



周期配列突起を有する 直線管路内の乱流解析

宇都宮大学大学院工学研究科

○岡垣 百合亜・杉山 均・加藤 直人

日本原子力研究開発機構

日野 竜太郎・寺田 敦彦

諸言

研究の流れ

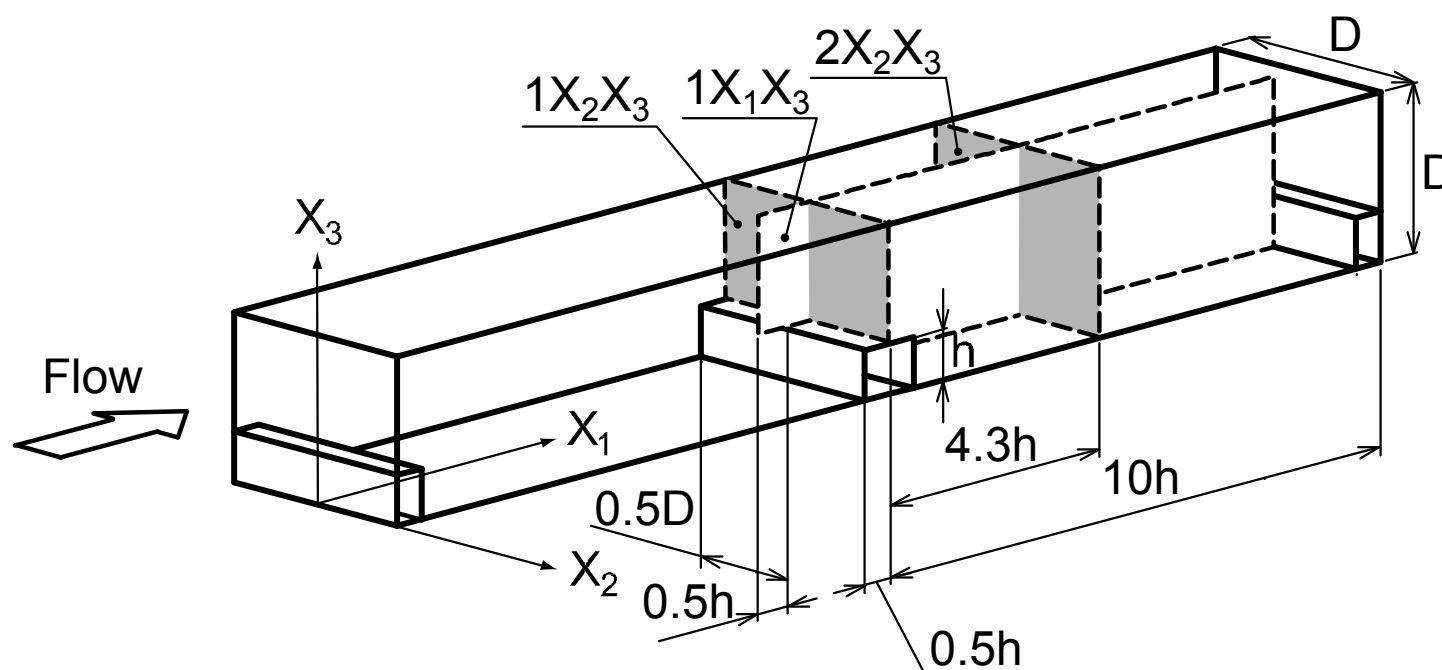
Casaraらの実験結果を採用
(3D乱流場でのレイノルズ応力について詳細に報告)



