

円柱を有する矩形断面管路内の 乱流構造解析

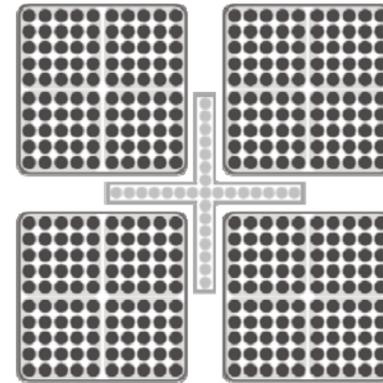
- 小手森 俊紀（宇都宮大学大学院工学研究科）
- 杉山 均（宇都宮大学工学研究科）
- 加藤 直人（宇都宮大学工学研究科）
- 寺田 敦彦（日本原子力研究開発機構）
- 上地 優（日本原子力研究開発機構）
- 日野 竜太郎（日本原子力研究開発機構）

緒言

円柱群周りの流体挙動を知ることは、機器の冷却性能や安全性を考慮するうえで重要。

例として、

原子炉は、炉心に燃料棒が円柱群を成しており、燃料棒周りの流体挙動を事前に予測することが必要となる。



原子炉内燃料集合体

緒言

流れを予測する手段として・・

実験解析

信頼性は**高い**
高コスト・長時間

数値解析

低コスト・短時間
信頼性は**低い**

乱流場を正確に予測できる**数値解析**が必要

目的

解析対象:「流れに平行に置かれた円柱を含む矩形管路内の実験」
M.S.Guellouz , S.Tavoularis

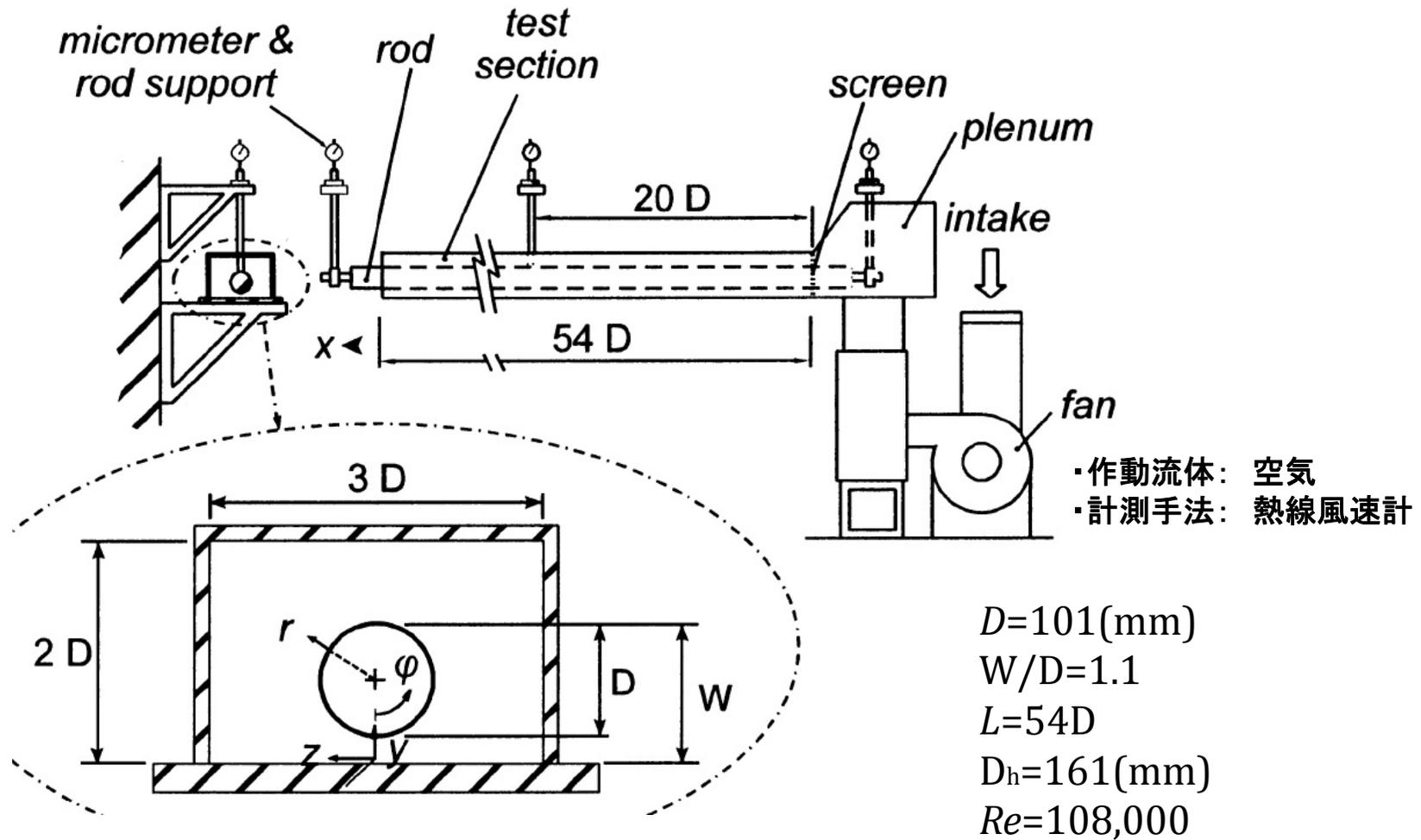


代数レイノルズ応力モデルを用いた数値解析を行う。

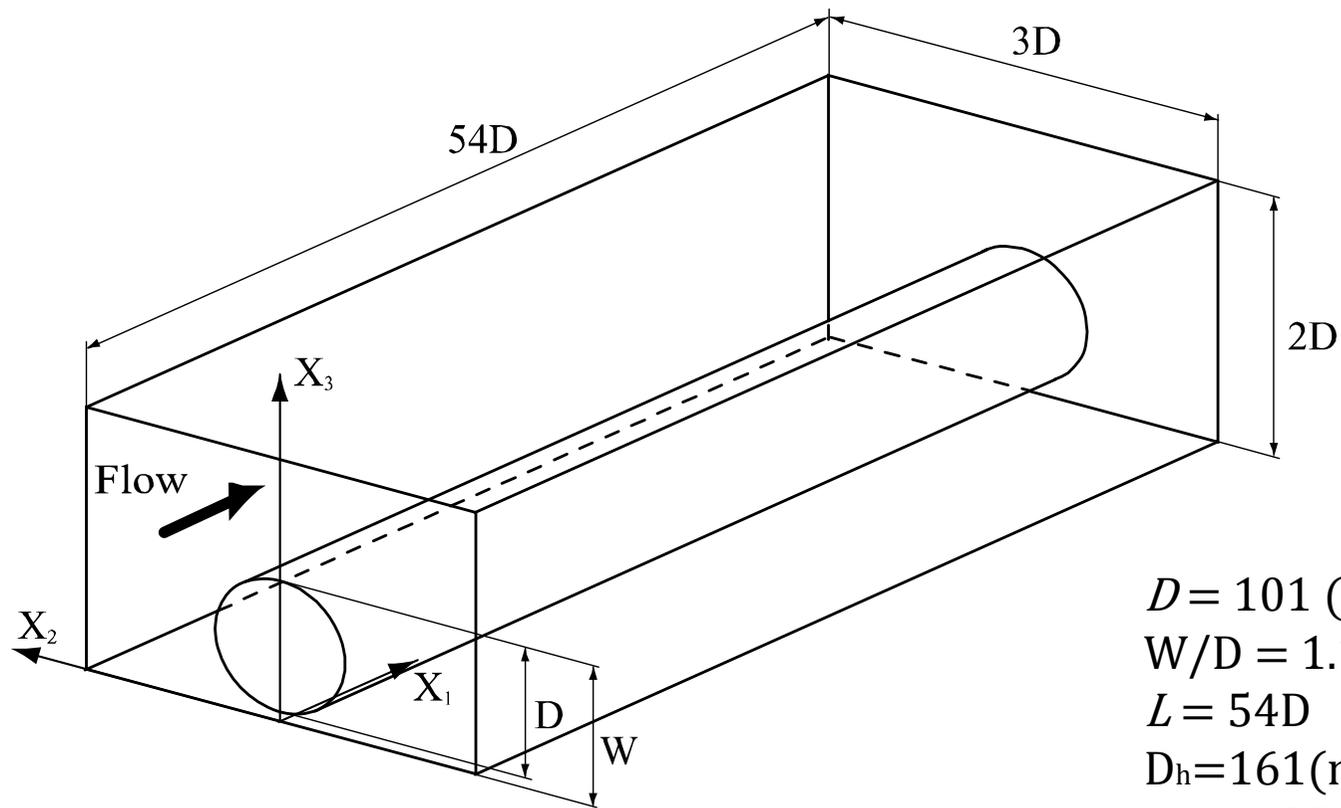
- 速度場とレイノルズ応力6成分について、計算結果を実験結果と比較する。
- 第2種二次流れと脈動流の存在を確認する。(第2種二次流れについては, D.Chang, S.Tavoularis が行った数値解析の結果と比較する。)

本解析手法の妥当性、有用性について検討する。

実験装置概略図



流路概略図および座標系



$D = 101$ (mm)
 $W/D = 1.1$
 $L = 54D$
 $D_h = 161$ (mm)
 $Re = 108,000$

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

