

TSUBAME 共同利用 令和7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 DNS 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。本研究ではチャンネル乱流・平面衝突噴流を対象とし、直接数値解析で得られた瞬時場データに時空間フィルタリングを施し、混合長型壁モデルに含まれる係数を評価するとともに、渦粘性の壁面漸近挙動に関わるモデル係数と乱流場の諸量との関係を機械学習によって調査した。その結果、チャンネル乱流場におけるモデル係数は壁面隣接点から壁面までの無次元距離、局所の非平衡性の強さに依存するが、平面衝突噴流においては、さらに速度ひずみの大きさ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。

We performed direct numerical simulations to investigate a non-equilibrium wall model for large eddy simulations. The flow configurations considered were turbulent channel flow and a plane impinging jet. Filtered DNS data were analyzed to evaluate the model coefficient in the mixing-length model for wall-modeled large eddy simulations. Machine learning techniques were employed to assess the influence of flow variables on the model coefficient that determines the wall-damping behavior of the eddy viscosity. The results indicate that for channel flow, the model coefficient depends on the non-dimensional wall-normal distance and the degree of non-equilibrium, whereas for the plane impinging jet, the velocity strain must be incorporated to accurately model the coefficient.

Keywords: Direct numerical simulation, wall modeling, mixing-length model, channel flow, plane 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、境界層を解像するために非常に細かい計算格子が要求されるため、薄い境界層が形成される高レイノルズ数乱流場の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。壁面モデルの多くは混合長型モデルを基本としており、モデル係数においては平衡境界層を仮定した一定値が採用されており、強い圧力勾配の影

響を受ける非平衡乱流場では予測精度が悪化する問題を抱えている。本研究では、チャンネル・平面衝突噴流の直接数値解析(DNS: Direct Numerical Simulation)を行い、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、フィルター化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の開発を行う。チャンネル乱流および平面衝突噴流の DNS を実施し、壁面近傍の瞬間場を取得し、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、乱流の非平衡が運動量式内の渦粘性モデルに与える影響を機械学習によってモデル化することを試みる。

チャンネル乱流場の議論は、摩擦レイノルズ数 650 の DNS 結果を用いる。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、 $512(x) \times 256(y) \times 512(z)$ とした。離散化には有限差分法を用い、空間の離散化は2次中心差分、時間積分は2次のアダムスバッシュフォース法を用いた。DNS の妥当性を評価するために、平均速度分布・レイノルズ応力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⁽¹⁾の結果とよく一致しており、DNS の妥当性が確認された。

DNS で得られた瞬時場に対して時空間フィルタリングを施し、混合長型壁モデルに含まれるモデル係数の評価を行う。本研究では、フィルター化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。

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

ここで、 $\langle u \rangle^+$ は壁面平衡方向に対しての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、壁面平行方向の粘性項の和をセル体積平均した項を表す。上付き添え字「+」は粘性スケールで無次元化された量を表す。なお、 C_u^+ は壁面隣接セル内の非平衡性の強さを表しており、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・スケール渦粘性 ν_{SGS}^+ は混合長理論に基づいて壁面からの無次元距離 y^+ と係数 $\alpha = 0.4$ を用いて以下のようにモデル化する

$$\nu_{SGS}^+ = \alpha f_\mu^2 y^+ \quad f_\mu = 1 - \exp(-y^+/A) \quad (2)$$

ここで、 f_μ はサブ・グリッド・スケール渦粘性の壁面挙動を修正する関数となっており、モデル係数 A は平衡境界層を仮定した平均場の議論により $A = 17$ で与えられるが、平衡境界層の仮定が成立しない流れ場においては、モデル係数 A は標準値とは異なる値を持つと考えられる。本研究では DNS で得られた瞬時場を用いて、式(1, 2)が最も整合するモデル係数 A を計算した。また、モデル係数 A と隣接セルの中心から壁面までの無次元距離 y^+ 、非平衡性の強さを表す項 C_u^+ との相関関係を機械学習によって調査した。なお、空間平均のフィルター幅は $\Delta_x^+ = 104$ 、 $\Delta_z^+ = 52$ と設定し、 $40(x) \times 40(z)$ と粗視化した LES を想定した。