実験と計算の比較

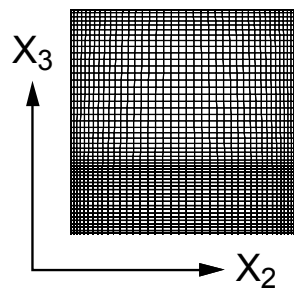
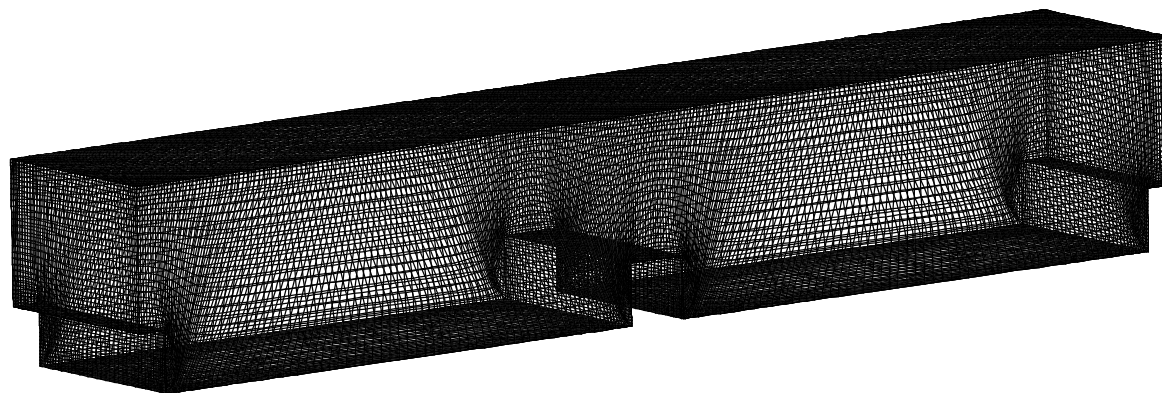
- 乱流構造を明確化
- 代数レイノルズ応力モデルの精度の検証

実験装置概略図および座標系

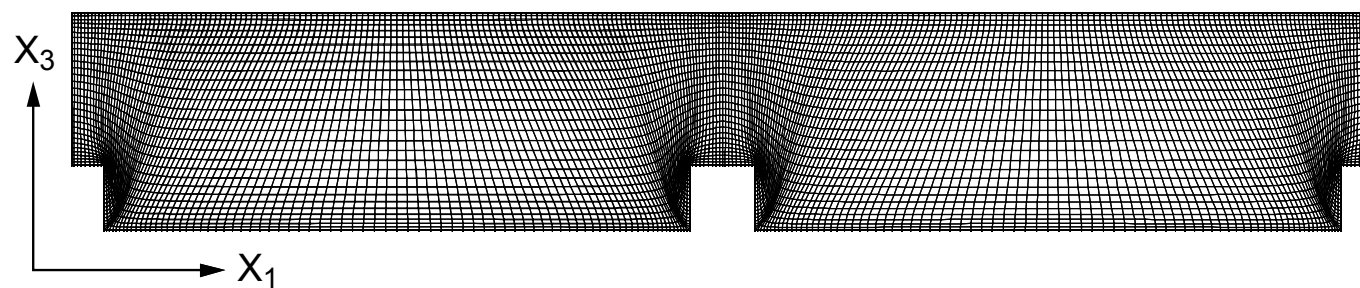


- 管路一辺長 $D=100\text{mm}$
- リブ高さ・幅 $h=30\text{mm}$
- レイノルズ数 $Re=4.0\times 10^4$

計算格子



X_2 - X_3 Plane



X_1 - X_3 Plane

- 計算格子数 $40 \times 30 \times 273$
- 総格子点数 327,600

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

$$\frac{Dk}{Dt} = -\overline{u_i u_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\nu \delta_{jk} + c_k \frac{k}{\varepsilon} \overline{u_k u_j} \right) \frac{\partial k}{\partial x_k} \right\} - \varepsilon \quad \text{レイノルズ応力}$$

エネルギー方程式

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (T U_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha \frac{\partial T}{\partial x_i} - \overline{u_i T'} \right) \quad \text{乱流熱流束}$$

