

## 圧縮性乱流の高精度数値シミュレーションに関する研究

報告書番号：R19JACA37

利用分野：JSS2 大学共同利用

URL：<https://www.jss.jaxa.jp/ar/j2019/11415/>

### ● 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

加茂川諒(kamogawa@klab.mech.tohoku.ac.jp)

### ● メンバ

河合 宗司, 石塚 沙也子, 加茂川 諒

### ● 事業概要

本研究では, (a)壁面モデル LES(wall-modeled LES:WMLES)の乱流生成メカニズム, および, (b)圧力勾配に起因する剥離・再付着を伴う複雑な流れに対する WMLES の予測精度を明らかにするために, 壁面まで解像する通常の大規模 LES(wall-resolved LES:WRLES)および WMLES を実施した. その結果, WMLES では, 壁面近傍に現れる格子スケールの対の渦構造が擬似的なストリーク構造の役割を果たし, 乱流生成に寄与していることを明らかにした. また, 圧力勾配に起因する剥離・再付着を伴う乱流境界層において, WMLES と WRLES の結果を比較すると, 壁面剪断応力に若干の誤差は見られるものの, WMLES が平均主流方向速度やレイノルズ剪断応力について良い予測精度を示すことを明らかにした.

### ● JAXA スーパーコンピュータを使用する理由と利点

本研究では, WMLES に加えて, その検証用データベースとしての高精度・大規模 LES 解析が重要な役割を果たすため, LES 解析の実施が必須となる. 通常の大規模 LES 解析では, 内層乱流まで解像する必要があるために, 高い計算コストを要する. そのため, JSS2 利用による大規模並列計算が不可欠である.

### ● 今年度の成果

(a) 平板乱流境界層に対して通常の内層乱流まで解像する WRLES と WMLES を用いた解析を行い, 乱流統計量に加え, 瞬時の流れ場や相関係数を比較することで WMLES の乱流生成メカニズムに関する解析を実施した. 用いたレイノルズ数条件は  $[\text{Re}]_{\tau} \approx 740, 1400, 8500$  であり, そのうち初めの 2 条件は WRLES が実施可能な比較的低レイノルズ数と中程度のレイノルズ数, 三つ目は計算コストの観点から WRLES が困難であり, 今後 WMLES の適用が期待される高レイノルズ数となっている.

WRLES は初めの 2 つのレイノルズ数条件で, WMLES は全 3 条件で解析を実施した. また, 一様流マッハ数はいずれのレイノルズ数においても  $M_\infty=2.28$  とした. 図 1 は【Re】 $_\tau \approx 1400$  おける WMLES の主流方向速度変動量の瞬時場である. WMLES の流れ場には壁面付近に高速・低速の速度変動成分がスパン方向に交互に並んだ対の渦構造が見られる. またその構造は, 壁面ごく近傍の小さい構造およびその上方の比較的大きな構造の二層構造になることが分かった. 図 2 は  $y/\delta \approx 0.07, 0.015$  における主流方向速度変動量のスパン方向および主流方向自己相関係数である. 図 1 における壁面ごく近傍の小さい渦構造の上方に形成される渦構造①に対応する  $y/\delta \approx 0.07$  位置の自己相関係数を見ると, WMLES はスパン方向, 流れ方向の主要な長さスケールを WRLES と同程度に捉えていることが分かった(図 2 (a), (c)). 一方, 図 1 の壁面ごく近傍の渦構造②に対応する  $y/\delta \approx 0.015$  では, スパン方向の長さスケールを WRLES と比較して大きく予測している(図 2 (b)). この傾向は全てのレイノルズ数で同様である. またこの壁面ごく近傍の渦構造の長さスケールは, 本研究で使用する 6 次精度コンパクト差分法で捉えることが可能な格子 6 点ほどのスケールであり, 物理的なスケールの現象ではなく, 計算手法と格子スケールで決まるのスケールの現象であることが明らかになった. また一方で, この壁面ごく近傍の渦構造②は, 流れ方向には WRLES と同程度のスケールを持っている(図 2 (d)). 以上の結果より, WMLES では壁面近傍に現れる格子スケールの対の渦構造が擬似的なストリーク構造の役割を果たし, レイノルズ応力の発生および正しい外層乱流の予測につながっていると考えられる.