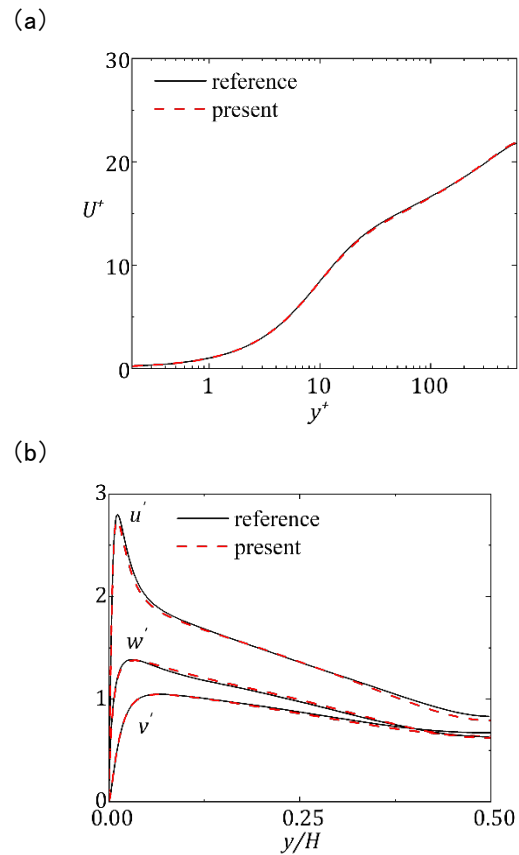


図1 チャンネル乱流 DNS 結果の比較

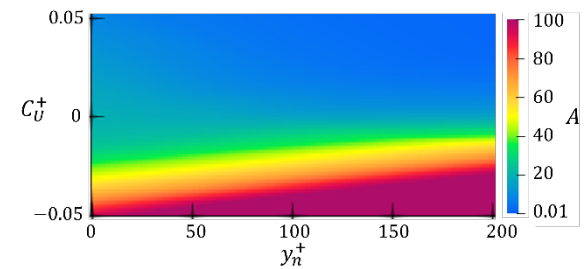


図2 チャンネル乱流におけるモデル係数 A

図2には、機械学習で得られた相関関係を示す。図より、モデル係数 A は無次元距離 y^+ 、非平衡性の強さを表す項 C_u^+ に応じて変化することが確認できる。 C_u^+ が大きくなると係数 A は減少し、壁面近傍の渦粘性の減衰効果が弱まることが示唆される。また、 C_u^+ が零に近い場合(平衡乱流境界層の条件に近い場合)は、モデル係数 A は標準値 $A = 17$ に漸近することも確認された。

次に、平面衝突噴流においてもモデル係数の評価を行う。平面衝突噴流 DNS の解析領域は図3に示す通りであり、ドライバー部で完全発達させたチャンネル乱流場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, 13680とした2つのレイノルズ数条件でDNSを実施した。低レイノルズ数のケースでは、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。高レイノルズ数のケースでは、それぞれ $96 \times 96 \times 144$, $480 \times 144 \times 144$ と設定した。なお、低レイノルズ数条件における解析条件は文献⁽²⁾と同様である。モデル係数 A と場の諸量との相関関係を機械学習によって調査した結果を図4に示す。平面衝突噴流場においては、隣接セル中心から壁面までの無次元距離 y^+ 、非平衡性の強度 C_{ij}^+ だけではモデル係数 A との十分な相関が得られなかったため、速度ひずみテンソルの第2不変量 $S_{ij}^+ S_{ji}^+$ を導入した。図より、係数 A は乱流場の状態に応じて標準値 $A = 17$ から大きく変化していることが確認できる。これらの結果より、混合長モデル型の壁モデルに関して、モデル係数は場の状態に応じて変化させることが望ましいことが示唆された。

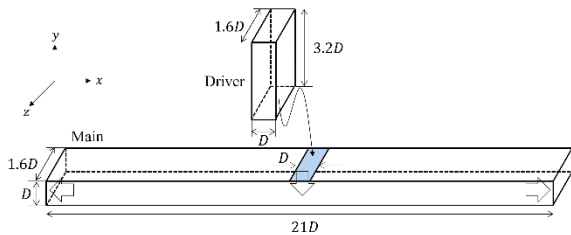


図3 平面衝突噴流の直接数値解析の解析系

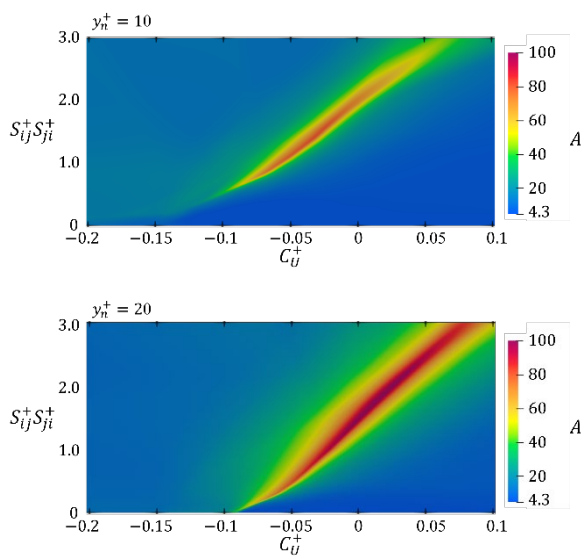


図4 平面衝突噴流におけるモデル係数 A の分布。

まとめ、今後の課題

DNS データを用いて、LES 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。本研究では、チャンネル乱流・平面衝突噴流を対象とし、DNS で得られた瞬時場データに時空間フィルタリングを施し、混合長型壁モデルに含まれる係数を評価した。その結果、壁面近傍の渦粘性を修正する関数に含まれるモデル係数は、場の状態に応じて変化させることが望ましいことが確認された。チャンネル乱流においては、モデル係数は壁面から隣接セル中心までの無次元化距離・非平衡性の強度に依存し、平面衝突噴流場においては、さらに速度ひずみテンソルの第二不変量を用いてモデル化できることが示唆された。今後は、これらの知見を実装した壁モデルによるラージ・エディ・シミュレーションを実施し、モデルの検討を進めていく。

参考文献

- (1) H. Abe, H. Kawamura, and Y. Matsuo. Direct numerical simulation of a fully developed turbulent channel flow with respect to Reynolds number dependence. *ASME, J. Fluid Eng*, Vol. **204**(2001), pp. 382–393.
- (2) H. Hattori and Y. Nagano. “Direct numerical simulation of turbulent heat transfer in plane impinging jet.” *Int. J. Heat Fluid Flow* **25.5**, pp.749-758 (2004).