

複断面蛇行開水路流れの 乱流構造解析

正 杉山 均 (宇都宮大学大学院工学研究科)

○ 齊藤 卓也 (東北電力株式会社)

緒言

自然河川の多くは、曲がりと直線開水路が複合して構成された蛇行開水路を形成する。また、河川流路は堤防が築かれる結果、低水路と呼ばれる本来の河川流路と、高水敷と呼ばれる洪水時に氾濫原となる河道から構成される複断面形状を有する。こうした氾濫河川の流れは多くの場合乱流であり、低水路内の流れと高水敷を流れる上層流とが相互干渉し、複雑な三次元乱流場を形成する。

本解析にて対象とした流れは、蛇行開水路流れが氾濫した際の流れであり、いくつかの現象が相互に関連した複雑な流れを形成する。こうした流れは自然災害の予測、あるいは河川工学上重要な問題である。

目的

本解析では、武藤－塩野－今本－石垣の実験を対象に複断面蛇行開水路流れの三次元数値解析を試み、実験結果と比較検討し、本解析手法の妥当性を検討するとともに、この種の流れの流動挙動について新たな知見を得ることを目的とする。

基礎方程式

▶連続の式

$$\frac{\partial U_i}{\partial X_i} = 0$$

▶運動方程式

$$\frac{DU_i}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial X_i} + \frac{\partial}{\partial X_j} \left(\nu \frac{\partial U_i}{\partial X_j} - \overline{u_i u_j} \right)$$

▶乱流エネルギー方程式

$$\frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial X_i} \left\{ \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} + \nu \right) \frac{\partial k}{\partial X_i} \right\} + \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial X_j} - \varepsilon$$

▶乱流散逸方程式

$$\frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial X_i} \left\{ \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} + \nu \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial X_i} \right\} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial X_j} - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k}$$

▶モデル化されたレイノルズ応力輸送方程式

$$\frac{u_i u_j}{k} (P_k - \varepsilon) = P_{ij} + \underbrace{[\pi_{ij} + \pi_{ji}]_1}_{\text{再配分項}} + \underbrace{[\pi_{ij} + \pi_{ji}]_2}_{\text{再配分項}} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \varepsilon$$

代数式化した
対流・拡散項

生成項

再配分項

散逸項

再配分項のモデル化

$$\left[\pi_{ij} + \pi_{ji} \right]_1 = -C_1 \cdot \frac{\varepsilon}{k} \left(\overline{u_i u_j} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \right)$$

$$\left[\pi_{ij} + \pi_{ji} \right]_2 = -\frac{C_2 + 8}{11} \left(P_{ij} - \frac{2}{3} P_k \delta_{ij} \right) - \zeta \cdot k \left(\frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right) - \frac{8C_2 - 2}{11} \left(D_{ij} - \frac{2}{3} P_k \delta_{ij} \right)$$

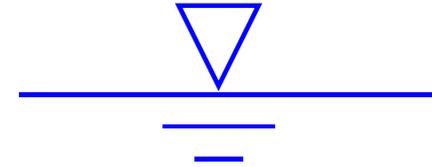
$$C_1 = C_1^* + C_1' \cdot f \left(\frac{L}{x_w} \right) \quad C_2 = C_2^* + C_2' \cdot f \left(\frac{L}{x_w} \right) \quad \zeta = \zeta^* + \zeta_1' \cdot f \left(\frac{L}{x_w} \right)$$

$$P_{ij} = -\overline{u_i u_k} \frac{\partial U_j}{\partial X_k} - \overline{u_j u_k} \frac{\partial U_i}{\partial X_k} \quad D_{ij} = -\overline{u_i u_k} \frac{\partial U_k}{\partial X_j} - \overline{u_j u_k} \frac{\partial U_k}{\partial X_i}$$

$$P_k = -\overline{u_k u_l} \frac{\partial U_k}{\partial X_l} \quad f \left(\frac{L}{x_w} \right) = \frac{C_\mu^{3/4}}{\kappa} \frac{k^{3/2}}{\varepsilon} \frac{1}{x_w}$$

C_1^*	C_2^*	ζ^*	C_1'	C_2'	ζ_1'
1.40	0.44	0.16	-0.35	0.12	0.10

自由水面境界



Naot-Rodi(1982)

$$\varepsilon_s = \frac{C_\mu^{3/4} k_s^{3/2}}{\kappa} \left(\frac{1}{y'} + \frac{1}{y^*} \right) \quad (y' = 0.07h)$$

