

圧力勾配が駆動する不安定性のハイブリッド・シミュレーション研究 ～イオン軌道の効果による抑制メカニズム～

佐藤 雅彦

核融合炉の実現には、高温高密度のプラズマを安定に閉じ込める必要があります。プラズマの圧力は中心部ほど高く、プラズマ内部には圧力の勾配が存在しています。この圧力の勾配が大きくなりすぎると、プラズマが不安定になり、その圧力勾配をなだらかにしようとする現象が発生します。このような現象は圧力勾配駆動型不安定性と呼ばれています。この不安定性が起きると、内側の高い圧力のプラズマと、外側の低い圧力のプラズマが混じり合うため、高いプラズマ圧力を維持することができなくなってしまいます。このため、プラズマの圧力を高く維持するためには、圧力勾配駆動型不安定性を抑制していく必要があります。

圧力勾配駆動型不安定性のようにプラズマ全体のスケールで変化する巨視的現象は、磁気流体力学(MHD)現象と呼ばれています。これまでMHD現象は、個々の荷電粒子の運動の効果は考慮せずに、プラズマを流体とみなしたMHDモデルで解析することができると考えられてきました。実際、MHDモデルは、ヘリカルプラズマ、トカマクプラズマ他、様々なプラズマのMHD現象の解析に対して幅広く使用されています。しかしながら、MHDモデルでも次のような問題があります。LHD実験結果で得られている大きな圧力勾配を持つ安定なプラズマに対して、MHDモデルによる解析を行うと、プラズマが不安定になることが理論的に予測されることがあります。なぜ、MHDモデルによる理論予測よりも、LHDの実験で得られているプラズマは穏やかなのでしょうか？

この問題の原因を調べるために、本研究では、MHDモデルを改良した「運動論的MHDモデル」を用いたシミュレーションを行いました。このモデルはイオン運動の効果（運動論的效果）を扱うもので、プラズマを構成するイオンを粒子運動モデル、電子を流体モデルで同時に取り扱うハイブリッド・シミュレーションにより解析を行っています。つまり、このモデルにより、MHDモデルでは考慮し

ていなかった、イオンが持つ様々な軌道の効果を含めた解析が可能です。この運動論的MHDモデルに基づくシミュレーションにより、圧力勾配駆動型不安定性の解析を行ったところ、MHDモデルによるシミュレーション結果よりも、不安定性が抑えられることが分かりました。その抑制メカニズムについて調べたところ、「捕捉イオン」が不安定性の抑制に重要な役割をしていることが分かりました。

プラズマ中のイオンの軌道は大きく分けて二つのタイプがあります。一つは図1(a)で示しているようなトーラス方向に周回運動を行い、磁場の強いところも弱いところも通過できる「通過イオン」です。もう一つは図1(b)で示しているような、磁場の弱い領域（図1の青色の領域）で往復運動を行う「捕捉イオン」です。捕捉イオンは、磁場に垂直方向の速度に対して、磁場に平行方向の速度が小さく、磁場が強い場所を通過することができません。このため、磁場が弱い領域で往復運動をします。同時に、その往復運動の中心も磁場の弱い領域に沿って移動しており、このような運動は歳差ドリフト運動と

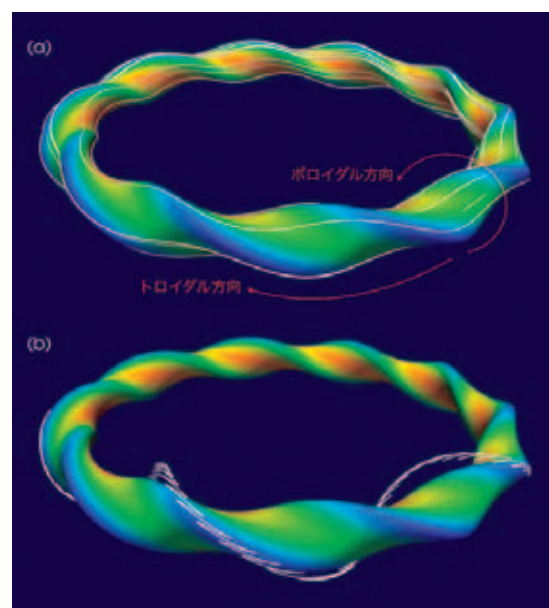


図1 LHDプラズマにおける典型的な(a)通過イオンと(b)捕捉イオンの軌道(白線)。面上の色は磁場強度を示しており、赤色は磁場強度が強く、青色は磁場強度が弱い領域に対応しています。

呼ばれています。LHDプラズマでは磁場強度が弱い領域がヘリカルコイルにより螺旋状に現れるため、トロイダル方向だけでなく、ポロイダル方向にも、歳差ドリフト運動が存在することが大きな特徴です。トカマク等の軸対称なプラズマ中の捕捉イオンの歳差ドリフト運動は、トロイダル方向のみです。ここで、圧力勾配駆動型不安定性による揺動の分布と、捕捉イオンの軌道の位置関係を考えることにします。図2は電子圧力の揺動分布と捕捉イオンの軌道を表します。赤色の領域は揺動により電子圧力が増えたところ、青色の領域は電子圧力が減ったところですが、LHDの捕捉イオンは歳差ドリフト運動を行うため、赤色の領域と青色の領域を交互に短時間で通過していくことが可能です。この通過時間が、揺動振幅が成長する時間よりも短い場合、イオンと揺動との相互作用が弱くなり、揺動は成長しにくくなると考えられます。この歳差ドリフト運動の効果を見るために、人為的に歳差ドリフト運動を除いた場合と、歳差ドリフト運動を含んだ場合の計算を実施し、両者の結果を比較しました。

