

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(2022年度)

課題代表者：三浦英昭（核融合研）

共同研究者：陰山聡（神戸大）、宇佐見俊介（核融合研）、大野暢亮（兵庫県大）、大谷寛明（核融合研）、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）、松本剛（京大）、R. Pandit (IISc)、S. Yadav (SVNIT)

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, 流体乱流基礎研究(間欠性など)
- 高レイノルズ数乱流(高い内部自由度)
拡張MHD(XMHD): ミクロ効果を一部導入
⇔
数値的高コスト (高波数部の励起, 分散性波動)
XMHD + LES手法で、ミクロスケールを取り入れつつ、より“軽快な大規模シミュレーション”
- イオン(MHD)スケールとサブインスケールの両者を適度に包含するシミュレーションの実現を目標とする。

利用システム・手法概要

- 研究開始: 2017年度～

- 利用システム:

東大 Wisteria/BDEC-01 (Odyssey)

言語: Fujitsu fortran (MPI+OpenMP)

mpifrtpx

-Kfast,parallel -Kparallel -Kopenmp -Koptmsg=2

-Nlst=t -Kprefetch_sequential=soft

-Kprefetch_line=9 -Kprefetch_line_L2=70

-Kzfill=18 -Nfjomplib -Cpp

- 手法: 擬スペクトル法 + Runge-Kutta-Gill

変数を3次元FFTで変換➡波数乗算 (微分値)

➡フーリエ逆変換➡RKGで時間発展

これまでの研究

【A】本課題の物理的な研究

- 一様等方Hall MHD乱流 ($Pr_M=1$) DNS
- 一様等方Hall MHD乱流($Pr_M \gg 1$)
- 一様等方Hall MHD乱流 ($Pr_M=1$) LES

【B】コードの開発・最適化

- 非圧縮性Hall MHDモデルのLESコード開発
- 圧縮性拡張MHDモデルモデルのLESコード開発
- Oakforest-PACS向けコード最適化
- Wisteria/BDEC-01 (Odyssey)向けコード最適化

【C】In-situ可視化 4DSV技術の開発

- 4DSV 技術の開発
- 4DSV に使用する可視化エンジンVISMOの最適化等

【小課題(A)】乱流シミュレーションとSGSモデル開発

MHD・拡張MHD乱流

- ⇒ 1) スケール幅が広くなければいけない
- 2) 高波数の物理はMHD・拡張MHDモデルでは正しくない
(サブイオンスケール近傍とMHDスケールでは妥当)
- ⇒ 方程式にローパスフィルター
必要なスケールだけシミュレーション(LES)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\partial (\rho u_j)}{\partial x_j},$$

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j + p \delta_{ij}) + \epsilon_{ijk} J_j B_k + \frac{\partial \Pi_{ij}}{\partial x_j},$$

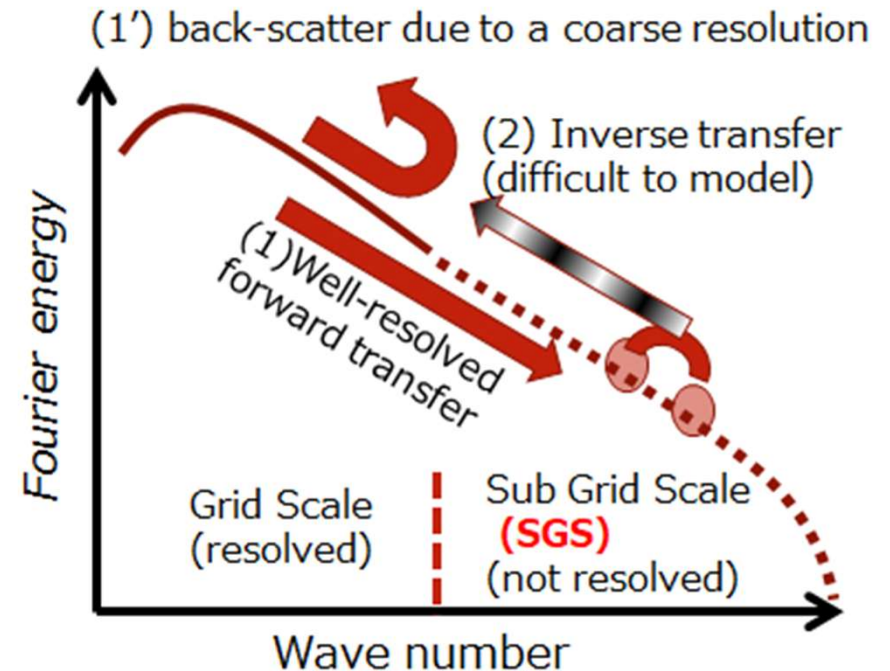
$$\frac{\partial p}{\partial t} = -u_k \frac{\partial p}{\partial x_k} - \Gamma p \frac{\partial u_j}{\partial x_j} + (\Gamma - 1) \left(\eta J_k J_k + u_i \frac{\partial \Pi_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial q_j}{\partial x_j} \right),$$

