

台形断面を有する三次元蛇行開水路流れの乱流構造解析

荏原製作所 正 員 亀澤 正之
 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

いくつかの曲がりにより構成された蛇行開水路流れの乱流構造は複雑であり、この種の研究に関する報告例は少ない。そこで台形断面を有する蛇行開水路の流れ場を対象に代数応力モデル、境界適合座標系を用い数値解析を行った。解析結果は実験結果と比較し本解析手法の妥当性を検討するとともに、その乱流構造についても検討を加えた。その結果、本解析手法は最大主流方向速度位置が流れ方向に沿って移動すること、二次流れ分布、レイノルズ応力分布など蛇行開水路流れに特徴的な現象を比較的良好に予測することを示した。

2. 解析手法

2.1 計算対象実験： 数値解析対象とした *Shiono-Muto*¹⁾ の実験装置の概略図、及び座標軸を Fig.1 に示す。蛇行開水路は5周期の蛇行水路より構成され、その一周周期長さは184.8cmでその全長は924cmとなる。さらにその半周期蛇行部は曲がり角60°、曲がり半径 $r_c = 42.5\text{cm}$ の曲がり部と37.6cmの直線部より構成されている。開水路断面は台形断面形状を有し、その河床幅は16.5cm、側壁傾斜角は45°である。測定領域は入口から4番目の上流側半周期の蛇行部である。座標系は直線開水路部では直交座標系を、蛇行開水路部では円筒座標系を用い各特性量を示した。また直線開水路を挟んで上流部、下流部に位置する曲がり部の各断面を示す際には、それぞれ曲がり角の θ の正符号、負符号をもって定義した。

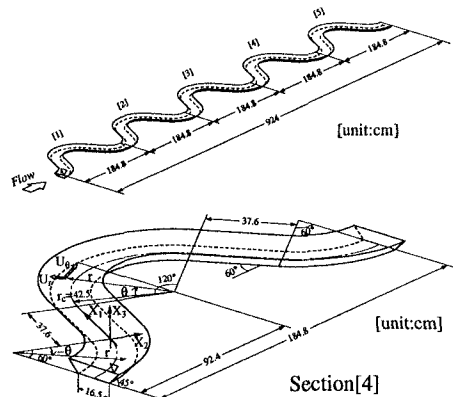


Fig.1 供試空間及び座標系

2.2 乱流モデル： 対流項、拡散項に *Rodi*²⁾ 近似を用い、代数応力モデルにより解析を行った。モデル化の際の問題となる再配分項については、*Launder - Reece - Rodi*³⁾ により提唱されたモデルを基に、その4次相関テンソルの制約条件に改良を加えた著者らの提示モデル⁴⁾を使用した。

2.3 数値解析： 数値解析に際しては境界条件の設定、方程式の離散化が容易な境界適合座標系を導入した。計算領域は Fig.1 に示す三次元蛇行開水路の全領域を対象とし、蛇行開水路の入口条件は一樣流入条件を課し、出口下流部には代表寸法 $4R$ の39.15倍の助走区間を設けて自由流出条件を課した。計算格子は断面内で 41×17 、流れ方向に372断面設置し、水位変化は考慮せず一定水位として計算を行った。

2.4 自由水面境界条件： 垂直方向速度変動値について、その値が自由水面下で急激に減衰する現象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。

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

3. 結果と考察

3.1 主流方向速度分布： Fig.2は主流方向速度等値線を比較した結果である。各等値線の値は主流方向平均速度にて無次元化した。 θ が負の場合、水路断面の左側は内壁を右側は外壁を示し、正の場合は左側は外壁を

キーワード：数値解析, 蛇行開水路, 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

右側は内壁を示す。実験結果を見ると最大主流方向速度の存在位置は蛇行開水路入口では内壁側に認められ、下流に向かって外壁へ移行し、第二の曲がり開水路では内壁近傍に形成される。こうした現象は蛇行開水路に生成される圧力勾配が遠心力より優っていることに起因しており、計算結果においても良好に再現されている。

