

交換型モードと巨視的フローとの相互作用に対する三次元MHD 数値解析  
**Three-dimensional MHD numerical analysis for interaction between  
interchange mode and global flow**

市口勝治<sup>1,2</sup>、鈴木康浩<sup>3</sup>、藤堂泰<sup>1</sup>、榊原悟<sup>1,2</sup>、居田克巳<sup>1,2</sup>、武村勇輝<sup>1,2</sup>、Benjamin A. Carreras<sup>4</sup>  
 ICHIGUCHI Katsuji<sup>1,2</sup>, SUZUKI Yasuhiro<sup>3</sup>, TODO Yasushi<sup>1</sup>, SAKAKIBARA Satoru<sup>1,2</sup>,  
 TAKEMURA Yuki<sup>1</sup>, Benjamin.A. Carreras<sup>3</sup>

核融合研<sup>1</sup>、総研大<sup>2</sup>、広大<sup>3</sup>、BACV Sol. Inc.<sup>4</sup>  
 NIFS<sup>1</sup>, SOKENDAI<sup>2</sup>, Hiroshima Univ.<sup>3</sup>, BACV Sol. Inc.<sup>4</sup>

大型ヘリカル装置 (LHD) プラズマ実験では、正味トロイダル電流を駆動して回転変換を上昇させた場合に、コア領域の電子温度分布に部分的崩壊現象が観測されている [1]。このとき、崩壊が生じる前にモードの回転周波数が時間とともに減少し、回転が止まるのと同期して磁場摂動が急激に成長し、崩壊現象が成長する。一方、このモード回転周波数は、プラズマの ExB 回転周波数に非常に近い。また、メルシエ安定性の観点から、この崩壊現象は交換型モードによって駆動されていると考えられる。以上のことから、プラズマの回転フローが交換型モードに対する安定性に影響を与えているのではないかと考えられる。以前に、この場合のプラズマフローと交換型モードに対する安定性との相互作用について、予備的な解析を行い、プラズマフローが安定化の効果を持つことを報告した。しかし、この時の解析では、プラズマフローのプロファイルとして、外部から与えた形状を仮定していた。そこで、今回は、実験データと矛盾の無いフローを用いることにした。

そのために、三次元プラズマフローのプロファイルの計算手法を開発した。まず、フローが、定常流であることと磁気面流であること、および、磁場に垂直成分がポテンシャルを用いて ExB フローと同じように表現できることを仮定した。この場合、フローは Hamada 座標を用いることによって、非常に簡単に表現することができる。ところが、実際の計算を行うためには、Hamada 座標は磁気座標であることから、磁気面形状の情報が必要となる。そこで、VMEC コードを用いて三次元平衡計算を行い、その磁気面情報を用いることとした。これによって、Hamada 座標での所量が座標変換によって VMEC 座標で表現できることになる。一方、この定式化では、2つの未定係数が必要となっている。そこで、この未定係数を決定するために、実験で観測されるフローのポロイダル及びトロイダル成分を用いることとした。以上の手順によって、プラズマフローはプラズマ中の全空間において三次元的に一意に決定される。実験データは視線方向に沿った一次元データであるため、この手法によって、一次元データを三次元データにマッピングすることができることになった。

このフローを用いて、交換型モードとの相互作用を調べた。この解析では、三次元平衡計算に HINT コード [2] を使い、その非線形ダイナミクスの追跡に MIPS コード [3] を用いた。今回、フローの絶対値の大きさを、実験データの1倍から30倍まで変更して、その依存性を調べた。その結果、フローの大きさを増加させると、ある一定の大きさまでは、フローによる安定化の寄与が見られたが、完全には安定化できる状況は得られていない。さらにフローの大きさを増していくと、逆に不安定化していくことがわかった。これは、フローが交換型モードに対しては安定化の寄与を持つが、フロー自体がケルビン-ヘルムホルツ不安定性を引き起こしているためではないかと考えられる。そこで、用いた平衡のベータ値を下げ、交換型モードの駆動力を下げ、完全に安定な領域が存在するかどうかを調べた。ところが、ベータ値を低くするほど、より小さなフローから成長率が上昇していくこととなった。このことから、フローによる安定化は、交換型モードとケルビン-ヘルムホルツ不安定性とがお互いの成長を阻害しあうことによって現れているのではないかと考えている。

- [1] S. Sakakibara, et al., Nuclear Fusion, 55, 2015, 083020  
 [2] Y. Suzuki, et al, Nuclear Fusion, 46, 2006, L19.  
 [3] Y. Todo, et al, Plasma and Fusion Res. 5, 2010 S2062.