

TSUBAME 共同利用 令和5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輸送現象のモデル化
 英文: On the modelling of turbulent heat transfer of turbulent flows
 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の理解とモデル化の為に、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、温度依存の粘性係数が乱流に与える影響は、壁面摩擦速度と局所の粘性係数を用いた半局所スケールリングによって整理できることが分かった。

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 the semi-local scaling based on the local viscosity and the wall friction velocity reasonably scale the turbulence modification by the variable viscosity.

Keywords: Lattice Boltzmann method, Turbulent channel flows, Heat transfer, Variable-viscosity, Water flow

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について調査を行い、粘性係数が変化する乱流場を予測する為に工学的な壁面モデルの提案を行う。

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。主流方向に圧力差を与えることで流体を駆動し、摩擦レイノルズ数 $Re_\tau = 300, 650, 1000$ の3条件で解析を行った。計算領域はチャンネル間隔 H 、に対して、 $Re_\tau = 300$ 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ており、コロモゴロフスケール見積もられる温度場の最小渦スケール η の 1~2 倍程度の計算格子幅となっている。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に乱れ強度を比較した結果を示す。壁面からの距離 y_n は、壁面温度における動粘度 ν_w 、壁面摩擦速度 u_τ で無次元化しており、 $y_n^+ = y_n u_\tau / \nu_w$ で表される。また、主流・壁面垂直方向の乱れ強度は、それぞれの壁面の摩擦速度で無次元化した。図より、温度に依存する粘性係数の影響によって、高温側の乱れ強度は壁面のごく近傍で増加するが、壁から離れると低温側よりも小さくなる。また、この傾向はレイノルズ数に依らず一貫して見られることが分かった。

図2には局所の動粘度 ν 、壁面摩擦速度 u_τ で無次元化した距離 $y_n^* = y_n u_\tau / \nu$ を用いる半局所スケールリングによって乱流強度を整理した結果を示す。半局所スケールリングによって整理された乱れ強度は、壁面温度に依らないことが分かる。また、 $Re_\tau = 1000$ における結果は、粘性係数一定とした結果⁽⁵⁾と一致しており、半局所スケールリングによって粘性係数が乱流量に与える影響をスケールリング可能であることが分かる。

次に、渦粘性乱流モデルに必要な渦動粘度、渦熱拡散率に関して、半局所スケールリングの有効性を議論する。図3に、局所の動粘度によって無次元化された渦動粘度 ν_t/ν 、渦熱拡散率 α_t/ν を粘性係数一定とした直接数値解析の結果⁽⁴⁾と比較した結果を示す。壁面からの距離は、 $y_n^* = y_n u_\tau / \nu$ とした。図より、粘性係数が流体温度に応じて変化するケースにおける渦動粘度 ν_t/ν 、渦熱拡散率 α_t/ν ともに粘性係数一定の結果と一致することが確認できる。つまり、半局所スケールリングは運動量・熱輸送に関する渦拡散率のスケールリングにおいても有効であり、粘性係数一定条件下で開発された乱流モデルであっても半局所スケールリングを用いて修正することによって、粘性係数が変化する乱流場においても適用しうることが示唆された。

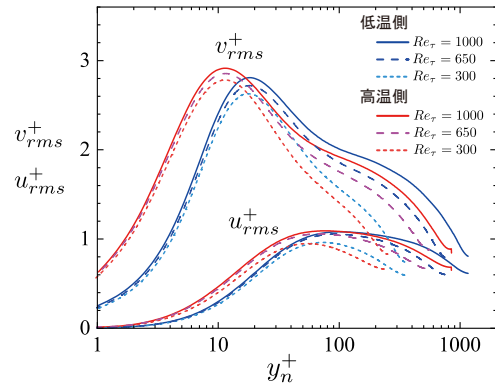


図1 主流・壁面垂直方向の乱流強度分布. 乱流強度 u_{rms} 、 v_{rms} は壁面の摩擦速度で無次元化しており、壁面からの距離は $y_n^+ = y_n u_\tau / \nu_w$ とした。

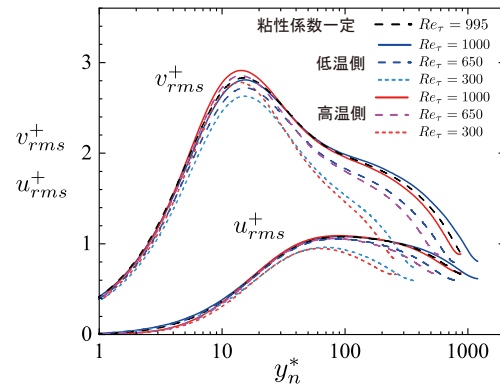


図2 乱流強度分布. 壁面からの距離 $y_n^* = y_n u_\tau / \nu$ とする半局所スケールリングを用いてプロットしており、粘性一定の結果⁽⁵⁾と比較を行った。

