

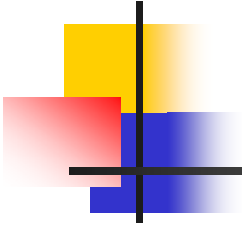
三次元屈曲管路内のはく離乱流数値解析

Numerical Analysis of Turbulent Separation Flow
in a Rectangular Duct with Sharp 180-Degree Turn

宇都宮大学大学院工学研究科 ○田中 達也

宇都宮大学大学院工学研究科 杉山 均

宇都宮大学大学院工学研究科 人見 大輔



緒言

管路内流れは伝熱効率, 吸入効率, ポンプ効率など機器性能に少なからぬ影響を及ぼす.

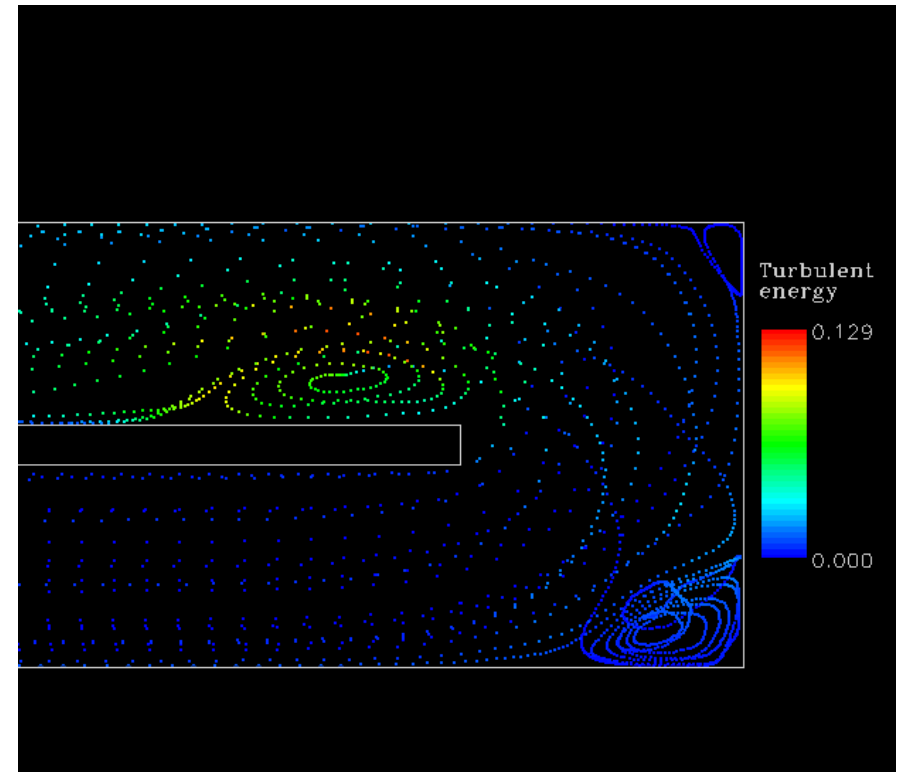
特にはく離現象は, 機器特性に直接的に影響する現象であり, はく離位置, 再付着位置, ならびにはく離流れの占める領域を事前に予測しておくことは, 装置設計の上から重要である.

しかし, はく離を伴う流れ場は, 強い三次元性を示し流れは複雑である. かつ流れが乱流となると, 乱流拡散による応力が作用し流れ場は, さらに複雑化し予測も困難となる.