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

□ 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

□ モデル化したレイノルズ応力輸送方程式

$$\underbrace{\frac{Du_i u_j}{Dt}}_{\text{対流項}} - \underbrace{Diff_k}_{\text{拡散項}} = \frac{\overline{u_i u_j}}{k} (P_k - \varepsilon) = \underbrace{P_{ij} + [\pi_{ij} + \pi_{ji}]_1 + [\pi_{ij} + \pi_{ji}]_2}_{\text{圧力・ひずみ相関項}} - \underbrace{\frac{2}{3} \delta_{ij} \varepsilon}_{\text{散逸項}}$$

□ モデル化された圧力・歪相関項および定数系

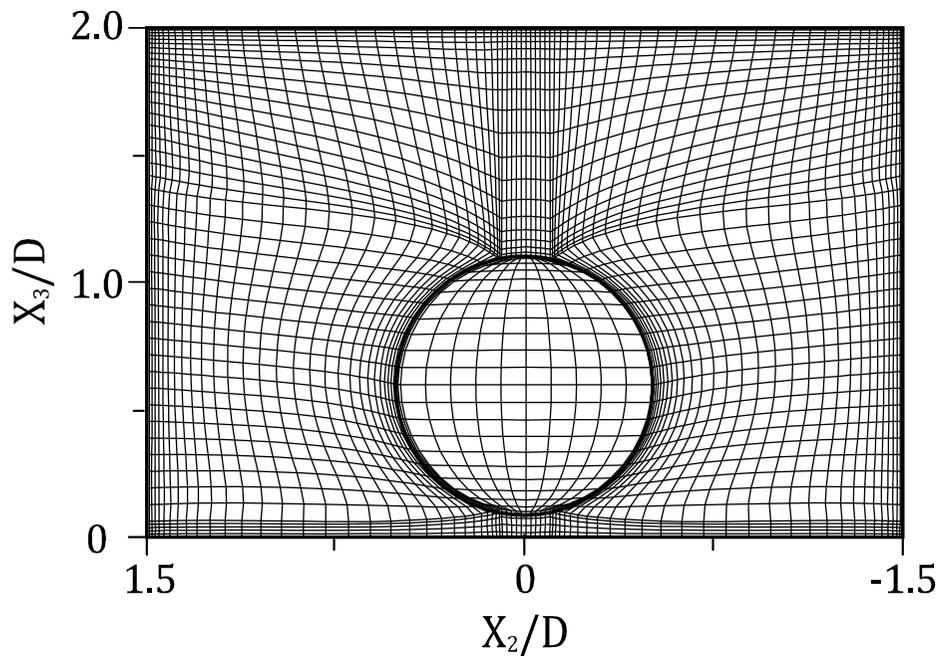
$$[\pi_{ij} + \pi_{ji}]_1 = -C_1 \frac{\varepsilon}{k} \left(\overline{u_i u_j} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \right) \quad [\pi_{ij} + \pi_{ji}]_2 = -\frac{C_2 + 8}{11} \left(P_{ij} - \frac{2}{3} P_k \delta_{ij} \right) + \zeta k \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}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

