

JHPCN: 学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点
第12回 シンポジウム(2020年7月09日(木),online meeting)

jh190006-NAJ

電磁流体力学乱流の高精度・ 高並列LESシミュレーションコー ド開発研究(2019年度)

三浦英昭(核融合研)

共同研究者: 陰山聡(神戸大)、片桐孝洋(名大)、
坂本尚久(神戸大)、高橋大介(筑波大)、中島研吾
(東大)、半場藤弘(東大)、宇佐見俊介(核融合
研)、大谷寛明(核融合研)

研究動機と目標

- 衝突頻度の低いプラズマの乱流(流体モデル)
核融合 MHD不安定性非線形シミュレーション,
太陽風, 乱流シミュレーション
- 高レイノルズ数乱流(高い内部自由度)
 - 1) マクロ・ミクロスケールでの支配方程式の分離
マクロ…MHD, ミクロ…PIC, GK, XMHD
 - 2) フルセットXMHD擬スペクトルコードは高コスト
 - 3) 運動論(GK), PICは、モデルとしてXMHDより
正当だが、遥かに高コスト
(eg. Vlasov-Boltzmann 5D)

研究動機と目標

- LES の導入
ミクロスケールは SGSモデルで代替
(計算コストの削減)
「シミュレーションの経済性」は重要キーワード
- 大規模LES… 可視化の高機能化
4次元ストリートビュー“4DSV”
(多点多方向 in-situ 可視化)
⇒ LES(運動論的効果を考慮したSGSモデル)
+ 高速3DFFT擬スペクトルコード
+ in-situ可視化
= 大規模高レイノルズ数高速シミュレーション

課題の構成要素と進捗状況

- 構成要素とその状況

1. 高解像度高並列拡張MHDシミュレーションコードの開発
擬スペクトル法のための3次元高速FFT(スラブ分割・ペンシル分割)高速化
FFTEを元にした通信時間隠蔽手法を実装(完了)
物理モデルを、非圧縮性拡張MHDから圧縮性拡張MHDモデルへ変更(進行中)
2. LESのための乱流(SGS)モデル開発
Hall 項など非理想MHD効果のためのSGSモデルの開発と改良(進行中)
直接数値シミュレーションによる基礎データ取得(進行中)
3. in-situ可視化手法4D Street View (4DSV)の開発
4DSVの概念実証(完了)
4DSV用ドライバー(KVS, VISMO), ビュワーの開発(進行中)
4DSVの高速化、高機能化(進行中)

非圧縮性XMHD擬スペクトル法コード 概要

- 基礎方程式とその性質

- $$\frac{\partial u_i}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left[(u_i u_j - B_i B_j) + \left(p + \frac{1}{2} B_k B_k \right) \delta_{ij} \right] + \nu \frac{\partial S_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial \Pi_{ij}}{\partial x_j},$$
$$\frac{\partial u_k}{\partial x_k} = 0,$$
$$S_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i},$$
$$\frac{\partial B_i}{\partial t} = -\epsilon_{ijk} \frac{\partial E_k}{\partial x_j},$$
$$\frac{\partial B_k}{\partial x_k} = 0,$$
$$E_i = -\epsilon_{ijk} (u_j - \epsilon_H J_j) B_k + \eta J_i.$$

XMHDモデルの特徴

- ジャイロ粘性項(磁力線の周囲を旋回)
- Hall 項 (イオンと電子の分離効果)
- エネルギースペクトルに新しい慣性小領域
- Whistler波など分散性波動
($\omega = ck_{\parallel}k$) $\Rightarrow \Delta t$ を強く制約

