

高速イオンの振る舞いを予測する —ハイブリッド・シミュレーションと実験の比較研究—

關 良 輔

核融合発電を実現するためには、核融合反応が持続するよう、プラズマを1億度以上の高温に加熱し、高温状態のまま保持することが必要です。将来の核融合炉では、核融合反応によって生成され、プラズマの粒子よりも高いエネルギーを持った高速のヘリウムイオンがプラズマにエネルギーを与えることで加熱します。一方、高温・高密度のプラズマの閉じ込め研究を行う核融合科学研究所の大型ヘリカル装置（LHD）では、高い電圧で加速した水素のビームを入射することにより生成した高速のイオンによってプラズマを加熱しています。超高温プラズマの生成・維持を実現するためには、プラズマ加熱において重要な役割を担う高速イオンの振る舞いを理解し、高精度で予測することが必要です。今回は、その予測を行う計算機シミュレーションとLHD実験との比較研究を紹介します。

高速イオンは、ドーナツ型の磁場の中を周回しながらプラズマを加熱します（図1）。この高速イ

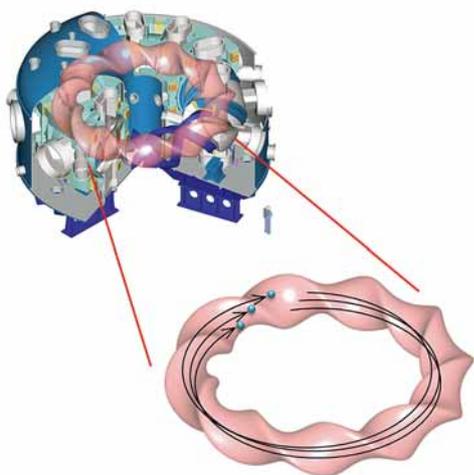


図1. 高速イオンは、LHDのねじれたドーナツの形をした磁場の中を周回しながらプラズマを加熱しています。高速イオンの周回の周期とプラズマの振動の周期が一致すると、振動の振幅が大きくなります。

オンの振る舞いに影響を与えるのが、プラズマの振動です。多数の分子の集まりである空気が音を伝える際に振動するように、電気を帯びた多数の粒子の集まりであるプラズマも様々な形で振動します。プラズマが元々持っている振動の周期と高速イオンの周回する周期が一致すると、振動が大きくなることがあります。そして、大きくなった振動の影響を受けた高速イオンは、プラズマ周辺部へ運ばれたり、プラズマの外へ飛び出しプラズマ真空容器に衝突したりしてしまいます。結果、加熱源である高速イオンがプラズマ中心部から減ってしまい、プラズマの加熱効率が低下してしまいます。本研究では、プラズマの振動と高速イオンの相互作用も含めて高速イオンの振る舞いを理解・予測することで、超高温プラズマの生成・維持の実現を目指しています。

研究所では、このようなプラズマの振動と高速イオンの相互作用を予測できる計算機シミュレーションを開発してきました。このシミュレーショ

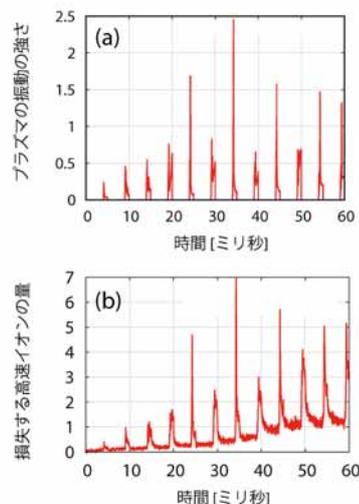


図2. プラズマ振動の強さ (a) と損失した高速イオンの量 (b) の時間変化。間欠的に発生する大きなプラズマ振動に合わせて、高速イオンの損失量が増えています。

ンは、プラズマの振動を解く磁気流体力学方程式の計算と、個々の高速イオンの動きを解く運動方程式の計算を連結して行うことで、プラズマの振動と高速イオンの相互作用を再現します。流体(プラズマ)と粒子(イオン)という異なる2種類の計算を連結するので、ハイブリッド・シミュレーションと呼ばれています。なお、このハイブリッド・シミュレーションは、これまでに、LHDや米国等の装置で観測された、高速イオンによってプラズマの振動が大きくなる現象を再現しています。

