

粗面壁管路内の微小リブ形状変化 による乱流構造変化の数値予測

Numerical Simulation of Turbulent Structure Duct with One
Roughened Wall Composed by Different Rib Shape

宇都宮大学大学院工学研究科 杉山 均

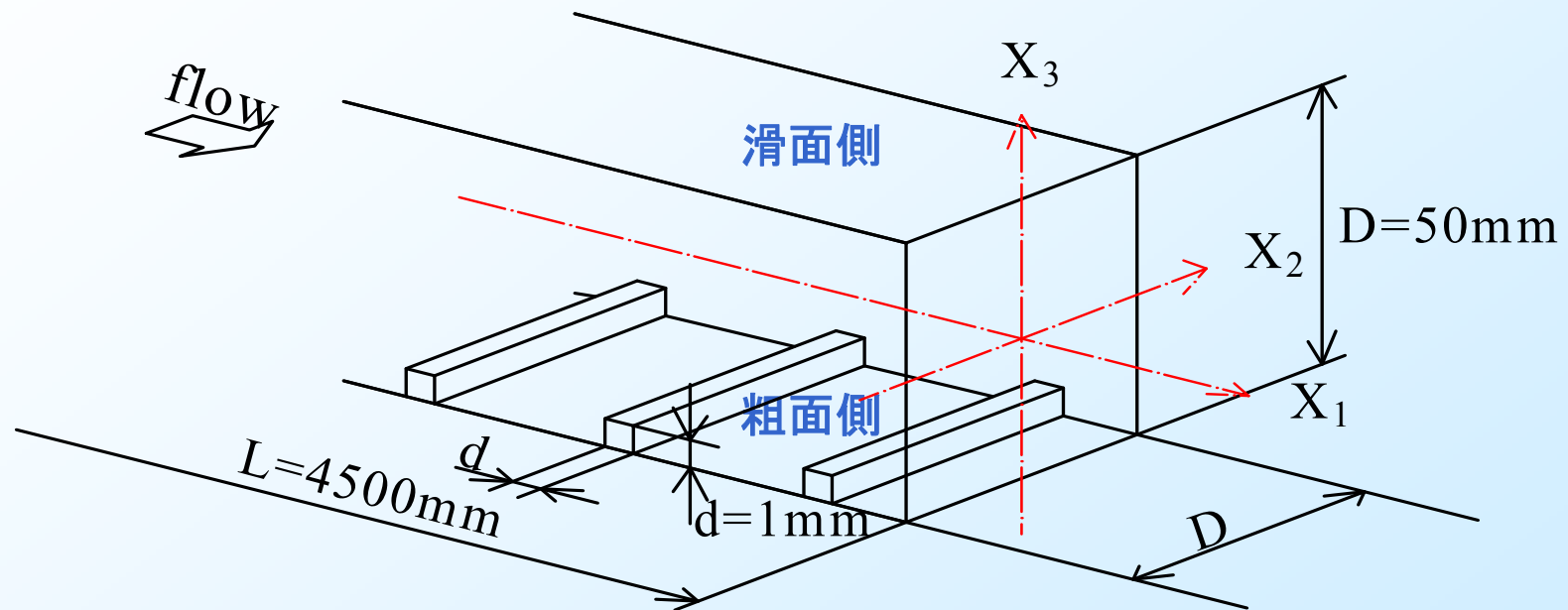
宇都宮大学大学院工学研究科 ○宇野 孝博

宇都宮大学大学院工学研究科 人見 大輔

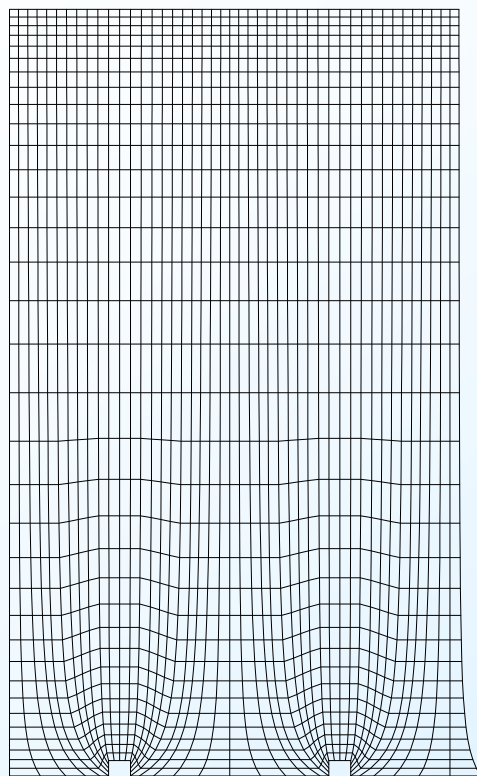
研究目的

伝熱促進を図る目的から伝熱壁面に突起を設けることは、古くから用いられてきた最も簡便で代表的な手法である。粗面壁を有する管路内流れは、滑面壁とは異なる乱流挙動を示し、微小突起でさえ流れに与える影響は大きいことが多数報告されている。本解析では、藤田先生らの行った実験結果を対象に、正方形断面管路の底壁面に微小突起を周期的に設けた管路内三次元乱流を代数応力モデルにて数値解析を行い、実験結果と比較することを目的とする。

