

45度傾斜リブを有する直線管路内の 乱流構造解析

Numerical Analysis of Turbulent Flow in a
square Duct with 45 Degree Ribs

宇都宮大学大学院

○ 岡垣 百合亜

杉山 均

加藤 直人

緒言

乱流生成による熱移動促進

本研究の目的

管路壁に突起形状のリブを周期配列する
代数レイノルズ応力モデルを用いて解析
圧力分布の変化、乱流生成の活性化

B. 傾斜配列リブではより複雑な流れを形成する
計算結果・実験結果との比較

解析

代数乱流場の予測は乱流モデルの妥当性を検討

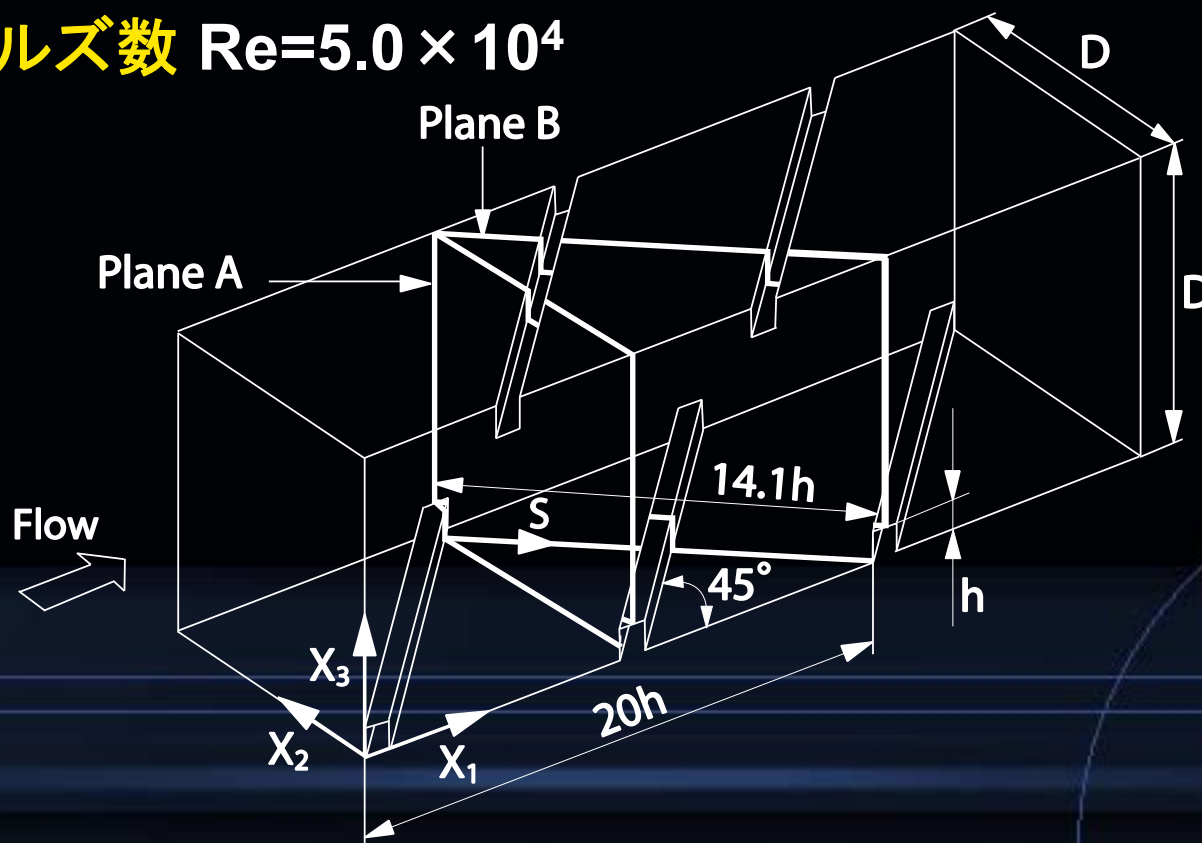
乱流モデル検証

実験装置概略図及び座標系

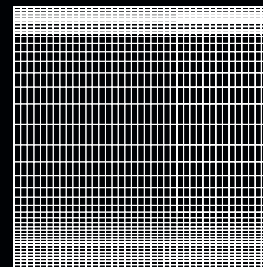
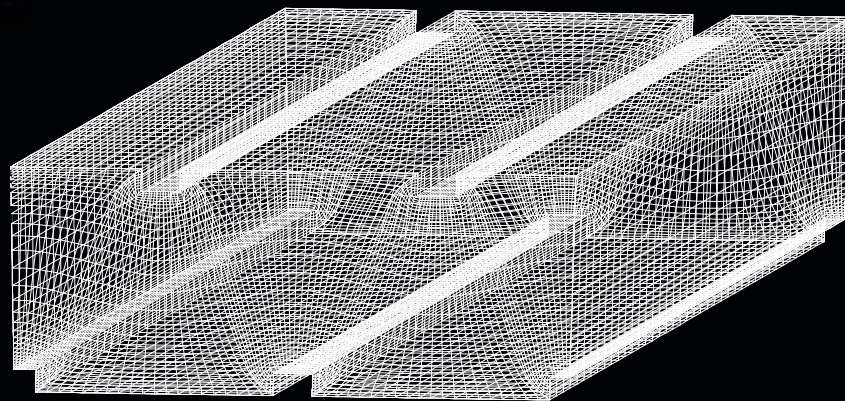
管路一辺長 $D=100\text{mm}$