3.2 二次流れベクトル分布： Fig.3は二次流れベクトルを比較した結果である。計算結果においてはベクトル長さの判読を容易にする為に格子点数を少なくして表示している。蛇行開水路入口に相当する $\theta = -60^\circ$ の実験結果より自由水面近傍の $(r - r_c)/4R = -0.1$ から0.5の範囲にて時計周りの渦が存在し、その渦を回り込むように内壁から外壁へ向かう二次流れが河床壁近傍に認められ、 $\theta = -0^\circ$ に至っては遠心力の影響が顕著となり内壁から外壁へ向かう二次流れが支配的となることが両結果より認められる。第二曲がり開水路に位置する $\theta = 30^\circ$ では外壁の高い圧力による慣性力と遠心力とが拮抗し二次流れは複雑に変化する。計算結果では時計周りの渦の存在位置が実験結果より内壁へ寄っているものの現象は良好に捉えている。

3.2 せん断応力 $-\bar{u}_\theta u_z$ 分布： Fig.4はせん断応力 $-\bar{u}_\theta u_z$ 等値線を両結果にて比較したものである。実験結果より零ラインを挟んで正値を示す最大値は自由水面近傍より河床壁近傍に生成されること、負の値を示す領域でも絶対値の大きい等

値線がが零ライン近傍に存在することなどが理解できる。前者は壁面近傍の乱流生成に起因しており、後者は二次流れによる運動量交換に起因する乱流生成と解釈される。計算結果においても多少差は認められるもののこうした現象を再現しており、代数応力モデルの複雑三次元乱流構造への有効性を示唆している。

4. 結論

台形断面を有する蛇行開水路流れを対象に代数応力モデル、境界適合座標系を用い三次元乱流場として数値解析を行った結果、最大主流方向速度の存在位置及び二次流れ分布、せん断応力等値線分布について特徴的現象を比較的良好に予測し、本解析手法の妥当性を確認した。

参考文献

- 1) Shiono, K. and Muto, Y., Proc. 3rd Symp. on Refined Flow Modelling and Turbulence Measurement, 1993.
- 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.

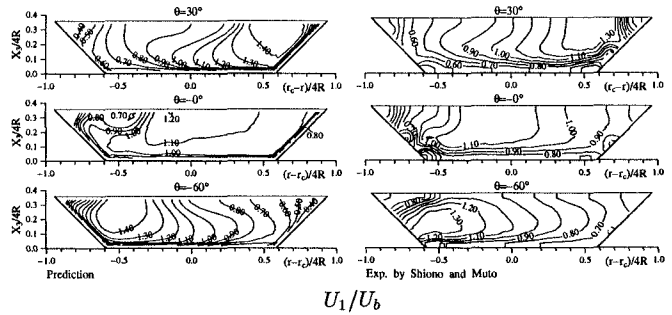


Fig.2 主流方向速度の比較

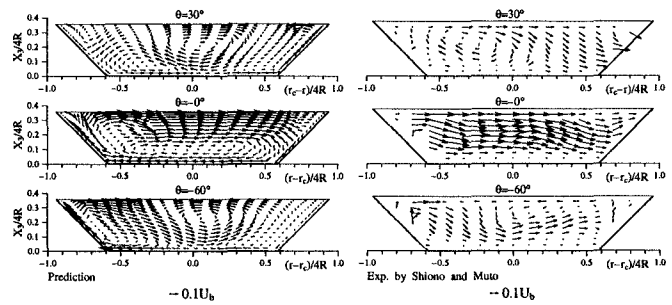


Fig.3 二次流れベクトルの比較

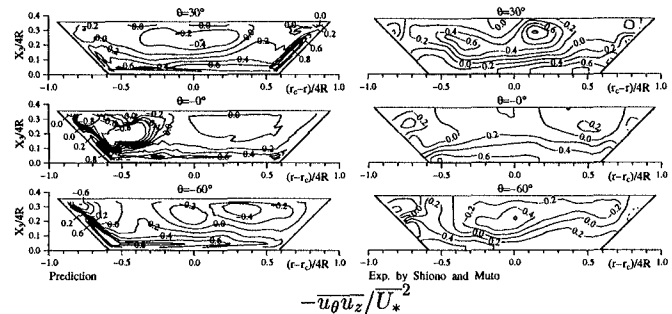


Fig.4 せん断応力 $-\bar{u}_\theta u_z$ 等値線の比較