今回、ハイブリッド・シミュレーションの信頼性をより一層高めるため、LHDの水素実験で観測された、プラズマの振動の影響を受けて一部の高速イオンがプラズマの外へ損失するという結果を再現できるか検証しました。LHDでは、損失高速イオンプローブと呼ばれる計測器が設置されています。この計測器は、磁力線に巻き付いて運動するイオンの特性を用いることで、損失した高速イオンのエネルギーとピッチ角(旋回の高さと磁力線方向の速さの比)を同時に測ることができます。計算においては、プラズマの温度や密度、高速イオンの速度や密度等について可能な限りLHD実験と同じ条件を設定しました。

図2は、ハイブリッド・シミュレーションで得た、プラズマ振動の強さと損失した高速イオン量の時間変化です。大きなプラズマの振動が間欠的に発生している様子と、そのプラズマの振動に合わせ

て、高速イオンの損失量が増えている様子が示されています。この振動の強さと高速イオンの損失量の関係を詳しく解析したところ、高速イオンの損失量が振動の大きさの2乗に比例するという、実験と同じ結果が得られました。また、図2 (b)においては、大きなプラズマ振動が発生していない時間においても、高速イオンの損失量が徐々に増加していることがわかります。これは、振動によってプラズマの周辺部へ運ばれた高速イオンが少しずつ損失していることによるものです。さらに、プラズマから損失した高速イオンのエネルギーとピッチ角について、ハイブリッド・シミュレーションとLHD実験との比較を行いました(図3)。赤で示した高速イオンの損失量が多い領域のエネルギーとピッチ角について、シミュレーション結果とLHD実験が概ね一致していることがわかります。これにより、損失した高速イオンのエネルギーやピッチ角についても、LHDでの実験結果をほぼ再現することに成功し、ハイブリッド・シミュレーションの信頼性を、より一層高めることができました。

今後は、ハイブリッド・シミュレーションとLHD実験との比較研究を更に推進することで、将来の核融合炉における高速イオンの振る舞いの予測精度を、更に向上させていきます。

(プラズマ加熱物理研究系 助教)

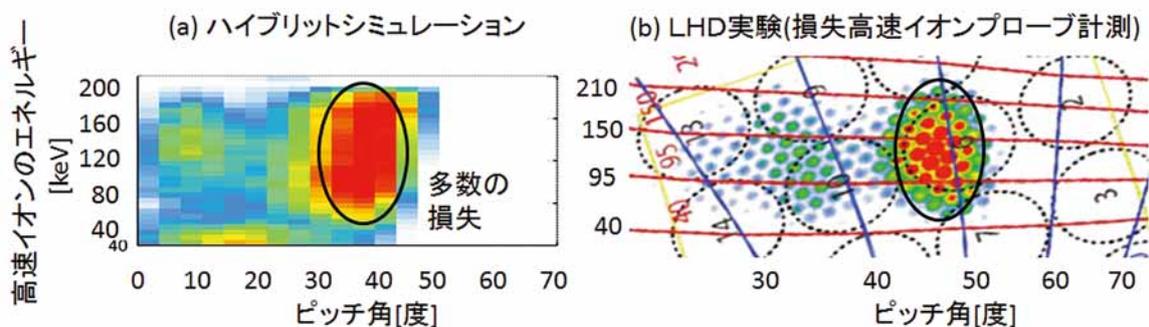


図3. プラズマから損失した高速水素イオンについてのハイブリッド・シミュレーションとLHD実験との比較。縦軸は、高速水素イオンのエネルギーで、100 keVはおよそ秒速4000キロメートルの速さに相当します。横軸は、旋回の高さと磁場方向の速さの比を表すピッチ角を、図の色は、損失した高速イオンの量(青⇒黄⇒赤と大きくなる)を表しています。損失が多いことを示す赤の部分に注目すると、シミュレーションと実験で概ね一致していることがわかります。