

平成30年度成果報告：数値実験炉研究プロジェクト

洲 鎌 英 雄

数値実験炉研究プロジェクトでは、大型ヘリカル装置（LHD）計画プロジェクトや核融合工学研究プロジェクトと連携しながら、超高温プラズマで起こる様々な物理現象の解析と予測を行い、将来の核融合発電炉の設計に役立てるため、先進的な理論モデルとスーパーコンピュータ「プラズマシミュレータ」を駆使した大規模なシミュレーション研究を行っています。以下では、最近の研究成果を2件ご紹介しましょう。

LHD実験では、中性粒子ビーム入射によって生成する高速粒子を利用して、高速粒子とプラズマの振動の研究を進めています。一方、数値実験炉研究プロジェクトでは、プラズマ流体の様子と、高速粒子の動きを同時にシミュレーションできるプログラム（流体と粒子の振る舞いを連結して解析するので、ハイブリッド・シミュレーションと呼びます）を開発してきました。今回は高速粒子に加えてプラズマ中のイオンも粒子として取り扱えるようにプログラムを拡張し、従来の方法では不可能だった、プラズマの振動と高速粒子・イオンの相互作用をシミュレーションで詳しく調べることが可能になりました。このハイブリッド・シミュレーションプログラムを用いて、プラズマシミュレータ上でLHDの大規模シミュレーションを実行しました。図1は、シミュレーションによって得られたLHDプラズマ中で高速粒子が引き起こす振動の様子を表しています。そして、この振動と高速粒子とイオンのエネルギーの時間変化を調べたところ、高速粒子が振動にエネルギーを与え、振動のエネルギーがイオンに吸収されることが分かりました。この成果には以下のような意義があります。核融合発電では、プラズマ中の核融合反

応で発生した高速の粒子がプラズマを加熱する「自己加熱」が必要です。ところが、高速粒子は主に電子を加熱するため、核融合反応の燃料であるイオンへの加熱が弱いという問題があります。そこで、高速粒子が引き起こすプラズマの振動を介してイオンを加熱する機構が提唱されていましたが、長年に亘って確証が得られていませんでした。今回の成果により、このイオンの加熱機構が世界で初めて証明されました。今後、本成果を基盤として、プラズマの自己加熱の研究が大きく加速するものと期待されます。

核融合科学研究所では、全国の大学にあるプラズマ実験装置を用いた共同研究も進めています。そのような共同研究として、数値実験炉研究プロジェクトでは、東京大学の球状トカマク装置TS-3Uのプラズマ合体実験を、プラズマシミュレータを用いて模擬しました。二つのプラズマの合体点では、磁力線が切れてつなぎかわる「磁気再結合」という現象が起こり、その結果プラズマが加熱されることが示されていますが、詳細なメカニズムは分かっていません。そこで、荷電粒子一つ一つの運動と電磁場の変化を計算することによって、磁気再結合が起こる際に、粒子がどのようにエネルギーを獲得しているかを調べました。その結果、磁力線のつなぎ換えが起こると、電場が新たに作り出されて、イオンはその電場からエネルギーを獲得していることを発見しました。さらに、このメカニズムによってイオンの加熱エネルギーは、ポロイダル磁場強度の2乗に比例して高くなることが分かりました。この加熱エネルギーの磁場2乗則は、TS-3Uをはじめとした世界中の球状トカマクで見られる実験結果と非常によく一致しています。磁気再結合は、太陽のコロナや地球の磁気圏でも起こっており、核融合と宇宙の両方の分野にとって重要な研究課題です。本研究成果は、宇宙における磁気再結合現象の研究にも貢献すると期待されます。

（数値実験炉研究プロジェクト 研究総主幹/
核融合理論シミュレーション研究系 教授）

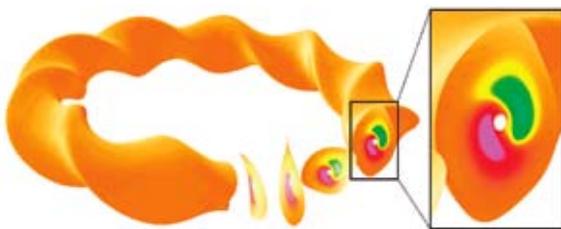


図1 シミュレーションによって得られたLHDプラズマ中で高速粒子が引き起こす振動の様子です。ドーナツの断面で、振動によってプラズマの圧力が増大した部分をピンク色で、減少した部分を緑色で表しています。