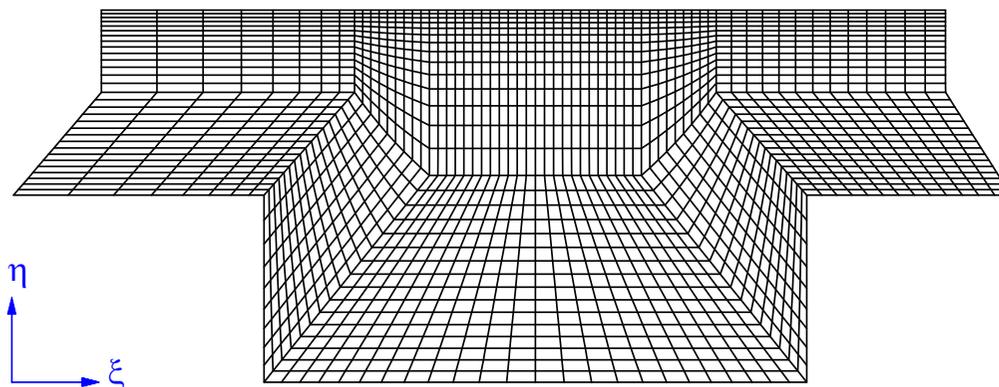
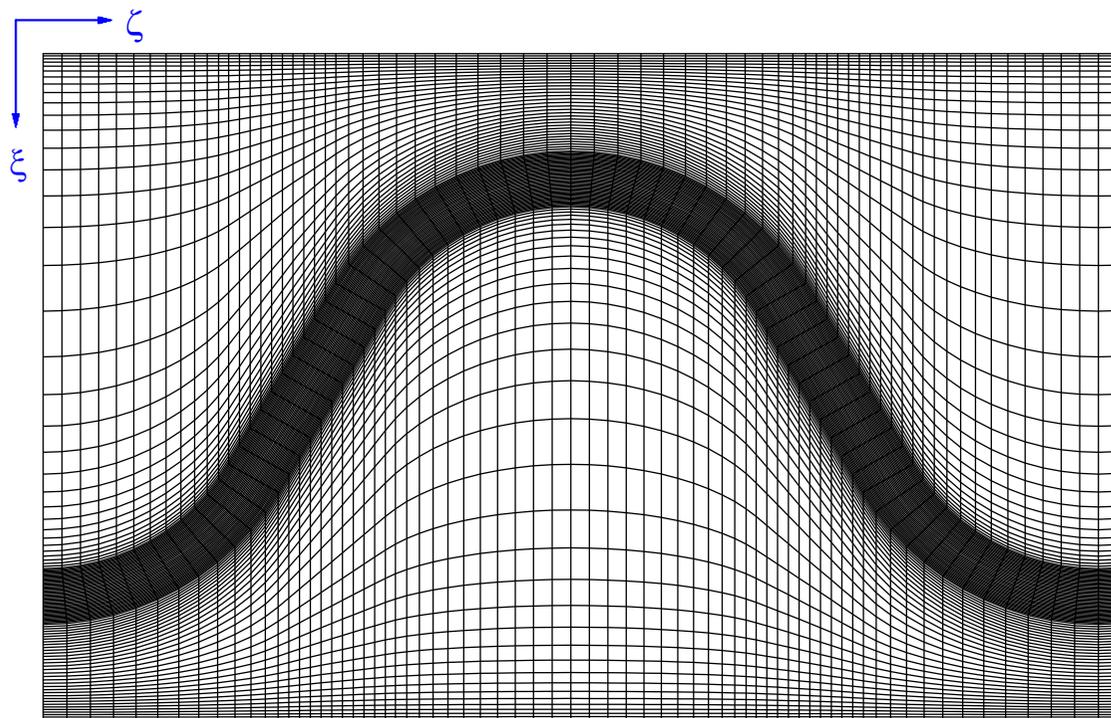
Nakagawa-Nezu(1987)

