乱流モデルを用いた正弦波面上の乱流の数値シミュレーション

Numerical simulation of turbulent flow over a wavy wall using turbulent models

○ 堀内学(富山県大・学) 永田哲郎(富山県大・学) 正 石塚勝(富山県大) 正 中川慎二(富山県大)

Manabu HORIUCHI, Tetsuro NAGATA, Masaru ISHIZUKA and Shinji NAKAGAWA
Toyama Prefectural University, Kurokawa 5180, Imizu, Toyama 939-0398, JapanKey Words: Turbulent model, Low Reynolds k - ε model, V2F model, Separation, Sinusoidal surface

1. 緒言

波面上の流れは風による波の発生, 砂漠の砂丘や川底での砂の堆積, あるいは高性能熱交換機¹⁾など, 様々な自然現象や工学的応用と関係しており, 多くの関心を集めている。波面上の流れははく離と再付着を伴う複雑な流れであり, 流れが乱流である場合, 正確な予測することは難しい。

乱流の直接数値シミュレーション(DNS)を用いることで, このような複雑な流れの予測が可能となった²⁾。しかし, DNS計算の負荷は極めて大きく, 工学的に応用することは難しい。工学的問題に対して実用的な計算を行うためには, 乱流モデルの使用が必要不可欠である。

乱流モデルを用いた波面上乱流の数値シミュレーションについて, これまでも報告³⁾⁴⁾されている。一般的なRANS型乱流モデルでは, 波面上の乱流を正確に予測することは困難である。そのため, 新たな乱流モデルの開発と評価が続けられている。

本研究では, 乱流モデルとして, 低レイノルズ数 k - ε モデルと V2F⁵⁾モデルを用い, 波面上乱流のシミュレーションを行った。計算結果を DNS 結果と比較することでモデルの有効性を検討した。V2F モデルは, 壁面に垂直な方向の速度変動エネルギーを考慮することで, 壁面近傍における非等方的なエネルギー輸送をモデル化する。そのため, はく離や再付着を伴う流れに対して有効であるとされている。

2. 計算方法

Fig.1 に計算対象を示す。上面は平面壁, 下面は正弦波面の壁で構成される2次元チャネルである。流入面から主流方向に座標 x_1 , それに垂直に座標 x_2 をとる。座標 x_2 の原点は正弦波面最下部とする。P. Cherukat らによる DNS 結果²⁾と比較するため, 彼らと同じ計算対象を採用し, 式(1)で定義するレイノルズ数 Re を $Re=3460$ とした。

$$Re = \frac{hU_b\rho}{2\mu} \quad (1)$$

ここで, 流路の高さ h , 波長 λ , 振幅 a , 波数はそれぞれ 5.00cm, 5.00cm, 2.50mm, 4 である。内部を流れる水の密度 ρ と分子

Fig.1 Simulation object

粘性係数 μ はそれぞれ 998kg/m^3 , $8.89 \times 10^{-4}\text{kg/ms}$ である。このとき, 断面平均流速 U_b は 0.123m/s となる。

計算には, CDAJ 社の「STAR-CD」を使用した。Navier-Stokes 方程式と連続の式を基礎方程式とし, 三次元有限体積法, SIMPLE 法で定常計算を行った。対流項は一次精度風上差分, その他の項は二次精度中心差分で差分化する。格子は非スタaggerドの構造格子を使用した。また楕円形格子生成法によりスムージング処理を施し, 格子の品質向上を行った。

境界条件として, 上部の平面と下部の正弦波面には滑りなしの壁面, 流入面および流出面には周期境界条件を与えた。

メッシュは x_1 方向に 696, x_2 方向に 120 とし, 壁面に近い領域は格子を集中させた。事前にメッシュの大きさが結果に与える影響について検討し, メッシュをこれより細かくしても結果に影響がないことを確認した。