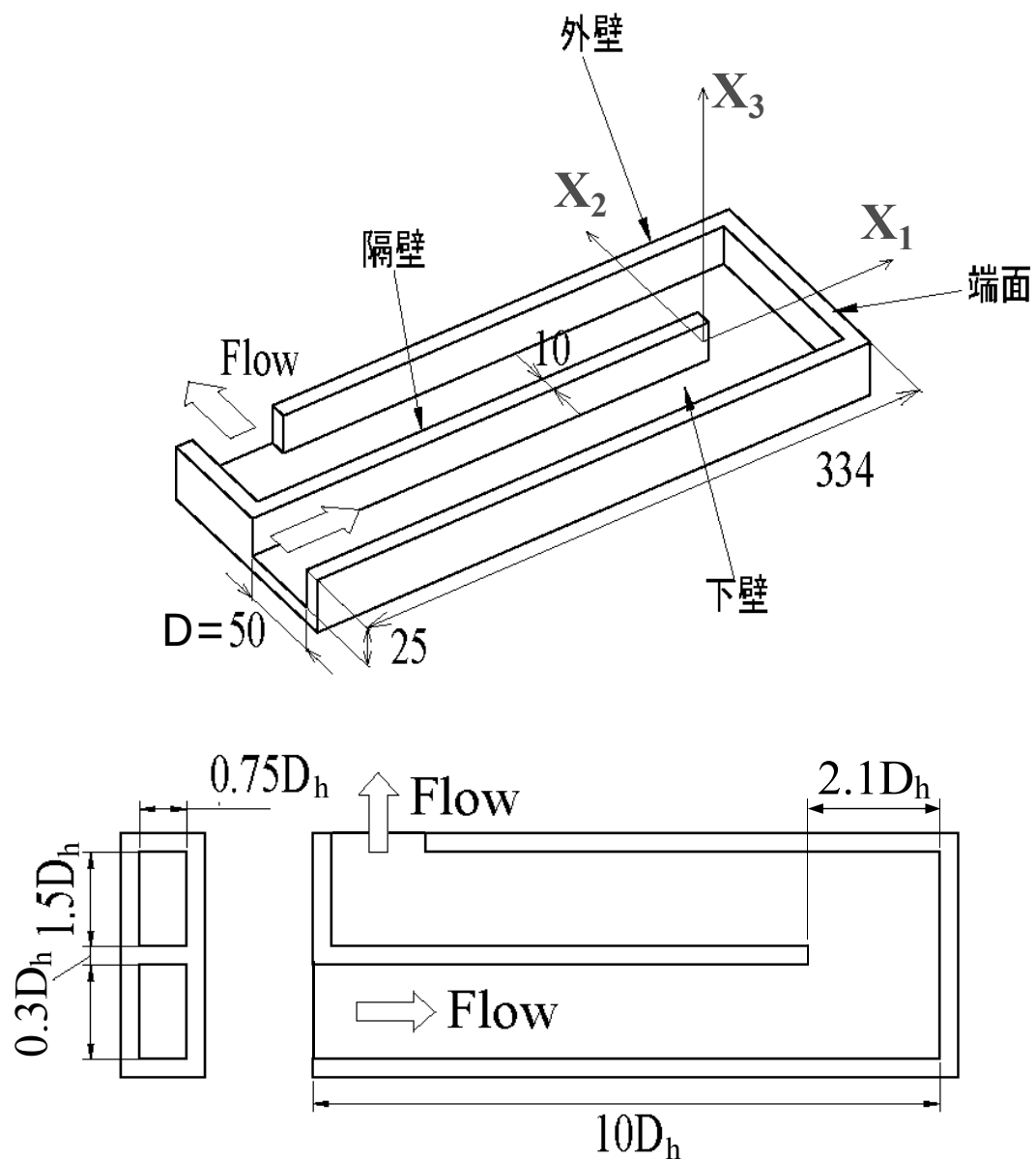
目的

本研究では、最近報告された中山らの屈曲管路内流れの実験を対象に、代数応力モデルを用い数値解析を行う。

特に屈曲部に生じる大規模はく離領域の再現が可能であるかどうか確認し、さらに速度場、応力場を実験結果と比較検討し本解析手法の妥当性を確認する。



実験装置概略図及び座標系



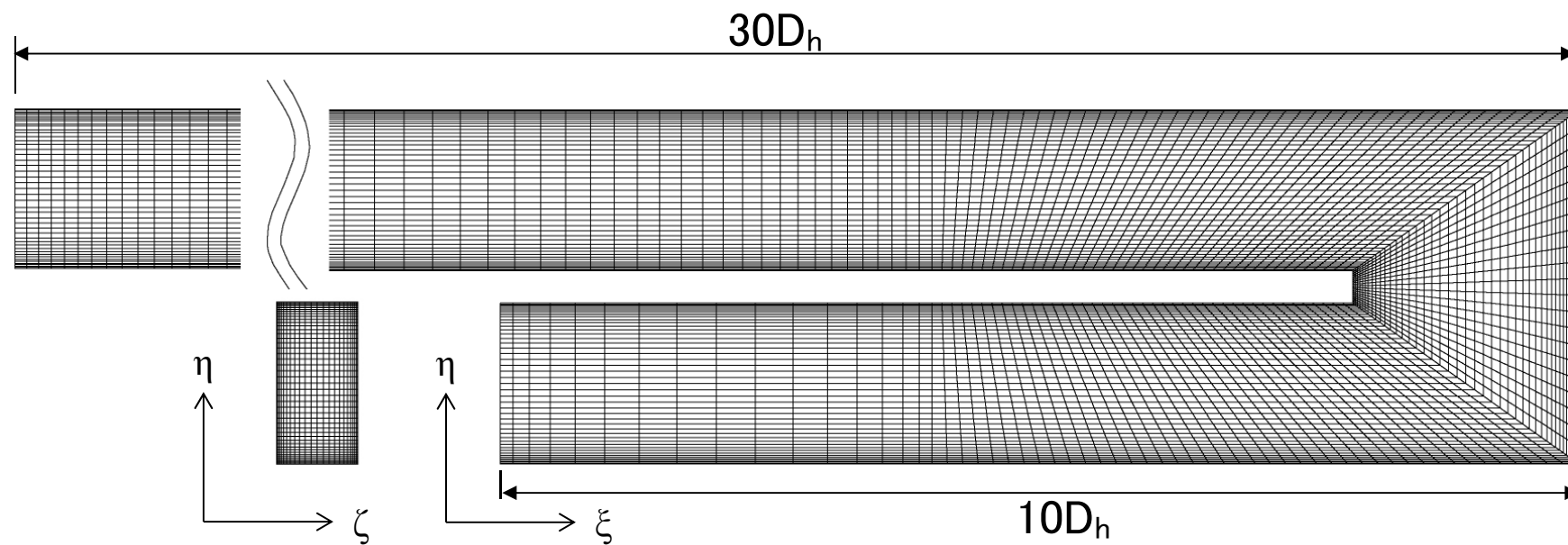
Unit : mm

$D = 50\text{mm}$

$D_h = 33.3\text{mm}$

$Re = 35000$

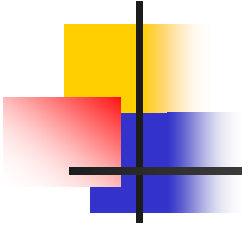
計算格子



$$\eta \times \zeta = 45 \times 23$$

$$\eta \times \xi = 23 \times 218$$

総格子点数: 225630点



基礎方程式

▶連続の式

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

▶運動方程式

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} U_i U_j = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right)$$

▶乱流エネルギー方程式

$$\frac{Dk}{Dt} = -\overline{u_i u_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\nu \delta_{jk} + c_k \frac{k}{\varepsilon} \overline{u_k u_j} \right) \frac{\partial k}{\partial x_k} \right\} - \varepsilon$$

▶乱流散逸方程式

$$\frac{D\varepsilon}{Dt} = -C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \overline{u_i u_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\nu \delta_{jk} + c_\varepsilon \frac{k}{\varepsilon} \overline{u_k u_j} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k} \right\} - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k}$$

基礎方程式(2)

▶ モデル化したレイノルズ応力輸送方程式

$$\overline{\frac{u_i u_j}{k}} (P_k - \varepsilon) = P_{ij} + [\pi_{ij} + \pi_{ji}]_1 + [\pi_{ij} + \pi_{ji}]_2 - \frac{2}{3} \delta_{ij} \varepsilon$$

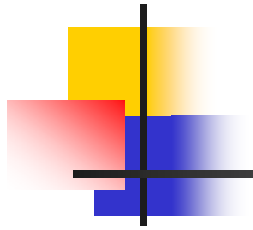
▶ モデル化された圧力・歪相関項及び定数系

$$[\pi_{ij} + \pi_{ji}]_1 = -C_1 \frac{\varepsilon}{k} \left(\overline{u_i u_j} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \right) \quad [\pi_{ij} + \pi_{ji}]_2 = -\frac{C_2 + 8}{11} \left(P_{ij} - \frac{2}{3} P_k \delta_{ij} \right) + \zeta k \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{8C_2 - 2}{11} \left(D_{ij} - \frac{2}{3} P_k \delta_{ij} \right)$$