乱流散逸方程式

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

代数レイノルズ応力モデル

モデル化されたレイノルズ応力輸送方程式

$$\underbrace{\frac{D\overline{u_i u_j}}{Dt}}_{\text{対流項}} - \underbrace{Diff_k}_{\text{拡散項}} = \underbrace{\frac{\overline{u_i u_j}}{k} (P_k - \varepsilon)}_{\text{乱流エネルギー輸送方程式の生成項}} = \underbrace{P_{ij}}_{\text{乱流エネルギー輸送方程式の生成項}} + \underbrace{[\pi_{ij} + \pi_{ji}]_1}_{\text{レイノルズ応力方程式の生成項}} + \underbrace{[\pi_{ij} + \pi_{ji}]_2}_{\text{レイノルズ応力方程式の生成項}} - \underbrace{\frac{2}{3} \delta_{ij} \varepsilon}_{\text{散逸項}}$$

↓
↓
圧力・ひずみ相関項

乱流エネルギー輸送方程式の生成項 レイノルズ応力方程式の生成項

モデル化された圧力・歪相関項及び定数系

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

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

$$P_{ij} = -\overline{u_i u_k} \frac{\partial U_j}{\partial x_k} - \overline{u_j u_k} \frac{\partial U_i}{\partial x_k} \quad D_{ij} = -\overline{u_i u_k} \frac{\partial U_k}{\partial x_j} - \overline{u_j u_k} \frac{\partial U_k}{\partial x_i} \quad P_k = -\overline{u_k u_l} \frac{\partial U_k}{\partial x_l}$$

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

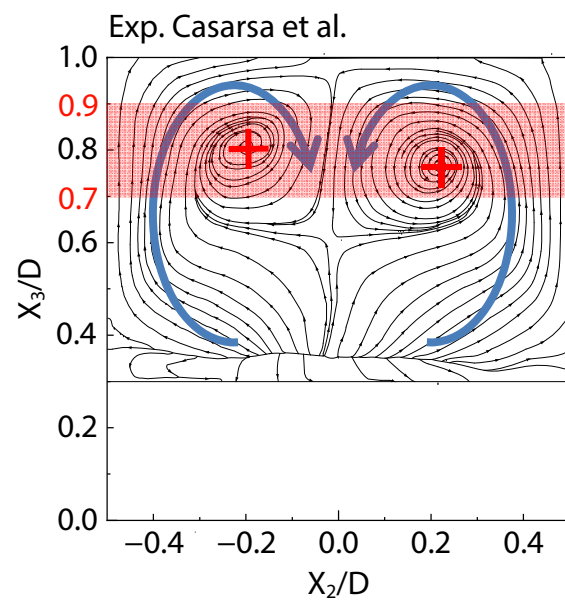
数値解析

数値解析条件

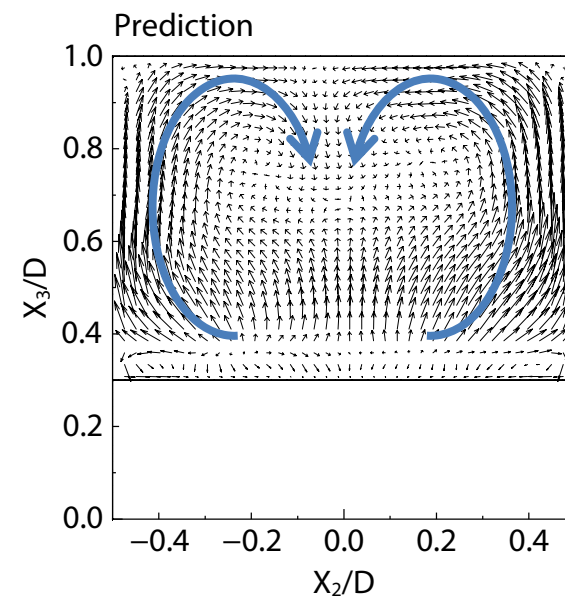
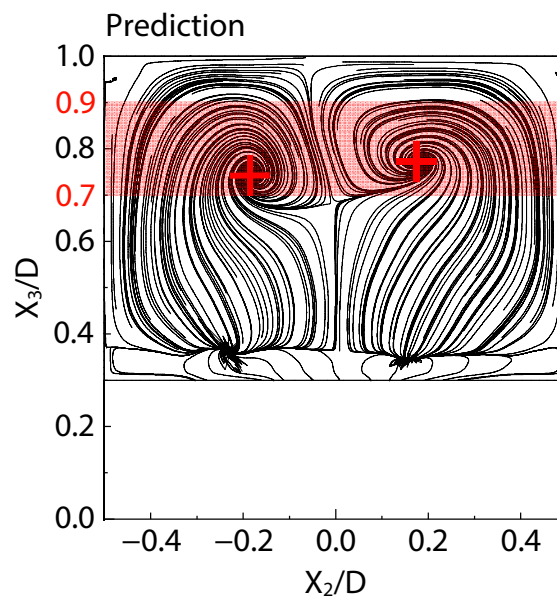
数値計算	差分法
支配方程式差分近似	QUICK法（対流項のみ）
境界条件	周期境界条件 →圧力以外は入口・出口での値を同一 →圧力は入口・出口の勾配値を同一
乱流モデル	高レイノルズ数型乱流モデル 壁関数
格子点配置	Regular Grid法
座標変換手法	境界適合座標系

