

令和 4 年 6 月 7 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K03589

研究課題名(和文) 高エネルギー粒子駆動揺動場とプラズマ乱流場のスケール間相互作用の検証

研究課題名(英文) Investigation of interaction among large-scaled energetic particle-driven fluctuations and micro-scaled plasma turbulences

研究代表者

井戸 毅 (IDO, TAKESHI)

九州大学・応用力学研究所・教授

研究者番号：50332185

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：磁場閉じ込めプラズマの閉じ込め性能を左右する電位や密度の揺らぎを計測するための計測器であるHIBPの高精度化を行い、これを用いてプラズマ中の高速イオンによって励起される不安定性とプラズマ乱流の計測に成功した。高速イオン励起不安定性とプラズマ乱流の直接相互作用は観測されなかったが、これまで観測されたことのない、高速イオン励起不安定性の2次元構造や高速イオンによる電場形成など新しい現象を見出すことに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

空間広がりや変動の時定数の異なる乱流と高速イオンによって励起される揺らぎは、従来は異なる階層の現象として独立して理解されていたが、近年ではそれらの相互作用に着目した研究が進み始めている。本研究は実験からそのような階層間結合の理解を進めようとしたものである。特に、これまで観測されることがない、高速イオン励起不安定性の空間構造や高速イオンによって形成される電位分布と密度分布の特異な構造の発見は、この研究分野の進展を加速する成果である。

研究成果の概要(英文)：A diagnostic system, HIBP, to measure the electric potential and density fluctuations, which determine the performance of magnetically confined plasmas, has been improved. Using it, fluctuations driven by energetic particles in the plasmas and plasma turbulence have been measured successfully. Although the direct interaction between the energetic-particle driven instability and the turbulence was not detected, novel phenomena, such as unique two-dimensional structures of the energetic-particle driven instability and the electric field formation by the energetic particles, have been found.

研究分野：プラズマ物理学

キーワード：磁場閉じ込めプラズマ 乱流 高エネルギー粒子駆動不安定性 重イオンビームプローブ

1. 研究開始当初の背景

核融合を目指した磁場閉じ込めプラズマ研究において、プラズマの高温化、高密度化は最優先課題の一つであり、熱輸送及び粒子輸送の物理機構の解明はこの分野の中心課題として精力的に研究されている。特にプラズマ中に発生するミクロスケールの乱流は熱・粒子輸送を決定付けていると考えられており、強い非線形性を有す非平衡系である磁場閉じ込めプラズマの中でどのように乱流が発生、飽和し、プラズマ中の構造形成に寄与しているかは、実用面とともに基礎科学の見地からも興味をもって研究が進められている。

一方、核融合炉心プラズマの性能を予測する上では、核反応生成物であり、かつプラズマを高温に保つための加熱のエネルギー源となることが期待されるアルファ粒子などの高エネルギー粒子の閉じ込めも重要な因子である。磁場閉じ込めプラズマ中の高エネルギー粒子は *Alfvén* 固有モードなどのマクロスケールの揺らぎを励起し、これによって高エネルギー粒子自身の損失を引き起こして核融合炉の経済性を悪化させることが危惧されている。

高エネルギー粒子駆動不安定性はマクロスケールの揺らぎであり、プラズマの輸送を決定づける乱流はミクロスケールの揺らぎであるため、空間スケールが大きく異なるこれらの輸送は独立に研究されてきた。しかし、数値シミュレーションや理論の進展、ミクロスケールの乱流によって駆動されるメソスケールを持つ帯状流の実験による実証により、スケール間の結合の重要性が認識されるようになっていた。ただし、実験環境もしくは高温プラズマ中内部での揺らぎの計測手段が多くは無いため、実験に裏付けられた研究は進んでいなかった。

2. 研究の目的

本研究は、高エネルギー粒子が励起するマクロスケールを持つ揺らぎや構造とミクロスケールを持つプラズマ乱流の同時計測により、異なる時空間スケールを持つ現象間の相互作用を検証し、異なる時空間スケール間相互作用という新しい観点を含めた熱及び粒子輸送の研究を推進することを目的として実施した。本研究では揺動計測器として重イオンビームプローブ (HIBP) を用いるため、その高精度化開発も本研究の目的の一つとして実施した。

3. 研究の方法

本研究は主に核融合科学研究所の大型ヘリカル実験装置(LHD)にて行った。LHD は加熱用高エネルギー粒子入射装置を備え、また、他の実験装置では実施するのが難しい低密度プラズマでの実験が可能な装置である。このため、入射された高エネルギー粒子の減速時間が長く、熱化プラズマと高エネルギー粒子が速度空間上で分離されるため、波動-粒子相互作用を含む輸送の素過程の研究を進めるのに適している。ただし、その高温プラズマ内部で高エネルギー粒子駆動の不安定性や電場構造の変化、及び乱流を計測することは容易ではなく、そのための計測器の開発が必要であった。本研究では、既に高エネルギー粒子駆動不安定性が計測可能であった重イオンビームプローブ (HIBP) による乱流計測のための高性能化開発を実施し、その成果に基づき LHD におけるプラズマ実験研究を実施した。

