

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。

ユニットテーマ「スマートグローバルシミュレーション」

4. 定式化（アプローチ）

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。

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

- 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
- 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。

運動論的MHDハイブリッドシミュレーション

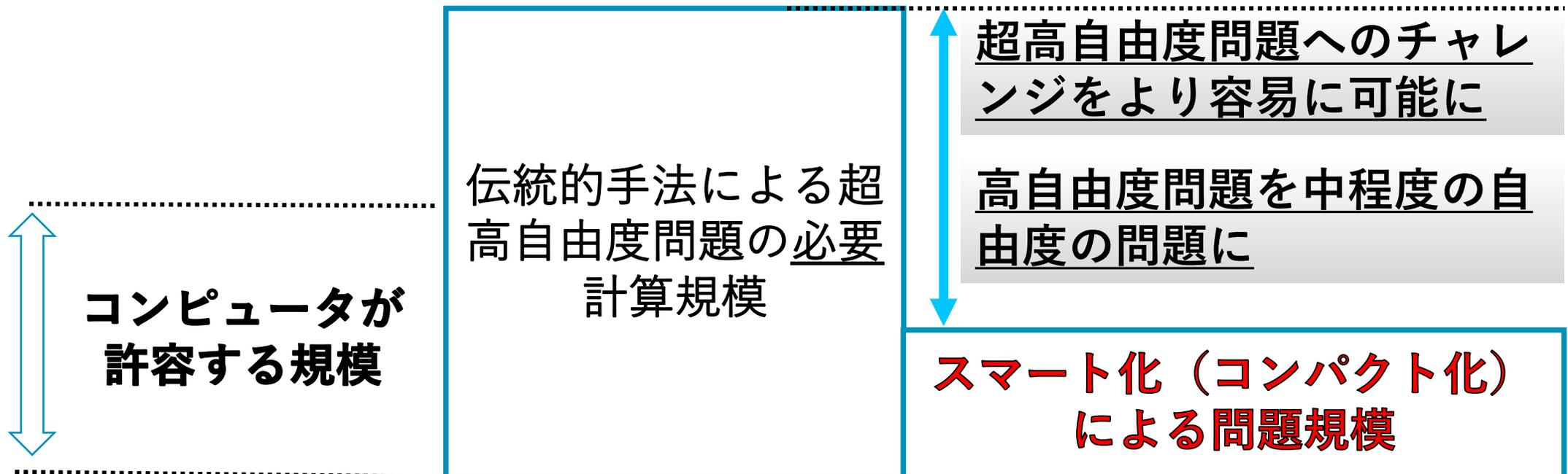
- 運動論的MHDハイブリッドシミュレーションコード MEGA =
 - 粒子法（運動論的効果）：熱イオン、高速イオン、高エネルギー電子
 - 流体モデル：電場、磁場、電子圧力
 - ビーム入射, ICRF加熱, 衝突の導入および、マルチフェーズ法の開発により、長時間の高速イオン分布形成過程の計算が可能
- MEGAを多くのヘリカル型装置、トカマク型装置に適用して、実証研究を推進してきた
 - ヘリカル型 LHD, Heliotron J, W7-X, CFQS
 - トカマク型 DIII-D, JT-60U, JET, TST-2, EAST, HL-2A, KSTAR, AUG, TCV, TFTR, ITER, JT-60SA
- 本提案では、ジャイロ運動論的ポアソン方程式を結合して静電ポテンシャルを解くことにより、MHD現象に加えて微視的乱流の計算を可能とする。

シミュレーションを制約する性能限界

- 乱流・不安定性・マルチスケール・マルチフィジックス
... 富岳全系でも実現不可能な問題が多数(「大艦巨砲主義」の限界)
- PS/富岳=1/50(Top500 Rpeak),
1/30(HPCG Rmax),
1/24.5 (Main memory) [PS 2~3 世代 (10-15年) ➡ 富岳]
- 「世界最大」の規模&成果を直接狙うなら「富岳」「ポスト富岳」
- 「PS」「ポストPS」で「富岳」「ポスト富岳」と同等程度
(10-15年先取りした) 学術的成果を得るためのアプローチを開発

