斜め不透過越流型水制周辺の流れ構造に関する三次元解析

四日市大学環境情報学部　正　員　○木村　一郎　京都大学大学院工学研究科　正会員　細田　　尚
京都大学大学院工学研究科　学生員　　音田慎一郎　名古屋工業大学社会開発工学科　正会員　冨永　晃宏
中部大学工学部　正会員　武田　　誠

１．はじめに：近年，河川環境向上のための構造物として水制が再評価されている．水制周辺に土砂が堆積して形成されるワンドは, 多様な生態系の維持に極めて有効であることが指摘されている. 河川環境構造物として水制を設計する場合, 水制周辺の河床変動と，水制・主流間の水質交換に留意する必要があり，このためには，水制周辺の三次元流況を精度よく予測する必要がある．本研究は，主流の向きに対する水制張り出し角度がワンド形成に与える影響が大きいという従来の研究結果 [1]を背景に，斜め越流型水制の設置角度の違いによる三次元流況の変化を，非線形 k-εモデルを乱流モデルとして用いた三次元数値解析手法により検討したものである.

２．数値解析手法：本研究では，次に示すような移動一般座標系における反変成分表示の基礎式を用いる [2,3].

[連続式]
$$\frac{1}{\sqrt{g}}\frac{\partial V^{\alpha}\sqrt{g}}{\partial \xi^{\alpha}}=0 \tag{1}$$

[運動方程式]
$$\frac{\partial V^i}{\partial t}+\nabla_j\left[V^i(V^j-W^j)\right]+V^i\nabla_j W^j+V^j\nabla_j W^i=F^i-\frac{1}{\rho}g^{ij}\nabla_j p+\nabla_j\left[-\overline{v^i v^j}\right]+2\nu\nabla_j e^{ij} \tag{2}$$

[k 方程式]
$$\frac{\partial k}{\partial t}+\nabla_j\left[k(V^j-W^j)\right]+k\nabla_j W^j=-g_{il}\overline{v^l v^j}\nabla_j V^i-\varepsilon+\nabla_j\left\{\left(\frac{D_t}{\sigma_k}+\nu\right)g^{ij}\nabla_i k\right\} \tag{3}$$

[ε方程式]
$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}+\nabla_j\left[\varepsilon(V^j-W^j)\right]+\varepsilon\nabla_j W^j=-C_{\varepsilon 1}\frac{\varepsilon}{k}g_{il}\overline{v^l v^j}\nabla_j V^i-C_{\varepsilon 2}\frac{\varepsilon^2}{k}+\nabla_j\left\{\left(\frac{D_t}{\sigma_k}+\nu\right)g^{ij}\nabla_i \varepsilon\right\} \tag{4}$$

ここに，ξ^i：計算空間の空間座標，t：時間，V^i: 流速ベクトルの反変成分，W^i: 格子移動速度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，ν：動粘性係数，ρ：流体の密度，k：乱れエネルギー，ε：乱れエネルギー散逸率, g_{ij}, g^{ij}：計量テンソルの共変及び反変成分，g：計量テンソルの共変成分から成る行列の行列式，F^i：重力ベクトルの反変成分をそれぞれ表わす．また，∇_j は共変微分を表し，クリストッフェル記号Γ_{ij}^{k}を用いて次のように表される.

$$\nabla_i A^k=\frac{\partial A^k}{\partial \xi^i}+A^j\Gamma_{ij}^{\ \ k} \tag{5}$$

乱流モデルとしては，高レイノルズ数型の２次非線形 k-εモデルを用いた [4]．本モデルによる構成則は,

$$-\overline{v'^i v'^j}=D_t S^{ij}-\frac{2}{3}k\delta_s^i g^{sj}-\frac{k}{\varepsilon}D_t\left[\alpha_1 Q_1+\alpha_2 Q_2+\alpha_3 Q_3\right], \quad D_t=C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon} \tag{6}$$

$$Q_1=S^{i\alpha}g_{\alpha l}\Omega^{lj}+S^{j\beta}g_{\beta l}\Omega^{li},\ Q_2=S^{i\alpha}g_{\alpha l}S^{lj}-\frac{1}{3}S^{k\alpha}g_{\alpha m}S^{m\beta}g_{\beta k}\delta_l^i g^{lj},\ Q_3=\Omega^{i\alpha}g_{\alpha l}\Omega^{lj}-\frac{1}{3}\Omega^{k\alpha}g_{\alpha m}\Omega^{m\beta}g_{\beta k}\delta_l^i g^{lj} \tag{7}$$

$$S^{ij}=g^{j\alpha}\nabla_\alpha V^i+g^{i\alpha}\nabla_\alpha V^j,\ \Omega^{ij}=g^{j\alpha}\nabla_\alpha V^i-g^{i\alpha}\nabla_\alpha V^j \tag{8}$$