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

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

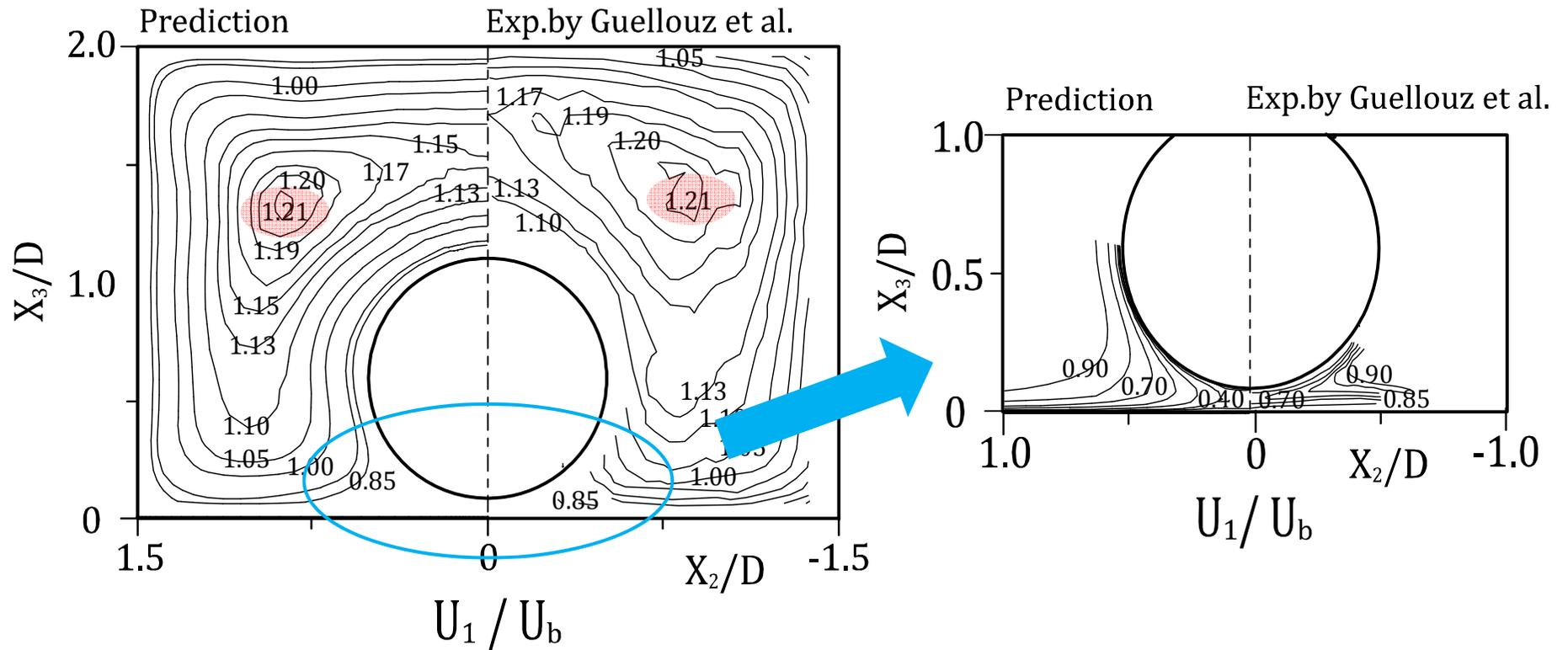
C_1^*	C_2^*	ζ^*	C_1'	C_2'	ζ'	C_μ	κ
1.4	0.44	-0.16	-0.35	0.12	-0.1	0.09	0.42

