

水平渦運動を伴う複断面開水路流れの非定常3次元数値解析

建設省土木研究所 正会員 櫻井 寿之 京都大学工学部 正会員 細田 尚
京都大学工学部 正会員 村本 嘉雄 京都大学大学院 学生会員 加藤 隆彰

1. はじめに：本研究は、開水路流れの第二種二次流、複断面開水路流れの低水路と高水敷の境界に発生する大規模水平渦運動などの3次元構造を有する流れを再現可能な3次元解析モデルの開発を目的としている。非線形 $k-\epsilon$ モデル及びストレイン・パラメータを導入したモデル¹⁾を用いて3次元非定常計算を行い、前述の現象の再現を試み、従来の実験結果と比較して本モデルの流れの再現性を検証した。

2. 数値解析モデル：基礎式は連続式、3次元のレイノルズ方程式及び乱流モデルによって構成される。乱流モデルには、ひずみ速度の非線形項を考慮することにより乱れの非等方性を再現できるようにした非線形 $k-\epsilon$ モデル²⁾を用いる。以下に乱流モデルの基礎式を示す。

$$(k \text{ 方程式}) \quad \frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial k U_j}{\partial x_j} = -\overline{u_i u_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\frac{D}{\sigma_k} + \nu \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\} \quad (1)$$

$$(\epsilon \text{ 方程式}) \quad \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial \epsilon U_j}{\partial x_j} = -C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \overline{u_i u_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\frac{D}{\sigma_\epsilon} + \nu \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right\} \quad (2)$$

$$(\text{レイノルズ応力}) \quad -\overline{u_i u_j} = D S_{ij} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} - \frac{k}{\epsilon} D \sum_{p=1}^3 C_p \left(S_{ip} - \frac{1}{3} S_{pp} \delta_{ij} \right) \quad (3)$$

$$S_{ij} = \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \quad D = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad S_{ij} = \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} \frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \quad S_{ij} = \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \quad (4)$$

ここに、 (x, y, z) ：空間座標、 t ：時間、 (U, V, W) ：平均流速ベクトル、 P ：平均圧力、 (u, v, w) ：乱れ速度ベクトル、 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、 D ：渦動粘性係数を表す。添え字 i, j, r は 1, 2, 3 の値をとり、1 は x 方向、2 は y 方向、3 は z 方向をそれぞれ表す。また、添え字 i, j, r に関して総和の規約を用いている。式(3)の右辺第3項が非線形項となっており、壁面近傍をのぞいた全領域において乱れの非等方な成分を表す。 $k-\epsilon$ モデルによる解析では、せん断不安定に起因する非定常な渦運動が再現されにくいことが知られており、この点を改良するために以下に示す補正式を用いてストレイン・パラメータの導入を試みる。

$$S = \frac{k}{\epsilon} \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)^2} \quad ; \quad C_\mu = \min \left[0.09, \frac{A_2}{1 + A_1 (\min[20, S])^{1.5}} \right] \quad (\text{本研究では、} A_1=0.7, A_2=0.3 \text{ とした}) \quad (5)$$

