

磁気再結合におけるプラズマ加熱の粒子シミュレーション

宇佐見俊介

プラズマには、「磁気再結合」という、互いに向きの異なる磁力線がつながり変わる現象がありますが、その詳細な物理機構はまだ完全には解明されていません。磁気再結合は、太陽フレアやオーロラの発生などに深く関わっていると注目されており、宇宙のプラズマ現象を人工衛星により観測する形での研究が世界中で活発に進められています。

一方、地上でのプラズマ実験により、磁気再結合の詳細な機構を調べる研究も進められています。東京大学の球状トカマク(ST)装置(TS-6)などでは、二つのトーラスプラズマを合体させて、磁気再結合を起こし、その性質を調べています。また、将来のSTを用いた小型の核融合炉を目指し、磁気再結合によるプラズマ加熱の実験を行っており、最大40%を超えるベータ値（プラズマ圧力を磁気圧力で割った値）のプラズマが生成されています。ところが、磁気再結合によるプラズマ加熱の詳細な機構は分かっていません。それが解明されれば、STのプラズマの加熱効率向上につながる知見が得られるとともに、宇宙プラズマ研究への応用も期待できます。そこで、本研究では、磁気再結合によるプラズマ加熱の機構を解明するため、東京大学の小野靖教授のグループと共同で、STにおける

磁気再結合について、研究所のスーパーコンピュータであるプラズマシミュレータを用いてシミュレーションを行いました。

図1は、STにおける、二つのトーラスプラズマの合体の模式図です。トーラスの周回方向(トロイダル方向)にトロイダル磁場が、断面(ポロイダル面)内にポロイダル磁場が存在します。二つのプラズマの境界付近で磁気再結合が起こりますが、ここでは、ポロイダル面内の点線で囲まれた領域について、シミュレーションを行います。以降、この面をxy平面と表します。右側の拡大図は、上が磁気再結合が起こる前で、下が磁気再結合の様子を示します。薄青矢印で示す上下から挟み込むようなプラズマの流れの影響で、向きの異なる磁力線が近づいて、つながり変わります。すると、この磁気再結合点からオレンジ色で示す下流へと向かうプラズマの流れが作られるとともにプラズマが加熱されると考えられています。

このような磁気再結合の詳細な機構を調べるためには、粒子間衝突の効果が小さく、粒子の速度分布がMaxwell分布とは異なる可能性があることを考慮する必要があります。そこで本研究では、プラズマ粒子一つ一つの運動方程式と、それらの粒子が作り出す電磁場の発展方程式を計算する「粒子シミュレーション」と呼ばれる手法を用います。この手法では、微小領域に存在する粒子一つ一つの速度を記録して集計することで、粒子の速度分布を調べます。また、温度はMaxwell分布が成立する場合に定義されるものですが、速度分布がMaxwell分布とは異なる場合にも拡張するために、実効的温度を導入します。実効的温度は粒子の速度分布の広がりに対応するもので、実効的温度が高いとは、粒子の速度分布が広がっていることを意味します。本稿では以降、実効的温度を「温度」と記します。

では、シミュレーション結果を見てみましょう。図2の上段は磁力線（黒線）とイオン温度（カラ

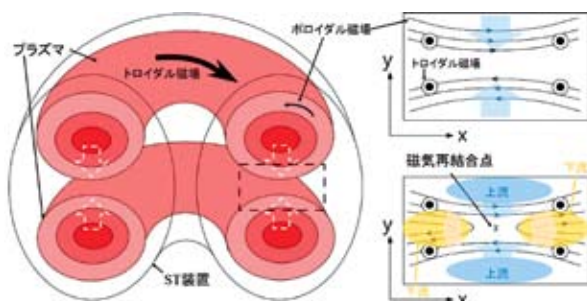


図1 球状トカマク装置における、二つのトーラスプラズマの合体の模式図。実験装置は球に近いドーナツの形をしていますが、ここでは、その断面を示します。二つのプラズマの境界付近で磁気再結合が起こります。左図のポロイダル面の点線で囲まれた領域をシミュレーションします。右はその領域の拡大図で、上が磁気再結合が起こる前を、下が磁気再結合の様子を示します。