計算格子



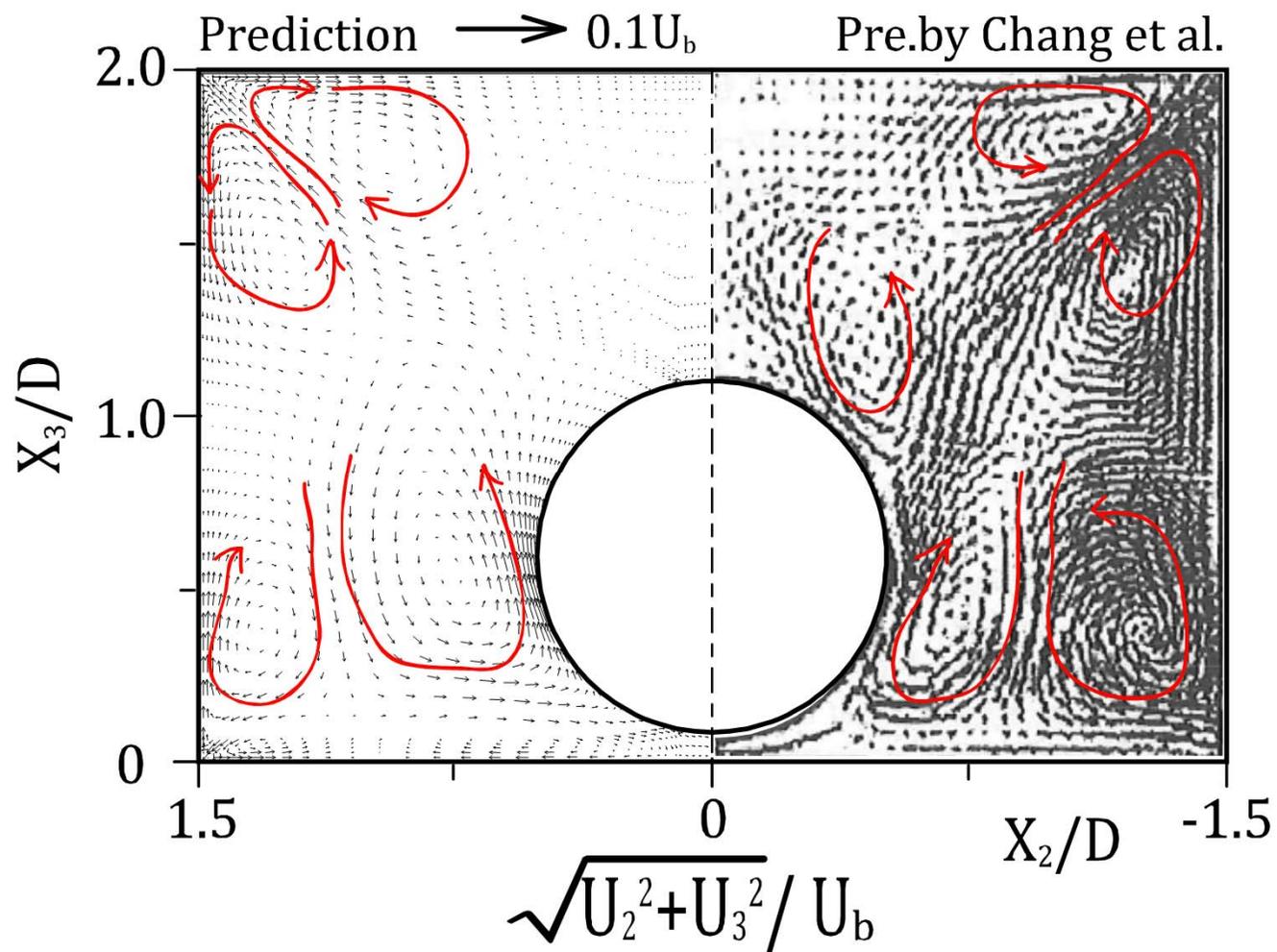
断面： $X_2 \times X_3 = 71 \times 45$
主流方向： $X_1 = 100$
総格子点数 = 319,500

