

神戸大学工学部建設学科 学生員 ○猪熊 裕司
 神戸大学大学院工学研究科 正会員 中山 昭彦

1. 緒言

河川計画や、河川防災を検討する際、湾曲部での二次流の効果を考慮することが重要である。外岸部では、乱流と遠心力によって生じる圧力勾配によって第一種二次流や逆向きの外岸セルという渦が観測されている。既往の開水路湾曲部に対する数値解析では遠心力で生じるはずの水面変動は考慮されていないが、本研究では水面適合シグマ座標を用い、LES(Large-Eddy-Simulation)によって開水路湾曲部における乱流構造の解明を図る。

2. 計算手法

支配方程式は非圧縮性流体における質量保存式である連続式と運動方程式である Navier-Stokes 式を用いる。水路床勾配は、図1の様に水路全体の傾きを θ_1 、主流方向一般座標 ξ_1 とデカルト座標 x_1 との角度をと θ_2 すると、Navier-Stokes 式の外力項に次式で与える。

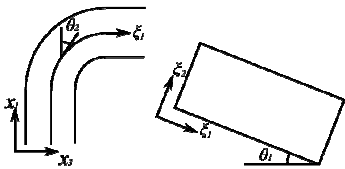


図1 勾配の与え方

$$g_1 = g \sin \theta_1 \cos \theta_2$$

$$g_2 = -g \cos \theta_1$$

$$g_3 = g \sin \theta_1 \sin \theta_2$$

乱流モデルは標準 Smagorinsky モデルを用い、時間進行法は Crank-Nicolson 法を用いる。変数配置はコロケート格子、座標系はシグマ座標系、自由水面における外向き単位法線ベクトルを n 、直交する単位接線ベクトルを s , t とする。また、自由水面の鉛直位置を h とすると

$$n = 1 / \sqrt{\left(-\frac{\partial h}{\partial x_1}\right)^2 + 1 + \left(-\frac{\partial h}{\partial x_3}\right)^2} \begin{pmatrix} -\frac{\partial h}{\partial x_1} & 1 & -\frac{\partial h}{\partial x_3} \end{pmatrix}^T$$

$$t = 1 / \sqrt{1 + \left(\frac{\partial h}{\partial x_3}\right)^2} \begin{pmatrix} 0 & \frac{\partial h}{\partial x_3} & 1 \end{pmatrix}^T \quad s = 1 / \sqrt{1 + \left(\frac{\partial h}{\partial x_1}\right)^2} \begin{pmatrix} 1 & \frac{\partial h}{\partial x_1} & 0 \end{pmatrix}^T$$

であるのでデカルト座標系における応力テンソル T とすると、自由水面での垂直応力 τ_n 、接線応力 τ_s , τ_t は

$$\tau_n = n^T T n, \quad \tau_s = s^T T n, \quad \tau_t = t^T T n$$

である。ただし、応力テンソル T は μ を粘性係数とすると

$$T_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \delta_{ij} p$$

である。気相側では運動量なしとして、水面でせん断応力を 0、気相側の圧力を一定値ゼロ、表面張力係数を σ 、自由水面での曲率を K とすると次式のようになる。

$$\tau_n + \sigma K = 0, \quad \tau_s = 0, \quad \tau_t = 0$$

上の式の水面位置 h は次式より 4 次のルンゲクッタ法を用いて解く。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = u_2 - u_1 \frac{\partial h}{\partial x_1} - u_3 \frac{\partial h}{\partial x_3}$$

流入部には十分発達した直線水路乱流を用いている。底面・壁面境界条件は基本的に No-slip 条件だが、壁面鉛直方向流速成分にのみ slip 条件を課している。

3. 解析対象

今回は 2 つのケースについて解析を行った。ケース 1 の形状は図 2 に示すとおりで格子刻みは(主流, 横断, 鉛直)=(150,80,70)であり、水路床勾配 1/1000, $Re=3100$, $Fr=0.20$ である。ケース 2 の形状は図 4 に示すとおりで格子刻みは(主流, 横断, 鉛直)=(290,80,21)であり、水路床勾配 1/80, $Re=5700$, $Fr=4.7$ である。

4. 結果と考察

図3, 5がそれぞれの結果である. 双方のケース共に第一種二次流及び外岸セルが再現された. また遠心力による水面上昇も得られた. 外岸セルは外岸上側で発生しており, 特にケース2では初期水深よりも上側で生じている.

