

三次元曲がり開水路流れの乱流構造解析

宇都宮大学大学院 学生員 田中美恵子
 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

1. 緒言

曲がり開水路には遠心力と圧力勾配が働き、かつ自由水面を有するためその乱流挙動は複雑である。そこで本研究では、長方形断面 180° 曲がり開水路を対象にレイノルズ応力モデル、境界適合座標系を用いて三次元乱流場として数値解析を行い、実験値と比較することによりモデルの妥当性について検討すると共に直線開水路部分を含めて計算を行い、曲がり出入口における二次流れの遷移挙動について検討を加えた。

2. 解析手法

2.1 計算対象実験： 数値解析の対象とした今本・石垣・藤沢¹⁾の実験装置の概略図、及び座標軸を Fig.1 に示す。測定流路は、水路幅 20cm、水深 2cm の長方形断面を持つ、水路中心の曲率半径 60cm の 180° 曲がり開水路であり、曲がり入り口と出口にそれぞれ 310cm、410cm の直線開水路部分を有する。Re 数は径深の 4 倍を代表長さ、断面内の平均主流方向速度 U_b を代表速度とし、 $Re=20760$ である。

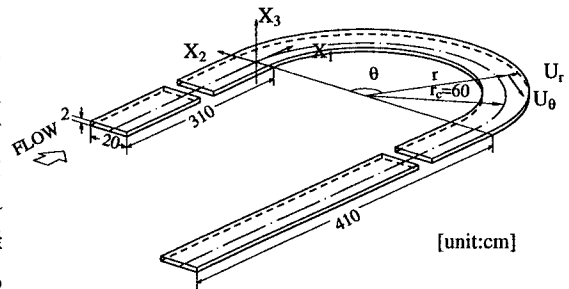


Fig.1 供試空間及び座標系

2.2 乱流モデル： 対流項、拡散項に Rodi²⁾近似を用い、代数応力モデルにより解析を行った。モデル化の問題となる圧力-歪相関項については、Launder-Reece-Rodi³⁾により提唱されたモデルをもとに、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)。

2.3 数値解析： 計算領域は Fig.1 に示す領域の全断面を対象とし、計算に際しては境界適合座標系を用い支配方程式の変換を行った。計算格子は断面内で 61×20 、主流方向に 180 断面設置した。

2.4 自由水面境界条件： 自由水面での垂直方向の速度変動の減衰に関して、本モデルでは壁面による影響を定数系に考慮していることから、自由水面においても同じ定数系を使用した。また、垂直方向速度変動値が自由水面下で非常に小さい値をとる現象を、計算では垂直方向速度変動値を自由水面から計算格子第一点目まで零とすることで近似した。乱流散逸については、自由水面も一種の壁面と考えられること、水深がステップ状に変化しても乱流散逸値が不連続値をとらないようにすることなどを考慮し、一般に壁関数として使用される次式を用いた。

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

Table 1 再配分項のモデル化

$\pi_{ij,1} + \pi_{ji,1}$	$-C_1 \frac{\varepsilon}{k} \left(\overline{u_i u_j} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \right)$
$\pi_{ij,2} + \pi_{ji,2}$	$-\frac{C_2 + 8}{11} \left(P_{ij} - \frac{2}{3} P_k \delta_{ij} \right) + \zeta k \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{8C_2 - 2}{11} \left(D_{ij} - \frac{2}{3} P_k \delta_{ij} \right)$
$[\pi_{ij} + \pi_{ji}]_w$	$C_1 = C_1^* + C_1' f \left(\frac{L}{X_w} \right) \quad C_2 = C_2^* + C_2' f \left(\frac{L}{X_w} \right) \\ \zeta = \zeta^* + \zeta' f \left(\frac{L}{X_w} \right)$
$P_{ij} = -\overline{u_i u_k} \frac{\partial U_j}{\partial x_k} - \overline{u_j u_k} \frac{\partial U_i}{\partial x_k}$	$D_{ij} = -\overline{u_i u_k} \frac{\partial U_k}{\partial x_j} - \overline{u_j u_k} \frac{\partial U_k}{\partial x_i}$
$P_k = -\overline{u_k u_l} \frac{\partial U_k}{\partial x_l}$	

Table 2 モデルでの経験定数

C_1^*	C_2^*	ζ^*	C_1'	C_2'	ζ'
1.4	0.44	-0.16	-0.35	0.12	-0.1

3. 結果と考察

3.1 主流方向速度分布： Fig.2 は主流方向速度の実験値との比較図で、各等値線の値は断面内主流方向平均速度 U_b で無次元化した。両結果とも、断面内の最大値が曲がり入り口で内壁側に寄り、曲がりが進むにつれて外壁側へ移動していくという現象が認められる。一方実験結果では曲がり後半で最大値が河床付近に現れる