4. 研究成果

4. 1 HIBP の高性能化

HIBP の計測精度を向上させるには、検出効率を向上させることと、入射プローブビーム電流量を増加させることが考えられる。HIBP で用いるタンデム加速器の出力電流のエネルギー依存性により LHD の高磁場実験に必要な 5MeV 程度の高エネルギービームの出力の際にビーム出力が低下することが問題であった。また検出素子であるマイクロチャンネルプレート (MCP) の検出効率が高エネルギー領域で低下することが危惧されていたため、本研究では、まず検出効率の向上を考える上での基盤として、HIBP で用いる金イオンに対する MCP の検出効率とその入射ビームエネルギーに対する依存性を、神戸大学タンデム加速器施設を利用して調べた(中島優一, 他, 第 35 回プラズマ・核融合学会年会 2018 年 12 月)。その結果、金イオンビームに対する検出効率は、MCP の仕様として公表されている軽水素ビームの検出効率よりも良く、また検出効率はビームエネルギーとともに増加する傾向が見られた。このエネルギー依存性は、金イオンを入射した場合の電子的阻止能の増加の依存性を反映していると考えられる。この実験結果から、検出効率の改善、特に高エネルギー領域での改善は難しいと判断した。

検出器開発と同時に、入射ビーム電流の改善のためにイオン源の改良を実施した。プラズマスパッタ型イオン源を使用するため、プラズマ生成のためのフィラメントの材質(タングステンと LaB₆) 及び構造を変え、電子放出特性と運転寿命の試験を行った。この結果に基づき、フィラメントの材質(タングステン)、径、形状、個数の最適化を行い、またイオン源からの引き出し電圧を印加する部分の絶縁管の改良を行った結果、従来の最大出力電流の運転を安定して行える

ようになり、プラズマ実験での稼働率が改善し、また計測精度の改善につながった。これらの改良により、プラズマ中心領域近傍において、高速イオン励起帯状流とともに DC 成分から数 10 kHz 程度まで広がる広帯域の周波数スペクトルを持つ乱流と考えられる密度揺動の同時計測に成功した。

4. 2 高速イオン励起測地線音波 (EGAM) の電場及び乱流への影響

4. 1 で述べたような計測器の改良により、EGAM と広周波数帯域に広がる乱流的揺動の計測に成功したが、当初に予測した EGAM 自体に伴う揺動場と乱流の相互作用は観測できなかった。これは後述するように、EGAM 発生時に EGAM に伴う揺動とは別の要因によって乱流的揺動が低減したことによる。また、EGAM の周波数が広帯域の乱流的揺動の周波数より高いため、広帯域揺動に対する EGAM に伴う電場シアの効果小さいことも予想される。広帯域揺動が EGAM に及ぼす影響に関しても、EGAM の振幅は広帯域揺動の振幅よりも 10 倍程度大きいいため無視できる程度であると考えられる。

EGAM が直接乱流的揺動に影響を与えることを示す結果は得られなかったが、以下に示すように、EGAM が発生することによって乱流が影響を受けることを示す実験結果が得られた。

EGAM は通常間欠的に発生するが、本研究において、この EGAM の発生とともに平均電位がプラズマ中心付近で大きく負に、周辺では正に振れ、小半径方向の電場分布が変化していることが確認された。電位が負に振れる領域は EGAM が励起されている領域であり、EGAM による高速イオンの小半径方向への輸送の増加によって定性的に説明することができる。観測された EGAM の周波数は通常の GAM 周波数に比べて高く、これは高速イオンとバルクイオンの密度比に依存することが T. Ido, et al., Nucl. Fusion 55, 083024 (2015) や H. Wang, et al., Phys. Plasmas 22, 092507 (2015) で明らかになっており、EGAM 周波数から閉じ込められている高速イオン密度を概算することができる。一方、電場の変化が高速イオンの小半径方向の輸送のみによって引き起こされていると仮定すると、電場の時間変化から輸送された粒子数を見積もることができる。このようにして見積もられた高速イオンの輸送量は、閉じ込められていた高速イオンの 70% 程度であった (井戸, 他, 第 36 回プラズマ・核融合学会年会 2019 年 11 月)。

電場の変化時には、低周波の広帯域に広がる乱流を反映する密度揺動と電位揺動が抑制されることが観測された。物理機構として、電場シアによる揺動の抑制効果や、高速イオンの小半径方向への輸送に伴うプラズマ中心圧力の減少による不安定性の抑制が考えられるが、本研究期間内では明らかにできず、今後の新たな課題として残った。