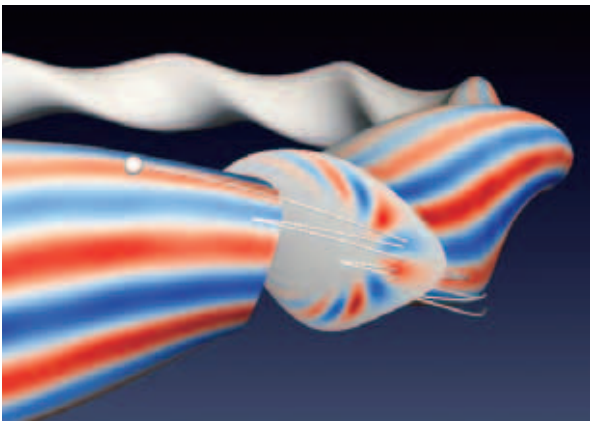


図2 圧力勾配駆動型不安定性による電子圧力の揺動分布と捕捉イオンの軌道（白線）。赤色は電子圧力が増える領域、青色は電子圧力が減る領域に対応しています。

図3(a)はポロイダル断面でのイオン圧力の揺動分布で、この図中の黒線に沿ったイオン圧力の揺動分布を、図3(b)(c)に示します。歳差ドリフト運動が無い場合(b)と歳差ドリフト運動がある場合(c)を比較すると、ある場合の方がイオン圧力の揺動振幅が小さくなって、不安定性が抑制されていることが分かります。また図3(b)(c)では、イオン圧力を、通過イオンからの寄与分、捕捉イオンからの寄与分に分けた分布も示しています。歳差ドリフト運動によって、捕捉イオンからの寄与分が減少しており、

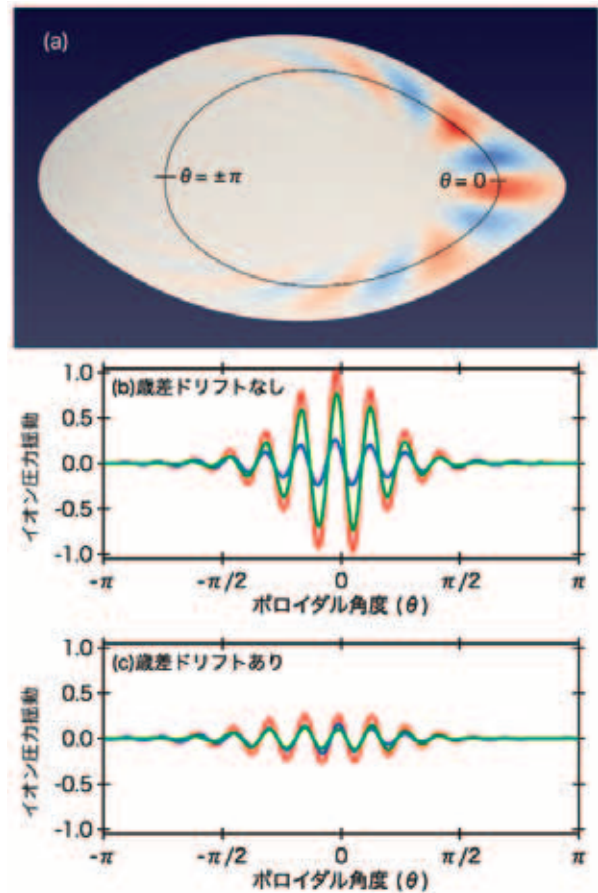


図3 (a)はポロイダル断面で見たイオン圧力の揺動分布。(b)と(c)は、(a)の図中の黒線に沿って見たイオン圧力揺動分布。(b)は歳差ドリフトなし、(c)は歳差ドリフトありの場合です。この2つの場合の電子圧力揺動の振幅は等しく、縦軸はその電子圧力揺動振幅で規格化しています。赤線はイオン圧力、緑線はイオン圧力のうち、捕捉イオンからの寄与分、青線はイオン圧力のうち、通過イオンからの寄与分を示しています。

捕捉イオンと揺動の相互作用が弱くなっていることが確認できました。この運動論的MHDモデルによるシミュレーション解析から、LHDプラズマでは、捕捉イオンが持つ特有の運動がMHD不安定性を抑制する上で重要な役割をすることが分かりました。

今後は、シミュレーション結果と実験結果との比較・検証を行うことで、計算モデルの改良を進めます。そして、LHDプラズマをはじめとする3次元トーラスプラズマ中で見られるMHD現象を予測するため、高精度な計算モデルへと発展させていきます。

(核融合理論シミュレーション研究系 助教)