02pA02

# ロックドモード様不安定性の実験研究
# Experimental study on locked mode like instability

武村勇輝[1], 渡邊清政[1], 徳沢季彦[1], 榊原悟[1], 成嶋吉朗[1], 岡本征晃[2], 大舘暁[1],
鈴木康浩[1], 居田克巳[1], 吉沼幹朗[1], 土屋隼人[1], 山田一博[1]
Yuki TAKEMURA[1], Kiyomasa WATANABE[1], Tokihiko TOKUZAWA[1],
Satoru SAKAKIBARA[1], Yoshiro NARUSHIMA[1], et al

核融合研[1], 石川高専[2]
NIFS[1], NIT[2]

LHDの低磁気シア放電では、放電の途中で前兆振動である低次MHD揺動の周波数が減少し、周波数がほぼゼロになると揺動振幅が急速に増加し、閉じ込め性能が急激に劣化する現象が観測されている[1]。低次MHD揺動の周波数がゼロになると揺動が急激に成長するという性質がトカマクプラズマで観測されるロックドモードと類似していることから、上記の不安定性はロックドモード様不安定性と呼ばれている。上記に示すように、ロックドモード様不安定性は閉じ込め性能の著しい劣化を引き起こすため、その駆動機構や抑制手法の研究が重要である。また、周波数の減少につれて振幅が増加するというトカマクのロックドモードと類似した性質を持つことから、ロックドモード様不安定性発生時における低次MHD揺動の回転減速機構や周波数が小さくなった時の振幅の振る舞いを調べ、ロックドモードとの異同を調べることは、トカマク型核融合炉でも課題となっているロックドモードの理解の進展につながる可能性が期待される。ロックドモードでは誤差磁場により生じる磁気島の電磁トルクが減速機構の有力な候補の一つである[2]。しかし、LHDで最も深刻な交換型モードは大きな幅の磁気島を持たないことが線形MHD理論により予想されている。本研究ではLHDで生じる$m/n$=1/1のロックドモード様不安定性の減速機構を解明するために、径方向のモード構造やプラズマ流速分布を調べた。ここで、$m/n$はポロイダルモード数/トロイダルモード数である。

ロックドモード様不安定性の前兆振動が減速する際の径方向のモード構造やプラズマ流速分布を計測できる条件で実験を行った。共鳴有利面付近の電子温度揺動をECE(電子サイクロトロン放射)計測で計測するために、運転磁場を1.375Tに設定した。CXS(荷電交換分光装置)でプラズマ流速を計測するために垂直NBを変調入射した。磁気軸位置3.6mで、高プラズマアスペクト比の磁場配位で、Neガスを導入し、接線NB入射によりco方向の高電流を駆動することで、低磁気シア配位とした。

図1に放電波形(ベータ値やプラズマ電流値)と$m/n$=1/1の揺動磁場強度、周波数、$m/n$=1/1の径方向磁場の非回転成分、共鳴面と**E**×**B**ドリフト回転周波数の径方向分布の時間発展を示す。**E**×**B**ドリフト回転周波数はCXSで計測したカーボン流速から評価した。**E**×**B**ドリフト回転周波数を評価する手法の詳細については、論文[3]に記述されている。共鳴面はトムソン散乱計測で計測した電子温度分布の平坦化部から推測した。共鳴面での**E**×**B**ドリフト回転周波数と前兆振動の回転周波数を比較すると、両者は一致している。また、回転周波数が一定のときは、共鳴面はほとんど変化しないが、回転周波数が低下し始める($t$=4.8~5.0s)と、**E**×**B**ドリフト回転周波数分布はあまり変化しないが、共鳴面が**E**×**B**ドリフト回転周波数が小さい領域であるプラズマコア部に移行している。これはco方向のプラズマ電流が増加し、コア部の回転変換が増加したことが原因であると推定できる。一方、回転周波数がゼロになる直前($t$=5.0~5.2s)は、共鳴有理面の位置はあまり変化しないが、**E**×**B**ドリフト回転周波数が減少している。

図2に前兆振動が回転している時($t$=4.7s)と回転が減速している時($t$=4.9s)の電子温度揺動の径方向分布を示す。各時刻は図1に赤線として示している。両分布ともECE揺動の強度は電子温度分布の平坦化部周辺で二つの尖塔化部を持ち、また、それら尖塔化部の位相は反転している。このような共鳴面に対して奇関数型のモード構造は、回転する磁気島が存在することを示唆しており、線形MHD理論から予想される抵

