

一般座標系での密度関数法による連続蛇行流れの数値シミュレーション

○京都大学大学院	学生員	栗田 祥太郎
京都大学大学院	正会員	音田 慎一郎
京都大学大学院	フェロー	細田 尚

1. はじめに

連続蛇行流れとは多くの河川でみられる典型的な流れ場であるが、二次流に代表されるその内部の流れ挙動は、様々な物理現象の相互干渉により生じており、その実態は非常に複雑で十分に解明されていない。著者らは湾曲部などの形状を少ない格子数で表現するため河岸に沿った一般座標系を用い、さらに界面捕捉法として密度関数法を適用させた3次元数値解析モデルを構築した¹⁾。本研究では、構築したモデルを連続蛇行流れに適用し、実験と比較することでモデルの妥当性を検証した。

2. 数値解析法

3次元流れ解析モデル¹⁾には、湾曲部において境界適合格子を適用するため一般座標系を用いるとともに、非定常流れの水面変動を考慮するため密度関数法を用いた。基礎式は次のようになる。

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial \Phi V^i}{\partial \xi^i} \sqrt{g} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial V^i}{\partial t} + \nabla_j [V^i V^j] \\ &= F^i - \frac{1}{\rho} g^ij \nabla_j p + \nabla_j \left[-\overline{v^i v^j} \right] + 2\nabla_j S^{ij} \end{aligned} \quad (2a)$$

$$\rho = \Phi \rho_{liq} + (1 - \Phi) \rho_{gas} \quad (2b)$$

$$\mu = \Phi \mu_{liq} + (1 - \Phi) \mu_{gas} \quad (2c)$$

ここに、 t : 時間、 ξ^i : 計算空間の空間座標、 Φ : 密度関数、 V^i : 流速ベクトルの反変成分、 v^i : 乱れ速度ベクトルの反変成分、 p : 圧力、 ρ : 流体の密度、 ρ_{liq} : 液相の密度、 ρ_{gas} : 気相の密度、 ν : 動粘性係数、 μ : 流体の粘性係数、 μ_{liq} : 液相の粘性係数、 μ_{gas} : 気相の粘性係数、 F^i : 重力ベクトルの反変成分をそれぞれ表す。また、乱流モデルには2次非線形 $k-\varepsilon^2$ モデルを用いた。

計算法は有限体積法とし、安定性と有限体積法への親和性を考慮して、圧力 p ・乱れエネルギー k ・乱れエ

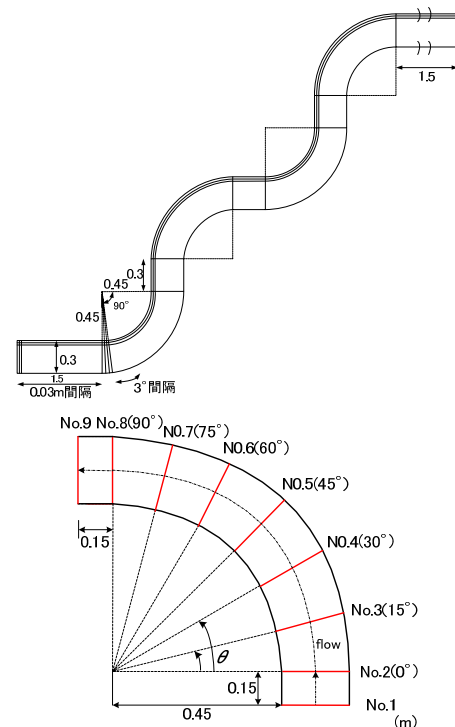


図-1 対象とする連続蛇行水路

ネルギーの逸散率 ε を直方体の中央で、流速ベクトルを側面で定義する完全スタガード格子系を用いる。計量テンソル、クリストッフェルの記号などは格子点上で定義し、計算の過程で必要となる位置の値についてはその都度内挿して求めた。

運動方程式の移流項の離散化には QUICK スキームを、 Φ の移流方程式の離散化には TVD-MUSCL 法を用い、 k および ε 方程式の移流項には Hybrid 法を用いた。圧力の収束計算手法などについては参考文献¹⁾に記述してあるため、ここでは紙面の都合上は省略する。

3. 連続蛇行流れへの適用

3次元流れ解析モデルの適用性を検証するため、図-1に示す連続蛇行流れに関する模型実験³⁾を対象に計算を行った。計算格子数は流れ、横断、鉛直方向にそれぞれ 250, 20, 40 とし、湾曲部を 3° 間隔で 30 分割

