

どんな時に磁気島はできるのか？

渡邊 清政

核融合発電炉を実用化するには1億度以上のプラズマ状態の燃料（重水素と三重水素の原子核と電子の集まり、以下プラズマ）を閉じ込めて、高温状態を長時間保つ必要があります。プラズマはドーナツ形状の磁場の容器を使って閉じ込めますが、この容器は磁力線でできていて、磁力線はドーナツの表面をねじれながらトロイダル方向に回転しています(図1)。磁力線をトロイダル方向に追跡していくと、ねじれがあるのでポロイダル方向にも回転し、1周すると元の場所とは違う場所に戻ってきます。磁力線が1周ごとに違う場所に戻ることから全体として網目のような面状になり、これは「磁気面」と呼ばれています。磁場容器は幾層にも重なった無数の磁気面でできています。プラズマは磁力線にそって動きやすいので、ほぼ一つの磁気面の中だけを移動して、他の層の磁気面には移動し難いことから、外に逃げ出すことなく、うまく閉じ込められています。

一般的な磁場容器では、磁力線のねじれの強さは磁気面によって異なります。このため、磁場容器を構成している磁力線の中には、トーラス方向に何周かすると出発点と同じ場所に戻ってきってしまうものがあります。このような閉じた磁力線の無数の集まりで構成されている磁気面を、特に「有理面」と呼んでいます。この有理面の位置に、図2の緑色で示すような「磁気島」と呼ばれる構造が形成されることがあります。この構造は川の中にある島のように見えることから磁気島と呼ばれています。磁気島ができると、磁場容器の内側と外側の磁気面がつながってしまい、プラズマの閉じ込め性能が悪くなってしまいます。そこで、磁気島が、なぜ、どんな時に作られるかについて様々な研究が行われてきました。ここでは、特に、大

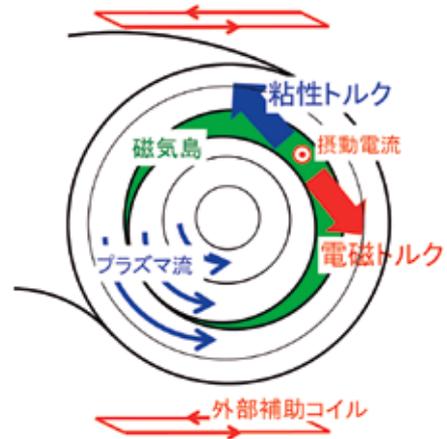


図2 磁気島とプラズマ回転、ならびに磁気島に働く電磁トルク（プラズマ振動電流と外部補助コイルによる振動磁場による）と粘性トルク の概念図

型ヘリカル装置（LHD）で行っている、磁気島ができる条件を探る研究を紹介します。

磁気島の形成の原因として注目されているのが振動磁場です（振動というのはLHDの超伝導コイルシステムが作る磁場と比べて小さく副次的なものという意味です）。特に、有理面上の磁力線と共鳴するような振動磁場を外部補助コイルにより加えると、磁気島が形成されることが観測されています。ただし、必ず磁気島が形成されるわけではありません。LHD実験では同じ強さの振動磁場を加えた場合でも、プラズマ密度などの違いによって磁気島が形成される場合と、形成されない場合

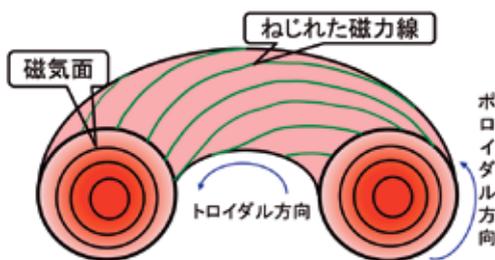


図1 磁力線で編まれた磁気面とドーナツ半周でカットした層状の磁気面で構成される磁場容器の概念図

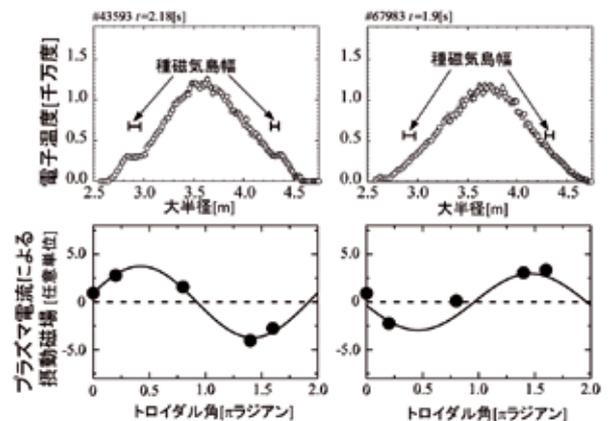


図3 磁場強度、密度の異なるプラズマの電子温度分布(上図)とプラズマ中の振動電流が作る振動磁場のトロイダル角方向依存性(下図)。上図の“種磁気島”は外部コイルによる振動磁場により予想される磁気島幅。