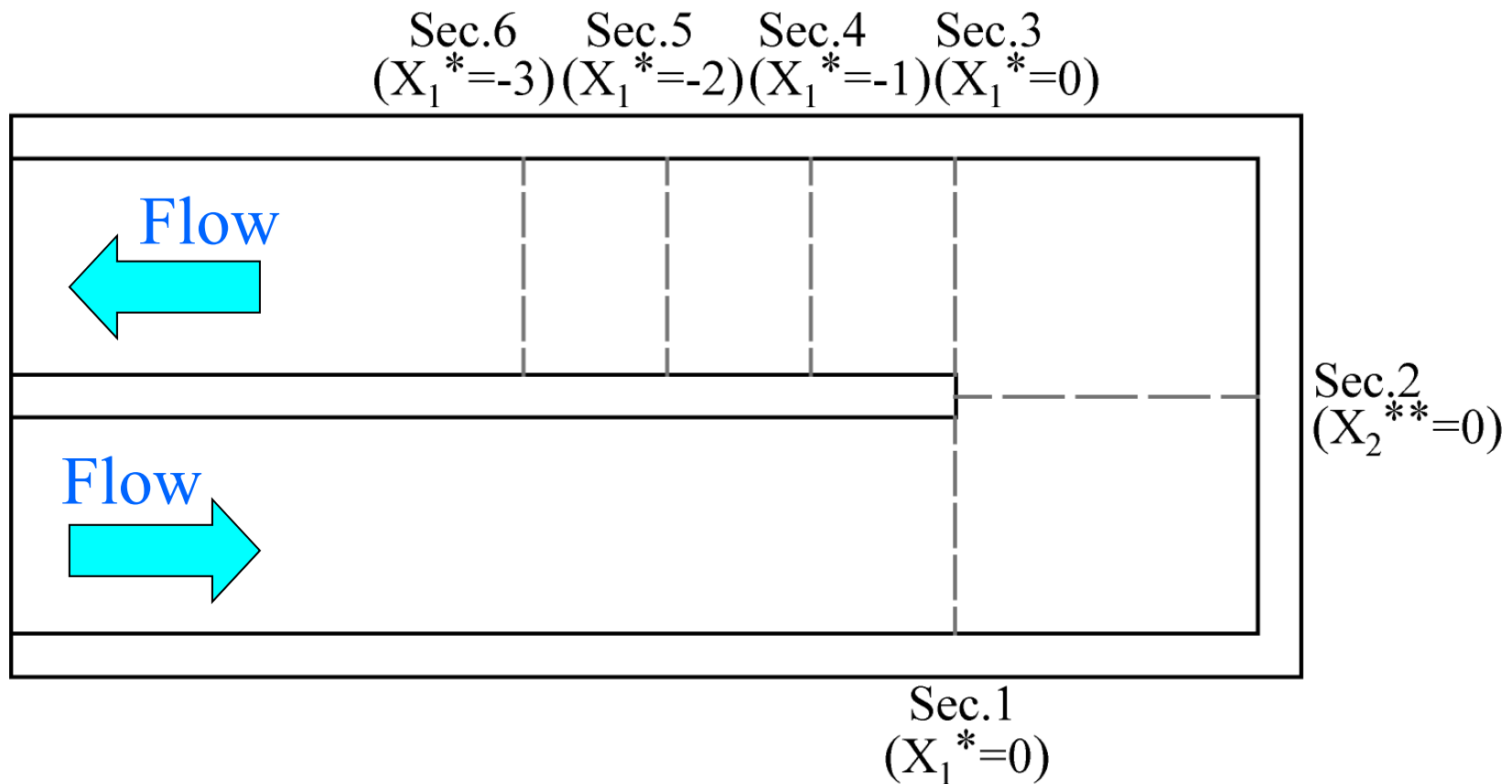
$$C_1 = C_1^* + C_1' f \left(\frac{L}{X_w} \right) \quad C_2 = C_2^* + C_2' f \left(\frac{L}{X_w} \right) \quad \zeta = \zeta^* + \zeta' f \left(\frac{L}{X_w} \right)$$

$$P_{ij} = -\overline{u_i u_k} \frac{\partial U_j}{\partial x_k} - \overline{u_j u_k} \frac{\partial U_i}{\partial x_k} \quad D_{ij} = -\overline{u_i u_k} \frac{\partial U_k}{\partial x_j} - \overline{u_j u_k} \frac{\partial U_k}{\partial x_i} \quad P_k = -\overline{u_k u_l} \frac{\partial U_k}{\partial x_l} \quad f \left(\frac{L}{X_w} \right) = \frac{C_\mu^{\frac{3}{4}} k^{\frac{3}{2}}}{\kappa \varepsilon} \frac{1}{X_w}$$

C_1^*	C_2^*	ζ^*	C_1'	C_2'	ζ'	C_μ	κ
1.4	0.44	-0.16	-0.35	0.12	-0.1	0.09	0.42

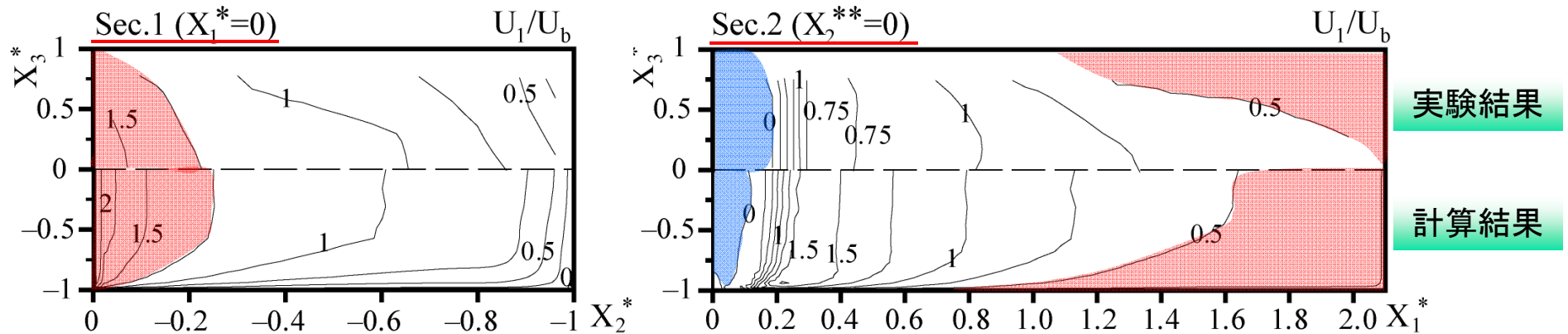


比較断面位置

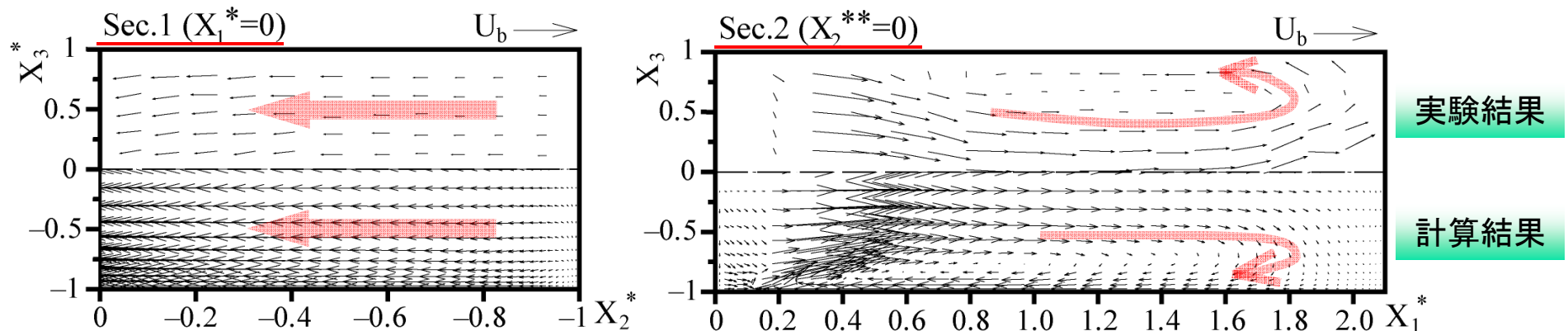


断面内の速度場(Sec.1,Sec.2)

