

宇都宮大学大学院 学生員 佐藤亮輔  
 宇都宮大学大学院 正員 杉山均  
 宇都宮大学工学部 秋山光庸

### 1. 緒言

いくつかの曲がり形状より構成される蛇行開水路流れは多くの自然河川に見られる典型的な流れ場である。しかしこうした流れ場についてレイノルズ応力分布の予測までも含め数値解析した研究はその形状、乱流構造の複雑さゆえ未だ報告されていない。そこで本研究では、レイノルズ応力までも詳細に測定した武藤-塩野-今本-石垣<sup>(1)</sup>の実験を対象に数値予測することを目的とする。

### 2. 解析手法

**2.1 対象実験：** 解析対象とした武藤ら<sup>(1)</sup>の矩形断面を有する単断面蛇行開水路の実験装置概略図、ならびに計算座標系を Fig.1 に示す。蛇行開水路は図に示すように 5 周期の蛇行水路により構成され、その 1 周期の長さは 184.8 cm でその全長は 924 cm となる。さらにその半周期蛇行開水路は曲がり角 60°、曲がり半径  $r_c = 42.5 \text{ cm}$  の曲がり開水路と 37.6 cm の直線開水路より構成されている。開水路断面は矩形断面形状を有し、その河床幅は 15.0 cm である。平均水深は 5.2 cm と報告している。レイノルズ数は代表速度に断面内主流方向平均速度、代表寸法に径深  $R$  の 4 倍を取った値で  $Re = 21,900$  である。

**2.2 代数レイノルズ応力モデル：** レイノルズ応力の空間微分を含むため、数値計算の上で特に障害となる対流項、拡散項は、Rodi<sup>(2)</sup>近似を用いた。再配分項のモデル化は、Launder - Reece - Rodi<sup>(3)</sup>により提案されたものを基本とし、4 次相關テンソルの制約条件の一部に改良を加えたモデルを使用した<sup>(4)</sup>。

**2.3 数値解析：** 計算座標系は、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用いた。計算領域は、Fig.1 に示す蛇行開水路のうち、1 周期長さの蛇行開水路を対象に解析し、流路流入部、流出部には周期境界条件を用いた。計算格子点数は  $41 \times 17 \times 70$  点である。計算では水位変化を考慮せず一定水位として計算を行った。本計算では自由水面をその特徴的流動現象を考慮した仮想壁として計算している。本解析で使用した非等方性乱流モデルは、高レイノルズ数型乱流モデルであることより乱流エネルギー、乱流散逸方程式の境界条件には壁関数を用いた。式の離散化は有限差分近似により行ない計算諸量の格子点配列は Regular Grid 法によった。支配方程式中の対流項差分近似は、QUICK を使用した。

### 3. 結果と考察

計算結果から、蛇行開水路流れには非定常性が認められた。従って実験結果と比較する際に時間平均化の操作を無次元時間  $T^*(tU_b/4R) = 20$  から 100 の範囲で行い各平均諸量を求めた。以下に、実験結果との比較を示すが、計算結果はこの時間平均化された物理量である。

Fig.2 に主流方向速度等価線を比較した結果を示す。各等価線は主流方向平均速度  $U_b$  にて無次元化している。 $\theta$  が負の場合、水路断面の左側は内壁を右側は外壁を示し、正の場合はその逆となる。実験結果に特徴的な現象として、最大主流方向速度の位置は入口にあたる  $\theta = -60^\circ$  では内壁側に認められ、下流に発達するに従い外壁側に移行し第二蛇行開水路では内壁近傍形成される点を指摘できる。こうした現象は計算結果においても良好に予測されている。曲がり開水路では内壁から外壁に向かう遠心力と圧力勾配による外壁から内

キーワード： 数値解析、蛇行開水路、乱流、代数応力モデル、境界適合座標

連絡先：〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東7-1-2 宇都宮大学大学院 TEL 028-689-6032 FAX 028-689-6043

