

令和 4 年 6 月 3 日現在

機関番号：17102

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2019～2021

課題番号：19K23426

研究課題名(和文)磁化プラズマ中電子温度勾配不安定性駆動乱流に対する帯状流の抑制効果の検証

研究課題名(英文)Verification of Suppression Effect of Zonal Flow on Electron Temperature Gradient Mode in Magnetized Plasma

研究代表者

文 贊鎬 (MOON, Chanho)

九州大学・応用力学研究所・助教

研究者番号：50734753

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は直線装置PANTAで高周波揺動 ETG (Electron Temperature Gradient) モードの同定及び非線形的諸特性を評価することを目指した。最初に高周波ETGモードを直接測定するため高周波用静電プローブの制作を行い、従来の静電プローブより高い周波数 (< 2 MHz) まで揺動計測は可能になった。また、ヘリウム (He) プラズマを用いてPANTAにおける乱流揺動の諸特性を高周波用静電プローブで詳細に調べた結果、低磁場実験条件下で低周波密度揺動 ~5.5 kHz と高周波密度揺動 ~200 kHzが同時に観測された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

直線装置PANTAにおける乱流揺動研究に関して、高周波揺動まで観測できる計測方法の確立は、多スケール揺動との非線形相互作用の研究などに貢献できると期待される。また、ヘリウムヘリコンプラズマにおける乱流揺動の磁場依存性の実験結果は、学術的に価値があると考えられる。

研究成果の概要(英文)：This study aims to identify high-frequency fluctuation ETG (Electron Temperature Gradient) mode and to evaluate their nonlinear characteristics using a linear magnetized device PANTA. In order to directly measure the high-frequency ETG modes, a new electrostatic probe has been fabricated, which enables plasma fluctuation measurements up to higher frequencies (< 2 MHz) than those with conventional electrostatic probes. On the other hand, in the case of helium helicon plasma, the low-frequency density fluctuation of ~5.5 kHz and the high-frequency density fluctuation of ~200 kHz was observed at the same time under low magnetic field conditions.

研究分野：プラズマ物理

キーワード：高周波揺動 ETGモード PANTA

1. 研究開始当初の背景

磁場閉じ込めプラズマにおいて、粒子・熱輸送の物理機構を解明し、制御することは重要なテーマであり、核融合発電を実現するために解決しなければならない問題である。近年、極めて大きな「電子異常輸送」が閉じ込め性能を劣化させる新たな要因として注目を集めている「電子温度勾配不安定性 (ETG モード) 駆動乱流」の抑制メカニズムの解明が求められている。しかし、大型核融合装置では空間的に一様な密度分布の条件下で電子温度勾配を制御して形成することが困難であるため、日本では主に理論的研究を中心に研究が

進められている。一方、理論やシミュレーションの発展により ETG モードの非線形過程で巨視的な帯状流 (Zonal Flow) が発生し、それが $E \times B$ シアを増加して、最終的に ETG モードに起因する異常輸送を抑えることを示している [図 1]。

