



ハーフトリップを有する 90度曲がり管路内の乱流構造解析

宇都宮大学大学院 工学研究科
学際先端システム学専攻

覺幸 知輝

研究背景

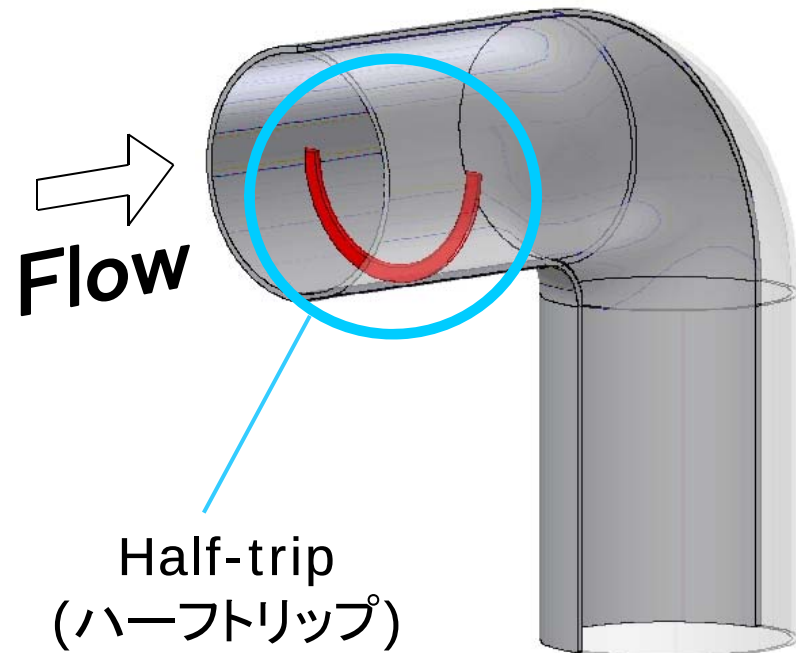
自動車部品を構成する吸気管路，排気管路では，圧力損失を抑えて吸気，排気効率を上げることが要求される。

特にはく離流れは，圧力損失の増大につながる。最近，この圧力損失の低減を図る意味から曲がり管路上流部に，ハーフトリップ[°]を設けた手法が提案され，90度曲がり管路内での平均速度，圧力損失低減に関する計測結果が望月・横田らにより報告された。

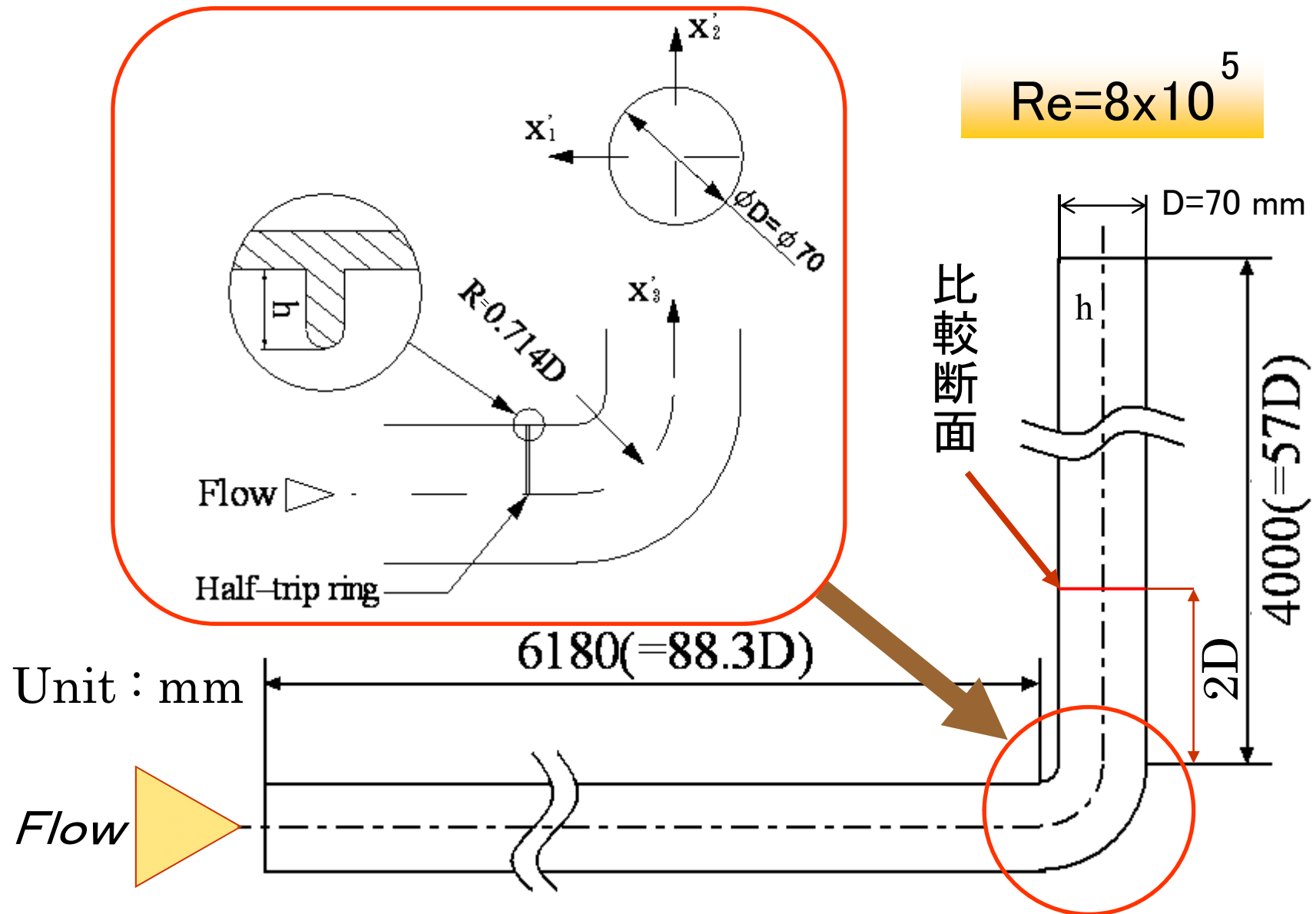
研究目的

本研究では、圧力損失低減効果のある流れ場を計測した、望月、横田らの実験を対象に、代数レイノルズ応力モデルを用いて乱流解析を行い、計測結果と解析結果を比較し、本解析手法の妥当性を検証することを目的とする。

