

研究課題：流体乱流解析手法を用いた周辺プラズマ揺動解析

研究代表者：大野哲靖（名古屋大学大学院工学研究科）

原子力機構担当者：朝倉伸幸

研究協力者：田中宏彦（名古屋大学大学院工学研究科），辻義之（名古屋大学大学院工学研究科）

研究期間：平成 20 年度-21 年度

## 1. 研究目的・意義

トーラス磁場プラズマ閉じ込め装置において、スクレイブ・オフ層（SOL）における磁場を横切るプラズマ輸送の理解は、SOL の広がりとともに、ダイバータへ達する熱流・粒子束を評価する上で重要な課題である。特に近年、計測機器の時間・空間分解能の著しい向上に伴って、磁力線に沿うフィラメント状のプラズマ塊（Plasma Blob）が磁場を横切り壁へ向かって飛行する現象（Plasma Blob 輸送）がトカマク装置ならびに種々の磁場配位装置（ヘリカル・直線型）の周辺プラズマ領域中で観測されている。このため、核融合周辺プラズマ分野において非拡散的かつ間欠的なプラズマ輸送物理の解明が重要な課題となっている。

本研究では、Plasma Blob 輸送の磁場構造依存性を明らかにするために、ポロイダル断面上の異なる位置で計測された揺動信号の特性を比較する。解析の対象として、時間・空間分解能に優れた静電プローブにより計測されたイオン飽和電流揺動信号を主に用いる。また、異なる放電条件における非拡散的輸送の違いを明らかにするため、三つの放電条件（L-mode, detached L-mode, ELMy H-mode）において計測された揺動信号を解析する。

## 2. 研究方法

本研究では JT-60U の弱磁場側赤道面直下、強磁場側バップル直上、および X 点近傍を計測可能な 3 本の高速掃引プローブ（サンプリング周波数：500 kHz）と、弱磁場側・強磁場側ダイバータ板上にアレイ上に設置されたダイバータプローブ（サンプリング周波数：250 kHz）により高時間分解能計測されたイオン飽和電流揺動を主な解析対象とする。このほか、 $H\alpha$ 線発光や高速テレビカメラにより撮影されたデータも解析する。流体乱流解析手法として主に確率密度関数やパワースペクトルを用いて、非拡散的輸送現象の特性を明らかにする。

## 3. 研究成果と進捗状況

図 1 には接触ダイバータ L-mode 放電において高速掃引プローブを用いて計測されたポロイダル各位置におけるイオン飽和電流の平均値および Skewness の径方向分布を示している。同図より、弱磁場側 SOL において Skewness が正に大きいことがわかる。Skewness が正であることは解析対象とする時系列信号が正にスパイク的な波形を多く含むことを示しており、これは Plasma Blob がプローブ上を通過したときに現れる揺動信号の特徴と一致する。また図 2 には弱磁場側 SOL で計測されたイオン飽和電流のパワースペクトルを示す。周波数数 kHz を境界として、両対数プロットされたパワースペクトル形状には平坦な領域と傾き ( $S(f) \approx f^{-\alpha}$ ) を持つ領域がみられる（周波数 30 kHz 以上に見られるピークはバックグラウンドでも計測されるノイズである）。このようなスペクトル形状は、バーストの発生は周期的ではないが、ある程度スケールが同じバースト波形が支配的などに現れる。また傾きの指数  $\alpha$  はバーストの形状に関連し、 $\alpha = 1.5$  は種々のトカマク装置で Plasma Blob 輸送が観測された場合に得られる指数 ( $\alpha = 1.6$ ) に近い [G.Y. Anter et al., Phys. Plasmas 10 (2003) 419. ]。これらの結果より、JT-60U の L-mode 放電では弱磁場側 SOL 中で Plasma Blob 輸送が顕著に発生していることがわかった。