主流方向平均速度の比較

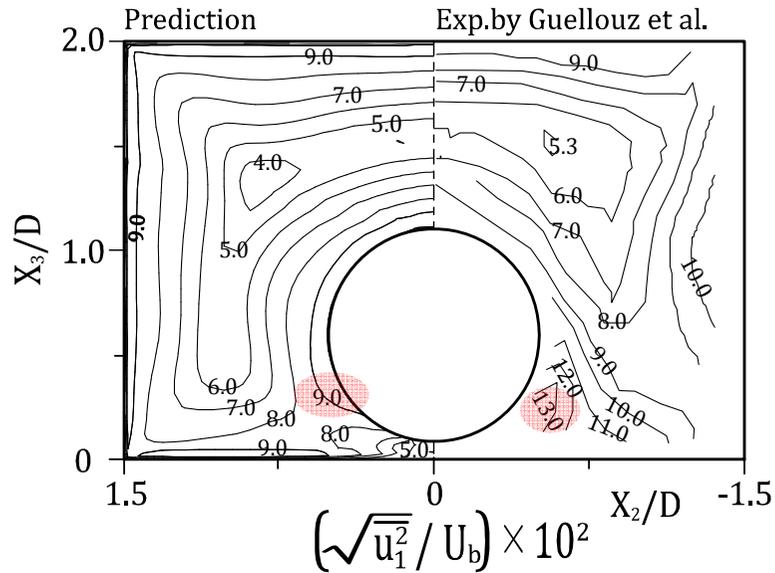


主流方向速度分布図

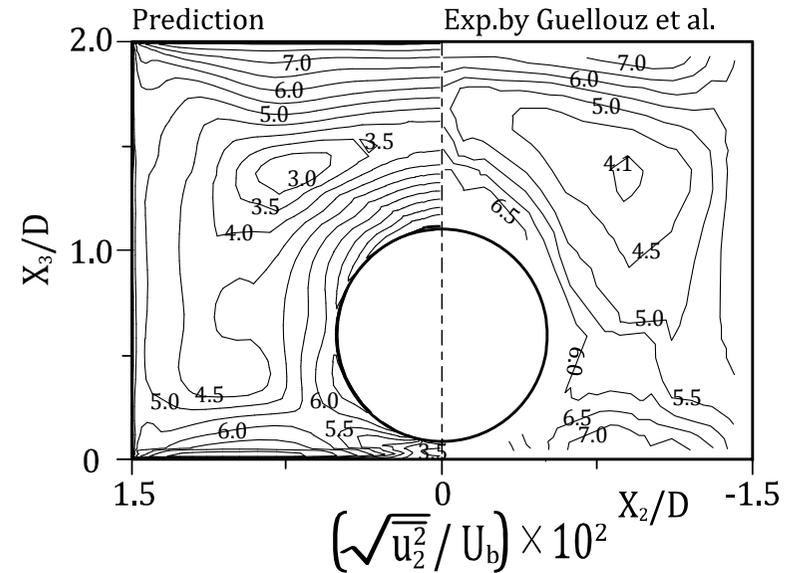
第2種二次流れベクトル線図の比較



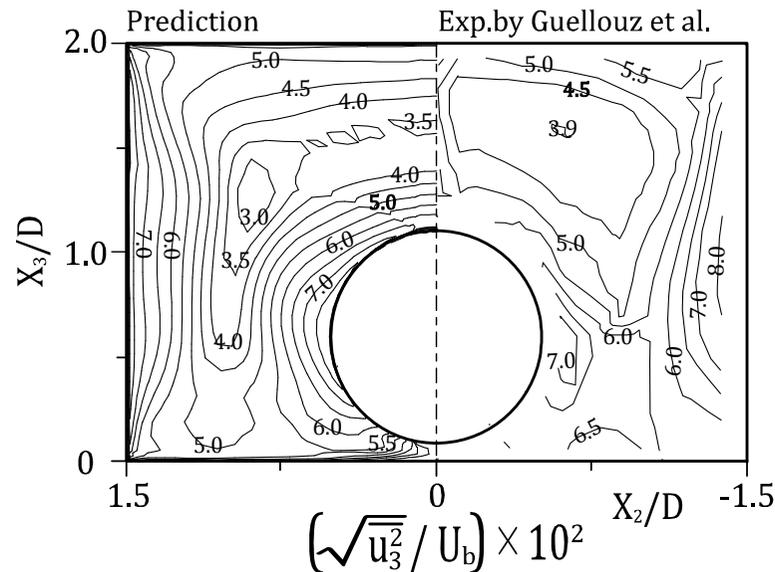
レイノルズ応力分布等値線図



(1)主流方向垂直応力

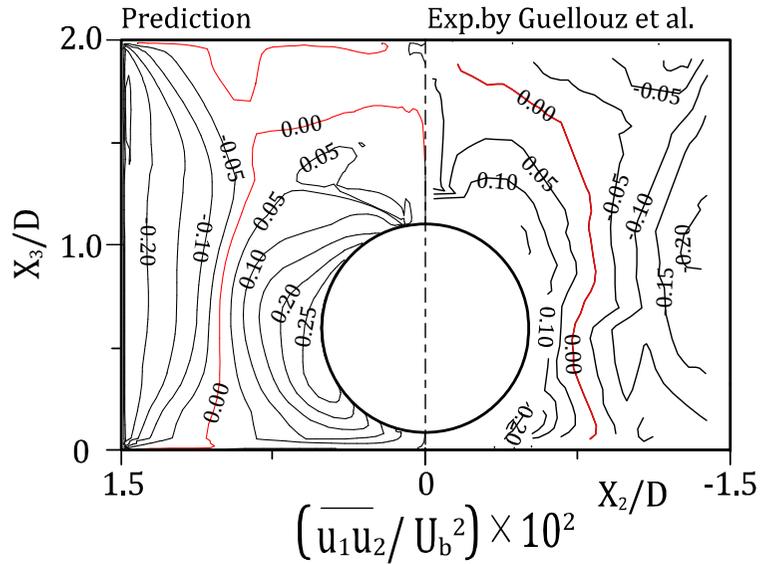


(2)水平方向垂直応力