同時に、ハーフトリップが設けられた曲がり管路内の流動から、ハーフトリップによる圧力損失低減のメカニズムについて検討する。



解析対象管路の概略図



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

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

・乱流散逸方程式

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

・モデル化したレイノルズ応力輸送方程式

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

代数式化した
対流・拡散項

生成項

再配分項

散逸項

圧力・歪相関項及び定数系

圧力・歪相関項のモデル式

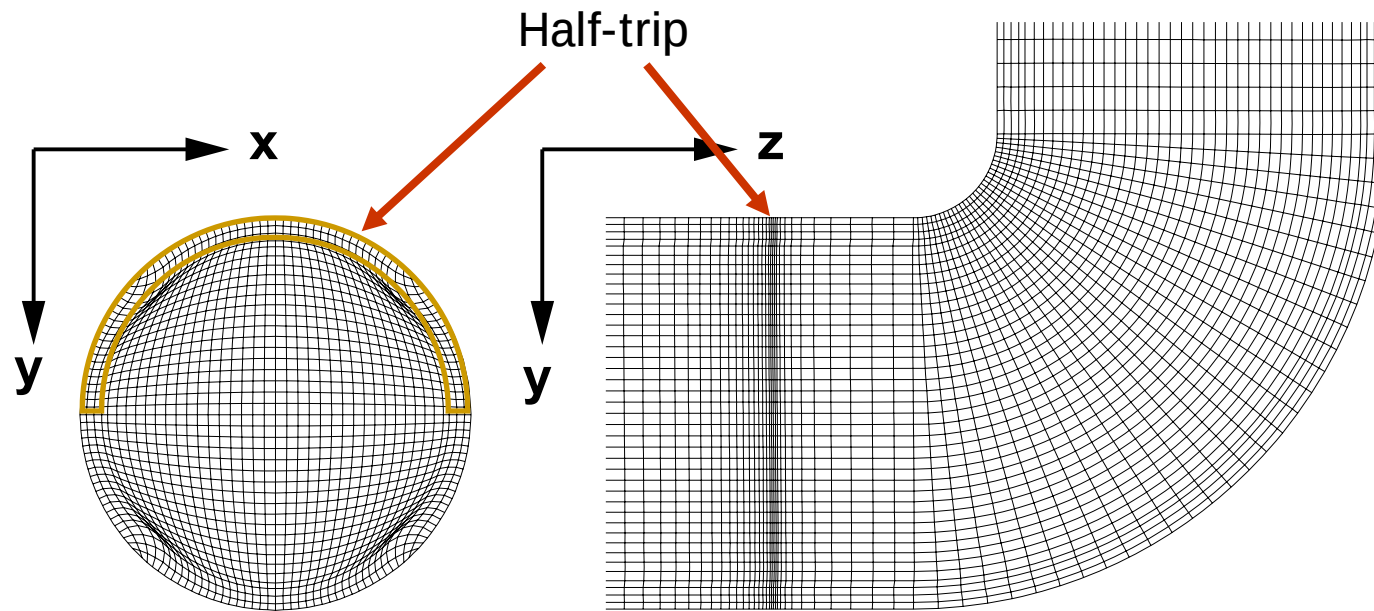
$\pi_{ij,1} + \pi_{ji,1}$	$-c_1 \frac{\varepsilon}{k} \left(\overline{u_i u_j} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \right)$
$\pi_{ij,2} + \pi_{ji,2}$	$-\frac{c_2 + 8}{11} \left(P_{ij} - \frac{2}{3} P_k \delta_{ij} \right) + \zeta k \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)$ $-\frac{8c_2 - 2}{11} \left(D_{ij} - \frac{2}{3} P_k \delta_{ij} \right)$
$\left[\pi_{ij} + \pi_{ji} \right]_w$	$c_1 = c_1^* + c_1' \cdot f \left(\frac{L}{X_w} \right), c_2 = c_2^* + c_2' \cdot f \left(\frac{L}{X_w} \right),$ $\zeta = \zeta^* + \zeta' \cdot f \left(\frac{L}{X_w} \right)$

