

2019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。

核融合炉の実現には、磁場の強さが同じであれば、より高い圧力のプラズマを安定的に長時間閉じ込められる装置が、経済的で有望だとされています。LHD実験では高圧力プラズマの保持に成功していますが、これまでの計算機シミュレーションは、この現象を再現できていませんでした。これまでは、プラズマを水や空気と同様に流れる物体(流体)とみなして計算する方法(流体モデル)が用いられてきました。プラズマ中では多数のイオンがそれぞれ異なる速度で異なる動きをしていますが、流体モデルは、これらイオンの平均的な動きを計算します。数値実験炉研究プロジェクトでは、より精密な計算を行うため、流体モデルでは考慮されていない、多数のイオンの動きの違いを

取り入れた「ハイブリッド・シミュレーション」を開発し、これを用いて、将来の核融合炉でプラズマを加熱する役割を担う、高速イオンに関する重要な成果を挙げてきました。例えば、高速イオンがプラズマの振動を引き起こし、その振動がプラズマを加熱することを世界で初めて証明しました。この研究をさらに発展させ、本研究ではハイブリッド・シミュレーションを用いて、LHD実験で成功した高圧力プラズマの保持を再現することに取り組みました。様々な動きをするイオンの中で特に注目したのが、往復運動しながら進んでいく「捕捉イオン」です(表紙図、黄線)。この捕捉イオンの動きはLHD特有のものであるため、その効果を調べる必要があります。そこで、ハイブリッド・シミュレーションで、数百万個の捕捉イオンを含む、数千万個のイオンの運動とプラズマの圧力の変化を計算しました。さらに、高圧力を保持できるかどうかを示すためには、長時間にわたる変化を調べる必要があります。これは膨大な計算量となりますが、プラズマシミュレータを駆使することで、その計算を実現しました。その結果、LHDの高圧力プラズマの保持をシミュレーションで再現することに初めて成功しました(図1)。また、

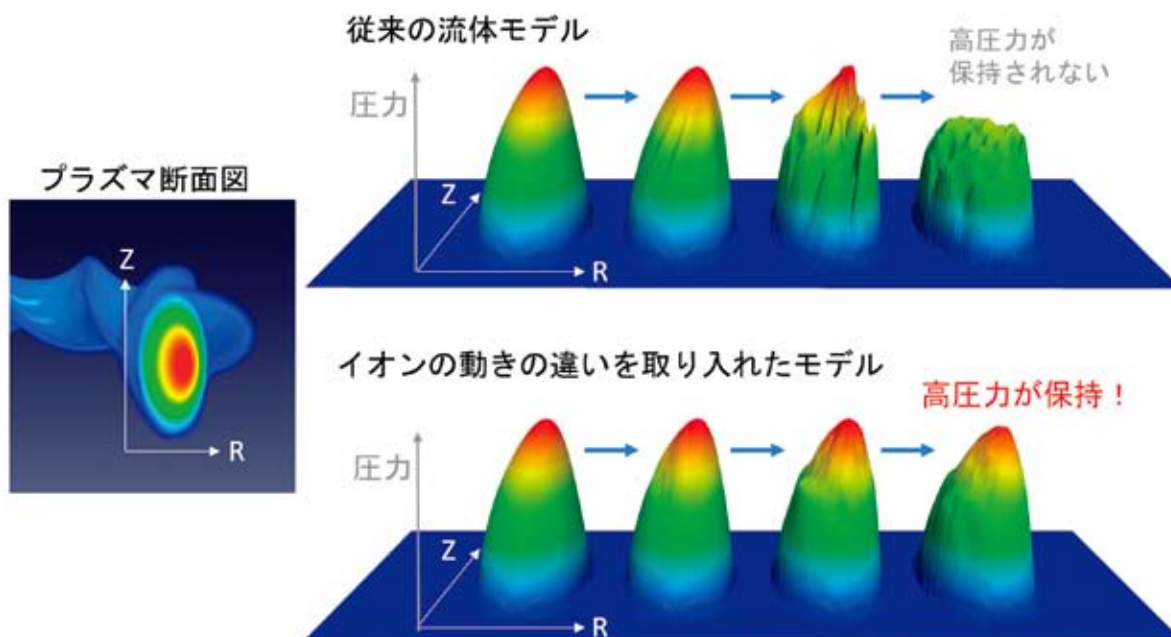


図1 LHDの高圧力プラズマのシミュレーション結果。プラズマ断面の圧力分布を示します。左図は、色が圧力を表していて、プラズマの中心部で圧力が高く、外に向かうほど低いことを示しています。右図はその圧力分布の時間変化を示します。

捕捉イオンの運動とプラズマの圧力変化との関係を詳しく解析しました。これにより、捕捉イオンがプラズマ中に発生する揺らぎが大きくなるのを抑えることによって、高圧力プラズマの保持に大きく貢献していることが明らかになりました。本研究によって、将来のヘリカル型核融合炉におけるプラズマの予測精度を大幅に向上させることができました。今後、本研究成果が基盤となって、将来のヘリカル型核融合炉の経済性向上を目指す設計研究が大きく前進することが期待されます。