(b) 圧力勾配に起因する剥離・再付着現象を伴う乱流境界層に対して, 平衡および非平衡壁面モデル LES を実施し, 得られた乱流統計量について, WRLES データベースと比較することで考察を行った. なお, 比較対象とした高精度 WRLES データベースは, すでに我々の研究グループで構築していたものを用いた. 流れ場条件は, 現状, WRLES が実施できる最大のレイノルズ数条件である【Re】 $_\theta=2000$ ,  $M_\infty=0.2$  である. 図 3 は平均主流方向速度およびレイノルズ剪断応力, 図 4 は壁面摩擦係数および壁面圧力係数を示している. 平衡および非平衡どちらの壁面モデル LES も, 平均主流方向速度およびレイノルズ剪断応力について全体的に大差は無く, 比較対象の WRLES と非常に良い一致を示している. 一方, 壁面モデルで予測する壁面剪断応力の値については, どちらの壁面モデルにおいても差異が見られる. このことは, 圧力勾配などに起因する外層での流体现象が流れ場全体に大きく影響する場合, 壁面モデルで与えられる壁面剪断応力が若干ずれていても, 外層をモデル化せずに計算している WMLES が良い予測精度を示すことを示唆していると考えられる. 今後は壁面剪断応力と流れ場全体の関係についてより詳細に調べるとともに, 特に誤差の大きかった再付着後における壁面モデルの改善に向けた研究を行う予定である.