リブ高さ $h=10\text{mm}$

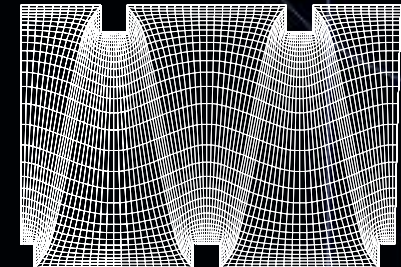
レイノルズ数 $Re=5.0 \times 10^4$



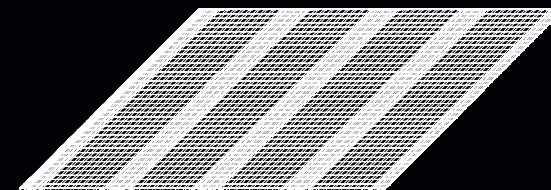
計算格子



X_2 - X_3 Plane



X_1 - X_3 Plane



X_1 - X_2 Plane

計算格子数 $41 \times 31 \times 102$

総格子点数 129642

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

レイノルズ応力

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

乱流散逸方程式

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

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

$$\underbrace{\frac{Du_i u_j}{Dt}}_{\text{対流項}} - \underbrace{Diff_k}_{\text{拡散項}} = \underbrace{\frac{u_i u_j}{k} (P_k - \varepsilon)}_{\text{乱流エネルギー輸送方程式の生成項}} = \underbrace{P_{ij} + [\pi_{ij} + \pi_{ji}]_1 + [\pi_{ij} + \pi_{ji}]_2}_{\text{圧力・ひずみ相関項}} - \underbrace{\frac{2}{3} \delta_{ij} \varepsilon}_{\text{散逸項}}$$

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

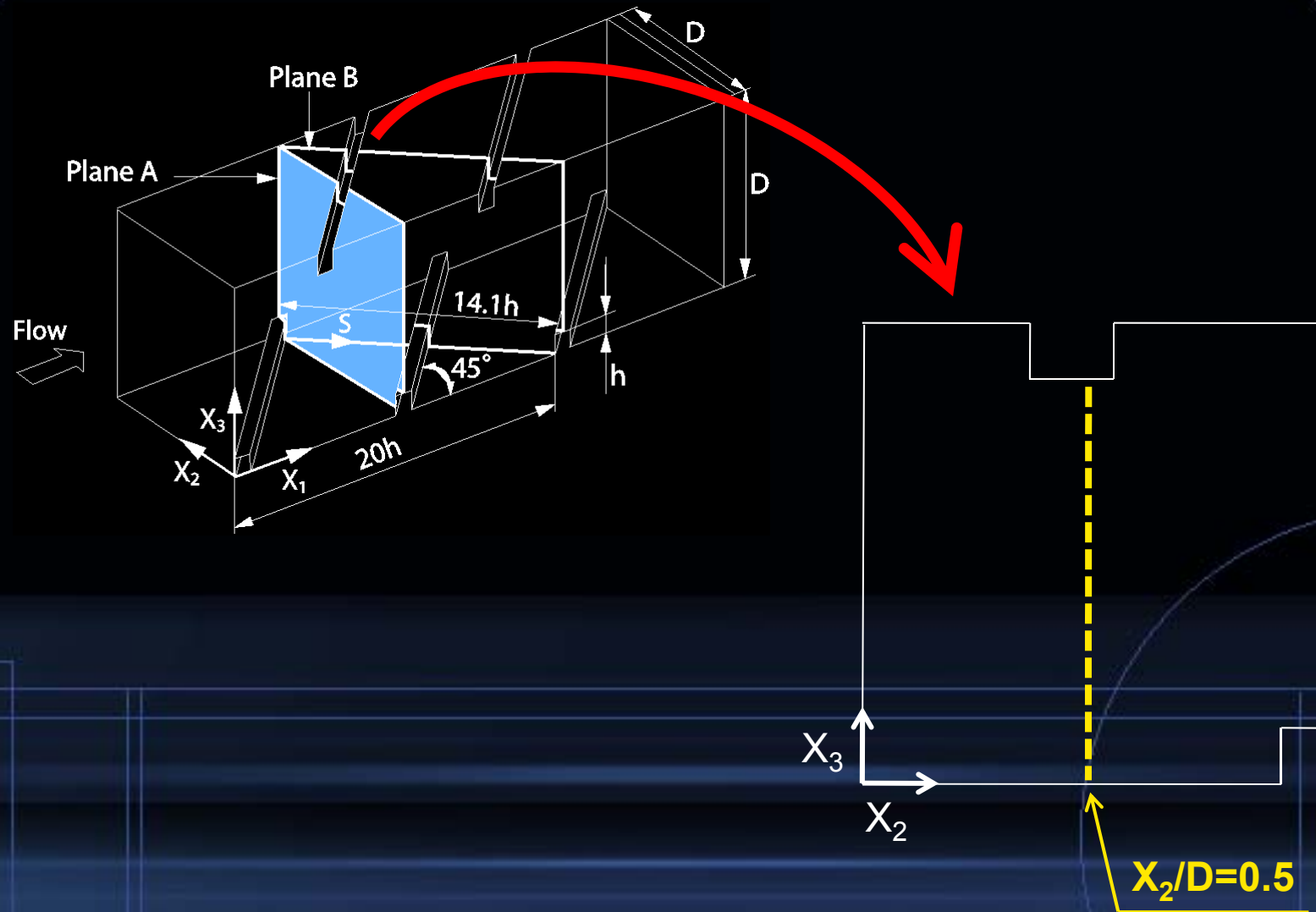
$$[\pi_{ij} + \pi_{ji}]_1 = -C_1 \frac{\varepsilon}{k} \left(\overline{u_i u_j} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \right) \quad [\pi_{ij} + \pi_{ji}]_2 = -\frac{C_2 + 8}{11} \left(P_{ij} - \frac{2}{3} P_k \delta_{ij} \right) + \zeta k \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}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