主流方向速度等値線図

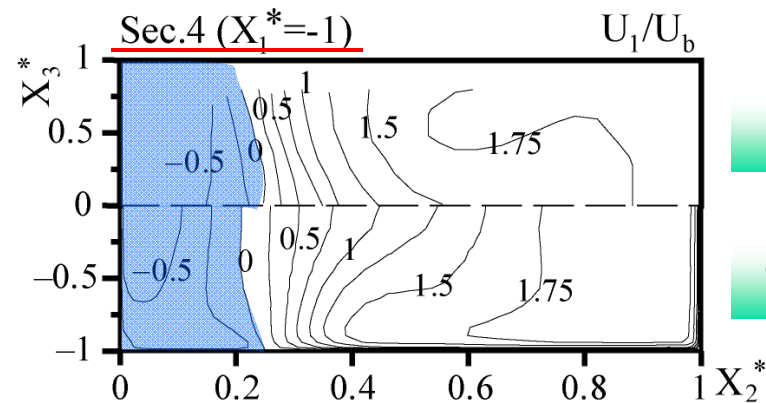
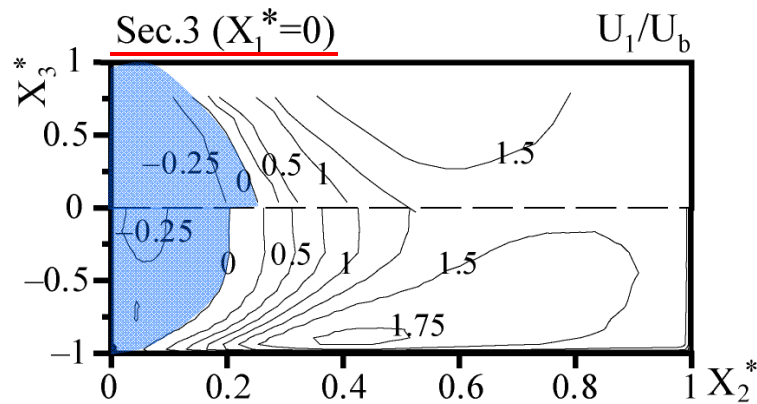


二次流れベクトル線図



断面内の速度場(Sec.3,Sec.4)

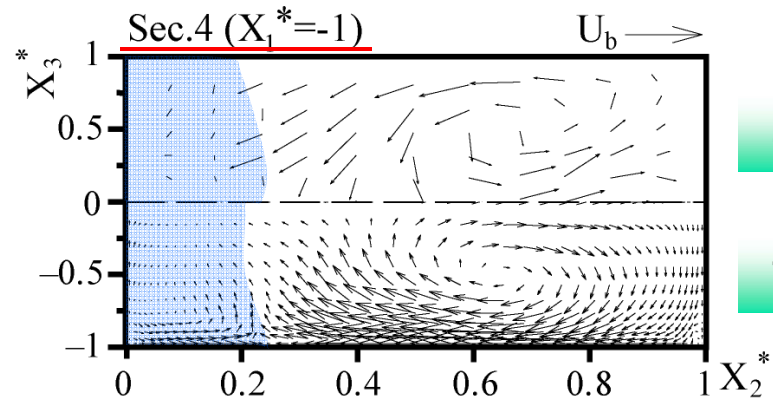
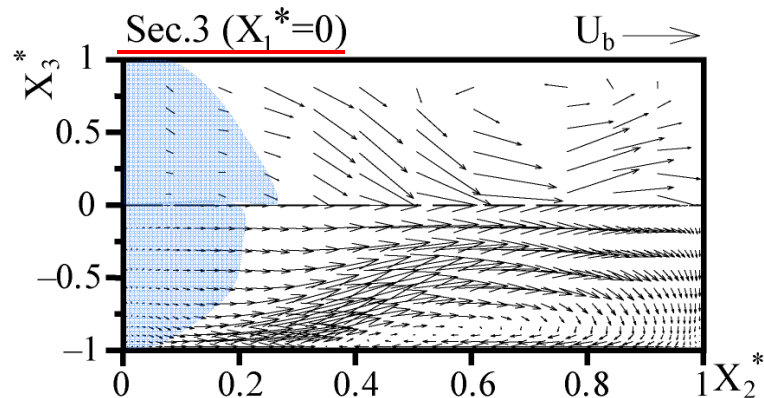
主流方向速度等値線図



実験結果

計算結果

二次流れベクトル線図

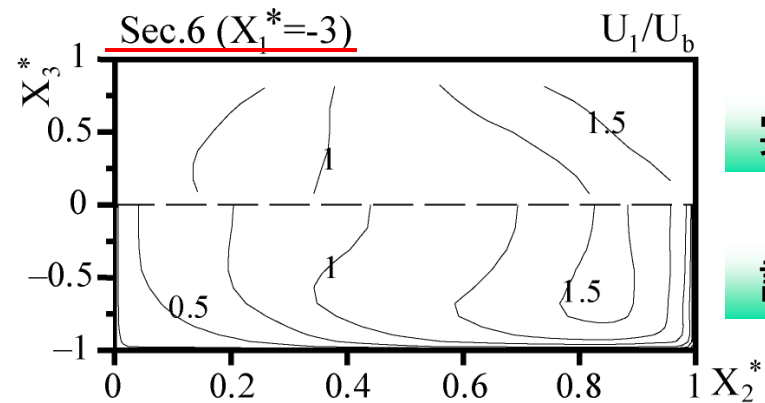
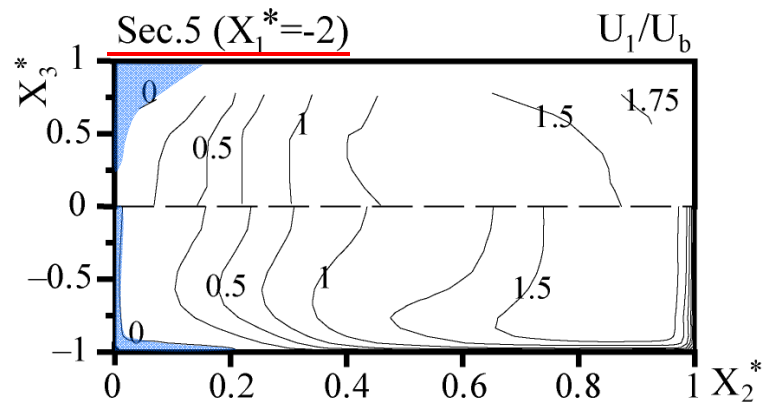


実験結果

計算結果

断面内の速度場(Sec.5,Sec.6)

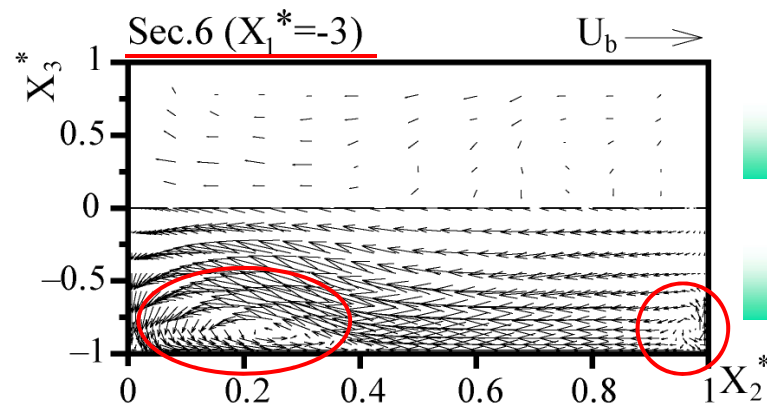
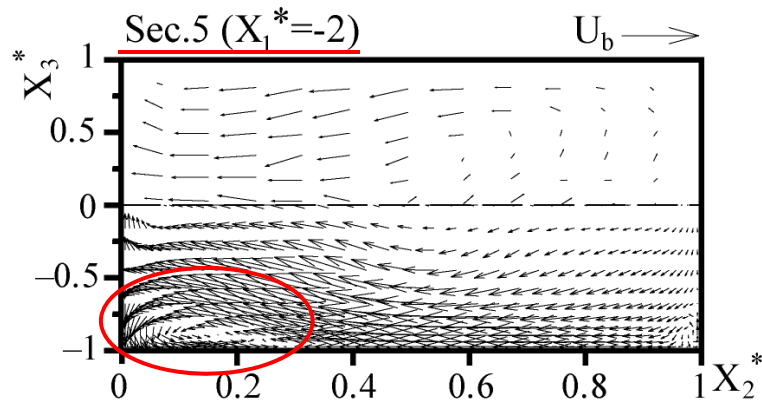
主流方向速度等値線図