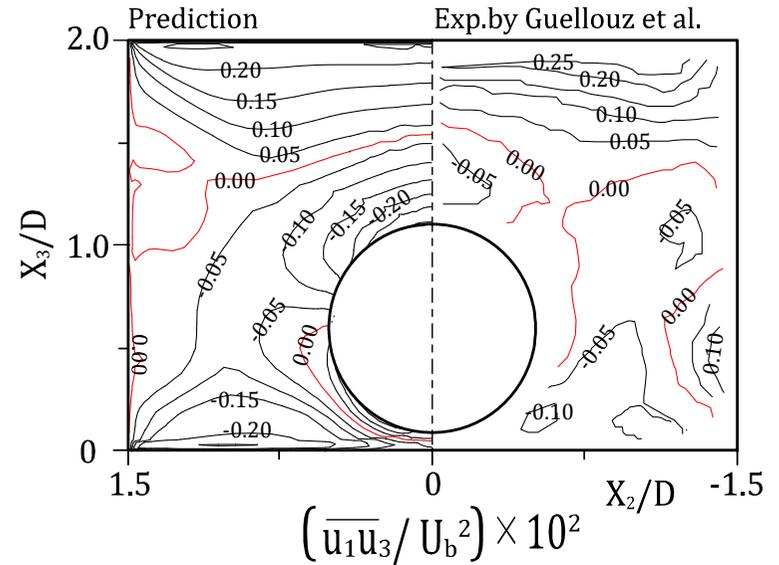


(3)鉛直方向垂直応力

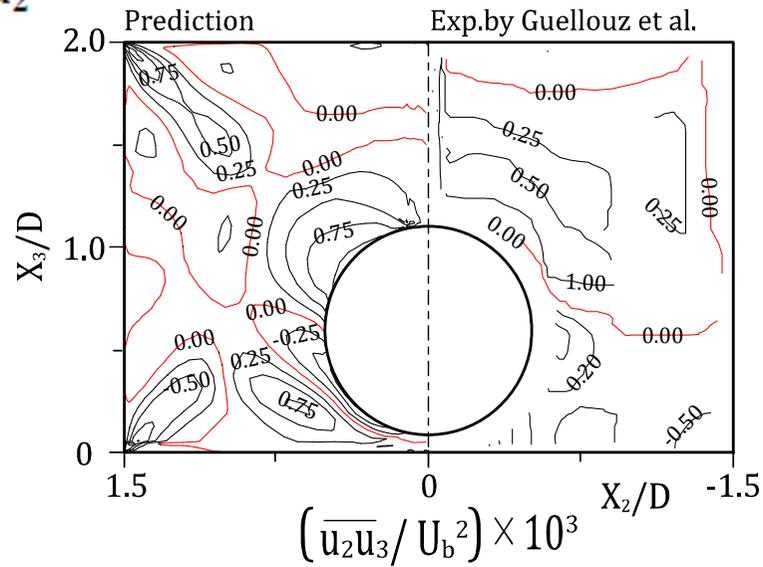
レイノルズ応力分布等値線図



(4)せん断応力 $\overline{u_1 u_2}$



(5)せん断応力 $\overline{u_1 u_3}$

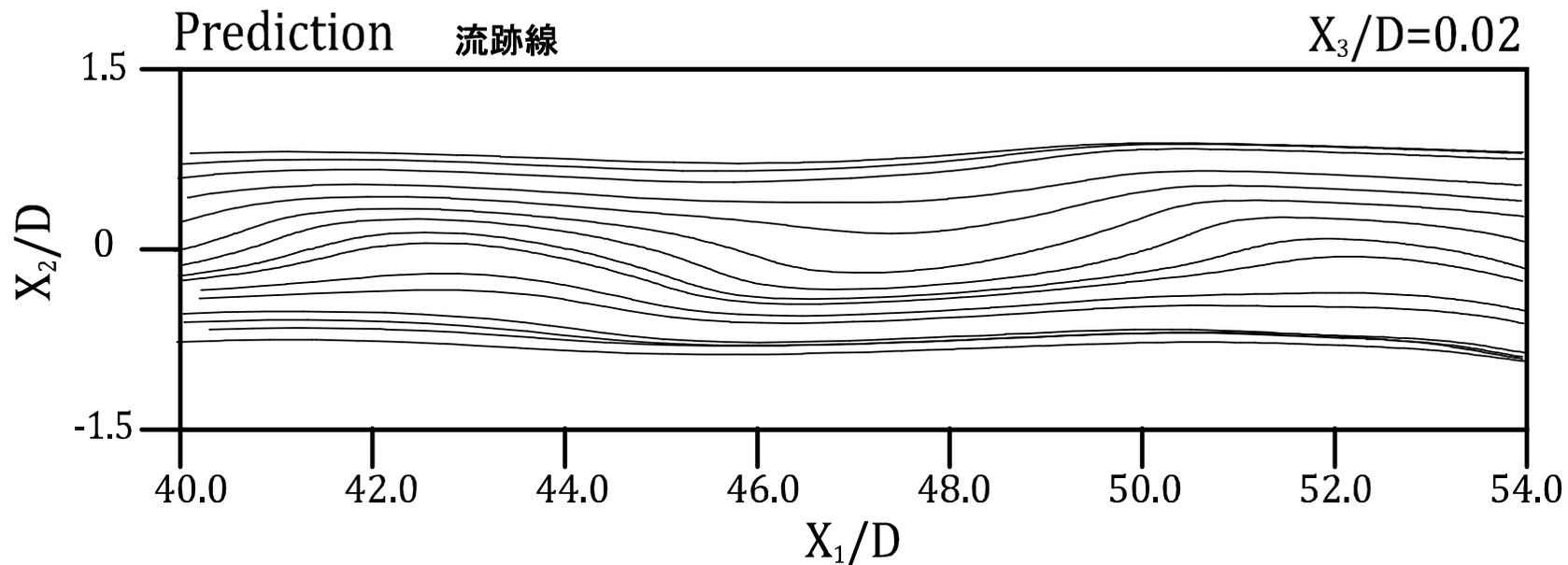
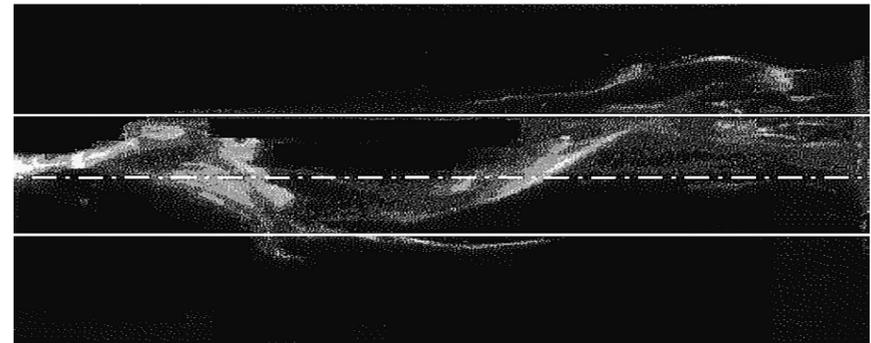