$1X_2X_3$ 流体挙動

○実験結果



○計算結果

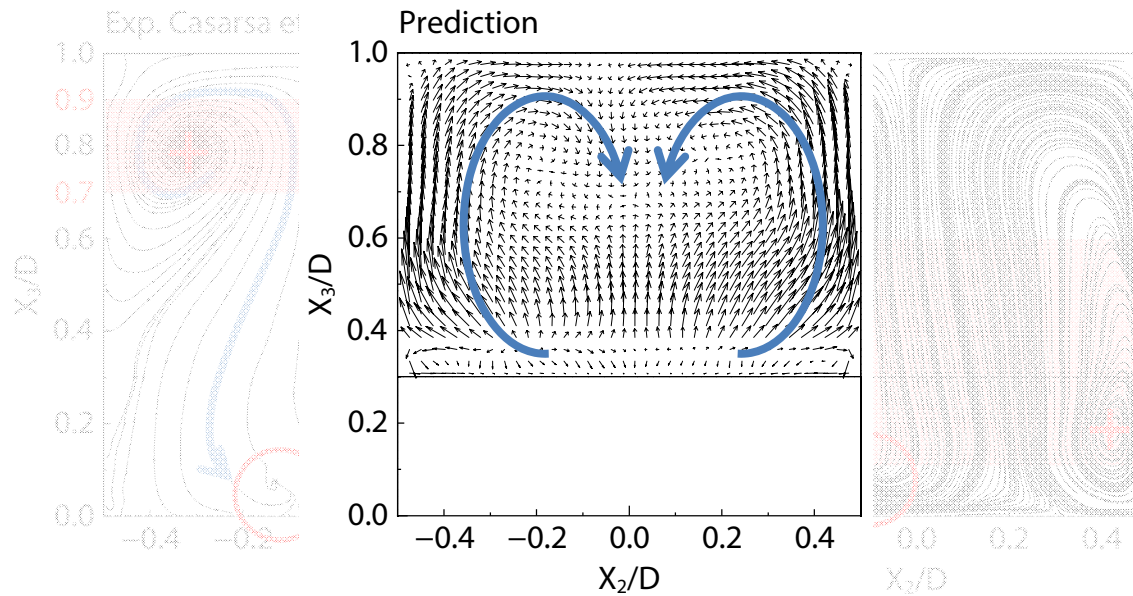


流跡線 (流線)