実験結果

計算結果

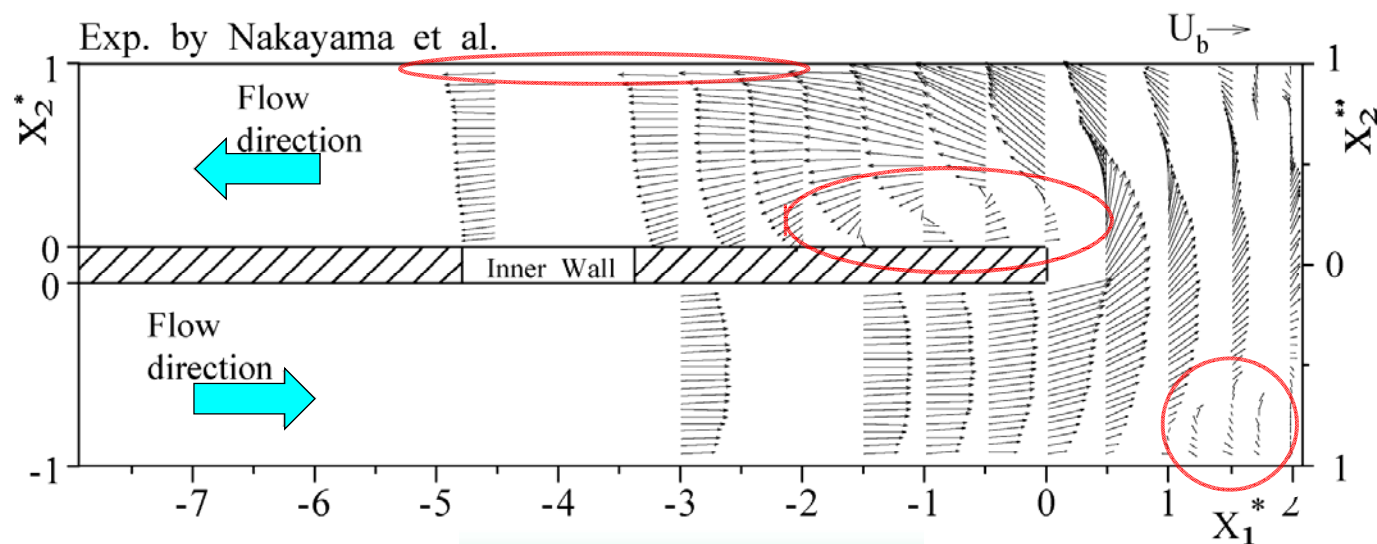
二次流れベクトル線図



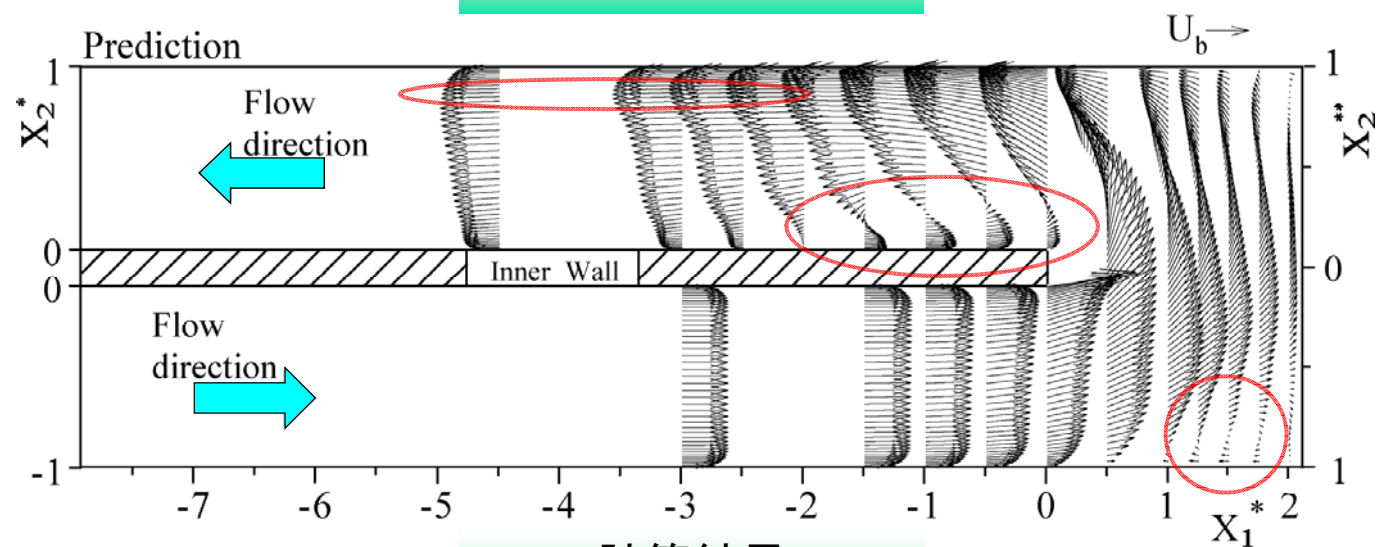
実験結果

計算結果

速度ベクトル線図

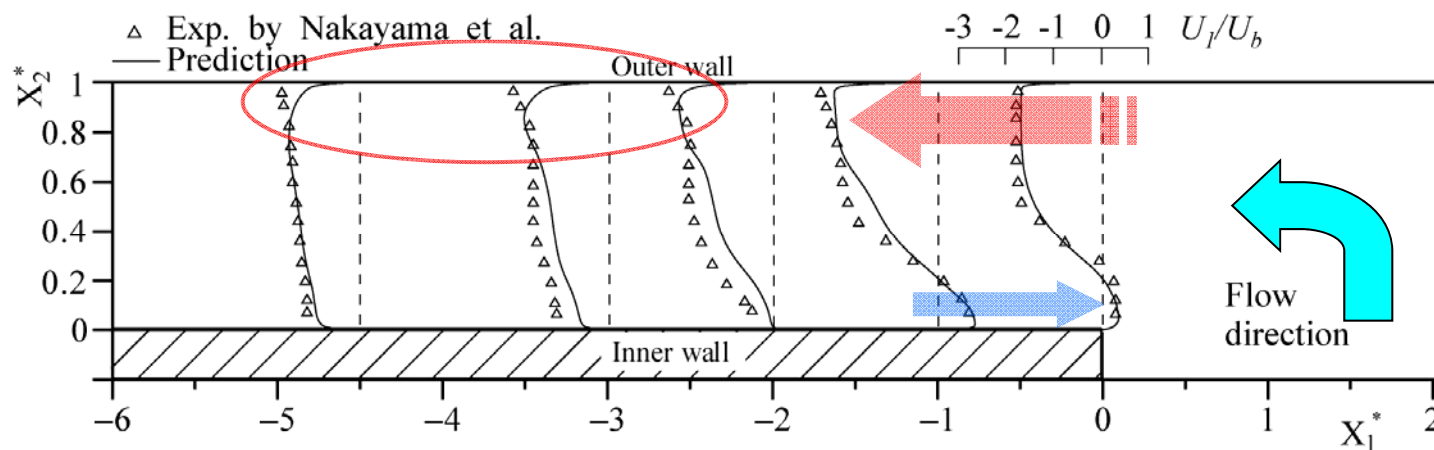


実験結果

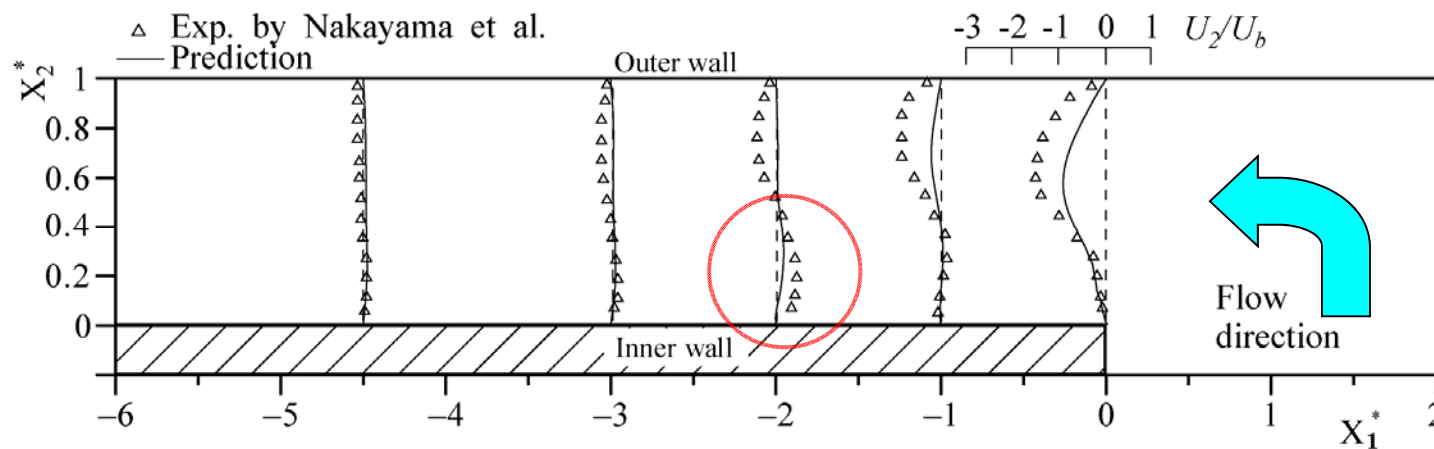


計算結果

ターン下流の速度分布