抗性交換型モードのモード構造とは異なる。

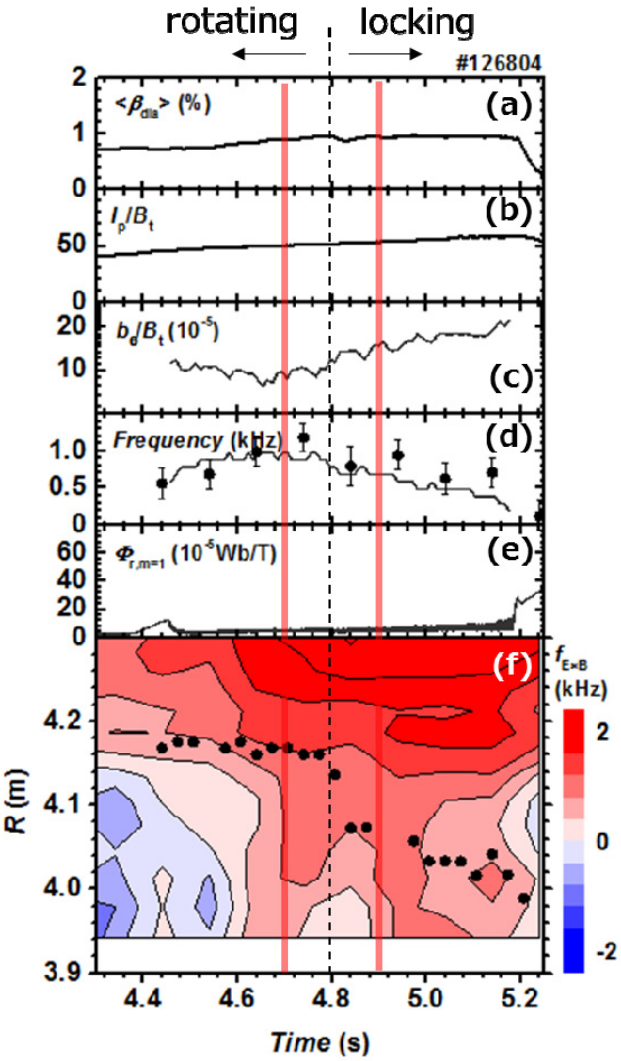


図 1. ロックドモード様不安定性発現時における前兆振動の回転とプラズマ流速の関係。(a)体積平均ベータ値、(b)co 方向のプラズマ電流値、(c)$m/n$=1/1 の揺動磁場強度、(d)電子反磁性方向の周波数(実線)と共鳴面での **E**×**B** ドリフト回転周波数(黒丸)、(e)$m/n$=1/1 の径方向磁場の非回転成分、(f)共鳴面(黒丸)と **E**×**B** ドリフト回転周波数の径方向分布(正が電子反磁性方向で負がイオン反磁性方向)の時間発展。

本研究ではロックドモード様不安定性における回転減速機構の解明を目指して、減速時における径方向のモード構造とプラズマ流速を計測した。前兆振動は**E**×**B**ドリフト流とともに回転していること、また、減速時の初期は、共鳴面が**E**×**B**ドリフト回転周波数の小さいコア部に移動し、周波数がゼロになる直前には、**E**×**B**ドリフト回転周波数自体が小さくなっているが明らかとなった。さらに、前兆振動は回転している磁気島を有していることが明らかとなった。以上の結果から、今回解析した放電群に関しては、磁気島の存在が前兆振動の回転減速に関係している可能性があることが示された。

一方で、LHDでは共鳴面に対して偶構造型のモード構造であるロックドモード様不安定性も見つかっている。この場合の減速機構については、今後、図1と同様の計測実験を行い、解明する必要がある。

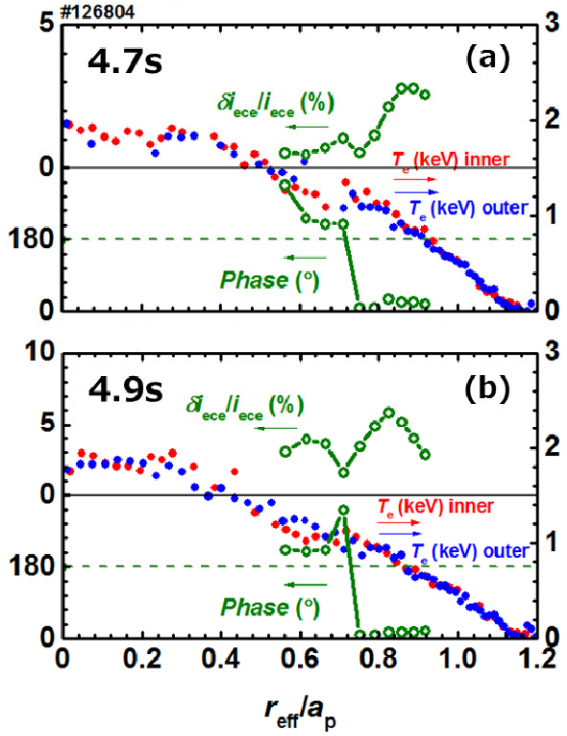


図 2. (a)前兆振動が回転しているとき(4.7s)と(b)減速しているとき(4.9s)における電子温度揺動の径方向分布。図中には ECE 揺動の強度と位相(緑点)、磁気軸に対して内側/外側の電子温度(赤点/青点)を示している。各時刻は図 1 の赤線に対応している。

## 参考文献


[1] Y. Takemura et al, Nucl. Fusion **52** 102001 (2012)
[2] R. Fitzpatrick, Phys. Plasmas **1** 3308 (1994)
[3] Y. Takemura et al, Plasma and Fusion Res. **8** 1402123 (2013)