

ミニマルスパン・チャネル乱流の直接数値計算による 乱流伝熱解析

関本 敦

岡山大学学術研究院 環境生命科学学域

1. はじめに

壁に沿う流れは工学上極めて重要で、壁面近傍での乱流現象は熱交換器などの壁面摩擦抵抗や熱伝達に大きく影響する。壁乱流の予測制御のためには乱流統計量のデータ取得が必要である。実験計測ではすべての統計量を精度良く計測することは困難であるため、もっぱら支配方程式である Navier-Stokes 方程式をモデルを使わずに直接解く数値シミュレーション (DNS) が用いられる。乱流の最小スケール渦までを解像できる DNS は、実測では計測困難な三次元の流れ場の情報が得られるため、乱流現象や統計法則の解明および予測モデルの構築には必要不可欠なツールである。また、得られたデータは、三次元空間内の時系列データというビッグデータであり、その解析には大規模な計算環境や数値解析の技術が要求される。時々刻々と変化する乱流のダイナミクスの中には、レアなイベントが含まれるため、乱流統計量を正確に取得するためには、長時間の DNS 計算や複数の初期データから多くの試行計算が必要であり、HPC 環境の発展と共に研究も進展している。

壁近傍の乱流構造は、統計量の予測のみならず、制御対象としても注目すべき対象であり、微細渦から大規模構造まで階層構造を有している。壁面からの熱移動の主要因となる階層化された渦の相互作用の特徴を抽出することが、今後の高精度な乱流モデルや流れの制御、高効率な伝熱機器の設計開発の鍵となる。本研究で対象としたのは、水のような中程度のプラントル数流体から、化学プロセスにみられる高プラントル数流体、もしくは海洋 (海水) などの高シュミット数流体である。温度の移流拡散方程式と濃度の移流拡散方程式は本質的に同じ形で、区別する必要はないので、本研究では、伝熱問題を対象として、温度成層がある壁面近傍の乱流を考える。プラントル数 (Pr) は粘性係数と熱拡散率との比を表し、高プラントル数流体では、運動量の拡散よりも温度拡散の方が遅くなる。したがって、乱流中の最小スケールの渦に比べて、 $Pr^{1/2}$ 倍で小さなスケールの温度変動が生じるため、非常に多くの計算格子が必要となり、高プラントル数乱流の DNS は現在でも挑戦的な課題である。最近の一樣等方性乱流を対象とした研究では、速度場も温度場と同様に高解像度を用いて、浮力が微小スケールに及ぼす影響も詳細に数値シミュレーションで再現されている [1, 2]。壁面近傍の流れにおいては、高プラントル数の DNS を扱う例はまだ少なく、 $Pr = 100$ 程度の壁乱流の詳細を十分な解像で捉えた研究はまだ少ない。特に、壁面付近の熱伝達は乱流現象の影響が大きく、浮力による乱流中の大小様々な渦への浮力の影響を詳細に調べることは、乱流モデルのさらなる高精度化への基礎的な知見となる。

本研究では、乱流の最小渦と壁面の相互作用下における、温度場の最小スケール構造の振る舞いを詳細に調べるために、計算領域をスパン方向に絞ることで、速度の最小スケールと温度の最小スケールまでを解像した直接数値シミュレーションを行う。計算コストを抑えながら、浮力の強さのパラメータであるフルード数 Fr を変えた DNS 計算を実施できる。十分高いレイノルズ数であれば、このような計算手法によっても、壁面近傍の乱流状態を正しく捉えることができ、同様の手法

は粗面乱流の研究でも用いられている [3, 4, 5]. 近年, 工学現場でも利用されつつあるラーゼ・エディ・シミュレーション (LES) においても, 乱流プラントル数という経験定数が扱われるが, その壁面近傍の分布と他のパラメータとの関連性は未解明である. また, 近年では機械学習による超解像や, ニューラルネットワークによる物理モデリングなどのための乱流の壁面近傍モデルの高精度化に必要な不可欠なビッグデータとして有効利用できる.

2. 結果

壁面近傍の乱流伝熱もしくは物質拡散の予測精度向上に向けて, 非圧縮性流体の平行平板間乱流の高精度直接数値計算 (DNS) を実施した. 壁乱流の DNS には, 少ない格子点数でも高精度に計算できるスペクトル法を用いており, 計算手法については [5] で述べられているように, Legendre-Chebyshev 変換を用いて, 高精度に Helmholtz 方程式を解く. 乱流渦を十分に解像するために壁面近傍に格子を細かく切るため, 時間ステップの制約が大きくなる. これを緩和するために, 粘性項は時間に対して半陰的に取り扱う. 温度場による浮力効果については, 浮力項のみに密度変化を考慮するブシネスク近似を用いる. OakForest-PACS を利用して MPI と OpenMP のハイブリッド環境で計算を実行し, 壁面熱伝達へのプラントル数の影響を調査するため, $Pr = 1$ 程度から 100 までの DNS データを取得した.