(6)せん断応力 $\overline{u_2 u_3}$

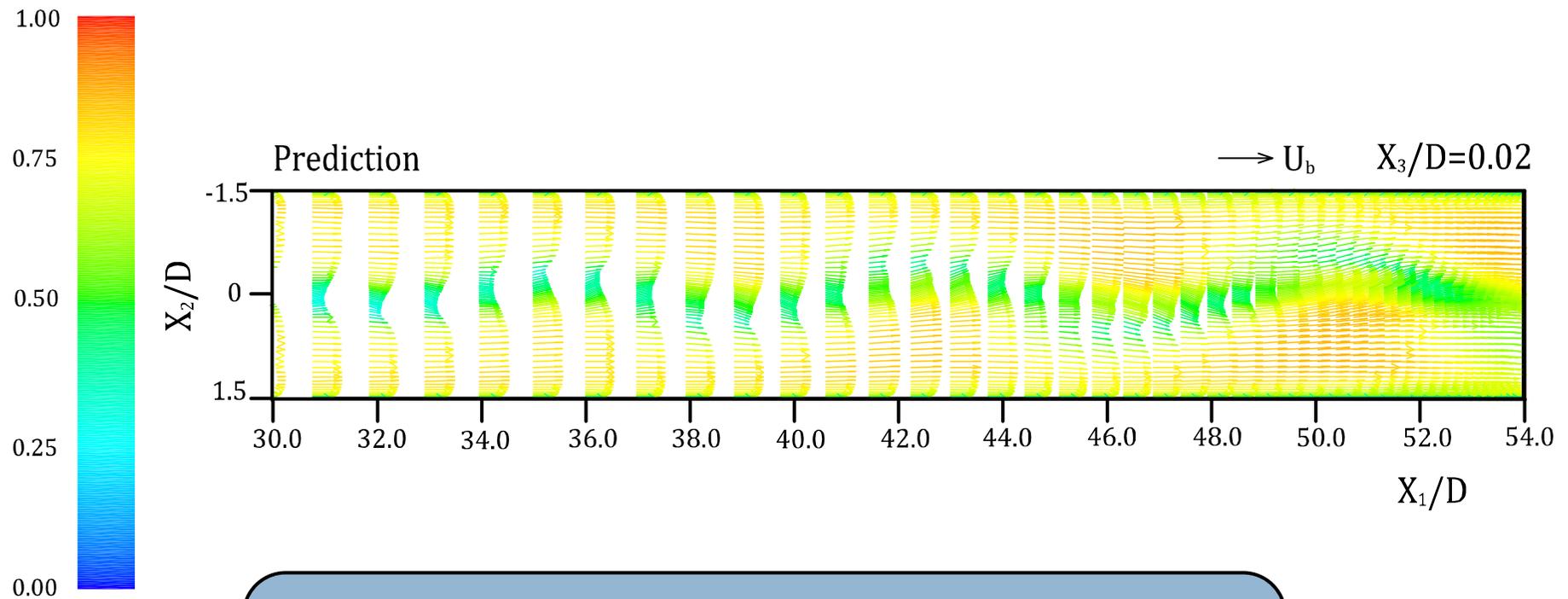
円柱-底壁面間の挙動(脈動流)

M.S. Guellouzらの実験より, 円柱-底壁面間に, 周期的な振動を伴う脈動流の存在が報告されている.

Exp.by Guellouz et al.

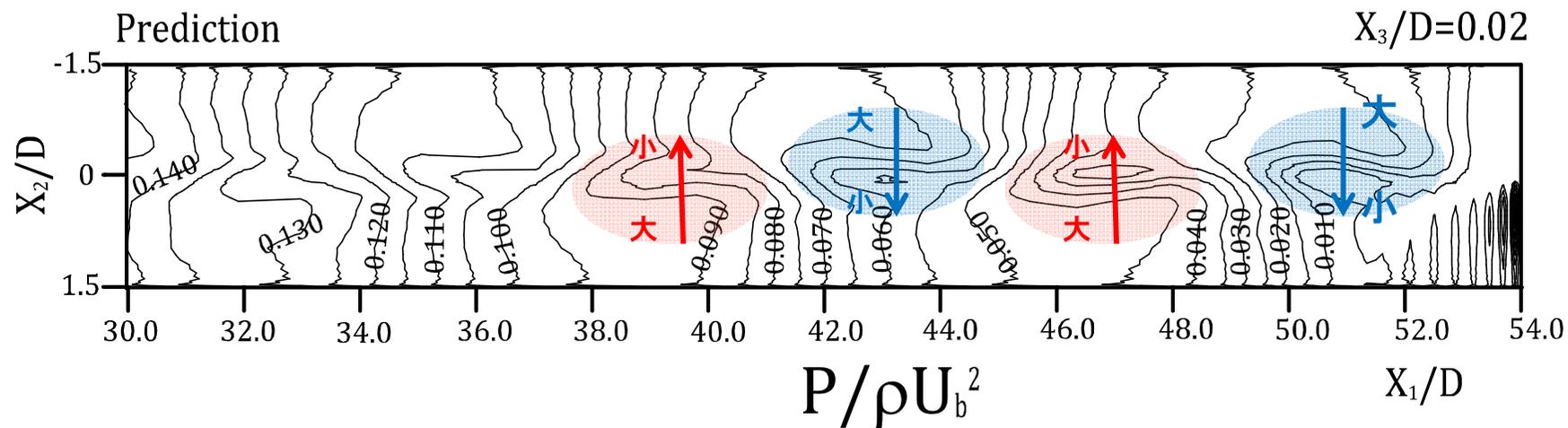


主流方向ベクトル線図(瞬時値)



