

複合大域シミュレーション ユニット

2023年度ユニット成果報告会 2024年5月9日

メンバーリスト

ユニット研究戦略会議

所内メンバー

樋田美栄子、三浦英昭、藤堂泰、洲鎌英雄、水口直紀、堀久美子、山本孝志、佐藤雅彦、石崎龍一、關良輔、WANG, Hao

所外メンバー

石澤明宏（京大）、陰山聡（神戸大）、後藤晋（阪大）、高橋俊樹（群馬大）、田口聡（京大）、辻義之（名大）、町田真美（国立天文台）、渡邊威（名工大）、渡邊智彦（名大）

ユニットの目的

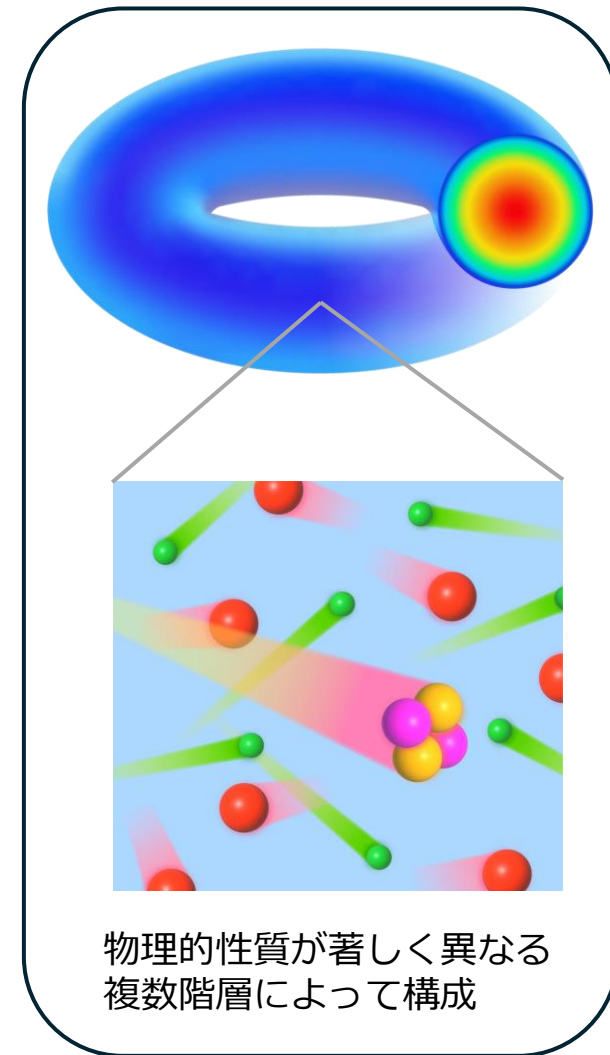
多階層によって構成されている系全体の挙動を理解するためには、各階層の個別のシミュレーションだけでは不十分。

階層間の相互作用を考慮した大域的シミュレーションが必要。
多くの学術分野で重要な課題だが実現は容易ではない。

要因：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。

目的

この問題を解決するシミュレーション手法を開発して、
複合大域シミュレーションを実現し、シミュレーション
研究を推進する。



ユニットの目標

本ユニットではこの課題を、微視的階層との相互作用を正しく取り入れた大域的シミュレーションを実現する方法論の問題として捉える。

階層間や異なる物理モデル間を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。

2つの中核目標

- 1) 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の実現
- 2) 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

⇒ 信頼性の高いデータの創出、複雑現象の挙動予測・解明

アカデミックプラン：戦略 1

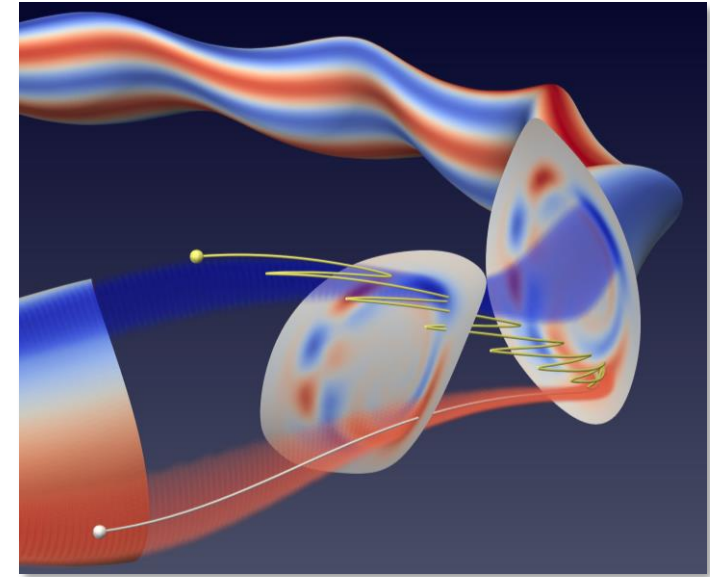
1. 磁場閉じ込め核融合プラズマ全体シミュレーションとその関連研究

高エネルギー粒子と熱イオンを運動論的に取り扱う
磁気流体ハイブリッドシミュレーションによる研究
を主軸とする

このシミュレーションコード(MEGA)は、これまで以下の装置
に適用され、信頼性が確認されてきた。

stellarator/heliotron: LHD, Heliotron J, W7-X, CFQS

tokamak: DIII-D, JT-60U/SA, JET, TST-2, EAST, HL-2A, KSTAR, AUG, TCV, TFTR, ITER

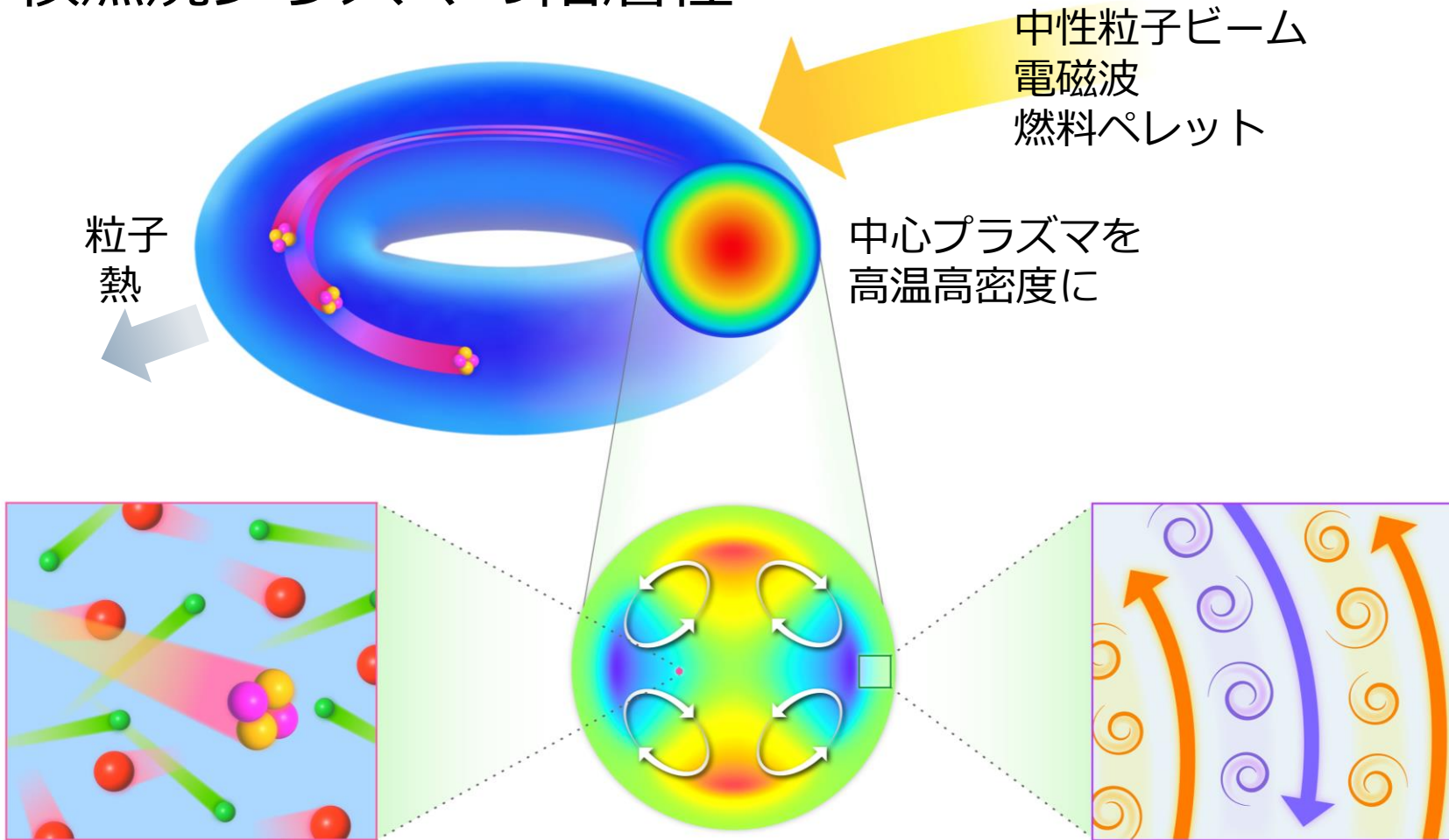


取り組むこと

- (1) MEGAを拡張 ⇒ 磁場閉じ込め全体の複合大域シミュレーションを実現
- (2) 実験との共同研究によるVerification and Validation (V&V)
自由な発想でシミュレーション⇒ 実験研究を先導する新たな現象の発見
階層間相互作用の解明、モデル化
- (3) 宇宙・天体プラズマに応用し、学際研究を展開
- (4) 理論と計算手法の高度化、物理理解の深化