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

圧力・歪相関項中の定数

c_1^*	c_2^*	ζ^*	c_1'	c_2'	ζ'
1.40	0.44	0.16	-0.35	0.12	0.10

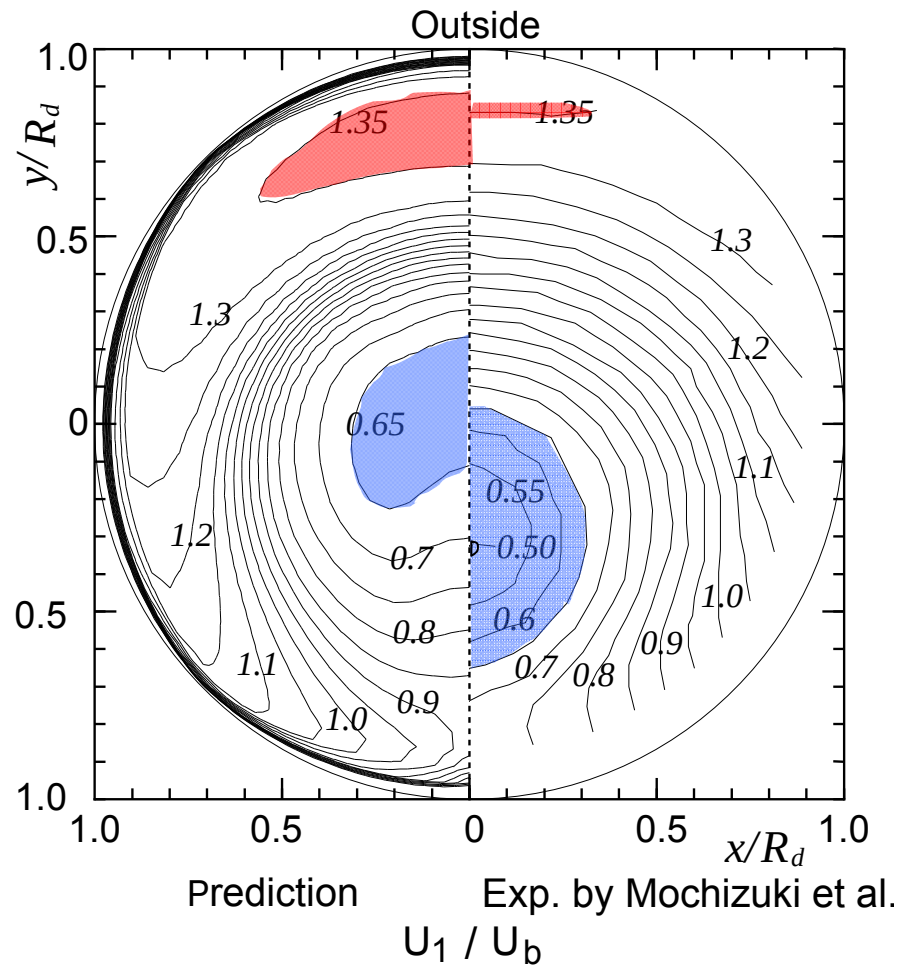
計算格子



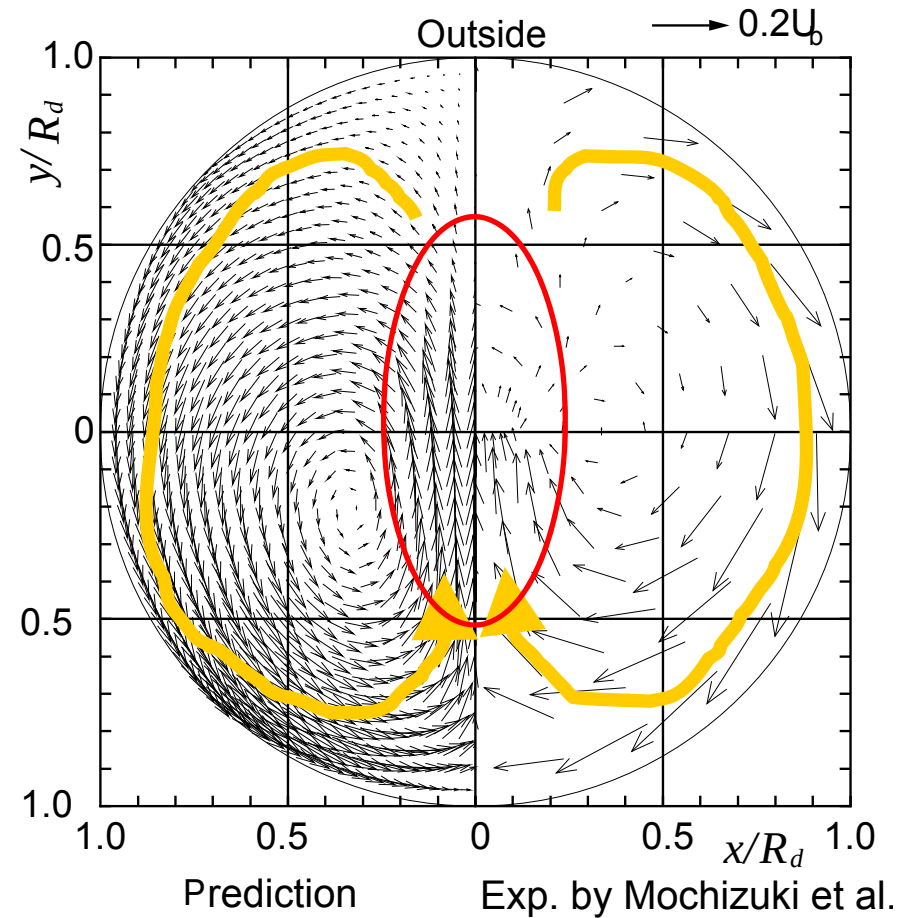
h:ハーフトリップ高さ 0, 1.5, 5mm, D:管直径70mm

	X × Y × Z	総格子点数
$h/D = 0.000$	$41 \times 41 \times 237$	398397
$h/D = 0.021$	$41 \times 41 \times 241$	405121
$h/D = 0.071$	$41 \times 41 \times 247$	415207

主流方向速度と二次流れ ($h/D=0.0$)