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

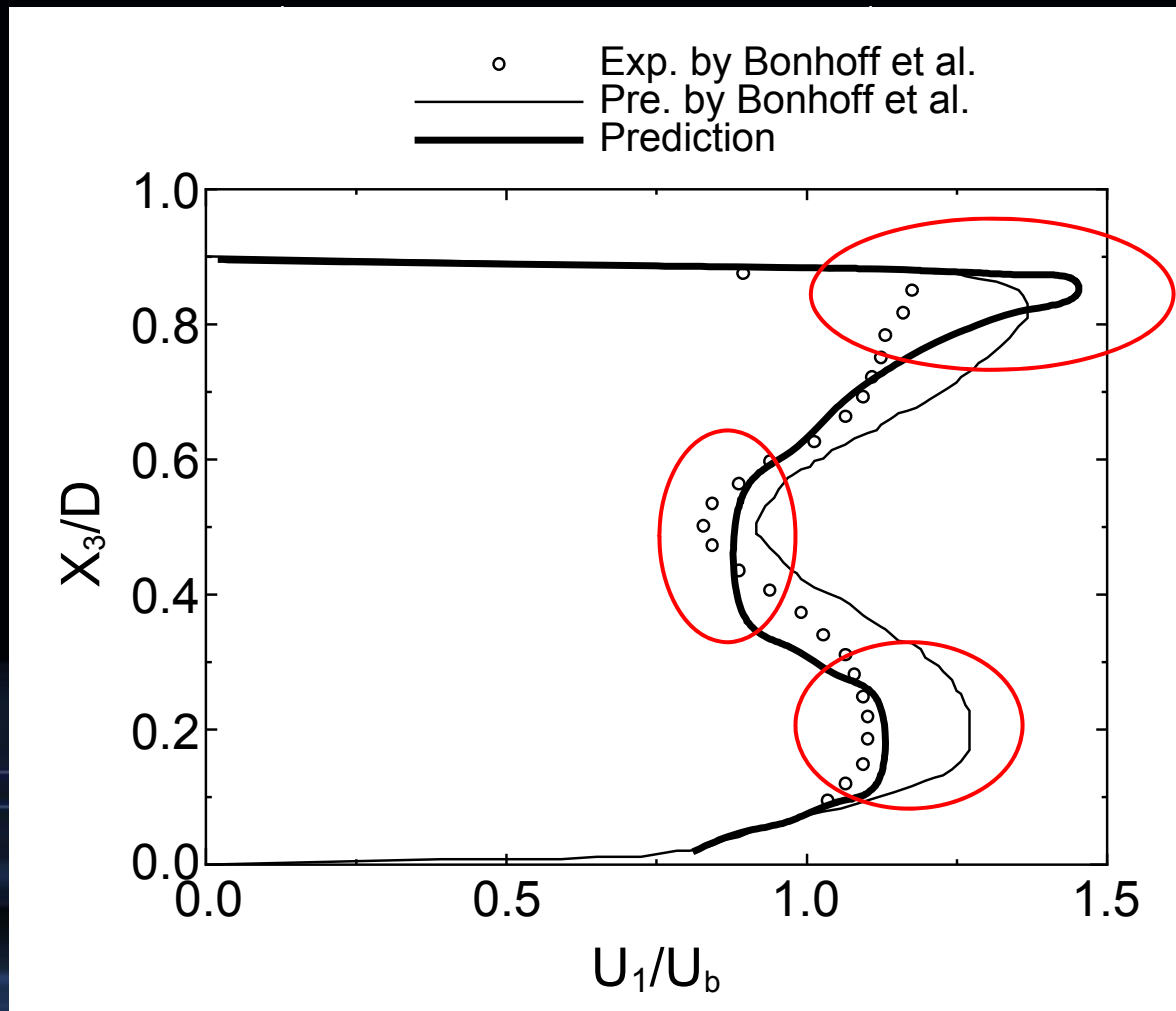
$$P_{ij} = -\overline{u_i u_k} \frac{\partial U_j}{\partial x_k} - \overline{u_j u_k} \frac{\partial U_i}{\partial x_k} \quad D_{ij} = -\overline{u_i u_k} \frac{\partial U_k}{\partial x_j} - \overline{u_j u_k} \frac{\partial U_k}{\partial x_i} \quad P_k = -\overline{u_k u_l} \frac{\partial U_k}{\partial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

