

プラズマ内部の乱流をいかにして抑制するか ～大規模計算機シミュレーションで乱流とイオン質量の関係に迫る～

仲田 資季

核融合発電炉の実現には、ドーナツのような円環状のプラズマに蓄えられている熱や粒子を強い磁場によって閉じ込め、1億度以上の高温状態を高い密度で長時間維持する必要があります。一日も早い実現を目指し、世界各国でトカマク型やヘリカル型等のプラズマ実験装置において研究が進められています。核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(LHD)では、プラズマの更なる性能向上を目指して、平成29年3月7日から重水素を用いたプラズマ実験を開始しています。LHDに先立って、世界各国で行われている幾つかのプラズマ実験では、通常の水素(軽水素)イオンの2倍の質量を持つ重水素イオンを用いることで、熱や粒子の閉じ込めが改善し、プラズマの性能が向上する「イオン質量効果」(より専門的には水素同位体質量効果と呼ばれます)という現象が観測されています。LHD重水素プラズマ実験においても1億2千万度という高いイオン温度が達成されました。しかし、イオン質量の増大がどのようにして性能改善につながっているか、その詳しい物理メカニズムは十分に解明されておらず、プラズマ物理・核融合研究当初からの長年にわたる最も重要な未解決問題の一つとなっています。

イオン質量効果の解明には、実験研究に加え、理論・計算機シミュレーション研究が極めて重要な役割を担います。磁場で閉じ込められたプラズマの中には様々な波が存在しますが、特定の条件下ではそれらが時間とともに成長する「波の不安定性」と呼ばれる現象が発生することがあります。成長した波からは、やがて流れや渦が作り出され、高温状態ではしばしばそれらが不規則に乱れた「乱流」状態となります。乱流が発達するとプラズマ内部がかき乱されることにより、熱や粒子の閉じ込めが劣化してしまいます。多様な物理メカニズムが折り重なっているこの乱流現象の解明にはスーパーコンピュータを駆使した大規模シミュレーション解析が欠かせません。これまでの研究により、プラズマの

乱流中では時折「ゾーナルフロー」(日本語では帯状流)と呼ばれる特殊な流れ構造が自発的に形成されることが明らかになっています。図1は円環状プラズマにおけるゾーナルフロー形成のシミュレーション例を示しており、プラズマ中の乱れの分布が色で表現されています。ゾーナルフローは、図中の矢印で表されるように、互いに逆方向の流れが幾つも連なった縞状の構造をとり、この特殊な流れ構造によって背景の乱流を著しく抑制することが分かっています。そのため、乱流やゾーナルフローの詳しい発生条件や物理メカニズム、それらに対するイオン質量の違いがもたらす影響を理論的に解明することができれば、実験で観測されている閉じ込め改善現象を正確に予測し、プラズマの更なる性能向上につなげることが可能となるため、研究の進展が期待されています。

核融合科学研究所では、名古屋大学と共同で、プラズマ中の波の不安定性や乱流を解析するためのシミュレーションコード「GKV」を継続的に開発しています。最新の研究では、磁力線に沿って往復運動する電子(捕捉電子)によって引き起こされる不安定性(捕捉電子不安定性と呼びます)とそこから発達する乱流が、当研究所の「プラズマシミュレータ」や理化学研究所の「京」を駆使したプラズマ乱流シミュレーションによって調べられていま

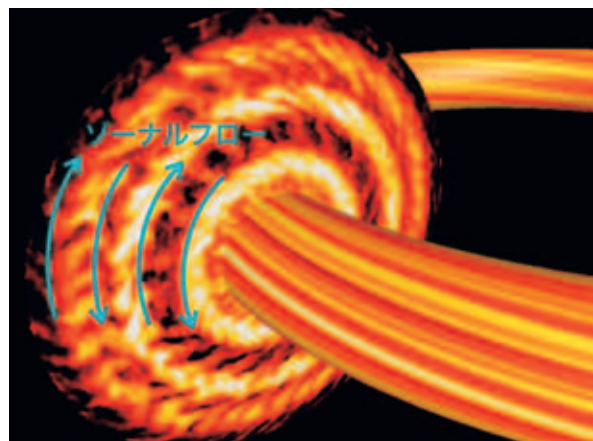


図1 プラズマ中のゾーナルフロー。矢印で示す逆方向の流れが連なる。

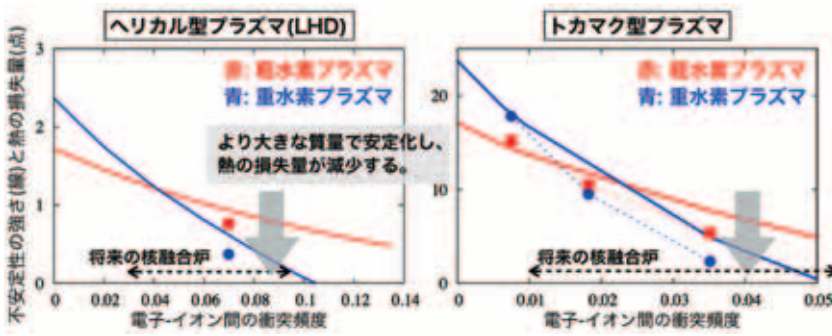


図2 プラズマ中の捕捉電子が引き起こす不安定性が、衝突頻度の増加とともに低減することを示したシミュレーション結果。ヘリカル型(LHD)(左)及びトカマク型(右)のいずれの場合も、密度が高くなって衝突頻度が大きくなると、軽水素プラズマ(赤)と重水素プラズマ(青)の不安定性の強さが逆転し、質量の大きなプラズマでは不安定性が弱く(安定化)なって乱流が抑制される。なお、点は熱の損失量を示し、黒色の点線矢印で示された領域は将来の核融合炉で想定される衝突頻度を示す。

