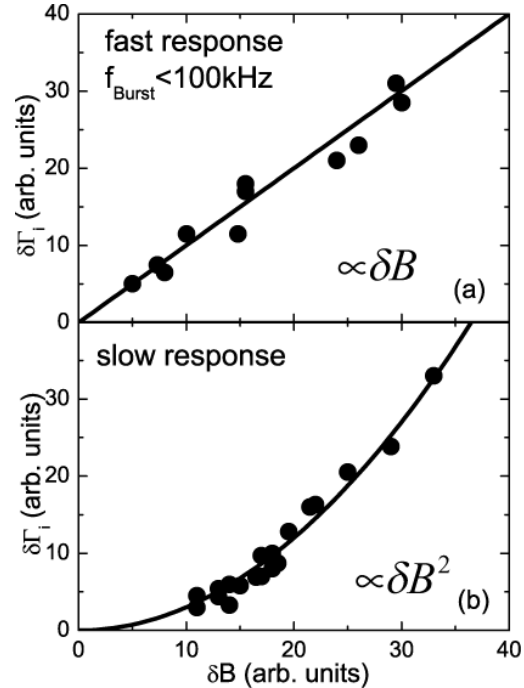


図3 バースト的揺動に伴う損失粒子束と揺動強度の相関。(a)高速成分と(b)低速成分。

理論シミュレーションについては、MEGAコードを3次元配位に適用する拡張が完了した。また、AEのプラズマ中での固有関数分布を評価する為のコードAE3Dを新たに開発し、LHDで観測されているAEモードのシミュレーションを行った。その結果、LHDで良く観測されている二つの周波数のAEモードが、奇パリティモード及び偶パリティモードに起因することが判明した。現在は、高エネルギー粒子の振る舞いを含めて再現することを行っている。シミュレーションによって、AEバーストが再起的に発生することを再現することが出来たが、発生間隔が実験では9ms程度であるのに対し、シミュレーションにおいては2msと短くなっている。この違いについては、高速イオンの空間分布、損失モデル、揺動の減衰率等の実験とシミュレーションと間の違いが原因であると考えられる。

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 15 件)

- ① M.Osakabe, M.Isobe, S.Murakami, S.Kobayashi, K.Saito, R.Kumazawa, T. Mutoh, T.Ozaki, M.Nishiura, E.Veshev, T.Seki, Y.Takeiri, O.Kaneko, K.Nagaoka, T.Tokuzawa, K.Ogawa, K.Toi, S.Yamamoto, M.Sasao, T.Watanabe, and LHD experiment group, "Fast-ion confinement studies on LHD", to appear in the LHD special issue of Fusion Science and Technology, 58, (9pages), 2010, 有
- ② Y. Todo, H. L. Berk, and B. N. Breizman, "Nonlinear magnetohydrodynamic effects on Alfvén eigenmode evolution and zonal flow generation", to appear in Nuclear Fusion, 50, 2010, 有
- ③ Y. Todo, S. Murakami, T. Yamamoto, A. Fukuyama, D. A. Spong, S. Yamamoto, M. Osakabe, and N. Nakajima, "6. 4 Numerical Analyses of Energetic Particles in LHD", to appear in the LHD special issue of Fusion Science and Technology, 58, (12pages), 2010, 有
- ④ D. A. Spong, E. D'Azevedo, and Y. Todo, "Clustered frequency analysis of shear Alfvén modes in stellarators", Physics of Plasmas, 17, 022106(12pages), 2010, 有
- ⑤ Y. Todo, N. Nakajima, M. Sato, and H. Miura, "Simulation study of ballooning modes in LHD", to appear in Plasma and Fusion Research, 5,(4pages), 2010, 有
- ⑥ M.Osakabe, T.Ito, "Evaluation of fast-ion confinement using radially injected neutral beam on LHD", to appear in Plasma and Fusion Research, 5,(4pages), 2010, 有
- ⑦ 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, 3, S1074(4pages), 2008, 有
- ⑧ K. Nagaoka, M. Isobe, K. Toi, A. Shimizu, A. Fujisawa, S. Ohshima, H. Nakano, M. Osakabe, Y. Todo, *et.al.*, "Radial Transport Characteristics of Fast Ions Due to Energetic-Particle Modes inside the Last Closed-Flux Surface in the Compact Helical System", Phys. Rev. Letters, 100, 065005 (4pages), 2008, 有
- ⑨ K. Nagaoka, M. Isobe, K. Toi, K. Goto, T. Ito, Y. Todo, M. Osakabe, S. Ohshima, A. Shimizu, A. Fujisawa, H. Nakano, Y. Takeiri, *et.al.*, "Local observations of fast ion responses to energetic particle modes using a directional probe in the Compact Helical System (CHS)", Nuclear Fusion, 48, 084006 (9pages), 2008, 有
- ⑩ K. Nagaoka, K. Y. Watanabe, M. Osakabe, Y. Takeiri, *et.al.*, "Fast ion measurement using a hybrid directional probe in the large helical device", Rev. Sci. Instrum., 79, 10E523 (3pages), 2008, 有
- ⑪ M. Osakabe, S. Murakami, M. Yoshinuma, K. Ida, A. Whiteford, M. Goto, D. Kato, T. Kato, K. Nagaoka, T. Tokuzawa, Y. Takeiri, *et.al.*, "Fast ion charge exchange spectroscopy measurement using a radially injected neutral beam on the large helical device", Rev. Sci. Instrum., 79, 10E519 (4pages), 2008, 有
- ⑫ Y. Todo and A. Ito, Construction of a Gyrokinetic Plasma Simulation Model for Electromagnetic Phenomena, Plasma and Fusion Research, 2, 020(5pages), 2007, 有
- ⑬ A. Fasoli, C. Gormenzano, H.L. Berk, B. Breizman, S. Briguglio, D.S. Darrow, N. Gorelenkov, W.W. Heidbrink, A. Jaun, S.V. Konovalov, R. Nazikian, J.-M. Noterdaeme, S. Sharapov, K. Shinohara, D. Testa, K. Tobita, Y. Todo, G. Vlad and F. Zonca, "Progress in the ITER Physics Basis Chapter 5: Physics of energetic ions", Nuclear Fusion, 47, S264(20pages) ,2007, 有
- ⑭ M. Osakabe, S. Yamamoto, K. Toi, Y. Takeiri, S. Sakakibara, K. Nagaoka, *et.al.*, "Experimental observations of enhanced radial transport of Energetic Particles with Alfvén Eigen mode on LHD", Nuclear Fusion, 46, pp.s917-s916, 2006, 有
- ⑮ Y.Todo, "Properties of energetic-particle continuum modes destabilized by energetic ions with beam-like velocity distributions", Phys. of Plasmas, 13, 082503 (7 pages), 2006, 有