$$k_s = Dk_d \quad (D = 0.8)$$

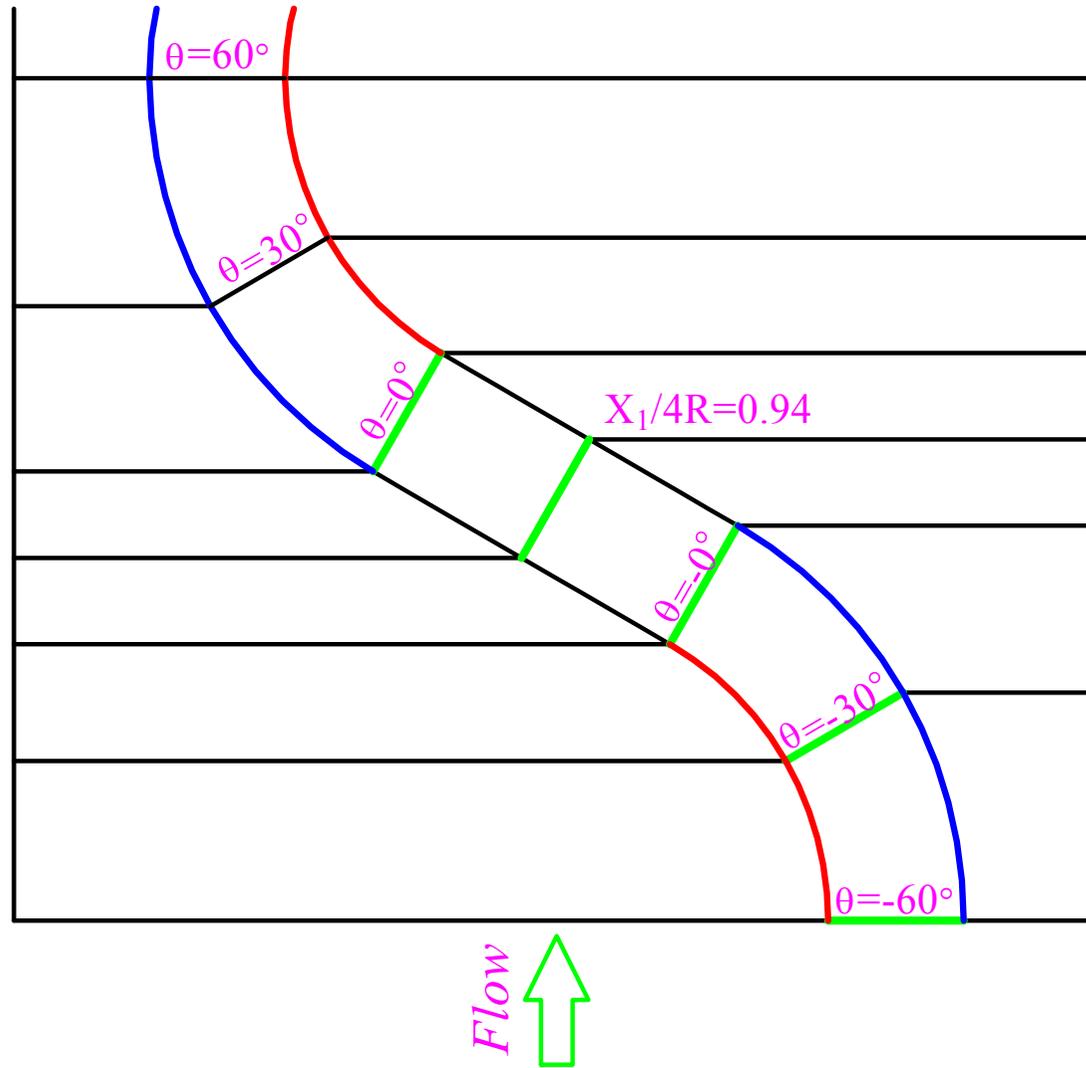
本解析

$$\varepsilon_s = \frac{C_\mu^{3/4} k_s^{3/2}}{\kappa y}$$

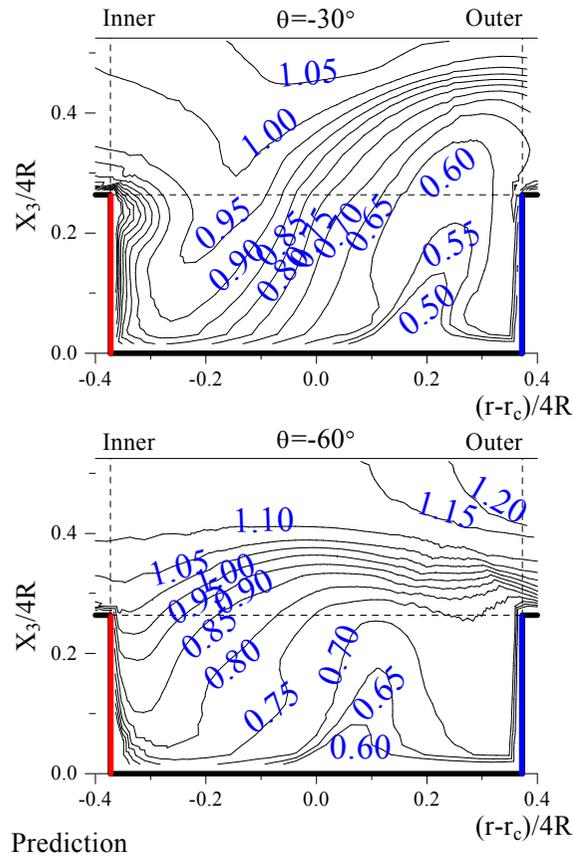
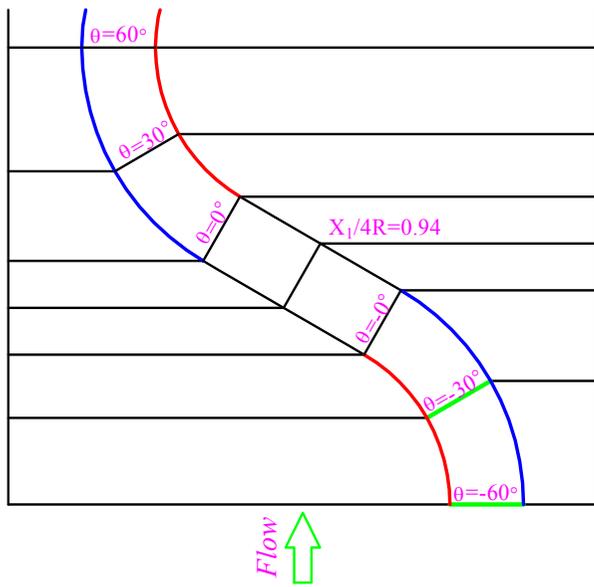
$$\overline{u_3^2} = 0.0$$



