

回転を有する粗面壁曲がり管路内の三次元乱流構造解析

正 杉山 均 （宇都宮大学大学院工学研究科）

○ 渡辺 智力 （日立ホーム・アンド・ライフ・ソリューション）

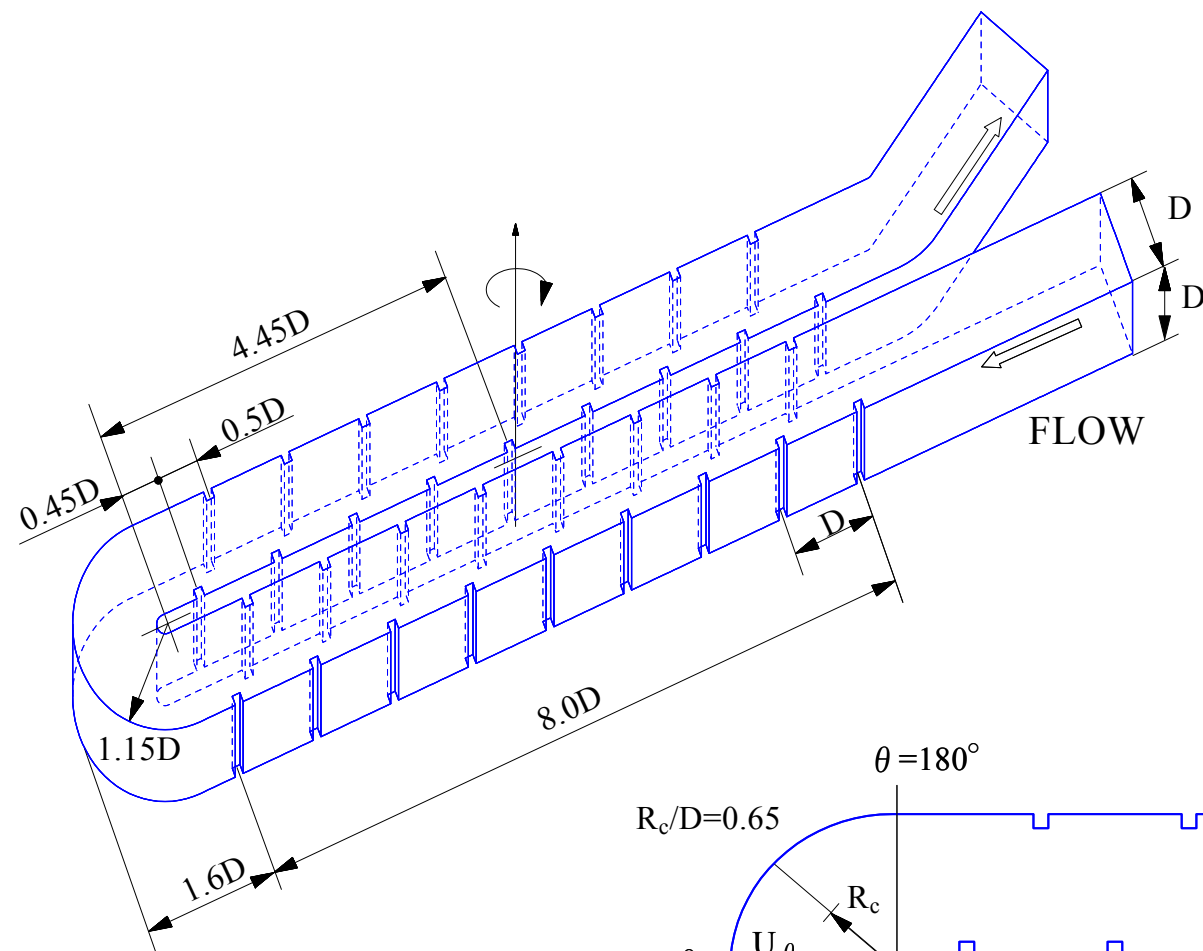
緒 言

タービン翼の冷却問題は、ガスタービン性能、材料の疲労寿命に直接的に影響をする因子である。一般にタービン翼の冷却方法は、冷却媒体をタービン翼表面に吹き出す膜冷却と、タービン翼内に設けられた内部流路内での強制対流冷却とに分類される。本解析の場合、後者の流れ場を対象とした。