MEGAを用いた研究戦略の概要

核燃焼プラズマの階層性



MEGA

巨視的揺らぎ (磁気流体)
+ 高速粒子と熱的イオンの
運動論的效果



拡張

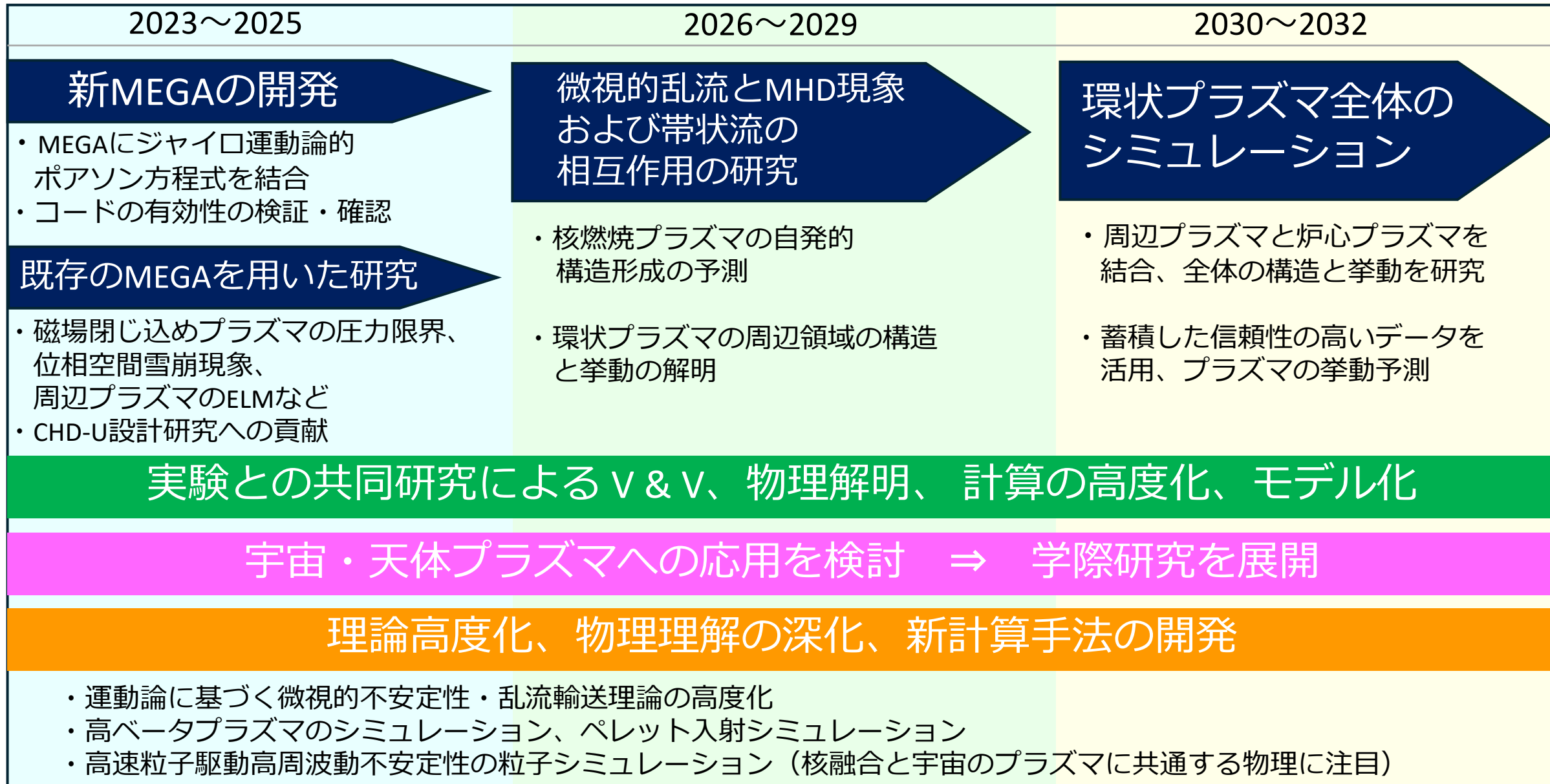
巨視的揺らぎ、
微視的乱流、帯状流の
相互作用を計算

核融合プラズマの全体の
シミュレーションを実現

未解決問題の解明、
挙動予測

高速粒子は宇宙でも普遍的
存在 ⇒ 学際研究を実施

MEGAを用いた研究とその関連研究：戦術（研究計画）



アカデミックプラン：戦略2

2. 実現象に近い散逸偏微分方程式系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とその関連研究

(拡張)MHD・中性流体・量子流体の乱流シミュレーションにおける散逸スケールのモデル化を中心とする

従来の乱流研究の大きな潮流である秩序構造・サブグリッドスケール・力学系アプローチの統合により、上記の目標を達成することを目指す。

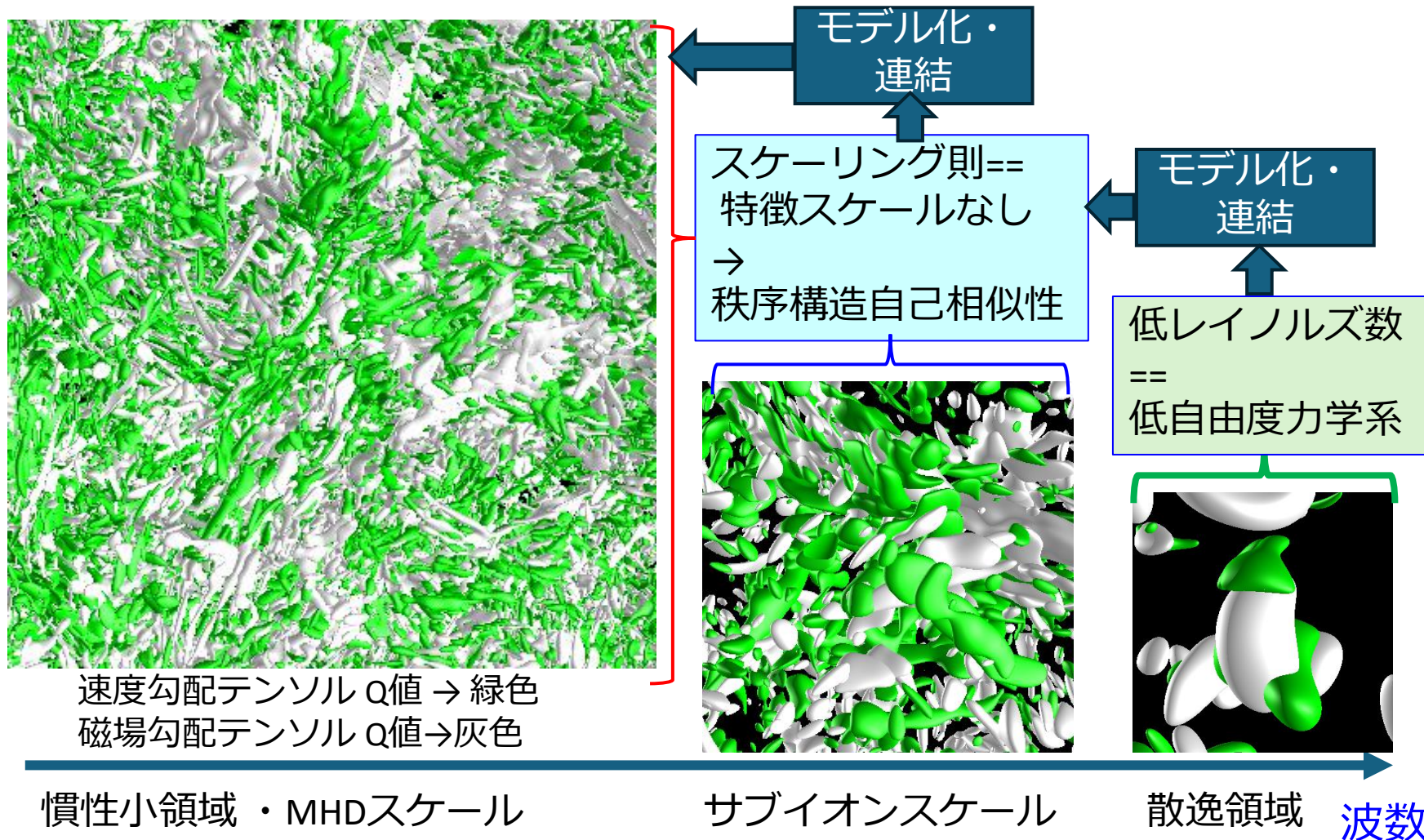
現在の主対象：(extended) MHD, Navier-Stokes, Gross-Pitaevskii eqs.
+ 回転, 相変化 (湿潤性), 粒子 etc.