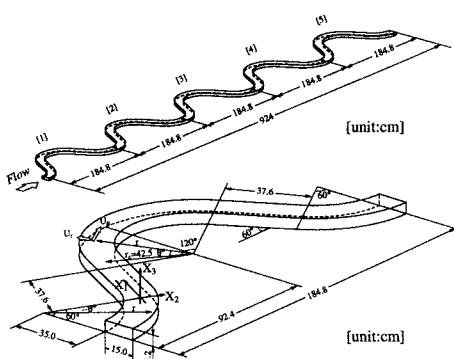


Fig.1 供試空間及び座標系

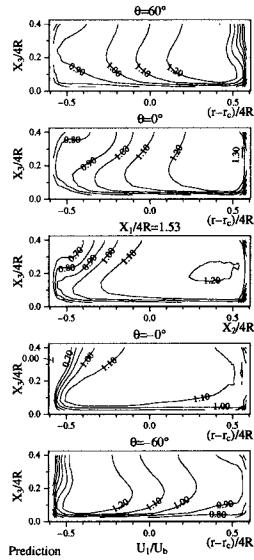


Fig.2 主流方向等值線図の比較

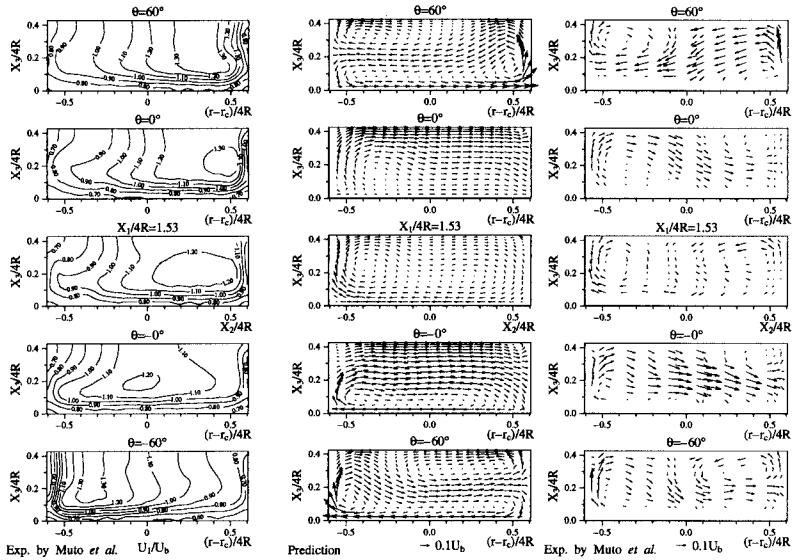


Fig.3 二次流れベクトル線図の比較

壁に向かう力の大小により流れ場は大きく変化するが、蛇行開水路の場合外壁に生成される大きな圧力勾配により主流方向速度の移動が内壁側に抑制されたものと解釈できる。

次に二次流れベクトルを両結果にて比較したものを Fig.3 に示す。比較図は上流側からの断面を示している。また計算結果に関してはベクトルの判別が容易なように格子点数を少なくして表示している。 $\theta = -60^\circ$  の実験結果より自由水面近傍の  $(r - r_c)/4R = -0.1$  から 0.5 にて反時計回りの渦と、その渦を回り込むよう内壁から外壁に向かう二次流れが認められる。計算でも同様のパターンを再現している。先にこの断面で最大主流方向速度は内壁に生成されることを示したが自由水面近傍の渦はその移動を抑制している。

$\theta = -0^\circ$  では遠心力の影響が顕著となり内壁から外壁に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。直線開水路に流入すると遠心力の作用がなくなるため二次流れは減衰すると予測されるが、実験、計算ともにこの傾向が認められる。ただし計算では一つの渦が流れ場を形成しているのに対し実験では二つの渦が認められ異なっている。 $\theta = 0^\circ$  では曲がり外壁に高い圧力勾配が存在することにより外壁から内壁に向かう二次流れが生成される。実験では河床壁の  $(r - r_c)/4R = -0.5$  近傍で河床壁から自由水面に向かう二次流れの上昇が認められ、計算も同様の現象を予測している。 $\theta = 60^\circ$  に至ると実験、計算ともに二次流れのパターンは  $\theta = -60^\circ$  断面を下流側から透視したパターンと同一となる。

#### 4. 結論

- (1) 蛇行開水路では最大主流方向速度は流路内壁に認められるが本解析は定性的にも定量的にもこの現象を予測した。
- (2) 二次流れは第一曲がり開水路で内壁から外壁へ、第二曲がり開水路では外壁から内壁に向かい形成されるが計算もそのパターンを良好に予測した。

#### 参考文献

- (1) 武藤, 塩野, 今本, 石垣, 京大防災研究所年報, 第38号B-2, pp.561-580, 1995
- (2) Rodi,W., Z. Angew. Math. Math. Mech., 56, pp.219-221, 1976
- (3) Launder,B.E., Reece,G.J. and Rodi,W., J. Fluid Mech., vol.68, pp.537-566, 1975
- (4) 杉山, 秋山, 芹沢, 機論, 56-531-B, pp.3328-3335, 1990