こうした流れ場では、はく離再付着現象、さらにタービン翼回転によるコリオリ力、遠心力の相互干渉現象が互いに関連し流れは複雑に変化する。

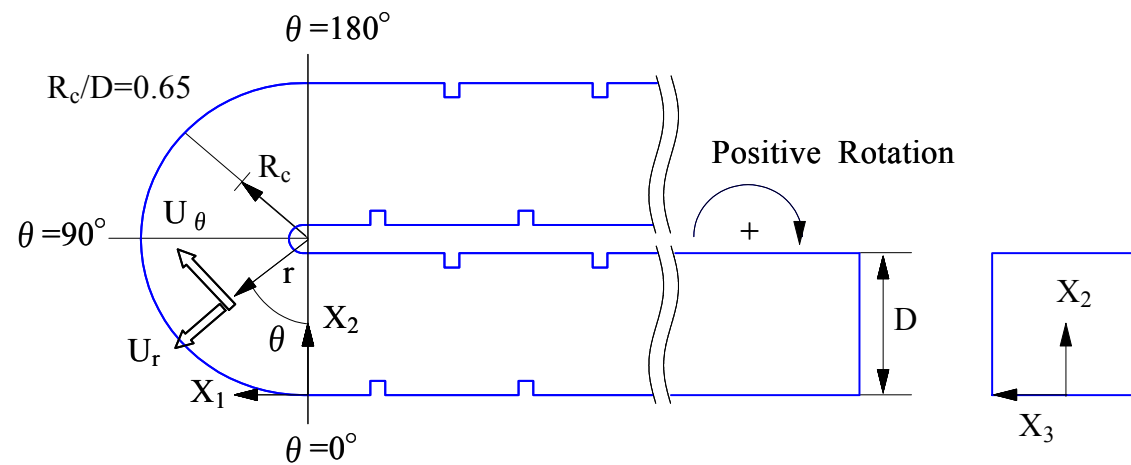
目 的

本研究では、最近報告された Iacovidesらの実験、特に回転を有する場合を対象に、レイノルズ応力輸送方程式の対流、拡散項を代数式化した代数応力モデルを用い数値解析を行う。解析結果は実験値と比較し、その適用限界を明らかにすると同時に、その流動挙動について新たな知見を得ることを目的とする。



Rotation数

$$Ro = \Omega D / U_b$$



実験装置概略図及び座標系

基礎方程式

▶連続の式

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

▶運動方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} U_i U_j = & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right) \\ & - 2 \varepsilon_{ijp} \Omega_p U_j - (\Omega_j X_j \Omega_i - \Omega_j X_j \Omega_j) \end{aligned}$$