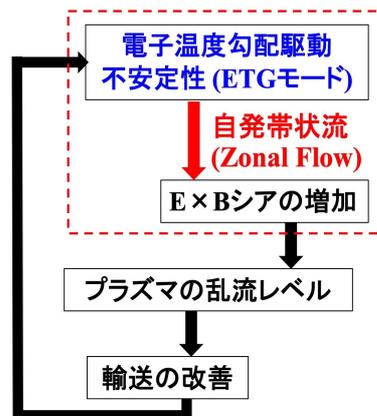


図 1: 電子温度勾配駆動不安定性による乱流と帯状流の自己組織化。

2. 研究の目的

本研究の目的は、直線型磁場装置を用いて ETG モードの非線形過程と Zonal Flow との非線形エネルギーの授受を定量的に評価し、ETG モードの非線形過程に起因する Zonal Flow を実験的に観測することを目指した。一方、大型核融合装置における実験結果では Zonal Flow が乱流を抑制して輸送障壁の形成に重要な役割を示していることが、H モードプラズマの電場計測で明らかになった [Ida 1990]。さらに、直線型磁場装置において、低周波ドリフト波モード (\sim kHz) と Zonal Flow ($< \sim$ 1 kHz) が同時に観測され、ドリフト波モードのエネルギーが Zonal Flow に非局所的に移送することを明らかになった [Nagashima 2008]。巨視的な Zonal Flow は、プラズマ乱流輸送を改善し、さらに低周波ドリフト波モードとの非線形相互作用によって成長されることが数十年前に観測されているが、ミクルスケール ETG モード (\sim MHz) と Zonal Flow との相関・因果関係に関する実験結果は、まだ報告されていない。それで ETG モードの非線形過程による Zonal Flow の成長機構、または自然発生する Zonal Flow による ETG モードの抑制機構を解明することが現在の核融合閉じ込め研究には必須の課題である。

3. 研究の方法

本研究の実験は、九州大学の直線型装置 PANTA (Plasma Assembly for Nonlinear Turbulence Analysis) を用いて、高周波用静電プローブや計測回路の制作を行い、高周波揺

動 ETG モードと低周波領域の帯状流の直接同時計測を試みた。PANTA ヘリコンプラズマは、装置左端のアンテナから周波数 7 MHz、電力 0 - 3 kW を印加し、アルゴン (Ar) とヘリウム (He) ガスを作動ガス (ガス圧 = 0.5~3 mTorr) とした高周波 (RF) 放電によって半径約 5 cm の高密度円柱磁化プラズマ (z 方向磁場 ≈ 0.1 T) を生成する。実験で得られたデータをスペクトル解析などで各々のプラズマ揺動を詳細に調べた。

4. 研究成果

(1) 高周波用静電プローブの制作

高周波 ETG モードを直接測定するため、図 2 に示したように同軸ケーブルを用いて高周波用静電プローブの制作を行った。その結果、従来の PANTA の静電プローブより高い周波数 (< 2 MHz) まで揺動計測は可能になった。

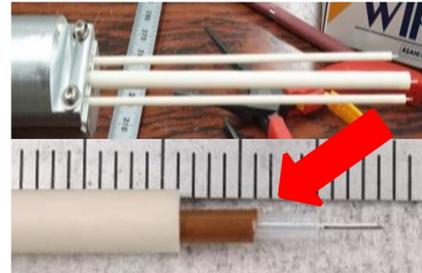


図 2: PANTA における新規高周波用静電プローブ。

(2) ヘリウム(He)プラズマにおける高周波密度揺動の観測

ヘリコンアルゴン(Ar) PANTA プラズマにおける電子温度勾配のパラメータ η (~ 1.3) は ETG モードを励起させる ($\eta > \sim 3.0$) に不十分であることがわかった。それで Ar プラズマよりイオンラーマ半径が小さい、ヘリウム (He) プラズマ (短波長の ETG モードにおけるラーマ半径効果を期待) を用いて PANTA における乱流揺動の諸特性を高周波用静電プローブで詳細に調べた。その結果、図 3 に示したヘリウムプラズマ揺動の磁場依存性のように、磁場; 400 G, 中性ガス; ~ 10 mTorr, 周辺領域 ($r = 2.5$ cm) の実験条件下で低周波密度揺動 ~ 5.5 kHz と高周波密度揺動 ~ 200 kHz が同時に観測された。さらに、イオン飽和電流 (I_{is}) 揺動と電子飽和電流 (I_{es}) 揺動, 両方で同じ傾向が観測された。しかし、その低周波・高周波揺動の種類を同定することはまだできなかった。

