

複数 GPU を用いた複雑物体周りの乱流の ラージエディ・シミュレーション解析

Large-eddy simulation of turbulence in complex geometry on GPU clusters

小野寺 直幸¹⁾, 吉田 啓之¹⁾, 高瀬 和之¹⁾, 青木 尊之²⁾
Naoyuki Onodera, Hiroyuki Yoshida, Kazuyuki Takase, and Takayuki Aoki

1) 日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究部門 (〒 319-1195 茨城県那珂郡東海村白石白根 2-4)

2) 東京工業大学 学術国際情報センター (〒 152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

Key Words: Multi-GPU application, Turbulence, Large-eddy simulation, Coherent-structure Smagorinsky model

1 緒言

乱流は渦の代表長さスケールの比がレイノルズ数の 3/4 程に比例して大きくなり、すべてのスケールの渦を解像した直接計算 (DNS) を行う事は非常に困難である。乱流のラージエディ・シミュレーション (LES) は格子解像度以下の物理量変動をモデル化をすることで、DNS に比べて少ない計算量で高いレイノルズ数の解析を行うことが可能である。実現象で取り扱うような複雑な問題に対して解析を行う場合、LES においても多くの計算資源と計算時間が必要であり高性能計算が不可欠である。差分法に基づく計算手法ではメモリアクセスが規則的であるため、GPU を用いることで非常に高速な計算が可能となる。

本研究では複数 GPU を用いた複雑物体周り的高精度 LES コードを開発する。乱流の構造を高精度に捉えるために、離散化手法として Morinishi 法 [1] を適用する。GPU の並列計算に適した高精度乱流モデルとして、メモリアクセスが局所的であるコヒーレント構造 Smagorinsky モデル (CSM)[2] を適用する。本研究は、計算機環境として本研究グループの GPU クラスタおよび東京工業大学の TSUBAME2.0 の GPU を利用することで、複雑物体周りの乱流現象の再現および解明を目指す。

2 複雑物体周りの LES 計算

複数 GPU を用いた LES 解析として、燃料集合体を模擬した体系に対して計算を行った。支配方程式として、非加熱の非圧縮性 Navier-Stokes 方程式を解く。計算条件として、流入速度・物体の直径に基づくレイノルズ数を $Re = 23000$ を設定し、格子解像度 $(N_1, N_2, N_3) = (192, 192, 640)$ に対して 4GPU を用いた。

図 1 に速度勾配テンソルの第 2 不変量の等値面 (上図・下図) およびマーカー量の分布 (上図) を示す。上図において、物体の先端部および後方に強い渦構造が存在しており、物体間においても細かな渦構造が確認できる。物体後方では乱流の強い拡散性により、マーカー量が激しく混合されている様子が確認できる。下図は、物体区間の断面の速度勾配テンソルの第 2 不変量の分布であり、正が回転が強い領域、負が歪が強い領域となる。計算結果より、正と負の領域が交互に分布する構造が確認でき、それらの構造は物体の直交方向と対角方向に濃淡が存在する。今後は、さらに解像度の高い計算を行うことで、乱流構造の詳細な把握を目指す。

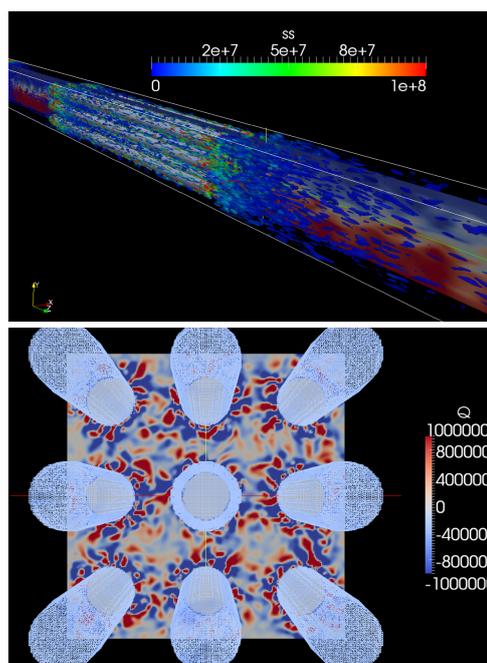


図 1: Second invariant of the velocity gradient tensor (Q) in complex geometry at $N = 192 \times 192 \times 640$.

3 結言

燃料集合体を模擬した体系において LES 解析を行い、物体周りに速度勾配テンソルの第 2 不変量の符号が異なる乱流構造の存在を確認した。さらなる詳細な解析のためには、より多くの格子解像度が必要であり、TSUBAME2.0 の GPU を用いた大規模計算を行うことで、乱流構造の解明を目指す。

参考文献

- [1] Y. Morinishi, T. Lund, O. Vasilyev, and P. Moin. Fully conservative higher order finite difference schemes for incompressible flow. *J.Comput.Phys.*, 143(1):90–124, 1998.
- [2] H. Kobayashi. The subgrid-scale models based on coherent structures for rotating homogeneous turbulence and turbulent channel flow. *Phys. Fluids*, 17:045104, 2005.