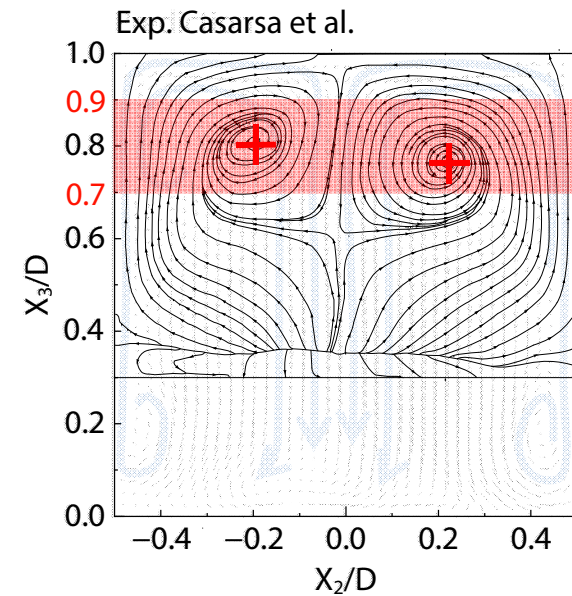
二次流れベクトル図

2X₂X₃流体挙動

○実験結果 ○1X₂X₃ 計算結果 計算結果



○1X₂X₃ 実験結果



流跡線 (流線)

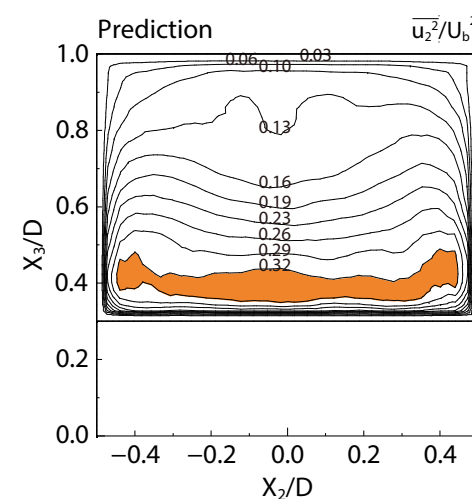
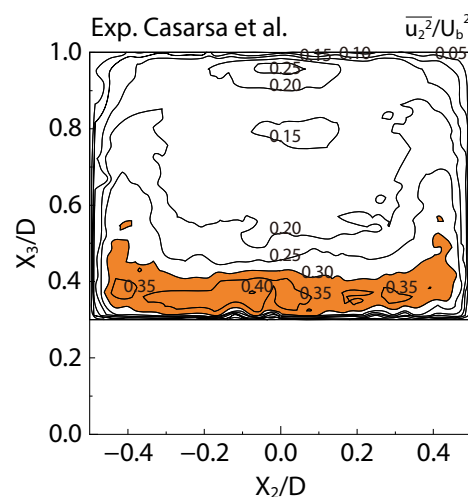
二次流れベクトル図

$1X_2X_3$ 垂直応力分布

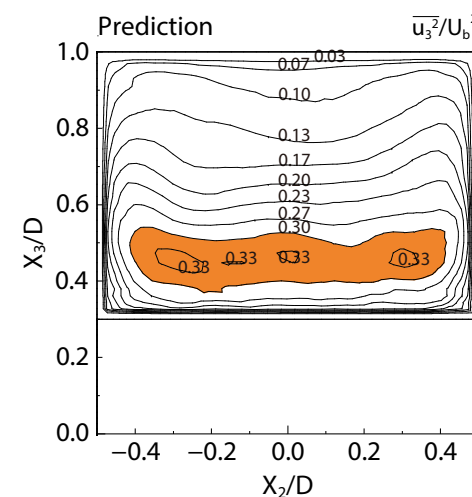
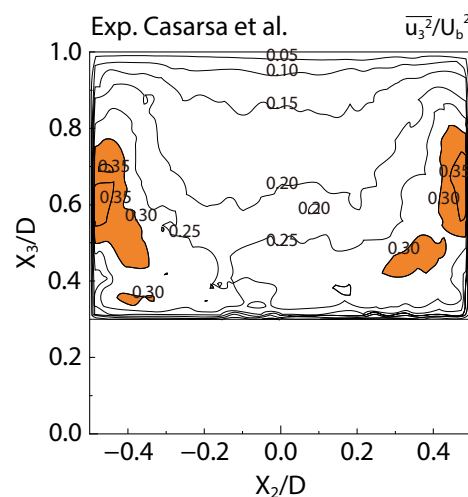
○実験結果