[学会発表] (計 10 件)

- ① M.Osakabe, 他, "Evaluation of fast-ion confinement using radially injected neutral beam on LHD", 第 19 回国際土岐コンファレンス, 2009 年 12 月 8 日-11 日 土岐 (岐阜)
- ② Y.Todo, 他, "Simulation study of ballooning modes in LHD", 第 19 回国際土岐コンファレンス, 2009 年 12 月 8 日-11 日 土岐 (岐阜)
- ③ M.Osakabe, 他, "Clump and Hole formation in the energetic particle spectra by the TAE and their behaviours during the mode activities

on LHD”, 第11回高エネルギー粒子に関する IAEA 専門家会議(招待講演), 2009年9月21日-23日, キエフ(ウクライナ)

- ④ Y. Todo, 他, “Interaction of energetic particles, Alfvén eigenmode, and zonal flow and fields”, 第11回高エネルギー粒子に関する IAEA 専門家会議, 2009年9月21日-23日, キエフ(ウクライナ)
- ⑤ M. Osakabe, 他, “Fast-ion studies near neo-classically optimized configurations of LHD”, 第36回プラズマ物理に関する欧州物理学会年会(招待講演), 2009年6月29日-7月3日, ソフィア(ブルガリア)
- ⑥ M. Osakabe, 他, “Fast ion charge exchange spectroscopy measurement using a radially injected neutral beam on the large helical device”, 第17回高温プラズマ計測会議, 2008年5月11日-15日, アルバカーキ(米国)
- ⑦ K. Nagaoka, 他, “Fast ion measurement using a hybrid directional probe in the large helical device”, 第17回高温プラズマ計測会議, 2008年5月11日-15日, アルバカーキ(米国)
- ⑧ M. Osakabe, 他, “Energy shift of the resonant particles being associated frequency shift of TAE-mode on LHD”, 第10回高エネルギー粒子に関する IAEA 専門家会議, 2007年10月7日-12日, クロスターゼーオン(ドイツ)
- ⑨ K. Nagaoka, 他, “Local Observation of Energetic Particle Mode Bursts and Fast Ion Responses in the Compact Helical System”, 第10回高エネルギー粒子に関する IAEA 専門家会議, 2007年10月7日-12日, クロスターゼーオン(ドイツ)
- ⑩ Y. Todo, 他, Numerical analysis of energetic ion transport due to Alfvén eigenmodes in an LHD plasma”, 第10回高エネルギー粒子に関する IAEA 専門家会議, 2007年10月7日-12日, クロスターゼーオン(ドイツ)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

長壁 正樹 (OSAKABE MASAKI)

核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・准教授

研究者番号：90280601

### (2) 研究分担者

竹入 康彦 (TAKEIRI YASUHIKO)

核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・教

授

研究者番号：60179603

藤堂 泰 (TODO YASUSHI)

核融合科学研究所・シミュレーション科学研究部・教授

研究者番号：00249971

永岡 賢一 (NAGAOKA KENICHI)

核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・助教

研究者番号：20353443