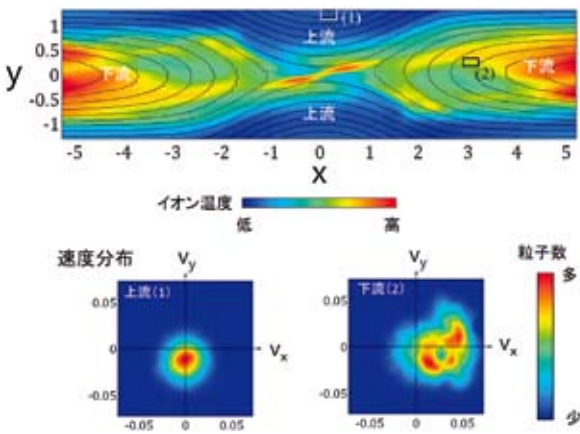


図2 磁気再結合におけるイオン加熱の粒子シミュレーション結果。上段は、磁力線（黒線）とイオン温度（カラーマップ）を示して、磁力線はこの面のほぼ中心でつなぎ変わっています。下段は、磁気再結合点の上流の微小領域(1)と下流の微小領域(2)におけるイオン粒子の速度分布です。下流では円環状の速度分布が形成されていて、上流に比べて分布が広がっており、イオンが実効的に加熱されています。

ーマップ) を示します。面のほぼ中心で磁力線が
つなぎ変わっており、その磁気再結合点の下流で
イオン温度が高くなっていることがわかります。
また、上流の微小領域(1)と下流の微小領域(2)
の粒子の速度分布を下段に示しました。上流の速
度分布は同心円のような形状(Maxwell分布)を
しており、分布の中心付近に多くのイオンが存在
します。この中心位置の v_y 方向の大きさがプラズ
マが磁気再結合点へ流れ込む平均的な速度に相当
します。一方、下流の速度分布は、円環状の構造
が形成されています。円の中心は、磁気再結合点
から流れ出してくるプラズマの速度に、円の半径
は、イオンがトロイダル磁場の回りを旋回する速
さに相当します。下流の速度分布は、上流に比べ
て広がっていることから、イオンが実効的に加熱
されて温度が上昇していることがわかりました。
また、電場の空間分布を調べたところ、磁気再結
合が起こると下流側に強い電場が発生することを
示しました。そして、イオンの運動とこの電場の
関係を解析した結果、イオンは電場からエネルギー
を獲得して大きな速さで旋回運動をするとともに、
その旋回中心がx方向に移動していくことを
明らかにしました。

次に、ポロイダル磁場、トロイダル磁場の強さ

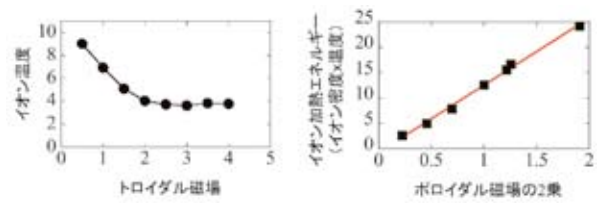


図3 イオン加熱の磁場依存性。左はトロイダル磁場、右はポロイダル磁場依存性を示します。イオン温度、密度は初期の値(磁気再結合が起こる前の値)を1とした相対的な値です。

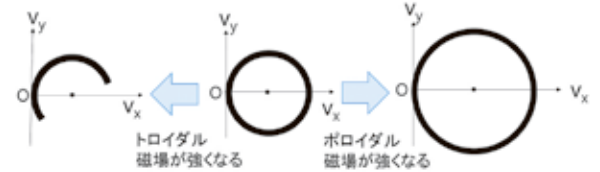


図4 磁気再結合点の下流領域におけるイオン粒子の速度分布の模式図。円環状の分布(中)は、トロイダル磁場が強くなると円の一部分が欠けていき(左)、ポロイダル磁場が強くなると円の半径が大きくなります(右)。

を様々に変えてシミュレーションを行いました。
図3は、磁気再結合点の下流でのイオン温度に関
する結果です。左はトロイダル磁場が強くなると、
イオン温度が低くなる傾向があることを示してい
ます。この性質は、TS-6の実験結果とよく一致し
ます。一方、右は、イオン加熱エネルギーがポロ
イダル磁場の2乗に比例して大きくなることを示
しています。この結果は、TS-6だけにとどまらず、
世界中のST装置で観測されている傾向です。この
ことから、本シミュレーションの信頼性を確認す
ることができました。また、磁気再結合点下流で
のイオン粒子の速度分布について、磁場依存性を
調べました。図4に示したように、円環状の構
造をしていた速度分布が、トロイダル磁場が強
くなると円の一部分が欠けていくことを発見し
ました。また、ポロイダル磁場が強くなると、
円環の半径が大きくなることわかりました。

今後は、STのプラズマ全体を計算できるように、
シミュレーションモデルを拡張し、実験との比較研
究を発展させていく予定です。そして、磁気再結
合についての理解を深めることで、核融合研究の
みならず、太陽フレアやオーロラの発生機構探
求など、宇宙プラズマの研究にも貢献していき
ます。

(基礎物理シミュレーション研究系 准教授)