

jh210004-NAH

三浦英昭(核融合科学研究所)

# 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



課題参加者：陰山聡<sup>1</sup>(副代表)，大野暢亮<sup>2</sup>，坂本尚久<sup>1</sup>，片桐孝洋<sup>3</sup>，高橋大介<sup>4</sup>，中島研吾<sup>5</sup>，半場藤弘<sup>5</sup>，宇佐見俊介<sup>6</sup>，大谷寛明<sup>6</sup>，R. Pandit<sup>7</sup>，S.K.Yadav<sup>8</sup> <sup>1</sup>神戸大，<sup>2</sup>兵庫県立大，<sup>3</sup>名大，<sup>4</sup>筑波大，<sup>5</sup>東大，<sup>6</sup>核融合研，<sup>7</sup> Indian Inst. Sci. (India)

## ◆ 研究の目的[物理課題として]

### 大レイノルズ数(無衝突に近い)プラズマ乱流のためのシミュレーション手法の開発

(1)：シミュレーションの大規模化  $\leftrightarrow$  物理的知識の更新  
 ⇒マシン性能に依存しない普遍的な性質の抽出

(2)：乱流の階層性：マクロ⇒格子で解像(GS)，  
 ミクロ⇒格子解像度以下(SGS)

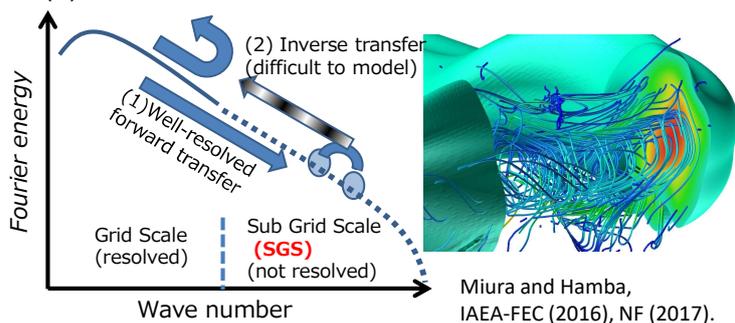
⇒SGSはモデル化することで、シミュレーション規模を抑制  
 SGSモデルが妥当なら、ミクロスケールを深堀りする必要なく、マクロスケールに専念可能

(SGSモデル開発のためのミクロシミュレーションは重要)

## ◆ GS方程式と非等方SGSモデルの開発

ターゲット：磁場閉じ込め核融合の短波長不安定性・飽和と研究

(1') back-scatter due to a coarse resolution



## ◆ 圧縮性モデルでの最適化【変数セットの配置など】

基礎変数  $\rho, \rho u_i, e_T, B_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) の位置

```
#ifdef VARS_INSIDE
vars(M,N1,N2,N3) !! 変数種が最内側
#else
vars(N1,N2,N3, M) !! 変数種が最外側
#endif
```

(1) 変数外側, ジャイロ粘性あり

N <sup>3</sup>	Node	Process	threads	Secs/step	Scaled time*
256 <sup>3</sup>	1	32	2	22.50	20.46
512 <sup>3</sup>	2	64	2	92.11	92.11
1024 <sup>3</sup>	16	512	2	111.60	102.34
2048 <sup>3</sup>	128	4096	2	128.145	112.58
4096 <sup>3</sup>	1024	32768	2	220.19	122.81

(2) 変数内側, ジャイロ粘性あり

N <sup>3</sup>	Node	Process	threads	Secs/step	Scaled time*
256 <sup>3</sup>	1	32	2	22.50	20.46
512 <sup>3</sup>	2	64	2	92.11	92.11
1024 <sup>3</sup>	16	512	2	111.60	102.34
2048 <sup>3</sup>	128	4096	2	128.145	112.58
4096 <sup>3</sup>	1024	32768	2	220.19	122.81

FFTEへの換装 + 通信時間隠蔽(再実装) が必要

## ◆ 非圧縮性モデルから圧縮性モデルへの移行

(速度場 + 磁場 ⇒ 質量密度, 運動量, 磁場, エネルギー)

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

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

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

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

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

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

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

## ◆ 2021年度研究

1. 物理的な性質：圧縮性の影響の解明  
 非圧縮性モデル、圧縮性モデルによるシミュレーション、両者の比較
2. コードの最適化：FFTE+通信時間の隠ぺい
3. 圧縮性モデル用 SGSモデルの開発  
 圧縮性に伴う複数の非線形項の出現に対応する必要
4. 4DSV およびVISMOの開発改良  
 計算の大規模化による可視化コスト（時間、ファイル数、ファイルサイズ）最小化

## Summary

2020年度：非圧縮性モデルから圧縮性モデルへ移行

2021年度：FFTE（通信と計算のオーバーラップ）の再実装，4DSV可視化の進展，LES用SGSモデルの開発続行，他。