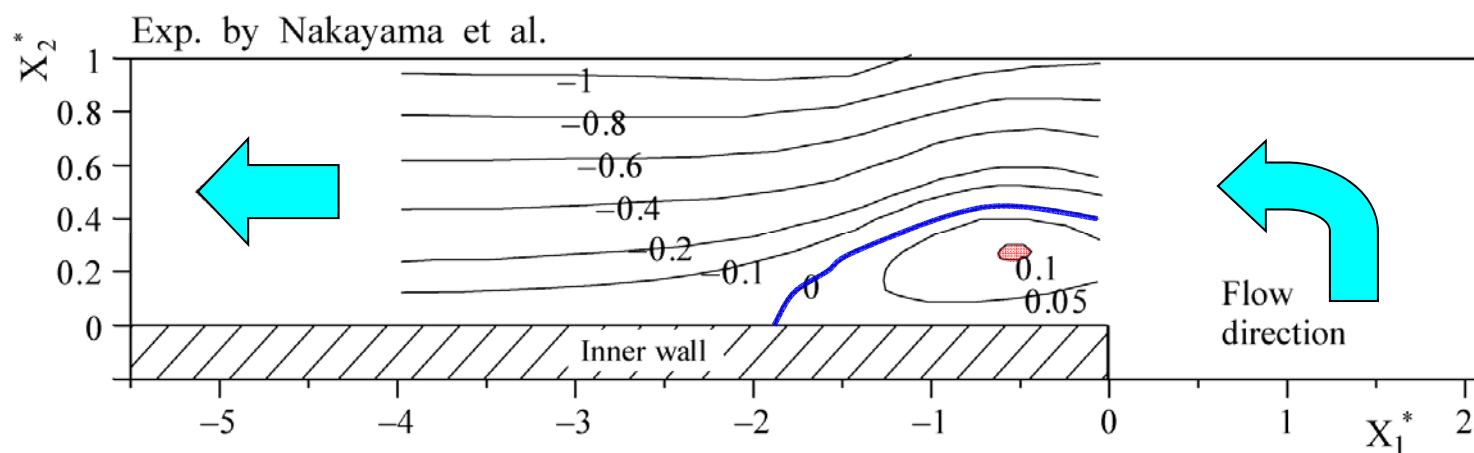


主流方向速度分布

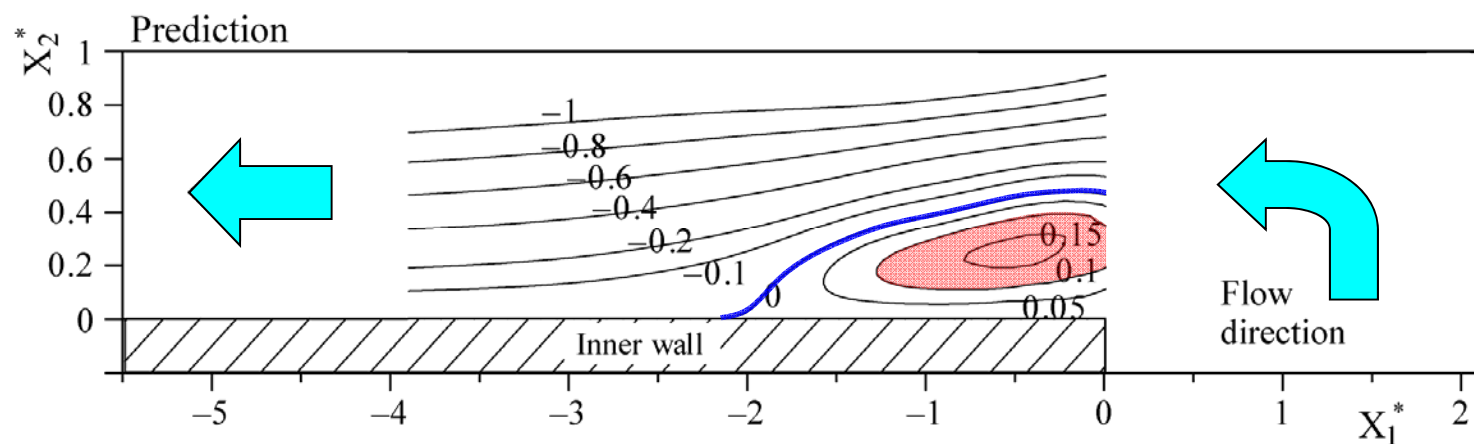


X_2 方向速度分布

流れ関数等値線図



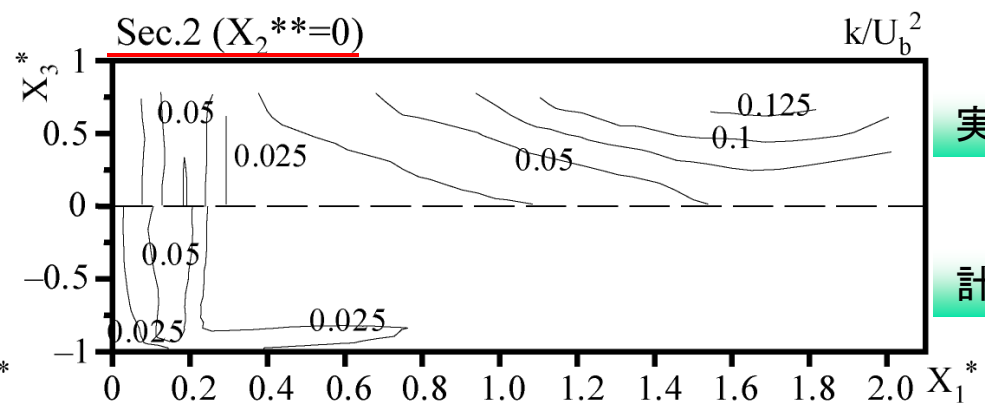
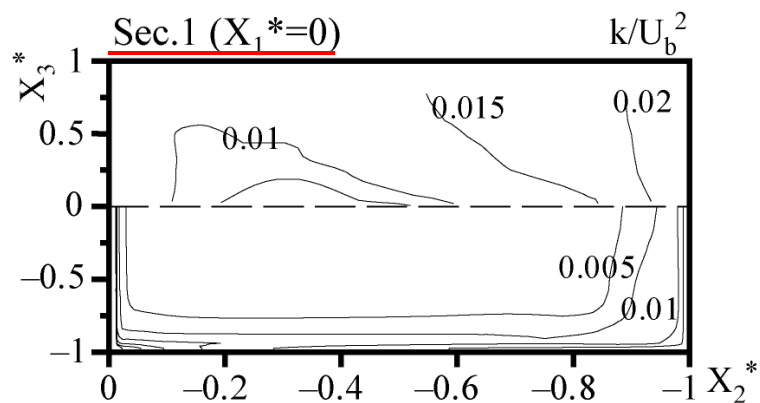
実験結果



計算結果

レイノルズ応力(Sec.1,Sec.2)

