

乱流モデルによる多孔体壁面流れの物質輸送に関する研究

A study on mass transfer over turbulent porous wall flows by the $k - \varepsilon$ turbulence models

○湯村将司, 大阪府大, 堺市中区学園町 1-1, E-mail:yumura@htlab.me.osakafu-u.ac.jp

須賀一彦, 大阪府大, 堺市中区学園町 1-1, E-mail:suga@me.osakafu-u.ac.jp

Masashi Yumura, Osaka Pref. Univ., 1-1, Gakuen-cho, Nakaku, Sakai, 599-8531, Japan.

Kazuhiko Suga, Osaka Pref. Univ., 1-1, Gakuen-cho, Nakaku, Sakai, 599-8531, Japan.

Although a turbulent flow in the clear fluid region over a porous medium can be solved by low Reynolds number $k - \varepsilon$ models, in the porous region drag force terms must be also considered in the macroscopic equations: turbulent kinetic energy, and dissipation rate equations. By such modifications, the obtained results of channel flows over porous media are compared with the DNS and experimental data. The results of flows over a porous rib are also compared with the experiments.

1. 緒言

多孔体に接する流れは工学分野では多数存在する。また流れ場に障害物を設置し物質交換を盛んにすることも工学分野で広く行われている。このような流れ場を計算するため、多孔体内部のマクロな計算を行う拡張 $k - \varepsilon$ 乱流モデルを用い計算を行った。結果を Breugem らによる多孔体チャンネル流れの DNS⁽¹⁾ 須賀らによる多孔体チャンネル流れの実験⁽²⁾ 多孔体リブ付き流れの実験⁽³⁾ と比較し検証を行った。

2. 拡張低レイノルズ数型モデル

低レイノルズ数型 $k - \varepsilon$ モデル (LS モデル) を基にした多孔体内部流に拡張された乱流モデル⁽⁴⁾ を適用した。多孔体内部において、連続の式と運動量方程式は、透過率 K , 空隙率 φ を用いて

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \overline{u_i u_j} \right] - \varphi \frac{\nu}{K} \hat{U}_i - \varphi^2 \frac{c_F}{\sqrt{K}} \sqrt{\hat{U}_j \hat{U}_j} \hat{U}_i \quad (2)$$

と書かれる。ここで U_i は全相平均の時間平均速度, c_F はフォルヒハイマー係数である。また $\hat{U}_i = U_i - U_p$ であり U_p は多孔体壁の速度である。式 (2) での右辺第三項, 第四項はそれぞれ多孔体による粘性抵抗を表すダルシー項と形状抵抗を表すフォルヒハイマー項である。乱流エネルギー k の輸送方程式とその散逸率 ε の等方成分 $\tilde{\varepsilon}$ の輸送方程式も同様にそれぞれ,

$$U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \varepsilon \quad (3)$$

$$U_j \frac{\partial \tilde{\varepsilon}}{\partial x_j} = c_{\varepsilon 1} f_1 P_k \frac{\tilde{\varepsilon}}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_{\tilde{\varepsilon}}} \right) \frac{\partial \tilde{\varepsilon}}{\partial x_j} \right] + c_{\varepsilon 2} \left(G_{\tilde{\varepsilon}} - f_2 \frac{\tilde{\varepsilon}^2}{k} \right) + 2\nu \nu_t \left(\frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_k} \right)^2 \quad (4)$$

と表される。ここで $G_k = \left(c_k \varphi \frac{k}{\sqrt{K}} \sqrt{\hat{U}_j \hat{U}_j} \right)$ は k の追加生成

項 $G_{\tilde{\varepsilon}} = \left(c_{\tilde{\varepsilon}} \varphi \frac{\tilde{\varepsilon}}{\sqrt{K}} \sqrt{\hat{U}_j \hat{U}_j} \right)$ は $\tilde{\varepsilon}$ の追加生成項であり多孔体性