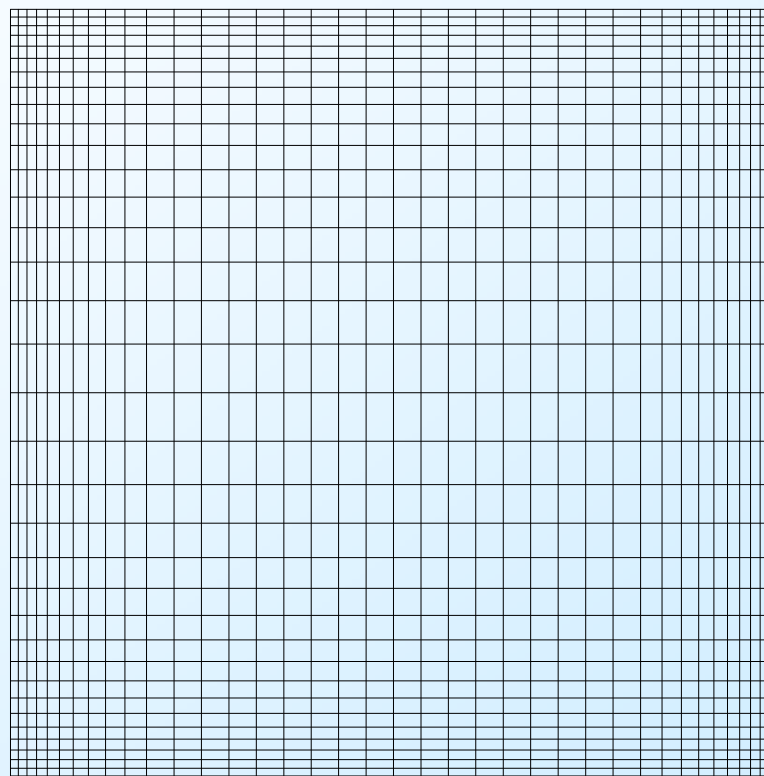
また、突起形状を変化させた数値解析を同時に行い、断面形状の違いによる各乱流諸量の相違点を確認する。以下にその解析結果の比較を示す。



Schematic diagram of square duct with roughened wall and coordinate systems



主流方向46点



断面内 39×35 点

Computation mesh

運動量輸送方程式

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

レイノルズ応力輸送方程式

$$\begin{aligned} \frac{D\overline{u_i u_j}}{Dt} = & - \left(\overline{u_i u_k} \frac{\partial U_i}{\partial X_k} + \overline{u_j u_k} \frac{\partial U_j}{\partial X_k} \right) + \frac{p}{\rho} \left(\frac{\partial u_i}{\partial X_j} + \frac{\partial u_j}{\partial X_i} \right) \\ & - \frac{\partial}{\partial X_k} \left\{ \overline{u_i u_j u_k} - \nu \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial X_k} + \frac{p}{\rho} (\delta_{jk} u_i + \delta_{ik} u_j) \right\} \\ & - 2\nu \frac{\partial u_i}{\partial X_k} \frac{\partial u_j}{\partial X_k} \end{aligned}$$

モデル化されたレイノルズ応力輸送方程式

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

圧力・歪み相関項(再配分項)のモデル化

圧力・歪み相関項のモデル化

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

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

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

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

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

モデル定数

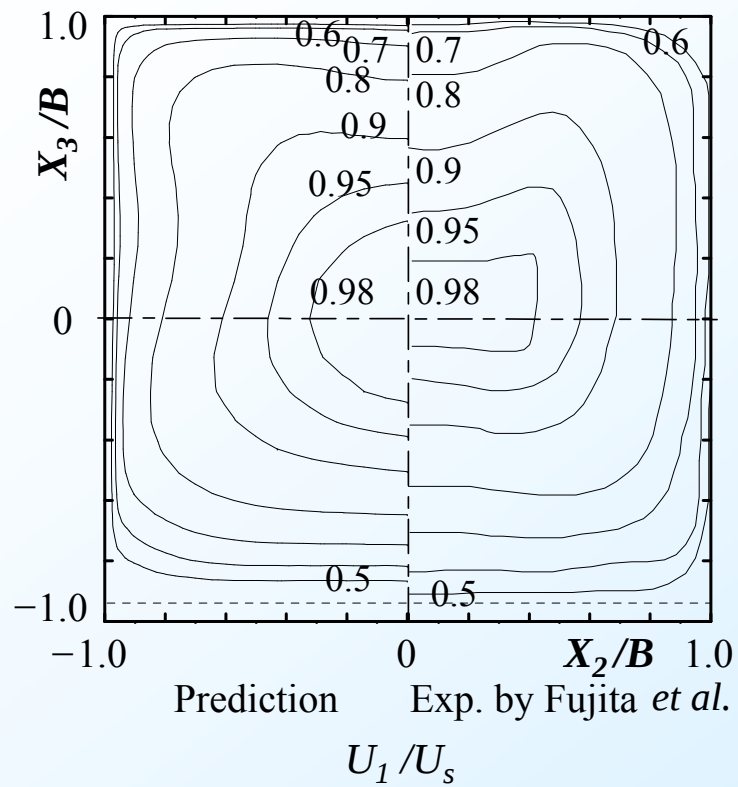
C_1^*	C_2^*	ζ^*	C_1'	C_2'	ζ'
1.40	0.44	0.16	-0.35	0.12	0.10

滑面壁に対する対数速度分布

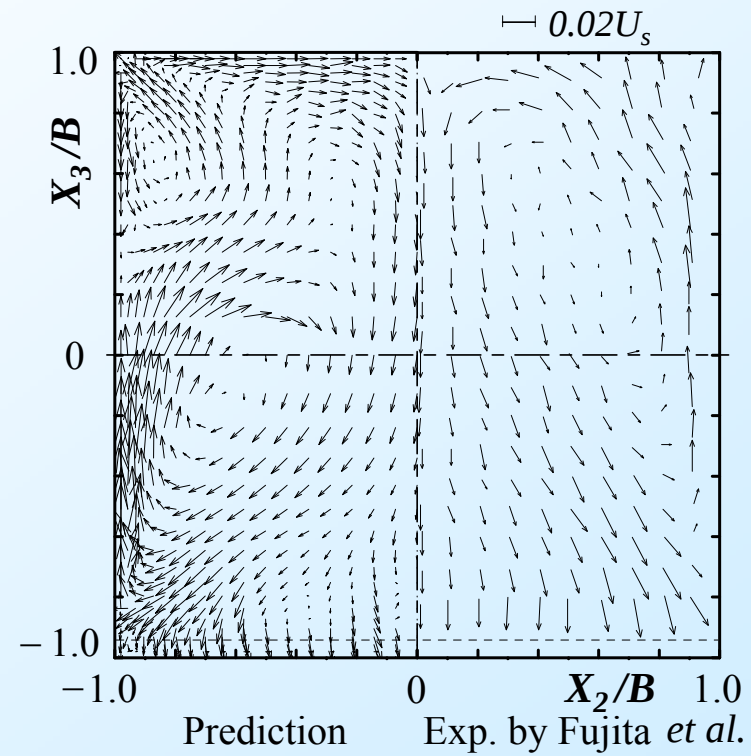
$$\frac{U_1}{U_\tau} = \frac{1}{0.42} \ln \left(\frac{U_\tau y}{\nu} \right) + 5.5$$