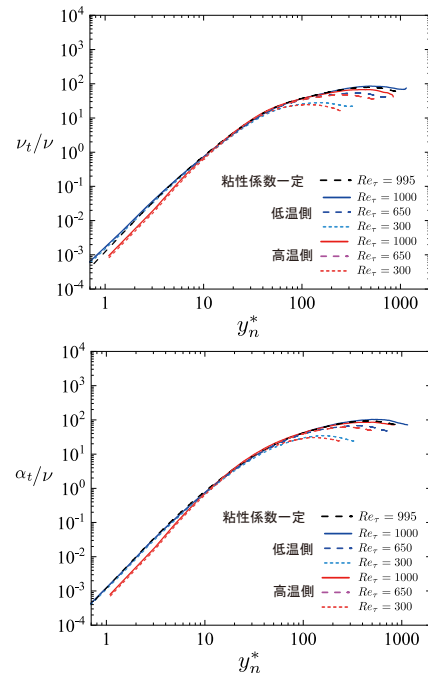


図3 渦動粘度 ν_t/ν (上図)、渦熱拡散率 α_t/ν (下図)の比較. 壁面からの距離 $y_n^* = y_n u_\tau / \nu$ とする半局所スケールリングを用いてプロットしており、粘性一定の結果⁽⁵⁾と比較を行った。

最後に半局所スケールリングを用いた壁モデルについて議論を行う。図3より、半局所スケールリングを用いることによって、粘性係数が変化する乱流場で得られた乱流統計量は、粘性係数一定の結果と一致することが確認された。そこで、半局所スケールリングを用いて既往の乱流モデルの拡張を行う。ここでは、一例として、混合長モデルを用いた壁モデルの拡張について説明する。既往の混合長モデルでは、運動量・熱輸送に関する渦拡散率は壁面からの距離 y_n^+ の関数としてモデル化される。そこで、粘性変化を伴う乱流場においては、局所の動粘度 ν で無次元化された運動量・熱輸送に関する渦拡散率が壁面からの距離 y_n^* の関数としてモデル化できると仮定する。なお、渦拡散率の表式は既往の混合長モデルと同じとして、 y_n^+ の代わりに、 y_n^* を用いてモデル化を行った。拡張を行った混合長モデルの妥当性を評価する為に、拡張混合長モデルによる壁面モデルを用いたラージ・エディ・シミュレーションを行った。支配方程式はフィルター化された非圧縮の運動量式・エネルギー式であり、支配方程式は有限差分法によって離散化を行った。壁面摩擦応力、壁面熱流束は拡張混合長モデルでモデル化を行った平衡境界層の運動量式・エネルギー式によって与えた。サブ・グリッド・スケール応力のモデル化にはスマゴリンスキーモデル⁽⁶⁾を用いた。摩擦レイノルズ数は1000とし、計算格子数は主流方向に60格子、スパン方向に60格子、壁面垂直方向に40格子の等間隔格子とし、その他の解析条件は直接数値解析と同様とした。

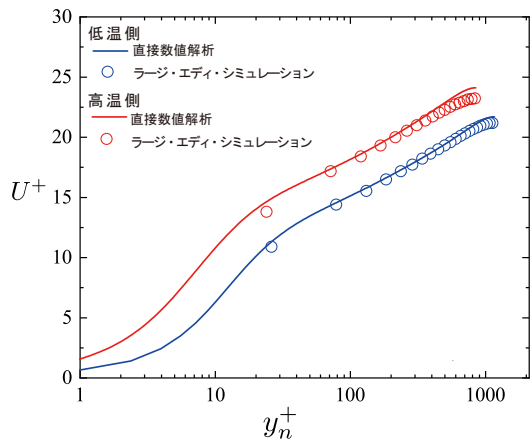


図4 摩擦速度で無次元化された主流平均速度 U^+ 分布の比較。実線は直接数値解析、シンボルは壁モデルを用いたラージ・エディ・シミュレーションの結果を示している。

図4に、壁面モデルを適用したラージ・エディ・シミュレーションにより得られた平均速度を直接数値解析と比較した結果を示す。図より、拡張を行った混合長モデルは、粘性変化による高温壁近傍の平均速度の増加、低温壁近傍の減少傾向を良好に再現していることが確認できる。よって、半局所スケールリングを用いることによって、既往の乱流モデルを粘性変化に対応したモデルに拡張でき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。粘性係数の変化に伴って、高温壁(低温壁)近傍で乱れ量が増大(減少)することが分かった。粘性係数が変化する乱流熱流動場は、壁面摩擦速度、局所の動粘度を用いた半局所スケールリングによってスケールリング可能であることが分かった。また、半局所スケールリングを用いることによって、粘性係数一定条件で開発された既往の乱流モデルを拡張し、粘性係数が変化する乱流場に適用しうることが示唆された。

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] S. Pirozzoli *et al.*, *J. Fluid Mech.* **788** (2016), 614–639.
- [6] J. Smagorinsky, *Monthly weather review* **91** (1963), 99–164.