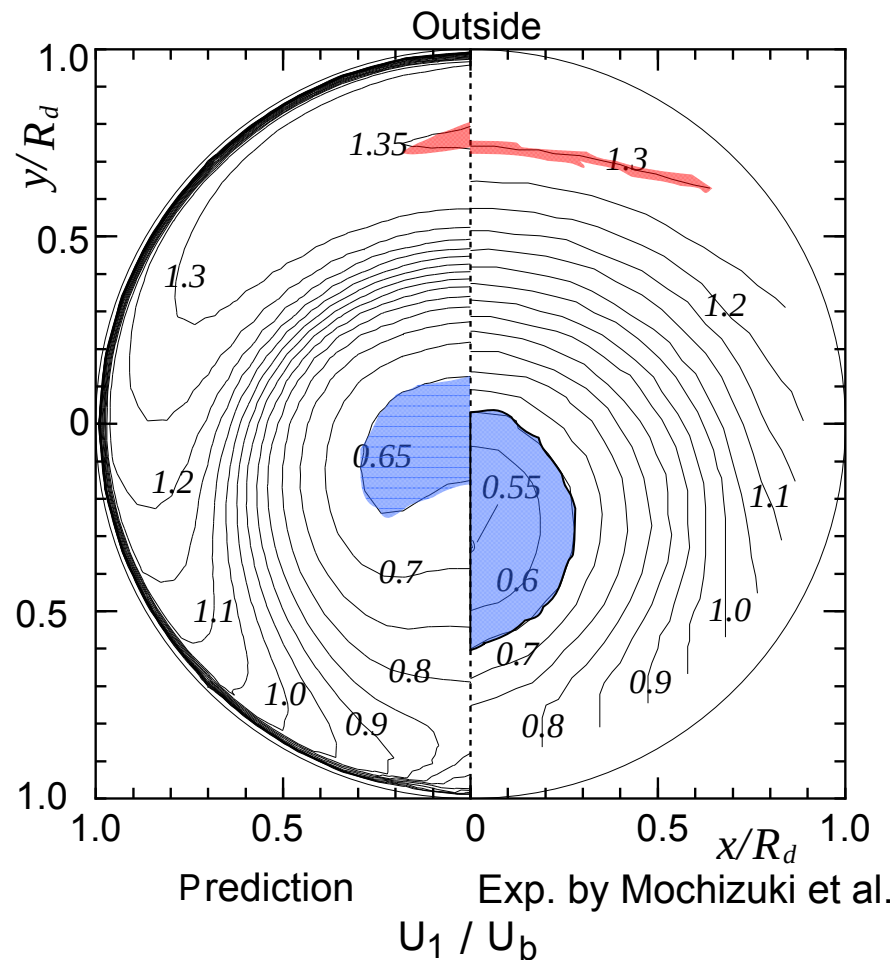


主流方向速度等値線図

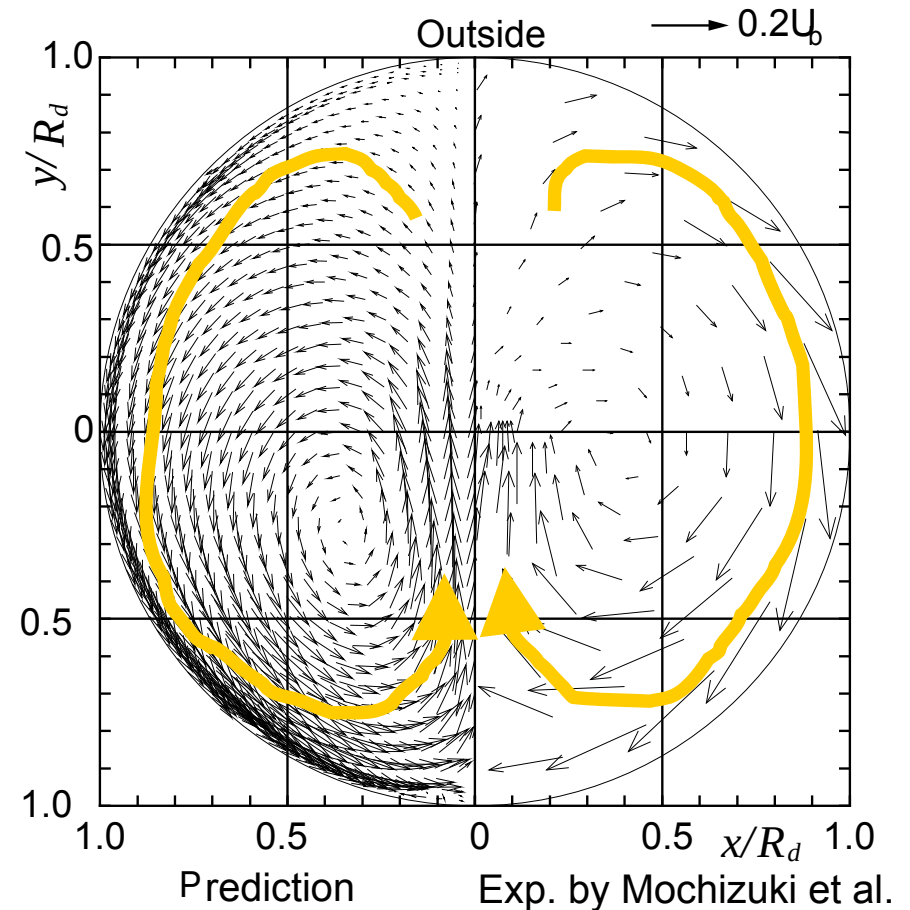


二次流れベクトル図

主流方向速度と二次流れ ($h/D=0.021$)

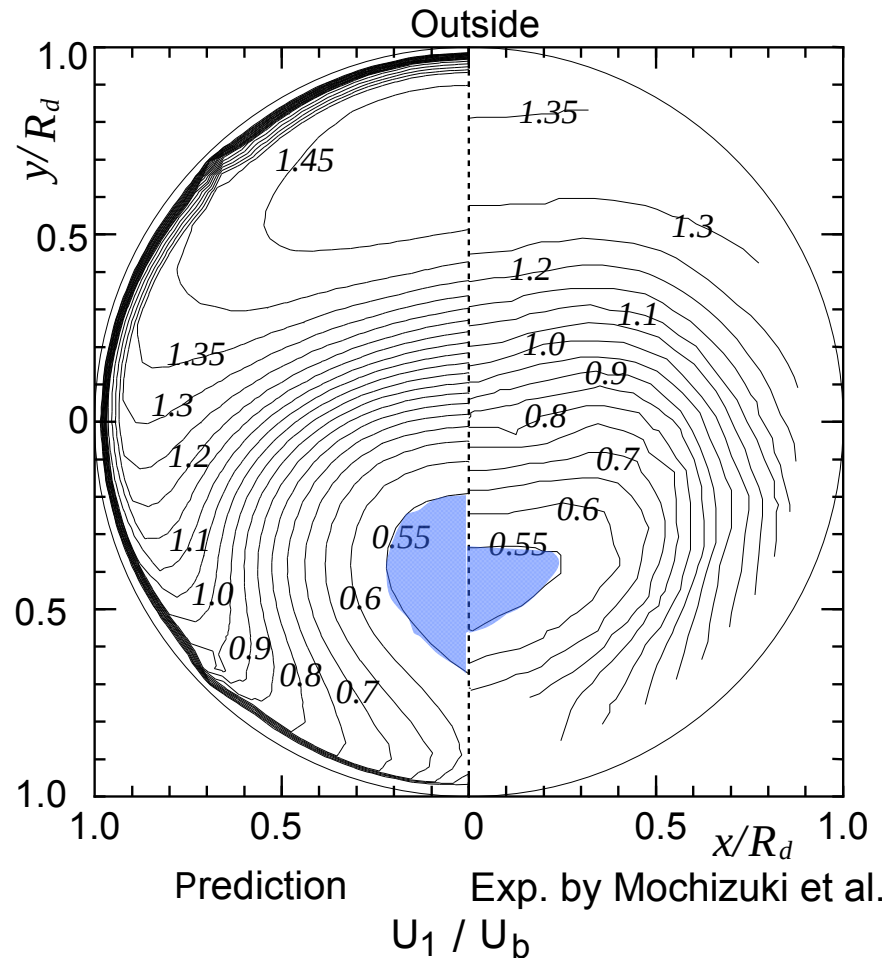


主流方向速度等値線図

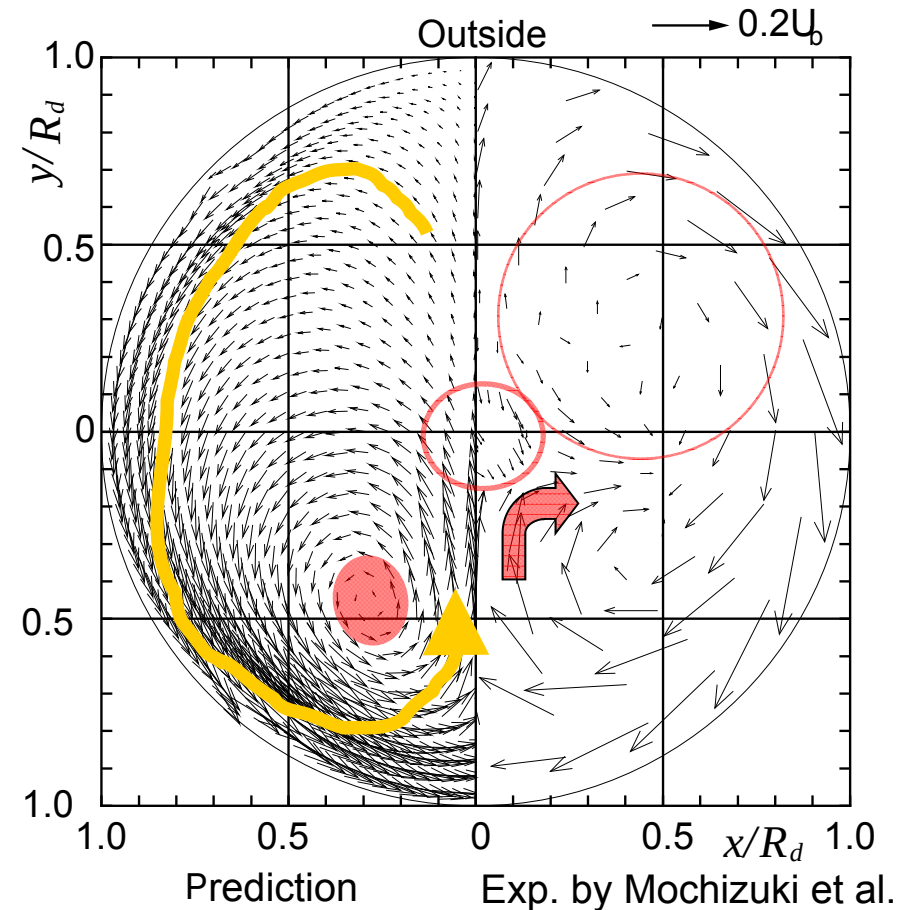


二次流れベクトル図

主流方向速度と二次流れ ($h/D=0.071$)



