

粗壁面に対する乱流モデルの提案 Proposal of Turbulence Model for Rough Wall

小島弘貴, 東理大院, 〒162-8601 新宿区神楽坂 1-3, j4500621@ed.kagu.sut.ac.jp
戸田和之, 山本誠, 東理大, 〒162-8601 新宿区神楽坂 1-3, yamamoto@rs.kagu.sut.ac.jp
Hiroki Kojima, Graduate School, Science University of Tokyo, 1-3 Kagurazaka, Shinjuku-ku, Tokyo
Kazuyuki Toda and Makoto Yamamoto, Science Univeristy of Tokyo, 1-3 Kagurazaka, Shinjuku-ku, Tokyo

Conventionally, wall roughness has been treated through a wall function in RANS computations. Since the wall function is tuned for the existing experimental data, the validity would be limited in a certain range of turbulent flow fields. Therefore, more universal modeling for wall roughness is needed, especially in engineering applications. In the present study, we propose a new turbulence model for rough wall, introducing a virtual force that characterizes each rough element. This technique is very useful, because an aerodynamically smooth wall can be used in the computation virtually. The modeling procedure is presented, and some computational results for two-dimensional airfoil with surface roughness are investigated to verify the new model.

1. 緒言

航空機, ガスタービン, ポンプなど翼を利用する流体機械において, 翼の空力性能の向上は永遠の課題である. また, 高い空力性能を維持したままこれらの流体機械を運転し続けることは, 省エネルギー, メンテナンスなどの面から, 今後より重要な要因になるものと考えられる. 翼の性能を劣化させ, 高性能運転の維持を阻害する要因のひとつに翼の表面粗さの問題がある. 翼設計においては, 通常, 流体力学的に滑らかな表面を仮定する. しかし, 実際の翼では, 加工精度によって粗面の部分が生じたり, 運転中に砂, ゴミ, すず, 油滴, 氷などが付着したりするなど, 粗面となっている場合がほとんどである. また, 境界層のはく離を抑制するために, 初めから部分的に粗面として設計する場合もある.

表面粗さを伴う数値シミュレーション (一般に乱流計算) は, 壁関数を導入して行われることが通例である. しかし, 壁関数が実験データに依存している以上, その適用範囲に限界の存在することは明らかであり, 表面粗さを普遍的に表現できるような乱流モデルの開発が必要であると考えられる.

本研究は, 以上の背景を鑑み, 粗壁面乱流に対する新たなモデル化を提案するとともに, 粗面を有する 2 次元翼周りの流れ場に対して検証計算を行うものである.

2. 粗さ効果のモデル化

本研究では, 三宅ら⁽¹⁾が提案した粗さ要素の効果を仮想力で代替するという概念を利用する. このとき, 非圧縮性流体のナビエ・ストークス支配方程式は以下のように表される.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} - \frac{f_i}{\rho}$$

ここで, f_i が粗さ要素による i 方向仮想力である. 三宅らは, 粗さ要素として壁面に直立する円錐を仮定し, 粗さ要素に含まれる格子点に対して,

$$f_i = C_D \frac{1}{2} \rho u_j^2 \frac{u_i}{\sqrt{u_j^2}} \frac{A}{V}, \quad C_D = 0.5$$

という抗力が作用するとした.

著者らが $k-\varepsilon$ モデルを用いて先に行った研究⁽²⁾では, レイノルズ方程式のみにこの仮想力を導入し, 乱流量の輸送方程式では粗さ要素の効果を反映させなかった. これは, 仮想力が平均流の排除効果のみを表すと仮定したためである. このような考え方でも粗面翼の空力性能は再現できたが, 境界層の状態をみると, 平均速度の減少に伴って乱れも減少し

てしまい, 粗面壁上で乱れが促進されるという現象を正しく表していないことが明らかとなった. このため, 本研究においては, 乱流量の輸送方程式における仮想力の効果を以下のようにモデル化することにした.

まず, 仮想力を含めたナビエ・ストークス方程式に対してレイノルズ平均を適用する. この結果,

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j^2} - \frac{\overline{\partial u_i u_j}}{\partial x_j} - \frac{F_i}{\rho}$$

なるレイノルズ方程式が得られる. ここで, 大文字は各変数の時間平均値を, 小文字は変動値を意味する. 類似の代数操作から, レイノルズ応力の輸送方程式が以下のように導ける.

$$\frac{D u_i u_j}{Dt} = P_{ij} + D_{ij} + \Phi_{ij} + \varepsilon_{ij} - \frac{u_j f_i}{\rho}$$

ただし, 右辺第 1 項から第 4 項はレイノルズ応力の生産, 拡散, 再分配, 散逸項をシンボリックに表したものである. 仮想力を導入したことにより, レイノルズ応力と同様の未知の干渉項が右辺の最後に生じることが分かる. この項のモデル化が当然必要となるが, f_i が物理的な厳密性のない仮想力であることを考えると, あまり厳密に取り扱っても (例えば, ナビエ・ストークス方程式から輸送方程式を導き, 各項を吟味するなど) 無意味であろう. したがって, 本研究においては, 実用性を重視し, 勾配拡散タイプのモデル化を行うこととした. すなわち,

$$-\overline{u_j f_i} = \frac{\nu_t}{\sigma_f} \frac{\partial F_i}{\partial x_j}$$

ここで, σ_f は新たなモデル定数である. このモデル定数は, 粗壁面境界層に対する試行計算により決定した.

3. 結言

本研究は, 粗さ要素に作用する仮想力を導入することによって, 粗壁面乱流に対する新たなモデル化を提案するとともに, 粗面を有する 2 次元翼周りの流れ場に対して検証計算を行ったものである. モデル定数の決定および検証の詳細については講演時に紹介する.

参考文献

- (1) 三宅, 辻本, 縣, 日本機械学会論文集 (B), (1998), 1-1.
- (2) 小島, 山本, 戸田, 計算工学講演会論文集, 第 6 巻, 第 1 号, (2001), 257-260