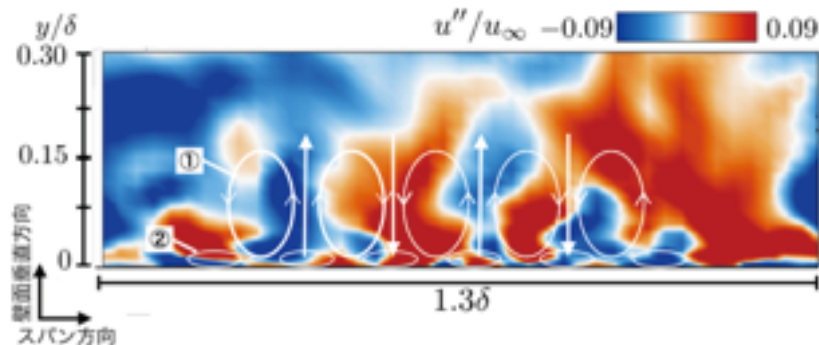


図 1: 平板乱流境界層  $Re_\tau = 1400$  おける WMLES の主流方向速度変動量の瞬時場

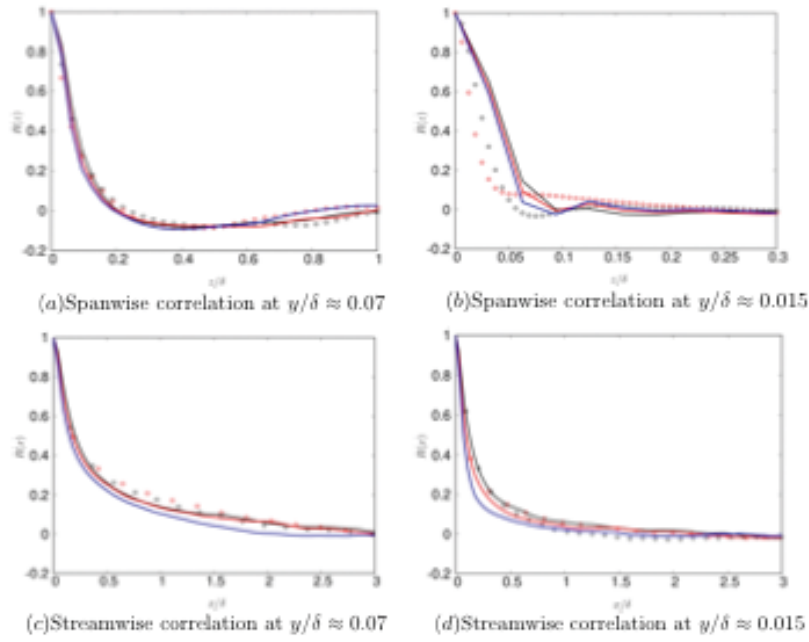


図 2: 平板乱流境界層における主流方向速度変動の自己相関係数

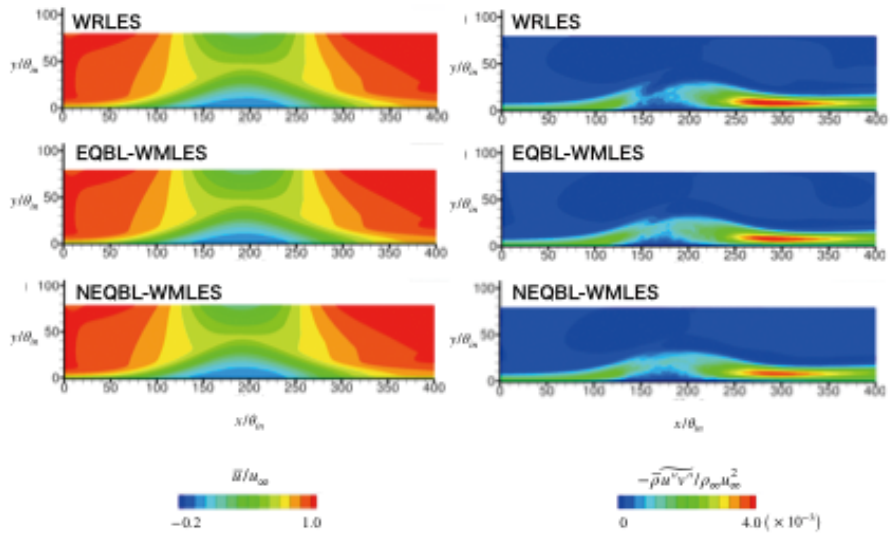


図 3: 剥離・再付着乱流境界層の平均主流方向速度およびレイノルズ剪断応力の比較(a:WRLES, b:平衡壁面モデル LES, c:非平衡壁面モデル LES)

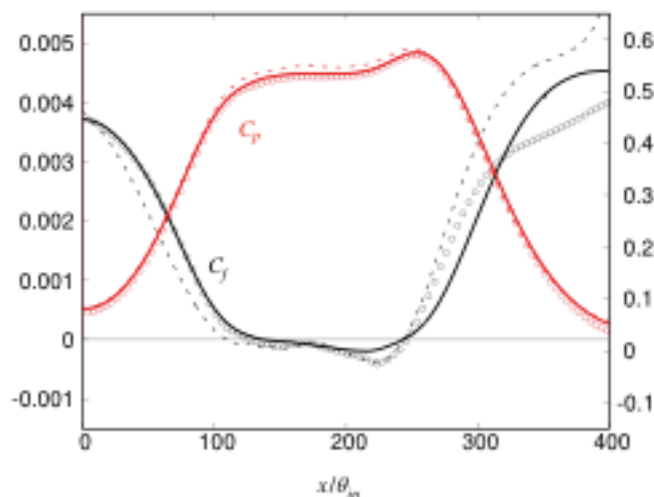


図 4: 剥離・再付着乱流境界層の平均壁面摩擦係数および壁面圧力係数の比較(丸:WRLES, 実線:平衡壁面モデル LES, 破線:非平衡壁面モデル LES)

## ● 成果の公表

-口頭発表

石塚沙也子, 河合宗司, "壁面モデル LES における乱流生成機構と乱流構造,"第 33 回数値流体力学シンポジウム, 札幌市, 北海道, 2019 年 11 月.

## ● 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	15 - 1930
1 ケースあたりの経過時間	4000000000 時間

### ● 利用量

総資源に占める利用割合<sup>\*1</sup> (%) : 0.02

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 <sup>*2</sup> (%)
SORA-MA	152,565.24	0.02
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	13.67	0.01
/data	4,241.31	0.07
/ltmp	2,799.48	0.24

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