核融合炉の内部のプラズマ側に面する壁にはプラズマから出てくる熱や粒子が照射されるため、壁からは不純物や中性の粒子がプラズマ中へ放出され、炉心プラズマの温度、密度やその閉じ込め性能に大きな影響を及ぼします。このような現象は、プラズマ・壁相互作用と呼ばれ、高性能核融合プラズマの実現のために極めて重要な研究課題です。プラズマ・壁相互作用は、様々な物理過程や化学反応過程が関与する非常に複雑な現象であり、その研究には幾つもの理論モデルや計算手法を組み合わせたシミュレーションが必要となります。プラズマ・壁相互作用の一例として、壁近くにある水素分子の輸送や反応があります。水素分子は、プラズマ中心部への燃料補給やプラズマ全体の閉じ込めに大きな影響を与えるとともに壁への熱負荷を軽減する役割を担うことが期待されています。このような水素分子の影響を調べるためには、壁近くのプラズマ（周辺プラズマ）中の水素分子の運動量・運動エネルギー、振動・回転などの状態を知ることが必要です。ところが、これらの情報を実験観測のみから得るのは容易ではありません。そこで、LHDにおける水素分子に関するこれらの情報を求めるための計算手法を、信州大学・山形大学・京都大学との共同研究により開発しました。この計算手法は、三つのシミュレーションを組み合わせます。まず、分子動力学とよばれる方法を用いたシミュレーションにより、炭素の壁で反射・放出される水素分子の状態を計算します。放出された水素分子はプラズマの中で電子やイオンと衝突しながら移動していくとともに、その状態が変化します。このような水素分子の振る舞いを、中性粒子の輸送シミュレーションを用いて計算します。ここで、LHDの複雑な形状を持つプラズマの密度や温度などの情報が必要ですが、これにはプラズマ輸送シミュレーションによる計算結果を用います。このように、三つのシミュレーションを組み合わせることで、周辺プラズマ中の水素分子の状態を予測することができるようになりました。図2は、三つのシミュレーションの結果を示しています。本研究で開発されたシミュ

レーション手法は、今後、LHDやその他のプラズマ実験装置において観測される水素の発光スペクトルの解析や水素分子の挙動の理解に大いに役立つことでしょう。

数値実験炉研究プロジェクトを推進するために活用されているプラズマシミュレータは、2020年度に新機種に移行しました。新機種の理論演算性能は、10.5ペタフロップス（毎秒1.05京回の演算能力で2020年2月末まで運用していた旧プラズマシミュレータの4倍）、主記憶容量と外部記憶装置はそれぞれ202テラバイトと32.1ペタバイトとなり、これまで以上にプラズマの大規模シミュレーションを実行することができるようになります。親しみをもつていただくため、この新しいプラズマシミュレータの愛称を一般公募した結果、「雷神」と決められました。「プラズマシミュレータ雷神」により、プラズマの理論シミュレーション研究全体がますます発展することが期待されます。次号のNIFSニュースにおいて、「プラズマシミュレータ雷神」のより詳しい情報を掲載する予定です。

(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)

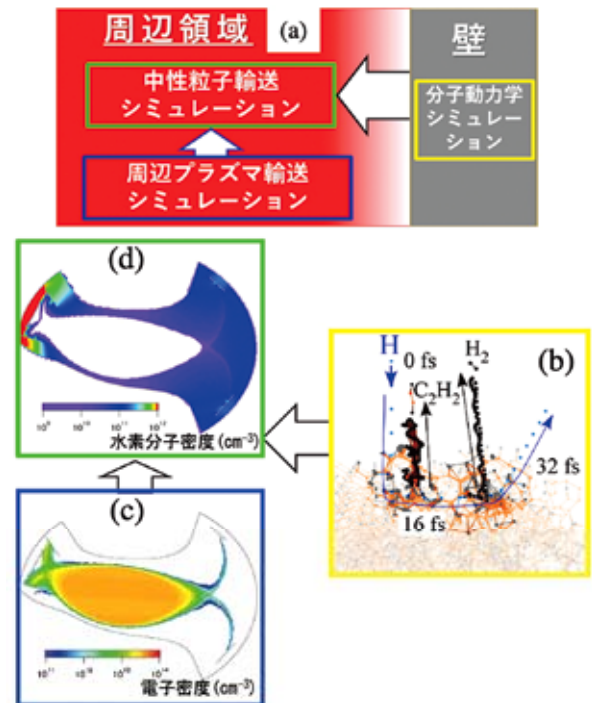


図2 三つのシミュレーションの関係 (a) と計算結果。分子動力学シミュレーションを用いて、炭素の壁から放出される水素分子の状態を計算し(b)、プラズマ輸送シミュレーションによりLHDのプラズマの状態を求めます(c)。これらの計算結果を使って、中性粒子輸送シミュレーションにより、周辺プラズマ中で水素分子の振る舞いを計算します(d)。