となる．モデル係数は，M=max(S,Ω) (S:Strain parameter, Ω:Rotation parameter)の次のような関数で与える.

$$\alpha_1=-0.1325 f_M,\ \alpha_2=0.0675 f_M,\ \alpha_3=-0.0675 f_M,\ f_M=\left[1+0.02M^2\right]^{-1},\ C_\mu=\min\left[0.09, 0.3/(1+0.09M^2)\right] \tag{9}$$

計算は，冨永らの実験（PIV 計測）[5]と同条件（**表１**参照）で行い，上流向きの水制の場合（直角より 30°上流向）を Run1，下流向きの水制（直角より 30°下流向）の場合を Run2 とする．**図１**は，Run1 の計算対象領域のうち，水制周辺の部分の計算格子を示したものである．格子形成にあたっては，千葉による格子生成プログラム，Rubbnet[6]を使用した.

表１　数値解析の水理条件（冨永らの実験 [5] と同条件）

水路幅 B	路床勾配 I	水深 H	流量 Q	平均流速 V	Froude 数	Reynolds 数	水制長 l	水制幅 b	水制高 d
0.3m	1/2000	8.0cm	4.1 l/s	17.08cm/s	0.193	13660	5.0cm	2.0cm	4.0cm

キーワード：水制，非線形 k-εモデル，CFD，RANS，開水路乱流
〒512-8512　四日市市萱生町 1200 四日市大学環境情報学部　木村一郎 Tel 0593-65-6599, Fax 0593-65-6617

格子数は94 (x 方向)×30 (y 方向)×8 (z 方向)である．

３．計算結果の概要：水制設計においては，掃流砂輸送と関係の深い底面付近の流れ場の予測が重要となる．**図2(a)**は，底面近傍（z=5mm）における計算結果の時間平均流速ベクトルであり，**図2(b)**は冨永らの実験結果である．計算結果を見ると，Run1では水制間の広い範囲に主流から川岸に向かう流れがみられるが，Run2では水制奥部から主流方向に向かう流れが卓越している．これらの特性は，**図2(b)**の実験結果と定性的に一致し，武田らによる木曽川水制の調査結果[1]とも適合する．ただし，Run1 の計算結果では水制先端付近の流れの再現性が悪い．これは，鉛直方向の計算格子が粗く，水制根元付近に発生する循環流を十分に再現できていないためと予想される．**図3(a),(b)**は，y = 50mm 付近の鉛直断面内の水路横断方向の流速分布の計算結果を示したものであり，**図4(a),(b)**は同様に冨永らの実験結果を示している．計算結果，実験結果の両方で，Run1では底面付近で水制間に流入する流れが卓越し，Run2では逆に底面付近で流出する流れが支配的となっている．

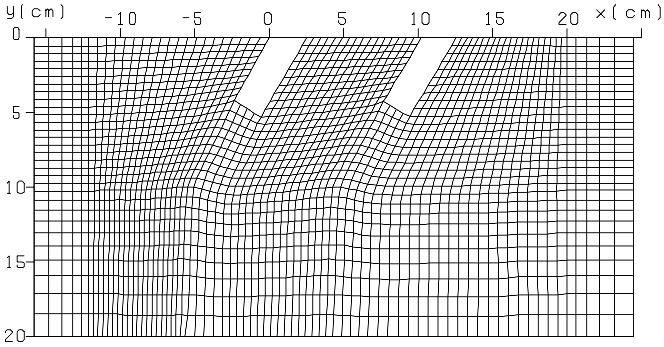

図１　水制付近の計算格子（Run 1）

参考文献　1)武田他，土木学会中部支部講演概要集，(2001)，pp.237-238.　2)木村他，四日市大学環境情報論集，**5**(2001)，pp.145-170.　3)越塚，“数値流体力学，” 培風館，(1997).　4)木村他，水工学論文集,**44**(2000)，pp.599-604.　5)冨永他，水工学論文集，**45** (2001),pp.379-384.　6)千葉他，四日市大学環境情報論集，**2-2**(1999)，pp.103-126.