粗面壁に対する対数速度分布

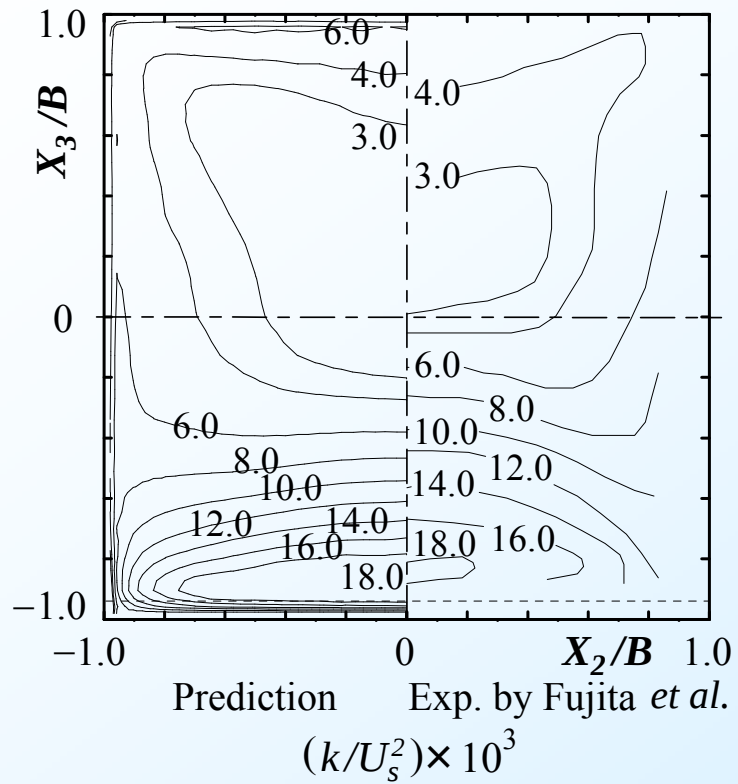
$$\frac{U_1}{U_\tau} = \frac{1}{0.42} \ln \left(\frac{U_\tau y}{\nu} \right) - 8.62$$



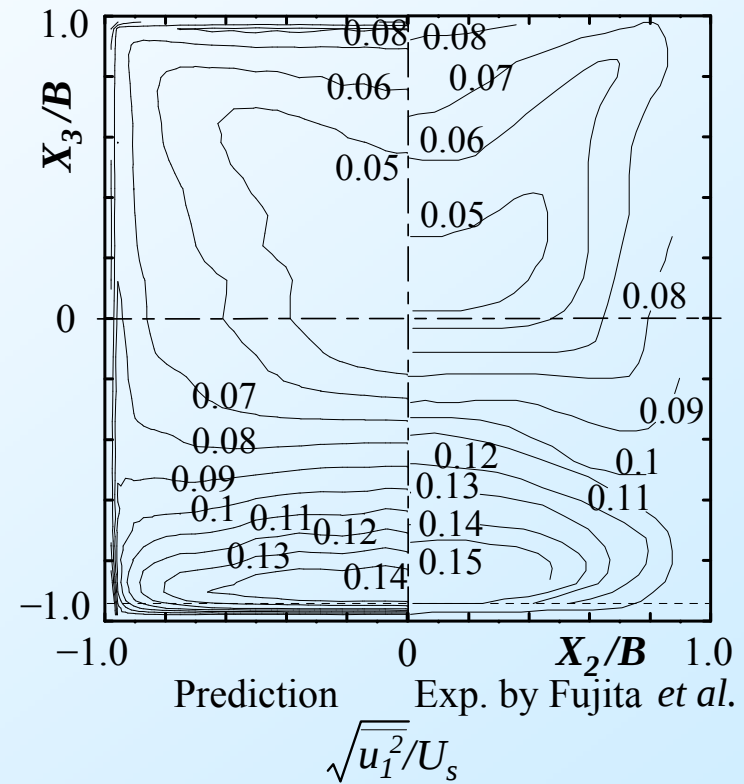
Comparison of mean velocity



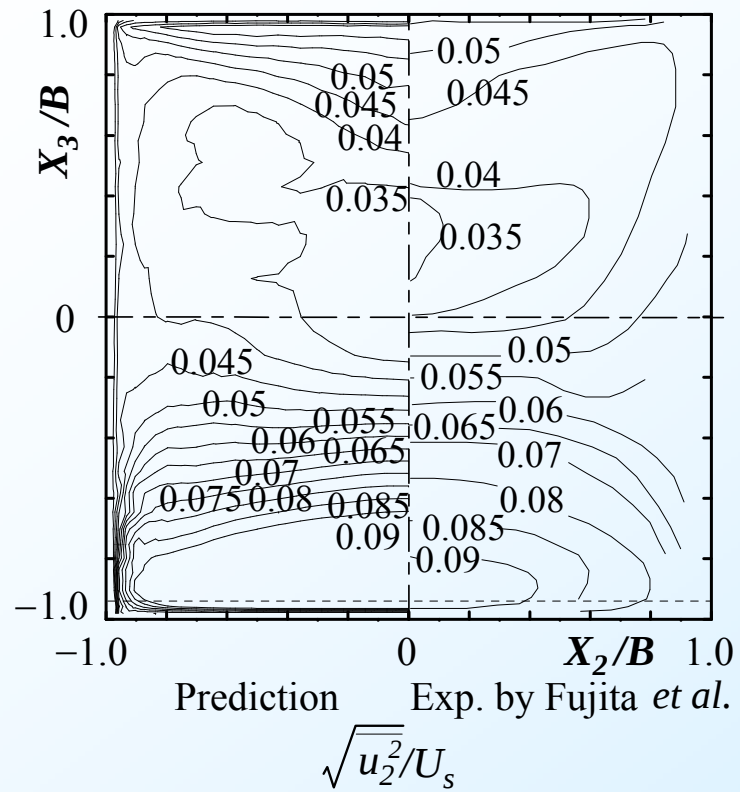
Comparison of secondary flow of second kind