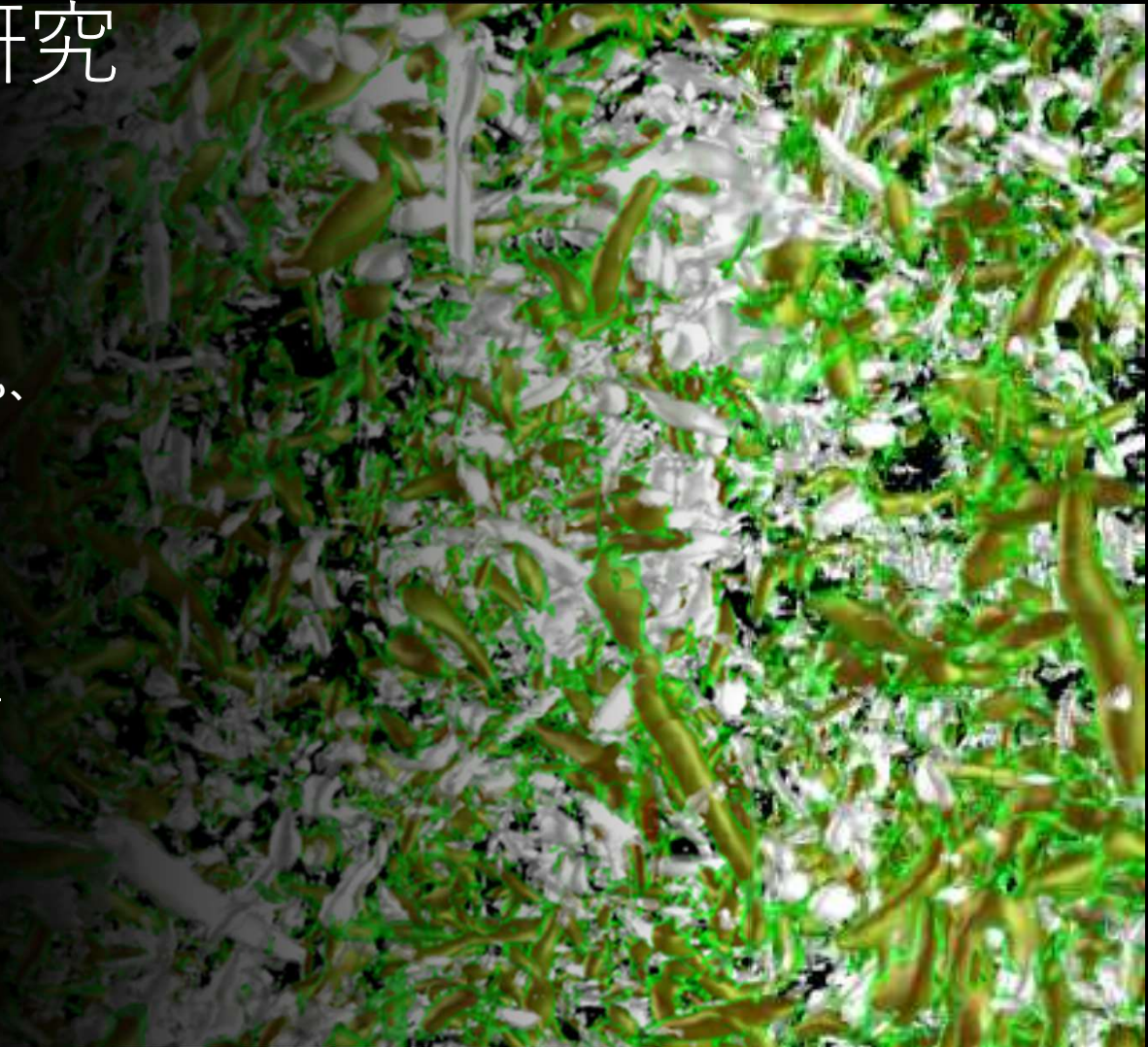
- LES:基礎方程式にローパスフィルター $\Rightarrow$ GS方程式
SGSモデルが必要(今回は省略)