キーワード： 数値解析、曲がり開水路、乱流、レイノルズ応力モデル、境界適合座標

連絡先：〒321 栃木県宇都宮市石井町 2753 宇都宮大学工学部 TEL 028-689-6032 FAX 028-689-6043

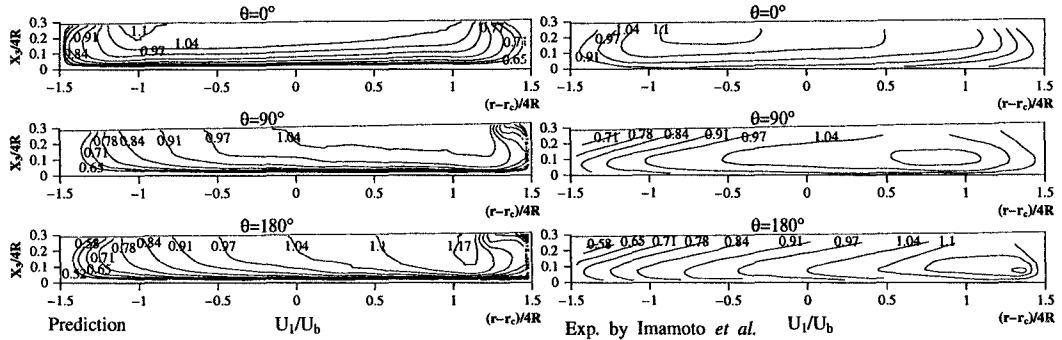


Fig.2 主流方向速度等値線の比較

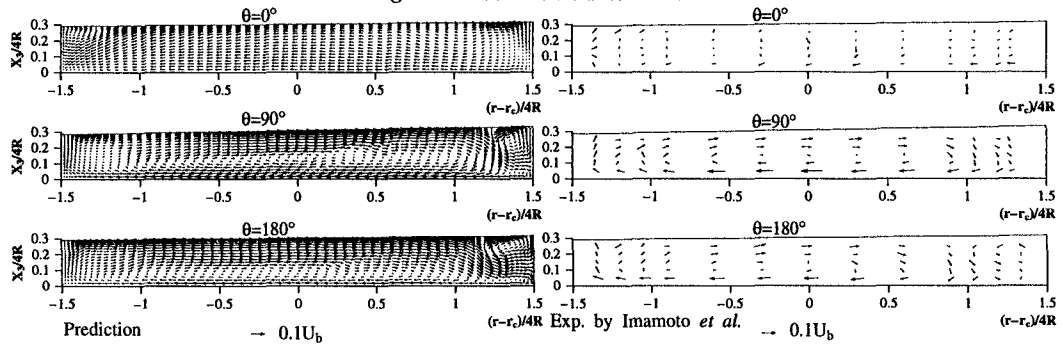


Fig.3 二次流れベクトル比較

が, 計算ではこの現象は見られないという違いも指摘される。

3.2 二次流れベクトル分布: Fig.3に実験, 計算両結果を示す。二次流れは水路断面内を時計回りに流れており, この特徴は実験, 計算共によく現れている。Fig.2で見られた, 主流方向速度の最大値が内壁側から外壁側へ移動する現象はこのためと思われる。また, 実験では180°において外壁近傍に反時計回りの渦状の二次流れができており, 計算はこれを良好に予測している。

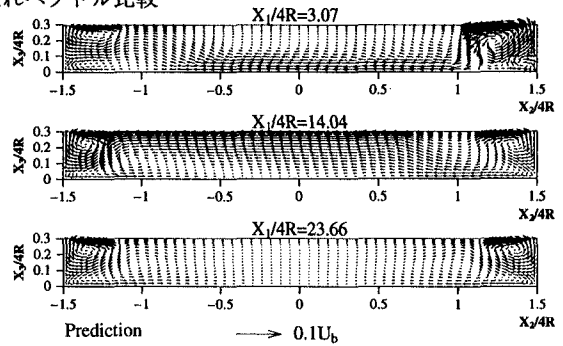


Fig.4 出口直管部での二次流れ遷移

3.3 出口直管部での二次流れ遷移: Fig.4に出口直管部における二次流れ分布の計算結果を示す。曲がりを出て遠心力が消えると, 二次流れは圧力勾配に支配されていったん外壁側から内壁側へ向かう。その後, 長い距離を経て, 左右対称の第二種二次流れの分布に戻る様子を計算結果は予測している。

4. 結論

長方形断面を有する曲がり開水路について数値解析を行い, 主流方向速度, 二次流れの分布を良好に予測し, 本解析の妥当性を確認した。また発生要因の異なる二種類の二次流れの遷移を予測することが可能であることを示した。

参考文献 1) 今本博健, 石垣泰輔, 藤沢寛: 複断面湾曲開水路流れの水理特性について (1), 京都大学防災研究所年報, 第25号 B-2, pp.529~543, 1982. 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.