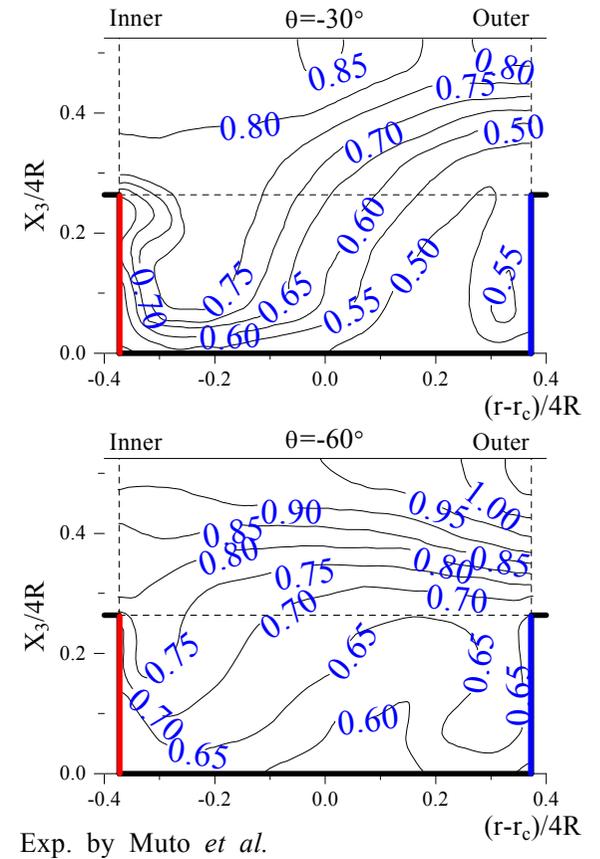
計算格子



比較断面

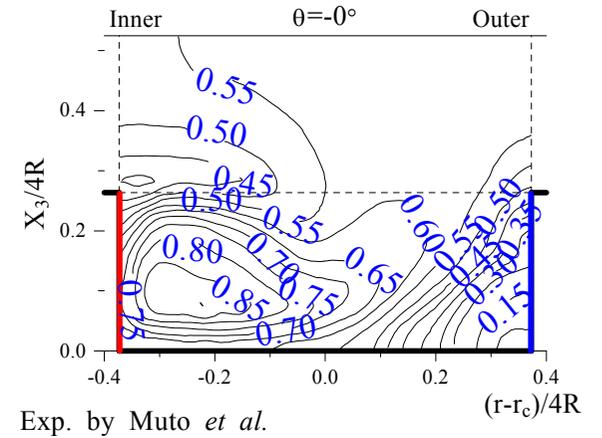
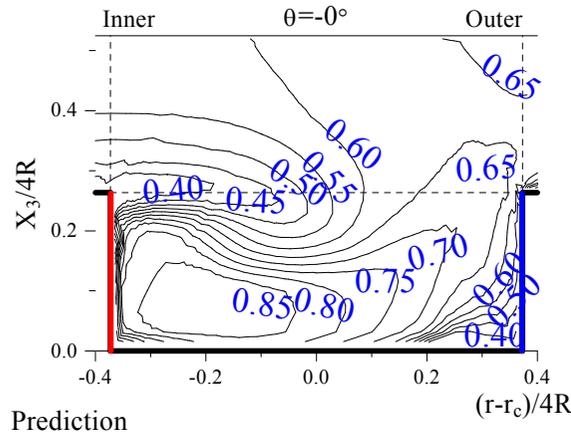
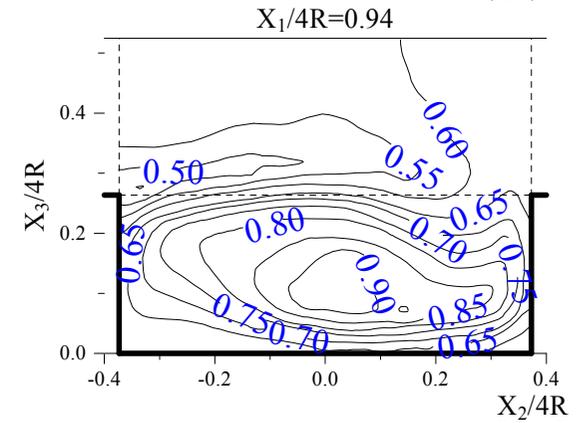
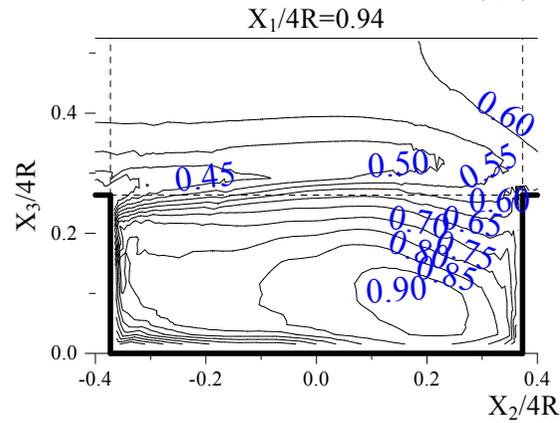
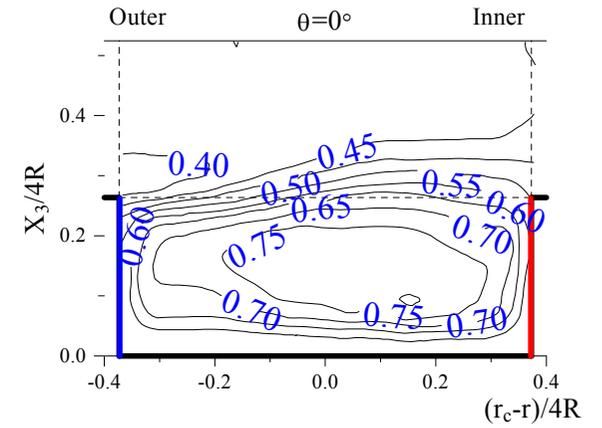
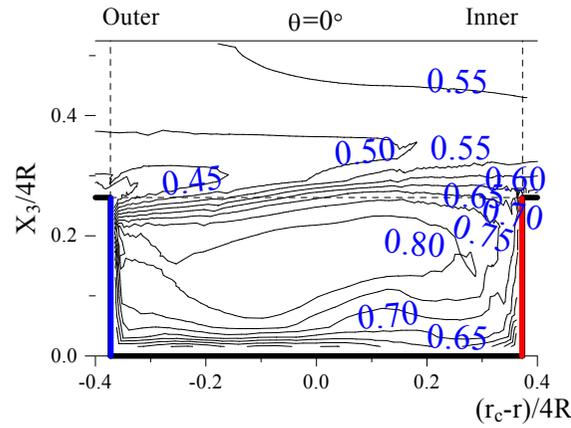
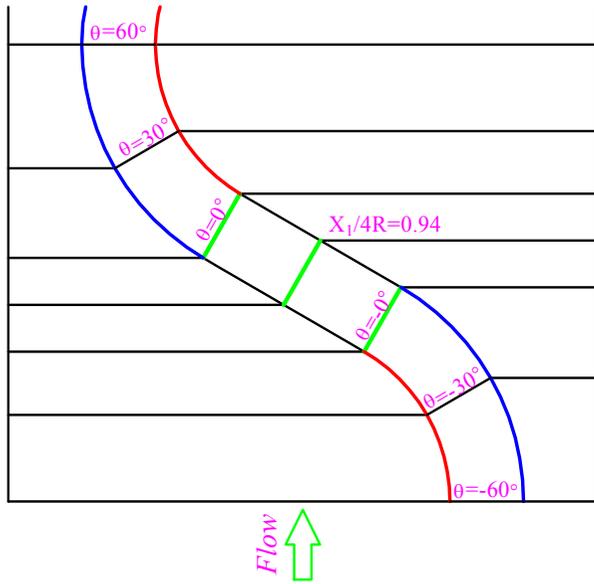


