

2021 年 8 月 3 日

ユニットテーマ提案書

1. ユニットテーマ

コンパクト化流体シミュレーションによる超多自由度複雑系のモデリング

2. 提案者（氏名・所属）

三浦英昭, 水口直紀, 石崎龍一(核融合研), 辻義之(名古屋大学), 後藤晋, 清水雅樹(大阪大学)

3. テーマと研究内容の概要

この研究は、様々な学術分野に現れる場の方程式の数値シミュレーションをコンパクトにまとめ、その数値解の複雑な振る舞いを現在よりもはるかに容易に理解可能にするものである。複雑な運動を記述する場の方程式(Navier-Stokes, MHD など) について、自由度逓減手法で得られる最適基底を用いた少数自由度数値シミュレーション手法を開発する。この手法の開発により、高自由度複雑運動(乱流・不安定性など)の固定点や不安定周期軌道解など様々な軌道の探索や、超臨界/垂臨界分岐などの解析を可能にする。また、現在のスーパーコンピュータで実現不可能な超高自由度シミュレーションを実現可能に変え、あるいは、従来の大規模シミュレーションをスマートフォン程度で実行可能な規模に縮小して、実験現場でリアルタイム解析も可能とすることとする等、従来の科学研究に質的な改変をもたらすパラダイムシフトを目指す。そして、この手法による広範な物理現象(たとえば量子乱流)への取り組みの道筋を確立することが10年間の目標である。

4. 位置づけ

自由度逓減手法は、流体力学における渦構造など乱流コヒーレント構造研究に端を発し、近年は動的モード分解法が開発されるなど、応用が加速している。この手法は現状でもトラスプラズマの構造形成など複雑運動を解析する有用な手法となるが、機械学習などの分野では日々研究が進むフロンティアでもある。このユニットの研究は、この盛んな研究の進展の恩恵を享受するとともに、実験・検証可能な高自由度複雑現象をこのフロンティアの対象として提示し、フロンティアをさらに推し進めることに貢献する。我々にはMHDをはじめとする様々な現象のシミュレーションの豊富な蓄積があり、自由度逓減手法が有効と確信される事例も多数存在する。この蓄積をシミュレーション手法の確立に利用し、研究を大きく展開できることは、我々の優位性の一つである。

5. 研究の方法

我々の研究方法は以下の2点から構成される。

- (1) 自由度逓減手法による最適基底シミュレーション法の開発: この手法がシミュレーション手法として有力にならなかった原因(例えば自由度の打ち切りがもたらす数値不安定)を、サブスケールモデルの開発や、機械学習分野の知見も活かした新しい最適基底計算法の開発で解消する。
- (2) 複雑運動の軌道探索: (1)で開発する新手法や、従来手法によるシミュレーションデータに自由度

逡減手法を適用し、数値解の軌道探索を行う。流れ場の不安定周期軌道（図1）の存在と重要性は中性流体乱流で示されており、このような軌道の探索と自由度逡減手法は強く結びついている。MHD 乱流ではヘリシティが、トラスプラズマでは磁場が解の軌道を拘束するため、衝突頻度の低いプラズマでもこのような特徴的な軌道の存在が期待される。たとえば RFP ではヘリカル緩和構造の出現のように、極少数自由度が支配することが強く示唆される複雑運動現象が実験的・数値的に調べられている(図2)ことから、自由度逡減法の適用対象として期待される。

これらの研究では、手法確立にあたって、大規模シミュレーションデータを基にした自由度逡減と最適基底の計算が必要不可欠であり、プラズマシミュレータとその後継機（2025年ごろには現行プラズマシミュレータの数倍規模の更新が望まれる）が必要である。

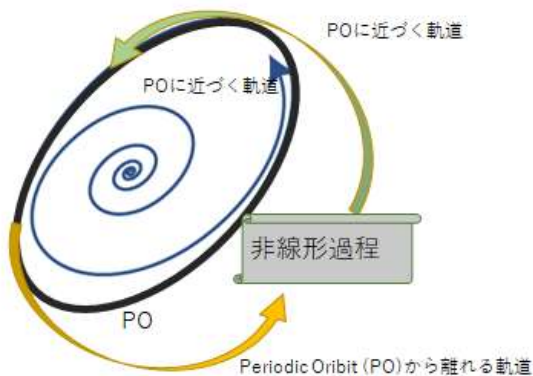


図1: 不安定周期軌道のイメージ

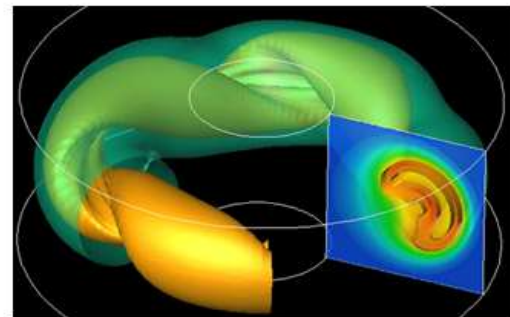


図2: RFPのMHDシミュレーション。不安定性の成長後、準定常状態が続き、その後に再度不安定化するなど、高度な自己組織化現象がみられる。

6. 自己評価

1) 未来志向であること

我々の研究は、力任せの大規模シミュレーションから、場の複雑構造を反映した最適基底関数を利用したコンパクトシミュレーションへとパラダイムシフトを指向するものである。これは研究分野を問うことなく広く応用可能で、特に MHD 現象への応用は未開拓部分が多く、新展開が期待できる。

2) 目標を具体的に示していること

新しいシミュレーション手法の開発は規模の小規模化を達成すること、軌道探索手順（これは対象とする現象によって異なる可能性がある）が確立されることで、完結可能である。

3) 10年後に学术界に輝くテーマに育つこと

この研究テーマは、古くからの概念が最近の流体力学や深層学習分野でのブレイクスルーを受けて大きな展開が可能になった。このテーマと核融合研の大型シミュレーション研究の組み合わせにより、より広範な学术分野や実学への応用の道が一気に開ける可能性がある。

4) 多様な「個人のテーマ」を包摂できること

この研究テーマでは、乱流やトラスプラズマの不安定性だけでなく、様々な物理現象・過程を対象としたシミュレーションを遂行し、実験観測や解析モデルとの検証を通じて自由度逡減手法を模索してゆく。逆に我々のシミュレーション手法が確立することにより、個々の現象に対する理解も深まる。このような相互深化により本ユニットの目指す方法論が完成してゆく。この点で、様々な個人のテーマを十分に包摂できるテーマである。