取り組むこと

- (1) 乱流の微視的・散逸スケール構造（微視的階層）の解明
微視的階層の特徴づけ：(3 + 1)次元解析・データ科学的手法
- (2) 微視的構造・微視的階層の駆動と変調
巨視的構造・微視的階層の相互作用の解明
乱流・粒子相互作用, 回転, 波動等の影響
- (4) 相互作用のモデル化と実現象問題への実装
- (5) 方程式系から方程式系への水平展開 (他の学術課題への展開)

乱流の微視的・散逸スケール構造（微視的階層）の解明とモデル化研究に関する研究戦略の概略

散逸系乱流現象の階層性（事例：Hall MHD Q値）



乱流：スケール階層性
（特徴スケール無）

+ 散逸

「乱流」偏微分方程式系
多数に共通

スケール階層性によ
るモデル化

+
散逸領域モデル化

コンパクトなシミュレー
ションの実現 ⇒ モデル化
を方法論として確立、
様々な研究分野に展開

乱流の微視的・散逸スケール構造の解明・モデル化研究の戦術（研究計画）

2023～2027

2028～2032

基本アプローチの探求

対象（方程式系・現象）ごとの研究

- ・信頼性の高いシミュレーションデータの蓄積
- ・秩序構造とその階層性の解明と特徴づけ
- ・（3 + 1）次元解析（可視化など）

モデル化手法の研究

- ・物理ベースの挙動予測
- ・サブグリッドスケールモデル
- ・POD, DMD, ROM など数理科学・データ科学的手法

それぞれの対象でアプローチの有効性の検証・確認

方法論確立への展開

- ・方程式・対象間のアプローチの比較
- ・他の方程式の導入とテスト
- ・実現象への応用による信頼性の向上
流体工学シミュレーション応用
気象・防災シミュレーション
量子乱流実験連携
など

ズマ全体の

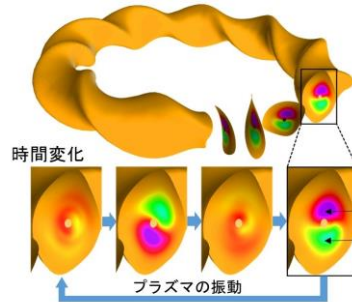
ネットワーク型研究加速事業・他大学との共同セミナー等による学際展開

競争的資金申請における学際連携

理論高度化、物理理解の深化、新計算手法の開発

2つの研究グループの協力

MEGAを用いた研究と
その関連研究

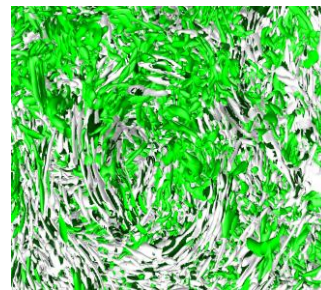


協力

流体計算手法の高度化
可視化
データ科学的手法の利用
オープンソース化
HPCシステム活用
物理議論



乱流の散逸階層・微視的階層
モデル化の方法論研究



促進

信頼性の高い
複合大域
シミュレーション
の実現

- ・信頼性の高いデータの創出
- ・複雑現象の解明と予測
- ・幅広い分野への応用

協力組織体制 1

MEGAを用いた研究とその関連研究

研究課題	所内メンバー	ユニットメンバー（所外）、ユニット外研究者、協力研究機関・装置等
新コード開発 V&Vと 物理解明	藤堂, 佐藤, Wang Hao, 關, Wang Jialei, Wei Shizhao, Li Hanzheng	京大・石澤、原研・井戸村、量研・相羽 ：新コード開発・検証 CHD-U設計グループ, LHD, JT-60SA, マックスプランクプラズマ物理研究所, ゼネラルアトミクス, セビリア大学, リスボン大学, ASIPP, 大連理工大学, 西南交通大学：実験研究 および 新装置設計
宇宙・天体プラ ズマへの応用	藤堂, 佐藤, 樋田	宇都宮大・川面、東北大・加藤、天文台・町田 ：宇宙・天体プラズマの専門家としてMEGAの応用を検討
運動論理論高度化	洲鎌, B. J. Kang	名大・渡邊 ：運動論理論の高度化、シミュレーションによる検証
高速粒子駆動 高周波動	樋田	京大・田口、小谷 ：宇宙空間観測、粒子シミュレーション ユニット間連携・メタ階層ダイナミクス 伊神 ：実験計測・数値計算
高ベータプラズマ	水口	群馬大・高橋、日本大FRC実験G ：極限的高ベータプラズマの計算手法開発、実験検証

国際共同研究遂行のために獲得した資金（科研費は除く）：自然科学研究機構・国際研究交流支援事業
「プラズマ閉じ込め性能に対する高エネルギー粒子駆動不安定性の影響」（代表者 Wang Hao）

協力組織体制 2

乱流の微視的・散逸スケール構造の解明とモデル化研究 [方程式系・対象ごとに分類]

研究課題	所内メンバー	ユニットメンバー (所外) ・ ユニット外研究者 ・ 協力研究機関
(拡張)MHD	三浦, 堀	東京大・半場 : サブグリッドスケールモデル, 岡山理大・荒木 : 非線形波動解析, 京都大・松本 : 乱流統計理論・渦構造解析, インド理科大学院(IISc)・R. Pandit, S. K. Yadav : Hall MHD乱流
ダイナモ・回転系	堀, 三浦	神戸大・陰山 : ダイナモシミュレーション, 英リーズ大・S.M. Tobias, C.A. Jones, 英グラスゴー大・R.J. Teed : ダイナモ理論・数値解析, 回転MHD波動, DMD
流体力学 (Navier-Stokes)	三浦, 堀	大阪大学・後藤 : 乱流、乱流・粒子相互作用, 乱流機械学習モデル, 大阪大学・清水 : 乱流, 乱流機械学習モデル, 名古屋工業大学・渡邊 : 乱流、乱流・粒子相互作用, 雲粒・湿潤乱流
量子流体	三浦	名古屋大学・辻 : 量子乱流実験, 筑波大学・吉田 : 量子乱流クロージャー・数値シミュレーション
可視化	三浦	神戸大・陰山 : 4DSV, 兵庫県立大・大野 : VISMOライブラリ開発
数理科学手法	堀, 三浦	大阪大学・清水 : 乱流モデリング, 神戸大・谷口 : 科学技術・物理のための深層学習基盤
HPC分野	三浦, 堀	東京大・中島, 住元, 筑波大・高橋, 名古屋大・片桐, 神戸大・横川 : シミュレーションコード高度化

国際共同研究遂行のために獲得した資金 (科研費は除く)

・Leeds Institute for Fluid Dynamics, University of Leeds ・LIFD Visiting Fellows Scheme「Geophysical and astrophysical fluid dynamics and data-driven approaches」代表者：堀久美子

・JST 先端国際研究支援事業・次世代のためのASPIRE 「深層科学技術計算：数理科学を基盤とする物理構造と深層学習の融合」 分担者：堀久美子、代表者：谷口隆晴 (神戸大学) およびクリストファーバド (バース大学) 13

学際研究ネットワークの形成

自然科学研究機構ネットワーク型研究加速事業 (2023~2027年度)
「多階層現象の複合大域シミュレーション研究拠点の構築」

代表者：三浦英昭

サブテーマを公募 (3年間+2年間), 6サブテーマ(2023~2025年度)

- 1 : 分子動力学法を中心としたマルチフィジックスシミュレーションへの挑戦
- 2 : 格子 QCDによる強磁場下における核融合反応のエネルギー生成計算
- 3 : 乱流現象の散逸階層・微視的階層のモデル化研究
- 4 : 磁場・レーザーの共創プラットフォームを用いたマルチスケール実験室宇宙物理学への挑戦
- 5 : エネルギー循環における劇的変容現象のシミュレーション研究
- 6 : 複合大域プラズマ

ユニット間協力 (複合大域シミュレーション, プラズマ量子プロセス, プラズマ・複相間輸送, 可知化センシング、メタ階層ダイナミクス)、**他分野・他研究機関・他大学と連携**

学際研究ネットワークの形成

全体の活動

- (1) 事業キックオフ会合 (8/29/2023) 各サブテーマ間認識共有
- (2) 進捗報告会 (2/28/2024) : サブテーマ報告 + 招待講演

招待講演リスト

1. 川口秀樹(室蘭工大) 「磁化プラズマ中のミリ波渦場の伝搬解析, および, らせん導体によるUV光渦の散乱解析」
2. **清水雅樹(大阪大)** 「壁面乱流遷移における乱流パターン形成過程」
3. 千秋元 (高知高専) 「大規模流体シミュレーションで明らかにする初期宇宙の星・銀河形成」*
4. **堀久美子 (核融合研)** 「地球ダイナモにおける遅進磁気ロスビー波」

* 報告会を契機に異なるサブテーマ間の共同研究開始 青太字: 複合大域シミュレーションユニットメンバー

各サブテーマ間の乗り入れ (セミナー等の情報共有)

- (1) International Workshop on Extreme Plasma Physics: Fusion of Magnetically Confined Plasmas with Lasers (8/26/2023)
- (2) 機械学習講習会 (3/21/2024)
複合大域シミュレーションユニット (サブテーマ3) より清水雅樹先生 (大阪大学) も講師に
- (3) 第19回名工大・核融合研 共同セミナー 伊藤靖仁先生 (名古屋大学)
「噴流場における輸送現象の基礎と噴流制御に向けた最適初期条件の同定」