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

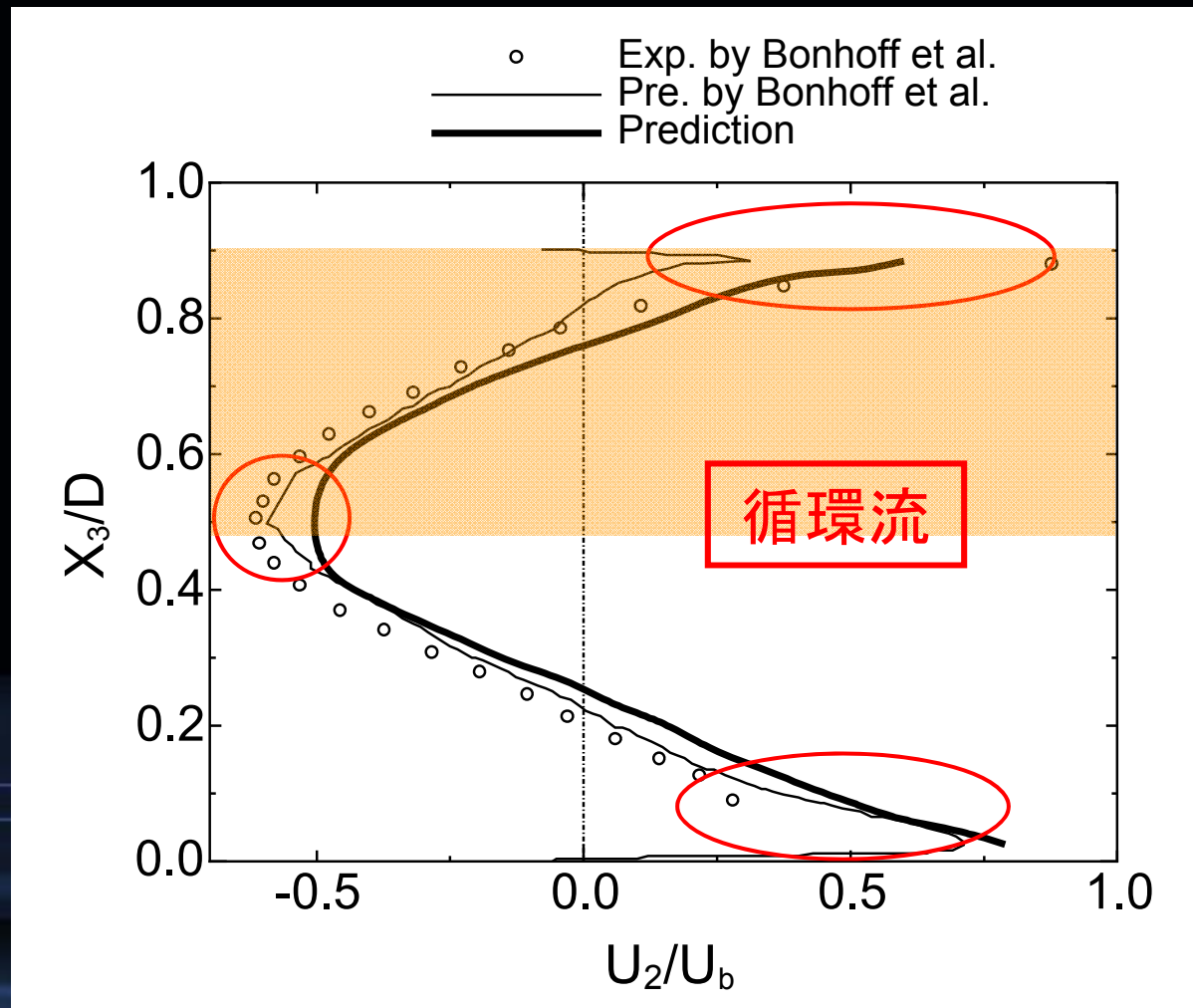
速度分布の比較位置



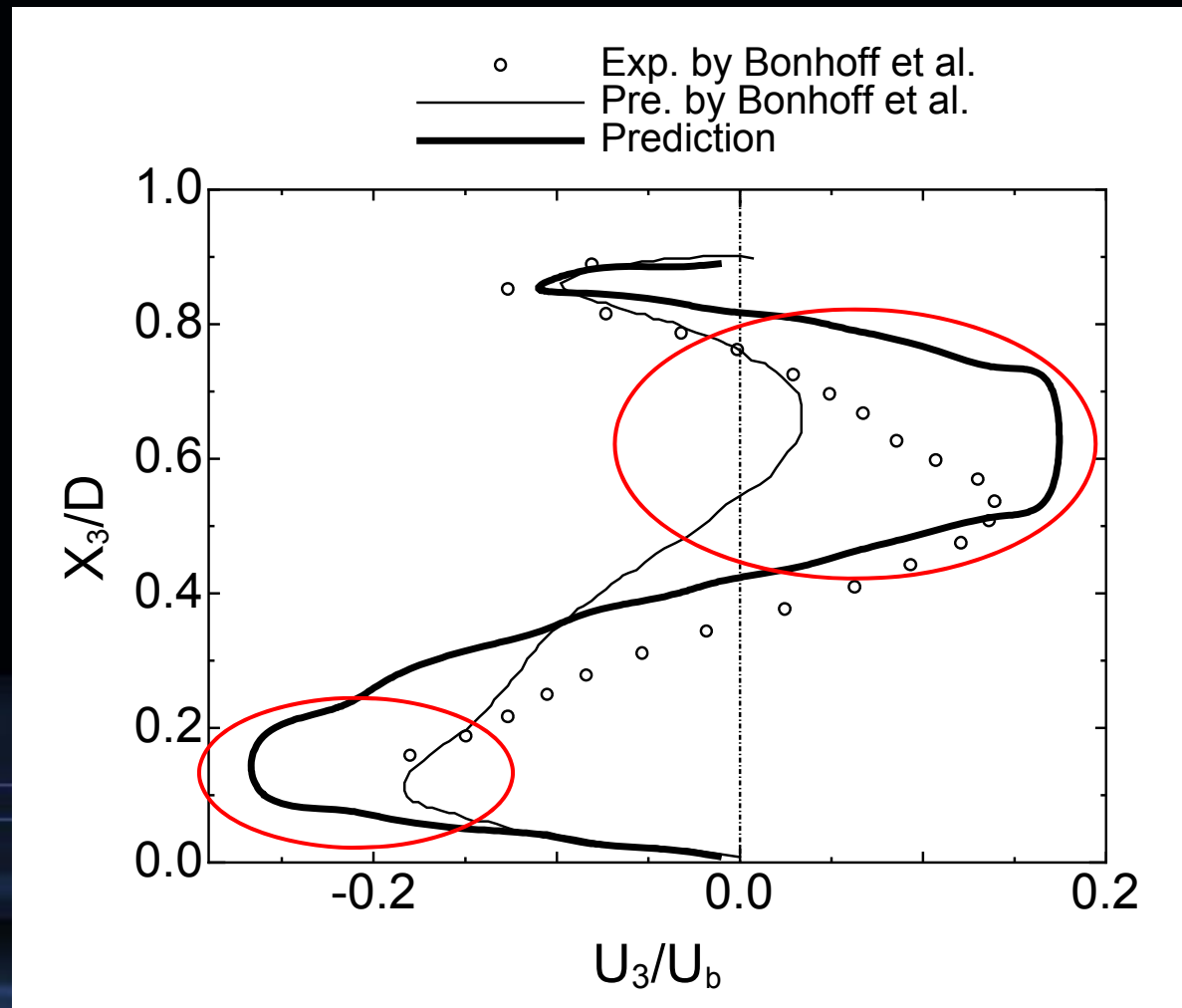
主流方向速度分布



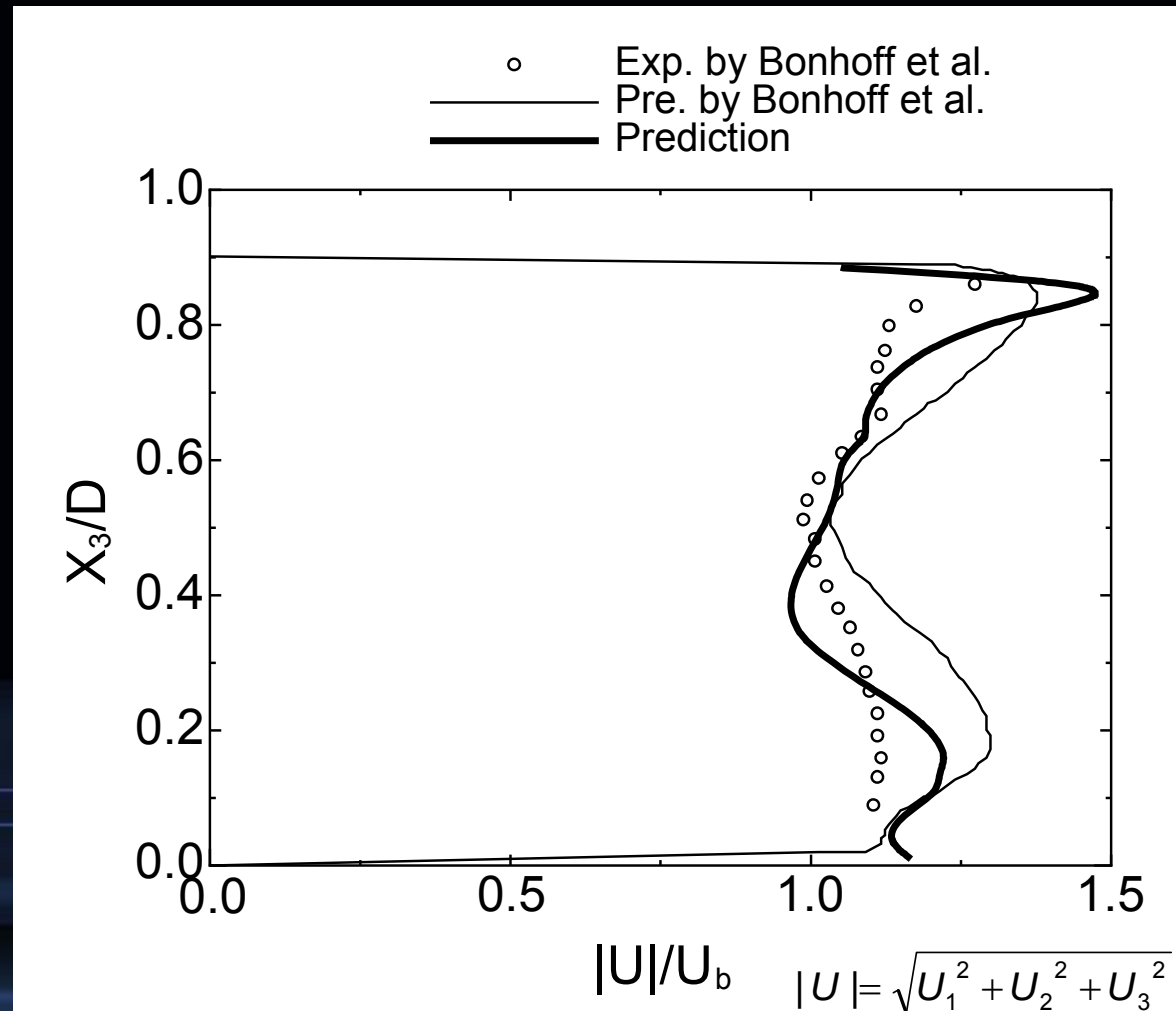
水平方向速度分布



