

圧縮性熱乱流境界層の物理とモデリングに関する研究

報告書番号：R19JACA31

利用分野：JSS2 大学共同利用

URL：<https://www.jss.jaxa.jp/ar/j2019/11412/>

● 責任者

河合宗司, 東北大学大学院工学研究科 航空宇宙工学専攻

● 問い合わせ先

平井遼(hirai@klab.mech.tohoku.ac.jp)

● メンバ

河合 宗司, 平井 遼, 森 優樹

● 事業概要

本研究では, 加熱・冷却壁を伴う圧縮性熱乱流境界層において, 壁面近傍の乱流物理に関して LES による解析を行い, 壁面熱流束を受けた際の平均速度分布と乱流構造の関連性を明らかにする. さらに LES 解析により得られた知見を元にして, 熱壁乱流に適用できる LES 壁面モデルの提案を行う.

参考 URL: http://www.klab.mech.tohoku.ac.jp/index_jpn.html

● JAXA スーパーコンピュータを使用する理由と利点

特に冷却壁条件において, 乱流境界層内層乱流に関わる壁ユニットベースのレイノルズ数は高レイノルズ数条件となり, 冷却壁を伴う熱乱流境界層の高忠実な LES 計算には非常に高い計算コストがかかり, JSS2 などのスーパーコンピュータを用いた大規模並列計算が必要不可欠である.

● 今年度の成果

本研究では加熱・冷却壁を伴う乱流境界層に対して大規模 LES 解析を行い, 壁面熱流束を伴う乱流境界層現象における詳細な乱流物理の解明を目指している. さらに, LES 解析により得られた知見をもとにした LES 壁面モデルの改善を行っている. 今年度は下記の計算条件で壁面モデルを使わない通常の大規模 LES, および壁面モデル LES の計算を行った. 主流条件は $[\text{Re}]_{\theta}=5,000, M_{\infty}=2.28$ とした (レイノルズ数の代表長さ θ は境界層の運動量厚さ). 空間差分に 6 次精度コンパクト差分法, 時間積分法に 3 段 3 次 TVD Runge-Kutta 法を用いた. 壁面温度 T_w は空力加熱を受けた壁面温度 (回復温度) を T_r とした時に $T_w/T_r=0.5, 1.0, 2.0$ の全 3 ケースを計算した. $T_w/T_r < 1.0$ のときに冷却条件, $T_w/T_r > 1.0$ のときに加熱条件, $T_w/T_r = 1.0$ のときに擬似断熱条件となる.

図 1 に, (a) 密度および粘性係数の変化を考慮する変換 [Trettel & Larsson (2015), Patel et al. (2015)] を施した平均速度分布と (b) 粘性応力分布を示す. 圧縮性乱流境界層で良く用いられる van

Driest 変換と比較して, 図 1 (a) に示す速度スケージング則は各ケース間で良い一致を示すが, 対数則付近で僅かな差異が生じていることがわかる. 本研究で行った解析により, この差異が 図 1 (b) に示す粘性応力の分布の差異から生じていることが明らかになった.

乱流境界層内層域, すなわち平衡流における運動量バランス(全剪断応力一定)を考えると, 粘性応力分布の差異は, 直接的にレイノルズ剪断応力の差異としても現れる(図 1). レイノルズ剪断応力と乱流構造の間には密接な関係があることから, 乱流構造にも変化が生じていることが考えられる. 図 2 に $y^* \approx 15$ 高さ断面における瞬時の主流方向速度変動を内層長さスケールで示す ($y^* = \sqrt{\rho} \sqrt{\tau_w} y / \mu$ は準局所長さスケール). 疑似断熱壁 (図 2 (a)) と比較して, 加熱壁 (図 2 (b)) で小さく, 冷却壁 (図 2 (c)) で大きくなる乱流構造の変化が見られ, この乱流構造の変化が図 1 (a) の平均速度分布の差異の原因であることが示唆される.

さらにこれらの現象理解を基に, 渦粘性近似における長さスケールを変更することにより, LES 壁面モデルの改善にも一部成功している. 図 3 に, 壁面モデルを使わない通常の大規模 LES と同条件での壁面モデル LES 結果の比較である (a) van Driest 変換された速度分布と (b) 温度分布を示す. 改善した壁面モデル LES は通常の LES の解と良く一致しており, 平板乱流においては提案した改良が良く機能していることが示されている.