4. 2 EGAM の 2 次元構造

EGAM を含む GAM に伴う電位揺動はトロイダルモード数 (n) とポロイダルモード数 (m) がともに 0、密度揺動は n が 0、 m が 1 である。ただし、EGAM の場合は高速イオンの磁場勾配ドリフトと曲率ドリフトとの共鳴により、その構造に赤道面に対して上下に非対称性が現れる可能性があることが理論的に示されている (M. Sasaki, Phys. Plasmas, 23, 102501 (2016), M. Sasaki, Plasma Fusion Res. 13, 3403040 (2018))。これを検証するために HIBP の計測位置を 2 次元掃引して計測することを試みたが、実験機器の不具合のため、理論を検証できるほど十分な空間分解能でデータを取得できなかった。しかしながら、EGAM がバーストし、周波数掃引を始めると、密度揺動の位相分布 (これからポロイダルモード数を評価する) が変化することを示すこれまでにない実験結果が得られた。この位相分布の変化の時刻は 4. 1 で示した EGAM による高速イオンの輸送の変化もしくは電場分布の変化の時刻と関係しており、この現象の解明には HIBP の計測信号の解釈と大きな流れが存在する時の GAM の構造に関する理解を進める必要がある。

4. 3 高速イオンの電位分布及び密度分布への影響

高エネルギー中性粒子入射 (NBI) に起因する捕捉高速イオンにより磁気面上に非一様な電位分布が形成されることが理論的に指摘されている (H. Yamaguchi, IAEA-FEC, (2018) TH/P6-29, H. Yamaguchi and S. Murakami, Nucl. Fusion 58 016029 (2018))。このようなポロイダル電場が形成されると、粒子輸送、特に不純物の輸送に大きな影響を及ぼす可能性があるため、核融合炉心プラズマの粒子循環を理解する上でこの理論予測の検証は極めて重要な課題である。本研究により電位分布の計測精度が向上したため、この検証実験を実施した。その結果、垂直 NBI 時に電位分布及びプラズマの密度分布を反映する HIBP の信号強度分布に凹凸のある特徴的な空間構造が形成されることが観測された。この構造は再現性があり、また計測位置からトロイダル方向に近い位置での NBI 時には顕著であるが、遠い位置での NBI 時には観測されないことから、NBI に起因する局所的な非一様性を検出している可能性がある。詳細な空間構造の同定は実験データが不十分であるため現時点では明らかになっておらず、今後の課題である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Takeshi Ido	4. 巻 1993
2. 論文標題 Abrupt excitation of energetic-particle-driven geodesic acoustic mode in the large helical device	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 AIP Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 020002-1 ~ 8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5048712	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 G.D. Conway, A.I. Smolyakov and T. Ido	4. 巻 62
2. 論文標題 Geodesic acoustic modes in magnetic confinement devices	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 13001-1 ~ 149
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1741-4326/ac0dd1	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 該当する
1. 著者名 Hao Wang, Yasushi Todo, Masaki Osakabe, Takeshi Ido, Yasuhiro Suzuki	4. 巻 60
2. 論文標題 The systematic investigation of energetic-particle-driven geodesic acoustic mode channeling using MEGA code	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 112007-1 ~ 11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1741-4326/ab8a04	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 Hao Wang, Yasushi Todo, Masaki Osakabe, Takeshi Ido, Yasuhiro Suzuki	4. 巻 59
2. 論文標題 Simulation of energetic particle driven geodesic acoustic modes and the energy channeling in the Large Helical Device plasmas	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 096041-1 ~ 7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1741-4326/ab26e5	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9件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 井戸毅, 清水昭博, 西浦正樹, 濱田泰司
2. 発表標題 乱流抑制配位創成に向けたHIBP設置可能性の検討
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会 第37回年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takeshi Ido
2. 発表標題 Nonlinear wave-particle interaction in magnetized high temperature plasmas confined in Large Helical Device
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 井戸毅、一ノ瀬薫、清水昭博、佐々木真、WANG Hao、西浦正樹
2. 発表標題 LHDにおける高速イオン励起測地線音波バーストが電位分布に及ぼす影響
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 井戸毅, 一ノ瀬薫, 清水昭博, 佐々木真
2. 発表標題 LHDにおける高速イオン励起測地線音波の2次元構造の観測
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 中島優一, 谷池晃, 古山雄一
2. 発表標題 重イオンビームプローブ法に用いる検出器の測定精度向上に関する研究
3. 学会等名 第35回プラズマ・核融合学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takeshi Ido
2. 発表標題 Dynamics of energetic particle-driven oscillatory zonal flow in toroidal plasmas
3. 学会等名 第37回プラズマ・核融合学会
4. 発表年 2021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	清水 昭博 (SHIMIZU AKIHIRO) (00390633)	核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教 (63902)	
研究分担者	谷池 晃 (TANI IKE AKIRA) (50283916)	神戸大学・海事科学研究科・准教授 (14501)	

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
---------	---------