

LHD における揺らぎの回転方向に対する理論的解析

Timothee NICOLAS

磁場閉じ込め核融合では、プラズマ中に巨視的な揺らぎが生じることがあります。このような揺らぎは、大きく成長するとプラズマの閉じ込めを急激に悪くしてしまいます。従って、どういう時に揺らぎが成長してしまうのか、また、どうすれば成長しないようにできるのか、ということが精力的に研究されてきています。大型ヘリカル装置(LHD)の実験では、このようなプラズマの揺らぎは、トラス装置の中でぐるぐる回転していることが観測されています(前号 No.225 の研究最前線で解説)。特に近年、回転が止まると揺らぎが大きく成長するという現象が見出されました。このようなことから、揺らぎの回転の性質について、注目が集まってきました。そこで私たちは最近、揺らぎの回転の向きについて、理論的な解析を進めています。

物体の回転の方向には、何かを基準に順方向、逆方向の2通りがありますが、プラズマ中の揺らぎについて議論する場合は、いわゆるプラズマの反磁性効果とその基準となります。一般に、プラズマ中に圧力勾配がある場合には、見かけ上、プラズマは圧力勾配の方向と磁場の方向の両方に垂直な方向に動こうとします。この動きを反磁性効果といいます。プラズマは、電子とイオンで構成されていますが、電荷の符号が異なるために動こうとする向きは逆向きで、その方向はそれぞれ電子反磁性方向及びイオン反磁性方向と呼ばれます(図1)。なお、「反磁性」とはこの電子とイオンの流れが作る電流によって生じる磁場が、元からある閉

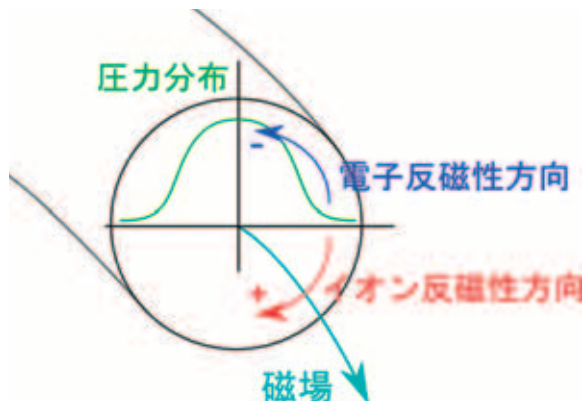


図1：プラズマ断面で見た電子及びイオン反磁性方向の模式図。圧力分布の勾配と、プラズマを閉じ込めている磁場(紙面に垂直方向)の両方に垂直な向きに反磁性の流れが生じます。

じ込め磁場を弱める向きに磁場を作ることから名付けられています。この反磁性効果は揺らぎを回転させる一つの要因となります。LHD 実験で観測された揺らぎは、電子の反磁性方向に回転していることが分かっています。

このような巨視的な揺らぎは、プラズマを流体の一種として扱う電磁流体力学的(MHD)方程式によって理論的に解析が行われています。私たちが現在進めているのは、上に述べた反磁性効果を含めた MHD 方程式を用いた理論・シミュレーション研究です。これまで、揺らぎの回転の向きは非常に単純化された MHD のモデルを用いて解析されてきました。その結果、揺らぎはイオン反磁性方向に回転すると予想されてきました。しかし、この回転の向きは、実験結果と逆向きであり、実験結果を説明することができません。実は、プラズマには通常の流体と同様に熱伝導と粘性という性質があるのですが、この簡単なモデルにはこの性質が取り入れられていなかったのです。その理由は、これらの効果を入れてもプラズマ中に起こる揺らぎが単に弱くなるだけで、揺らぎの回転の速さや向きに特に影響を与えとは思われていなかったからです。そこで私たちは、この熱伝導と粘性を入れた詳しい解析を行ってみました。まず、LHD プラズマに対して大規模な三次元数値シミュレーションを行いました。図2は、この時のプラズマ圧力

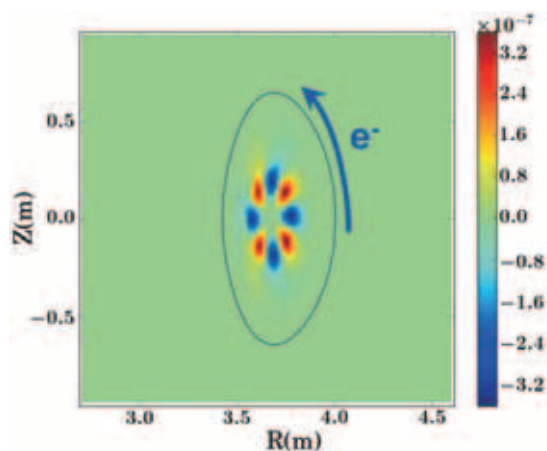


図2：LHD プラズマのシミュレーションの結果得られた圧力揺らぎの分布。黒線はプラズマの境界。縦長断面での分布を示しており、赤もしくは青の領域で揺らぎが大きいことを示しています。この揺らぎは電子反磁性方向に回転していることも計算から分かっています。

の揺らぎを示しています。いろいろと計算条件を変えた計算をすると、イオン反磁性方向にだけでなく、実験に対応する電子反磁性方向に回転する場合がありますことが分かりました。図2の揺らぎも電子反磁性方向に回転しています。このことから、熱伝導や粘性が重要な働きをしていると考えられます。そこで次に、そのメカニズムについて解析を進めました。

