

TSUBAME 共同利用 令和4年度 学術利用 成果報告書

利用課題名 粘性の温度依存性を考慮した乱流熱流動の直接数値解析

英文: Direct numerical simulations of turbulent heat transfer with temperature-dependent viscosity

利用課題責任者

須賀 一彦

所属

大阪公立大学 工学研究科 機械系専攻

<https://www.omu.ac.jp/eng/htlab/>

流体の温度変化に伴う物性値の変化が乱流熱流動場に与える影響を理解する為に、平行平板間乱流を対象として温度による物性値変化を考慮した直接数値解析を実施した。流体には水を想定し、チャンネル壁の上壁は 293[K]、下壁は 353[K]の等温壁とし、流体の密度・熱拡散率は一定で粘性係数のみが温度によって変化する乱流熱流動場を解析した。解析は格子ボルツマン法を用いて行い、摩擦レイノルズ数 300, 650, 1000 の3条件で解析を行った。その結果、粘性一定条件と比較して、高温壁側(低温壁)では乱れが減少(増加)し、乱流摩擦抵抗が減少(増大)することが分かった。また、粘性が変化する熱流動場においても、対数速度・温度領域を確認することができた。

To understand the effects of the temperature-dependent fluid properties on turbulent flows, we performed direct numerical simulations (DNSs) of turbulent channel flows with temperature-dependent fluid properties where isothermal conditions were specified for the top (293K) and bottom (353K) walls. We considered a water fluid with variable viscosity but constant fluid density and thermal diffusivity. The DNSs at the friction Reynolds number of 300, 650, and 1000 were performed by the lattice Boltzmann method. The results show that turbulence reduction (enhancement) occurs near the hot (cold) walls, leading to a decreased (an increased) frictional resistance. It is also found that the logarithmic region is still retained for the mean velocity and temperature of variable-viscosity turbulent flows.

Keywords: Lattice Boltzmann method, Turbulent channel flows, Heat transfer, variable-viscosity flow, logarithmic law

背景と目的

一般的な数値シミュレーションでは、温度はパッシブスカラーとして取り扱われ、温度が流動場に与える影響は無視されることが多い。しかし、燃焼など急激な温度変化を伴う熱流動場では、物性値が局所の流体温度に応じて変化するため、パッシブスカラーとして取り扱うことができない。しかし、このようなアクティブスカラーの乱流熱輸送に関する知見は少なく、対応する乱流モデルや壁モデルも少ない。本研究では、温度によって粘性係数が大きく変化する流体として水を対象とし、アクティブスカラーの直接数値解析を実施する。得られた結果より、粘性係数の変化が乱流場に与える影響を理解するとともに、乱流モデルの構築に必要な基礎的なデータベースを作成することを目的とする。

概要

本研究は、上壁 $T_{top} = 293$ [K]、下壁 $T_{bot} = 293$ [K]の等温壁とした平行平板間乱流を対象とした直接数値

解析を行った。流体には水を想定し、粘性係数の温度依存性のみを考慮した。本研究では、粘性係数 $\mu(T)$ は流体温度 T [K]の関数としたモデル $\mu(T) = A \times 10^{\frac{B}{T-C}}$ を用い、それぞれのモデル係数は $A = 2.414 \times 10^{-5}$ [Pa s], $B = 247.8$ [K], $C = 140$ [K]を用いた⁽¹⁾。その他の物性値は参照温度 $T_{ref} = (T_{top} + T_{bot})/2$ における値を使用した。流体は主流方向に圧力差を課して駆動し、摩擦レイノルズ数 $Re_\tau = 300, 650, 1000$ の3条件で解析を行った。計算領域は、 $Re_\tau = 300$ のケースでは、主流方向に $6H$ 、スパン方向に $3H$ とし、 $Re_\tau = 650, 1000$ のケースでは主流方向に $3H$ 、スパン方向に $1.5H$ とした。直接数値解析は格子ボルツマン法を用いて行い、速度場は3次元27方向多緩和時間格子ボルツマン法⁽²⁾を用いて解析し、温度場には3次元19方向速度正規化格子ボルツマン法⁽³⁾を用いた。また、不均衡修正の局所細密格子法⁽⁴⁾を用いて、物理量が急激に変化する壁近傍領域に細かい計算格子を配置した。

本研究では、壁面近傍では内層スケールで無次元化された格子幅が $\Delta^+ = 1.5$ となるように設定した。総格子点数は $Re_\tau = 300, 650, 1000$ のケースにおいて、それぞれ 4.5 億点、7.3 億点、22.5 億点となった。プログラムコードは CUDA Fortran によって記述されており、複数の GPU を用いた領域分割法によって並列化した。結果および考察