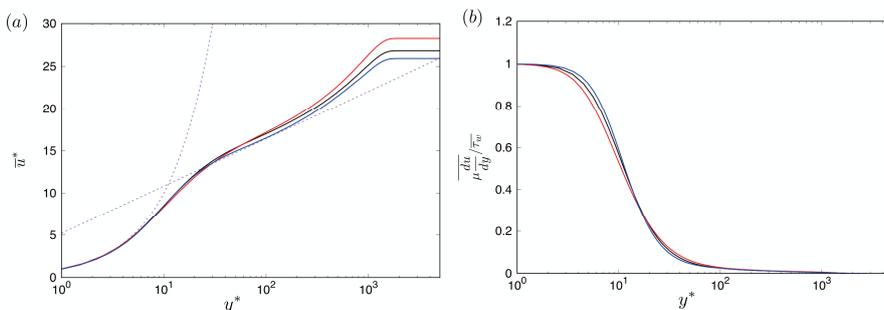


図 1: 断熱・加熱・冷却壁を伴う熱乱流境界層の比較. (a) 密度および粘性係数の変化を考慮する変換 [Trettel & Larsson (2015), Patel et al. (2015)] を施した平均速度分布, (b) 粘性応力分布. 黒線, 疑似断熱条件; 赤線, 加熱条件; 青線, 冷却条件; 点線, 壁法則.

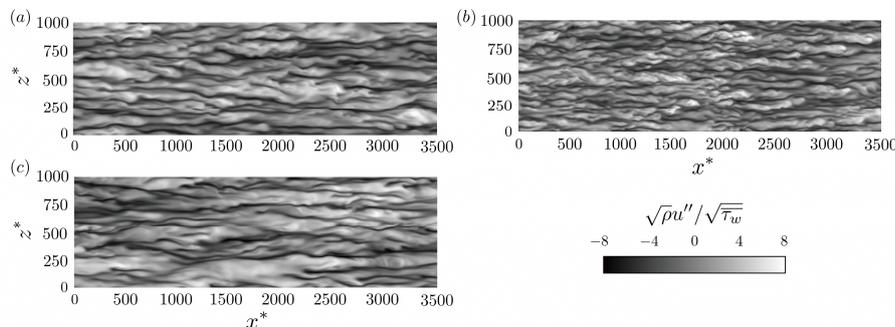


図 2: $y^* \approx 15$ の高さ断面における瞬時の主流方向速度変動. (a) 疑似断熱条件, (b) 加熱条件, (c) 冷却条件.

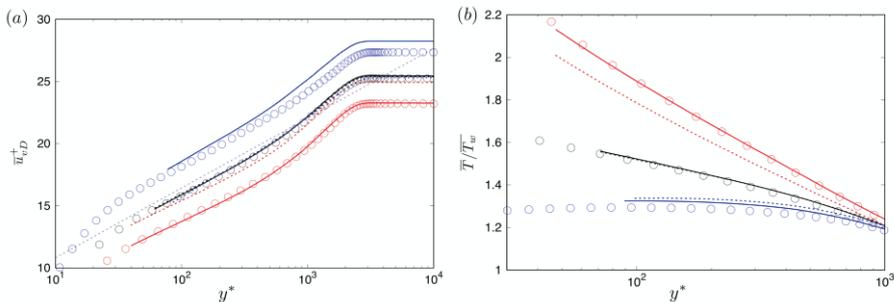


図 3: 提案壁面モデル LES による断熱・加熱・冷却壁を伴う熱乱流境界層の予測精度. (a) van Driest 変換を施した平均速度分布, (b) 温度分布. シンボル, 参照解 (通常の LES); 実線, 改善した壁面モデル LES; 破線, 従来の壁面モデル LES. 黒線, 疑似断熱条件; 赤線, 加熱条件; 青線, 冷却条件; 点線, 壁法則.

● 成果の公表

-口頭発表

- (1) 平井遼, 河合宗司:高熱流束を伴う熱乱流境界層の壁面モデル構築に向けた LES 解析, 第 37 回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム
- (2) R. Hirai, S. Kawai, "Assessment of Wall-Modeled LES for Turbulent Boundary Layers with Heated/Cooled Wall", 72nd Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics

● JSS2 利用状況

● 計算情報

プロセス並列手法	MPI
スレッド並列手法	OpenMP
プロセス並列数	660 - 1020
1 ケースあたりの経過時間	120 時間

● 利用量

総資源に占める利用割合※1 (%) : 0.11

内訳

計算資源		
計算システム名	コア時間(コア・h)	資源の利用割合※2 (%)
SORA-MA	976,363.17	0.12
SORA-PP	0.00	0.00
SORA-LM	0.00	0.00
SORA-TPP	0.00	0.00

ファイルシステム資源		
ファイルシステム名	ストレージ割当量(GiB)	資源の利用割合※2 (%)
/home	291.82	0.24
/data	14,657.98	0.25
/tmp	3,125.00	0.27

アーカイバ資源		
アーカイバシステム名	利用量(TiB)	資源の利用割合※2 (%)
J-SPACE	0.00	0.00

※1 総資源に占める利用割合 : 3つの資源(計算,ファイルシステム,アーカイバ)の利用割合の加重平均

※2 資源の利用割合 : 対象資源一年間の総利用量に対する利用割合