揺らぎの時間変化は、揺らぎの振幅が大きくなっていく割合を示す成長率と、回転の速さと向きを示す回転周波数で特徴づけられます。このとき回転周波数の符号が、回転の向きに対応します。そこで、LHD プラズマでの揺らぎの成長率と回転周波数の熱伝導や粘性に対する依存性に着目した計算を行ってみました。一般に、揺らぎの中には、様々な成長率と回転周波数を持つ成分が含まれています。この中で、一番成長率が大きい成分が実際に現れ、その成分が揺らぎ全体の回転の向きを決めることとなります。また、成長率が大きいほど閉じ込めを急激に悪くしてしまうので、これまでの多くのMHD研究において、一番成長率が大きい成分だけが注目されてきました。しかし今回、揺らぎの回転の向きを考えると、一番目だけでなく二番目の成分についても熱伝導度や粘性による成長率の変化を調べる必要があることが分かったのです。まず、熱伝導だけを含めた計算を行いました。図3にその結果を示します。図3は、熱伝導度の大きさに対する一番目と二番目の成分の成長率と回転周波数の変化を示しています。この図から、熱伝導の効果を変えても、一番目の成分はイオン反磁性方向に回転し、二番目の成分は電子反磁性方向に回転していることが分かります。これは、以前の簡単なモデルと同じ結果です。次に、これにさらに粘性を加えた計算を行いました。その結果を図4に示します。この場合、熱伝導度が小さい時には、粘性がない場合と同様に一番目及び二番目の成分は、それぞれイオン及び電子反磁性方向に回転しています。しかし、熱伝導が大きくなると、成長率が大きく変化し、一番目と二番目の成分の成長率が入れ替わってしまいます。言い換えると、電子反磁性方向に回転する成分が一番目の成分となり、この成分の回転が現れることになるのです。このように、熱伝導と粘性が揺らぎの回転方向をイオン反磁性方向から電子反磁性方向に変えることが分かりました。実験や数値シミュレーションで得られている電子反磁性方向の回転も、この効果によって説明できると考えています。今後は、このような反磁性回転が、揺らぎの成長にどのようにかわつ

ているのかを理論的に探求していく予定です。
 (核融合理論シミュレーション研究系・博士研究員)
 日本語訳：核融合理論シミュレーション研究系 市口勝治教授

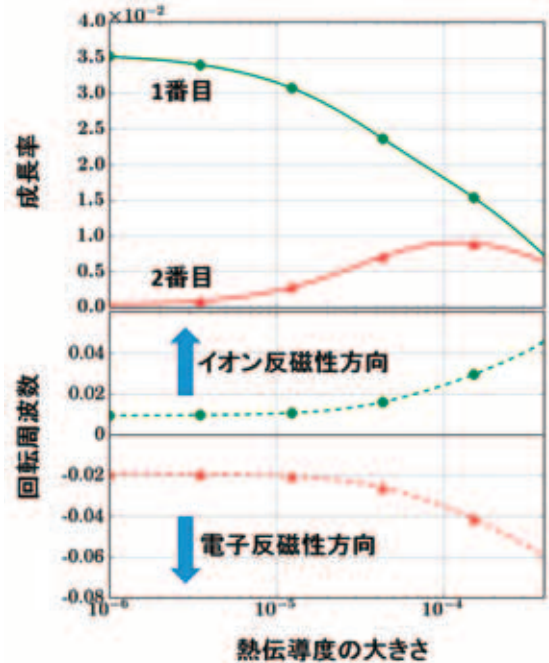


図3：熱伝導効果だけを考慮したときの、揺らぎの成長率と回転周波数の熱伝導度に対する依存性。緑の線が第1成分の値を、赤の線が第2成分の値を示しています。また、回転周波数の正の値がイオン反磁性方向に、負の値が電子反磁性方向に対応しています。

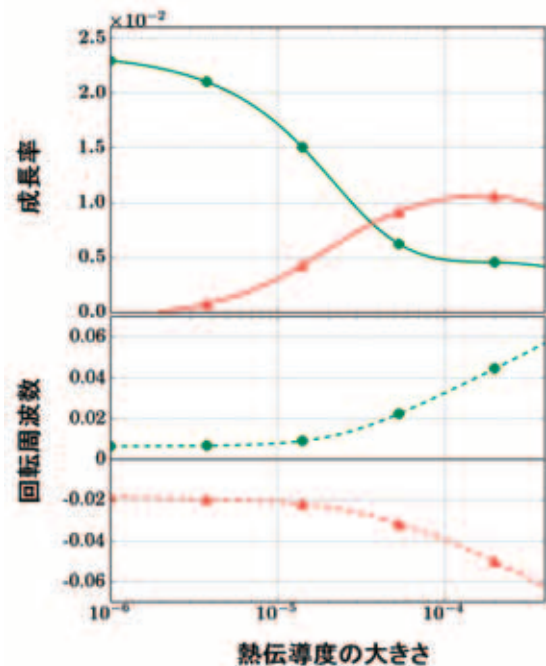


図4：熱伝導と粘性の両方の効果を考慮したときの、揺らぎの成長率と回転周波数の熱伝導に対する依存性。緑と赤の線は、熱伝導度が小さいときの第1成分の値と第2成分の値を、それぞれ示しています。