

高エネルギー粒子が駆動する不安定性のシミュレーション研究

藤 堂 泰 ・ 王 灝

大型ヘリカル装置（LHD）などの実験装置では、中性粒子ビームや電磁波を外部から入射して高エネルギー粒子を生成し、高エネルギー粒子とプラズマ粒子の衝突によってプラズマを加熱します。高エネルギー粒子の良好な閉じ込めが核融合反応に必要な高温プラズマを実現する鍵となります。一方、プラズマは電磁場の変動を伴う電導性流体であり、LHDなどの環状プラズマはアルヴェン固有モードなどの固有振動をすることが知られています。高エネルギー粒子はアルヴェン固有モードなどと共鳴してその振幅を増大させることがあり、増幅した振動は高エネルギー粒子の閉じ込めを劣化させます。このような高エネルギー粒子駆動不安定性は核融合研究の重要な研究課題の一つです。

核融合科学研究所では、高エネルギー粒子駆動不安定性の理解と予測のため、計算機シミュレーション MEGA の開発を進めています。シミュレーションによって得られた LHD における高エネルギー粒子駆動不安定性の空間分布を図 1、図 2 に示します。図 1 はアルヴェン固有モード、図 2 は高エネルギー粒子駆動測地的音響モードと呼ばれる不安定性の空間分布をそれぞれ示しています。アルヴェン固有モードは、プラズマを閉じ込めている磁力線の振動がギター弦のように磁力線方向に伝わる現象で、測地的音響モードはプラズマ中の静電ポテンシャルが図 2 のような固有の構造を持って振動する現象です。

シミュレーションの役割として、実験結果を予測してその計画立案に貢献することが期待されていますが、その前にシミュレーションの信頼性をよく確認しておくことが必要です。信頼性の確認方法としては、Verification and Validation と呼ばれる方法論が知られています。ここでは Verification を「検証」、Validation を「妥当性確認」と呼ぶことにします。「検証」は、計算プログラムが物理方程式を正しく解いているかどうかを検査します。具体的には、理論的な答えが知られている問題を解くことや、同一の問題を複数のプログラムで計算して結果を相互に比較することにより、計算プログラムの正しさを確認します。「妥当性確認」は、実験と同様の条件を設定して計算結果を実験結果と比較し、プログラムに採用した物理方程式や物理条件が妥当であることを確認します。信頼できる

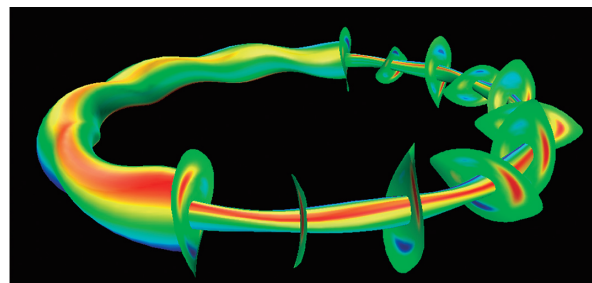


図1 シミュレーションで得られた LHD におけるアルヴェン固有モードの速度揺動分布。赤色と青色は正と負の値にそれぞれ対応する。

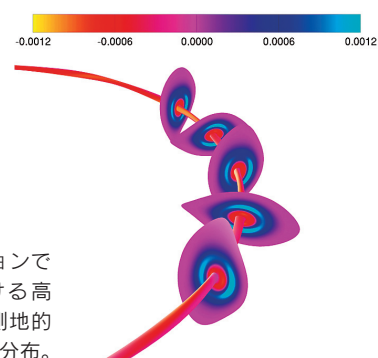


図2 シミュレーションで得られた LHD における高エネルギー粒子駆動測地的音響モードの速度揺動分布。

シミュレーションは「検証」と「妥当性確認」の両方に合格する必要があります。国際トカマク物理活動という国際協力の中で実施された計算プログラムの「検証」に参加して、MEGA を含む複数のプログラム間でアルヴェン固有モードの性質について良好な一致を確認しました。一方で、MEGA には以下に述べるようなアルヴェン固有モードと高エネルギー粒子の双方の時間発展をプラズマ粒子との衝突時間スケールで追跡できるという他のプログラムにはない特長があります。

高エネルギー粒子の速度空間分布が熱平衡状態から大きく離れていることが原因となって、シミュレーション結果を実験データと直接比較する「妥当性確認」はこれまでは困難でした。実験において観測される高エネルギー粒子分布は、高エネルギー粒子が生成後にプラズマ粒子と衝突して減速し、さらにアルヴェン固有モードなどの振動と相互作用して形成されたものです。この高エネルギー粒子分布の形成過程を計算する上で難しい点は、アルヴェン固有モードの振動周期が 0.01 ミリ秒程度であるのに対して、プラズマ粒子との衝突による高エネルギー粒子の分布形成時間は 100 ミリ秒以

上であり、両者の時間スケールが一万以上異なっていることです。アルヴェン固有モードとの相互作用を考慮すると時間ステップ幅を小さくする必要があるので、分布形成の計算量は膨大なものとなります。我々は、時間ステップ幅の小さいアルヴェン固有モードとの相互作用の計算を常時行うのではなく一定時間間隔で実行し、その他の時間帯では時間ステップ幅を大きくとつても正しい答えが得られることを実証しました。このシミュレーション手法を米国のトカマク型実験装置 DIII-D に適用した結果、図 3、4 に示すようにアルヴェン固有モードによる高速イオン分布の顕著な平坦化とアルヴェン固有モードの周波数、空間分布、振幅について実験結果を世界で初めて定量的に再現し、シミュレーションの妥当性を確認することができました。このシミュレーションでは高エネルギー粒子の生成・入射、高エネルギー粒子とプラズマ粒子の衝突、高エネルギー粒子とアルヴェン固有モードの相互作用を全て考慮しています。