U_1/U_b

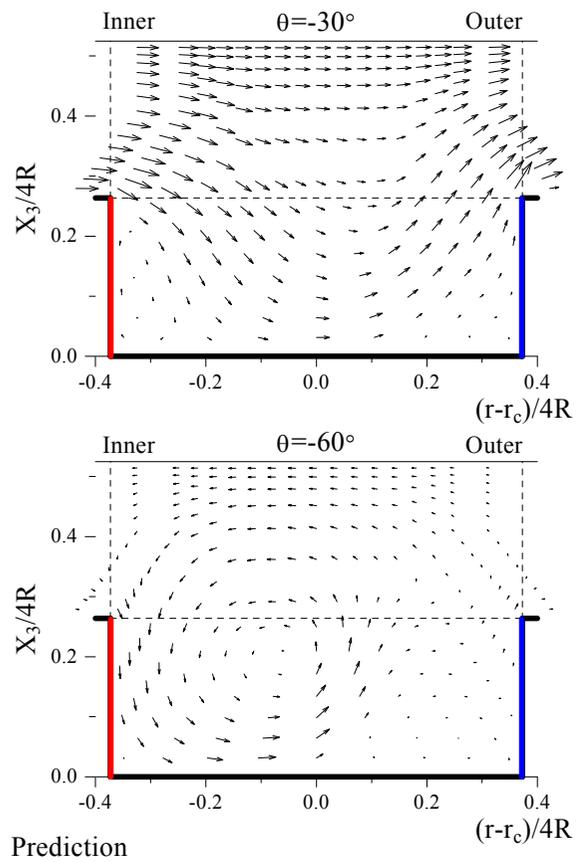
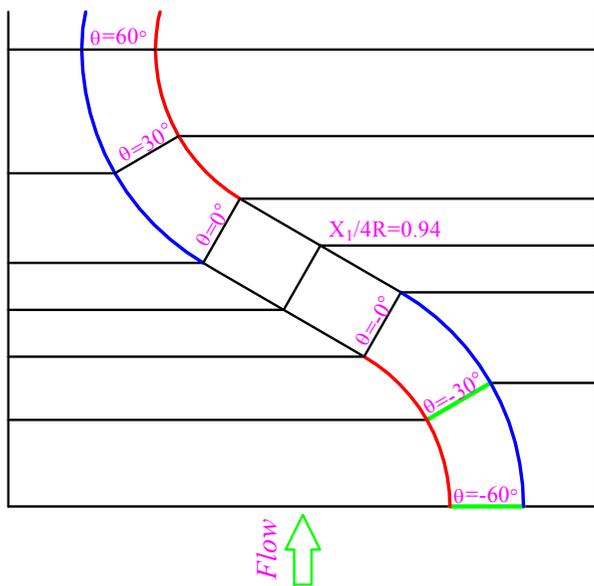


