

CS - 55

レイノルズ応力モデルによる開水路流れの乱流構造解析

宇都宮大学大学院 学生員 松原 珠
 宇都宮大学工学部 正 員 杉山 均
 宇都宮大学工学部 秋山光庸
 日産自動車株式会社 松本将師

1. 緒言

直線状開水路流れは自由水面を有し、管路内乱流と乱流構造が大きく異なっている。この開水路流れを特徴づける現象として、最大主流方向速度が自由水面下に存在することが指摘されている。本研究は、この自由水面を伴う三次元乱流場を対象に、レイノルズ応力モデルを用いて数値予測し、本乱流モデルの妥当性、自由水面を有する乱流場の流動特性について検討を加えることを目的とする。

2. 解析手法

2.1 計算対象実験：解析対象とした福津・中川¹⁾の実験

装置の概略図、および座標軸をFig. 1に示す。測定流路は、短辺 $h=10.1\text{cm}$ 、長辺 $B=20.1\text{cm}$ の長方形断面、全長 20m の流路である。レイノルズ数は、混合平均速度 U_b 、水力直径 D_h を用いて、 $Re=9.7\times 10^4$ である。また測定は、完全発達領域であると考えられる $89D_h$ の断面にて行われている。

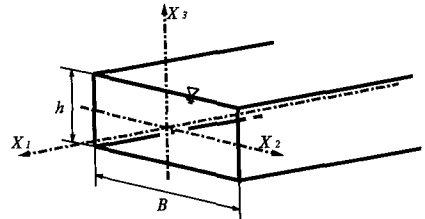


Fig. 1 Subject of calculation and coordinate system

2.2 乱流モデル：乱流モデルとしてはレイノルズ応力モデルを用いた。この時、対流項、拡散項に関してはRodi²⁾近似を用いて代数応力モデルとして解析を行った。また、モデル化の際、特に問題となる圧力-歪み相関項については、Launder-Reece-Rodi³⁾により提唱されたモデルを基に、その制約条件の一部に改良を加えた著者らの提示モデル⁴⁾を使用した(Table 1, 2)。表中 $f(L/X_w)$ は、壁面の影響を示す関数であり $f(L/X_w)=(c_\mu^{3/4}k^{3/2})/(\kappa\varepsilon)\cdot(1/X_w)$ である。ただし、 $1/X_w=\Sigma(1/X_n)_i^2/\Sigma(1/X_n)_i$ (X_n は壁からの垂直距離)

2.3 数値解析：計算領域は、Fig. 1に示す領域のうち系の対称性を考慮して1/2断面、計算格子数 30×30 、レイノルズ数は実験と同様 $Re=9.7\times 10^4$ 、流れは完全発達流として計算を行った。

2.4 自由水面での境界条件：開水路流れの数値解析において問題となる境界条件の設定は、自由水面の特徴的な現象を参考に決定した。第1に自由水面に垂直な速度変動成分が壁面の場合と同様に自由水面に近づくにつれ減衰傾向を示す^{5, 6)}ことが報告されているが、本モデルも壁面効果としてこの減衰効果を考慮しているため自由水面においても定数系を変えることなく適用した。Table 1 Modeling of the pressure-strain correlation term

$\pi_{ij,1} + \pi_{ji,1}$	$-c_1 \cdot \frac{\varepsilon}{k} \left(\overline{u_i u_j} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \right)$
$\pi_{ij,2} + \pi_{ji,2}$	$\frac{-c_2 + 8}{11} \left(P_{ij} - \frac{2}{3} P_k \delta_{ij} \right) + \zeta k \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{8c_2 - 2}{11} \left(D_{ij} - \frac{2}{3} P_k \delta_{ij} \right)$
$[\pi_{ij} + \pi_{ji}]_w$	$c_1 = c_1^* + c_1' \cdot f\left(\frac{L}{X_w}\right), c_2 = c_2^* + c_2' \cdot f\left(\frac{L}{X_w}\right), \zeta = \zeta^* + \zeta' \cdot f\left(\frac{L}{X_w}\right)$

$$P_{ij} = -\overline{u_i u_k} \frac{\partial U_j}{\partial x_k} - \overline{u_j u_k} \frac{\partial U_i}{\partial x_k}, \quad D_{ij} = -\overline{u_i u_k} \frac{\partial U_k}{\partial x_j} - \overline{u_j u_k} \frac{\partial U_k}{\partial x_i}$$

$$P_k = -\overline{u_k u_i} \frac{\partial U_i}{\partial x_j}$$

Table 2 Constants in the pressure-strain correlation term

c_1^*	c_2^*	ζ^*	c_1'	c_2'	ζ'
1.40	0.44	-0.16	-0.35	0.21	-0.10

第2にその減衰傾向は壁面と異なり、自由水面からかなり離れた位置から減衰傾向を示し、自由水面近傍ではほぼ零に近い値を示すことから垂直変動速度を自由水面から計算第1点目まで零としこの現象を近似した。第3に自由水面近傍における乱れスケールが自由水面に近づくにつれ減衰されることが報告され⁷⁾、いくつかの散逸に関する境界条件が提示されているが、複断面開水路のように水深がステップ状に変化する場合などへの適用も考慮し、自由水面から計算第1点目に、壁関数として用いられる以下の境界条件を設定した。

$$\varepsilon = \frac{C_\mu^{3/4} k^{3/2}}{\kappa y} \quad (1)$$

なお、乱流散逸以外のパラメータの境界条件に関しては、対称軸上に使用される一般的な境界条件を自由水面にて設定することとした。

3. 結果と考察

3.1 主流方向速度分布(Fig. 2): Fig. 2に示す値は主流方向の流路断面最大速度 U_{1max} で無次元化している。実験結果より主流方向速度の最大値が水面下に存在することが指摘でき、計算結果においてもこの傾向を良好に予測している。

