

プラズマの「紐」の振る舞いを粒子シミュレーションで調べる

長谷川 裕 記

磁場閉じ込め核融合の実現のためには、中心部に高温高密度のプラズマを閉じ込める必要がありますが、それと同時に、周辺部のプラズマも制御しなければなりません。この周辺部のプラズマのことを“周辺プラズマ”と呼びますが、周辺プラズマについては、これまでもNIFSニュースのなかで取り上げられているように（No.213、No.215、No.219など）、国内外の数多くの研究者が、その制御を目指した研究を進めています。

磁場閉じ込め装置の周辺部では、中心部とは異なり、磁力線が端を持っており、その終端となっている場所には「ダイバータ板」と呼ばれる受熱板が置かれています。周辺プラズマは主に磁力線に沿ってこのダイバータ板へ向かう運動をしていますが、わずかながら、磁力線を横切る方向にも動いています。そして、磁力線を横切る運動については、これまで、粒子同士の衝突やプラズマの不安定性にともなう「拡散」という過程だけで説明が試みられてきました。しかし、最近の実験によると、この拡散過程から予測される密度よりも高い密度のプラズマが壁の近くまで存在していることがわかってきました。拡散過程だけでは説明できないこの密度の拡がりの原因として考えられているのが、間欠的に中心部から周辺部に飛んでくる、磁力線に沿った紐状のプラズマの塊（“プラズマブロップ”と呼ばれています）です。ある密度のもの（塊）がある速度で運動する（飛んでくる）ことを、拡散に対して「対流」と呼びますが、この紐状の塊による対流過程によって、より多くのプラズマが壁の方向へ運ばれ、一部のプラズマが壁に当たってしまうことも考えられます。そのため、世界中で、このプラズマの「紐」に関する研究が進められています。

このプラズマの「紐」は、中心部のプラズマと周辺プラズマの境目あたりで、なんらかの不安定性によって作り出されると考えられています。では、なぜ、このような「紐」が作り出されると「紐」は外側に飛んでいくのでしょうか。磁場閉じ込め装置の内部では、磁力線は真っ直ぐではなく曲がっていて、また、磁場の強さも変わります。図1のように磁力線が曲がっていて、真空容器の壁に近づくほど磁場の強さが弱くなっているとすると、磁力線に垂直な方向の運動がイオンと電子で逆向きになるため、プラズマの「紐」のなかでプラスとマイ

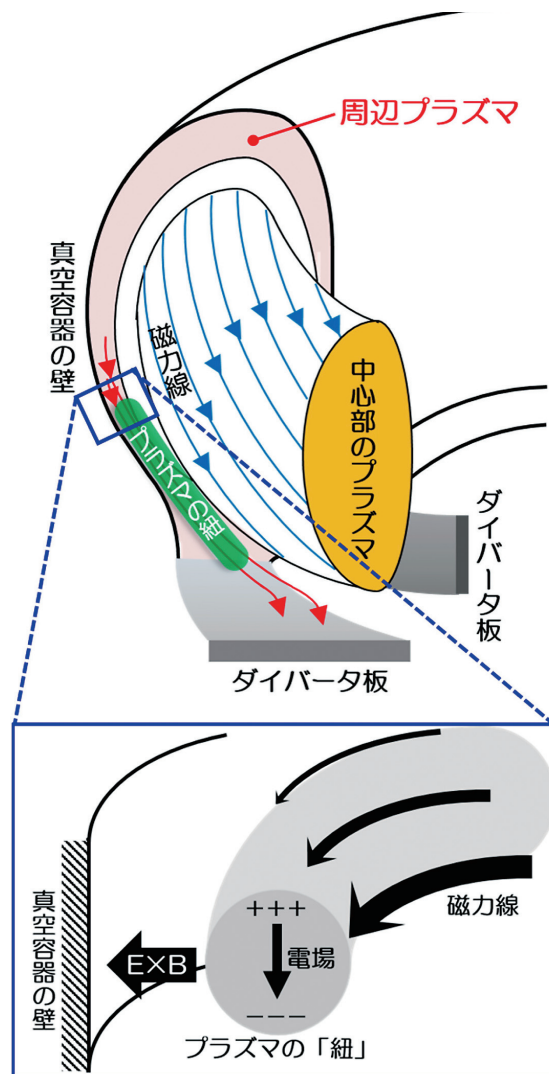


図1 プラズマの「紐」の模式図。プラズマ中に「紐」構造ができると、磁場の形状によって、電気の偏りが生じます。この偏りで生まれた電場と磁場の効果で、「紐」は外側へ動きます。

ナスの電気の偏りが生じます。このような偏りが生じると「紐」のなかに電場が生まれます。すると、この電場と磁場の効果（ $E \times B$ ドリフト）によって、「紐」は、磁力線を横切って、秒速数キロメートルにもなるスピードで真空容器の壁に向かって動いていくのです。

このようなプラズマの「紐」の振る舞いを制御するためには、まずはその性質を理解する必要がありますが、プラズマの運動は複雑なため、その理解のためには、計算機シミュレーションが欠かせません。しかし、これまでの「紐」についてのシミュレーションでは、流体手法というプラズマの紐状の塊