▶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

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

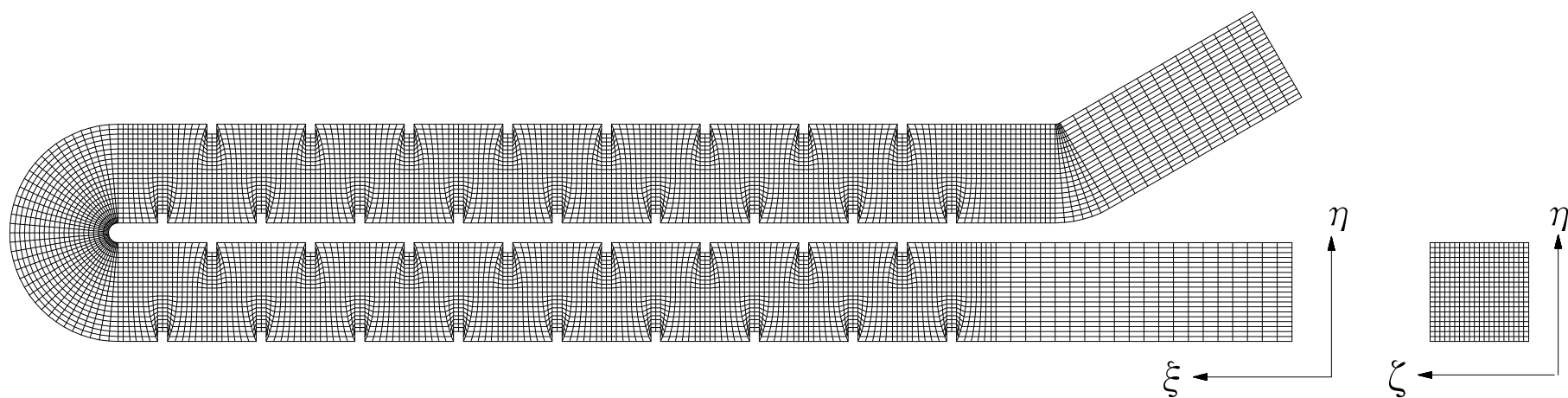
▶モデル化したレイノルズ応力輸送方程式

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

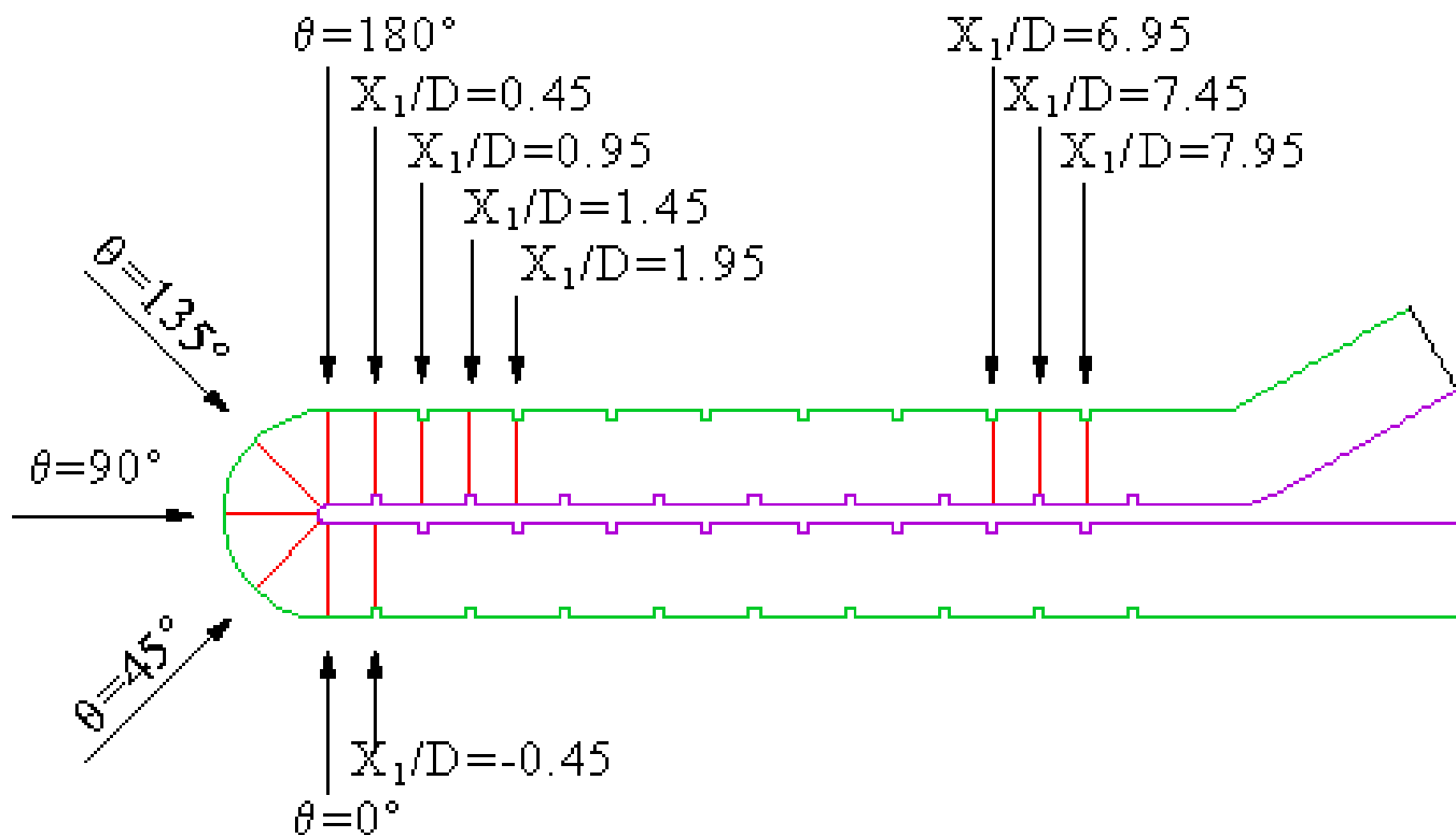
再配分項のモデル化

$\left[\pi_{ij} + \pi_{ji} \right]_1$	$-C_1 \cdot \frac{\varepsilon}{k} \left(\overline{u_i u_j} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \right)$
$\left[\pi_{ij} + \pi_{ji} \right]_2$	$-\frac{C_2 + 8}{11} \left(P_{ij} - \frac{2}{3} P_k \delta_{ij} \right) - \zeta \cdot k \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{8C_2 - 2}{11} \left(D_{ij} - \frac{2}{3} P_k \delta_{ij} \right)$
$C_1 = C_1^* + C_1' \cdot f\left(\frac{L}{X_w}\right) \quad C_2 = C_2^* + C_2' \cdot f\left(\frac{L}{X_w}\right) \quad \zeta_1 = \zeta_1^* + \zeta_1' \cdot f\left(\frac{L}{X_w}\right)$ $P_{ij} = -\overline{u_i u_k} \frac{\partial U_j}{\partial x_k} - \overline{u_j u_k} \frac{\partial U_i}{\partial x_k} - 2\Omega_k (\overline{u_j u_m \varepsilon_{ikm}} + \overline{u_i u_m \varepsilon_{jkm}})$ $D_{ij} = -\overline{u_i u_k} \frac{\partial U_k}{\partial x_j} - \overline{u_j u_k} \frac{\partial U_k}{\partial x_i} \quad P_k = -\overline{u_k u_l} \frac{\partial U_k}{\partial x_l} \quad f\left(\frac{L}{X_w}\right) = \frac{C_\mu^{3/4}}{\kappa} \frac{k^{3/2}}{\varepsilon} \frac{1}{X_w}$	