3. 計算結果と考察

Fig.2 に波面一つ分の波面上無次元壁面せん断応力 $\tau_w/\rho U_b^2$ を示す。 $\tau_w/\rho U_b^2$ が正から負になる点ではく離, 負から正になる点で再付着が生じている。Table.1 にはく離点, 再付着点の座標を示す。V2F モデルは, 低レイノルズ k - ε モデルと比較して, はく離点の予測精度が高く, 最大値も DNS に近い。一方, V2F モデルでは, 再付着点が下流側に予測された。

主流方向速度 U_1 および壁面に垂直な方向の速度 U_2 を比較するため, はく離点付近 ($x_1/\lambda=0.2$) での無次元速度分布を Fig.3 に, 再付着点付近 ($x_1/\lambda=0.6$) での分布を Fig.4 に示す。V2F モデルでは, 壁面近傍をのぞく流路の大部分において, 平均速度の予測精度が高い。低レイノルズ k - ε モデルでは, 下面での壁面せん断応力を大きく予測するため, 主流方向速

Fig.2 Shear stress at the wavy wall normalized by ρU_b^2 Table.1 Separation and Reattachment point (x_1/λ)

Case	Separation	Reattachment
DNS	0.140	0.590
Low Re k - ε model	0.147	0.547
V2F model	0.136	0.666

度分布のピークが上面側に予測される。なお、V2F モデルでは再付着点をより下流に予測するため、 $x_f/\lambda=0.6$ においては、壁面近傍に生じる U_2 の極大値を予測できていない。

Fig.5 に波面近傍における U_2/U_b の等高線を示す。低レイノルズ数 $k-\varepsilon$ モデルでは、負の速度の最大値が DNS より小さく、その領域も小さい。V2F モデルでは、負の速度の最大値が下流側に現れる。しかし負の最大値は DNS より大きく（絶対値は小さく）、左側と真ん中側の二箇所が発生した。

Fig.6 に波面近傍における無次元乱流エネルギー k/U_b^2 の等高線を示す。DNS は最大値がおおよそ 0.050 であるが両モデルはおおよそ 0.037 と小さかった。また最大値の予測位置も DNS よりも右にずれていた。

以上のことから、今回用いたモデルでは、波面からはく離れたせん断層部分において、流れの予測精度が低いことが確認された。先に示した壁面せん断応力の相違も、これが大きな要因であると予想される。はく離れたせん断層や再付着点より下流では、非等方性がくずれ、スパン方向の乱れが増大する。この効果を取り入れた乱流モデルが必要であろう。今後、波面上での熱および物質移動を検討する際には、より精度の良いモデルが必要である。

4. 結言

正弦波面上に発達する乱流の数値シミュレーションを、低レイノルズ数 $k-\varepsilon$ モデルと V2F モデルを用いて行った。DNS 結果との比較から、V2F モデルを用いることで、平均速度分布の予測精度が向上することを明らかにした。ただし、壁面近傍での予測精度は十分ではなく、精度向上に向けた研究が必要である。

参考文献

- 1) 笠木ら, 日本機械学会論文集, 70-698, B(2004), 2604-2611.

Fig.3 Profiles of U_1/U_b and U_2/U_b at $x_1/\lambda=0.2$

Fig.4 Profiles of U_1/U_b and U_2/U_b at $x_1/\lambda=0.6$

- 2) P.Chelukat, Y.Na, and T.J.Hanratty, Theoret. Comput. Fluid Dynamics (1998) 11:109-134.
- 3) T.S.Park, H.S.Choi, K.Suzuki, Int. J. Heat and Mass Transfer. 47: 2403-2415 (2004).
- 4) VC Patel, JT Chon, JY Yoon, J. Fluids Eng. 113: 579-586, (1991).
- 5) S.Parneix, P.A.Durbin and M.Behnia, Flow Turbulent and Combustion 60: 19-46, (1998)

Fig.5 Contours of U_2/U_b

Fig.6 Contours of k/U_b^2