

プラズマの集団的な振る舞いを理解するための実験研究

武村 勇輝

磁場で作ったドーナツ状のかごの中に高温高密度プラズマを長時間閉じ込めることができれば、核融合反応を持続させることができます。ただ、プラズマはまるで与えられたかごが気に入らないとでもいうようにかごを変形し、かごの閉じ込め性能の劣化やかごの破壊をもたらすことがあります。かごの変形はプラズマを構成している多数の荷電粒子の「集団的」な振る舞いが引き起こす電流や磁場によって生じます。このようなプラズマの振る舞いを理解するには、ばらばらに動き回る個々の荷電粒子の運動よりも、荷電粒子の集団的な運動に焦点を当てるのが重要です。個々の荷電粒子の運動はニュートン力学モデルにより記述されますが、荷電粒子の集団的な振る舞いはMHD (Magnetohydrodynamics、磁気流体) モデルにより記述されます。MHD モデルで取り扱うのが妥当な空間尺度の大きなプラズマ現象をMHD現象と呼び、ここではMHD現象を理解するための実験的な研究手法と大型ヘリカル装置 (LHD) における実験結果を紹介します。

MHD 不安定性

かごの中にプラズマを閉じ込めるには、第一にかごとプラズマの間に働く力が釣り合っていないと成りません。これを平衡状態と呼びます。このときのプラズマはまるでかごを気に入っているかのように落ち着いています。ただ、平衡状態でありさえすれば、かごの中で静かにしていかれるかというとはそうではありません。何らかの要因により生じたプラズマの揺らぎ (揺動) が増大していくことで、元の平衡状態を壊すことがあるからです。これをMHD不安定性と呼び、たとえば、MHD不安定性はプラズマ温度の急激な低下 (崩壊現象) をもたらし、高温プラズマの生成が困難になることもあります。

MHD不安定性は種類だけでなく、様々な不安定性が存在します。それらは不安定性の駆動機構や

空間構造などの特徴により分類されています。一例を挙げると、プラズマ圧力勾配を駆動力とし、図1のように実際はマトリョーシカ人形のように入れ子状になっているかごの一部分を変形する不安定性があります。不安定性によって生じる変形はある面に局在化することが予測されています。また、この変形はドーナツ全域に及び、巻き寿司のような構造になっているため、異なる断面で見ても変形の仕方が似ているという特徴もあります。

揺動計測

実験装置で観測された不安定性の回避・抑制手法を確立するためには、不安定性の正体を明らかにする必要があります。そのためには、計測結果とMHDモデルとの比較が不可欠です。よって、まずはまるで中身の見えない箱の中に入っているものが何であるかを手で確かめるように、不安定性の特徴を一つ一つ実験的に調べていくことが求められます。そのときに手の役割を果たすのが揺動計測です。

プラズマ中で生じている揺動を観測したいときは、プラズマ温度・密度の揺動のほか、プラズマ

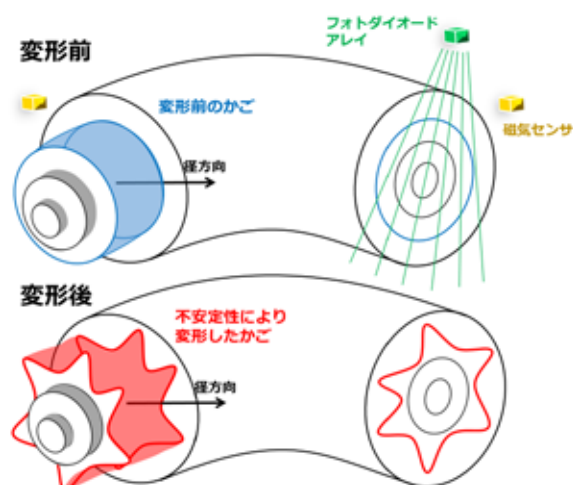


図1 MHD不安定性によるかごの変形。かごは入れ子状になっています。MHD不安定性により青色のかごは赤色のかごのように変形します。ほかの断面でも同じような変形が見られます。

から放射される電磁波による放射強度の揺動、プラズマが作る磁場の揺動を計測します。放射強度の計測には、一般的に光センサとして使用されているフォトダイオードを用います。また、磁場の揺動はコイルなどの磁気センサにより計測します。