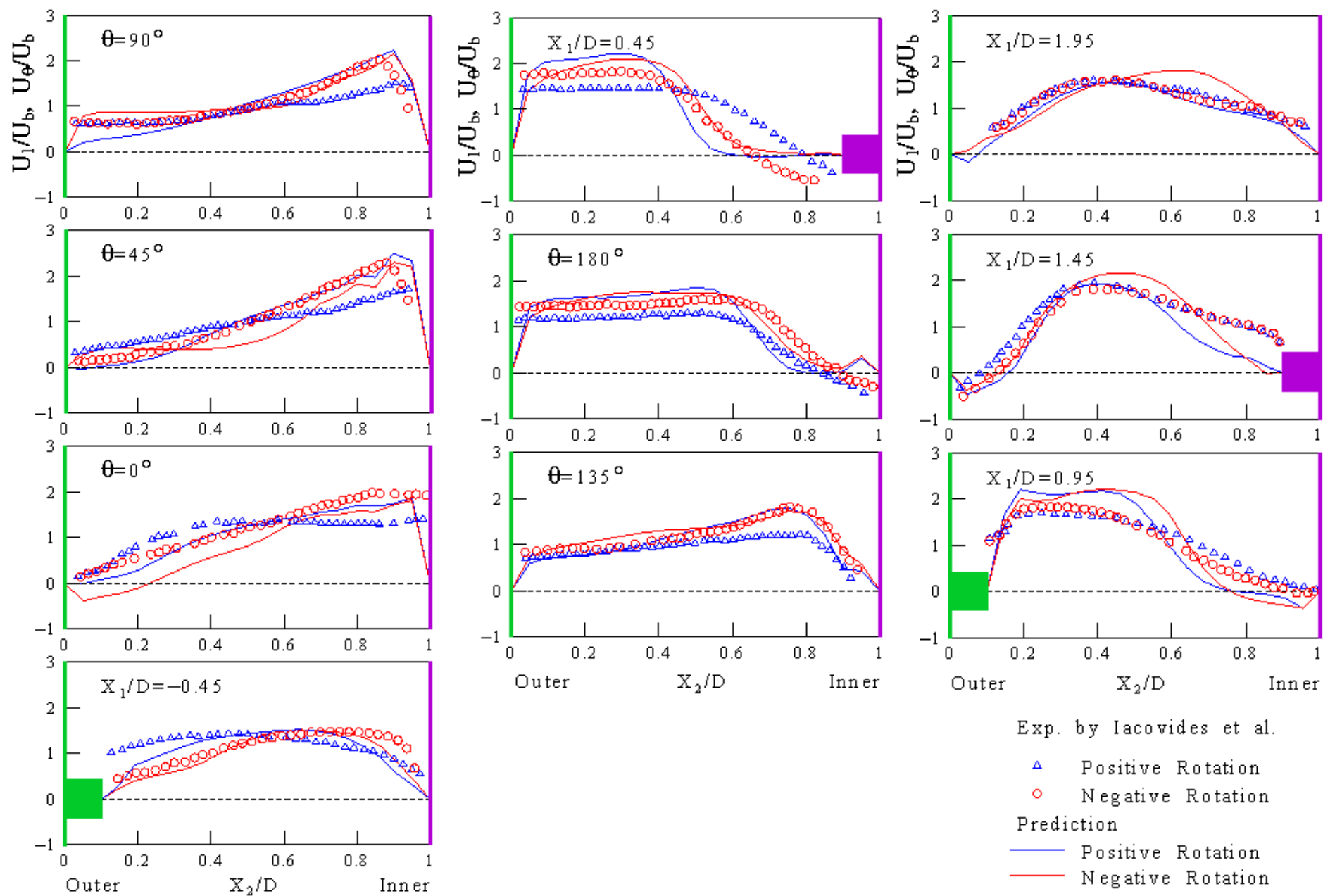
C_1^*	C_2^*	ζ^*	C_1'	C_2'	ζ'
1. 40	0. 44	0. 16	-0. 35	0. 12	0. 10