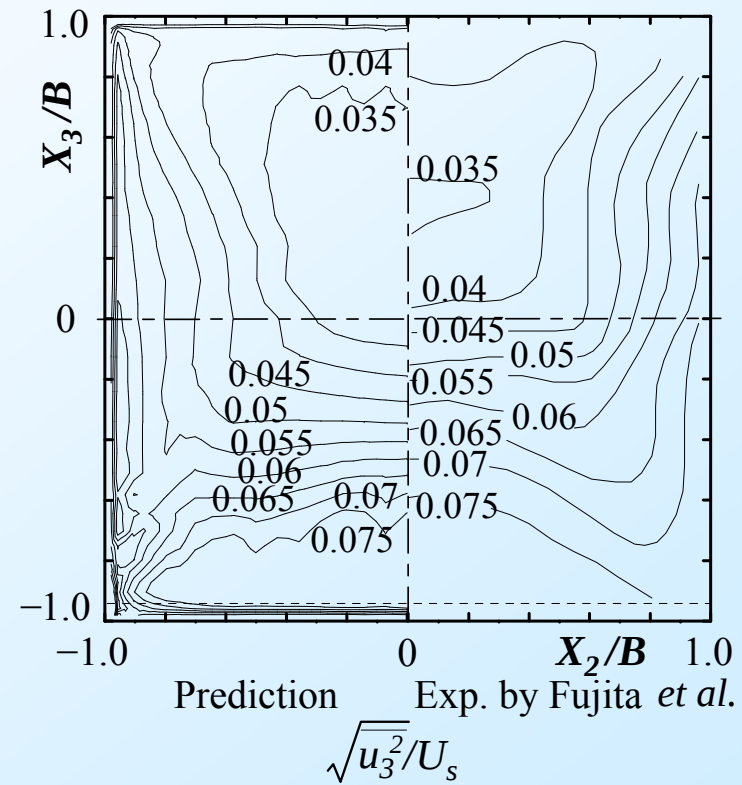
Comparison of turbulent energy



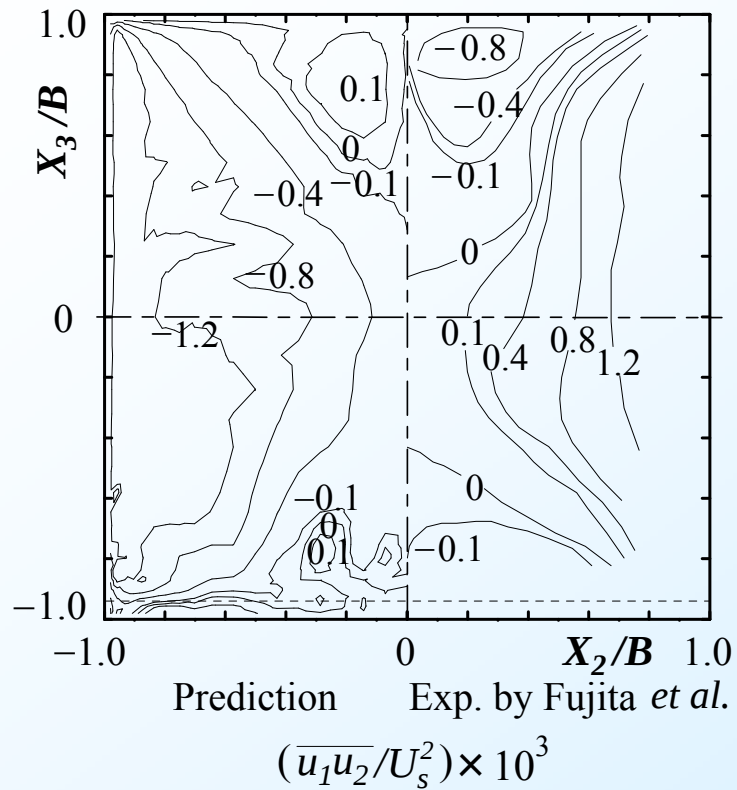
Comparison of normal stress along
streamwise flow



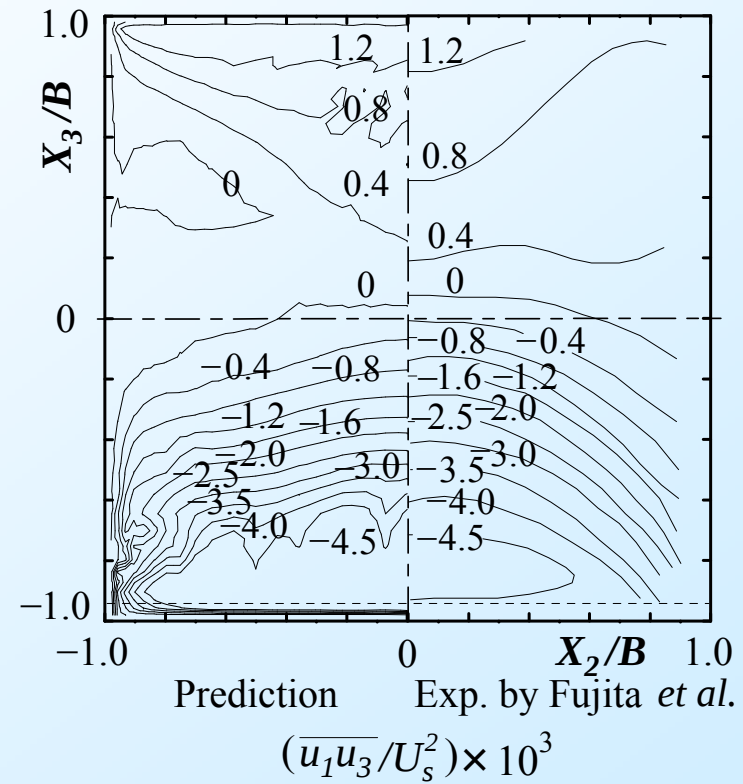
Comparison of normal stress along
horizontal direction