大艦巨砲主義に代わる「限界突破」

- 「頭の使いどころはどこか」「より多数の研究者が参加できるテーマを」「アーキテクチャについても」
- データが大きいなら圧縮を（次元低減）,
- 計算量が大きいなら計算量の圧縮 and/or 高速計算法を(AMR, LES),
- 必要ならHW（新しいアーキテクチャー, 装置)も最大限活用



微視・散逸スケールのデータ科学的手法によるモデル化

- 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。

関連分野との連携

- 場の方程式による複雑現象を伴うシミュレーション分野全般
- 次元低減等
低次元力学系の物理・数理【古典力学・数理科学】
次元遡減法の開発【データ科学・数理科学・計算科学】
- 先進的な可視化手法との連携【データ可視化分野】
例： 4-Dimensional Street View (4DSV) による in-situ 可視化
- ハードウェア的な側面【計算科学・計算機科学】
 - ✓ CPU・メモリアーキテクチャー
 - ✓ 大量データへのアクセスの改善等（IOデバイスへの対応）
 - ✓ 新しい演算加速器（FPGA, 量子コンピュータ等の可能性）

ユニットテーマ「スマートグローバルシミュレーション」

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。

ユニットテーマ「スマートグローバルシミュレーション」

6. 独自性と優位性など

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。

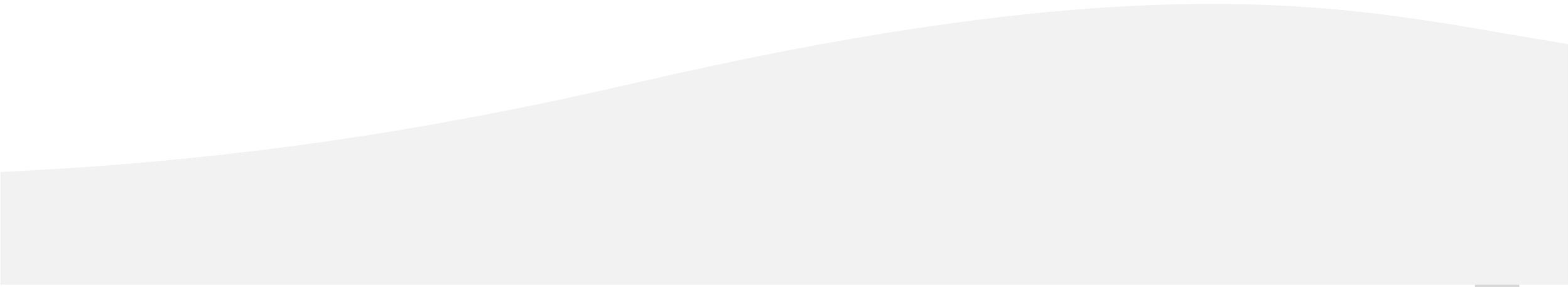
“シミュレーション+データ”科学手法の研究では、流体乱流研究におけるデータ科学的手法の研究や、乱流微細渦構造、乱流の階層性研究などの実績に基づく散逸構造研究の独自性・優位性がある。