$$\frac{\partial q_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_{\perp}} \left(\rho \kappa_{\perp} \frac{\partial T}{\partial x_{\perp}} \right) - \frac{\partial}{\partial x_{\wedge}} \left(\rho \kappa_{\wedge} \frac{\partial T}{\partial x_{\wedge}} \right) - \frac{\partial}{\partial x_{\parallel}} \left(\rho \kappa_{\parallel} \frac{\partial T}{\partial x_{\parallel}} \right)$$

$$\frac{\partial B_i}{\partial t} = -\epsilon_{ijk} \frac{\partial E_k}{\partial x_j},$$

$$\frac{\partial B_k}{\partial x_k} = 0,$$

$$E_i = -\epsilon_{ijk} \left(u_j - \frac{\epsilon_H}{\rho} J_j \right) B_k - \frac{\epsilon_H}{\rho} \frac{\partial p_e}{\partial x_i} + \eta J_i,$$



【小課題(A)】乱流シミュレーションとSGSモデル開発

2022年度の研究について、下記の通り計画する。

- ・MUTSU-T3/XMHDコードの大型シミュレーション128~512ノード
主要コントロールパラメータ: $\beta = p/(B^2/2)$
⇒圧縮性XMHD SGSモデル開発の基礎データ取得
- ・現行SGSモデルの改良
速度勾配テンソルの不変量(Q値等)・乱流場の間欠性などに関する解析とその反映
- ・VP法による非周期系問題のDNS
PICシミュレーションデータの比較
SGSモデルを通じた運動論的効果導入について方針を検討

【小課題(B)】シミュレーションコードの高度化

2022年度の研究について、下記の通り計画する。

- ・非圧縮性モデル・圧縮性モデル2つのコードの開発・最適化
主要ターゲット: 格子点数 2048^3 以上の大規模シミュレーションで
高効率・高並列率に
※ 一部計算スキームの変更も検討
- ・VP法, PIC機能導入機能の拡張と最適化
VP法... 格子点数が大きい場合の最適化を念頭に
PIC機能... セルあたりの粒子数の増大に注意