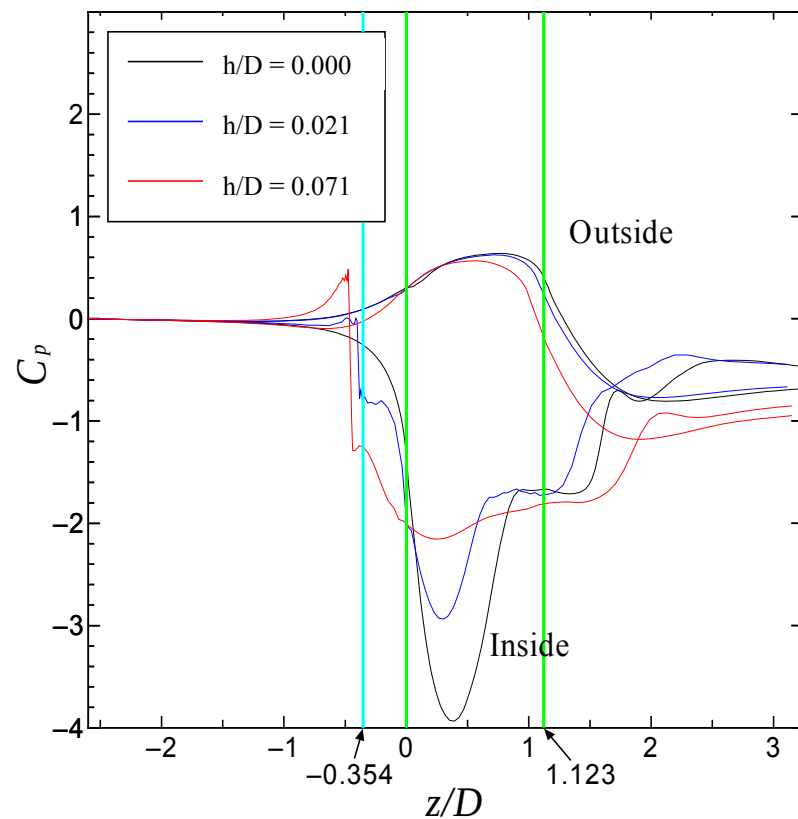
主流方向速度等値線図



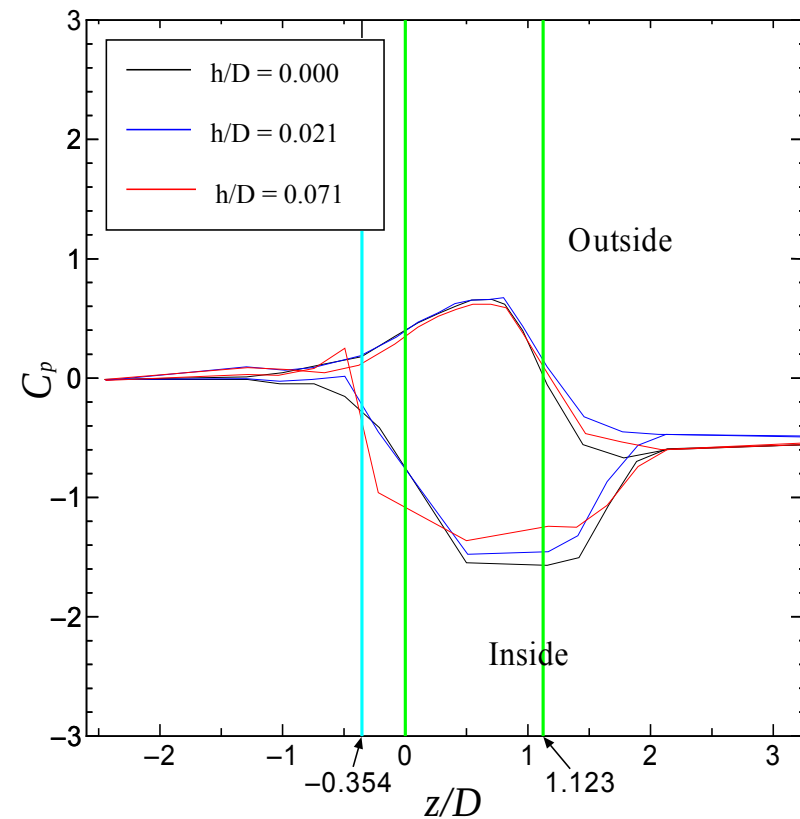
二次流れベクトル図

曲がり部壁面静圧分布比較

壁面静圧係数 $C_p = \frac{2(P - P_0)}{\rho U_b^2}$ (P_0 : 曲がり部開始位置より2.6D上流の壁面静圧)



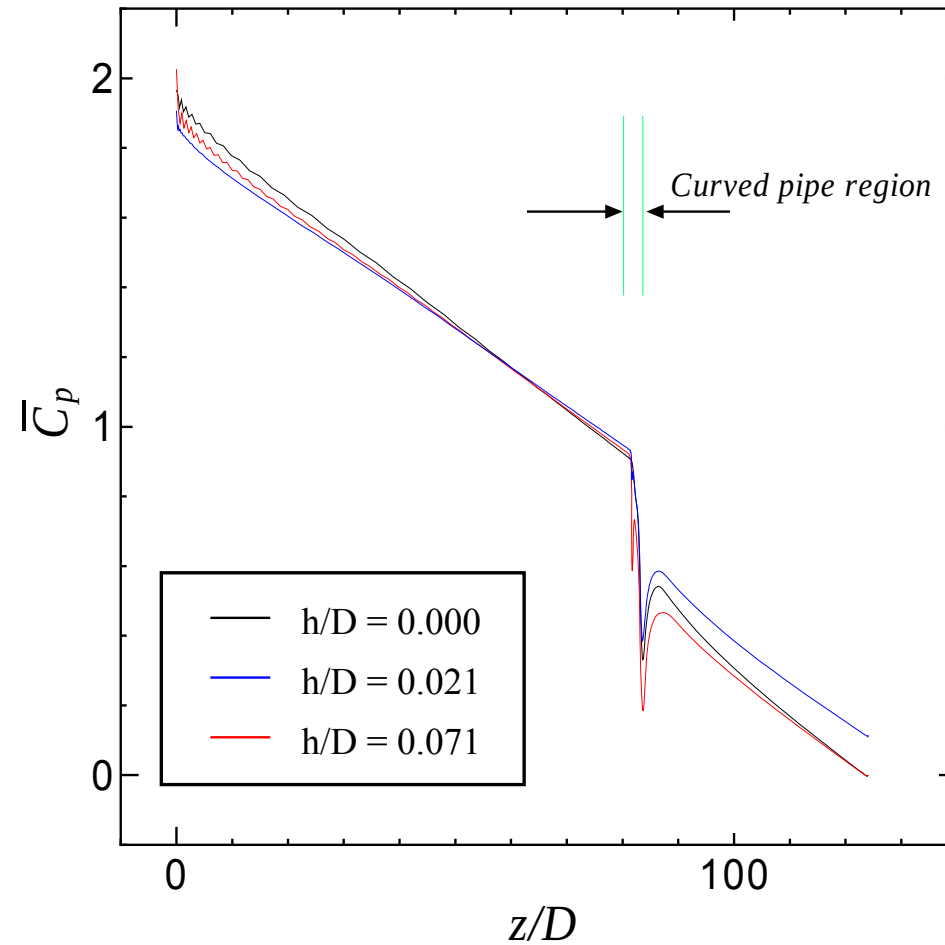
Prediction



Exp. by Mochizuki et al.