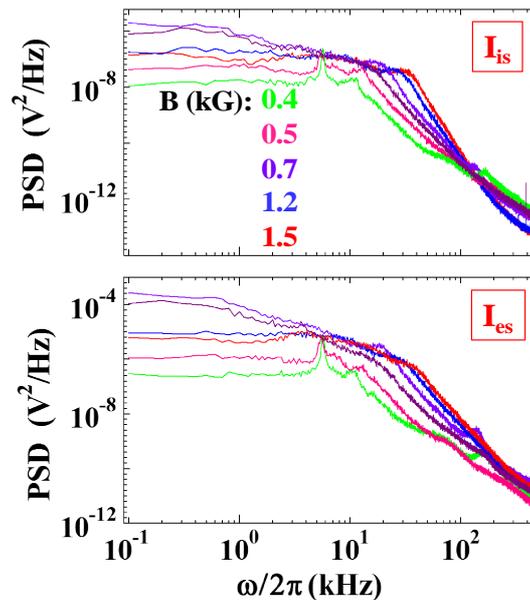


図 3: ヘリウム (He) プラズマ揺動の磁場依存性 ($r = 2.5$ cm). (上)イオン飽和電流揺動, (下)電子飽和電流揺動。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 KOBAYASHI Taiki, FUJISAWA Akihideo, NAGASHIMA Yoshihiko, MOON Chanho, NISHIMURA Daiki, YAMASAKI Kotaro, INAGAKI Shigeru	4. 巻 16
2. 論文標題 Proposal of Analysis Method for Pattern Recognition of Two-Dimensional Structure of Plasma	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research: Rapid Communications	6. 最初と最後の頁 1201082 ~ 1201082
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.16.1201082	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 NISHIMURA Daiki, FUJISAWA Akihideo, NAGASHIMA Yoshihiko, MOON Chanho, YAMASAKI Kotaro, KOBAYASHI Taiki, INAGAKI Shigeru	4. 巻 16
2. 論文標題 Fourier-Rectangular Function Analysis of Spatiotemporal Structure of Bursting Phenomenon in a Cylindrical Plasma	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research: Rapid Communications	6. 最初と最後の頁 1201075 ~ 1201075
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.16.1201075	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 Moon Chanho, Yamasaki Kotaro, Nagashima Yoshihiko, Inagaki Shigeru, Ido Takeshi, Yamada Takuma, Kasuya Naohiro, Kosuga Yusuke, Sasaki Makoto, Kawachi Yuichi, Nishimura Daiki, Kobayashi Taiki, Fujisawa Akihideo	4. 巻 11
2. 論文標題 The first observation of 4D tomography measurement of plasma structures and fluctuations	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-021-83191-3	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 Yamasaki K., Fujisawa A., Nagashima Y., Moon C., Inagaki S., Yamada T.	4. 巻 91
2. 論文標題 Tomography system for two-dimensional observation of fluctuation in magnetized plasma	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 033502 ~ 033502
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5144480	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 Kobayashi T.-K, Fujisawa A, Nagashima Y, Moon C, Yamasaki K, Nishimura D, Inagaki S, Yamada T, Kasuya N, Kosuga Y, Sasaki M, Kawachi Y	4. 巻 63
2. 論文標題 Correlation-estimated conditional average method and its application on solitary oscillation in PANTA	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Plasma Physics and Controlled Fusion	6. 最初と最後の頁 032001 ~ 032001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6587/abd980	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 Nishimura D., Fujisawa A., Nagashima Y., Moon C., Yamasaki K., Kobayashi T.-K., Inagaki S., Yamada T., Kawachi Y., Kasuya N., Kosuga Y., Sasaki M.	4. 巻 129
2. 論文標題 Modal polarization analysis using Fourier-rectangular function transform in a cylindrical plasma	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 093301 ~ 093301
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0037352	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 Moon C., Kobayashi T., Ida K., Tokuzawa T., Hidalgo C., Yoshinuma M., Ogawa K., Itoh K., Fujisawa A., and LHD Experiment Group	4. 巻 26
2. 論文標題 Spatial structure of low-frequency fluctuations throughout the transition of poloidal flow velocity in edge plasmas of LHD	5. 発行年 2019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) 10.1063/1.5098954	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 Yamasaki K., Fujisawa A., Nagashima Y., Moon C., Inagaki S., Kasuya N., Kosuga Y., Sasaki M., and Yamada T.	4. 巻 126
2. 論文標題 Fourier-rectangular function analysis for cylindrical plasma images	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 043304 ~ 043304
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5108717	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 Marui I., Fukisaw A., Nagashima Y., Moon C., Yamasaki K., Inagaki S., and Yamada T.	4. 巻 15
2. 論文標題 Magnetic Field Dependence of Plasma Properties Observed with Tomography in PANTA	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research: Rapid Communications	6. 最初と最後の頁 1201018-1~3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.15.1201018	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 -