【小課題(B)】シミュレーションコードの高度化

VP法導入の狙い

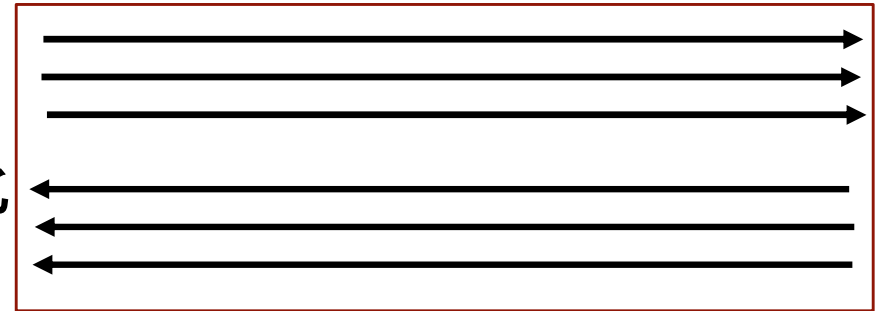
運動論的(非流体的)効果のモデル化

Eg. 磁気リコネクション

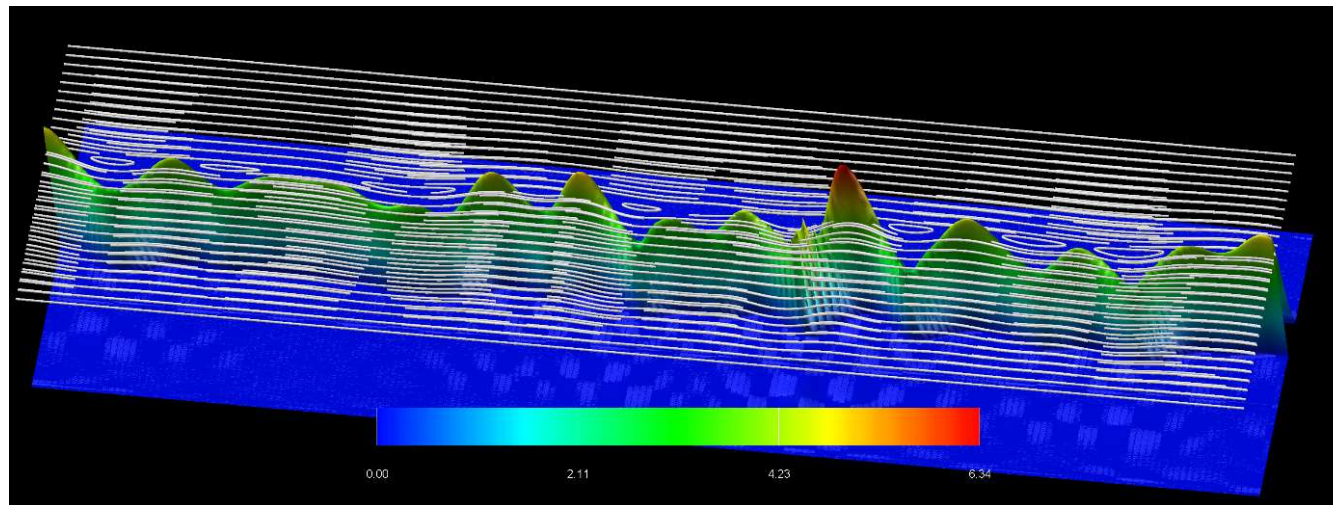
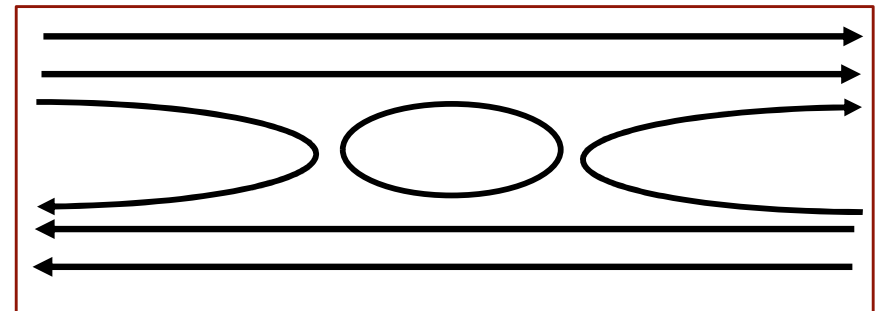
SGSモデルを通じた人為的な付加項として方程式を運動論的効果を導入