高プラントル数流体においては, $Pr^{1/2}$ で温度境界層が薄くなるため, 例えば, $Pr = 100$ (油など) では空気 ($Pr = 0.7$) と比べて, 1 方向あたり 10 倍の格子解像度が必要である. 本課題ではスパン方向に計算領域を狭めた計算によって, 高プラントル数の壁面乱流伝熱の DNS を比較的低コストで実現できた. 乱流統計量には, 壁面近傍の速度変動のピーク位置よりも更に壁に近い位置で, 温度変動のピークが観測でき, 壁面近傍の温度変動の散逸スケールを十分に捉えることができることを確認した.

図 1 では, 非常に薄い温度の層が再現できている. 壁面近傍では, 温度層が何層にも折り畳まれることで, 伝熱が促進される. この層は流れ方向に非常に引き延ばされながら, 壁面近傍の乱流渦と相互作用していると考えられる. 壁面近傍の温度スカラー場の折りたたみ現象については, これまでに詳細な研究報告はなく, 壁面の温度変動や熱伝達率への寄与について詳細な解析が必要であるが, 比較的簡単な熱輸送機構であれば, モデル化することによって, 高プラントル数流体の伝熱シミュレーションの計算不可の大幅な低減に繋がるものと期待できる. また, この折りたたみ熱伝達機構の制御を目指せば, 高効率な乱流伝熱を実現できる可能性も広がる. 今後, 本課題で得られた DNS の時系列データベースを用いて, 詳細な伝熱ダイナミクスの解明を進める.

謝辞

本研究での計算は, 東京大学情報基盤センター若手利用 (2019 年度) の援助を受け, OakFoorest-PACKS を利用した.

参考文献

- [1] S. Okino, H. Hanazaki, *J. Fluid Mech.* **874**, 821 (2019).
- [2] S. Okino, H. Hanazaki, *J. Fluid Mech.* **891**, A19 (2020).
- [3] O. Flores, J. Jiménez, *Phys. Fluids* **22**, 071704 (2010).
- [4] M. MacDonald, *et al.*, *J. Fluid Mech.* **816**, 5 (2017).

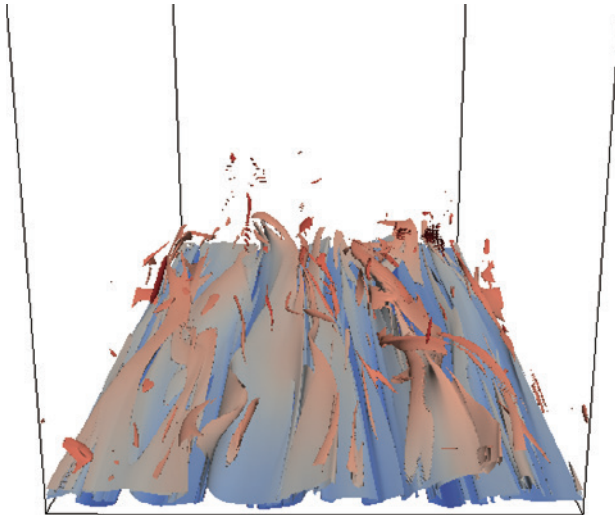
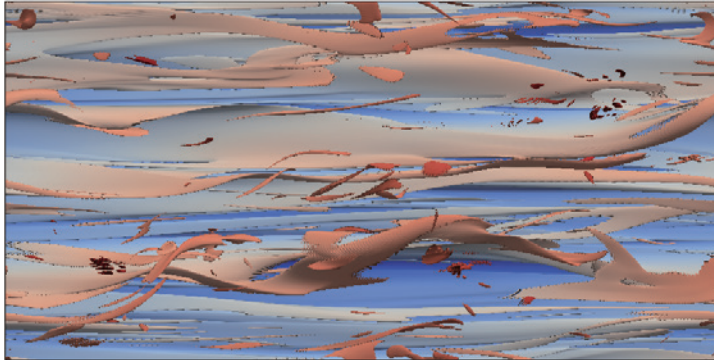


図1 $Re_\tau = 350$, $Pr = 100$ のときの冷却壁面近傍の温度の等値面 ($T/\Delta T = -0.25$) で色は流れ方向の速さを示す (赤が高速, 青が低速部). (上図) Top view (流れは左から右). (下図) 3D view (流れは手前から奥).

[5] A. Sekimoto, C. Atkinson, J. Soria, *J. Phys.: Conf. Series* **1001**, 012020 (2018).