

TSUBAME 共同利用 令和6年度 学術利用 成果報告書

利用課題名 直接数値解析データを用いた非平衡壁面モデルの開発

英文: Development of non-equilibrium wall model by using the direct numerical simulation data

利用課題責任者

須賀 一彦

所属

大阪公立大学 工学研究科

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

直接数値解析データを用いて、ラージ・エディ・シミュレーションに適用する汎用的な非平衡代数壁モデルの検討を行った。対象とした流れ場は、チャンネル乱流・平面衝突噴流として、直接数値解析で得られるデータを用いて、モデル化を施したフィルター化運動量式を解析し、局所的な乱流の非平衡が混合長モデルの係数に与える影響を調査した。その結果、チャンネル乱流の壁面近傍においても、混合長モデルに含まれる係数は局所的な非平衡によって時空間的な分布を持つことが明らかとなった。また、非平衡の影響は、平面衝突噴流場でより顕著にみられ、モデル係数には歪み速度テンソルなどを用いてモデル化する必要があることが明らかとなった。

We performed direct numerical simulations to explore the non-equilibrium wall model for large eddy simulations. The flow geometries were turbulent channel flow and plan impinging jet flow and analyzed the filtered momentum equation to clarify the effects of local non-equilibrium on the mixing-length model in the filtered momentum equation. The results show that the model coefficient in the mixing-length model exhibits spatial and temporal variations depending on the local non-equilibrium. This effect is more pronounced for the plan impinging jet flow and the coefficient in the mixing-length model needs corrected by using the flow parameters such as the local strain rate tensor.

Keywords: Direct numerical simulation, wall modeling, mixing-length model, channel flow, plan impinging jet flow

背景と目的

近年の急速な計算機技術の発展に伴い、設計現場で使用される乱流の数値解析手法は、平均場を解くレイノルズ平均モデルから、時空間的な乱流変動を解くラージ・エディ・シミュレーション (LES: Large Eddy Simulation) に置き換わりつつある。LES では支配方程式にフィルター化平均方程式を用いるため、直接数値解析と比較して粗い計算格子を利用することができる。しかし、壁面近傍においては、境界層を解像する為に非常に細かい計算格子が要求されるため、解析コストは依然として高い。そこで、壁面近傍の計算負荷の軽減のために、壁面近傍に粗い計算格子を用いて、モデル化された壁面摩擦応力を境界条件として与える壁面モデルLESが提案されている。これまで、様々な壁面モデルが提案されているが、いずれも混合長モデルを基本としており、そのモデル係数には一定値が採用されている。その為、運動量輸送の局所的な非平衡性が渦粘性に与える影響を原理的に考慮できない。本研究では、チャネ

ル・平面衝突噴流の直接数値解析を行い、局所的な非平衡性が混合長モデルの係数に与える影響を調査し、モデル改良の指針を得ることを目的とする。

概要

工学応用を見据えた壁モデル LES に組み合わせる汎用的な壁面モデルとして、薄層近似された運動量式を積分することで得られる非平衡代数壁モデル⁽¹⁾の開発を行う。チャンネル・平面衝突噴流の直接数値解析を実施し、得られた瞬間場にフィルター平均を施し、モデル化されたフィルター平均運動量式を解析する。特に、局所的に生じる乱流の非平衡が運動量式内の渦粘性モデルにあたえる影響について議論する。

チャンネル乱流の解析では、摩擦レイノルズ数を 300 と 650 とした 2 通りで解析を行う。計算格子は、壁面近傍の粘性低層内部に数点の計算格子が入るように設定し、計算領域 $6\delta(x) \times 2\delta(y) \times 3\delta(z)$ に対して、摩擦レイノルズ数 650 のケースでは $512(x) \times 256(y) \times 512(z)$ とした。解析の妥当性を評価するために、摩擦レイノルズ数 300, 650 のケースで平均速度分布を比較