特筆される成果 と見込み

特筆される成果と見込み 1

MEGAを用いた研究とその関連研究の成果

- ・新MEGAコードの開発：熱イオンを運動論的に扱うMEGAコードをイオン温度勾配不安定性に適用、その妥当性を検証。今後、イオン温度勾配不安定性乱流の計算を実施して妥当性を検証するとともに、計算の精度と負荷のバランスを考え、最適な計算モデルを構築する。
- ・現MEGAコードを用いて、MHD安定性やMHD突発現象に対する運動論的效果を解析、熱的イオンの運動論的效果や高速イオンによる波動励起などについて新たな成果を得た。これらについて、IAEA-FECにて3件の研究発表を行い、論文を投稿した。
- ・運動論理論の高度化、MHD近似が適用できない高周波の粒子シミュレーションについてそれぞれ論文を発表。複数の分野の国際・国内会議で研究発表を行った。
- ・MEGAを宇宙プラズマに適用するための検討を開始。今後本格的な研究へと繋げていきたい。

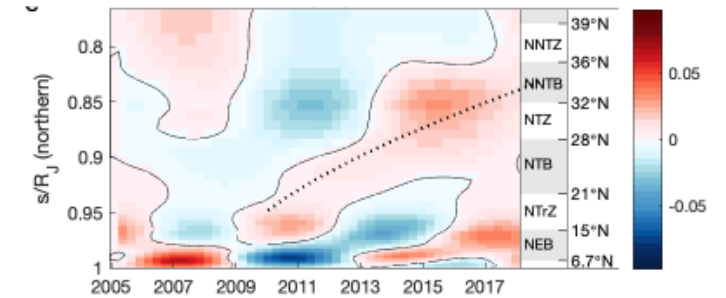
特筆される成果と見込み 2

乱流の微視的・散逸スケール構造の解明・モデル化研究

・回転 MHD 波の線形理論、球殻 MHD ダイナモシミュレーション、および、赤外撮像データのデータ駆動型解析などを基に、木星深部におけるねじれアルヴェン波を提唱・初検出。

Nature Astrophysics に論文掲載。

プレスリリース; メディア報道 29ヶ国133件以上 (含 BBC Radio)



・Hall MHD乱流の研究において、Kolmogorov的な現象論による乱流発達と空間構造・間欠性などの特徴と、一般化されたElsasser変数によるイオンサイクロトロン・ホイッスラーモード分解の関係性を示した。この成果は**AAPPS-DPP2023のプレナリー講演**として発表。2024年度には論文として投稿する見込み。

・Kuramoto-Sivashinsky方程式の複雑パターン形成を題材に、データ科学的手法を用いてサブグリッドスケールモデルを開発する研究に着手。サブグリッドスケールモデルを記述するのに最適な状態変数の探索など、検討課題が明らかに。

セミナー実施

1. 2023年8月24日, 小林大地(日本大学)『高ベータFRCプラズマの超音速衝突実験の現状と実験室宇宙物理学への挑戦』
2. 2023年8月31日, Arno Vanthieghem (自然科学研究機構共創戦略統括本部・アストロヒュージョンプラズマ物理研究分野 国際特任研究員)『Electron heating in high-Mach number collisionless shocks』
3. 2023年9月27-28日 『**プラズマシミュレータシンポジウム2023**』※を当ユニットが幹事として開催
4. 2023年12月8日 堀久美子『惑星ダイナモにおけるねじれ振動と磁気ロスビー波』
5. 2024年1月17日 Gyugjin Choi (ソウル大)『Theory of direct fast ion effect on turbulence self-regulation』
6. 2024年2月21日 小出眞路(熊本大学)『ブラックホールまわりのプラズマの一般相対論的シミュレーション』
7. 2024年2月27日 後藤晋(大阪大学)『大型予算獲得に向けた「さきがけ」プロジェクト事例紹介』
8. 2024年3月8日 伊藤靖仁(名工大)『噴流場における輸送現象の基礎と噴流制御に向けた最適初期条件の同定』

※ これまで核融合研では、プラズマシミュレータ利用共同研究の成果発表、国内のプラズマ・核融合分野および関連分野のシミュレーション科学に関する議論のため、プラズマシミュレータシンポジウムを毎年開催してきた。2023年度は、これらの発表・議論に加え、核融合科学の学際化を目指す共同研究を発展させていくために、当ユニットが幹事をつとめて開催。プラズマシミュレータを利用して、よりすぐれた研究成果を生み出すための運用についての意見交換も行った。

参加者数: 延べ 115 名、招待講演: 6件、口頭発表: 9件、ポスター: 31件

2023年度の成果報告

- MEGAを用いた研究とその関連研究
- 乱流の微視的・散逸スケール構造の
解明・モデル化研究

イオン温度勾配不安定性に関する 運動論的電磁流体力学ハイブリッドシミュレーションモデルの検証

- 熱イオンに粒子法を適用した運動論的電磁流体力学(MHD)ハイブリッドシミュレーションコード MEGAを用いてイオン温度勾配(ITG)不安定性を計算した。さらに、GKポアソン方程式に基づいた電場の補正を導入し、両者の結果をジャイロ運動論(GK)シミュレーションと比較した。
- ITGモードの空間分布、周波数、成長率についてよく一致した結果が得られた。
- MEGAを用いてITG不安定性の計算が可能であることを実証した。
- GKポアソン方程式による電場の補正の効果は小さいことがわかった。

藤堂泰+, プラズマ・核融合学会年会(2023年11月, 盛岡市)

イオン温度勾配不安定性に関する 運動論的電磁流体力学ハイブリッドシミュレーションモデルの検証

- MEGAコードを用いてイオン温度勾配 (ITG) 不安定性と帯状流の減衰を計算し、結果をGT5Dコード及び洲鎌・渡邊理論と比較した。
- ITGモードの成長率と実周波数についてよく一致した結果が得られた。
- 帯状流の減衰率と実周波数についても、MEGAコード、GT5Dコード、洲鎌・渡邊理論の結果はよく一致した(右表)。
- 今後の展望: ITG乱流に関する検証。高エネルギー粒子励起不安定性と微視的乱流の相互作用の研究。

帯状流減衰	$\gamma R_0 / v_{ti}$	$\omega_G R_0 / v_{ti}$
MEGA	-0.034	2.739
GT5D	-0.036	2.643
洲鎌・渡邊	-0.039	2.690

藤堂泰+, 日本物理学会2024年春季大会(2024年3月, オンライン開催)

熱イオンの運動論的効果が 抵抗性インファーマルモード による圧力分布の平坦化を抑制することを発見

抵抗性インファーマルモード：トカマクプラズマにおける圧力駆動型MHD不安定性の一種

- MIPSコード(MHDモデル)と、MEGAコード(運動論的MHDモデル)を用いて、線形安定性および非線形飽和状態に対する熱イオンの運動論的効果の影響を調べた。
- 熱イオンの運動論的効果を見ないMHDモデルでは、抵抗性インファーマルモードにより、飽和状態の圧力分布が著しく平坦化される。一方、**熱イオンの運動論的効果を考慮すると、圧力分布は平坦化されない。**
- 熱イオンの運動論的効果は、この圧力分布平坦化の抑制において重要な役割をする。

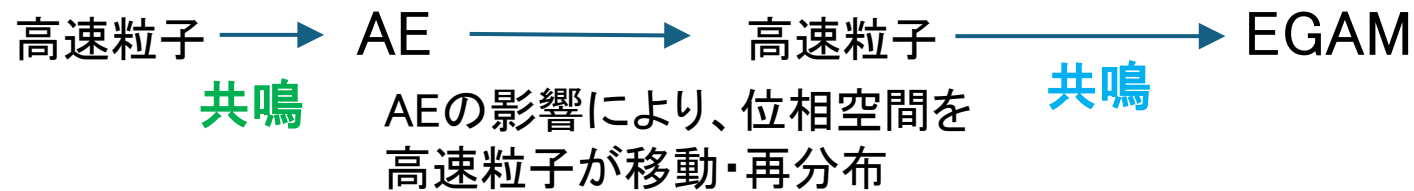
Sato, Todo, Aiba, Takechi, 29th IAEA Fusion Energy Conference, 2023 ; submitted to Nuclear Fusion

高速粒子の位相空間分布を介した MHD波動 (AE⇒EGAM) の非線形励起機構を解明

マックスプランク・プラズマ物理研究所等との国際共同研究

ASDEX-Upgrade 実験で、高速粒子駆動のアルヴェン固有モード(AE)による
高速粒子駆動測地線音波(EGAM)の**非線形励起**が観測。詳細な機構は不明であった。
この現象をMEGAを使って再現。高速粒子の位相空間 (P_ϕ, E) における発展を詳細に解析。

EGAMの非線形励起機構を解明



非軸対称プラズマで初、LHDにおけるICRF加熱が引き起こす アルヴェン波をMEGAで予測 ⇒ 実験で確認

LHDでは、ICRF(Ion cyclotron周波数帯)加熱パワーは最大3MW、**高エネルギーイオンのテイル**はMeVに及ぶにもかかわらず、ICRF加熱に伴うアルヴェン波は報告されていなかった。