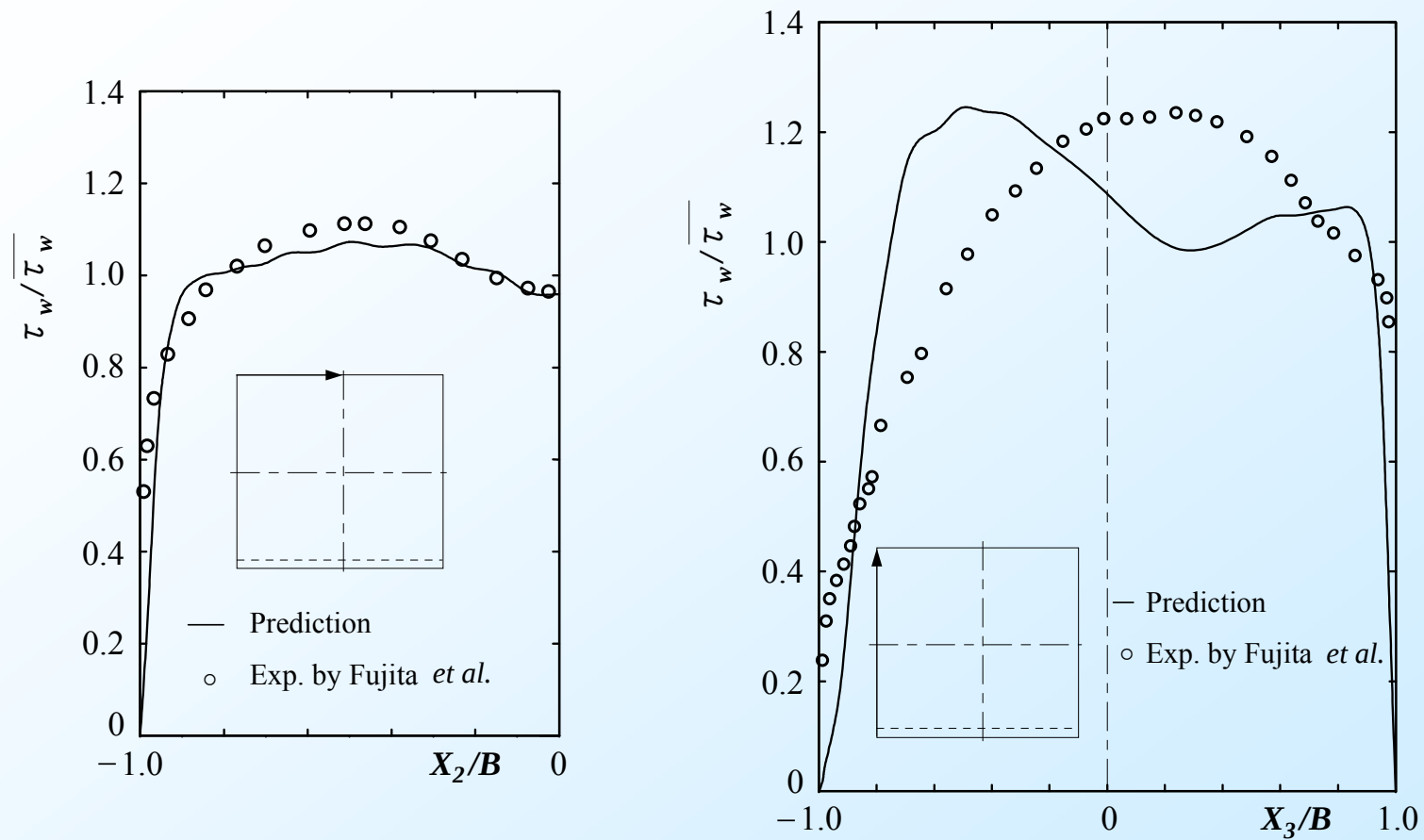
Comparison of normal stress along
Vertical direction



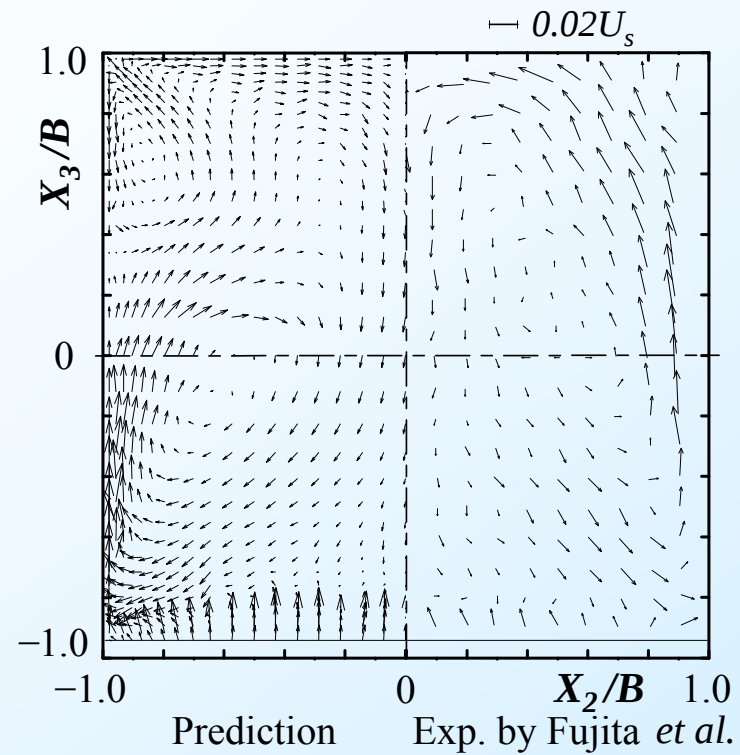
Comparison of shear stress $\overline{u_1 u_2}$