計測した揺動を取り扱う際に注意しなければならないのが、不安定性以外の要因で生じた揺動も含まれているということです。ただ、図1のような不安定性は離れた場所でも同じような変形をしているため、二つの場所で計測した揺動から似ている成分を抜き出すことで、不安定性起因の揺動が得られます。

このようにして得られた揺動は不安定性の特徴を色濃く反映しています。揺動振幅の増加はかこの変形の増大、つまり、不安定性の成長を表していて、また、不安定性がプラズマ中で回転している場合、周波数は不安定性の回転速度に対応します。図1のような空間構造も特徴のうちの一つです。

LHDにおけるMHD現象の観測結果

ではLHDにおいて崩壊現象を引き起こすMHD不安定性の計測結果を紹介します。図2の磁場揺動振幅が急増する前と後の時刻の電子温度分布をみると、揺動振幅が急増する前は放物線型であった温度分布の中心部が、揺動成長後は半分以下まで低

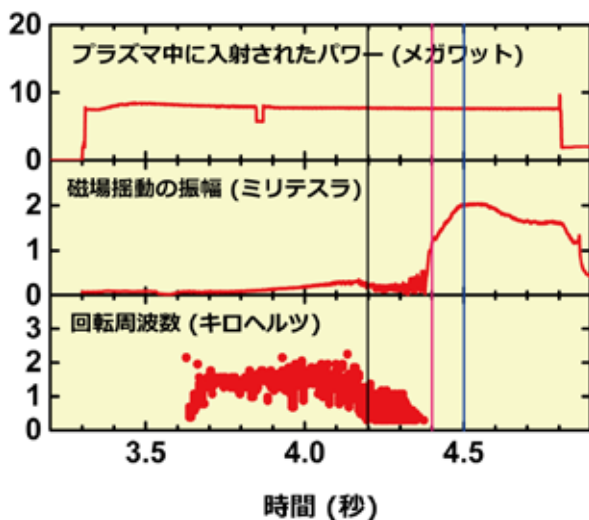


図2 LHDにおいて崩壊現象をもたらすMHD不安定性を観測した典型的な放電波形。3本の縦線は図3の電子温度分布の時刻に対応している。

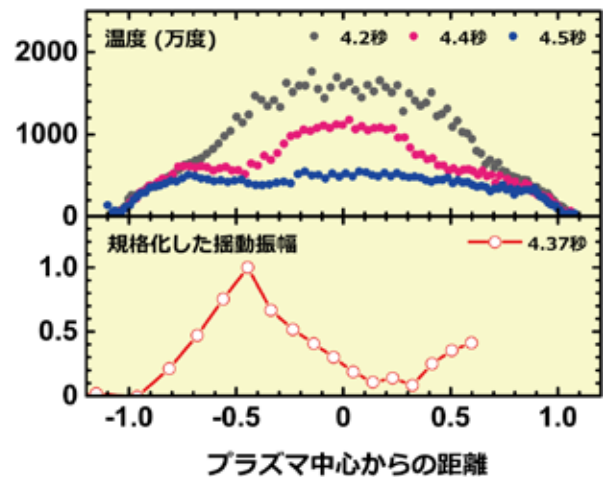


図3 電子温度分布と不安定性停止直前の4.37秒における揺動振幅の径方向分布。フォトダイオードアレイにより計測した揺動振幅は最大値で規格化している。プラズマ中心からの距離は0がプラズマ中心で1がプラズマ端を示す。

下し、平坦な分布になっています(図3上)。この間、プラズマを加熱するためにプラズマ中に入射されたパワーに変化はありません。さらに、回転の減速とともに揺動振幅が増加している様子や停止直後に揺動が急増している様子はまるで自転車に乗った人が速度を落としてふらつき、停止した時に転ぶようです。このように揺動の成長に対して回転が重要な役割を担っている可能性が示されました。さらに、フォトダイオードアレイにより回転停止前の4.37秒における規格化した揺動振幅の径方向分布を計測することで(図3下)、ある面に局在化した空間構造であることがわかりました。これは図1で紹介した不安定性の空間構造と類似しています。このように今回は不安定性の特徴の一部分について紹介しましたが、複雑なプラズマの振る舞いを理解するには多くの実験事実を積み上げることが必要です。

プラズマ中で生じる現象は今回取り上げた現象に留まらず多種多様なので、広い視野を持って、今後も実験側からMHD現象の理解に貢献したいと考えています。

(高密度プラズマ物理研究系 助教)