ICRF加熱で生成される高エネルギーイオンの位相空間分布とアルヴェン波との相互作用を、**MEGAでシミュレーション**

3次元平衡 : HINTコードでLHD shot 166518@t=6sに基づき構築

モデル : quasilinear RF operator, Coulomb collisions, particle source, and sink を含む

- ・コア部に局在するアルヴェンモードを MEGAで予測
特徴 : $m = 2,3/n=1$; $f \sim 90\text{kHz}$, 条件 : on-axis ICRF heating ($B_{ax}=2.55\text{T}$)

同様のモードをLHD実験で確認

シミュレーション・実験確認ともに**非軸対称系プラズマで初の成果**

J. Wang et al., 29th IAEA Fusion Energy Conference, October 2023.

ジャイロ運動論的電磁乱流における局所運動量 バランス方程式の導出

Canonical momentum balance equation

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\sum_a \int d^3v F_a p_{aj} \right) - \sum_a \int d^3v \mathcal{K}_a p_{aj} + \frac{\partial}{\partial x^i} \left(\frac{\delta L_{GKF}}{\delta A_i} A_j \right) - \frac{\delta L_{GKF}}{\delta A_i} \frac{\partial A_i}{\partial x^j} + \nabla_i \Theta_j^i = 0$$

canonical momentum collision or source term pressure tensor

$$\Theta^{ij} \equiv 2 \frac{\delta L_{GKF}}{\delta g_{ij}}$$

- ジャイロ運動論的プラズマ電磁乱流の支配方程式を与えるラグランジアン、任意の空間座標変換に対する不変性から導出。
- 運動量バランスに対する衝突や外部ソースの効果も含む。衝突および乱流による運動量輸送は対称圧力テンソルによって表現、これらは計量テンソルに対するラグランジアン汎関数微分で与えられる。

この方程式に基づいて

- トロイダル磁場の軸対称性や準軸対称性と局所運動量バランス方程式の保存形との関係を明らかに。
- WKB表現を用いて、微視的乱流による運動量輸送を記述する圧力テンソルを詳細に表現し、軸対称系に対して過去の研究で導出されたトロイダル運動量輸送を再現することを確認。

ジャイロ運動論的シミュレーションによる運動量輸送の定量的評価や精度検証に活用

高速粒子が駆動する低域混成波の高調波構造を再現 その生成機構を解明

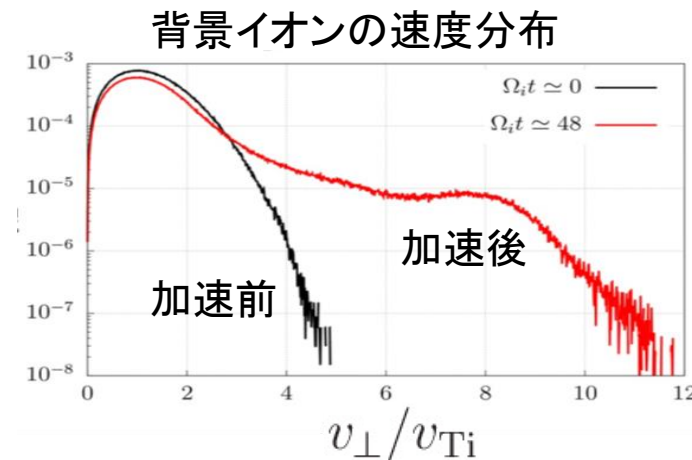
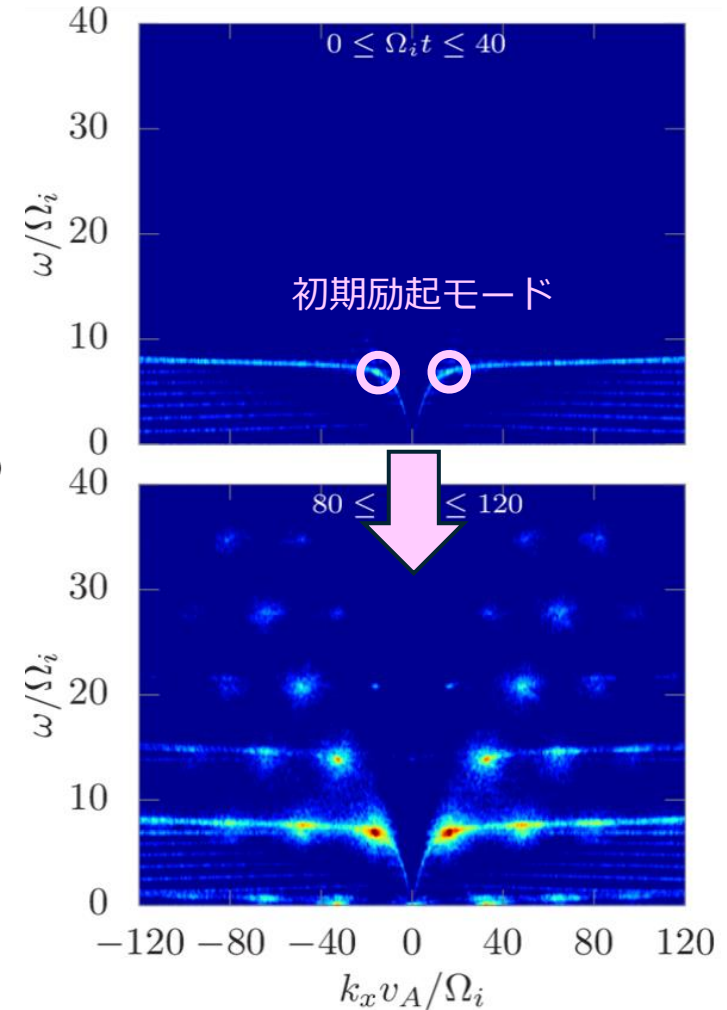
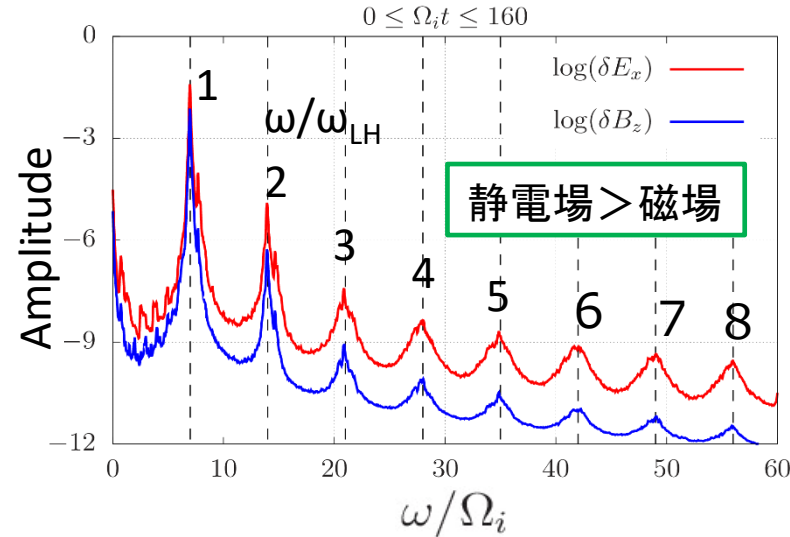
磁場に垂直方向の速度空間でリング状の分布を持つ高速イオンの生成

核融合プラズマ: NBI

宇宙プラズマ: 磁場中無衝突衝撃波による粒子加速 など

そのような高速イオンが励起したと考えられる低域混成波とその高調波が
核融合プラズマと地球磁気圏で観測

- 粒子シミュレーションを用いて、地球磁気圏極域上空の高調波構造を再現
- 高速粒子が駆動する低域混成波とその非線形結合によって高調波が生成されることを解明
- 高調波によって背景イオンの加速が促進される可能性も示した。



2023年度の成果報告

- MEGAを用いた研究とその関連研究
- 乱流の微視的・散逸スケール構造の
解明・モデル化研究

Hall MHD乱流微視的階層の特徴抽出とモデル化

三浦

AAPPS-DPP (2023年11月) プレナリー講演 (投稿準備中)

- 乱流の統計法則と現象論(Kolmogorov, Iroshnikov-Kraichnan)と構造関数のスケージング則

$$S_p(r) = \langle \delta Z_{\parallel}(r)^p \rangle = \langle |Z_{\parallel}(\mathbf{x} + r\mathbf{e}_{\parallel}) - Z_{\parallel}(\mathbf{x})|^p \rangle \propto r^{\zeta_p}$$