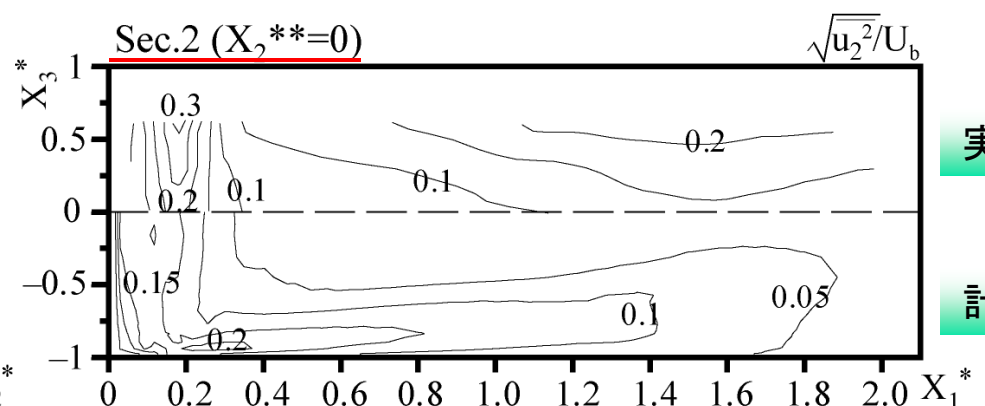
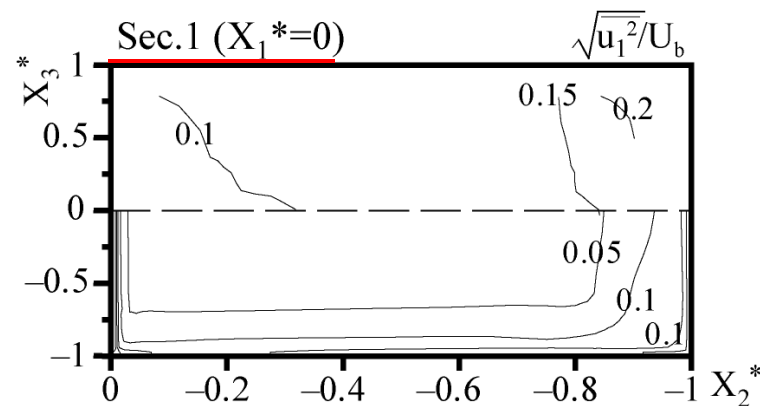
乱流エネルギー等値線図



実験結果

計算結果

主流方向変動速度強度等値線図

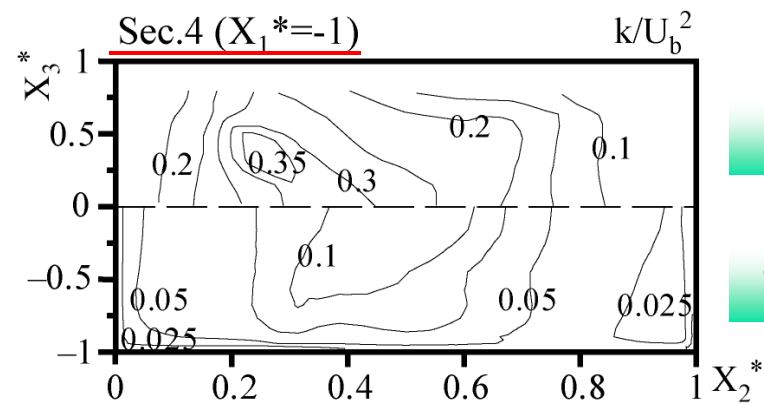
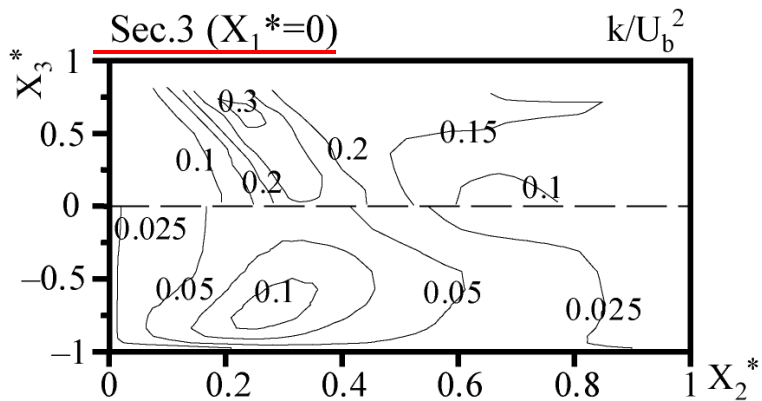


実験結果

計算結果

レイノルズ応力 (Sec.3, Sec.4)