将来の核融合発電では、高温プラズマにおける重水素と三重水素の核融合反応を利用し、核融合反応

から発生する高エネルギーアルファ粒子がプラズマを加熱して、核融合反応に必要な高温状態を保持します。このようなプラズマは燃焼プラズマと呼ばれ、燃焼プラズマでは高エネルギーアルファ粒子の閉じ込めが重要な研究課題です。我々は、燃焼プラズマの実現を目指す ITER での高エネルギー粒子駆動不安定性に関するシミュレーションも推進しており、その結果得られた ITER の定常運転シナリオにおけるアルヴェン固有モードの分布を図 5 に示します。この計算結果では、多数のアルヴェン固有モードが不安定になり、最大振幅のアルヴェン固有モードも時間とともに変化します。この計算には、DIII-D の計算で採用した高エネルギー粒子生成や粒子衝突を含んでいないので、ITER についても DIII-D と同様の計算を今後実行する予定です。また、LHD についても、中性粒子ビーム入射と粒子衝突を取り入れた計算を開始しており、重水素実験ではシミュレーションとの比較ができる計測環境が整うので、シミュレーションによる実験解析を推進していきます。

(核融合理論シミュレーション研究系 教授)

(核融合理論シミュレーション研究系 助教)

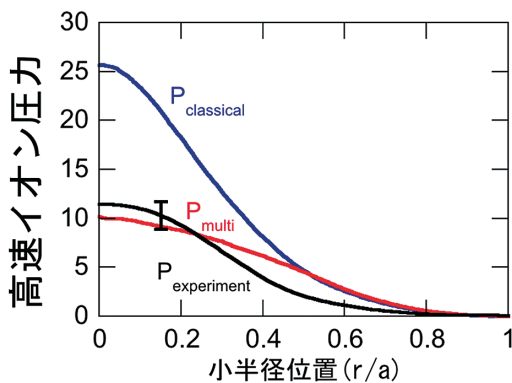


図3 MEGA によるシミュレーション結果の高速イオン圧力分布 (P_{multi}) は実験 ($P_{\text{experiment}}$) と測定誤差の範囲で一致した。高エネルギー粒子駆動不安定性を含まない従来の計算 ($P_{\text{classical}}$) は実験を再現できない。

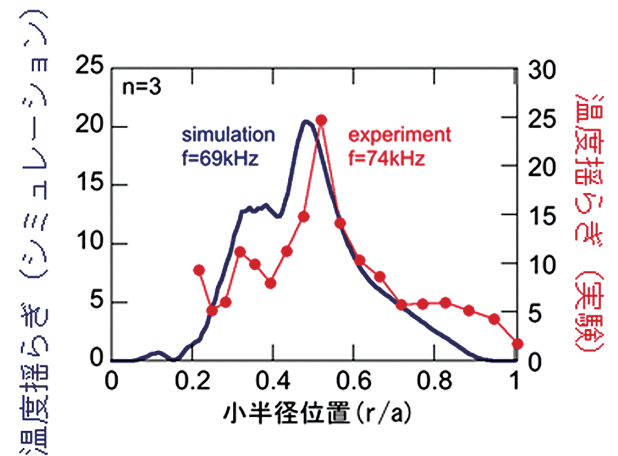


図4 アルヴェン固有モードがもたらす電子温度揺動分布について、シミュレーション結果 (青) は実験計測 (赤) とよく一致した。両者の最大値は20%の範囲で一致している。シミュレーションと実験における揺動の周波数も図中に記されている。

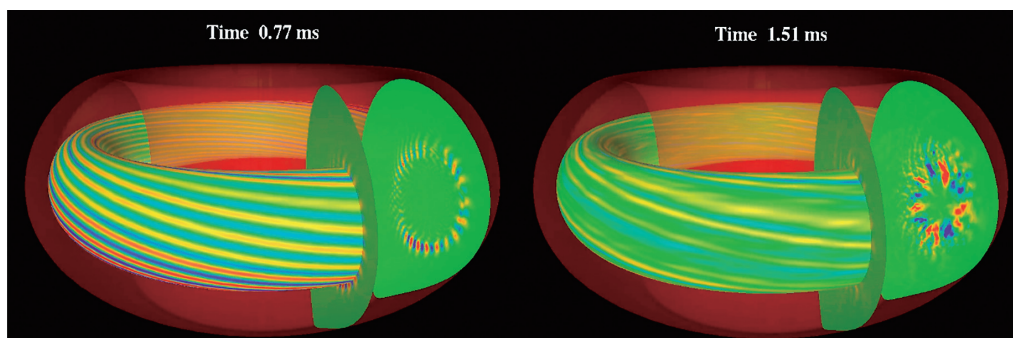


図5 ITER 定常運転シナリオにおけるアルヴェン固有モードの速度揺動分布。時間発展の初期における分布 (左) と後期における分布 (右) をそれぞれ示している。赤色と青色はそれぞれ正と負の値に対応する。