曲がり部壁面静圧分布

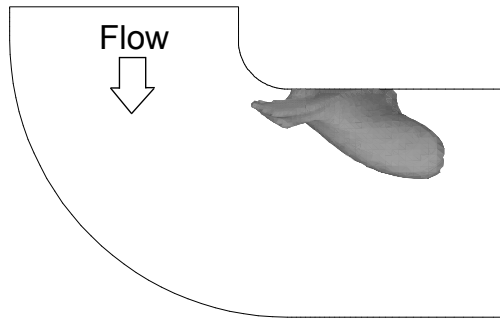
断面内平均压力分布



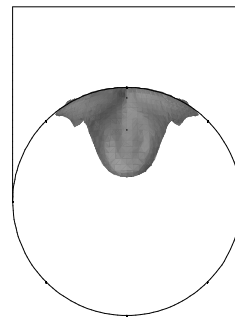
断面内平均压力分布

はく離領域の比較

$h/D = 0.0$

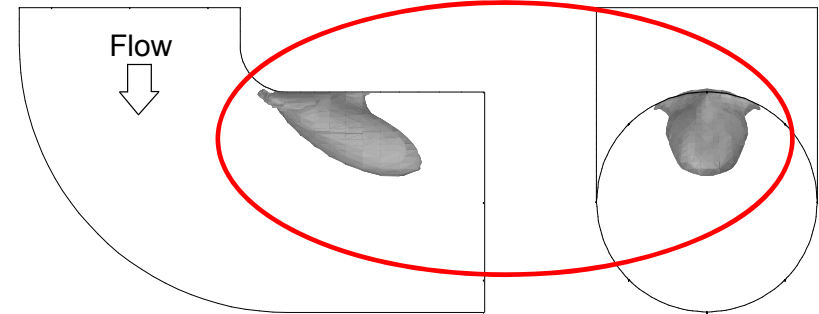


側面断面



円形断面

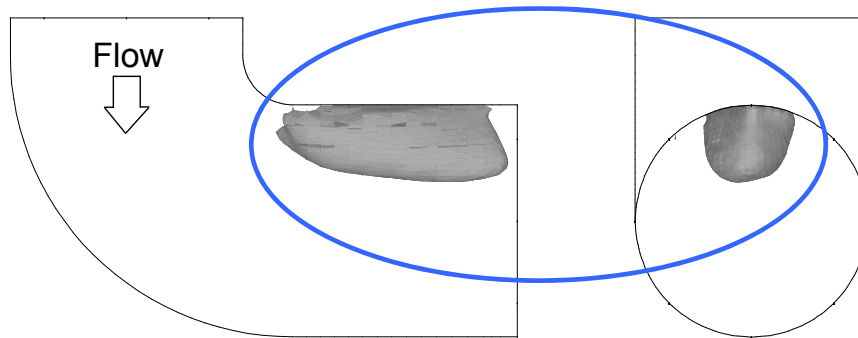
$h/D = 0.021$



側面断面

円形断面

$h/D = 0.071$



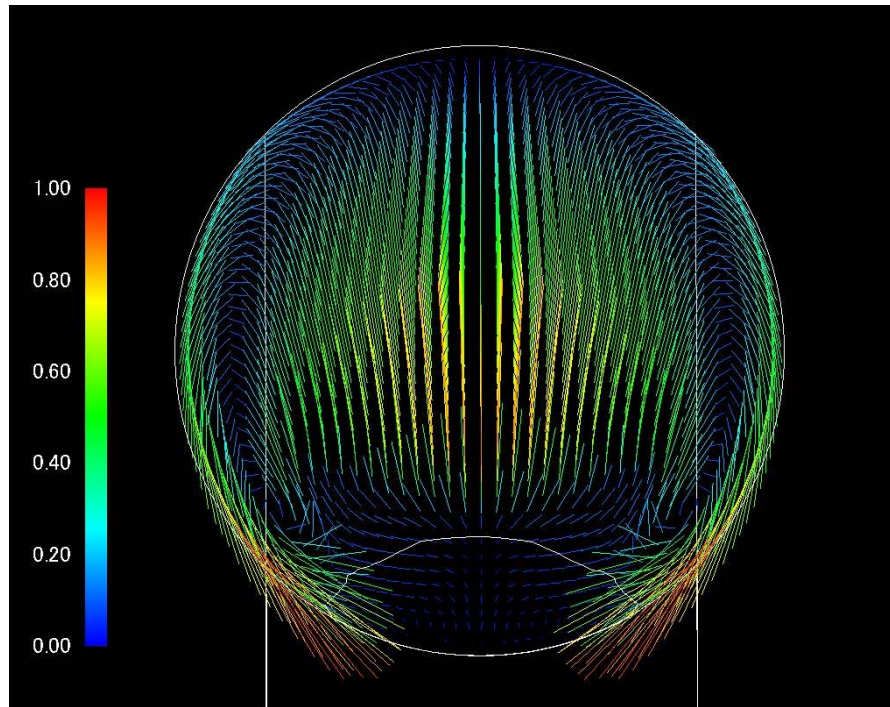
側面断面

円形断面

二次流れとはく離領域比較(I)

