

軸	計算科学
ユニット名 (英文名)	複合大域シミュレーション (Complex Global Simulation)
核融合科学の キーワード	核燃焼プラズマ、MHD、ジャイロ運動論、乱流、周辺プラズマ、不安 定性・飽和
学際的展開の キーワード	大域的シミュレーション、多階層、秩序構造、渦、散逸構造、データ科 学、計算科学、可視化
研究組織	<p>核融合研職員</p> <p>藤堂 泰, 運動論的 MHD ハイブリッドシミュレーション 三浦英昭, 乱流シミュレーション 洲鎌英雄, ジャイロ運動論理論 樋田美栄子, 粒子シミュレーション 水口直紀, MHD シミュレーション 山本孝志, 情報ネットワーク 石崎龍一, MHD シミュレーション 佐藤雅彦, 運動論的 MHD ハイブリッドシミュレーション 關 良輔, 運動論的 MHD ハイブリッドシミュレーション Wang Hao, 運動論的 MHD ハイブリッドシミュレーション Wang Jialei, 運動論的 MHD ハイブリッドシミュレーション Idouakass Malik, 運動論的 MHD ハイブリッドシミュレーション Adulsiriswad Panith, 運動論的 MHD ハイブリッドシミュレーション</p>

1. ユニットが掲げる研究目的の概要

多階層によって構成されている系全体の挙動を理解するためには、各階層の個別のシミュレーションだけでは不十分であり、階層間の相互作用を考慮した大域的なシミュレーションが必要となる。このような複合大域シミュレーションは核融合分野だけでなく多くの学術分野で実現が期待される重要な課題であるが、実現は容易ではない。その要因は、微視的階層と系全体の時間空間スケールが極端に異なる状況がしばしば発生し、微視的階層を対象とした単一の基礎物理方程式に基づいたシミュレーションで両スケール全体を取り込むには計算機の規模・能力が不足することである。この問題を解決するシミュレーション手法を開発し、シミュレーション研究を推進することが本ユニットの目的である。

2. ユニットテーマに対するユニットとしての学術戦略

本ユニットでは、階層間や異なる物理モデル間を連結する手法を開発し、単一の基礎物理方程式に基づいたシミュレーションでは取り扱うことのできない物理系全体の挙動を予測・解明する大域的シミュレーションを実現する。本ユニットでは、1) 炉心プラズマと周辺プラズマを包含する磁場閉じ込め核融合プラズマ全体の大域的シミュレーション、および2) スーパーコンピュータの規模による強い制限を超えて、より実現に近いシミュレーションを実現するための、広範な応用性をもつ方法論の確立に取り組む。

1) 炉心プラズマと周辺プラズマを包含する磁場閉じ込め核融合プラズマ全体の大域的シミュレーション

本ユニットは、高エネルギー粒子と熱イオンを運動論的に取り扱う MHD ハイブリッドシミュレーションにジャイロ運動論的ポアソン方程式を結合することにより、イオン温度勾配不安定性などの微視的乱流と MHD 現象および両者の中間スケールを構成する帯状流の三者の相互作用を計算することが可能なシミュレーションモデルを構築し、磁場閉じ込めプラズマ全体のシミュレーションを実現する。さらに、プラズマの電磁粒子シミュレーションと大域的解析との連結計算手法や磁場閉じ込め核融合プラズマへのペレット入射における多相（固相・液相・気相・プラズマ）計算手法を開発する。

本ユニットで新たに開発するジャイロ運動論的 MHD ハイブリッドシミュレーションを ITER によって初めて実現する核燃焼プラズマに適用し、高エネルギーアルファ粒子が駆動する不安定性・微視的乱流・帯状流の三者の相互作用によって形成される構造を予測する。また、このシミュレーションを磁場閉じ込め核融合プラズマの周辺領域に適用し、乱流と MHD 不安定性によって決定される周辺プラズマの構造と挙動を解明する。周辺プラズマと炉心プラズマを結合して計算することにより、炉心プラズマからの輸送流束を考慮した周辺プラズマのシミュレーションを実現する。

本ユニットは開放系電磁粒子シミュレーションにより広周波数帯波動が関与する高速粒子不安定性の非線形発展を解明するとともに、波動伝播などの大域的解析と電磁粒子シミュレーション

ュレーションの連結計算手法を開発する。さらに、磁場閉じ込め核融合プラズマへのペレット入射シミュレーションのための多相（固相・液相・気相・プラズマ）計算手法を開発し、ペレット溶発の制御法を見出す。

本ユニットで開発するジャイロ運動論的 MHD ハイブリッドシミュレーションを核融合プラズマだけでなく宇宙・天体プラズマにも適用して、学際的な研究を推進する。実験研究との連携によるシミュレーションの実証研究を推進し、有効性を検証しながらシミュレーションの開発を進めるとともに、自由な発想で問題を設定して実験研究を先導できるような新しい現象の発見を目指す。

2) スーパーコンピュータの規模による強い制限を超えて、より実現象に近いシミュレーションを実現するための、広範な応用性をもつ方法論の確立

最初に取り組むのは、微視・散逸スケールのデータ科学的手法によるモデル化である。場の方程式(MHD, Navier-Stokes, Gross-Pitaevskii など) のシミュレーションでは散逸・微視的階層まで数値的に解像することが重要であると同時に、巨大化の原因でもある。このため、この階層を数値モデル化・学習・次元低減などの手法で小型化し、さらにこの低次元化した階層と自由度が高い階層の関係性を定式化する。このような“シミュレーション+データ”科学のハイブリッドアプローチは、一つの方程式系に成功すれば他の対象でも成功する可能性が高い。この性質を活用し、成功した方法を多様な課題へ展開して「方法論」として確立する。

これらに加えて、従来からの数値手法(AMR,CIP,LES など)の発展、4次元以上の高次元データ（これには3次元空間+時間だけではなく、高次元データ空間を低次元化するものを含む）を可視化する「メソ次元可視化」など高度なシミュレーション可視化、ハードウェアによる演算加速や計算規模拡大など、この課題で開拓する方法論をコンセプトで終わらせずに実装するための技術やシステム提案を、関連分野の研究者とともに作り上げていくべく、研究活動を展開する。

3. 期待される研究成果, その学術的な価値, 波及効果

微視的階層との相互作用を取り入れた無衝突プラズマの大域的シミュレーションは核融合プラズマ研究の長年に渡る重要な課題であり、実現すれば核融合プラズマシミュレーション研究の中心的な手法となり、核融合プラズマの様々な重要問題に広く応用されることが期待される。その成果として、ITERによって初めて実現する核燃焼プラズマの構造を予測し、磁場閉じ込め核融合プラズマの最重要課題とも言える L-H 遷移の解明が期待される。

散逸・微視的スケールのデータ科学的手法によるモデル化は、ある条件を満たす偏微分方程式系のシミュレーションであれば共通して使える方法論となり得る。これは、様々な学術研究・産業応用における研究の進展を著しく促進する効果が期待できる。