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える。

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。

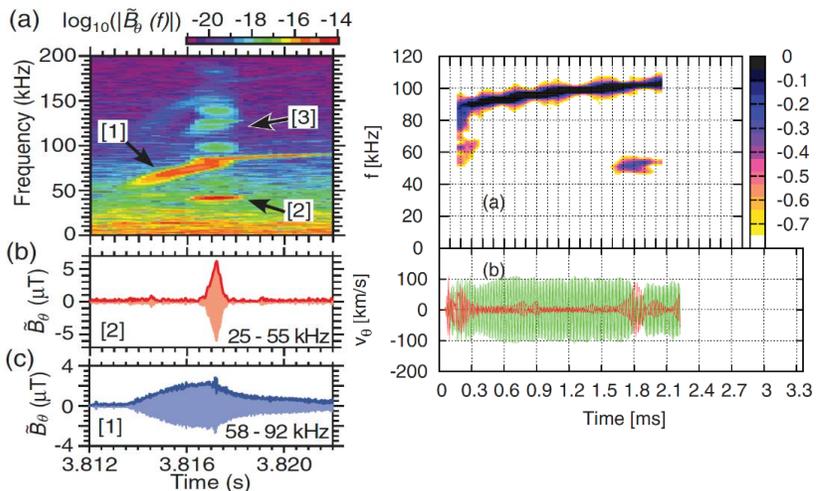


參考資料

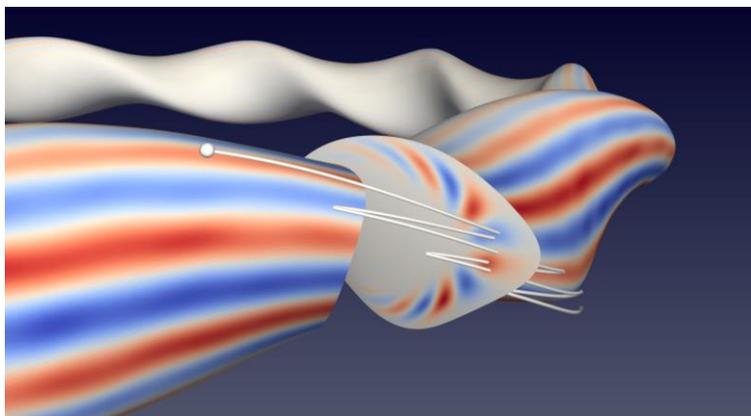


運動論的MHDシミュレーション研究の進展 (1)

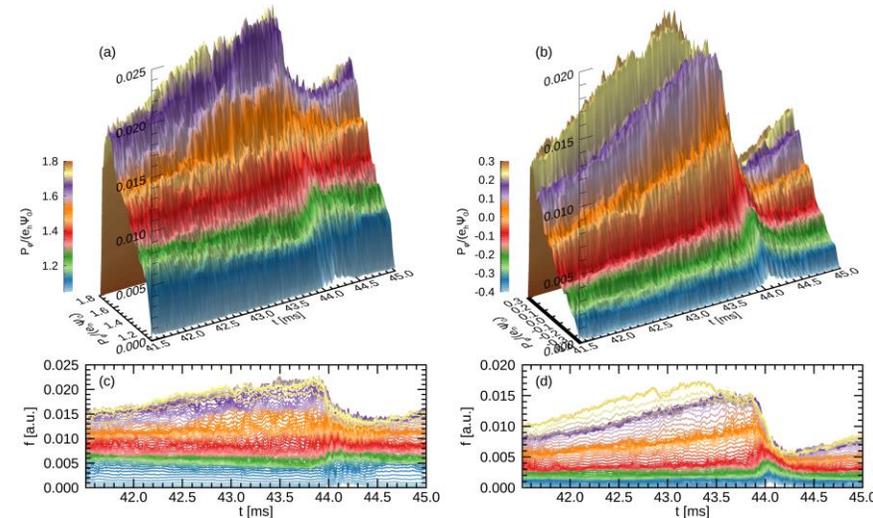
LHD実験における シミュレーション
EGAM [Ido+ 2016] [Wang+ 2018]



LHDにおけるMHD不安定性と
捕捉イオン軌道 [Sato+ 2019]



高速イオン分布関数の時間発展
[Todo 2019]