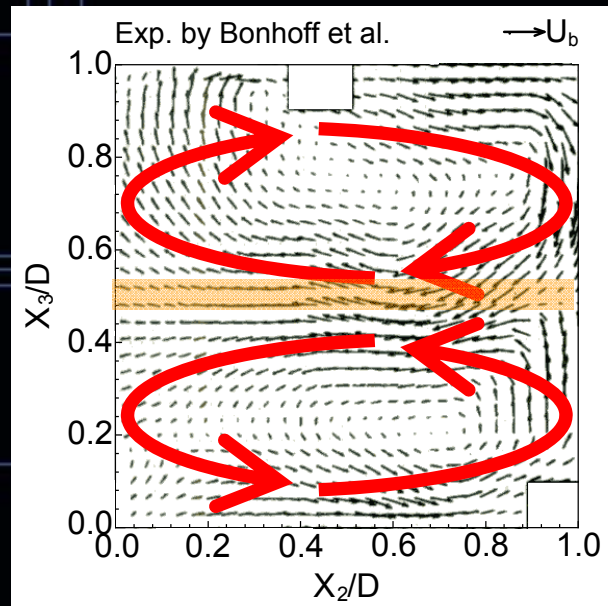
垂直方向速度分布



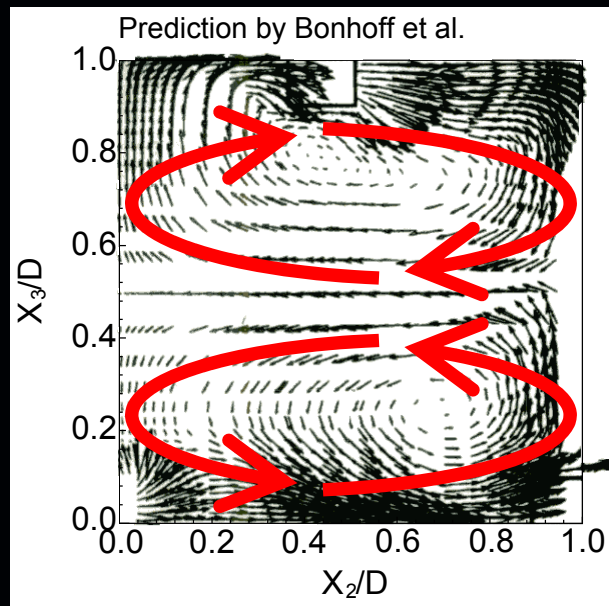
三次元速度ベクトルの絶対値



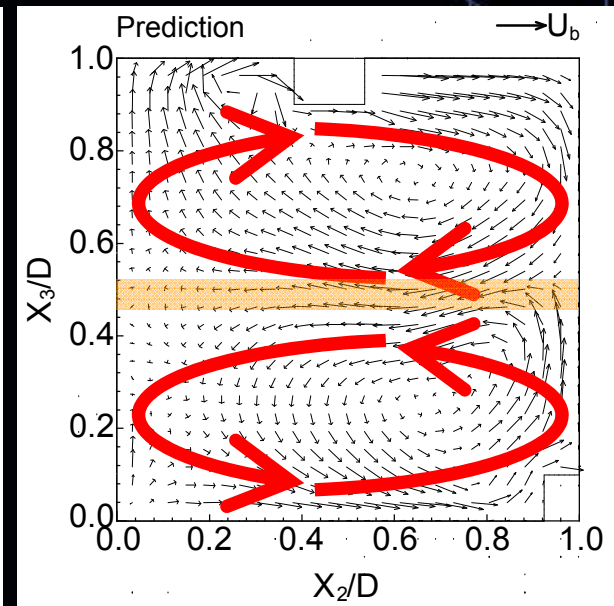
二次流れベクトル



実験結果

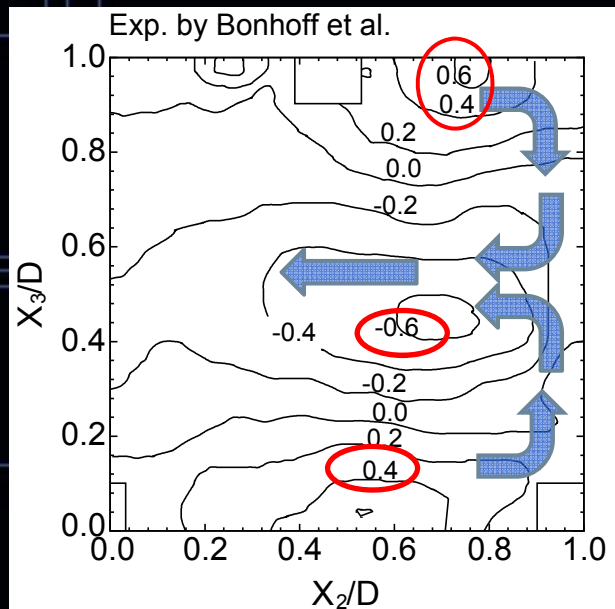


レイノルズ応力モデル