○計算結果

水平方向



垂直方向

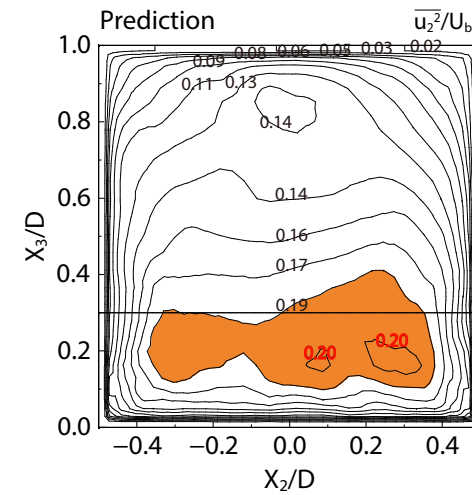
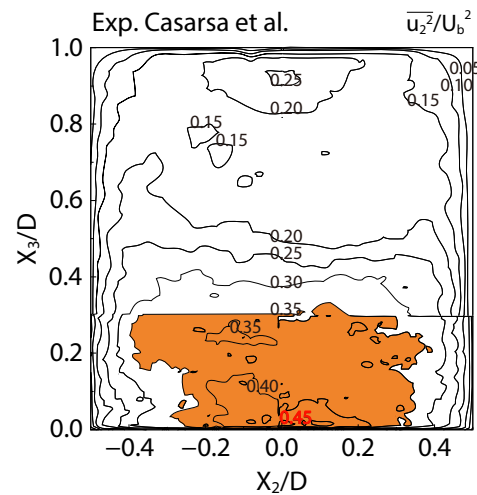


$2X_2X_3$ 垂直応力分布

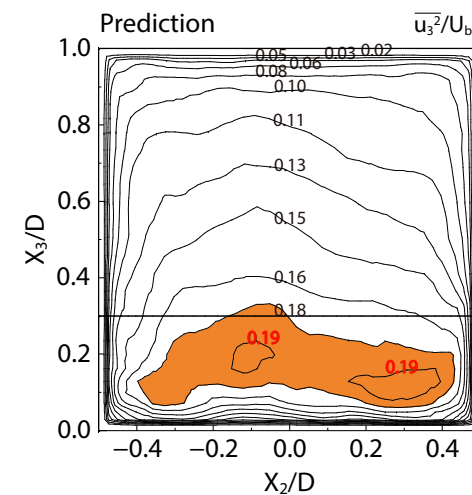
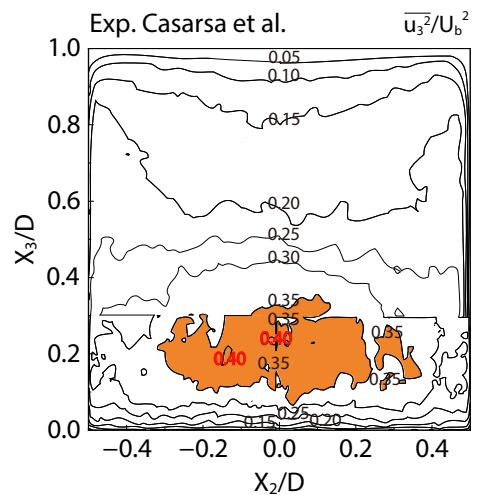
○実験結果