LHDにおいて観測されたEGAM
の周波数変調と第2モードの励
起をシミュレーションで再現。

捕捉熱イオンの運動論的効果が、
LHDプラズマの優れたMHD安定
性の物理機構であることを解明。

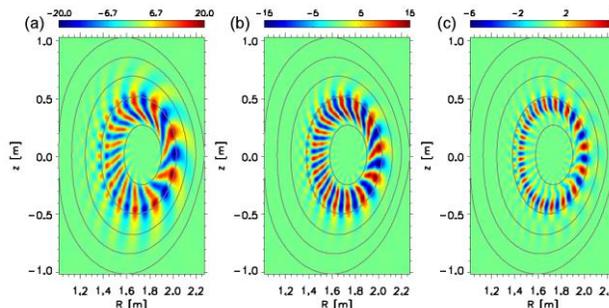
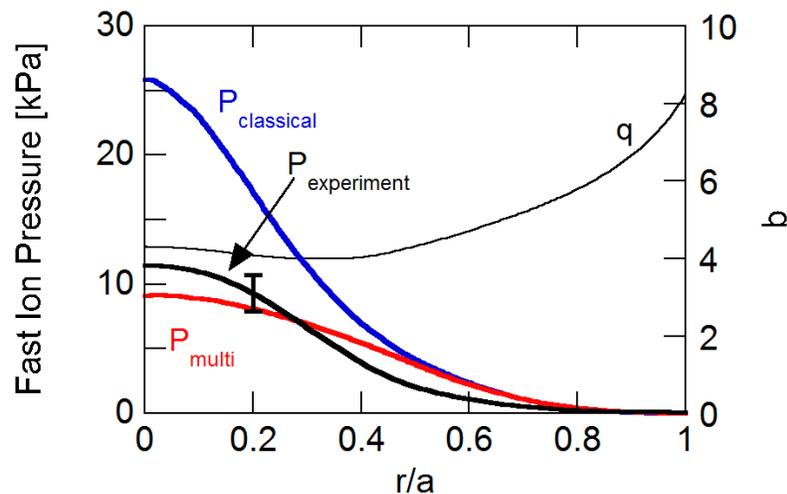
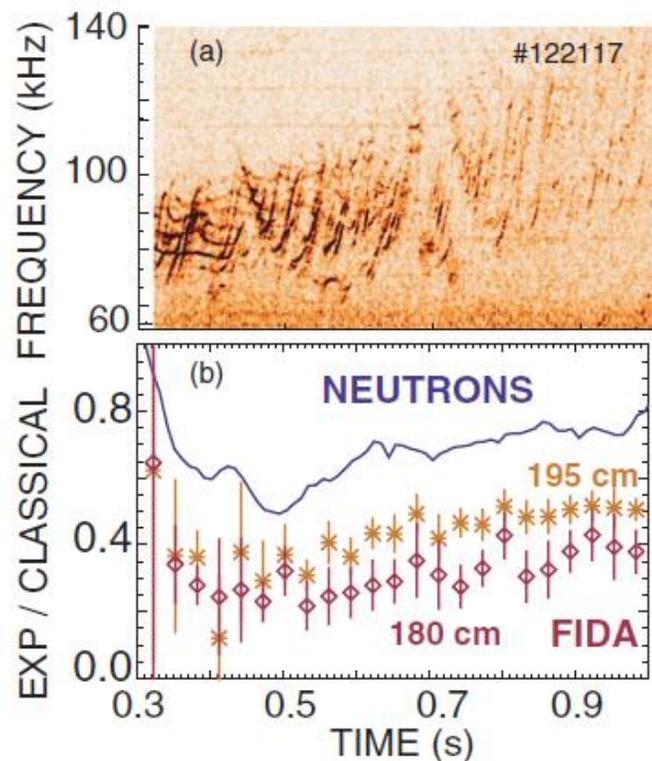
複数のアルフベン固有モードの共
鳴の重なりが**大域的に発生して**、
バースト（突発現象）をトリガー
し、高速イオン分布を崩壊させる
ことを実証。

運動論的MHDシミュレーション研究の進展 (2)

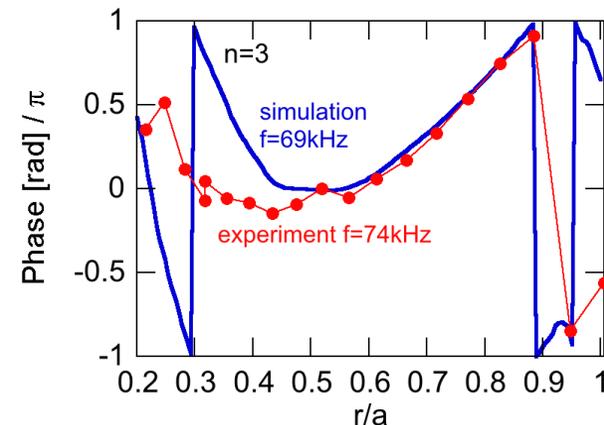
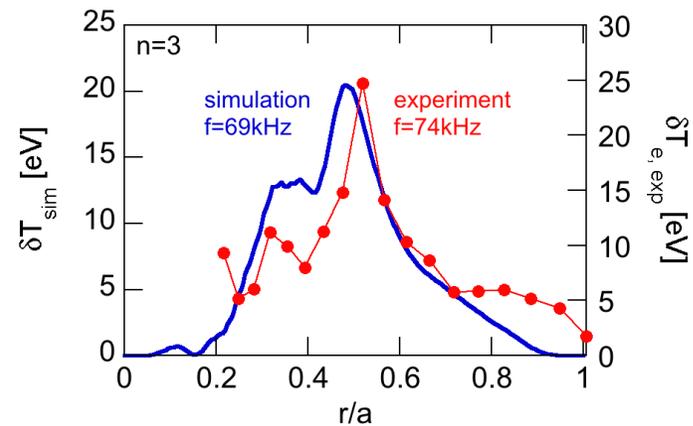
DIII-D実験におけるアルフベン固有モード (上)、中性子と高速イオン圧力の減少 (下) [Heidbrink+, PRL 2007]