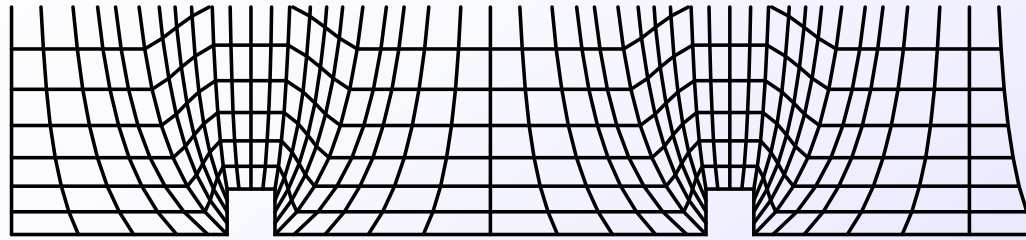
Comparison of shear stress $\overline{u_1 u_3}$



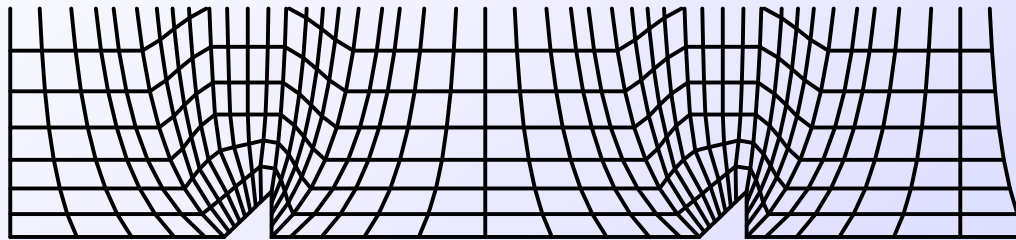
Wall shear stress distribution along side and upper wall



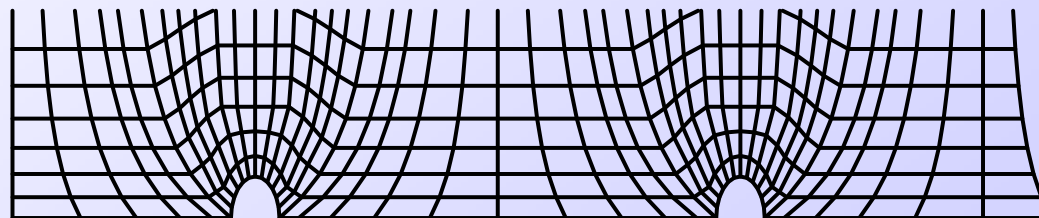
Comparison of secondary flow of the second kind
in the cross section located over rib



Square rib

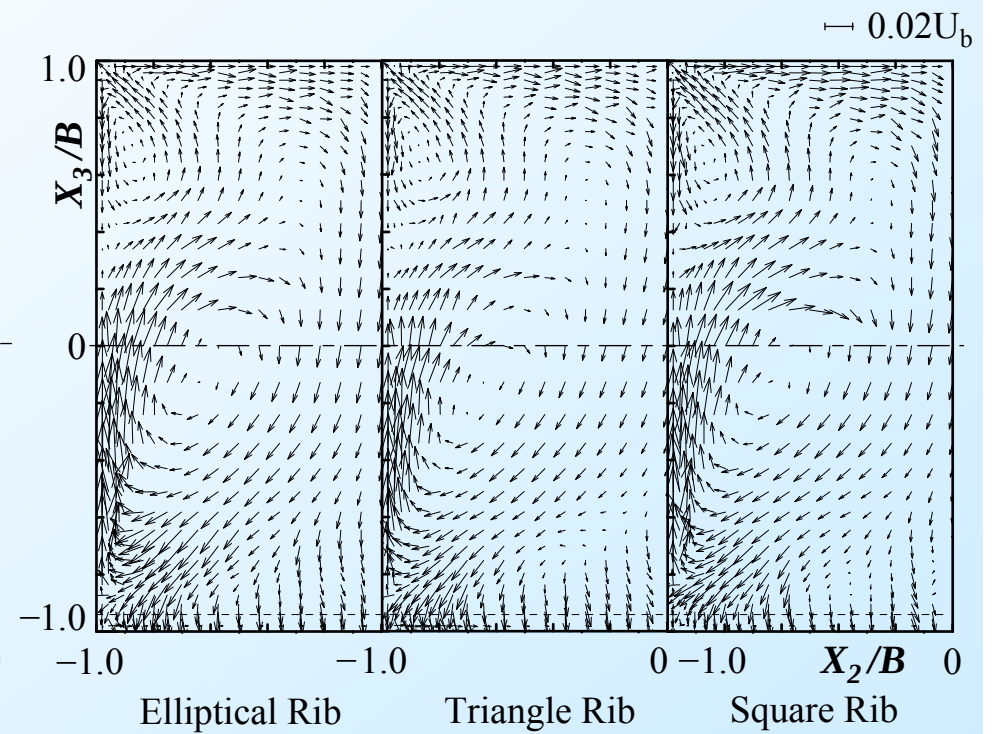
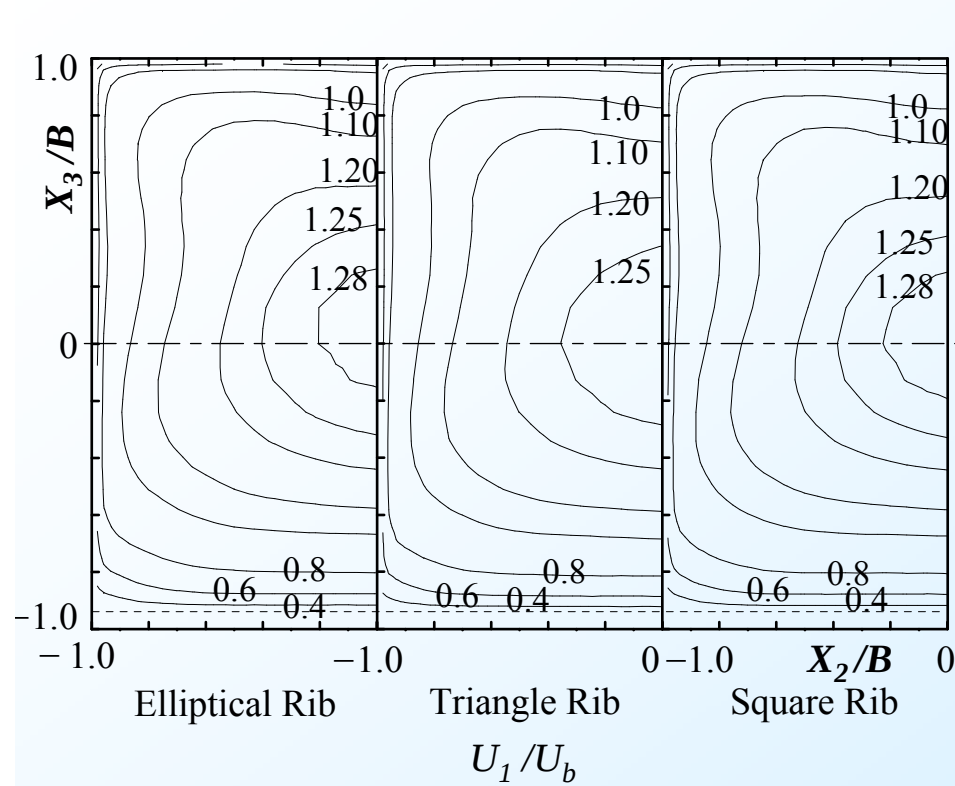