による計算結果

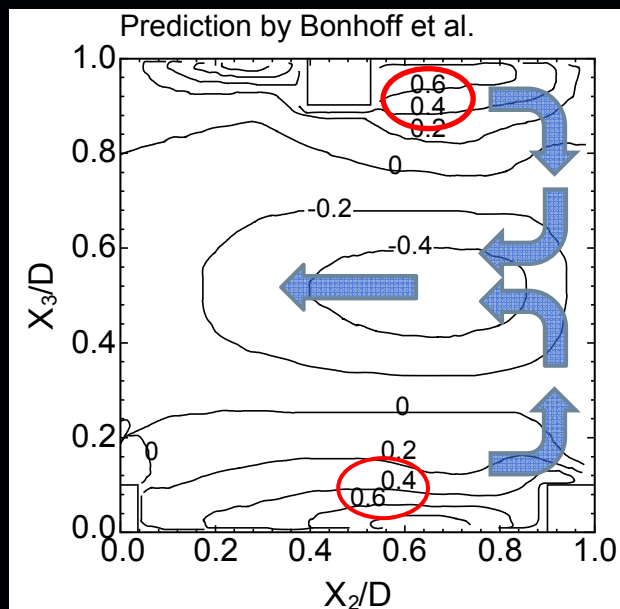


代数レイノルズ応力モデル
による計算結果

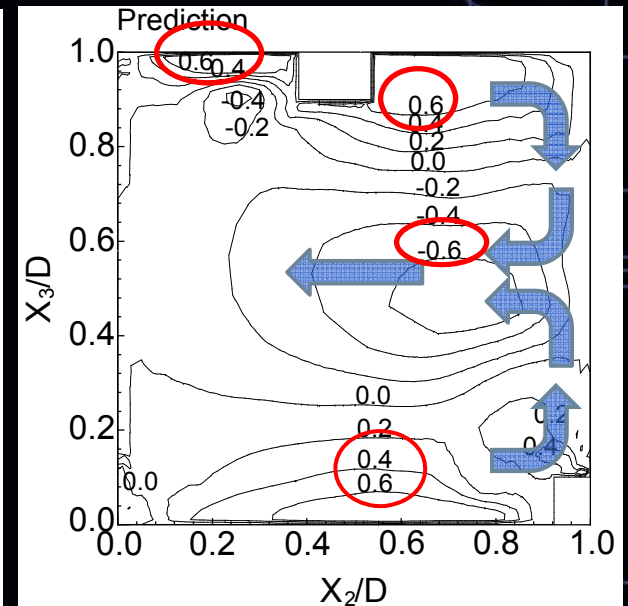
水平方向速度の等値線分布



実験結果



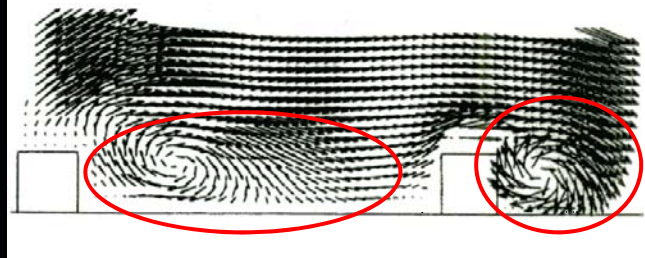
レイノルズ応力モデル
による計算結果