計算格子

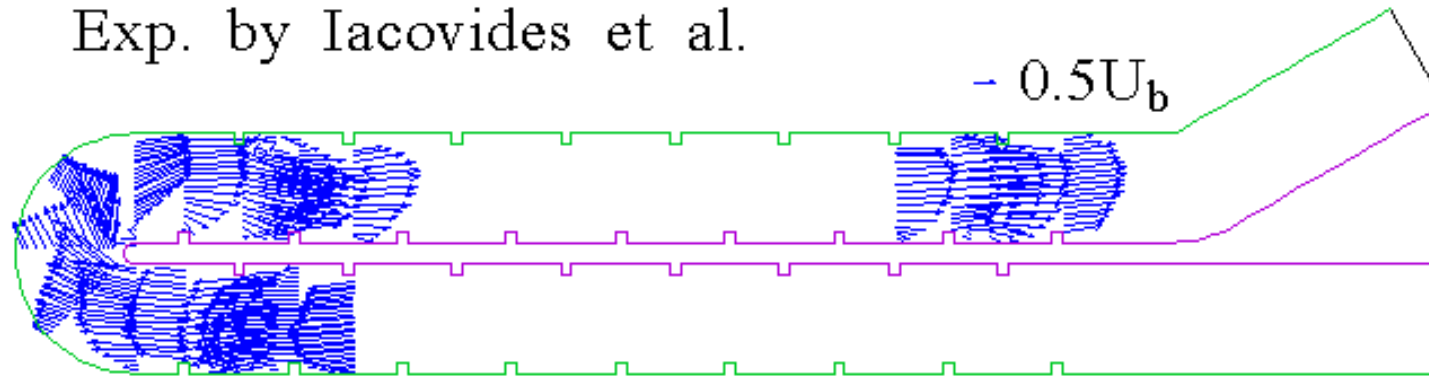


比較断面

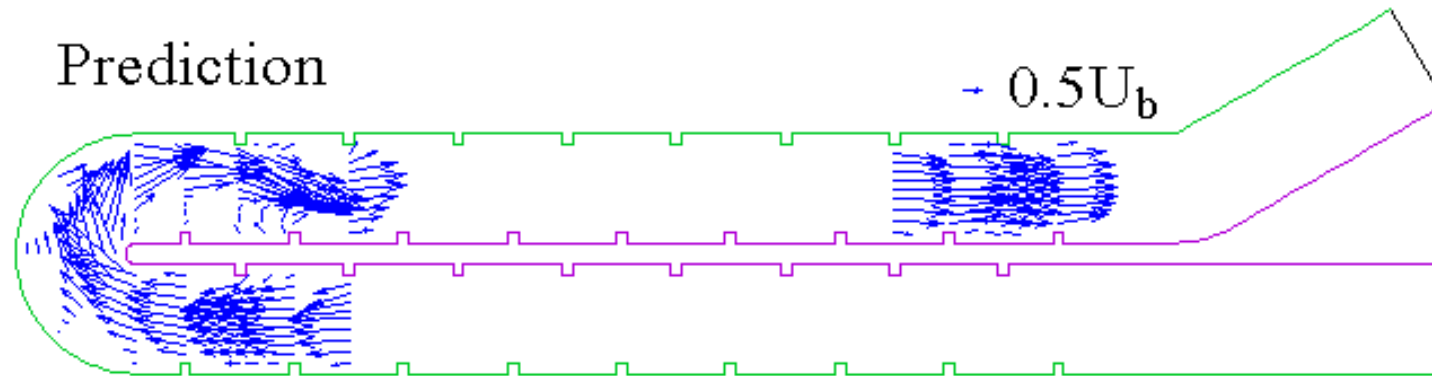


主流方向速度比較図

Exp. by Iacovides et al.