U_1/U_b

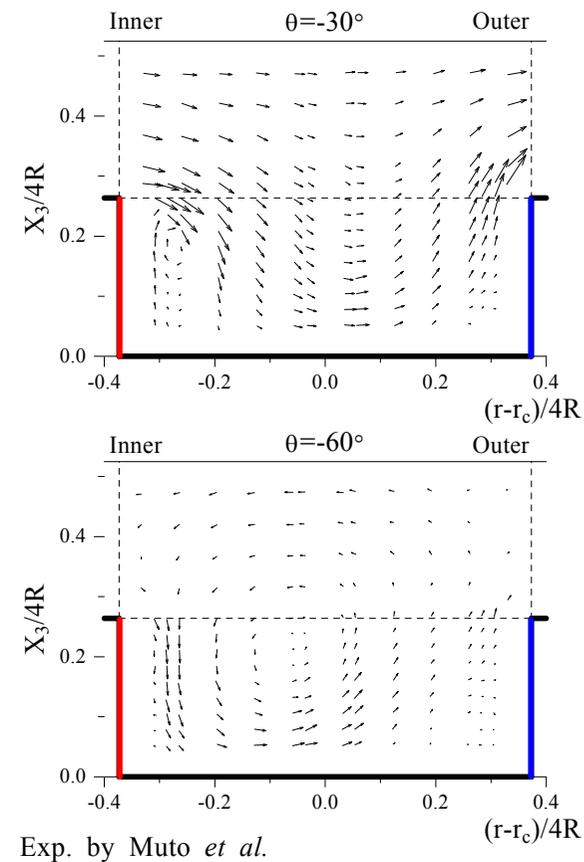
主流方向速度等値線比較図



主流方向速度等値線比較図

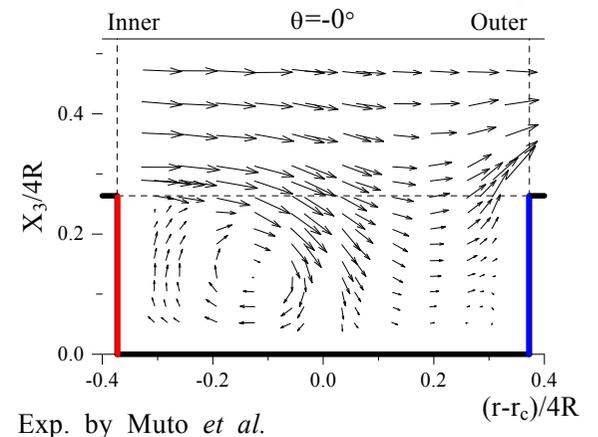
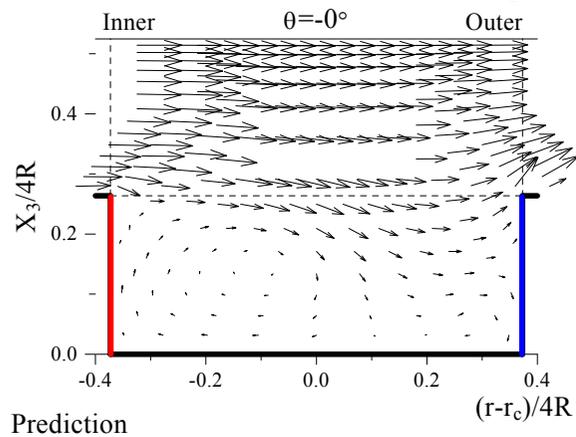
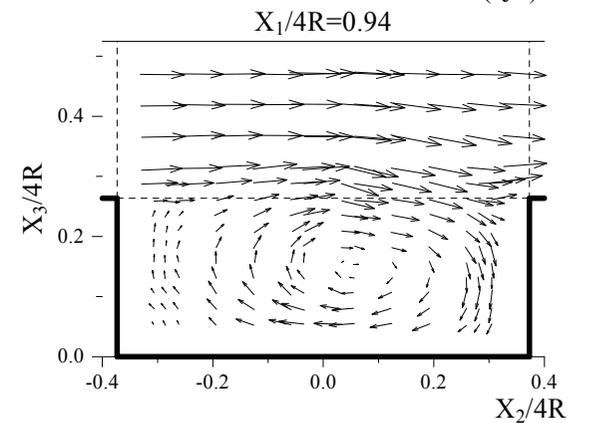
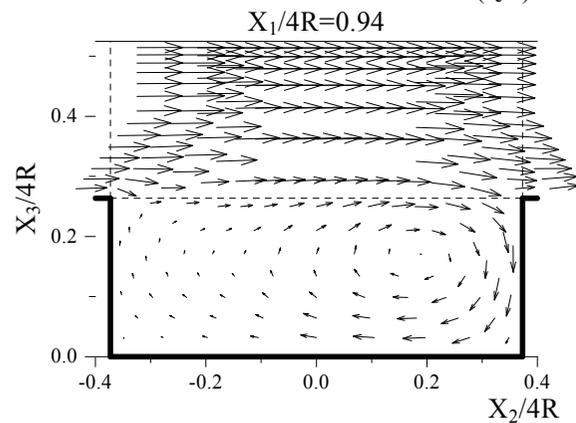
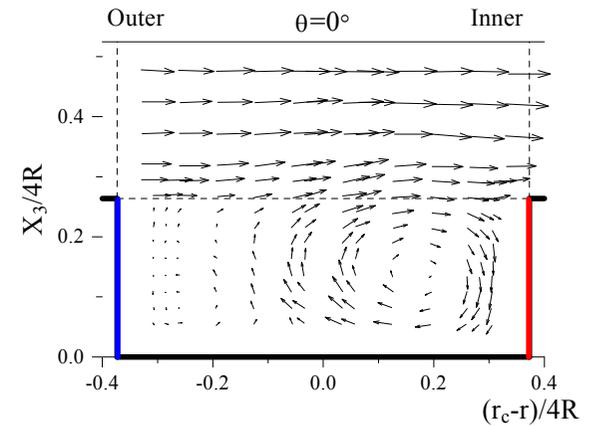
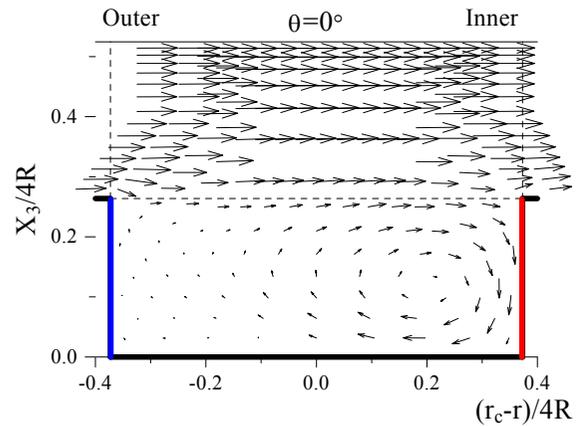
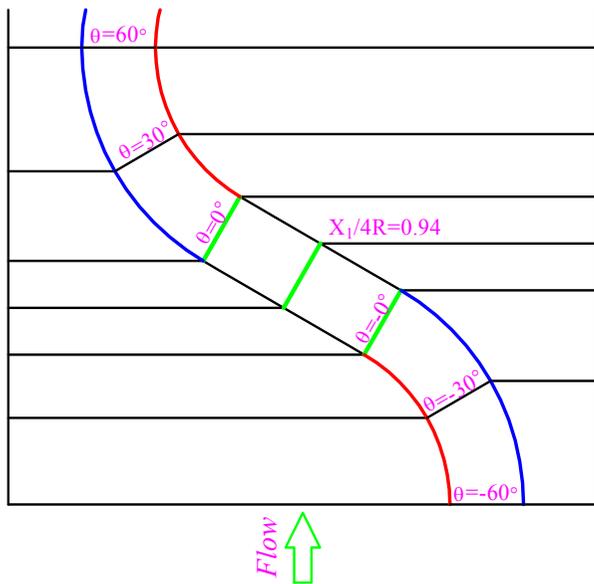