⇔

非周期系シミュレーション (PIC等を含む)との比較・付加項の最適化



磁気リコネクション



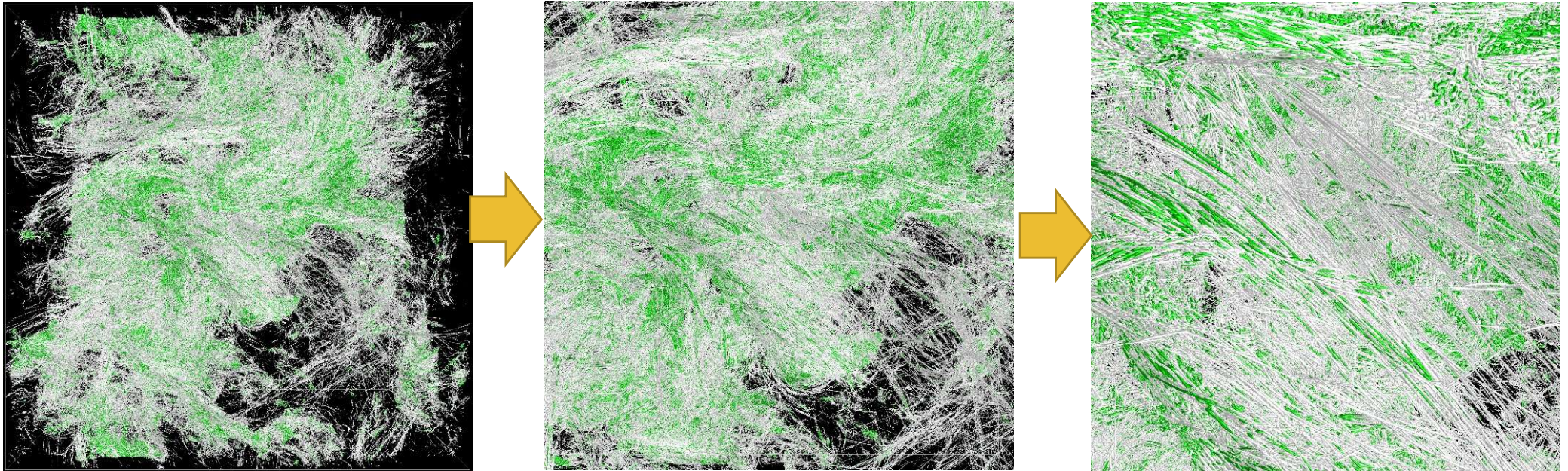
【小課題(C)】4次元ストリートビュー(4DSV)可視化 手法開発

2022年度の研究について、下記の通り計画する。

- ・VISMOの最適化
 - ・OFPでの開発を元にしたライブラリ・ツール群の構築
 - ・カメラ位置の動的変更手法の開発
可視化物理量(渦度や電流等)の大小に応じた移動
⇒適切な物理量の検討も必要(【A】とも連動)
- 磁気リコネクションなど重要イベントの検知

【小課題(C)】4次元ストリートビュー(4DSV)可視化 手法開発

事例：微細現象の探索(緑：渦Q値, 白：磁場構造Q値)



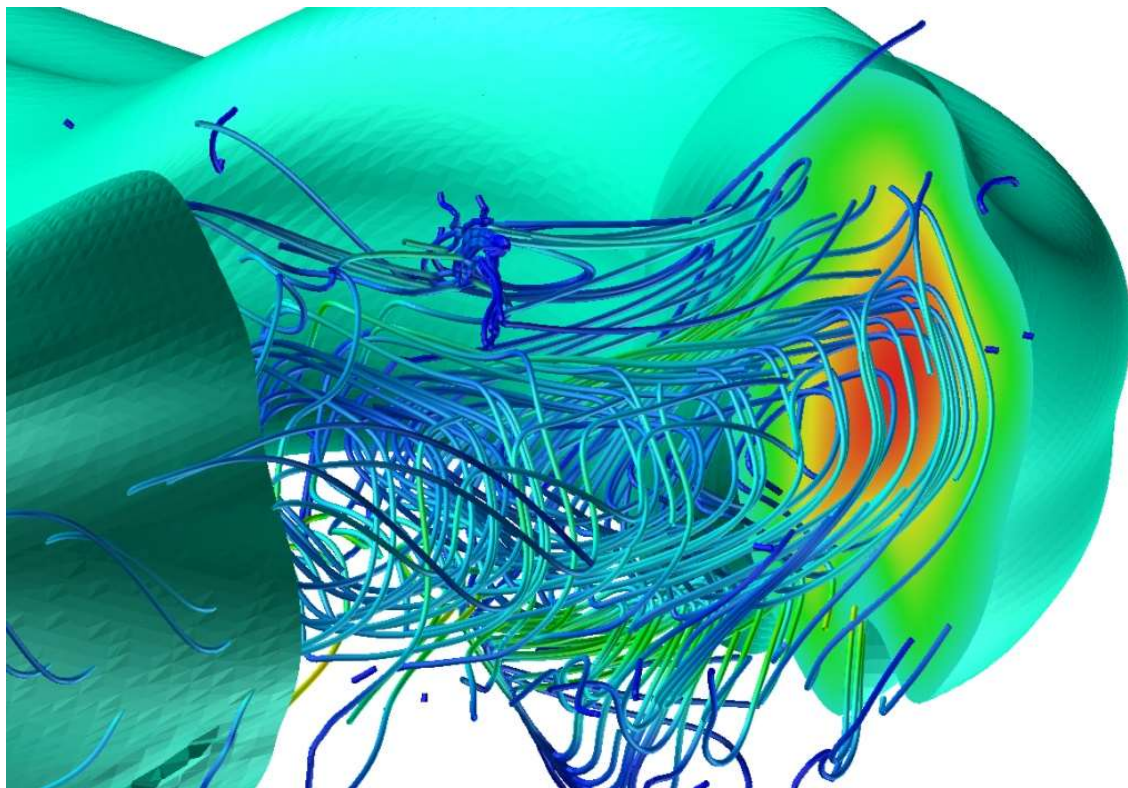
大規模シミュレーションの中の微細構造とそのインパクト
いつ、どこで、何が起きているか？

例：磁気リコネクション・渦リコネクション

⇒ベクトル場のトポロジーの変化による大域的構造の変更

様々な応用へ

トーラスプラズマシミュレーション



非等方乱流シミュレーション