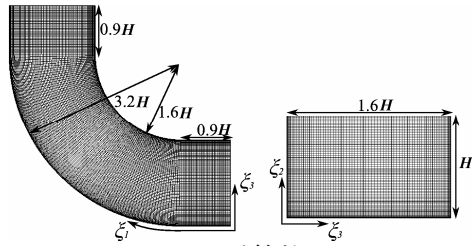


図2 ケース1: 計算格子

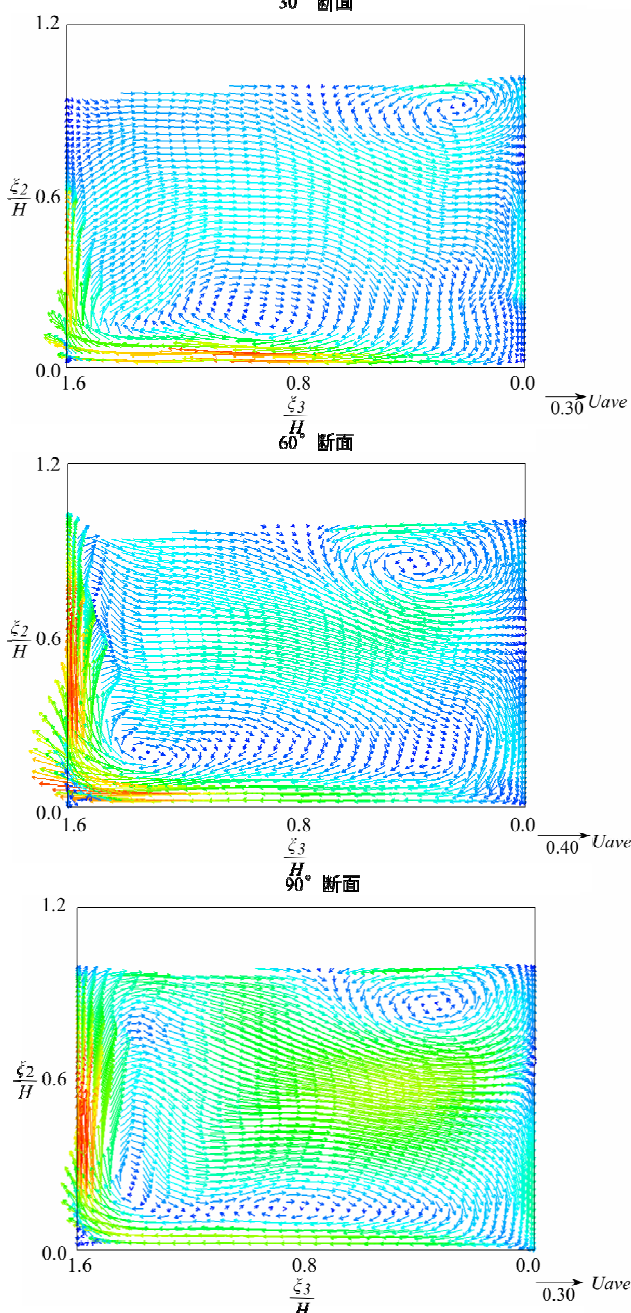


図3 ケース1: 各断面流況

5. 結論

本計算結果より湾曲部のような複雑な乱流構造の再現に本LES手法が有効であることが分かった. 特に既往の解析では補足できない水面変化とその中で生じる乱流構造を再現できることは本手法の最大の利点だと言える.

参考文献

三村豪:移動境界適合シグマ座標を用いた自由水面流の数值解析, 学位論文, 神戸大学建設学科, 2009.2
 滝本慎二, 木村一郎, 清水康行, 細田尚:急な湾曲部を有する開水路三次元乱流構造に関する数值シミュレーション, 応用力学論文集 Vol.12, pp.749-489, 2009.8

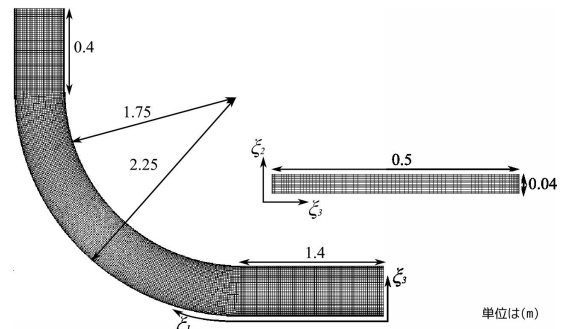


図4 ケース2: 計算格子

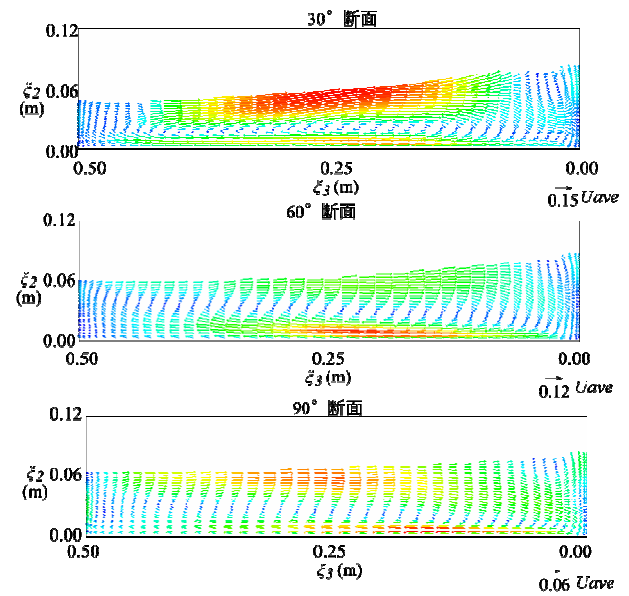


図5 ケース2: 各断面流況