した結果を図1に示す。図より、本研究の結果は文献⁽²⁾の結果とよく一致しており、解析の妥当性が確認された。

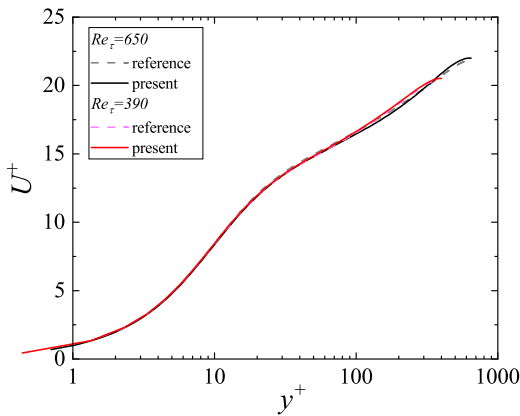
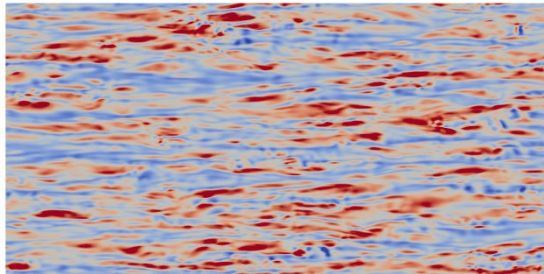
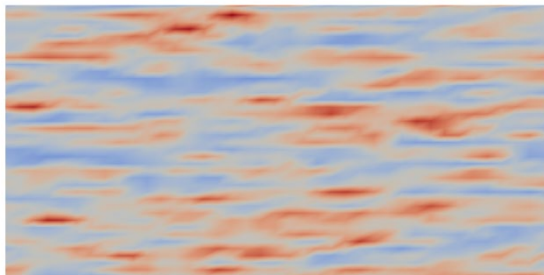


図1 平均速度分布の比較.

(a)



(b)



(c)

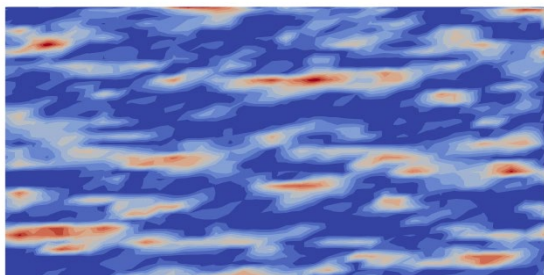


図2 (a)壁面摩擦応力, (b)フィルター化壁面摩擦応力, (c)混合長モデルの係数. (a), (b)は平均の摩擦応力で無次元化しており, 0 が青色, 2 が赤色に対応する. (c)は標準値 0.4 との差を標準値で規格化しており, 青が-1, 赤が1を示す.

次に、壁モデルで予測を行う壁面摩擦応力について議論する。図2(a)に瞬時の壁面摩擦応力を示す。壁面摩擦応力は、平均の摩擦応力を用いて無次元化を行った。図2(a)より、瞬時の壁面摩擦応力は、主流方向に伸びた乱流構造であるストリークの影響を強く受けていることが分かる。次に、図2(b)にフィルター化を施した摩擦応力分布を示す。ここで、フィルター幅は $\Delta_x^+ = 104$, $\Delta_z^+ = 52$ と設定し、 $40(x) \times 40(z)$ と粗視化したLESを想定した。図2(b)より、フィルター化を施した壁面摩擦応力は、フィルター化前と比べて摩擦応力の空間的な変動は小さいが、主流方向に伸びるストリークの影響を受けた分布となっていることが確認できる。次に、フィルター化されたデータを用いて壁モデルに含まれる混合長モデルの評価を行う。本研究では、薄層近似を施した運動量式に混合長モデルを適用した下記の式の解析を行う。

$$\frac{\partial}{\partial y^+} \left[(1 + \alpha y^+) \frac{\partial \langle u \rangle^+}{\partial y^+} \right] = C_u^+$$

ここで、 $\langle u \rangle$ はフィルター化を施した主流方向速度を表し、右辺の C_u^+ は主流方向の運動量式の圧力勾配、時間微分、対流項、壁面並行方向の粘性項を合算した項を表す。この項は、平衡境界層を仮定すると零となり、非平衡境界層では非零の値を持つ。また、フィルター化平均によって生じたサブ・グリッド・スケール応力は渦粘性モデルによってモデル化し、サブ・グリッド・スケール渦動粘度は混合長モデルによって壁面からの無次元距離 y^+ と係数 α によってモデル化した。壁モデルでは、上式の積分式に対して、セル上面に境界条件を与えることで積分式の定数を定め、壁面摩擦応力を得る。平衡境界層を仮定したレイノルズ平均場では、係数は一定値 $\alpha = 0.4$ を取るが、本研究では時空間的に分布する乱流変動が α に与える影響を議論する。図2(c)に直接数値解析のフィルター化壁面摩擦応力から得られる α の分布を示す。なお、壁面垂直方向に対して $\Delta_y^+ = 97$ の幅のフィルター平均を施している。図より、モデル係数 α は空間的に大きく分布をしていることが確認できる。また、図2(b)のフィルター化壁面摩擦応力との間で必ずしも強い相関関係も見られるわけではなく、局所の非平衡性の大きさやフィルター幅以外にも、渦度や歪度などの局所の流れ量を用いてモデル化する必要が

