

## 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

核燃焼プラズマの自己組織化、巨視的 MHD 現象と微視的乱流の相互作用、周辺プラズマの構造と挙動、プラズマ・壁相互作用などを解明・予測する核融合プラズマの大域的シミュレーション

### 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。

### 4. アプローチ (定式化)

本ユニットテーマでは、階層間や異なる物理モデル間をスマートに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。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研究に取り組む。

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。

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。

もう一つの重要な課題は、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である。急速なスーパーコンピュータの性能向上は厳しくなる一方で、データ科学、量子コンピュータなど新しい潮流が発生している現状に鑑み、大規模シミュレーションの規模の制約をこれら新潮流を取り入れることで突破する必要がある。

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、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、従来からの数値手法(AMR,CIP,LES など)の発展、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。

## 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。

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。