拡張電磁流体力学シミュレーションによる 渦構造形成の研究

本課題で開発した電磁流体力学シミュレーションコードを用いた、非圧縮性Hall MHD・拡張MHD乱流の減衰性一様等方性数値計算の事例。

Hall MHD乱流, 拡張MHD乱流の両者とも、渦構造は管状となった。

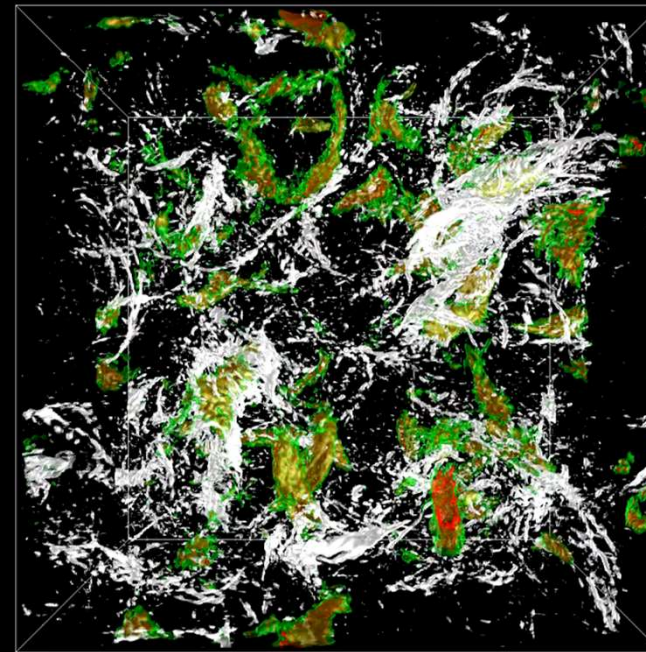
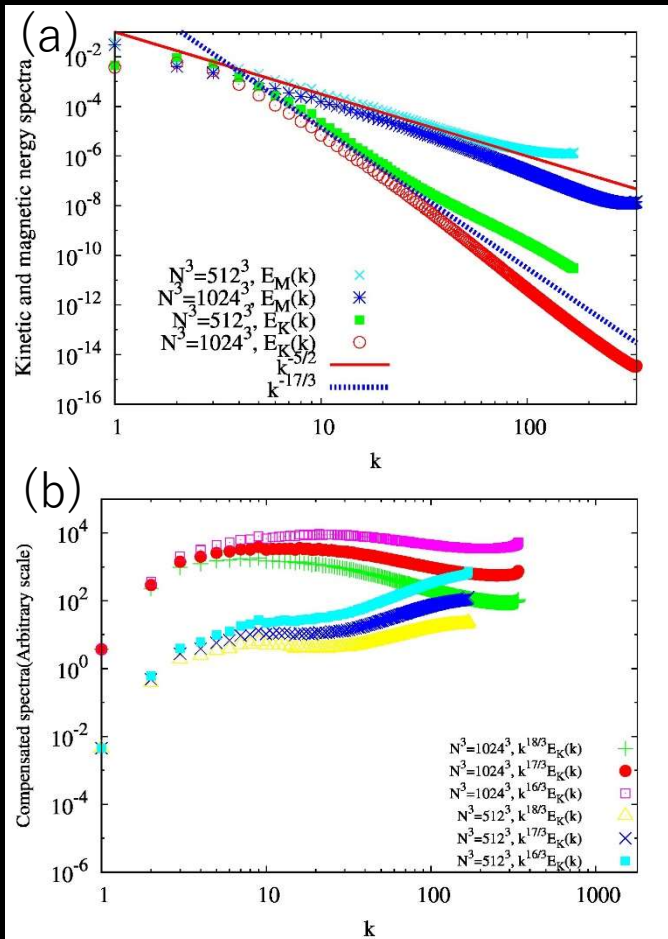
渦構造が管状であることは、その構造形成にKelvin-Helmholtz不安定性が関わっていることを示唆している。[H.Miura, fluids vol.4 (2019)]



図：Hall MHD一様等方性乱流における管状渦構造の形成(緑, 濃緑： $2 \times \text{渦度場} |\omega|^2 / 2$ の等値面, 灰色： $2 \times \text{電流密度} |j|^2 / 2$ の等値面)。渦構造が管状であることは、その構造形成にKelvin-Helmholtz不安定性が関わっていることを示唆している。

高磁気Pr HallMHD乱流シミュレーション によるエネルギースペクトルの研究

高磁気プラントル数(Pr)の非圧縮性Hall MHDシミュレーションにより、運動方程式のローレンツ力と粘性項のバランスが、運動エネルギースペクトルに $k^{-17/3}$ のべき則に従う領域を形成し得ることを示した。[H.Miura et al., Phys.Rev.E. 100(2019)]



動画(上)：磁気Pr 100のシミュレーションにおける2乗渦度場 $|\omega|^2/2$ (緑～赤)、2乗電流密度 $|j|^2/2$ (白) の等値面の動画。