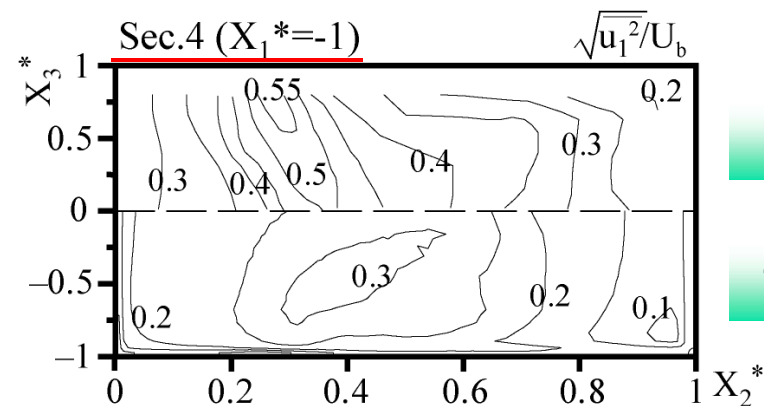
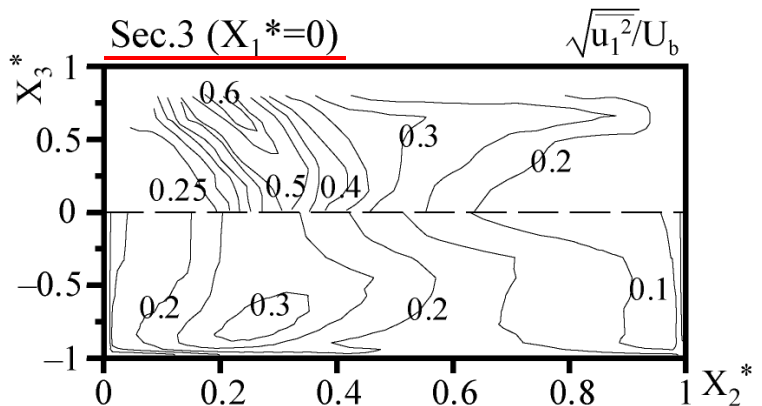
乱流エネルギー等値線図



実験結果

計算結果

主流方向変動速度強度等値線図

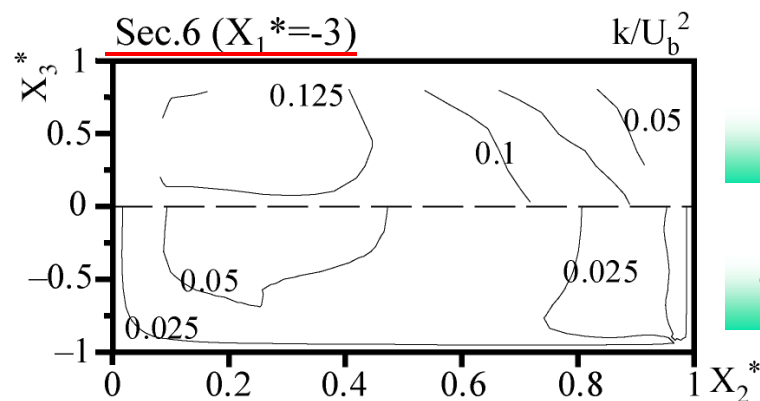
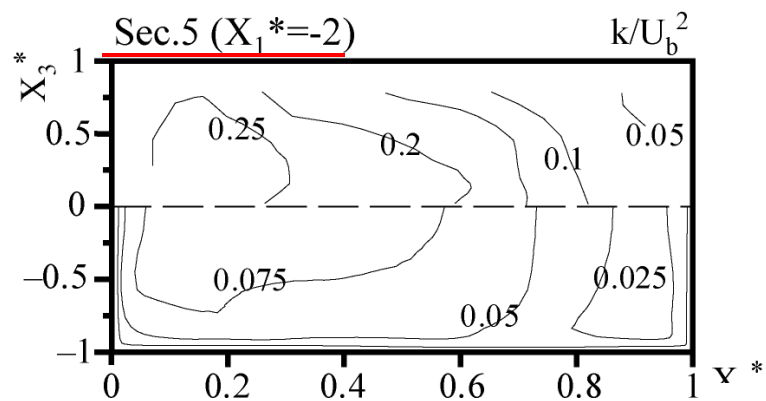


実験結果

計算結果

レイノルズ応力 (Sec.5, Sec.6)

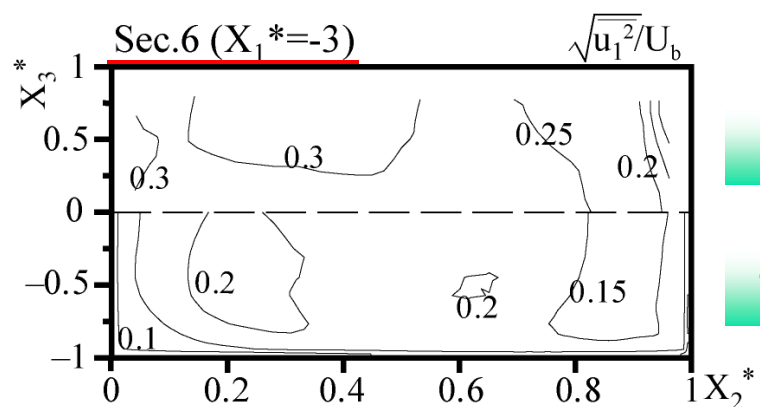
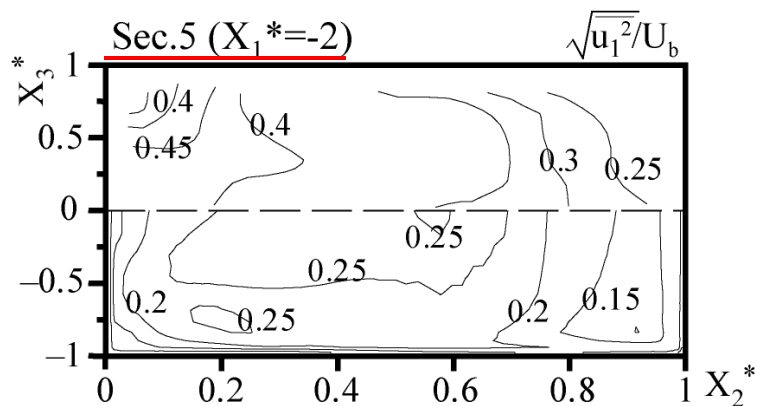
乱流エネルギー等値線図



実験結果

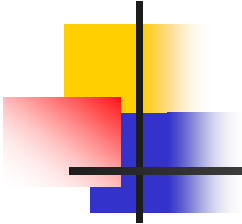
計算結果

主流方向変動速度強度等値線図



実験結果

計算結果



結論

- ・本解析手法は、主流方向速度分布を比較的良好に予測する。断面内での等値線分布を比較すると、零等値線が存在するが、この生成位置も良好に再現している。
- ・本解析手法は、はく離を伴う複雑な二次流れを再現した。ただし、はく離・再付着点近傍、その下流位置において計算では短辺壁近傍に実験では認められない循環流を予測している。
- ・はく離・再付着点位置予測に関して、流れ関数値にて比較すると、本解析手法は、はく離再付着点位置を再現した。しかし、はく離内部領域を定量的に予測するには至らない。
- ・実験値と異なる点もあるが、矩形断面を有する屈曲管路内の複雑乱流を代数応力モデルにて予測可能であることを示した。