→ Kolmogorov/ Kraichnan-Iroshnikov 現象論の適用の検証

- 微視的構造の特徴抽出

大規模磁場構造 vs 渦・電流フィラメント → 見解の対立

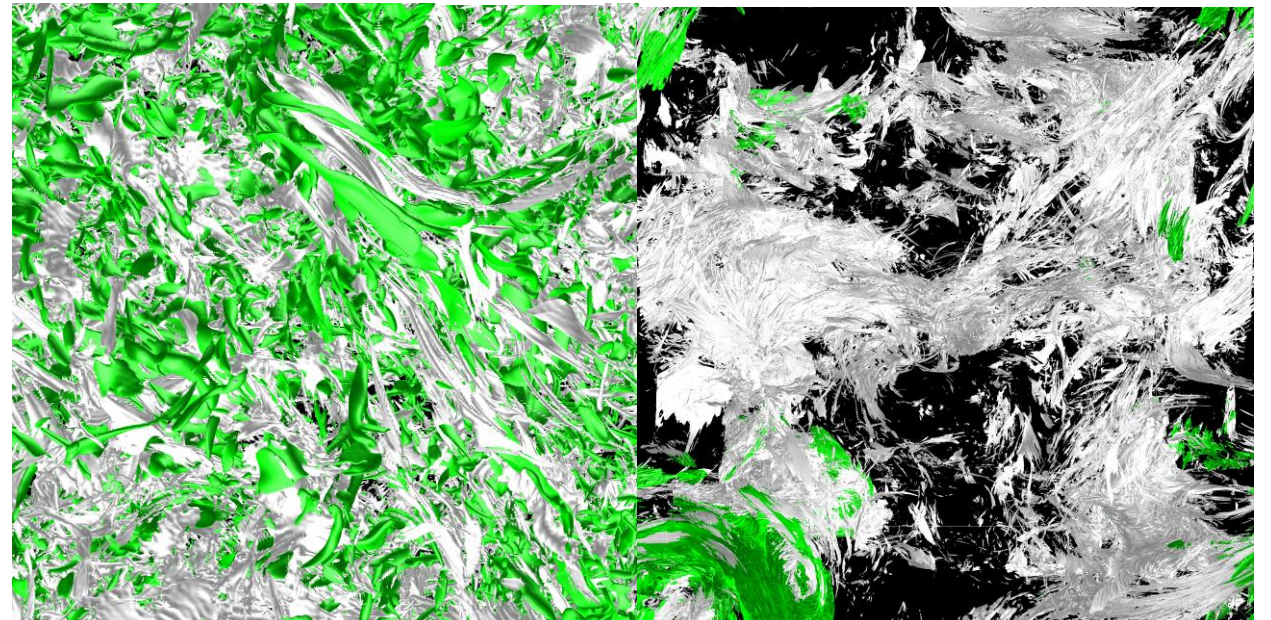
$Pr_M=1$

$Pr_M=100$

[Marino & Sorriso-Valvo, 2023]

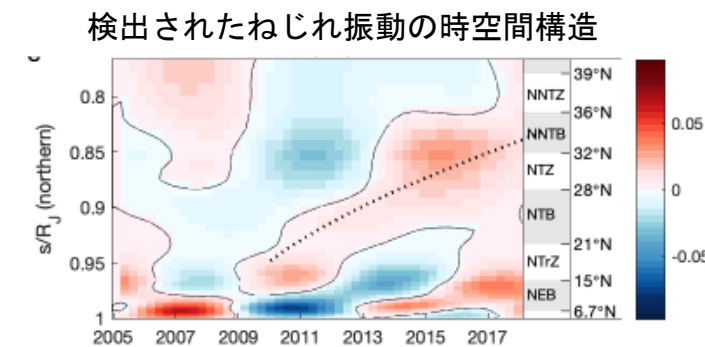
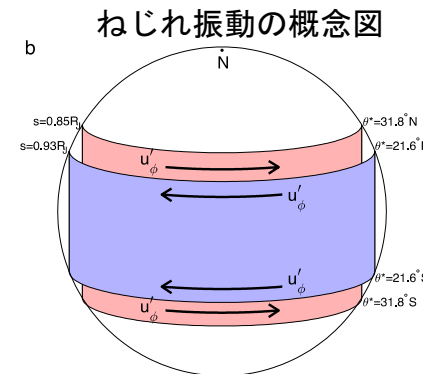
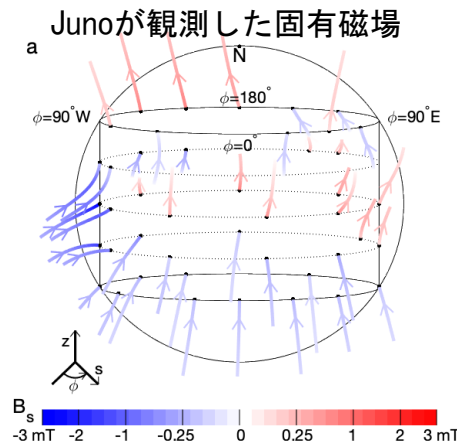
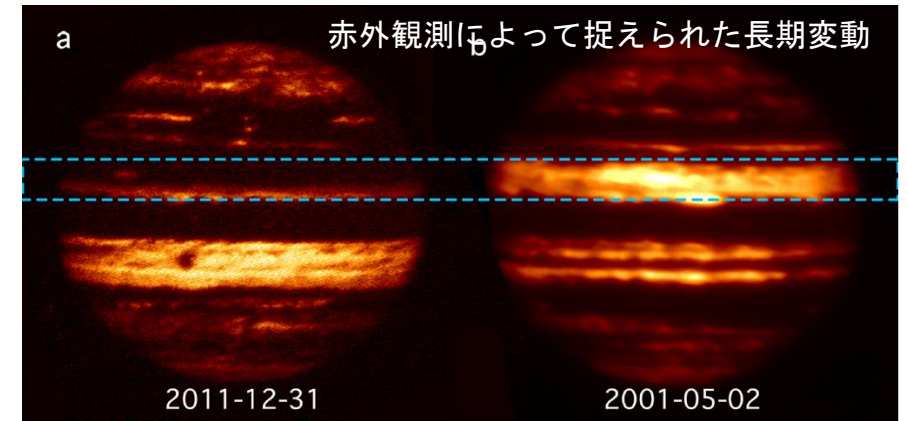
→ 現象論に対応した構造の形成
+ 磁気プラントル数の影響

- 電流フィラメント形成に対するホイッスラー・イオンサイクロトロンモード間エネルギー輸送
→ 短波長成分のモデル化へ



木星表面で観測されてきた長期変動現象を解明 深部で励起された MHD 波を他惑星で初検出

- 数十年間にわたって展開された地上望遠鏡観測網により、**木星表層大気**の数年周期変動性が確認された
- NASA 探査機 Juno 磁場観測やシミュレーションによる知見などを基に、**木星(他惑星)深部ダイナモ内の MHD 波(ねじれ振動)**が原因であることを提唱
- ねじれ振動の周期の理論値により、地上観測データが見出した数年周期性(とその緯度依存性)を説明
- 赤外撮像データセットに DMD を適用することで、ねじれ振動のシグナルを検出
- 英リーズ大学応用数学科、英レスター大学物理天文学科、西バスク大学応用物理学科との共同研究



K. Hori, C.A. Jones, A. Antuñaño, L.N. Fletcher, & S.M. Tobias, Nature Astronomy (2023).
 ※ 堀ほか, 日本地球惑星科学連合大会, 2023年5月; Hori et al. IUGG, 2023年7月.

正四面体内部のMHD熱対流とそのダイナモ

(神戸大 陰山)

目的：MHDダイナモの新しいトイモデル開拓

背景：MHDダイナモ計算が難しいのは系の自転のせい

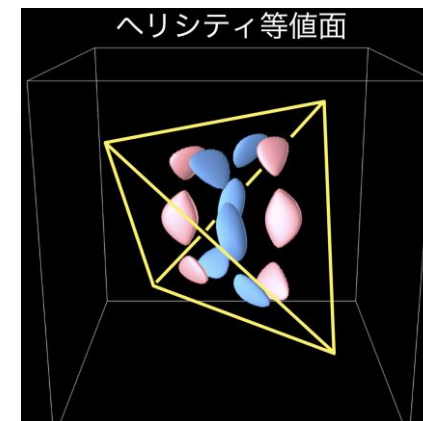
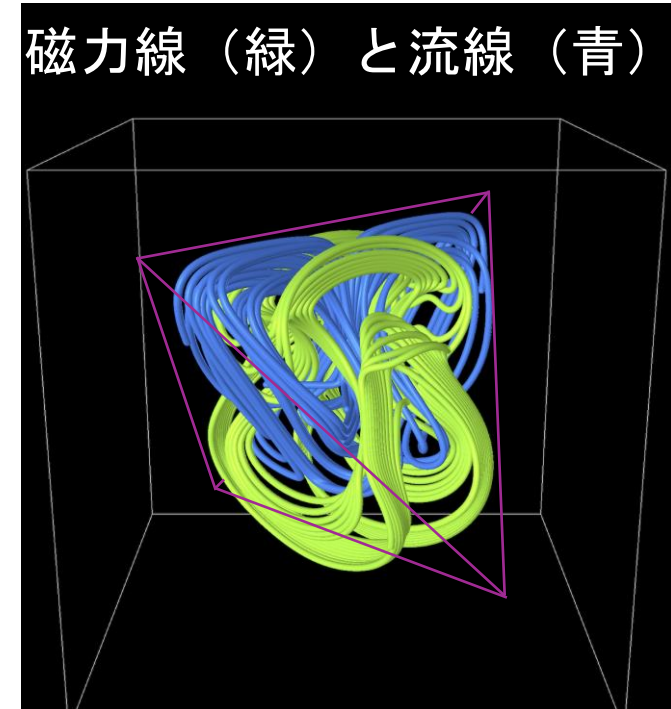
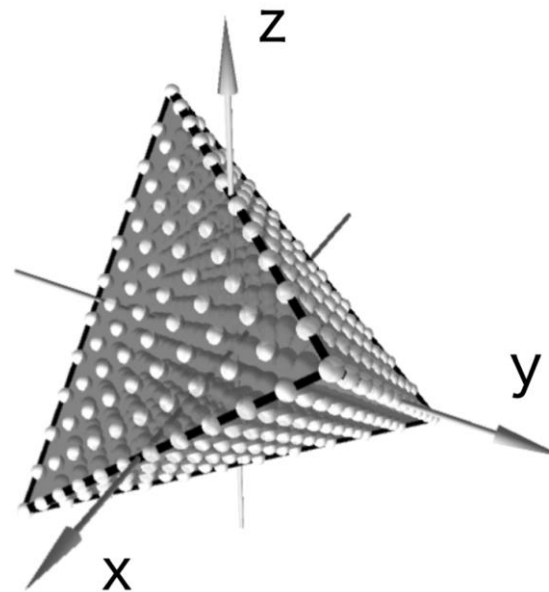
予想：正四面体容器内部での熱対流は自転がなしでも
(ダイナモに不可欠な) 流れのヘリシティをもつ