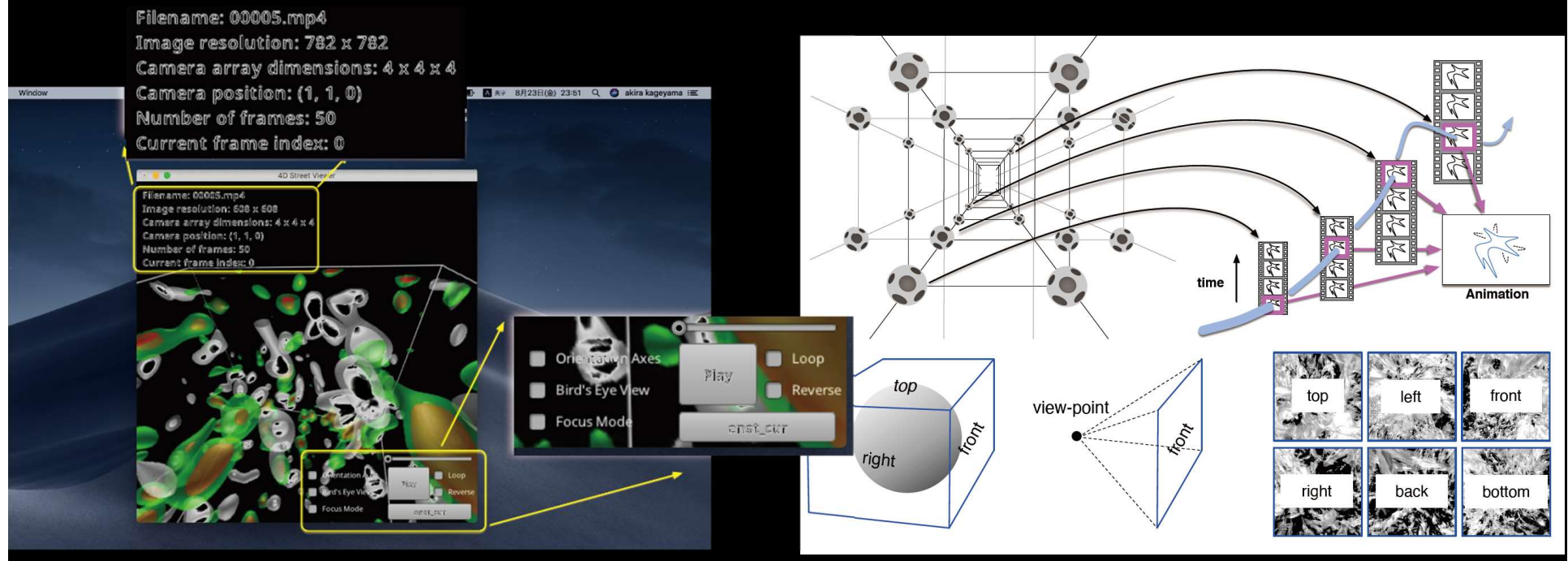
図(左)：磁気プラントル数100の数値シミュレーションにおける(a) 運動エネルギースペクトルおよび磁気エネルギースペクトル、(b) 運動エネルギーの"compensated spectra".

4DSVの開発と可視化

電磁流体力学シミュレーションのin-situ可視化手法としての4DSVの要素技術が進み、概念実証も行われた。

- ・ 可視化ドライバーとしてVISMO(Ohno&Ohtani,2014)が追加された。
- ・ 図（上）：4DSVにおけるカメラの配置と機能。3次元的に配置された複数のカメラがそれぞれ、6方向について可視化を行う。
- ・ 図（下）：各カメラの画像を統合して4DSVとして連続的に場の可視化ができるビューワーの開発が進んでいる。

[Kageyama, Sakamoto, Ohno and Miura, to appear in Plasma Fusion Research]



今後の研究の方向性

- 物理モデルの変更
エネルギースペクトルのスケーリング則についての圧縮性効果の検証
シミュレーション規模の拡大によるスケーリング則の検証
- SGSモデルの改良
PICシミュレーションとの比較による改良(圧縮性モデル導入後)
非等方性モデルの検証と改良
- 4DSVの改良
カメラ設置点増大に伴う可視化処理時間の増大
ファイル数増大に伴うI/O負荷の増大

2019年度成果発表(学術論文,査読付きプロシーディングス)

学術論文 (査読あり)

- H. Miura, J. Yang, and T. Gotoh, "Hall magnetohydrodynamic turbulence with a magnetic Prandtl number larger than unity", Phys. Rev. E 063207, vol.100 (2020).
- K. Uemori, N. Sakamoto, N. Ohno, and A. Kageyama, "YYZVis: An Efficient Visualization Toolkit for Yin-Yang-Zhong Grid Dataset", J. ADV. SIMULAT. SCI. ENG., vol.7, pp.15-33 (2020).

(2) 国際会議プロシーディングス (査読あり)

- K. Yamamoto and A. Kageyama, "In-Situ Visualization with Membrane Layer for Movie-Based Visualization", Lecture Notes in Computer Science (proc. ICCS 2019), vol. 11540, pp. 588-594 (2019).