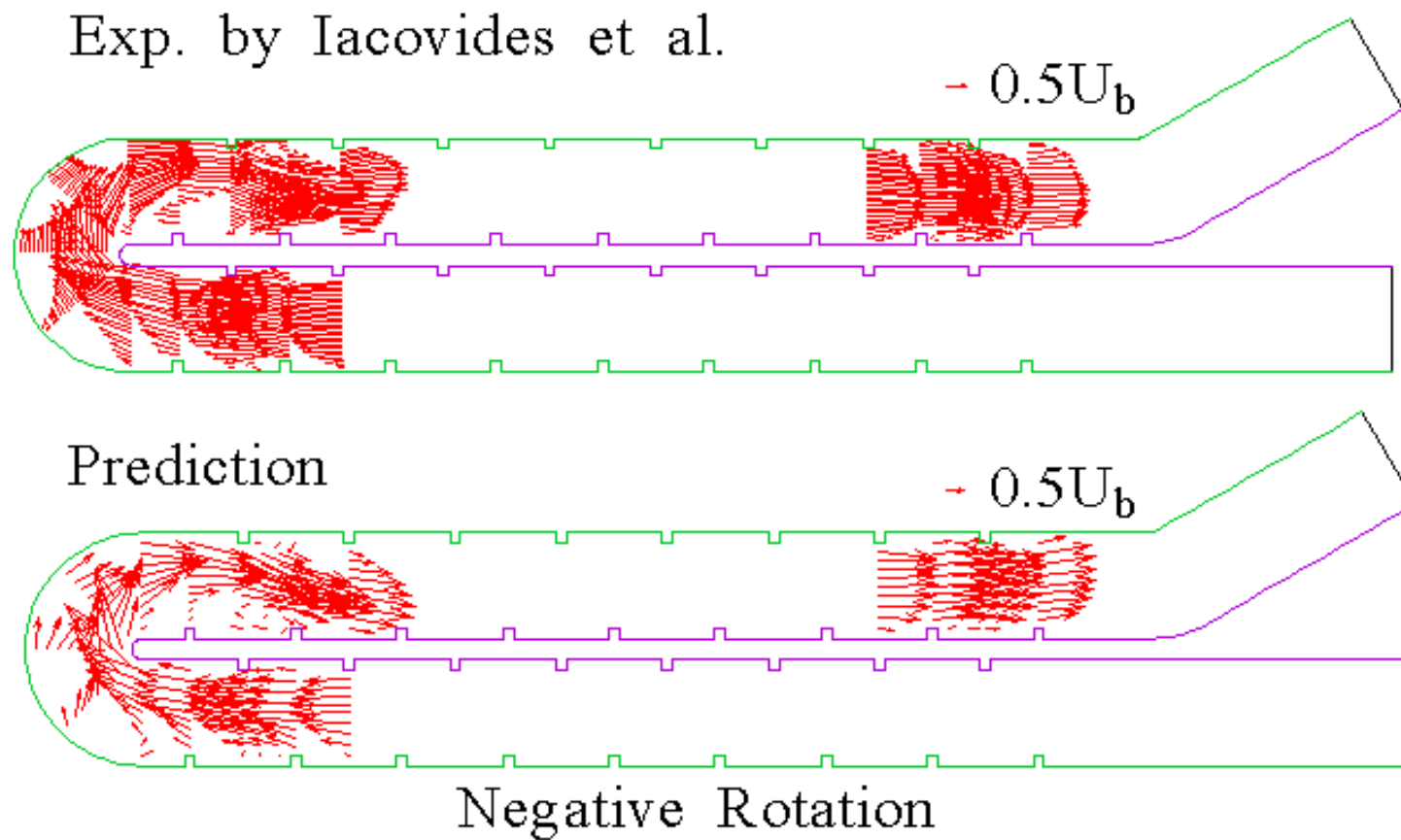


Prediction

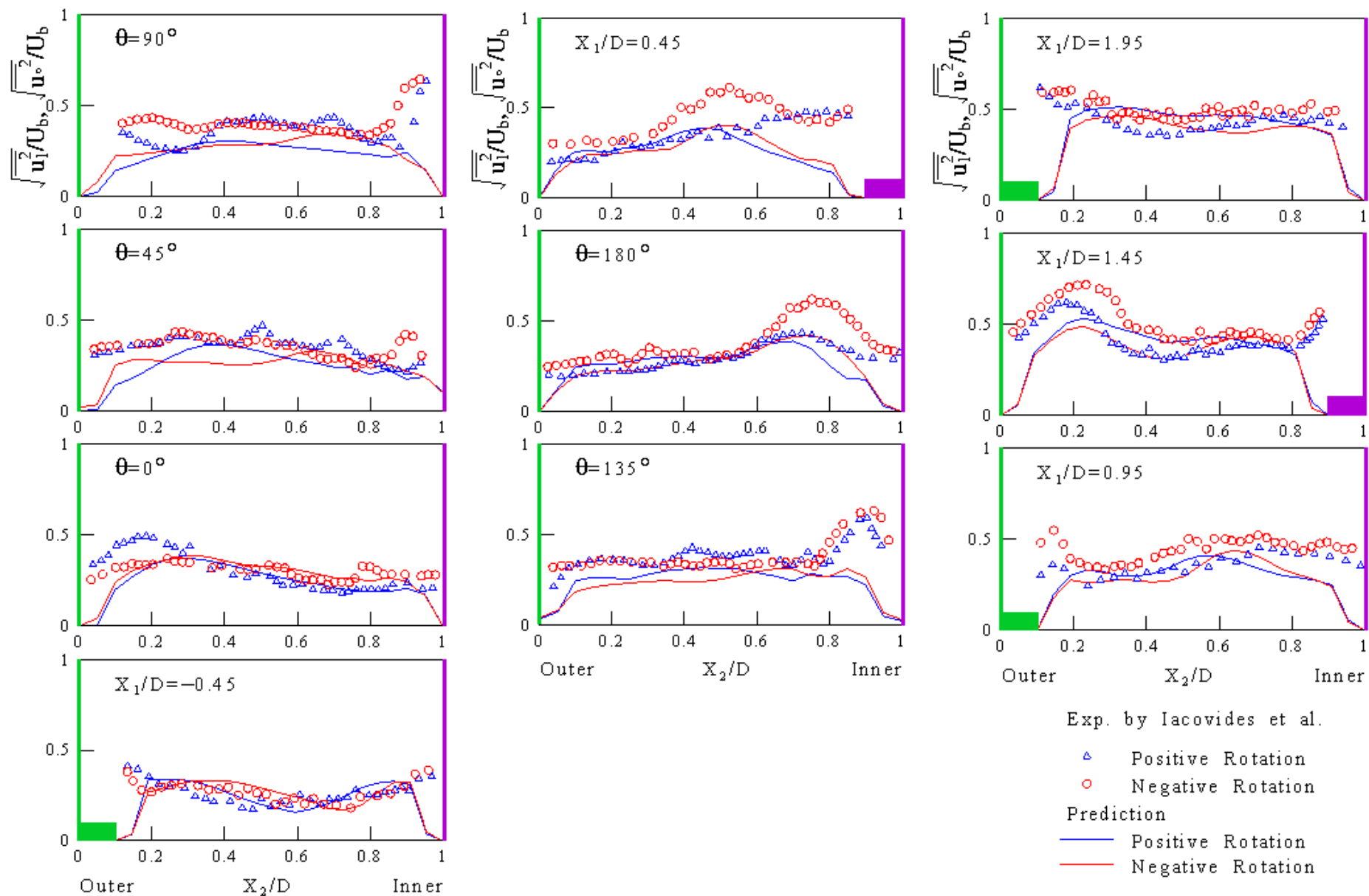


Positive Rotation

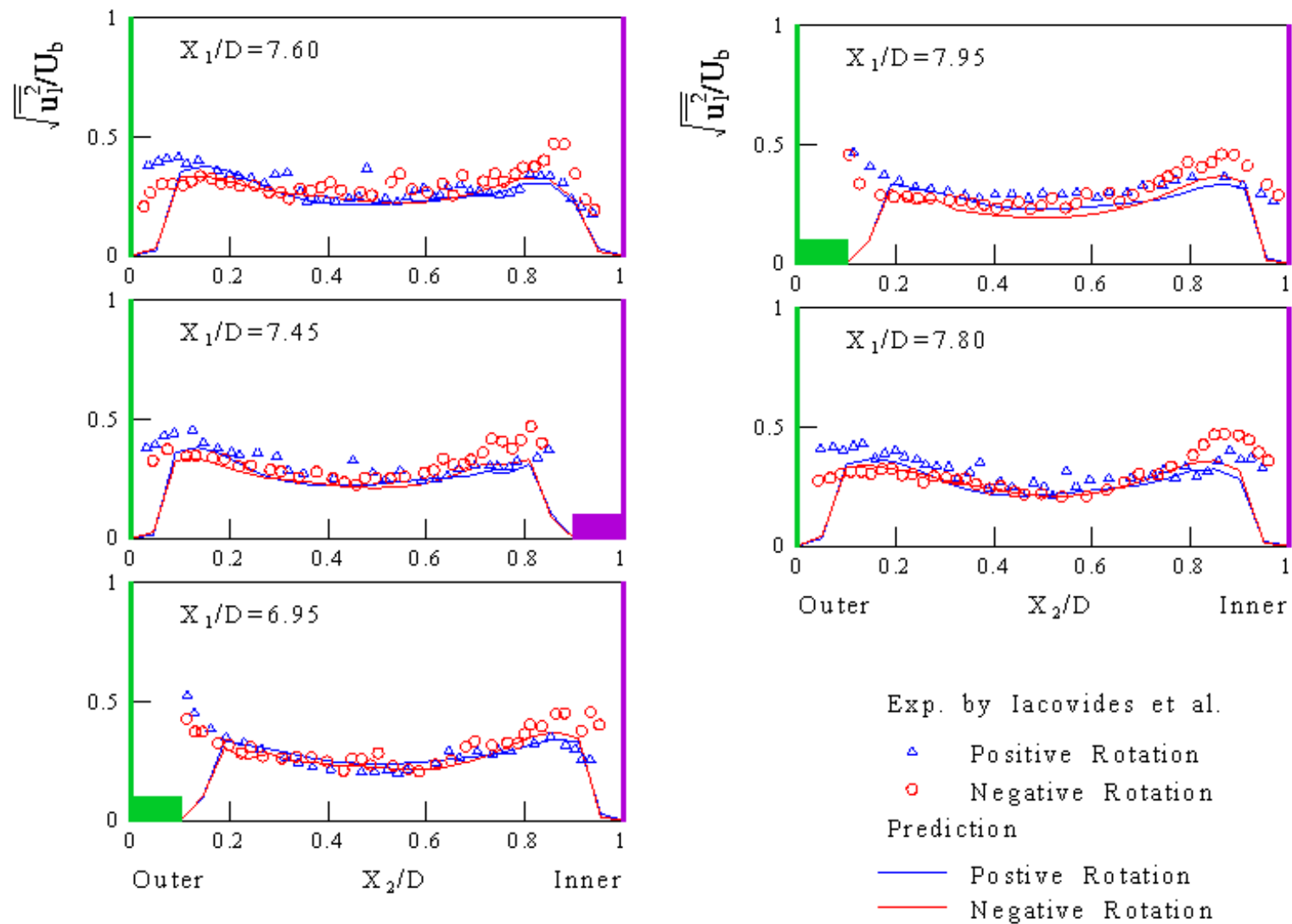
流れ方向ベクトル線比較図



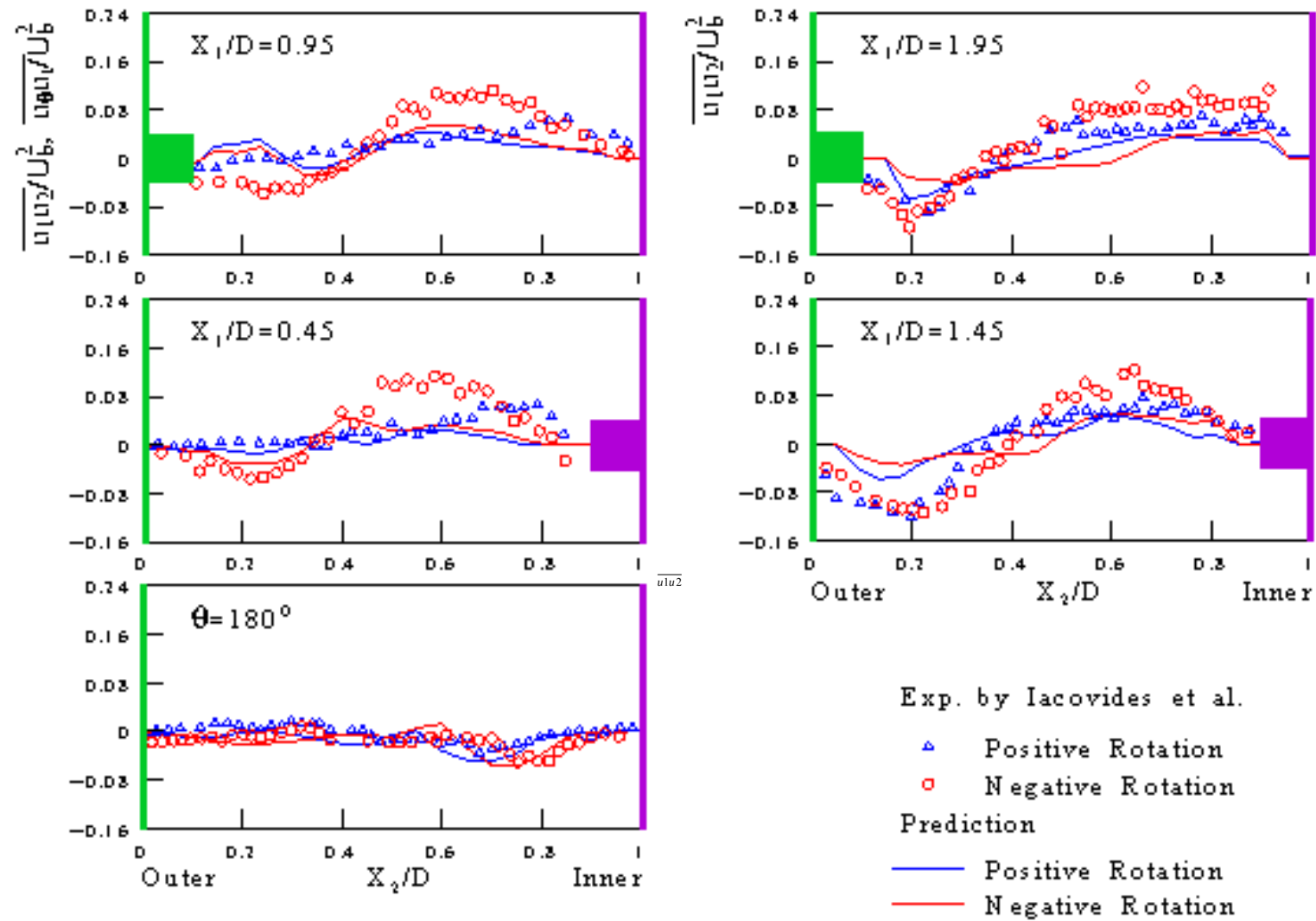
流れ方向ベクトル線比較図