計算手法：

正四面体の頂点・辺・面はx-y-z座標の

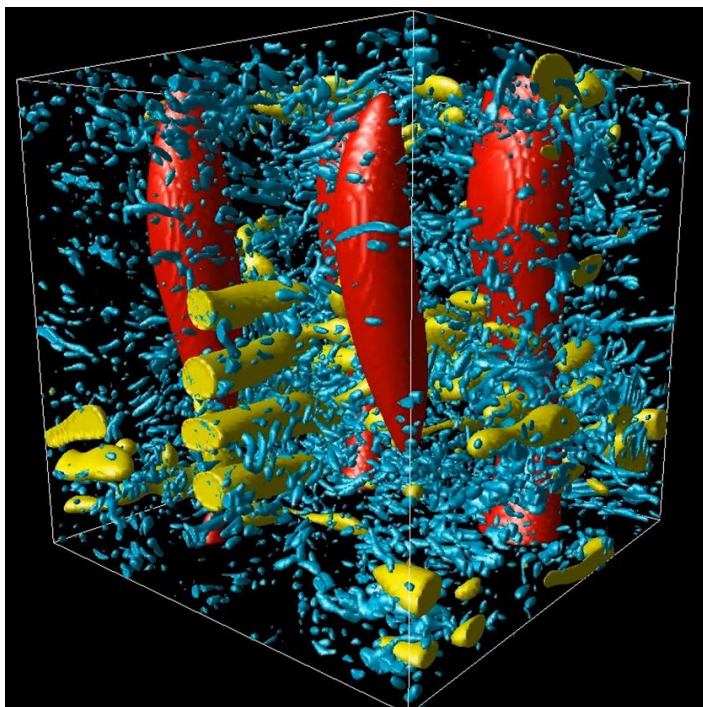
整数格子点上にあることを利用

結果：流れのヘリシティができた。
ダイナモ (磁場成長) も起きた！



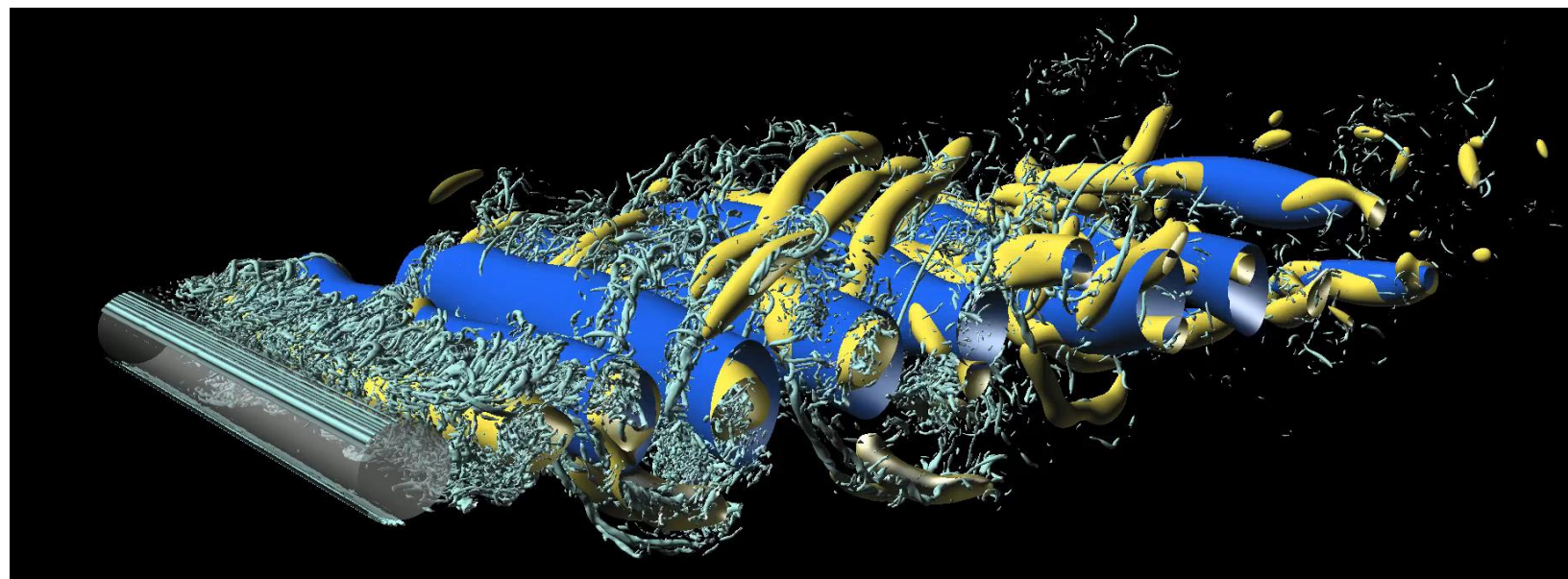
中性流体 (Navier-Stokes) 乱流

(阪大 後藤晋, 他)



← 周期箱乱流中における渦の階層構造 (**大規模渦対**の間に**中規模渦**、**中規模渦対**の間に**小規模渦**が生成される)

↓ 円柱の背後にできる乱流中でも同様の渦の階層構造 (**大規模渦対**の間に**中規模渦**、**中規模渦対**の間に**小規模渦**が生成される)



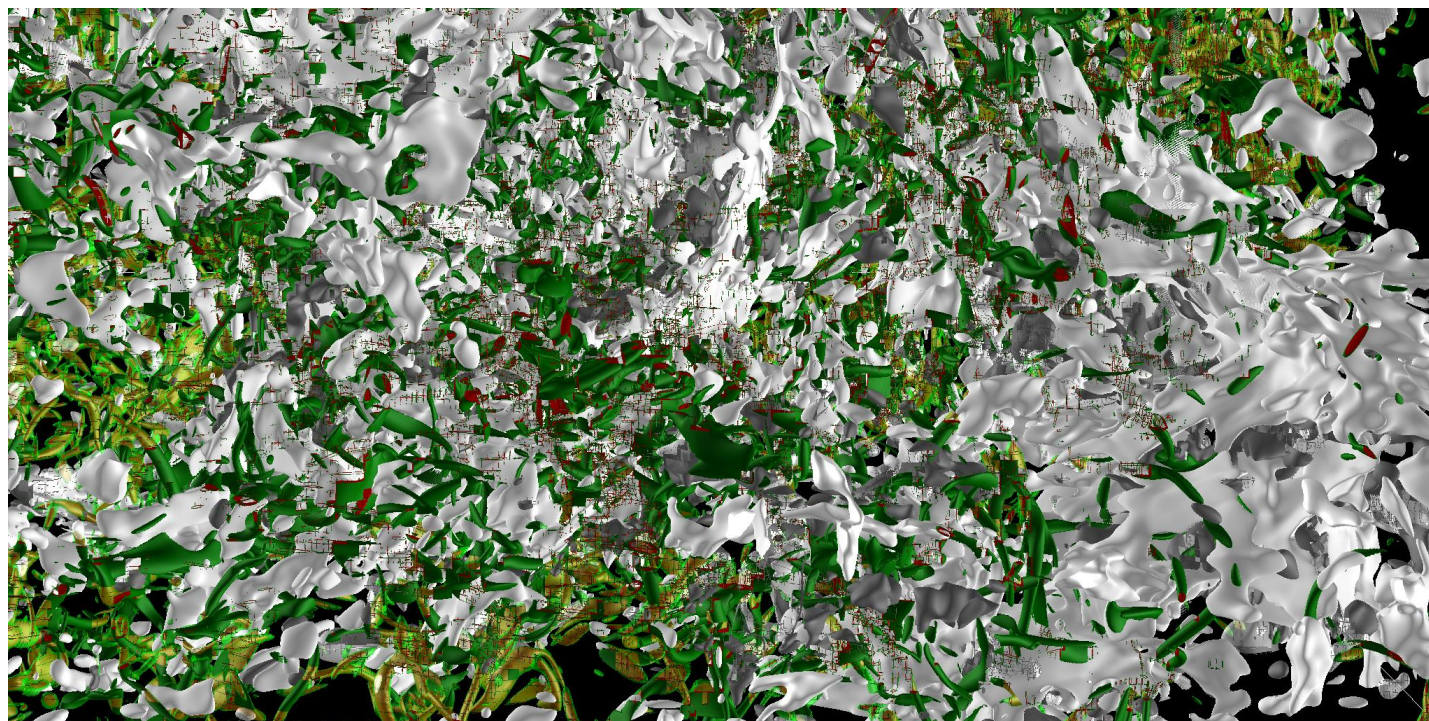
現在は、これらの知見を活かして大規模渦の動力学を忠実に表現する Reduced Order Model の構築に取り組んでいる。