3.2 第二種二次流れベクトル分布(Fig. 3): 両結果ともに自由水面側で大きな縦渦を形成し、コーナ部の縦渦は自由水面より生成された縦渦により抑圧された分布を示している。また、自由水面近傍の水路中央部に向かう縦渦成分が非常に強いいため、水路中央部の広い範囲で下降流が現れている。このことが、最大主流点の降下を誘起している。以上のことより解析手法の妥当性を示しているものと思われる。

3.3 河床および側壁に沿う壁面せん断応力分布(Fig. 4): 各壁面せん断応力は平均せん断応力 τ_w で無次元化してある。実験結果より河床上の壁面せん断応力は、 $X_2/h=-0.5$ 付近で減少を示した後水路中央部に向かって単調増加していることが特徴的である。計算結果は、水路中央部に向かい単調増加しているが、 $X_2/h=-0.5$ 付近での減少は確認できない。これは、Fig. 3より実験ではこの領域で縦渦が上昇流を示すが、計算結果ではそれが認められないことに起因すると思われる。

3.4 せん断応力 u_1u_3 分布(Fig. 5): せん断応力は平均摩擦速度 U_τ の2乗で無次元化してある。実験結果に特徴的な点として零ラインを挟んだ異符号領域が認められる。計算結果においてもこの異符号領域、零ラインの位置を比較的良好に予測している。この理由としては、Fig. 2の最大流速線(max-line)を良好に予測できたためと思われる。

4. 結論

完全発達領域における自由水面を有する開水路流れを対象に数値予測を行い、瀬津・中川¹⁾の実験と比較し、この種の流れに特徴的な最大主流速度の降下現象、壁面せん断応力、レイノルズ応力を再現できた。

参考文献 1)瀬津家久・中川博次:京都大学防災研究所年報, 28, pp. 499~522, 1985. 2)Rodi, W.: Z. Angew. Math. Mech. 56, pp. T219~T221, 1976. 3)Launder, B. E., Reece, G. J. and Rodi, W.: J. Fluid Mech., Vol. 68, pp. 537~566, 1975. 4)杉山均・秋山光庸・芹沢寿行:日本機械学会論文集, 56-531, pp. 3328~3335, 1990. 5)Nakagawa, H., Nezu, I. and Ueda, H.: Proc. of Japan Soci. Civil Engrs., 241, pp. 155~168, 1975. 6)Komori, S., Ueda, H., Oginno, F. and Mizushima, T.: Int. Heat Mass Transfer, Vol. 4, pp. 513~521, 1982. 7)Hunt, J. C. R.: Gas Transfer at Water Surface, Reidel Pub., pp. 67~82, 1984.

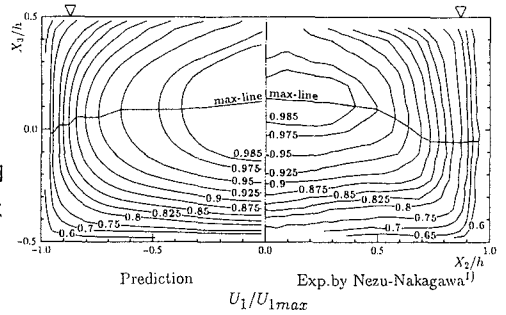


Fig. 2 Contours of mean primary velocity

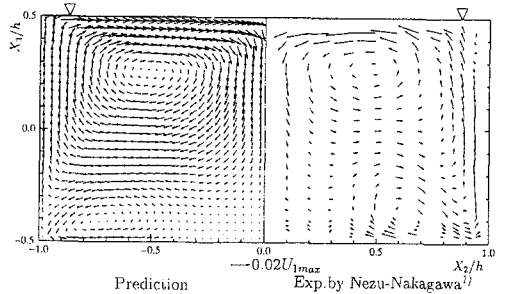


Fig. 3 Cellular secondary vector

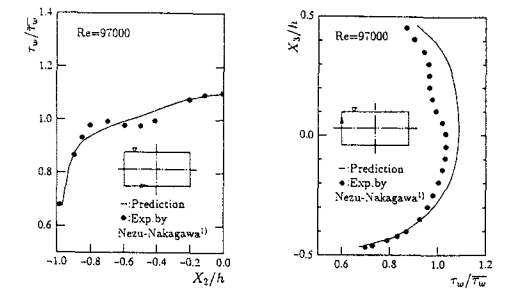


Fig. 4 Distributions of wall shear stress

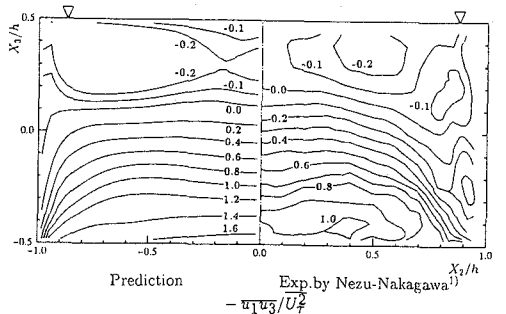


Fig. 5 Contours of shear stress $\overline{u_1 u_3}$