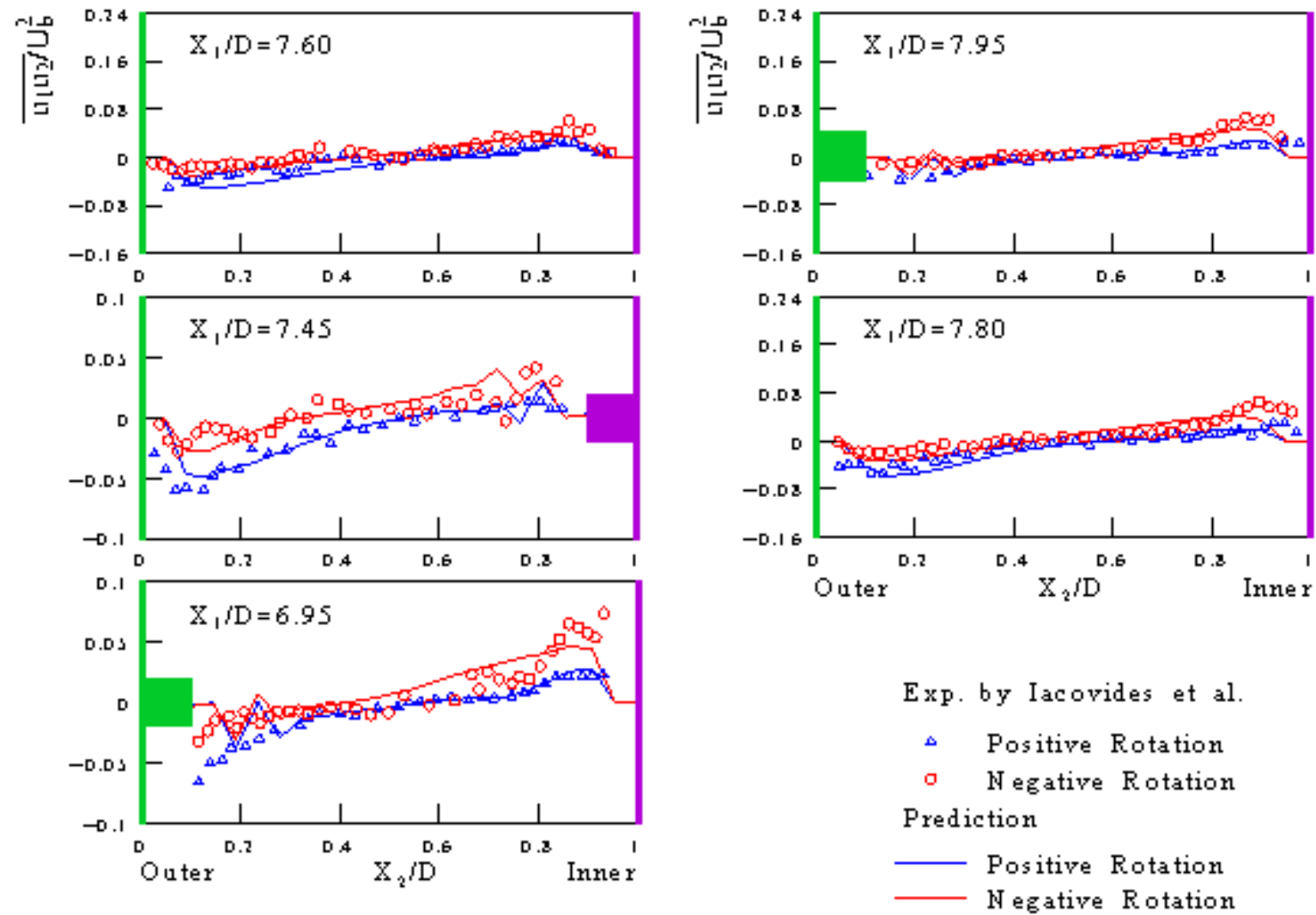
主流方向垂直応力比較図



主流方向垂直応力比較図



せん断応力 $\overline{u_1 u_2}$ 比較図



せん断応力 $\overline{u_1 u_2}$ 比較図

結 論

- ▶ 正回転の場合、コリオリ力は内壁から外壁に向かい作用するため、曲がり管路内の主流方向速度は一様化の、逆回転の場合は管路内壁に高速流体領域を形成する傾向を示す。計算は逆回転場における主流方向速度を比較的良好に予測した。
- ▶ 曲がり管路出口下流のレイノルズ応力分布を計算は定量的に予測していないが、これは、はく離点、再付着点を正確に予測していないことに起因する。こうしたはく離の影響の無い下流領域では正回転、逆回転とも比較的良好に応力分布を予測する。
- ▶ いくつかの点で実験値と差はあるが、回転を有する粗面壁曲がり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。