3. 計算領域および計算条件

流れ領域には LS モデルを用い, 多孔体領域では上記のモデルを用いた。計算格子は, 多孔体と流れ領域での境において密になるような不等間隔格子で, 多孔体チャンネル流れに対しては $110(x) \times 100(y)$, 多孔体リブ付き流れに対しては流れ領域の半分の長さ h を一辺とする正方形の多孔体リブを設置した $320(x) \times 110(y)$ の格子を用いた。また計算条件を表 1 に示す。

4. 計算結果および考察

多孔体チャンネル流れについての計算結果を DNS および実験結果と比較し, それぞれを Fig.1, Fig.2 に示す。これから流れ領域において, よい速度分布の一致を示したが Fig.3 をみると, 多孔体内部の速度分布について十分な精度が得られないということが分かった。リブ付き流れの計算結果について, Fig. 4 に速度分布

Table 1 Computational conditions of channel flows, E:DNS, #:exp

case	φ	K/H^2	c_F
E60	0.60	7.5×10^{-7}	0.17
E80	0.80	7.1×10^{-6}	0.15
E95	0.95	1.9×10^{-4}	0.14
# 06	0.80	1.04×10^{-4}	0.095
# 20	0.82	2.52×10^{-5}	0.17

を示す。速度分布においては実験と計算はよく対応していることがわかる。今後さらに精度を改善するにはモデル構築の際に省略されてしまった項の検討が必要であると考えられる。

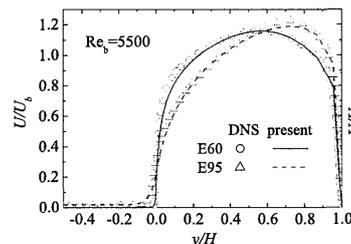


Fig. 1 Mean velocity in channel flow

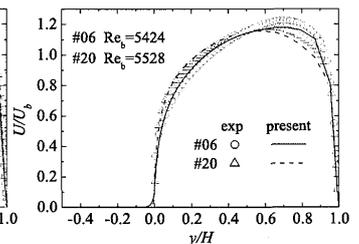


Fig. 2 Mean velocity in channel flow

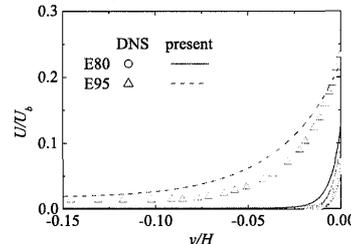


Fig. 3 Mean velocity in the porous wall

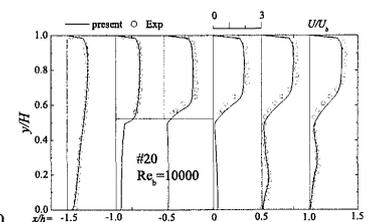


Fig. 4 Mean velocity profile.

5. 結言

DNS, 実験結果との比較を行ったが, 全般的に良い一致を示すことが分かった。リブ付き流れについても, 多孔体内部の流れの様子をかなり妥当に予測できていることが推測された。しかし, チャンネルの多孔体内部速度分布から分かるように, 十分に正確な結果が得られているとは言えず, 今後, 更なるモデルの改良が必要である。

参考文献

- (1) W.P.Breugem, B.J.Boersma, R.E.Uittenbogaard, Journal of Fluid Mechanics, vol.562, pp. 35-72,2006
- (2) 須賀一彦, 松村康弘, 芦高優, 富永聡, 金田昌之, 日本機械学会論文集 (B 編) 75 巻 760 号 (2009-12) No.09-0565
- (3) 富永聡, 松村康弘, 金田昌之, 須賀一彦 リブ付き透過性壁面乱流の実験的研究, 日本流体力学会年会 2009
- (4) H.C. Chan, W.C. Huang, J.M. Leu, C.J. Lai, International Journal of Heat and Fluid Flow vol.28,pp1157-1166,2007.