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, jh200002-NAH

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(2020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）、大野暢亮（兵庫県大）、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)

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)

2020年度の開発事項

- 物理モデルの変更
  エネルギースペクトルへの圧縮性効果の指摘
  (European Turbulence Conference, Torino, 2019)
  圧縮性Hall MHD/XMHDへのモデル変更

- 物理モデル変更に伴う、コードの最適化
  変数の数、3D FFTのコール回数などが変更
  計算による通信時間の隠ぺい効果などの確認が必要に

- 圧縮性モデル用 SGSモデルの検討
  圧縮性に伴う複数の非線形項の出現に対応する必要

- 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）の増大への対処

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⇒ GS方程式
  SGSモデルが必要(今回は省略)

圧縮性XMHD擬スペクトル法コード概要

- 基礎方程式

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

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

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

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

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

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

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

圧縮性XMHD擬スペクトル法コード概要

- 基礎方程式

$$
\begin{aligned}
\Pi_{ij} &= \Pi_{ij}^{\parallel} + \Pi_{ij}^{\perp} + \Pi_{ij}^{\wedge}, \\
\Pi_{ij}^{\parallel} &= -\frac{2}{3}\mu_0 \left(B_m S_{mn} B_n\right)\left(\delta_{ij} - \frac{1}{3}B_i B_j\right), \\
\Pi_{ij}^{\wedge} &= \frac{\mu_3}{2}\left[\epsilon_{imn} B_m S_{nk}\left(\delta_{kj} - \frac{1}{3}B_k B_j\right) + \epsilon_{jmn} B_m S_{nk}\left(\delta_{ki} - \frac{1}{3}B_k B_i\right)\right], \\
\Pi_{ij}^{\perp} &= -\mu_1 \left\{\left(\delta_{im} - B_i B_m\right) S_{mn}\left(\delta_{nj} - B_n B_j\right)\right. \\
&\quad -\frac{1}{2}\left(\delta_{ij} - B_i B_j\right)\left(\delta_{mn} - B_m B_n\right) S_{mn} \\
&\quad +4\mu_3 \left(\delta_{im} - B_i B_m\right) S_{mn} B_n B_j \\
&\quad \left. +transpose\right\}, \\
S_{ij} &= \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\frac{\partial u_k}{\partial x_k}\delta_{ij}.
\end{aligned}
$$

コード開発上の課題

- 基礎方程式の変数セットの増加
  (1) 大規模シミュレーションに必要な資源の増加
  (2) 計算による通信時間の隠ぺいへの影響
  （3D FFTの実行回数の増大）
- 物理的な波動の種類の増加による計算ステップの制約
  （圧縮性モード）（最適化が必要）
- 垂直方向不連続性（衝撃波）の発生
  擬スペクトルコードの利用に不向きなパラメータ領域が発生（今年度は対象外）
- LESのためのSGSモデルの複雑化
  非圧縮性モデルの援用
  (eg. Miura, Hamba, Ito, Nuclear Fusion (2016))

4DSVの開発と可視化

概念実証の成功(2019年度)を受けた、実用化への取り組み

- 大規模シミュレーション実行時に必要なカメラ数の確認
- カメラ数増大につれて生じると想定される諸課題
  (1) 計算時間の増大
  (2) ファイル数の増大
  (3) ファイル総量の増大
  【仮定】3次元各方向8ステンシルに1個のカメラを設置する
  格子点数 256^3 → カメラ数 16^3 =4096,
  1024^3 → カメラ数 64^3 =262144,
  4096^3 → カメラ数 256^3 =1677216
- 大規模計算でのin-situ可視化に向けて、実用上の工夫（カメラ数の調整、可視化パートの最適化等々）を検討