あることが示唆された。次に、平面衝突噴流の解析領域を図3に示す。解析条件は文献⁽³⁾と同様であるが、ここでは概要を簡単に説明する。ドライバー部で完全発達させたチャンネル乱流をメイン部の入口条件とし、メイン部では上面・下面は滑りなし、スパン方向には周期境界条件を課し、出口には対流流出境界条件を課した。流入面から衝突壁面までの距離は D とし、流入断面の水力直径と平均流速によって定義されるレイノルズ数を9120とした。ドライバー部は領域 $3.2D \times D \times 1.6D$ に対して計算格子を $64 \times 64 \times 96$ を設定し、メイン部では領域 $21D \times D \times 1.6D$ に対して計算格子を $320 \times 96 \times 96$ と設定した。図4(a)にはスパン方向から見た平面の衝突領域近傍の瞬時速度の絶対値、(b)には壁面摩擦応力を示す。図4(a)より、よどみ点付近では流速が遅く、衝突領域から少し離れた領域で速度が速くなっており、下壁に沿って高速の流体が流れている様子が分かる。壁面摩擦応力(図4(b))において、よどみ点付近では摩擦応力が小さく、よどみ点から少し離れた位置で最大値を取り、衝突領域から距離が離れるにしたがって減少する。また、壁面摩擦応力は流れ方向に伸びた縞状分布となっており、壁面近傍に発達する乱流渦の影響を強く受けていると考えられる。また、混合長モデルの係数 α は局所の歪み応力テンソルや C_u^+ の影響を強く受けることが明らかとなっており、今後はそのモデル化について議論を進める予定である。

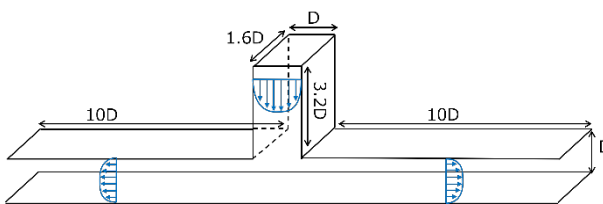
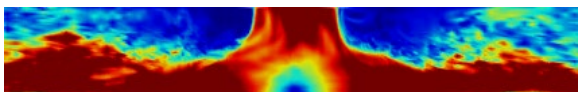


図3 平面衝突噴流の解析系

(a)



(b)

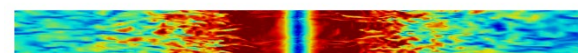


図4 (a)スパン方向から見た衝突領域近傍の瞬時速度、(b)壁面摩擦応力。青色は値が小さく、赤色は値が大きいことを示す。

結言

直接数値解析データを用いて、ラージ・エディ・シミュレーションに適用する非平衡代数壁モデルのモデル係数の検討を行った。対象とした流れ場は、チャンネル乱流・平面衝突噴流として、直接数値解析で得られた壁面摩擦応力を用いて、局所的な運動量輸送の非平衡がフィルター化運動量式に含まれる混合長モデルの係数に与える影響を調査した。その結果、平均的には平衡境界層の仮定が成立するチャンネル乱流であっても、混合長モデルに含まれる係数は局所的な運動量輸送の非平衡によって時空間的に分布を持つことが明らかとなった。また、非平衡の影響は、平面衝突噴流場でより顕著にみられ、定数には速度歪みなどの影響を考慮してモデル化する必要があることが明らかとなった。

参考文献

- (1) K Suga *et al.*, "Algebraic non-equilibrium wall-stress modeling for large eddy simulation based on analytical integration of the thin boundary-layer equation", *Phys. Fluids* **31** (7) (2019).
- (2) H Kawamura, "Direct Numerical Simulation Data Base for Turbulent Channel Flow with Heat Transfer", 1998-2004.
- (3) H Hattori and Y Nagano, "Direct numerical simulation of turbulent heat transfer in plane impinging jet." *Int. J. Heat Fluid Flow* **25.5** (2004).