数値解析法としては、有限体積法、陽解法、運動方程式の慣性項に QUICK スキームを用い、圧力は静水圧を仮定しないで収束計算により求めた。

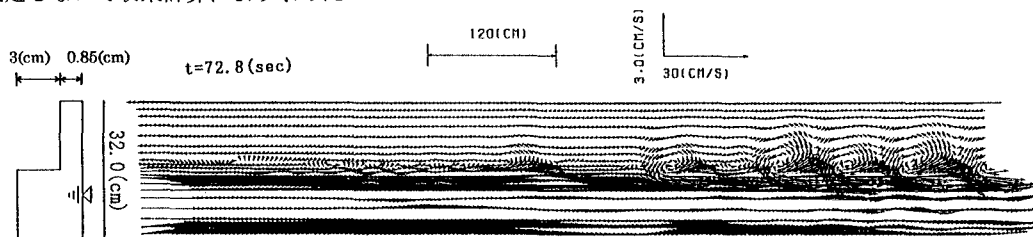


図-1 Run-3 の平面流速ベクトル図（スケール、流速の縦横の比に留意）

乱流，大規模渦，複断面開水路，数値解析

〒606-01 京都市左京区吉田本町 TEL 075-753-5076

3. 計算結果と考察：周期的な大規模水平渦運動が観測された池田らによる実験の CASE A を対象に解析を行った³⁾。ここでは、標準型 $k-\epsilon$ モデルにストレイン・パラメータを導入した Run-2 と非線形 $k-\epsilon$ モデルにストレイン・パラメータを導入した Run-3 について結果を示す。図-1 をみると、Run-3 の計算により上流より高水敷と低水路の境界面が徐々に不安定になり上流端より 4m ほど下流で渦列が生じている。Run-2 においても高水敷と低水路の境界部に発生する大規模水平渦運動を定性的に再現することができたが、渦の横断方向のスケールは、実際の現象よりかなり小さいものとなった。非線形 $k-\epsilon$ モデルにストレイン・パラメータを導入することで上記の渦運動の横断方向スケールが 5~6 倍大きくなったが、それでも実験結果のスケールはさらに 5 倍ほど大きくなっている。図-2、図-3 の横断ベクトルをみると Run-2、Run-3 とともに高水敷上および境界付近ではよく似た流れの構造を示しており、渦の 3 次元構造は定性的には実験結果に近いものが再現されている。図-2、3 の低水路の様子をみると、非線形モデルを取り入れた Run-3 の方がかなり複雑な構造を示している。長方形断面水路の流れなどと比較すると、Run-3 の方が実際の二次流の様子に近いと思われるが低水路底面での上昇、下降流が強い点などを考慮すると十分に再現しているとは言えない。

4. おわりに：今後の課題としては、モデルの二次流の再現性をさらに高めること、水平渦のスケールを精度良く再現すること、3次元解析をすることにより二次流と大規模水平渦運動を同時に考慮した場合の流れの抵抗則について研究していくことが必要と思われる。

参考文献

- 1) Kato・Launder : Proc.9th Symp.Vol.1, pp.10.4.1~6,1993.
- 2) 明・笠木：機会学会論文集（B編）,56巻, 531号,pp94~100,1990.
- 3) 池田駿介・村山宣義・空閑健：土木学会論文集, No.509/II-30, pp.131-142, 1995.2

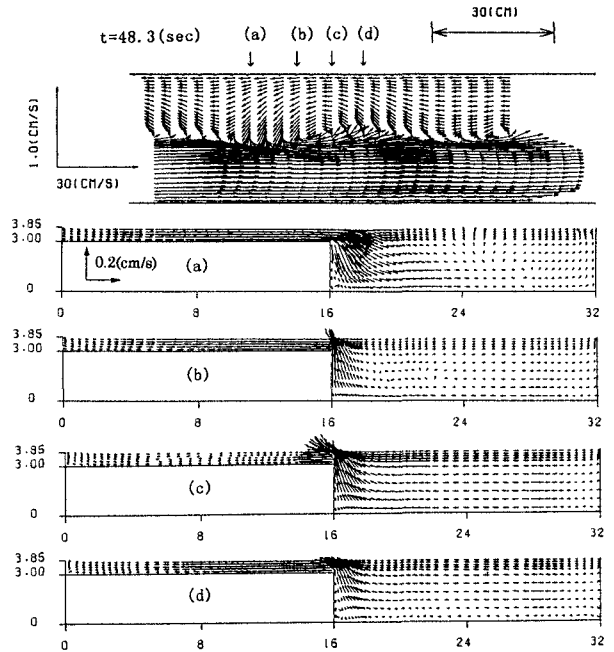


図-2 Run-2 の水平渦の各横断面の流速ベクトル

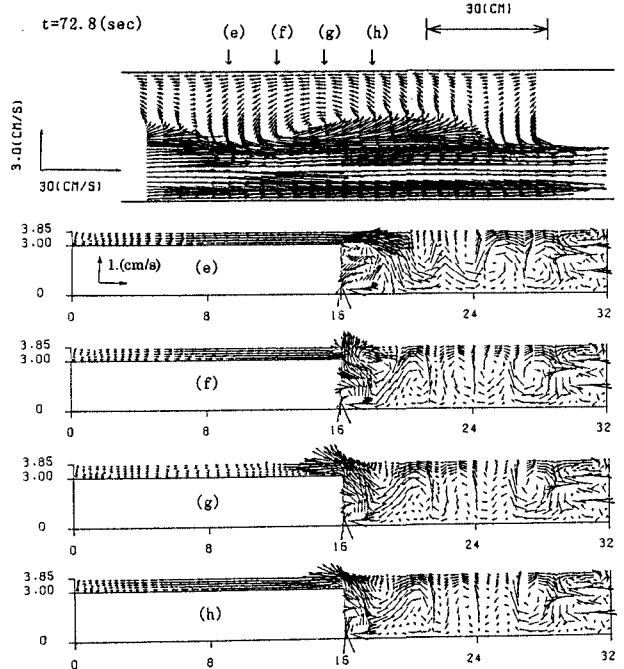


図-3 Run-3 の水平渦の各横断面の流速ベクトル