○計算結果

水平方向

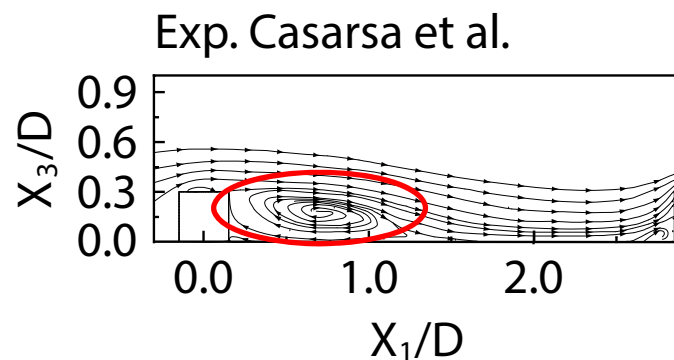


垂直方向

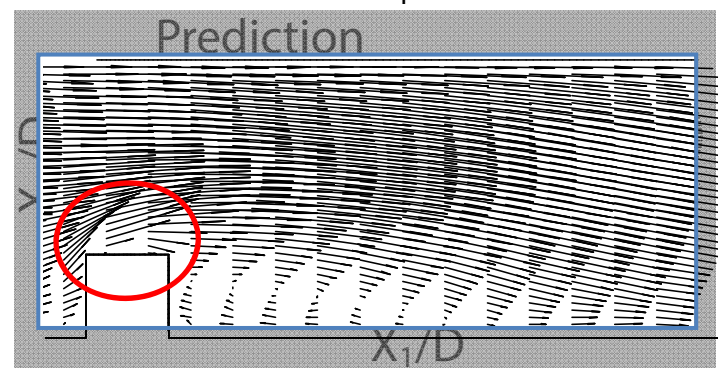
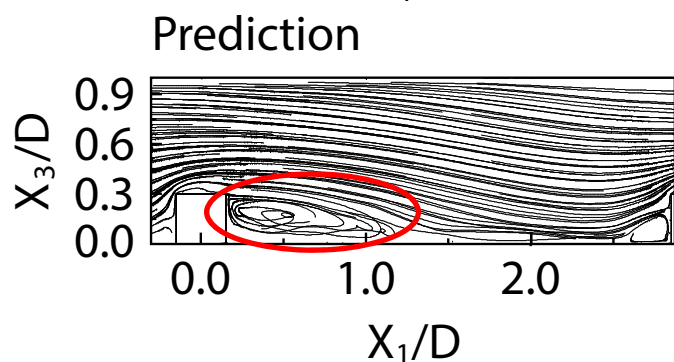


$1X_1X_3$ 断面流体挙動

○実験結果



○計算結果



流跡線
(流線)

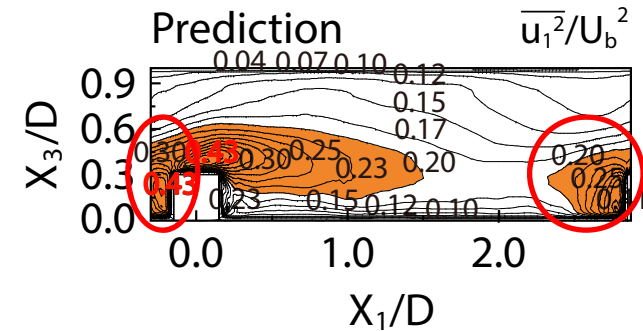
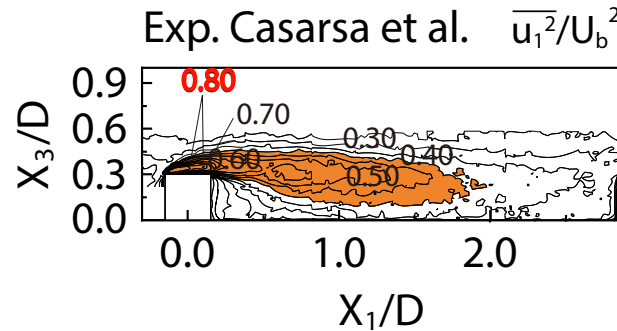
二次流れ
ベクトル図