$\rightarrow 0.5U_b$



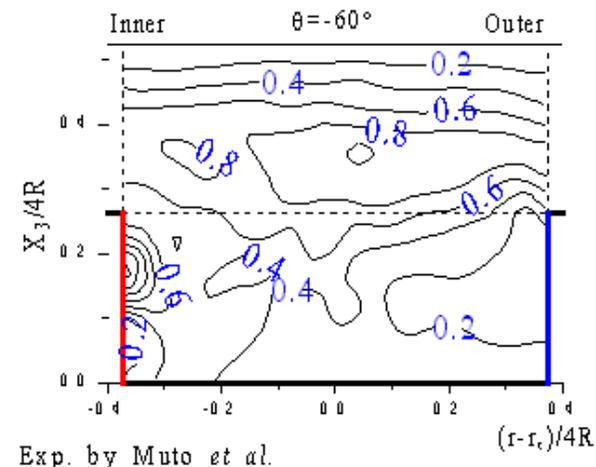
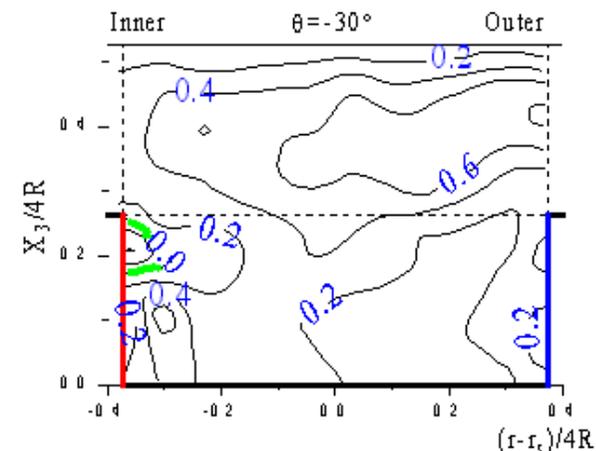
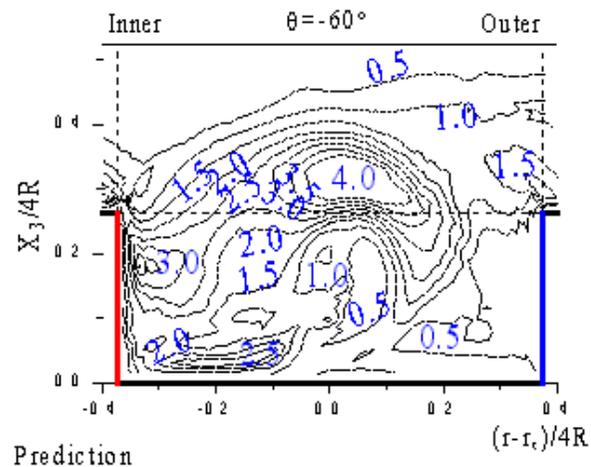
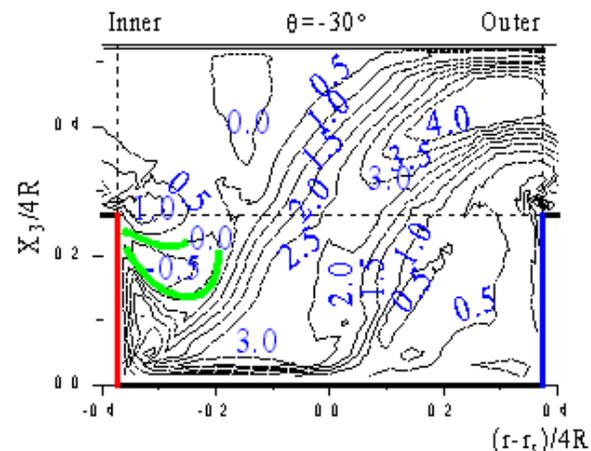
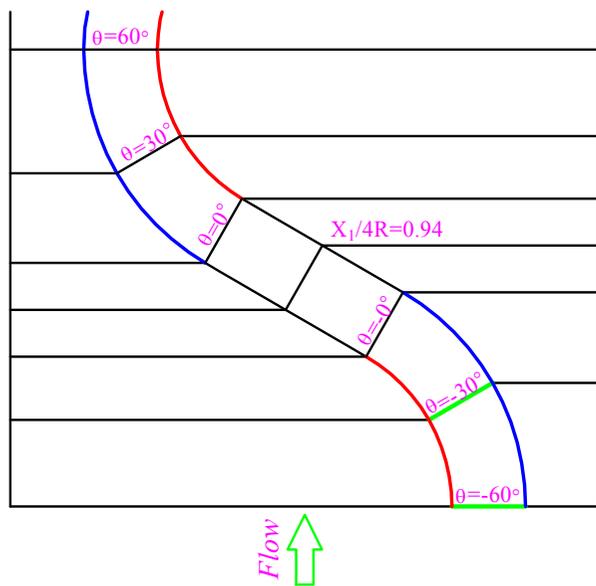
$\rightarrow 0.5U_b$