があります。磁気島が形成されたかどうかは、電子の温度分布を測定して判定することができます。これは、磁気島ができると磁気島の中では熱が容易に移動できるようになるために、磁気島の中の温度がほぼ一定となって温度分布が平らになるからです。図3に同じ強さの摂動磁場をかけた時の電子温度の分布を二例示します。平らな部分の有無から左上図では磁気島が形成され、右上図では形成されていないことが分かります。また、プラズマの内部に流れる摂動電流が作る磁場を測ることによっても磁気島の形成を判定することができます。外部補助コイルによる摂動磁場（以降、外部摂動磁場と記す）を強めるように電流が流れる（左下図）ときは、大きな磁気島が形成され、外部摂動磁場を打ち消すように電流が流れる（右下図）と磁気島は小さくなり、完全に打ち消されることもあります。

それではなぜ磁気島を打ち消すような電流が流れるのでしょうか？ 理論的には、プラズマの回転が大きく関与していると考えられています。図2に示すように、ポロイダル方向のプラズマの流れがあってプラズマが回転していると、有理面付近に外部摂動磁場を打ち消すような摂動電流が流れます。これにより、外部摂動磁場が有理面の位置まで浸透できなくなり、磁気島が形成されないと予測されています。しかし、外部摂動磁場が大きくなると、以下のメカニズムによって、磁気島が現れると推定されています。外部摂動磁場が大きくなると、それによって誘起された有理面付近の摂動電流と外部摂動磁場による電磁トルクが大きくなります。この電磁トルクは、プラズマの回転を減速させます（図2）。一方、プラズマの回転は流体力学的な観点によると粘性トルクにより維持されています。このため、電磁トルクが駆動力である粘性トルクより大きくなると、プラズマの回転が止まり、外部摂動磁場が有理面まで浸透することができるので磁気島が現れることとなります。

この理論予測を検証するために行った実験の結果を図4に示します。これは、外部摂動磁場を徐々に強めていき磁気島が現れた時の強さ（以降、外部摂動磁場の閾値と記します）を、ポロイダル方向のプラズマ回転周波数の関数として示したものです。なお、ここでは、その閾値を外部補助コイルに流した電流値で表しています（電流値が大きいほど、外部摂動磁場の閾値が大きいです）。図4には磁場容器の形状の違いや、プラズマ条件（ベ

ータ値：プラズマの圧力と磁場の圧力の比 など）が異なる場合といった様々な実験条件の結果をまとめて示しています。外部摂動磁場の閾値とポロイダル回転周波数の関係に注目すると、実験条件によってその比例係数は異なりますが、同じ実験条件では、プラズマ回転（流速）が速いほど、外部摂動磁場の閾値が大きくなっています。つまり、プラズマ回転が速いほど、磁気島が形成されにくいことが分かります。流速が大きいほど、粘性トルクが大きいと推定されるので、上記の理論予測の妥当性が高まりました。

図4には、最近LHDで開始された重水素プラズマ実験の結果も含まれていて、重水素プラズマでは、軽水素プラズマに比べて小さい摂動磁場でも磁気島が形成されやすいことを示しています。この結果には、次のような意義があります。今回紹介した実験では、外部補助コイルを用いて摂動磁場を意図的に作りましたが、摂動磁場は磁場容器を作るコイルのゆがみや周囲にある磁性体の影響でも発生します。このような意図しない摂動磁場を抑えるためには、コイルの製作精度の向上、摂動磁場の抑制手法の開発、摂動磁場を吸い込む磁性体の利用や配置の最適化が必要です。主として重水素が使用されることが予想される核融合炉においては、このような研究がより重要であることが、本実験結果により明確になりました。

今後は、磁場容器の形状やプラズマの種類、プラズマの状態などによる磁気島の発生条件の研究をさらに深めることで、核融合研究の進展に貢献していきます。

（高密度プラズマ物理研究系 教授）

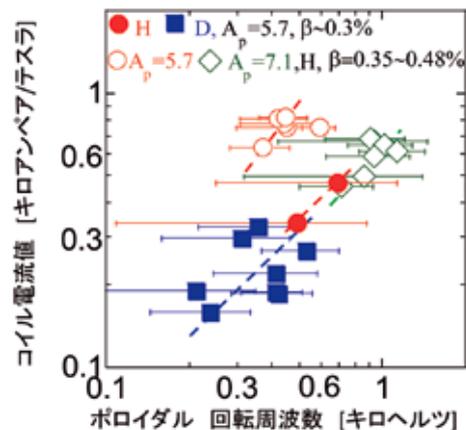


図4 磁気島が形成される外部摂動磁場の閾値（閾値は外部補助コイルに流した電流値で表しています）をプラズマのポロイダル回転周波数の関数として示しました。様々な実験条件の結果をまとめて示していて、Hは軽水素、Dは重水素、 A_p はアスペクト比（磁場容器のドーナツの大半径と小半径の比）、 β はプラズマのベータ値です。