す。これら最新鋭のスーパーコンピュータを用いてようやく実現できた大規模計算の結果、密度が高いプラズマにおいてイオン質量の影響が顕著に現れることを明らかにすると同時に、電子とイオンの衝突が生み出す作用によって乱流が抑制されるという詳しい物理メカニズムを解明しました。また、それらの現象がヘリカル型とトカマク型で共通して存在することも発見しました。これにより、これまで普遍的に観測されてきたイオン質量効果の解明とプラズマの高性能化の鍵を握る重要なメカニズムの一つを突き止めることができました。

乱流抑制のメカニズムの詳細は、以下のとおりです。捕捉電子不安定性によって引き起こされた乱流はプラズマの熱や粒子の閉じ込めを劣化させますが、プラズマの中を飛び交う捕捉電子とイオンの衝突が不安定性を抑える(波の成長を抑える)働きをします。一定の温度では、プラズマ中の粒子の衝突はより高い密度で頻繁に生じます。イオン質量の大きい重水素プラズマでは波が成長しながら伝搬していく際における衝突の働きが軽水素プラズマに比べて顕著であり、その結果として、乱流が抑制されることを明らかにしまし

た。図2は不安定性の強さと乱流による熱の損失量に対する衝突頻度の依存性をLHDとトカマクプラズマについて示したものです。また、図3に示すように、衝突頻度が高くなって捕捉電子不安定性が弱くなった重水素プラズマでは、「ゾーナルフロー」がより強く形成され、大きな渦や波を効果的に分断して乱流を更に抑制することにより、熱や粒子の閉じ込めが改善するというシミュレーション結果も得られています。

これらの研究成果は、プラズマ物理・核融合研究における長年の未解決問題であったイオン質量効果の全容解明に向けた重要な発見であり、今後の研究の進展に大きく貢献するものです。また、LHDをはじめとするヘリカル型のみならず、現在建設中の国際熱核融合実験炉(ITER)に代表されるトカマク型のプラズマの高性能化にも広く役立つことが期待されます。

(核融合理論シミュレーション研究系 助教)

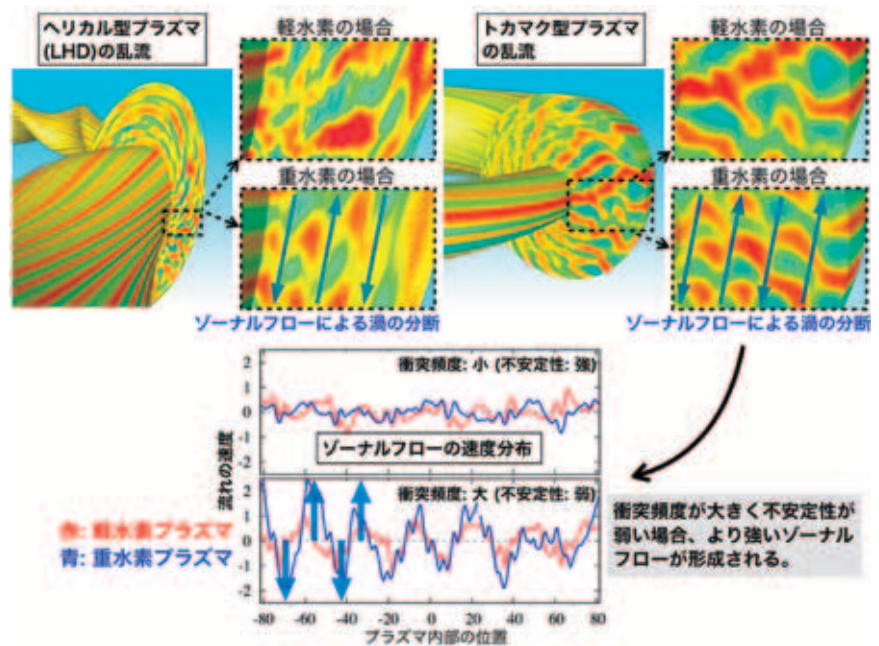


図3 ヘリカル型(LHD)(左)及びトカマク型(右)プラズマにおける乱流の比較。濃い赤色の部分で強い渦や波が生じている。質量の大きい重水素プラズマでは帯状のゾーナルフローが渦や波を小さく分断して乱れを抑えている。ゾーナルフローは不安定性が弱い場合において、より顕著に形成される(下)。