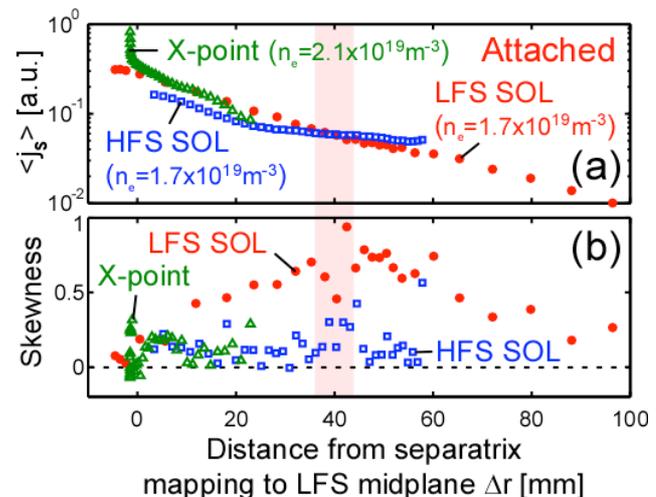


図 1. 接触状態時におけるポロイダル各位置で計測されたイオン飽和電流の(a)平均値および(b)Skewness の径方向分布。

図 2 には ELMy H-mode 放電の弱磁場側 SOL において得られたパワースペクトルも示す。ここでは ELM と ELM の間のプラズマが定常な時間における揺動信号を解析した。セパトリス近傍では約 60 kHz にピークを持つ高周波揺動が見られるが、周辺でこれは減衰し、L-mode 放電で得られたものと似たスペクトル形状となっている。これよりコアプラズマの閉じ込め性能の良い ELMy H-mode 放電の ELM 間においても弱磁場側 SOL 中では Plasma Blob 輸送が生じていると考えられる。

図 3 には接触・非接触ダイバータ L-mode 放電における X 点近傍の高速掃引プローブ計測信号の揺動特性を示す。接触状態時には Skewness が全体に渡りゼロに近く、この領域で Plasma Blob 輸送は発生していないと考えられる。これに対し、ダイバータ板上ストライク点付近が非接触状態となり、上流の X 点近傍においてもプラズマが低温・高密度状態となると、セパトリス近傍で約 2.3 kHz の非常に大きな周期変動が観測され、さらに X 点脇の弱磁場位置では周期変動と似た時間スケールで、正の大きな Skewness を持つ、すなわち正にスパイク的な揺動波形が得られた。周期変動はダイバータプローブおよびダイバータ板を視線に含める H $\alpha$ 線発光からも計測されたことから、周期的で大きな揺動現象はダイバータ領域近傍で生じているものと予想される。以上の結果は、非接触プラズマがダイバータ板から上流に進行したことでレッグ近傍でなんらかの周期的な現象が生じ、これが弱磁場側への非拡散的な輸送現象を生じさせた可能性を示している。ただし条件付き平均法から得られたイオン飽和電流のバースト波形はピークを中心に左右対称に近く、Plasma Blob 通過時の典型波形の特徴（急峻な立ち上がりとなだらかな立下り）と異なっていた。Plasma Blob 輸送とは一部異なる輸送機構を持つ可能性が考えられる。

#### 4. まとめ

L-mode 放電, ELMy H-mode 放電, および非接触ダイバータ放電において、イオン飽和電流揺動信号の解析を行った。それぞれの解析から、Plasma Blob 輸送が主に弱磁場側 SOL 中で起きていること、ELMy H-mode 放電でも同様の現象が生じていること、また非接触ダイバータ周辺で非拡散的輸送と思われる現象が顕著に発生していることがわかった。非接触ダイバータ状態における非拡散的な輸送の増大を示唆する結果は他の磁場配位装置（ヘリカル、直線型）でも得られており、トカマク装置においてこの現象が本質的なものであるか、さらなる検証が必要と考えられる。

#### 5. 今後の課題・予定

非接触ダイバータ放電において観測された非拡散的輸送と思われる現象の調査を進める。また ELMy H-mode 放電においては TV カメラにより ELM の挙動が捉えられている。プローブ信号解析と ELM 動画の解析結果を比較することにより、SOL 領域での ELM 挙動の理解を進展させる。