二次流れベクトル比較図



→ $0.5U_b$
二次流れベクトル比較図

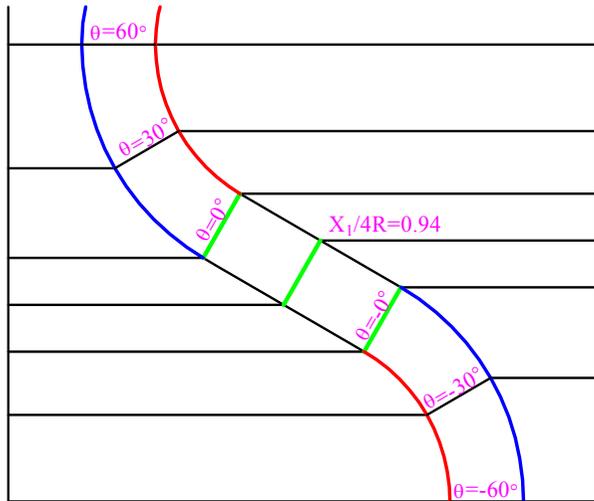
→ $0.5U_b$



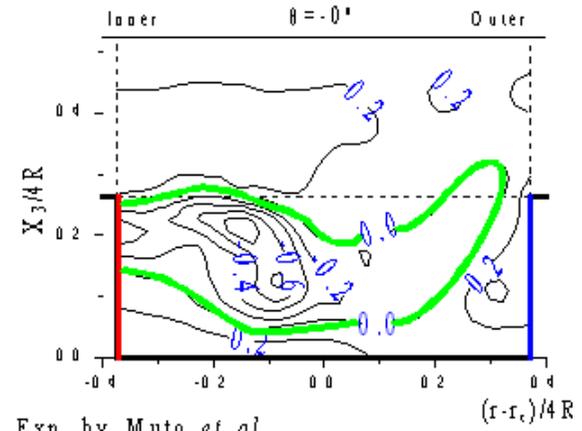
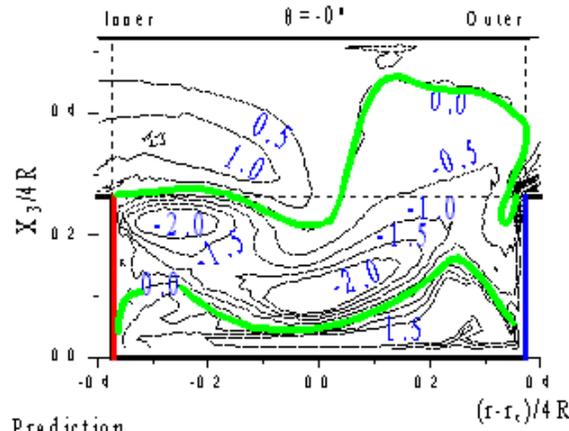
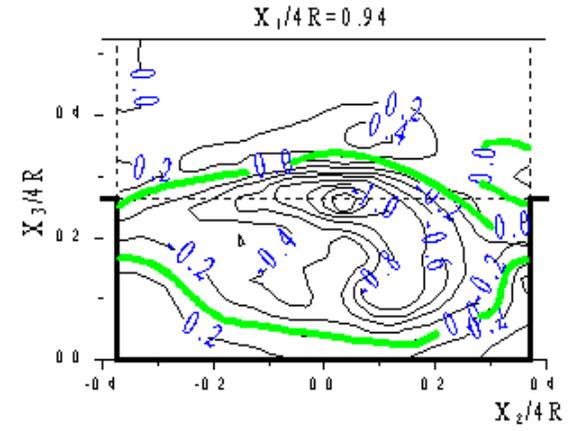
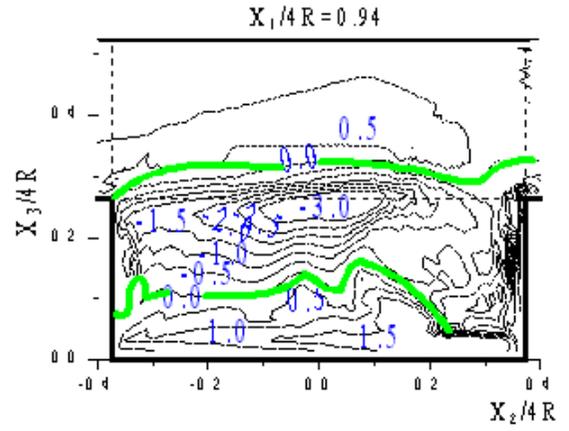
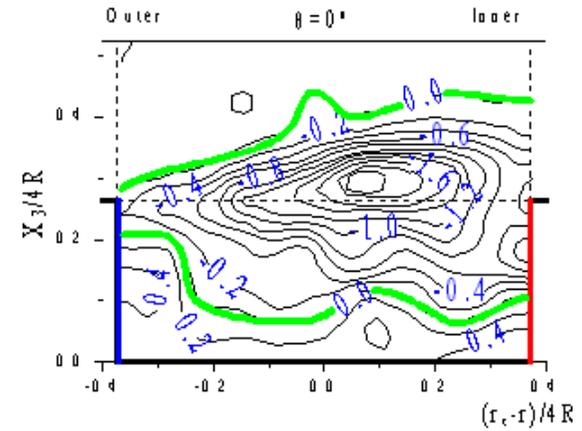
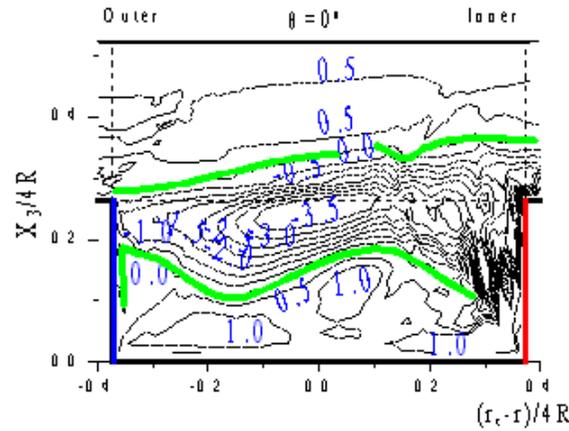
$$-\overline{u_\theta u_z} / \overline{U_*}^2$$

$$-\overline{u_\theta u_z} / \overline{U_*}^2$$

せん断応力 $\overline{u_\theta u_z}$ 等値線比較図



Flow ↑



Prediction

Exp. by Muto *et al.*

$$-\overline{u_\theta u_z} / \overline{U^2}$$

$$-\overline{u_\theta u_z} / \overline{U^2}$$

せん断応力 $\overline{u_\theta u_z}$ 等値線比較図

結 論

- ✓ 本解析手法は、低水路内の主流方向速度分布、及び高水敷を流れる主流方向速度分布の特徴的な分布を定性的、定量的に再現した。
- ✓ 二次流れ強度は低水路側壁の法線と高水敷側壁からの法線との交差角の大きい直線水路で最大値を示しその交差角に依存する。解析結果は複雑に変化する二次流れを比較的良好に予測した。
- ✓ せん断応力分布は、零ラインの発生により異符号領域が形成される点に特徴があり、計算結果もこうした特徴を再現した。
- ✓ 本解析手法は、複断面蛇行開水路の複雑乱流構造を解析することが可能であることを示した。