

ユニットテーマ提案書

1. ユニットテーマ

プラズマ物理学・核融合科学から探求する「創発と消失」の科学

2. 提案者（氏名・所属）

伊藤篤史、川手朋子、河村学思、菅野龍太郎、後藤基志、登田慎一郎、仲田資季、永岡賢一、沼波政倫、松岡清吉(NIFS, 50 音順)、佐々木真(日本大学)、佐野孝好(阪大レーザー研)

3. テーマと研究内容の概要

創発という宇宙・生命・社会までの現象を広く含みつつもやや抽象的な概念がある。プラズマ物理学・核融合科学の観点から、創発現象を「系を構成している集団の要素間の相互作用の結果として構造・秩序・運動・機能などの新たな性質が発現する現象」と捉え、新たな方法論の開拓とともに創発原理を探求する。また、創発したものが崩壊・緩和等によって**消失**する過程も対にして扱うことで、創発研究の先行分野に対しても新しい流れを生み出す。

『創発と消失』というテーマに対して、時間・実空間に加えて速度空間にも自由度が広がるプラズマの特徴を活かした『4本の柱』で研究を展開する。

柱 1. 乱流揺らぎ駆動の創発と消失：“Beyond Fourier 分解”

巨大自由度と強い非線形性を有する乱流や揺らぎの中では、秩序構造の形成やその崩壊がしばしば生じる。ここではプラズマ乱流とゾーナルフロー形成、磁場形成、揺らぎ・渦・輸送の大域伝搬、局在化、構造同期などを題材にして、乱流場や磁場の幾何学的数理解造から創発と消失の機構に迫る。磁場構造と乱流揺らぎの結合から生じる高次元非線形構造のランドスケープやトポグラフィを数理・情報科学的手法を用いて分析・定量化し、従来のフーリエ分解による相互作用表現を超えた新しいエネルギー/エントロピー伝達解析やそれらに基づいた縮約モデルの構築を目指す。

柱 2. 速度分布歪み駆動の創発と消失：“Beyond moment 展開”

実験における計測技術の進展、天文観測技術の進展により非平衡プラズマの速度分布関数の高精度計測が注目され始めている。ここでは、非等方性や非マクスウェル性といった、低次モーメントでは捉えられない速度分布関数の歪みや揺らぎを計測し、速度空間だけでなく実空間にまで及ぶ構造および秩序形成との因果関係を見出すことを目的とする。本活動により、新しい流体描像を開拓すると共に、核融合プラズマの閉じ込め性能やプラズマスラスタの推進力などに与える影響を機能として評価し、機能向上のための能動的な手法の開拓も視野に入れる。

柱 3. 長時間駆動の創発と消失：“Beyond the time”

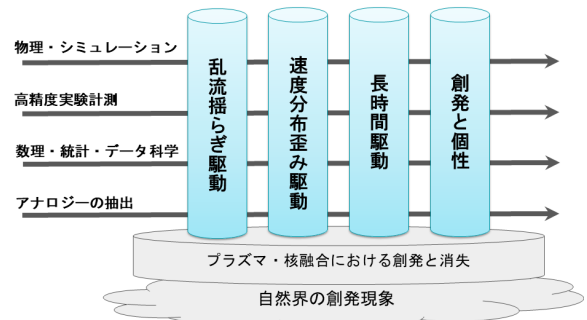
プラズマ照射下の固体表面現象を俯瞰して見ると、電子顕微鏡でようやく見える空間的にミクロな構造変化を起こすために秒・分・時間といった長時間が必要であり、時空間スケールにギャップのある系である。長時間の積み重ねによって、例えば固体表面の孤立した原子の移動があたかも集団現象のように見える。マルチスケール解析の次世代手法として、運動の時間方向だけを粗視化するギャップドスケールシミュレーションを展開し、長時間駆動の創発と消失を研究する。

柱 4. 創発と個性：“Beyond 散逸機構”

社会システム実験に使われるマルチエージェント計算としてプラズマで開拓された PIC 法が利用できることから、個体間の相互作用よりも場を介した相互作用が人流等の複雑系を司る可能性が示唆される。言い換えれば個体が持つ個性という自由度が消失し、集団としての新たな個性が生成される。一方、渡り鳥の群れや魚群のように、個性を残しつつ集団の構造・機能を創発する系も存在する。集団構造を Wilson 線り込み群の漸近安定超面、創発機構を線り込み群流れと捉えなおす。一見すると両極端にある生態系とプラズマ系を数値計算によってアナロジーの橋渡しを行い、創発機構における個性の消滅・生成の役割を明らかにし、従来の統計的散逸機構を超えた理解を目指す。

4. 位置づけ

掲げた 4 つの柱は独立に発展してきた研究テーマの様で、しかし俯瞰してみれば、集団から生ずる創発現象という観点で一般化して拡大展開することができる。互いに新たな知見を提供し合い、個々では突破できなかった問題の解決を目指す。個別分野で独自に築いてきた方法論の開発と共有で柱に対して横串を通す。さらに他分野連携を積極的に行い、学术交流を超えて新たな学問領域を形成する。



5. 研究の方法

理論・シミュレーション、データ科学、数理・統計学の応用を展開する。問題に合わせた計算機資源として、大自由度系の計算にはペタフロップス級計算機、長時間駆動や個性の探求にはワークステーションやヘテロジニアス環境などが想定される。また、実験データに基づく非平衡および非等方的速度分布関数の高精度計測と、付随して起こる創発現象・消失現象の関係性を見出す。常伝導 LHD、ヘリオトロン J、プラズマスラスタ、HYPER-I、TPD-II、レーザー生成プラズマ、天体プラズマ観測、NBTS(Neutral Beam Test Stand)、液晶電気対流乱流などの実験が想定される。

6. 自己評価

1) **未来志向であること**：エネルギー源という単一目的研究として捉えられていた核融合研究を学術として大きく展開し、プラズマ物理の観点で創発と消失の概念をより鮮明化させ、複雑系科学・生物科学・社会学など各論に散らばっていた創発現象の研究に対して新たな潮流を生み出す。

2) **目標を具体的に示していること**：プラズマ・核融合の問題にブレイクダウンすることで理工学としての創発と消失の概念を確立し、方法論も含めて分野内外へ浸透・波及させる。その実現に向けて、相互に関連した具体的な研究課題となる柱に対し、Beyond～形式の挑戦的目標を設定した。

3) **10 年後に学术界に輝くテーマに育つこと**：創発という概念はプラズマ・核融合分野には現状で殆ど普及してない。分野の発展とともに細分化されていたプラズマ・核融合研究の諸課題を、創発という観点から捉えなおし、個々の研究だけでは到達できないフロンティアを目指す。

4) **多様な「個人のテーマ」を包摂できること**：創発と消失に対応する現象を、ここで挙げなかった新たな柱として追加することができる。理論・実験問わず分野間連携も視野に、新たな方法論の開拓という横串を重視した研究も推奨される。