[学会発表] 計10件(うち招待講演 1件/うち国際学会 2件)

1. 発表者名 文 贊鎬
2. 発表標題 4次元トモグラフィ、プラズマの特異な挙動を観測
3. 学会等名 九州大学 応用力学研究所(RIAM) フォーラム(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Chanho Moon, Toshiro Kaneko, Shigeru Inagaki, Akihide Fujisawa, and Rikizo Hatakeyama
2. 発表標題 Verification of ETG mode Energy Transfer to Drift-Wave mode through Multiscale Nonlinear Interactions
3. 学会等名 9th Asia Pacific Transport Working Group (APTWG) International Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 C. Moon, A. Fujisawa, Y. Nagashima, T-K Kobayashi, and D. Nishimura
2. 発表標題 Versatile Three-dimensional Tomographic Imaging System for the Plasma Turbulence Dynamic Studies
3. 学会等名 5th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 文 贊鎬, 稲垣滋, 永島芳彦, 山田琢磨, 糟谷直宏, 小菅佑輔, 小林大輝, 西村大輝, 山崎広太郎, 藤澤彰英
2. 発表標題 四次元トムグラフィ計測を用いた直線プラズマのダイナミクス観測
3. 学会等名 第38回プラズマ・核融合学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 文 贊鎬, 稲垣滋, 永島芳彦, 山崎広太郎, 糟谷直宏, 小菅佑輔, 佐々木真, 井戸毅, 山田琢磨, 赤司智宏, 小林大輝, 西村大輝, 藤澤彰英
2. 発表標題 直線型磁化プラズマPANTAにおける揺動の3次元ダイナミクス
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 文 贊鎬
2. 発表標題 トムグラフィを用いた直線磁化プラズマの3次元構造解析
3. 学会等名 第37回プラズマ・核融合学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 文 贊鎬
2. 発表標題 4次元プラズマ乱流構造研究のためのトムグラフィの開発
3. 学会等名 核融合エネルギーフォーラムプラズマ物理クラスター計測サブクラスター令和2年度第1回会合
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 文贊鎬, 藤澤彰英, 永島芳彦, 山崎広太郎, 稲垣滋, 糟谷直宏, 小菅佑輔, 佐々木真, 井戸毅, 山田琢磨
2. 発表標題 PLATO計画のための3次元乱流ダイナミクス観測を目指したトモグラフィの開発
3. 学会等名 日本物理学会2019秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 文贊鎬, 永島芳彦, 山崎広太郎, 稲垣滋, 糟谷直宏, 小菅佑輔, 佐々木真, 井戸毅, 山田琢磨, 挾間田一誠, 河内裕一, 荒木健, 丸井一生, 星野智, 赤司智宏, 小林大輝, 西村大輝, 藤澤彰英
2. 発表標題 3次元トモグラフィ計測を用いたPANTAプラズマの乱流構造解析
3. 学会等名 第36回 プラズマ・核融合学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 文贊鎬
2. 発表標題 トモグラフィを用いた直線プラズマの3次元構造解析
3. 学会等名 プラズマインフォマティクス研究会
4. 発表年 2019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

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