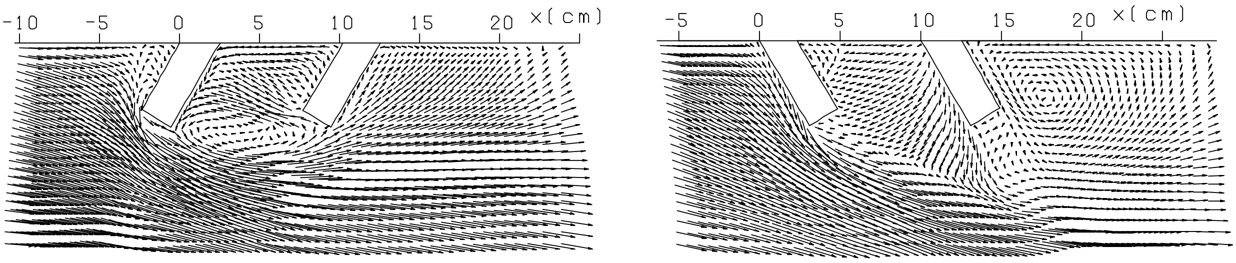

図2 (a) z=5mm における平面流況(Cal.)（左：Run 1，右：Run 2）

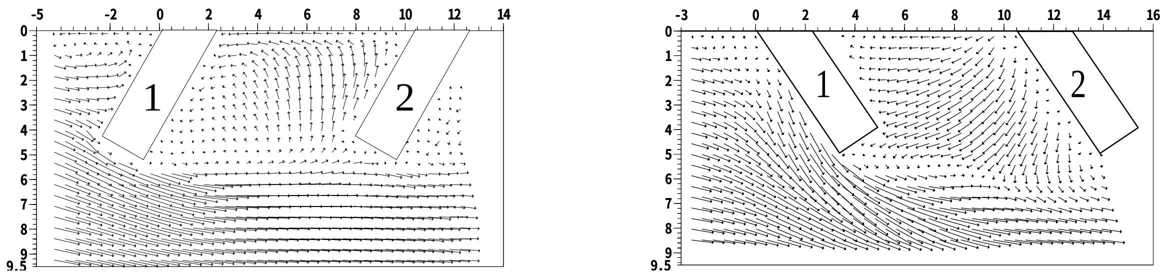

図2 (b) z=35mm における平面流況(Exp.[5])（左：Run 1，右：Run 2）

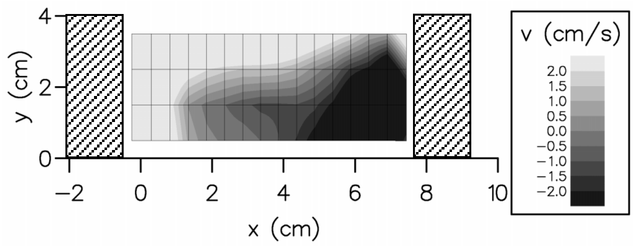

図 3 (a) 鉛直面内の流速分布(y=50mm, Run 1, Cal.)

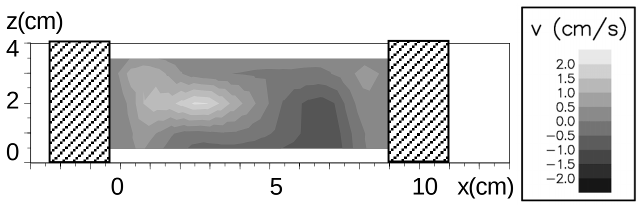

図 4 (a) 鉛直面内の流速分布(y=50mm, Run 1, Exp.[5])

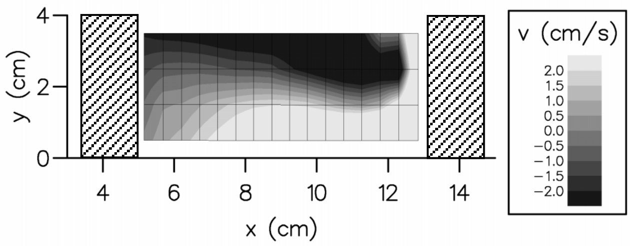

図 3 (b) 鉛直面内の流速分布(y=50mm, Run 2, Cal.)

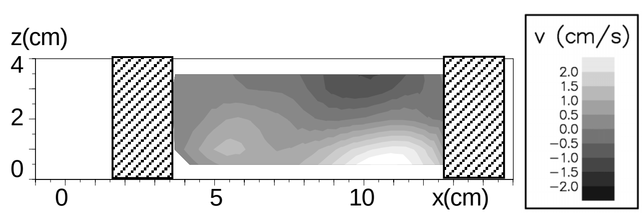

図 4 (b) 鉛直面内の流速分布(y=50mm, Run 2, Exp.[5])