

ヘリオトロンプラズマにおける圧力駆動型モードの非線形遷移

Nonlinear transition of pressure driven modes in heliotron plasmas

市口勝治^{1,2}、鈴木康浩³、藤堂泰¹、武村勇輝¹、榊原悟^{1,2}、Benjamin A. Carreras⁴
 ICHIGUCHI Katsuji^{1,2}、SUZUKI Yasuhiro³、TODO Yasushi¹、TAKEMURA Yuki¹ and
 CARRERA Benjamin A⁴

核融合研¹、総研大²、広大先進理工³、BACV Sol. Inc.⁴
 NIFS¹、SOKENDAI²、Hirosihima Univ.³、4)BACV Sol. Inc.⁴

ヘリオトロン配位である LHD プラズマにおいて、非線形 MHD ダイナミクスシミュレーションを行っている。LHD では、閉じ込め磁場はすべて外部コイル電流で生成されるため、トカマクのように大電流をプラズマ中に流す必要はない。このため、プラズマは電流駆動型モードに対しては基本的に安定である。一方、ヘリカルコイル電流による磁場によって磁気丘が形成されやすいため、圧力駆動型モードが不安定になりやすい。このため、プラズマの MHD 安定性特性を調べるために、実験・理論両面において精力的に研究がなされてきた。この中で、正味トロイダル電流に対する特性も実験的に調べられ、ある限界電流値に達すると、電子温度分布に崩壊現象が生じることが観測されている [1]。このとき、支配的な成分のモード数が常に $(m,n)=(1,1)$ であるという特徴がある。一方、圧力駆動型モードである交換型モードの線形理論によると、モード数が大きいモードほど成長率が大きい。このことから、どうして実験での崩壊現象が最も低いモード数である $(1,1)$ 成分で引き起こされるのか、ということが大きな謎となっていた。

そこで、この実験での磁場配位において、正味トロイダル電流を流した平衡での三次元 MHD ダイナミクス計算を行った。このとき、平衡計算には HINT コード [2] を用い、ダイナミクス計算には、MIPS コード [2] を用いた。回転変換が上昇する方向の正味トロイダル電流を採用し、コア領域で、回転変換の値が 1 に近く分布が平坦に近い状況を調べた。微小摂動の時間発展を追跡すると、線形領域では、 $(m,n)=(3,3)$ 成分が支配的であるような典型的な交換型モードが成長した。この時、 $(2,2)$ 成分が 2 番目に支配的であり、線形成長率や、圧力摂動のピーク値において、 $(3,3)$ 成分のものとの差は小さい。さらに時間発展を追跡すると、非線形飽和領域において、 $(m,n)=(1,1)$ 成分が支配的となる構造が現れる。この場合、この成分は共鳴面

ある回転変換が 1 である有理面近傍ではなく、磁気シアの弱いコア領域に局在する。したがって、このような平衡では、高 (m,n) モード数の成分が支配的な交換型モードから、 $(1,1)$ 成分が支配的な非共鳴モードへ非線形遷移したことになる [4]。

一方、LHD 実験においては、アスペクト比が高い ($A_p = 8.1$) 平衡においても、崩壊現象が観測されている [5]。この実験では、有意なトロイダル電流は流していないが、ベータ値を上昇させてある臨界値に到達すると、磁場摂動の急激な上昇が生じ、電子温度分布が崩壊する。この場合においても、支配的な成分のモード数は $(1,1)$ となっている。そこで、この高アスペクト比の磁場配位に対しても、数値シミュレーションを行った。このとき、正味トロイダル電流はゼロとして、ベータ値を変化させた場合での非線形発展の様子を比較した。ベータ値が低い平衡においては、 $(2,2)$ 成分が支配的成分として線形成長する。非線形領域においても、この成分が支配的なままであり、圧力分布も $m=2$ の変形をして崩壊する。ベータ値を上昇させると、線形領域において $(3,3)$ 成分が相対的に大きくなる。あるベータ値に達すると、 $(2,2)$ 成分と $(3,3)$ 成分の線形成長率や線形圧力摂動成分拮抗するようになる。このようになると、非線形領域において非線形遷移が生じ、 $(1,1)$ 成分が支配的となる。また、この $(1,1)$ 成分はコア領域に局在する非共鳴モードとなっている。

以上の計算結果から、交換型モードが不安定な平衡において、線形領域における支配的な成分が (m,n) と $(m+1,n+1)$ であり、両者の線形成長率および摂動の大きさがほぼ同じ大きさである場合に、 $(1,1)$ 成分への非線形遷移が生じると考えられる。

- [1] S. Sakakibara et al. Nucl. Fusion, 55, 083020 (2015)
- [2] Y. Suzuki et al., Nucl. Fusion, 46, L19 (2006)
- [3] Y. Todo et al., Plasma and Fusion Res., 5, S2062 (2010).
- [4] K. Ichiguchi et al., Nucl. Fusion, 61, 126056 (2021)
- [5] S. Sakakibara et al., Fusion Sci. Tech. 50, 177 (2006)