全体の動きに注目したものが主流で、塊を構成しているプラズマ粒子ひとつひとつの運動は計算していない、すなわち、個々の粒子が引き起こすミクロな効果は取り入れることができませんでした。そのため、例えば、プラズマ粒子がダイバータ板にぶつかる際にできるシーストと呼ばれるミクロな電場が計算できないため、プラズマの「紐」の内部の電流構造が、正しく再現されているのか分からないという問題がありました。その他にも、個々の粒子の運動が「紐」の振る舞いにおよぼす影響などについては、ほとんど解明されてきませんでした。

そこで、私たちは、粒子法という手法を用いた3次元シミュレーションで、「紐」の振る舞いを調べています。粒子法を用いると、ミクロな電場であるシーストも矛盾なく計算できるため、「紐」の内部の電流やプラズマ粒子の動きを正しく再現できるからです。ただ、粒子法を用いた計算では、流体手法とは異なり、多数のプラズマ粒子（イオンと電子）ひとつひとつの運動と、これらの粒子が作る電場の時間変化を解く必要があるため、流体手法に比べてその計算量は桁違いに大きくなります。さらに、3次元のシミュレーションであるため、その計

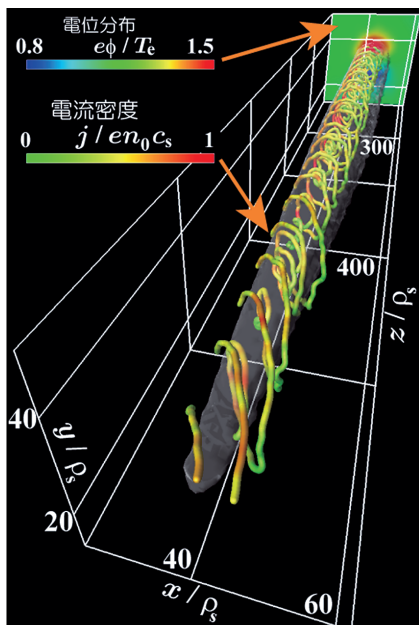


図2 3次元粒子シミュレーションで得られた「紐」の内部の電流構造（渦状のカラーの太い線）。灰色の透けた曲面は電子の密度の値が等しい面を示しています（すなわち、このあたりに「紐」があることを表しています）。また、奥側のカラーマップは、電位の分布を示しています。各方向の軸の値は、その長さを、イオン音速と呼ばれる速度でのイオン旋回半径で割ったものとなっています。

算はとても大規模なものとなりますが、核融合科学研究所のスーパーコンピュータ「プラズマシミュレータ」を用いることによって、その実行が可能となりました。そして、この大規模シミュレーションによって、プラズマの「紐」の内部をらせん状に流れる電流系の存在を確認しました(図2)。また、「紐」の内部の電位構造などを詳しく調べることも可能となりました。「紐」の内部には、その断面で見ると、図3に示したように、電位が高い部分と低い部分があるのですが（「紐」のなかに電場が生じるのはそのためです）、その電位の高低に合わせて、プラズマの温度も高低の分布を持つことが明らかになりました(図4)。このような温度分布（粒子速度分布の場所による差異）があると、「紐」の振る舞いに対して様々な影響を与える可能性があるため、その点について、さらに調べていく予定です。

プラズマシミュレータは昨年6月に更新され、計算性能が従来に比べて約8倍に向上しました。今後は、この新プラズマシミュレータを用いて、更に大規模なシミュレーションを行い、プラズマの「紐」の振る舞いを、より詳しく検証していきます。また、周辺プラズマの分野で重要な研究対象となっている非接触プラズマや不純物輸送と、「紐」の振る舞いの関係なども今後の重要なテーマです。これらの研究を通して、「紐」を含めた周辺プラズマの挙動の予測、そして、核融合発電の実現に貢献することを目指します。
(基礎物理シミュレーション研究系 助教)

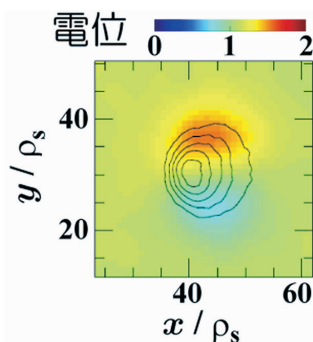


図3 磁力線に垂直な断面における電位（静電ポテンシャルエネルギー）の分布（カラーマップ）。カラーバーの値は、1が初期の電子熱エネルギーに相当するようになっています。各方向の軸は、図2と同様になっています。

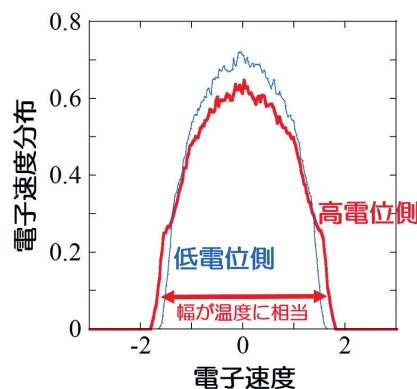


図4 「紐」の内部の電位が高い部分（高電位側）における電子速度分布（赤い太線）と電位が低い部分（低電位側）における電子速度分布（青い細線）。プラズマの粒子は、それぞれ異なる速度で動いていて、このように粒子の速度が分布を持っています。この分布の幅が温度を意味しています。高電位側の速度分布の方が、分布の幅が広いことから、高電位側の電子温度が高いことがわかります。なお、横軸は、1が初期の電子熱速度に対応しています。また、縦軸については、速度分布を積分して1となったときに、背景のプラズマ密度と同じ値に相当するようになっています。