

令和 6 年 6 月 4 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K13898

研究課題名（和文）トカマク周辺プラズマの高・低磁場側における乱流輸送特性の同時計測

研究課題名（英文）Simultaneous measurement of turbulent transport characteristics on the high and low field side in edge tokamak plasma

研究代表者

文 贊鎬（MOON, Chanho）

九州大学・応用力学研究所・准教授

研究者番号：50734753

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000 円

研究成果の概要（和文）：磁場閉じ込め核融合研究において、周辺プラズマの熱・粒子輸送機構の解明とその抑制は緊急の課題です。最近シミュレーション研究では、磁場閉じ込め周辺プラズマの高・低磁場側における乱流揺動および輸送の特性が大きく異なることが示された。大型トカマク装置では一般的に高・低磁場側の乱流揺動の同時計測が難しく、これまでシミュレーションと理論の予測の詳細な検証が困難であった。そこで本研究では、初期段階でPANTAを用いて乱流輸送評価のための高時間分解能の温度・電位揺動計測法を確立し、最終的にはPLATO小型トカマク装置の周辺プラズマにおける高・低磁場側の乱流輸送の同時評価を目指した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

異常な乱流輸送の原因を解明し、その制御方法を確立することは、核融合発電の実現に向けて重要な一歩である。新しい計測法やプラズマの特性理解に基づく技術革新は、エネルギー技術全般に影響を与える。高い効率で安定したプラズマの閉じ込めが可能になることで、経済的な核融合発電が実現し、将来のエネルギー供給の安定化に寄与すると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In the field of magnetic confinement fusion research, understanding and controlling the thermal and particle transport mechanisms in the peripheral plasma is an urgent challenge. Recent simulation studies have revealed significant differences in the characteristics of turbulent fluctuations and transport between the high- and low-magnetic-field sides of the magnetically confined plasma. However, simultaneous measurement of turbulent fluctuations on both sides has been difficult in large tokamak devices, making detailed validation of simulations and theoretical predictions challenging. Therefore, in this study, we aimed to establish a high-time-resolution temperature and potential fluctuation measurement method for turbulent transport evaluation using the PANTA device at the initial stage, and ultimately aimed to simultaneously evaluate turbulent transport on the high- and low-magnetic-field sides of the peripheral plasma in the PLATO small tokamak device.

研究分野：プラズマ乱流

キーワード：核融合プラズマ プラズマ診断 乱流揺動 ポールペンプローブ

## 1. 研究の背景

磁場閉じ込め核融合研究において、周辺プラズマの熱・粒子輸送機構の解明とその抑制は緊急の課題である。最近シミュレーション研究では、磁場閉じ込め周辺プラズマの高・低磁場側における乱流揺動および輸送の特性が大きく異なることが示された (図1参照)。大型トカマク装置では一般的に高・低磁場側の乱流揺動の同時計測が難しく、これまでシミュレーションと理論の予測の詳細な検証が困難であった。そこで本研究では、初期段階で PANTA (Plasma Assembly for Nonlinear Turbulence Analysis) を用いて乱流輸送評価のための高時間分解能の温度・電位揺動計測法を確立し、最終的には PLATO (PLAsma Turbulence Observatory) 小型トカマク装置の周辺プラズマにおける高・低磁場側の乱流輸送の同時評価を目指した。

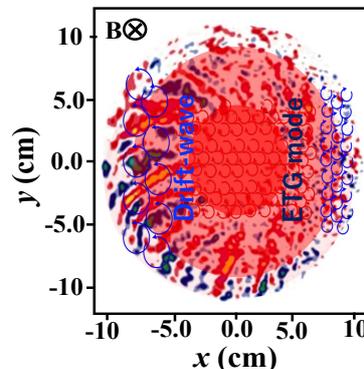


図 1: 磁場閉じ込め周辺プラズマにおける高・低磁場側のシミュレーションの結果。

## 2. 研究の目的

磁場閉じ込め核融合研究において、経済的な核融合発電の実現は重要な課題である。多くの磁場プラズマ閉じ込め装置では、熱・粒子輸送においてクーロン衝突に基づく古典および新古典輸送理論の予測をはるかに上回る「異常乱流輸送」が発生し、閉じ込め性能を劣化させており、その原因の解明が求められている。本研究の目的は、磁化プラズマにおける乱流輸送を正確に評価する方法を確立することである。具体的には、空間電位の新たな計測方法の開発および確立を目指す。また、直線型磁場装置 PANTA を用いて、磁化プラズマにおける熱および粒子の乱流輸送機構の解明とその制御を目指す。

## 3. 研究の方法

本研究は、直線型装置 PANTA を用いて、高時間分解能のボールペン (BP: Ball-Pen) プロブや計測回路を製作し、プラズマ空間電位  $\phi_s$  と電子温度  $T_e$  の直接同時計測を試みた。具体的には、磁化プラズマ中の空間電位、浮遊電位  $\phi_f$ 、電子温度との関係は、 $\phi_s = \phi_f + \alpha T_e$  であるため ( $\alpha = \ln(I_{es}/I_{is})$ ,  $I_{es}$ : 飽和電子電流), BP プロブで  $\phi_f$  を計測することで、電子温度  $T_e$  および温度揺動  $\tilde{T}_e$  を求めることができる。一方、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 3 kW を印加し、アルゴン (Ar) ガスを作動ガス (ガス圧 = 0.5~3 mTorr) とした高周波 (RF) 放電によって生成される。また、半径約 5 cm の高密度円柱磁化プラズマ (z 方向磁場  $\approx 0.1$  T) を生成する。実験で得られた BP プロブのデータを用いてプラズマ  $\phi_s$  と  $T_e$  のプラズマパラメータを詳細に調べた。