図 1 に壁面近傍 $y^+ = yu_\tau/v_{ref} \approx 10$ における、 $Re_\tau = 1000$ のケースの主流方向変動速度のスナップショットを示す。ここで、 y はそれぞれの壁からの距離を表し、 u_τ はそれぞれの壁における摩擦速度を表し、 v_{ref} は参照温度における動粘性係数を表している。図より、粘性係数一定条件の流れで見られる乱流構造と同様に、高温・低温壁の近傍では変動速度の高速・低速領域が主流方向に伸びるストリーク構造が確認される。しかし、高温壁・低温壁の近傍の乱流構造には違いが見られる。高温壁の近傍に見られるストリーク構造は、低温壁近傍の構造と比較してスパン方向幅が狭く、変動強度も強くなっていることが確認できる。

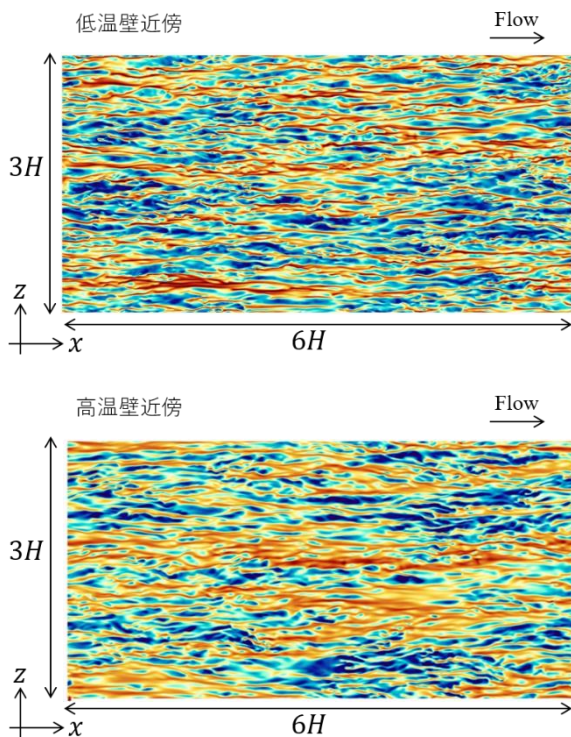


図1 高温、低温壁近傍の主流方向変動速度。変動速度 u' は摩擦速度 u_τ で無次元化され、 $-3 < u'/u_\tau < 3$ の範囲で可視化されている。赤は高速、青は低速領域を示している。上図は低温壁(上壁)近傍、下図は高温壁(下壁)近傍の結果を示す。

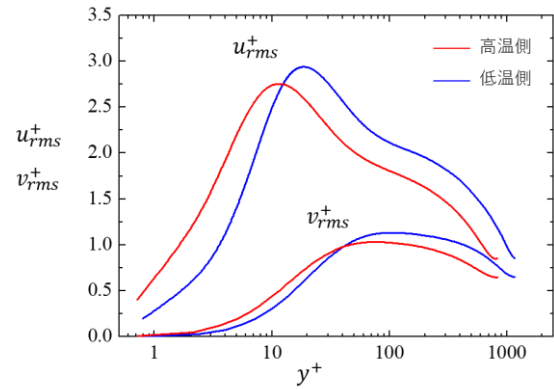


図2 $Re_\tau = 1000$ における主流方向・壁面垂直方向の乱流強度分布。乱流強度 u_{rms} 、 v_{rms} はそれぞれの壁面の摩擦応力の平均値を基にした摩擦速度で無次元化を行っている。

次に、乱流統計量について議論を行う。図2に、 $Re_\tau = 1000$ における主流方向・壁面垂直方向の乱流強度を摩擦速度で無次元化した結果を示す。図より、 $y^+ < 10$ の壁面の近傍では、高温壁側の乱流強度が低温壁側の結果を上回っており、主流方向・垂直方向の乱れ強度ともに鋭い立ち上がりを見せている。いっぽうで、壁面から離れた領域($y^+ > 10$)では、乱れ強度の最大値は低温壁側のほうが大きく、チャンネル中央まで強い乱れが維持されている様子が分かる。なお、ここでは $Re_\tau = 1000$ の結果のみを示しているが、この傾向は他の摩擦レイノルズ数条件でも見られる。