表示断面位置: $Z/D = 0.125$

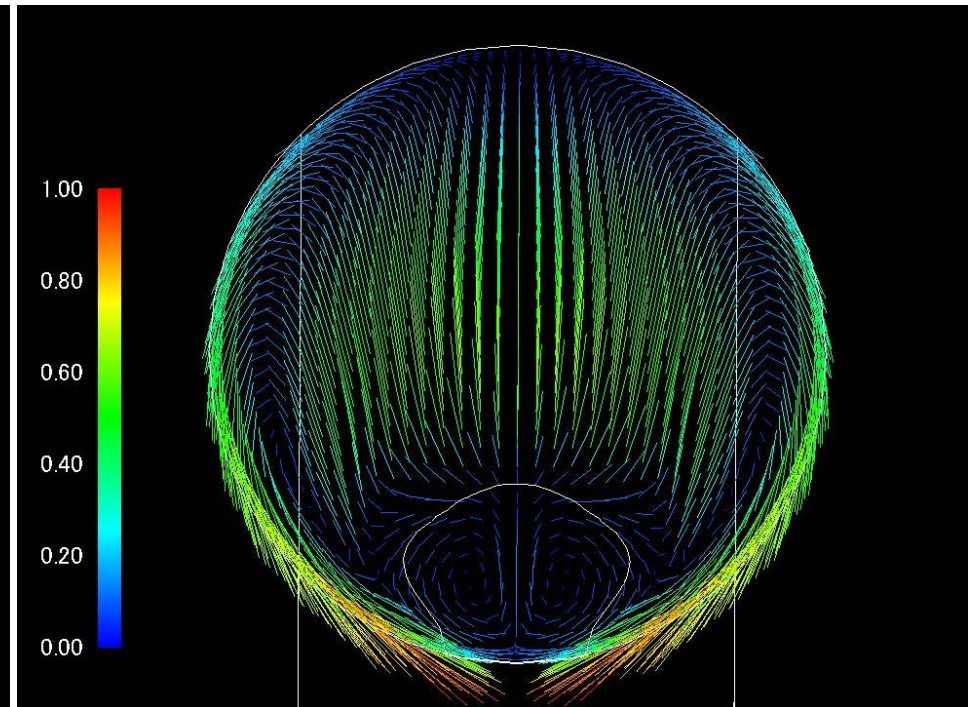
Outside



Inside

$h/D = 0.0$

Outside



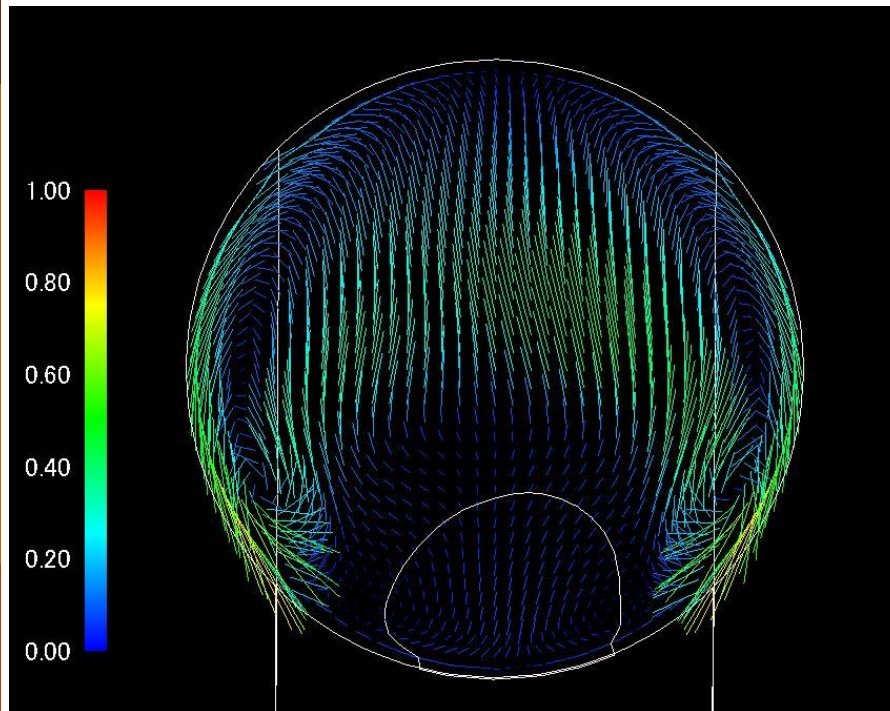
Inside

$h/D = 0.021$

二次流れとはく離領域比較(II)