中性粒子ビーム入射、粒子間衝突、MHD揺動を含むハイブリッドシミュレーション [Todo+, NF 2015]。実験における高速イオン分布平坦化を再現した。

電子温度揺動分布[振幅 (上)、位相 (下)]に関するシミュレーションと実験の比較 [Todo+, NF 2015]。



電子温度揺動2次元分布。



コンパクト化・スマート化のために

様々なアプローチ

従来手法

AMR (アルゴリズム)

CIP, LES (方程式ベース)

Reduced Order Modeling
(DMD, POD, KL etc.による低次元化)

データ科学的手法

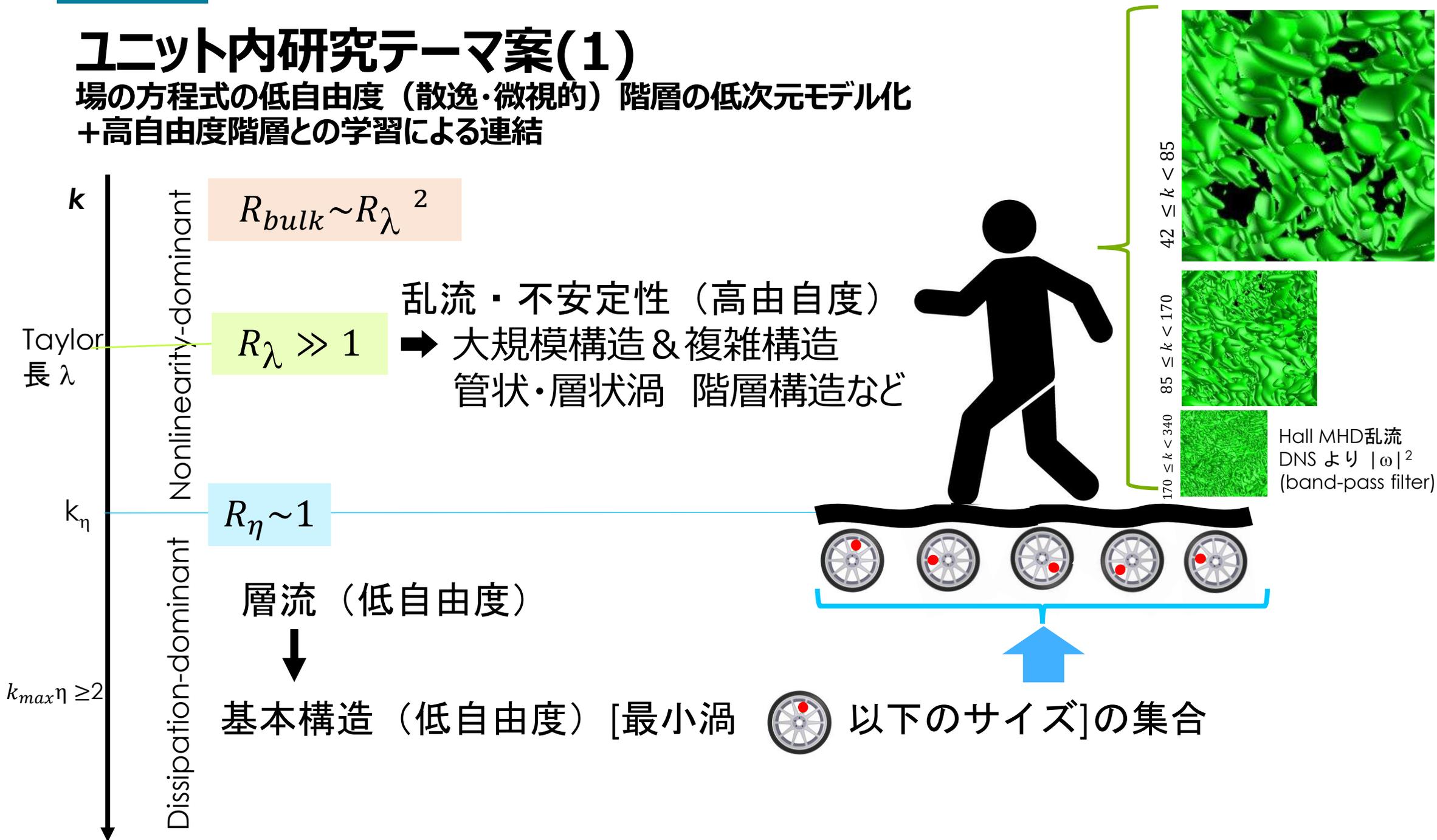
散逸階層の低次元モデル化と慣性小領域との学習による連結
(低自由度階層—高自由度階層 連結)