(Fujino, Motoori, Goto 2024 JFM; Goto & Motoori 2024 RMPP)

圧縮性流体力学(Navier-Stokes)乱流の解析とモデル化

共同研究開始 2023年度

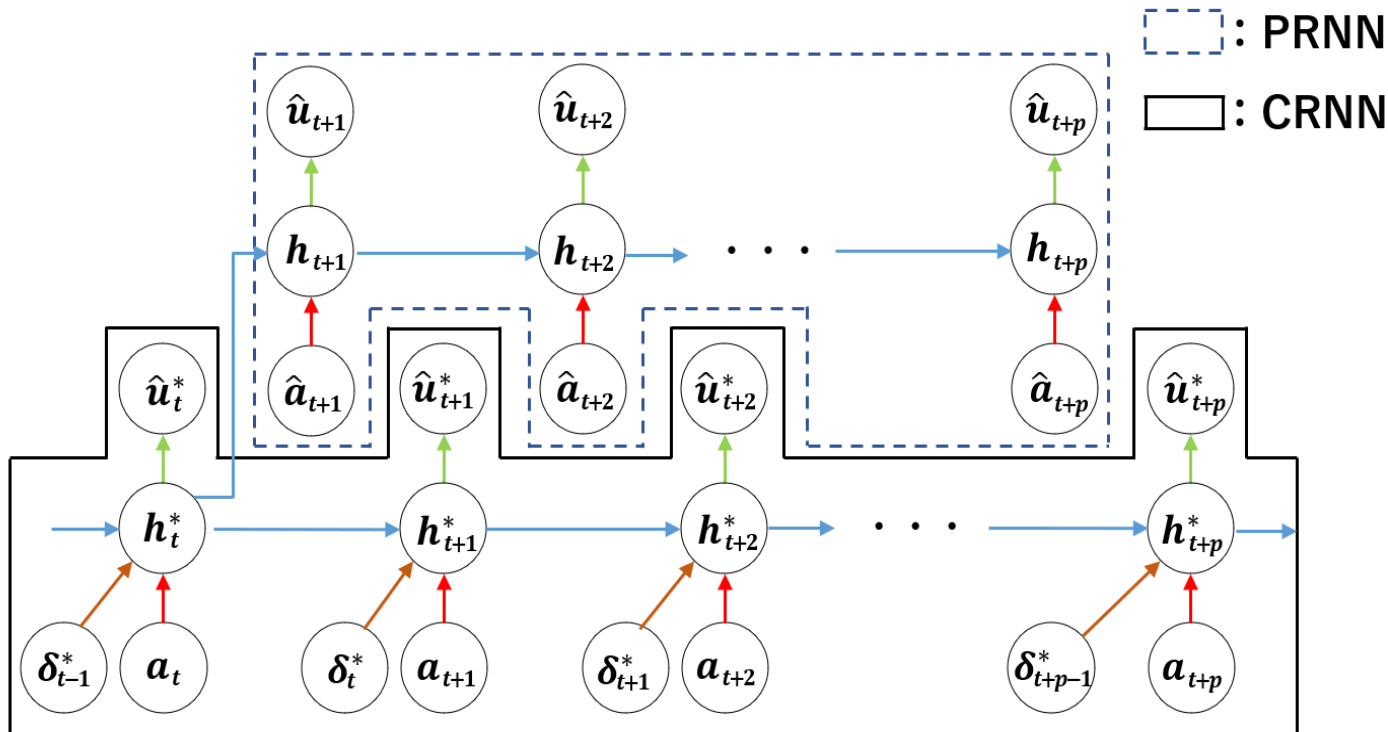
- 課題1: 圧縮性を伴う散逸ケールのモデル化：三浦
- 課題2: 衝撃波を伴う乱流 R. Pandit (IISC,India), S. De (IISC, India), 他
- 課題3: 乱流渦と圧縮性
松本剛（京都大学）
- データの共有
JHPCN & HPCI 共同研究
- Pandit 教授招聘 (3/21-, ネットワーク型研究加速事業)等



シミュレーション 緑：乱流渦 灰色：圧縮領域（音波・ショックレットの発生）

乱流モデリング：状態変数のサブグリッドモデルの開発研究を開始 1

(阪大 清水)



- 数値シミュレーションにおけるサブグリッドモデルでは速度場等の物理変数を用いて、近傍点の関数としてモデリングが行われる。
- 再帰型ネットワーク（同期学習：左図）を用いて、近傍点のモデリングがより最適となる状態変数の存在を探索する。

同期学習（清水・木村，特願2023-080371 (2023)）

CRNNは制御用RNN、PRNNは予測用RNN

乱流モデリング：状態変数のサブグリッドモデルの開発研究を開始2

(阪大 清水)

例：Kuramoto-Sivashinsky 方程式のサブグリッドモデル

近傍点でのモデリング

$$\frac{du_i}{dt} = E(u_{i-2}, u_{i-1}, u_i, u_{i+1}, u_{i+2})$$



近傍点モデル

$$G(\mathbf{h}) = h_i \quad F = E$$

を初期条件にして、同期学習を用いてより最適なG,Fを導出する。

状態変数を用いたモデリング

$$u_i = G(\mathbf{h})$$

$$\frac{dh_i}{dt} = F(h_{i-2}, h_{i-1}, h_i, h_{i+1}, h_{i+2})$$

検討課題が明らかに

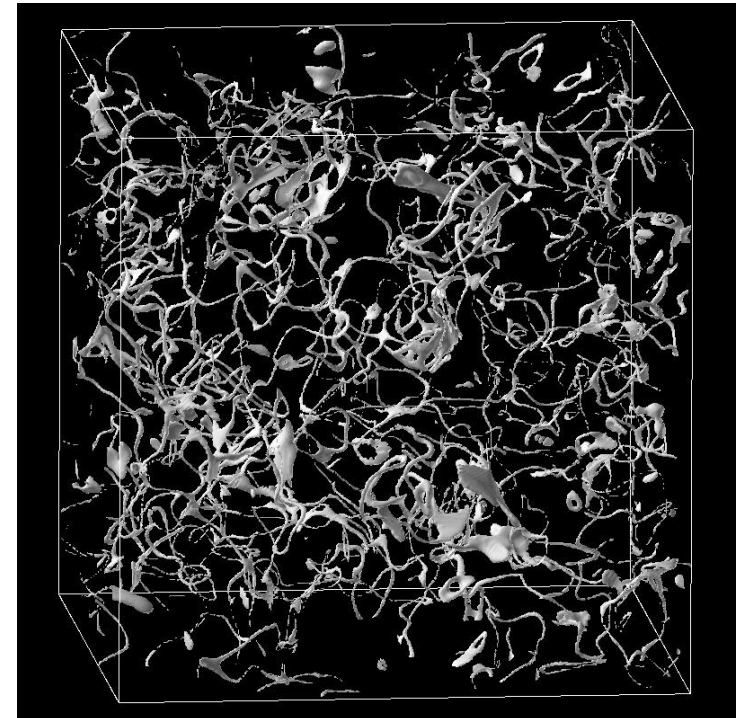
→現状は限られたGで学習を行っているが、近傍点モデルから劇的に改善するモデル構築に至っていない

→Gの制約や、調整パラメータの初期ノイズ等を様々試して、状態変数による高精度モデル構築を行う

量子乱流

(名大, 筑波大, 核融合研)

- 目的：量子渦可視化研究・モデル化・量子乱流による熱輸送能への影響の解析等
辻義之（名大） … 量子乱流実験
吉田恭（筑波大） … Gross-Pitaevskii 方程式乱流シミュレーション・統計法則解析
三浦英昭（核融合研） … GP乱流シミュレーション、渦可視化
- シミュレーションと渦の同定
三浦, 榊, 辻, 吉田, 数値流体力学シンポジウム(2023)
N. Sakaki et al (2023),
submitted to Phys. Rev. Fluids
(arXiv:2310.14264 [physics.flu-dyn])
- 大規模シミュレーションの実施
- R. Pandit 教授招聘 2024年3月21-31日
3/26 NIFS来所, 量子渦に関する議論



まとめ

- 複合大域シミュレーション実現のため、2つの中核目標のもとで研究活動を開始した。
- シミュレーションモデルの開発、階層間相互作用の物理の解明、各階層の物理理解の深化、理論高度化などについて成果があった。
- 新たな所内メンバーが加わり、研究分野が拡大した。
- 学際的共同研究の発展を目指し、セミナー・研究会の開催、自然科学研究機構ネットワーク型研究加速事業による活動を実施した。
- 学際研究ネットワーク構築により、新たな共同研究を開始した。