1X₁X₃断面レイノルズ応力分布

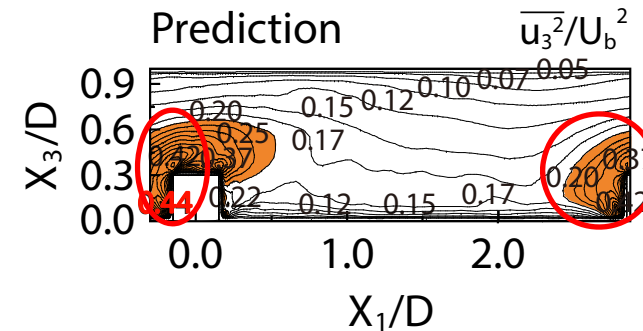
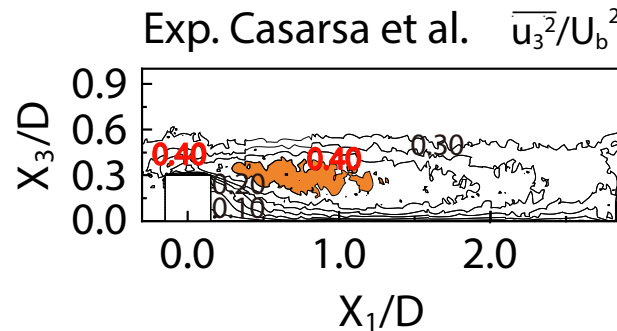
○実験結果

○計算結果

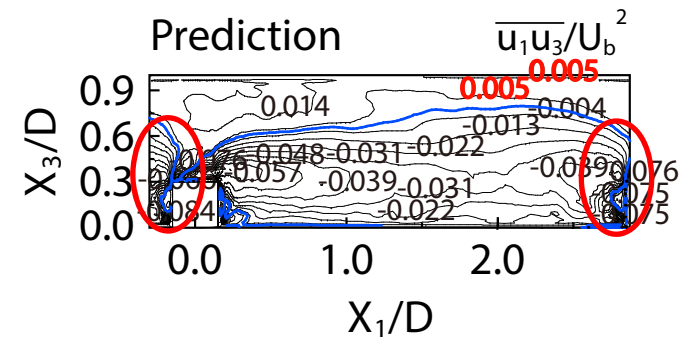
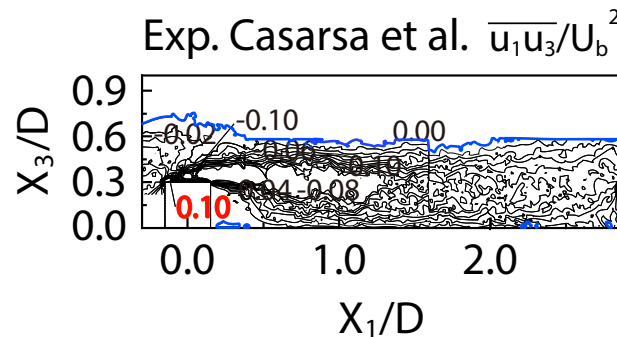
主流方向



垂直方向



主流-垂直
方向



結論

代数レイノルズ応力モデルを用いた周期配列突起付き直線管路の乱流解析を行い, CasarsaらのPIV計測実験結果と比較検討した

● 乱流構造

流体拳動

水平方向のリブ上・主流方向では剥離・再付着点、流体拳動共にほぼ一致



● モデル精度の検証

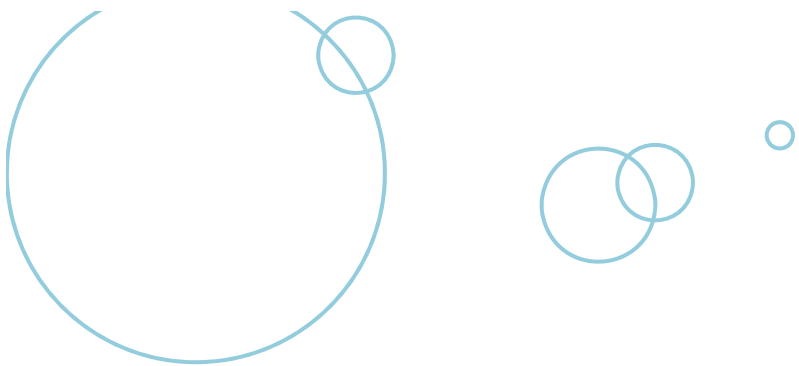
代数レイノルズ応力モデルでは高さのあるリブを有する3次元乱流場の解析も可能である

レイノルズ応力

値や分布に差が見られたが、計算結果からは物理現象の再現性を確認出来た



PIV解析の不確実性、代数レイノルズ応力モデルの精度向上



ご清聴ありがとうございました