散逸・微視的階層構造 (管状渦階層構造・局所散逸率)
学習・予測

計算科学・計算機科学・データ可視化

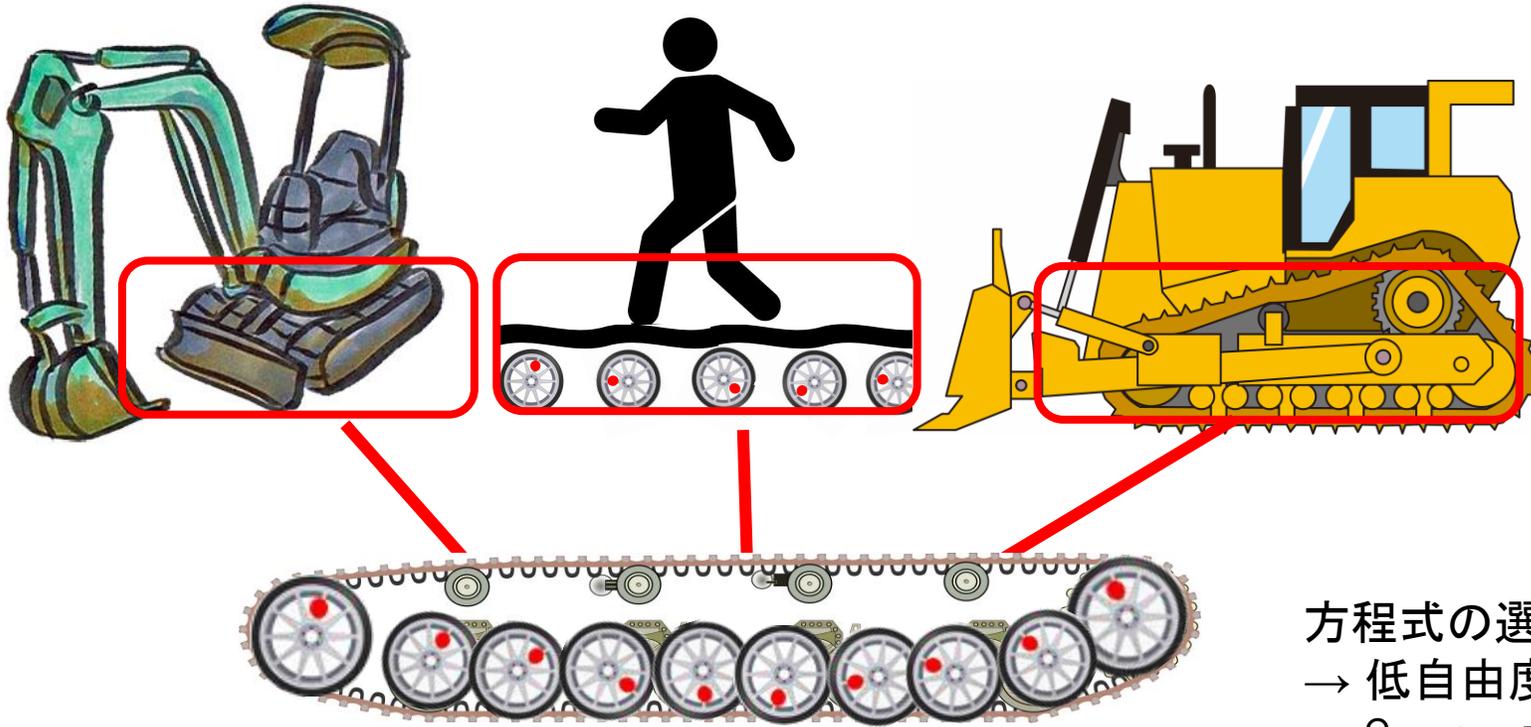
ユニット内研究テーマ案(1)

