研究室

複雑性科学理論研究室

沼波政倫准教授

*沼波政倫　准教授　*Masanori Nunami, Assoc. Prof.*

自然界で我々の身近に起こる殆どの現象は，外界と構成要素が相互作用しながら，非平衡で非線形という重要な性質を持っています．そのため，その振る舞いを解析的に予測することは極めて困難です．本研究室では，この複雑な性質，すなわち「複雑性」を研究しています．複雑性を示す系では，構成要素の個性だけでは予測できない多様な特性が自己組織的に発現したり，ほんの些細な揺らぎが系全体に及ぶ程の変動に発展したりします．複雑性の科学とは，複雑系に潜む普遍的な特徴を捉えようとする学問です．このような系は，実験と理論という従来の物理学の研究手法では，その理解に到達することができず，現代科学の重要な研究対象の一つとなっています．私たちは，この複雑性に対して，プラズマを主な研究対象として計算機シミュレーションやデータ科学的手法を武器に科学していきます．

研究内容

プラズマは，複雑性を有する物理系の代表例です．構成要素は，電子やイオンといった荷電粒子と電磁場だけの単純なものですが，そこに表出する現象は極めて多様性に富んでおり，宇宙空間のオーロラや太陽活動，雷雲中の放電現象など，あらゆる場面で，我々の前に複雑性を垣間見せてくれます．我々は，プラズマの複雑性をコンピュータ上で再現して，そこに潜む普遍性を見出そうとしています．

高温プラズマの乱流

高温に熱せられたプラズマは核融合反応を起こします．そして，そのエネルギーを利用しようとするのが制御核融合です．強力なコイルを用いてプラズマを閉じ込める磁場閉じ込め方式は，世界各国で研究が進められていますが，装置内で発生するプラズマの密度や温度のわずかな揺らぎが要因となって，大小様々な大きさの渦が形成され，「乱流」と呼ばれる状態に陥ります．このプラズマ乱流は，非常に広い時空間スケールに跨がる複雑性の物理現象の宝庫とも言え，世界中の研究者の興味を惹きつけています．我々は，スーパーコンピュータを用いた第一原理シミュレーションによって，この高温プラズマ乱流の物理に挑んでいます．

複雑性科学のデータ科学的アプローチ

スーパーコンピュータの急速な性能向上に伴って，プラズマの様子をシミュレーションで正確に追うことができる例が増えてきました．このような大規模シミュレーションからは膨大で豊富なデータが得られます．これまでは，そのデータから簡単な物理量に落とし込み，プラズマの挙動を理解しようとしてきました．しかし，大規模なデータには，まだまだ拾い切れていない多くの情報が潜んでいます．近年，深層学習や人工知能といったデータ科学の視点に立った研究が盛んですが，プラズマシミュレーションに対しても，このデータ科学からの解析に取り組んでいます．これまでの方法では捉えられていなかった物理機構やパラメータ構造，プラズマの複雑な挙動を司る法則の解明に向けて，データ科学的アプローチからも挑んでいます．

計算機シミュレーション手法開発

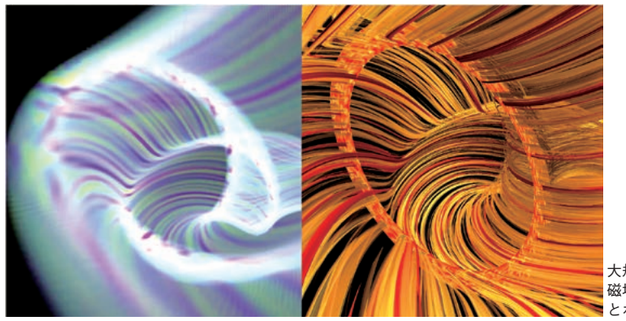
計算機シミュレーションは，複雑なプラズマの振る舞いを理解するためには不可欠の研究手法です．しかし，いくら最先端のスーパーコンピュータであっても，その性能には限界があるため，私たちは，対象に応じて適材適所で計算アルゴリズムを選択しながら，その時代に応じた計算機の能力を最大限に発揮できるように，シミュレーションプログラムを開発していかなければいけません．そのためには，コンピュータのアーキテクチャーや特性，最新のコーディング技術を把握し，さらには独自に新しい手法を開発する必要があります．我々は，国内外のスーパーコンピュータを使って，この課題に取り組んでいます．新しい手法を不断に開発し，複雑性科学の研究範囲を拡大させていきます．

Σ_T研究室のメンバー

研究環境

研究室は，岐阜県の核融合科学研究所内にあります．ここには，最先端のスーパーコンピュータ，演算サーバ，グラフィックワークステーション等が設置されていて，大学院生でも自由に使うことができ，複雑性を計算機により科学する最高の環境があります．ただし，コンピュータは所詮道具であり，専門知識は必ずしも事前に必要ではありません．それよりも大事なのは，「やる気」です．最先端の計算機とともに，複雑性を科学しましょう！！

核融合科学研究所に設置されているスーパーコンピュータシステム「プラズマシミュレータ」



大規模乱流シミュレーションで得られた磁場閉じ込めプラズマの密度揺らぎ（左）とポテンシャル揺らぎ（右）

最近の修士論文・博士論文の紹介

2022年度修士論文「Relation among turbulent fluctuations, zonal flows, and transport coefficients in time series data of gyrokinetic simulations」（藤井洸太郎）
磁場閉じ込めプラズマ輸送の第一原理シミュレーションから得られた時系列データに着目して，輸送を表現する現象論モデル関数を拡張し，従来と比較して2桁程度の輸送予測精度向上を実現した．

2022年度修士論文「高速点火レーザー核融合における高速電子のガイディングに関するシミュレーション研究」（松岡良洸）
高速点火レーザー核融合における燃料へのエネルギー変換効率の低下を回避するため，高強度の先導極超高強度レーザー（EILL）照射による高速電子をガイディング手法についてシミュレーション解析し，空洞ターゲットを導入することで高いガイディング効果が得られることを実証した．

2019年度修士論文「レーザー核融合における光線追跡法の高速計算法の開発および評価」（大津貴志）
光線追跡法におけるエネルギーデポジットに分配法を導入して計算精度を保ちながら必要なメッシュ当たりの光線数を低減し，時間発展に可変時間ステップを用いたスキームを導入し，レーザー吸収計算を約40倍高速化した．

2018年度博士論文「Plasma Simulation Analysis for Formation Mechanism of Periodic Nanograting Structures by Laser Pulses」（Amany M. Gouda）
高強度フェムト秒レーザーを固体表面に繰り返し照射すると自己組織的に形成される周期的ナノ構造について，レーザー強度によって異なる二つの形成機構があることを粒子コードのシミュレーション研究により明らかにした．

http://www.sigma.phys.nagoya-u.ac.jp/sigmat/

*連絡先　nunami.masanori@nifs.ac.jp

教授：0／准教授：1／助教：0／DC：1／MC：1