キーワード 一般座標系, 密度関数法, 連続蛇行流れ

連絡先 〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂 C1-3 TEL075-383-3269

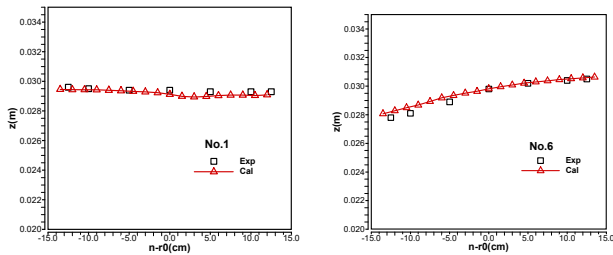


図-2 水位の横断方向分布

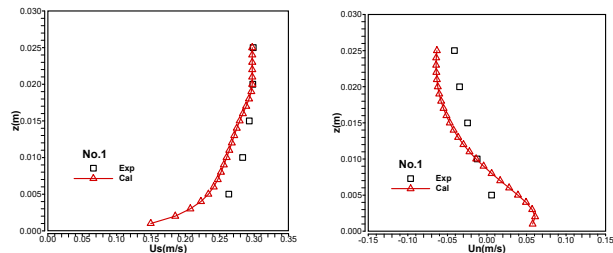


図-3 No.1断面における主流と二次流の鉛直分布

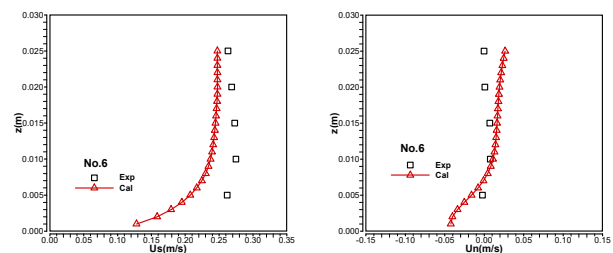


図-4 No.6断面における主流と二次流の鉛直分布

して格子を作成した。図-1に示すNo.1～No.9の各断面での水位と、主流と二次流の鉛直分布について実験値と比較した。

図-2は計算結果によるNo.1, No.6断面の水位の横断分布を示したものである。両結果とも実験値との良好な一致がみられ、湾曲部にあたるNo.6断面では、内岸に対し外岸側の水位が高くなるという水面特性が表現できた。

図-3, 図-4にNo.1, No.6断面での水路中央における主流流速(u_s)と二次流流速(u_n)の鉛直分布を、また各断面における二次流ベクトルを図-5, 6に示す。図の左側が内岸、右側が外岸である。まず、No.1断面について考察する。図-3をみると、二次流に関して実験値よりも大きく流速を評価してしまった。図-5より、外岸に反時計周りの二次流が発生しているのが分かるが、これは先行する湾曲水路で形成された第1種二次流の影響が直線区間に入っても強く残っていることを示す

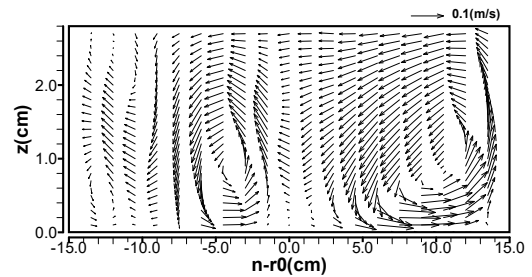


図-5 No.1における断面内二次流ベクトル図

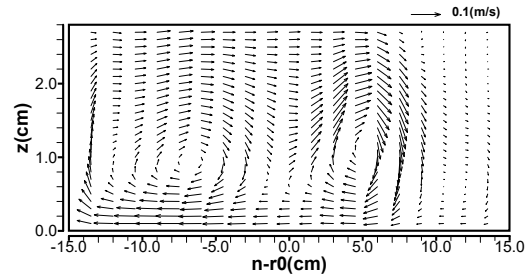


図-6 No.6における断面内二次流ベクトル図

ものと考えられる。No.6断面では、主流速でやや定量的な差が出たが、定性的には良好な結果が得られた。

図-6をみると、No.1でみられた反時計回りの二次流は消散し、新たに遠心力に起因する時計周りの二次流が発生していることが分かる。

4. おわりに

本研究では、河道湾曲部での堤防越流などを精度よく予測できる3次元数値解析モデルの開発を最終目標とし、その第1ステップとして連続蛇行水路流れへの適用性について検討したものである。その結果、湾曲部における水位差や二次流の発生を確認するとともに、蛇行流れ特有の現象を良好に再現できることを示した。今後、上記のモデルに土砂輸送モデルを組み合わせることで、湾曲部での越流破堤過程について検討したい。

参考文献

- 1) 音田慎一郎, 細田 尚, 木村一郎, Jacimovic, N.: 境界適合座標系での密度関数法を用いた開水路流れ解析法の開発とその検証について, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.72, No.4, pp.I_505-I_510, 2016.
- 2) Kimura, I. and Hosoda, T.: A non-linear k-ε model with realizability for prediction of flows around bluff bodies, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Wiley, Vol.42, No. 8, pp.813-837, 2003.
- 3) 玉井信行, 池内幸司, 山崎晶: 連続わん曲水路における流れの実験的研究, 土木学会論文集, No.331, pp.83-94, 1983.