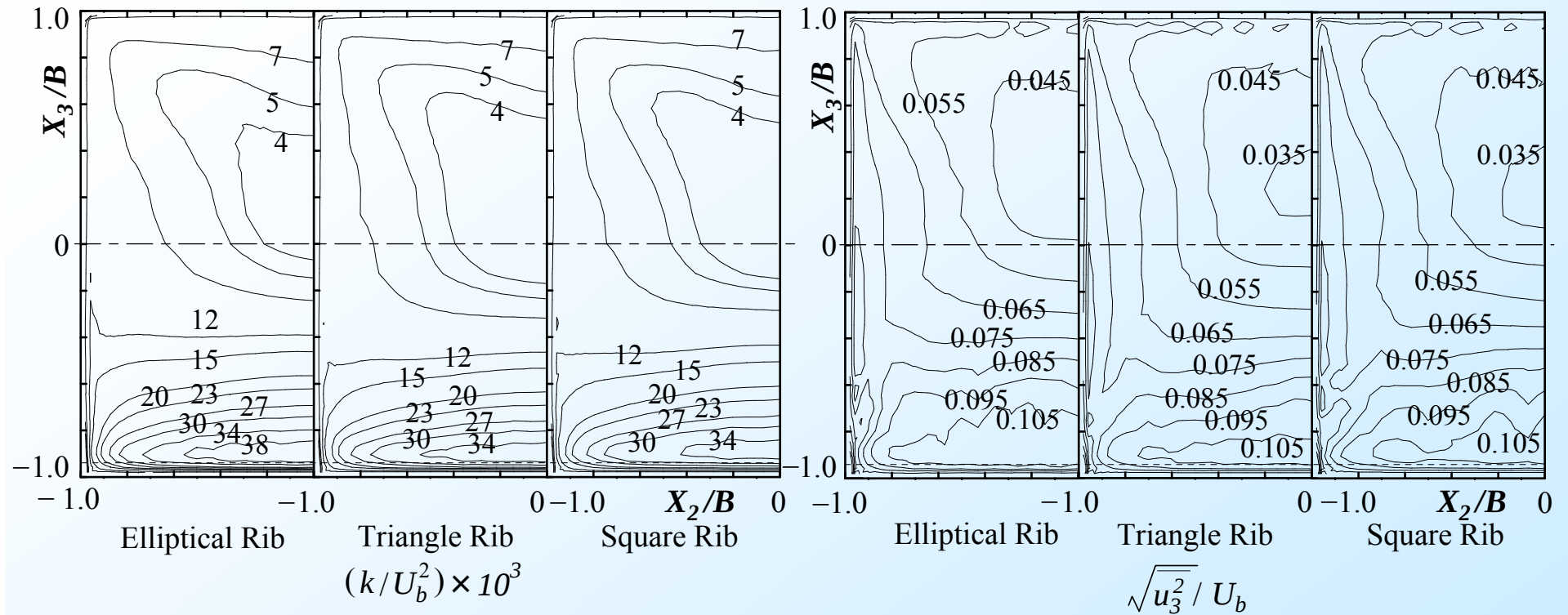
Triangle rib



Elliptical rib

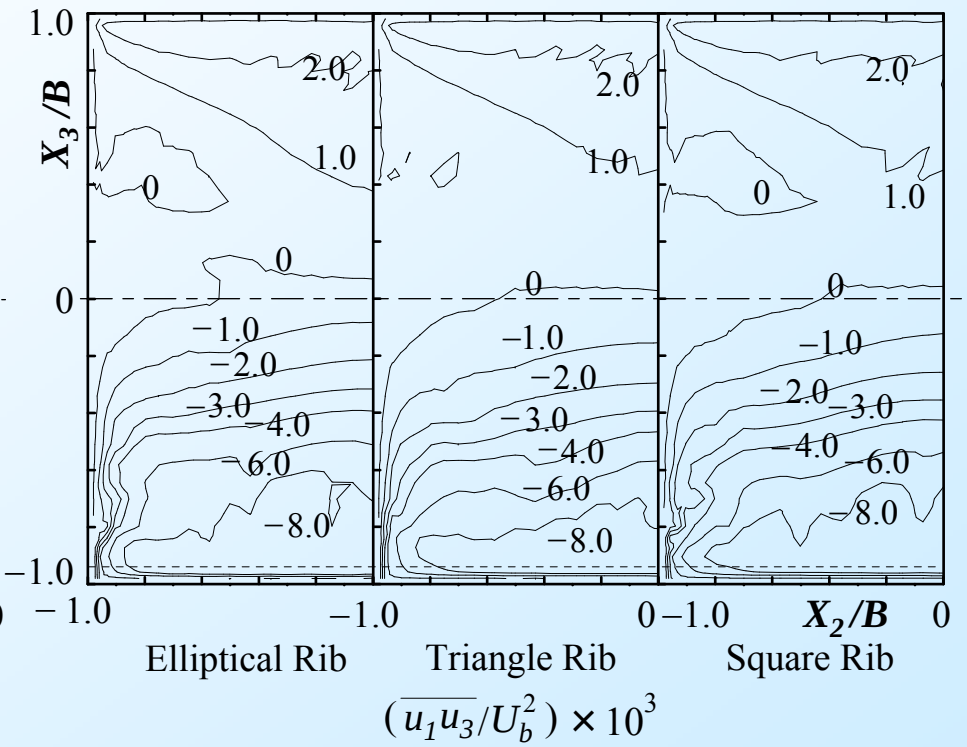
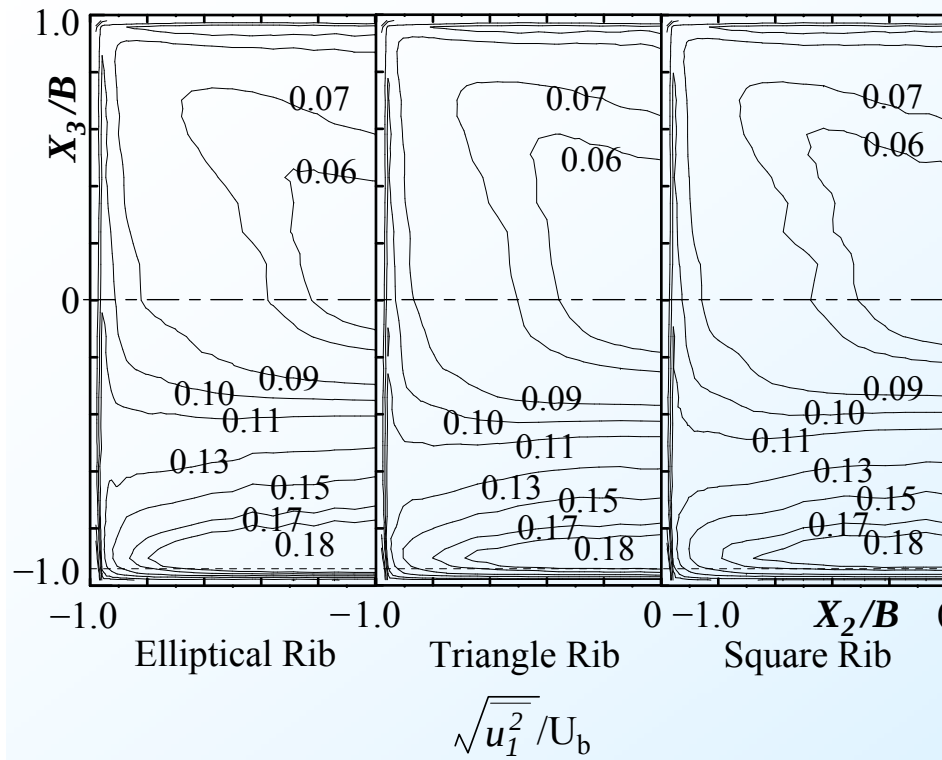
Computational mesh layout around ribs

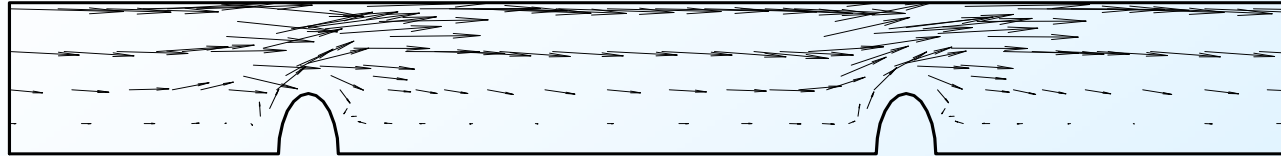




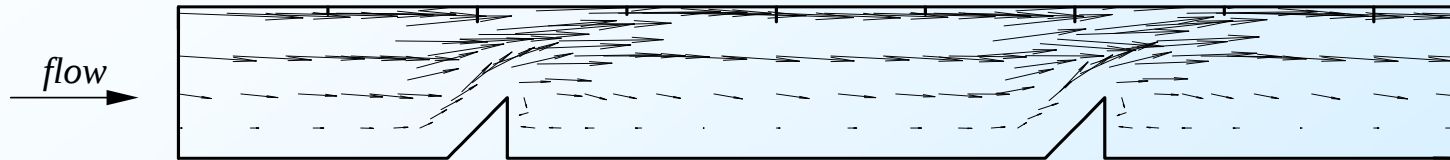
Comparison of turbulent energy

Comparison of normal stress
along vertical direction