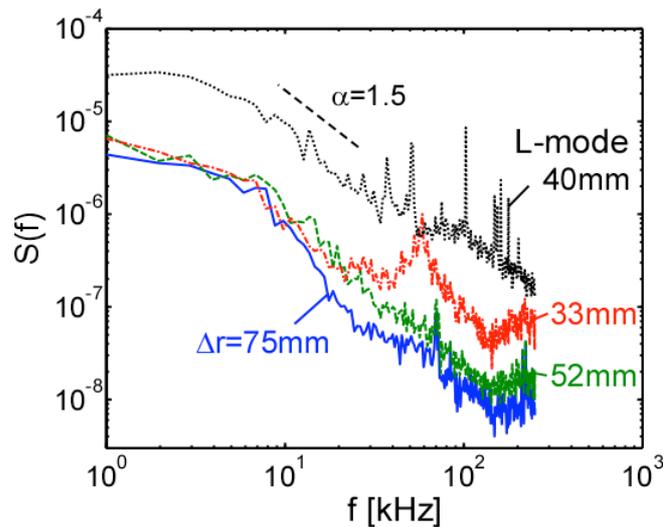


図 2. L-mode および ELMy H-mode 放電における弱磁場側 SOL 中で計測されたイオン飽和電流のパワースペクトル。

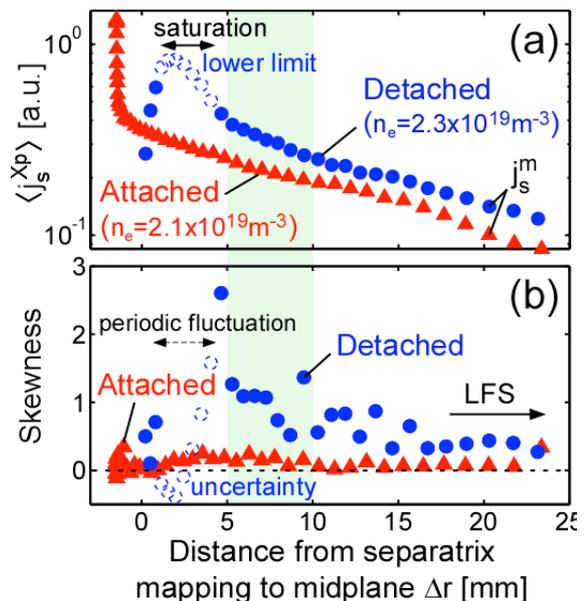


図 3. 接触・非接触状態時における X 点近傍の高速掃引プローブで計測されたイオン飽和電流の (a) 平均値および (b) Skewness の径方向分布。

平成 21 年度までの成果リスト（口頭発表含む）

[1] N. Asakura, H. Kawashima, N. Ohno, G. Matsunaga, T. Nakano and N. Oyama, “ELM propagation in the low- and high-field-side Scrape-of Layer of the JT-60U tokamak,” *Journal of Physics: Conference Series* **123** (2008) 012009.

[2] N. Asakura, H. Kawashima, N. Ohno, T. Nakano, „Fluctuation characteristics and influence on parallel plasma flow in the JT-60U SOL,” 18<sup>th</sup> International Conference on Plasma Surface Interaction in Controlled Fusion Devices, P1-30, 26-30 May, Toledo, Spain, (2008).

[3] N. Ohno, H. Tanaka, S. Takamura, S. Masuzaki, A. Komori, N. Asakura, “Non-Diffusive SOL Plasma Transport in Magnetically Confined Plasmas in Relation with Magnetic Configuration and Plasma Detachment with Use of Statistical Analysis,” 2008 International Congress on Plasma Physics, 8-12 September, Fukuoka, Japan (2008).

[4] N. Ohno, H. Tanaka, N. Asakura, Y. Tsuji, S. Takamura, Y. Uesugi, and JT-60U Team, “Statistical Analysis of Fluctuation Characteristics at High- and Low-Field Sides in L-mode SOL Plasmas of JT-60U,” *Proc. of 22<sup>nd</sup> IAEA Fusion Energy Conference*, 13-18 October, Genova, Switzerland (2008).

[5] H. Tanaka, N. Ohno, N. Asakura, Y. Tsuji, H. Kawashima, S. Takamura, Y. Uesugi, and JT-60U Team, "Statistical Analysis of Fluctuation Characteristics at High- and Low-Field Sides in L-mode SOL Plasmas of JT-60U," *Nuclear Fusion* **49** (2009) 065017.

[6] N. Asakura, N. Ohno, H. Tanaka, H. Kawashima, T. Nakano, "Statistical Analysis to the SOL Plasma Fluctuation in JT-60U," *J. Nucl. Mater.* **390-391** (2009) 364-367.

[7] H. Tanaka, N. Ohno, N. Asakura, Y. Tsuji, H. Kawashima, S. Takamura, and Y. Uesugi, "Fluctuation Characteristics of the L-mode and H-mode SOL Plasmas," *JAEA-Review* 2009-045, (2010) 112-115.

[8] 田中宏彦, 大野哲靖, 朝倉伸幸, 辻義之, 梶田信, "JT-60U 非接触ダイバータ状態における SOL/ダイバータプラズマ揺動解析," 第 8 回核融合エネルギー連合講演会, 10A-27p, 2010.6.10-11, 高山市民文化会館.

[9] H. Tanaka, N. Ohno, N. Asakura, Y. Tsuji, S. Kajita, “Fluctuation Characteristics in Detached SOL/Divertor Plasmas of JT-60U,” 1<sup>st</sup> International Youth Conference on Fusion Energy, FEC2010-0121, 9-10 October, Daejeon, Republic of Korea (2010).