

ユニットテーマ提案書

1. ユニットテーマ

スマートグローバルシミュレーション (Smart Global Simulation)

2. 核融合としての課題

微視的階層や個々の構成粒子の運動が重要な役割を担う物理系全体の挙動を予測・解明するために、スマートな大域的シミュレーションを開発し、シミュレーション研究を実施する。スマートな大域的シミュレーションとは、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実現できないシミュレーションであり、具体的には粒子モデルと流体モデルを連結したハイブリッドシミュレーションや巨視的シミュレーションと微視的シミュレーションを連結した階層連結シミュレーションを発展させて系全体の計算を可能とするシミュレーション、及び散逸・微視的階層をデータ科学的手法等の様々な手段によってモデル化した大域的シミュレーションなどのことである。核融合の課題としては、巨視的 MHD 現象から微視的乱流までを同時に計算可能なシミュレーションモデルを開発し、このシミュレーションモデルを炉心プラズマと周辺プラズマを含む磁場閉じ込め核融合プラズマ全体に適用することにより、アルファ粒子生成を考慮した核燃焼プラズマ全体や周辺プラズマの構造と挙動を予測・解明するシミュレーションを実現する。

3. 学術的な特徴づけ

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。このような大域的シミュレーションの実現が難しい要因は、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すること、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。このマルチスケールシミュレーションの困難を克服して微視的階層との相互作用をスマートに取り入れた大域的シミュレーションが本ユニットテーマである。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 遷移を解明できれば、学术界に対してもアピールできるものと考えられる。また、散逸スケールのデータ科学的手法によるモデル化は学術研究・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ことから、学术界においても評価されるものと考えられる。

4. アプローチ (定式化)

本ユニットテーマの下での重要な課題の一つは、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である。磁場閉じ込め核融合プラズマは無衝突プラズマであり、個々の粒子軌道を考慮した運動論的なシミュレーションが必要である。ここでは、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

2 ページ以内で記述し、10.5pt・行間 1 行を使用してください。青字の注意書きは削除してください。

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。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。

もう一つの重要な課題は、CIP, LES など従来手法を越え、データ科学的手法も取り入れた“シミュレーション+データ”科学的手法の開発に取り組むことである。最初に取り組むのは、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ため、散逸・微視的階層のモデル化・学習化や次元低減などの手法を用いて小型化する。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についても成功する可能性が高く、多様な課題へ展開する「方法論」となり得る。また、このアプローチは場の方程式に対するものであるため、運動論的シミュレーションへの拡張も考えられる。

上記に加えて、大規模化するシミュレーションデータの可視化や、ハードウェアを用いた計算の加速や計算規模の拡大など、我々が開拓する方法論をコンセプトで終わらせずに、実際のアプリケーションに実装するための技術やシステム提案を、ユニットに参加する関連分野の研究者とともに作り上げていく。これにより、これまでの制約を順次乗り越え、計算機の世代を先取りする内容のスマートグローバルシミュレーションの実現を目指す。

5. 学際的展開

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。また、場の方程式の数値手法研究は、流体力学（特に乱流）研究、量子乱流等関連分野へと展開するとともに、データ科学・データ可視化・計算科学分野との学際研究による“シミュレーション+データ”科学研究への展開を目指す。

6. 独自性、優位性など

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は、これまでに開発し実績を上げてきた運動論的 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ところに独自性と優位性がある。“シミュレーション+データ”科学手法の研究では、流体乱流研究におけるデータ科学的手法の研究や、乱流微細渦構造、乱流の階層性研究などの実績に基づく散逸構造研究の独自性・優位性がある。