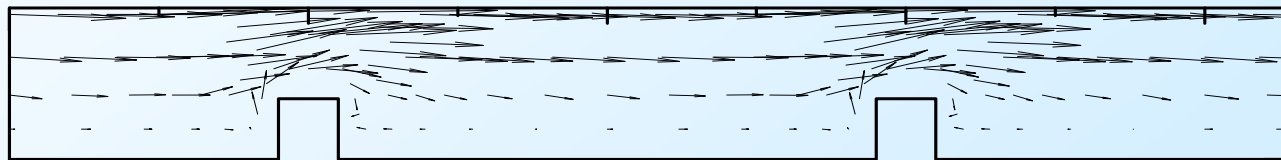




Elliptical Rib



Triangle Rib



Square Rib

Velocity vectors around ribs

結論

- リブ形状を直接計算格子に考慮し, かつ粗面壁に対しての対数速度分布を用いることで, 実験値を比較的良好に再現できた.
- 粗面壁を設けた場合に認めれる粗面壁に対して垂直となるベクトルは, リブ形状を変化させた場合にも認めれた.
- 楕円形状リブでは, 乱流エネルギー分布や, 乱流諸量に違いが認めれた.
- リブ形状を変化させた場合の各乱流諸量は, 僅かながら変化を示す. こうした結果は, 伝熱促進を図るために, リブ形状の考慮が必要なことを示唆している.