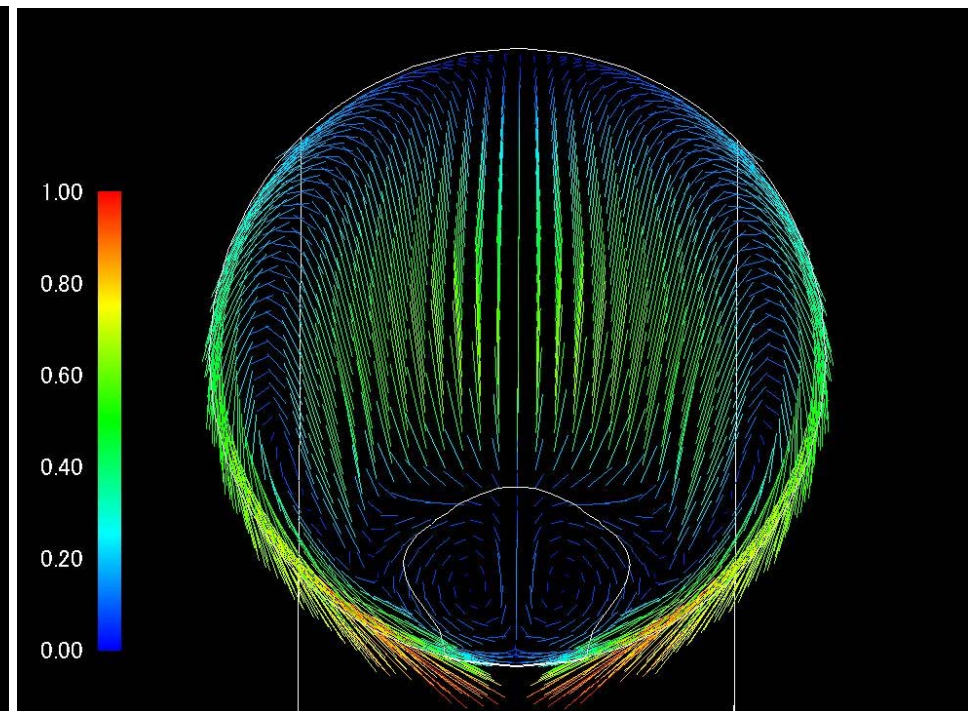
表示断面位置: $Z/D = 0.125$

Outside



Inside
 $h/D = 0.071$

Outside

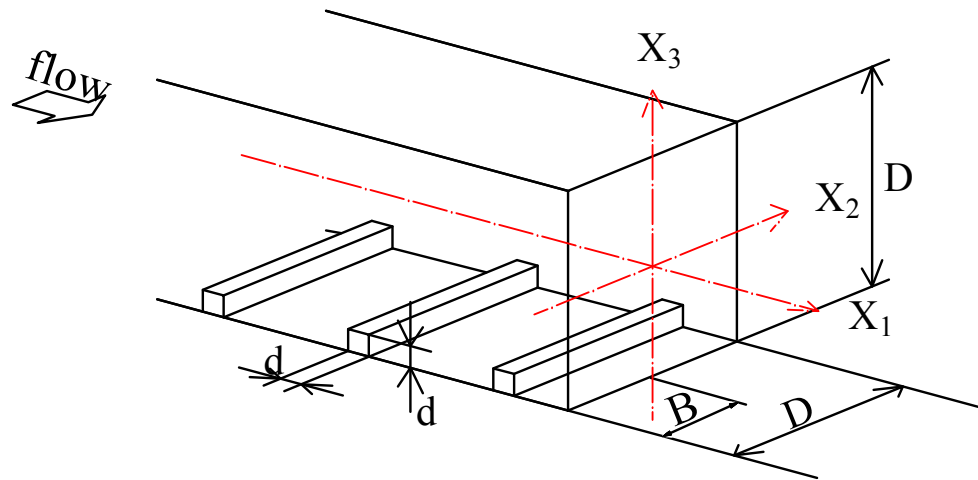


Inside
 $h/D = 0.021$

第2種二次流れ

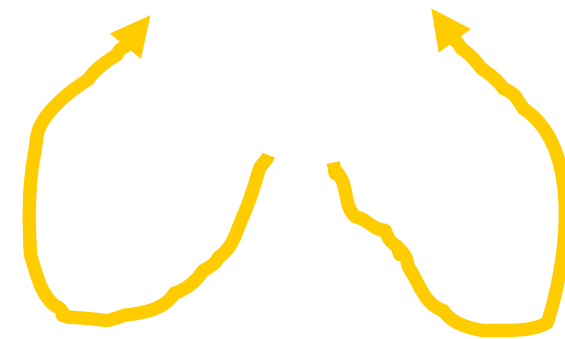
主流方向渦度輸送方程式

$$U_2 \frac{\partial \Omega_1}{\partial x_2} + U_3 \frac{\partial \Omega_1}{\partial x_3} = \frac{\partial^2}{\partial x_2 \partial x_3} (\overline{u_2^2} - \overline{u_3^2}) + \left(\frac{\partial^2}{\partial x_3^2} - \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} \right) \overline{u_2 u_3} + \nu \left(\frac{\partial^2 \Omega_1}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 \Omega_1}{\partial x_3^2} \right)$$
$$\Omega_1 = \frac{\partial U_3}{\partial x_2} - \frac{\partial U_2}{\partial x_3}$$



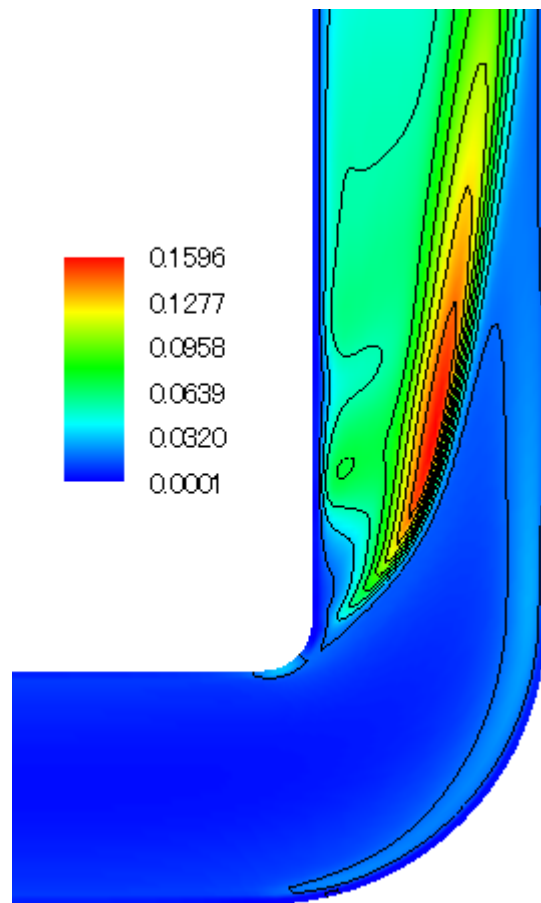
周期リブを有する正方形断面管路

Re=6,5000, d/D=0.02

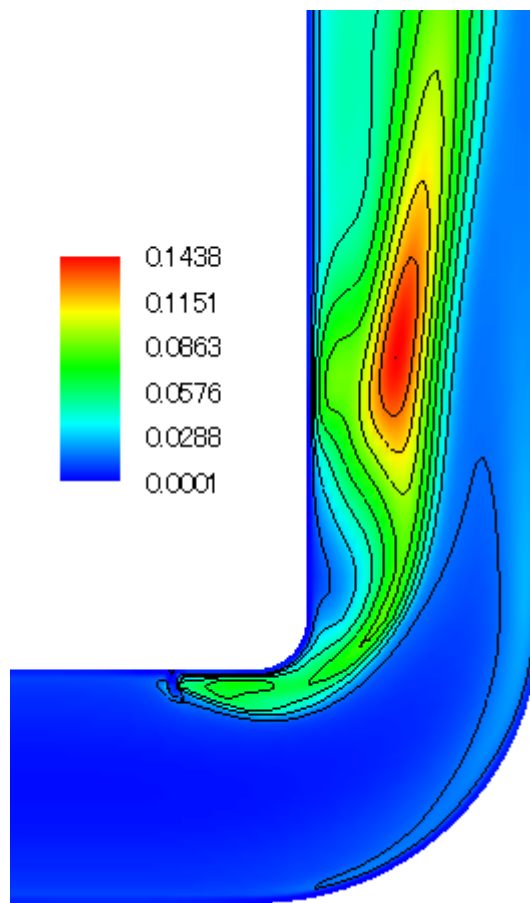


第2種二次流れの予測結果

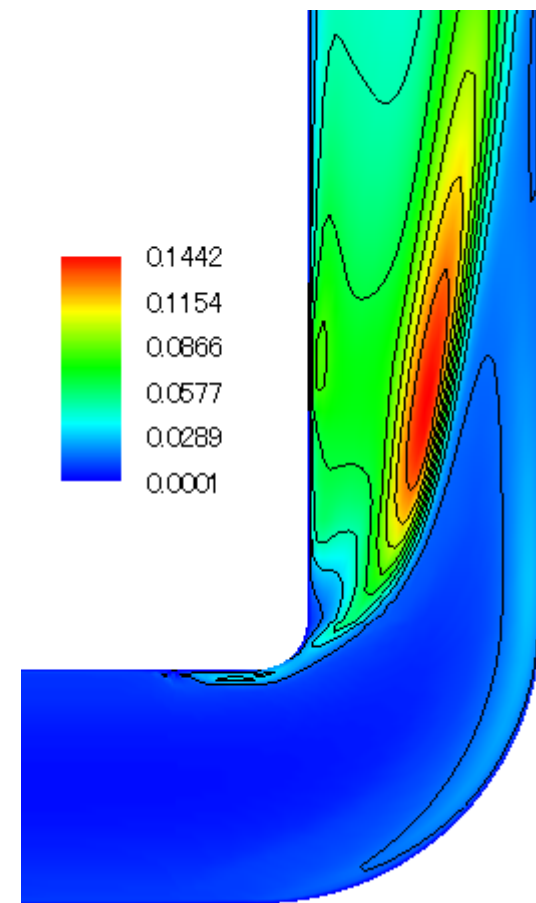
乱流エネルギー分布比較



$h/D = 0.0$



$h/D = 0.021$



$h/D = 0.071$

結論

- 計算は、主流方向速度分布を定性的に予測することができるが、定量的比較においては最大値、最小値に多少の差が見られる.
- 計算は、ハーフトリップなし、 $h/D=0.021$ の場合の二次流れ分布は比較的良好に予測するが、 $h/D=0.071$ の場合には差異が認められた. ただし、特徴的現象は再現している.
- ハーフトリップを設けることより圧力損失低減効果が実験より示されているが計算でも確認できた.
- 圧力損失低減のメカニズムについて提案した.
- 代数レイノルズ応力モデルにて、ハーフトリップを含む複雑乱流場を解析することが可能であることを示した.