最後に、図3に対数速度分布、対数温度分布を示す。なお、温度には、壁面温度からの偏差 θ を示している。また、比較の為に粘性係数一定条件の結果として速度分布には直接数値解析結果⁽⁵⁾、温度分布には経験式⁽⁶⁾を示している。図より、得られた平均速度分布の傾きは、粘性係数一定条件の結果とおおむね一致しており、粘性係数が温度に応じて変化する流れ場においても、対数領域が存在することが示唆される。いっぽう、平均温度に関しては、 $Re_\tau = 650, 1000$ のケースにおいて、壁面遠方で分布が一致する領域($50 < y^+ < 200$)が見られる。この領域の平均温度の傾きは、粘性係数一定条件の経験式の傾きとおおむね一致しており、対数領域に対応していると考えられる。この対数領域において、平均速度分布は低温壁側では下方にシフトし、高温壁側では上方にシフトする。これは、低温壁側の壁面摩

擦係数が増加し、高温壁側で増加したことを意味する。いっぽうで、平均温度に関しては、逆の傾向が見られ、高温壁側の平均温度は下方にシフトし、低温壁側の平均温度は上方にシフトする。つまり、高温側で壁面熱伝達率が増加し、低温側で増加したことが示唆される。実際に、壁面摩擦係数は、高温壁側では低温壁側と比べて 20%ほど小さいが、ヌセルト数は高温壁側では低温壁側と比べて 7%ほど大きく、粘性係数の変化が速度場・温度場に与える影響が異なっていることが確認された。

まとめ、今後の課題

粘性係数の温度依存性が乱流熱流動に与える影響を議論した。高温・低温壁の近傍では粘性変化が乱流渦構造、乱流強度に影響を及ぼし、対数速度・温度分布の上下シフトを導くことが分かった。対数領域の分布において、高温壁側の分布は上方シフトし、低温壁側の分布は下方シフトするが、温度分布では逆の傾向が見られることが分かった。今後は、さらに詳細な統計量を取得し、乱流輸送現象を明らかにする。

参考文献

- [1] C.O. Popiel, J. Wojtkowiak, *Heat Transfer Engineering* **19** (3) (1998), 87–10.
- [2] K. Suga *et al.*, *Computers & Mathematics with Applications* **69** (6) (2015), 518-529.
- [3] K. Suga *et al.*, *International Journal of Heat and Fluid Flow* **68** (2017), 225-236.
- [4] Y. Kuwata, K. Suga, *Journal of Computational Physics* **311** (2016), 348-362.
- [5] K. Iwamoto, K. *et al.*, Database of Fully Developed Channel Flow-THTLAB Internal Report, Rapport technique, THTLAB, Dept. of Mech. Engng., The Univ. of Tokyo.
- [6] B.A. Kader, *International Journal of Heat and Mass Transfer* **24.9** (1981), 1541-1544.

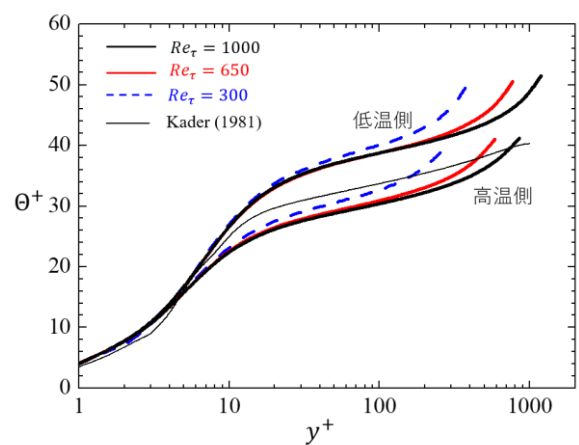
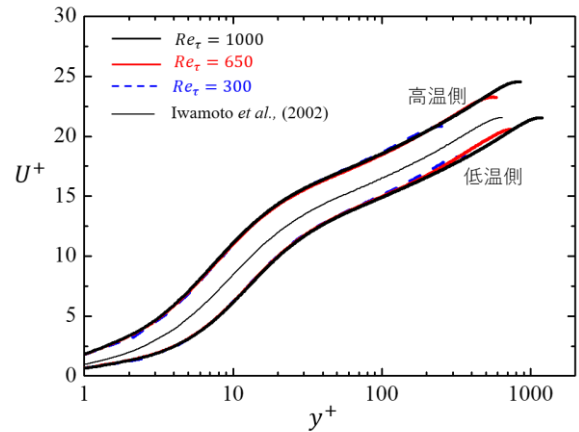


図4 平均速度・温度分布の比較. 上図には速度分布, 下図には温度分布を示している. 比較の為、粘性係数一定条件の結果として、平均速度分布の直接数値解析結果⁽⁵⁾、平均温度分布の経験式⁽⁶⁾を示している。