

## 円柱トカマクにおける抵抗性壁モードの非線形シミュレーション

核融合科学研究所 佐藤雅彦、中島徳嘉

外部キンクモードは、完全導体壁をプラズマ表面に置くことで完全な安定化が行える。しかしながら、実際には有限の電気抵抗率が壁に存在するため、モードを完全に安定化することができない。このとき不安定なゆっくり成長するモードが抵抗性壁モードと呼ばれている。抵抗性壁モードは、近年のトカマクプラズマにおけるベータ値を制限している原因の一つであり、その抑制は重要な課題となっており、理論的にも多くの抵抗性壁モードの研究が行われてきた。しかしながら、多くの理論的研究は線形の範囲に限られており、非線形挙動については未解明なところが多い。そこで、本研究では非線形シミュレーションにより、抵抗性壁モードの非線形挙動の解明を進めている。

本研究では、低ベータ円柱トカマクモデルを仮定して得られるポロイダルフラックスと、渦度の簡約化磁気流体力学 (MHD) 方程式を用いている。抵抗性壁モードは外部 MHD モードであるため、プラズマと真空の変形を取り扱う必要がある。そこで本研究では、擬真空プラズマモデルを採用し、抵抗が非常に大きい低温プラズマにより、真空を置き換えている。よって、ポロイダルフラックス、渦度の他に、スピッツアー抵抗を仮定し、温度の時間発展の方程式も解く計算モデルになっている。

まず、シングルヘリシティを仮定した2次元計算の結果について紹介する。ここでは、ポロイダル回転が存在するもとの抵抗性壁モードの研究を行った。線形解析によれば、回転が存在するもとの抵抗性壁モードの分散式は3次方程式になり、3つのモードが存在することが知られている。一つは常に安定なモードであり、残りの2つが不安定になりうるモードである。この2つのモードは回転が小さい時に不安定で壁に対してほぼ静止しているモードと、回転が大きい時に不安定で壁に対して回転しているモードであり、それぞれ「壁モード」、「プラズマモード」と呼ばれている。シミュレーションの結果から、「壁モード」の飽和レベルは回転の大きさに依存しないが、「プラズマモード」では回転を大きくすると飽和レベルが小さくなることがわかった。この原因は「壁モード」と「プラズマモード」とでは、回転に対する減速トルクの大きさの依存性が異なることが原因である。回転が存在すると、プラズマには電磁力による減速トルクが働く。この減速トルクは抵抗壁にしみこんでいる摂動磁場の大きさと、モード構造のねじれ具合に依存している。回転を大きくしていくにつれて、摂動磁場は抵抗壁にしみこみにくくなるが、モード構造はよりねじれた構造になる。すなわち、回転を大きくすることは減速トルクを減少させる効果（摂動磁場のしみこみの減少）と増大させる効果（ねじれの増加）の両方の効果がある。「壁モード」では、壁に対してほぼ静止しているモードなため、モード構造はねじれやすい性質をもっている。そのため、回転を大きくしていくと減速トルクも増大する。それに対して、「プラズマモード」は、壁に対して回転するモードであるため、「壁モード」と比較するとモード構造はねじれにくい。そのため、「プラズマモード」に対しては、回転を大きくすると、モード構造がねじれる効果よりも摂動磁場がしみこみにくくなる効果の方が勝り、結果として減速トルクは減少する。このような回転に対する減速トルクの大きさの依存性の違いが、飽和レベルに影響を与える。「壁モード」では、回転を大きくしても減速トルクも同様に大きくなるため、結局は周辺部で回転が大きく減速されてしまう。その結果、モード構造のねじれが減少し、飽和レベルは回転がないときと同じになる。一方、「プラズマモード」に対しては、回転を大きくすると減速トルクは逆に減少する。したがって、回転が大きいほど、非線形状態においても回転は維持され、ねじれたモード構造が維持されるようになる。このようなモード構造では磁力線のねじれによる安定化効果が大きいため、飽和レベルは減少することになる。

本シミュレーションコードは3次元に拡張されており、異なるヘリシティを含むマルチヘリシティの計算も可能となっている。現在、外部 MHD モードである抵抗性壁モードと内部 MHD モードであるテアリングモードの相互作用等の研究を進めており、このマルチヘリシティシミュレーションによる計算結果例も示す予定である。