#### 4. 研究成果

##### (1) ボールペン (BP) プローブの制作

図 2 (a)に PANTA に設置した BP プローブを示す。BP プローブは直径 3.2 mm のステンレス電極と内径 4 mm のセラミックチューブで制作しており、電極はセラミックチューブ内を移動して、約 0.01 mm の分解能(電極深さ)で調整可能である。また隣の静電プローブ LP で  $\phi_f$  を測定する。図 2 (b)にイオン飽和電流  $I_{sat}^+$  に規格化した BP プローブの I-V 特性の電極深さ( $h$ )依存性を示す。BP プローブの I-V 特性の電子飽和電流  $I_{sat}$  は、 $h = -1$  mm の場合が  $h = 3$  mm と比較して約 7 分の 1 に著しく減少することが明らかになった。つまり、BP プローブの動作原理通りに実験結果が得られたため、製作した BP プローブの使用に問題がないと判断された。

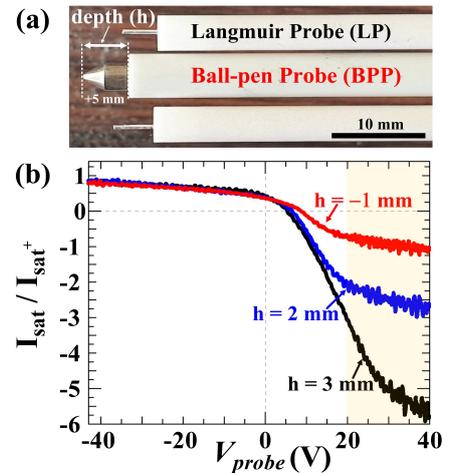


図 2: PANTA における (a) BP プローブと (b) BP プローブの I-V 特性の電極深さ depth,  $h$  依存性。

##### (2) BP プローブによるプラズマ $\phi_s$ と $T_e$ の計測方法の確立

直線装置 PANTA を用いて BP プローブ計測法の実施と校正を行なった。その結果、磁化プラズマのホールパラメータ ( $\beta$ ) が 1 未満の領域(プラズマ半径位置  $r < 2$  cm)では、BP プローブがプラズマ空間電位を正確に測定するのが困難であることが明らかとなった。ここでのホールパラメータ  $\beta$  は、電子のジャイロ周波数と電子と重粒子 (イオンや中性粒子) の衝突周波数の比率として定義される。

図 3(a)および 3(b)は、プラズマ半径位置  $r > 2$  cm の場合における BP プローブの直接測定結果の空間電位と電子温度を示す。具体的には、静電プローブ LP の I-V 曲線から得られたプラズマ空間電位と電子温度の値を BP プローブから直接得られた結果と比較した。その結果、実験誤差を考慮すると、両方の実験結果は概ね一致していると判断された。即ち、BP プローブを用いてプラズマの空間電位と電子温度の計測方法の確立を成功した。将来的には、これまで得られた直線装置 PANTA の実験結果に基づいて多チャンネル BP プローブの調整を行い、プラズマの熱流速分布を同時に評価できるようにする。また、今度は小型トカマク装置 PLATO に多チャンネル BP プローブを用いた高時間分解能の温度・電位揺動計測法を確立して、その揺動乱流が駆動する熱流・粒子束を定量的に評価する予定である。

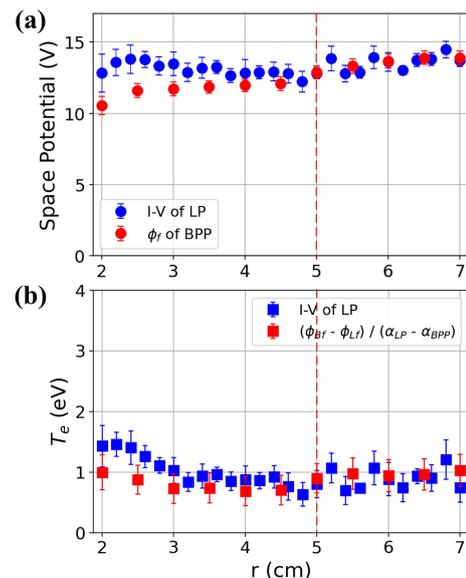


図 3: (a) BPP の空間電位と LP の I-V 曲線からの空間電位の比較および (b) BPP の電子温度と I-V 曲線からの電子温度の比較。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 NISHIMURA Daiki, FUJISAWA Akihide, 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 KOBAYASHI Taiki, FUJISAWA Akihide, 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 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 1件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 文 贊鎬, 永島 芳彦, 西澤 敬之, 山田 琢磨, 小林 大輝, 西村 大輝, 藤澤 彰英
2. 発表標題 ボールペンプローブを用いたPANTAプラズマの電位と電子温度の直接測定
3. 学会等名 日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 C. Moon, A. Fujisawa, Y. Nagashima, T. Nishizawa, T-K Kobayashi, and D. Nishimura
2. 発表標題 Direct Measurement of the Plasma Potential and Electron Temperature using the Ball-pen Probe in Linear Magnetized Plasm
3. 学会等名 6th Asia-Pacific Conference on Plasma Physic (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 文 賢鎬
2. 発表標題 4次元トムグラフィ、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 賢鎬, 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

〔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
---------	---------