場の方程式の低自由度 (散逸・微視的) 階層の低次元モデル化
+ 高自由度階層との学習による連結



ユニット内研究テーマ案(2)

場の方程式の低自由度（散逸・微視的）階層の低次元モデル化
+高自由度階層との学習による連結



上部構造物 (大規模構造 & 乱流微細渦)
(高自由度階層)
== 方程式の性質が直接反映

高自由度階層-低自由度階層
2-way カップリング
(カップリング方法の研究が必要)

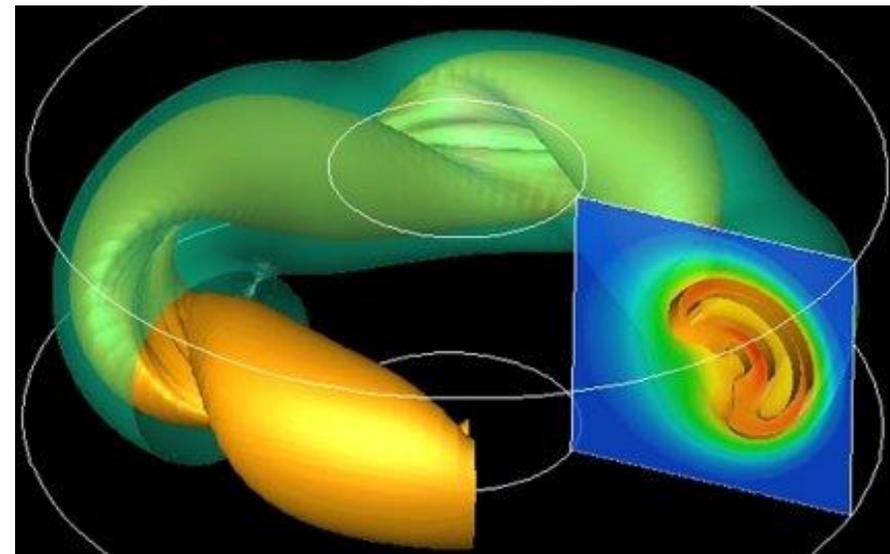
散逸階層（低自由度階層）：
類似のパーツ（最小渦、最小せん断層など）の集合
(散逸項の形状を反映、低次元化可能な要素の集団)

方程式の選択(NS, MHD, GP, etc.)
→ 低自由度階層のモデル化
→ 2-way カップリングの学習
→ 低自由度+高自由度 連結によるシミュレーション
(サイズ≒高自由度階層)
→ 成功すれば、他の方程式にも適用可能
(他分野への展開)

ユニット内研究テーマ案(3)

Reduced Order Modelling の探求

- トーラスプラズマ
準定常状態 \leftrightarrow 変形 : Dynamic Mode Decomposition (DMD)が有用
- 比較的少数のmode への射影
... 現象の理解に有用
- DMD : トーラスプラズマ不安定性解析と親和性
不安定性解析研究者の参加を期待



話題の本質はコンパクト化・スマート化の達成による研究の推進

➡ 既存手法、データ科学その他の区別なく、必要なものを開発、
利用可能な手法は採用