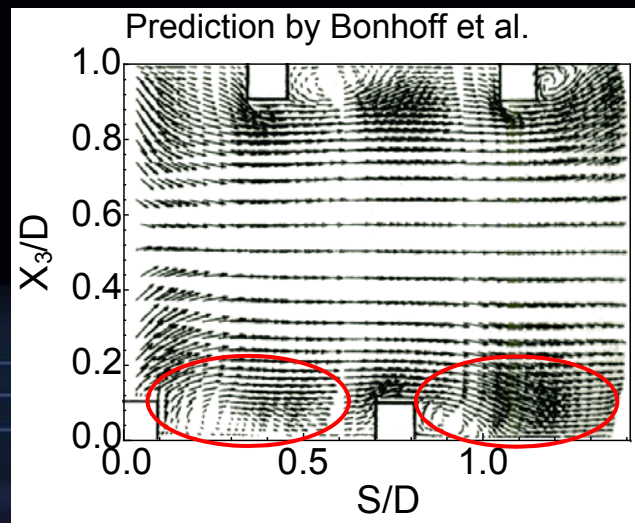
代数レイノルズ応力モデル
による計算結果

リブ近傍の速度ベクトル

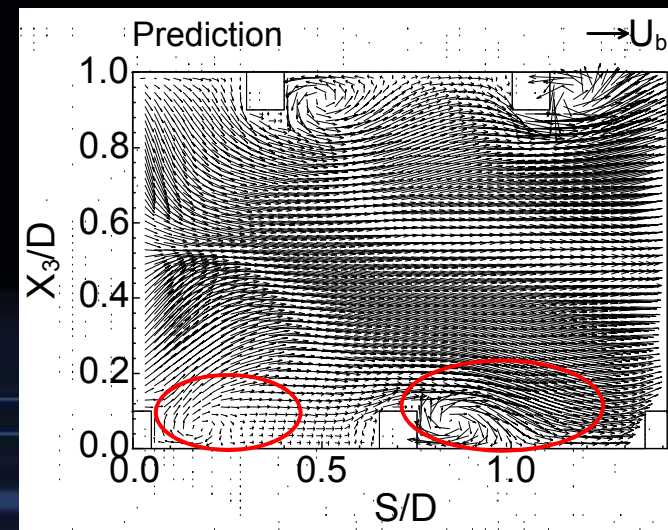
Exp. by Bonhoff et al.



実験結果



レイノルズ応力モデルによる計算結果



代数レイノルズ応力モデルによる計算結果

結論

流れ方向に対し 45° 傾斜したリブを有する直線管路内の三次元乱流を代数レイノルズ応力モデルにより解析し、以下の結論を得た.

- ・ 定量比較において、垂直方向速度分布で代数レイノルズ応力モデルの解析結果と実験値に差が認められ、レイノルズ応力モデルの解析結果でも同様の結果となった.
- ・ 三次元速度ベクトルの絶対値比較、水平方向等値線分布などの結果から、代数レイノルズ応力モデルでも、傾斜リブを有する三次元乱流場を解析することは可能であり、レイノルズ応力モデルの解析結果と比較しても両者に大きな差はないことを示した.