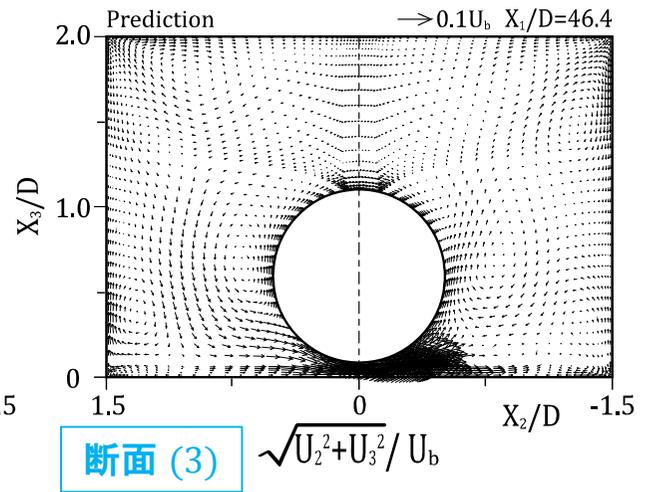
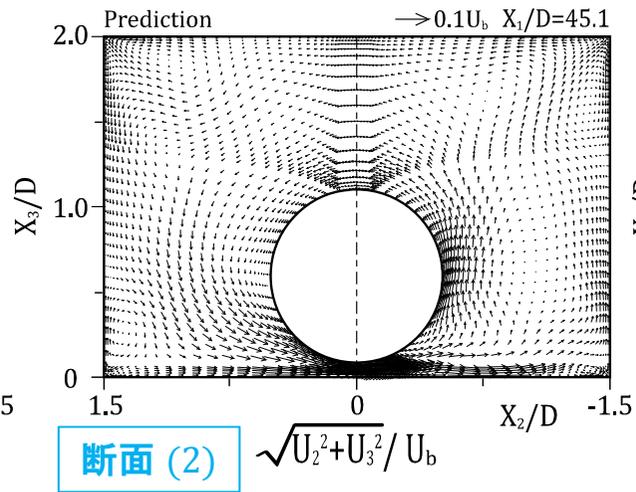
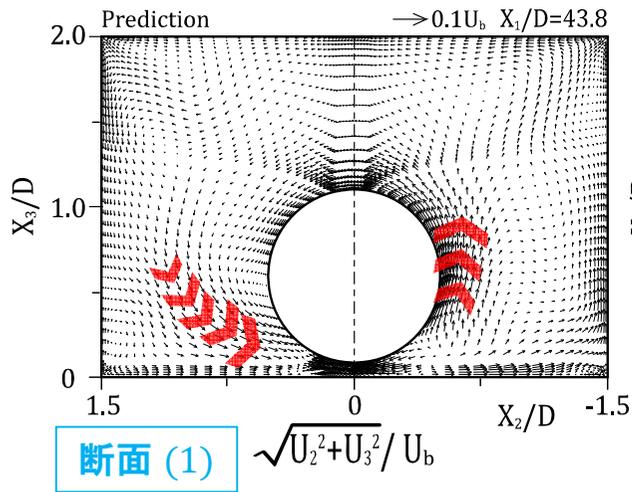
流れが蛇行している様子がわかり、
脈動流の存在を再現している

・圧力分布図

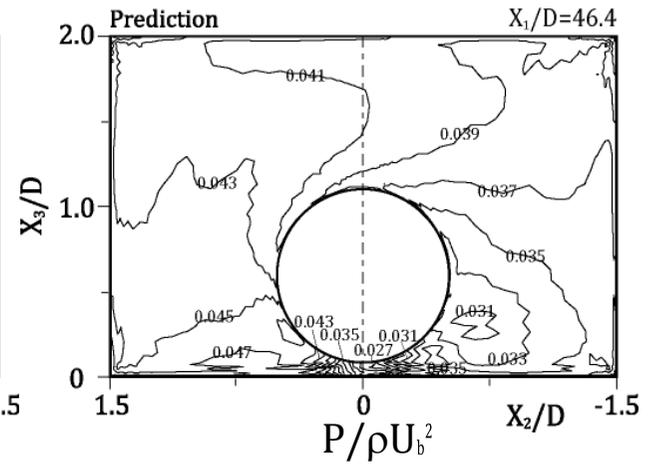
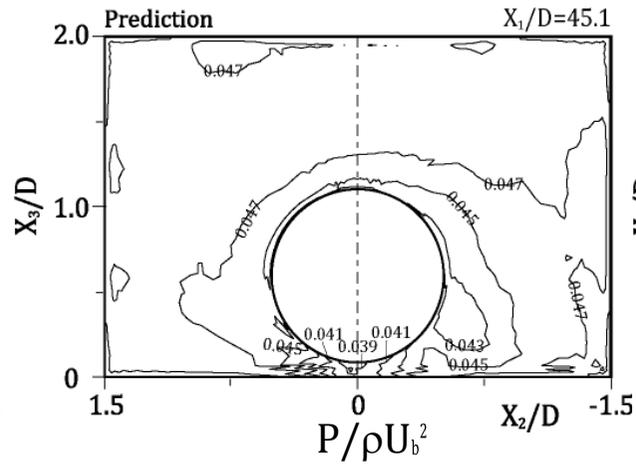
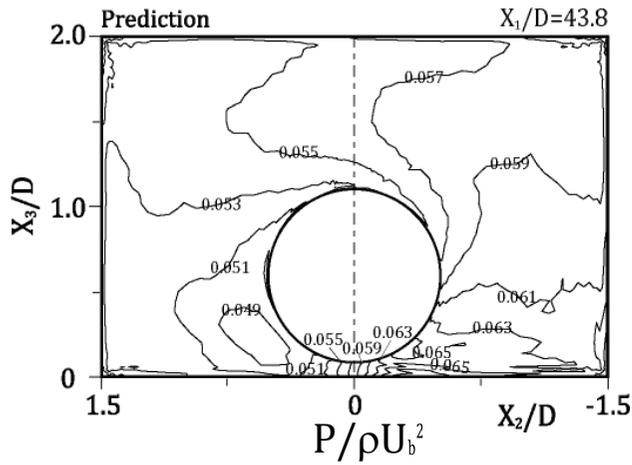


水平方向の**圧力勾配**が存在しており、
脈動流と相関があると推測される

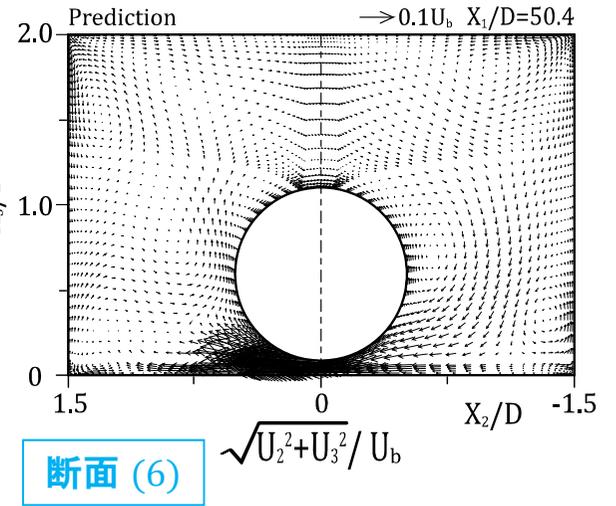
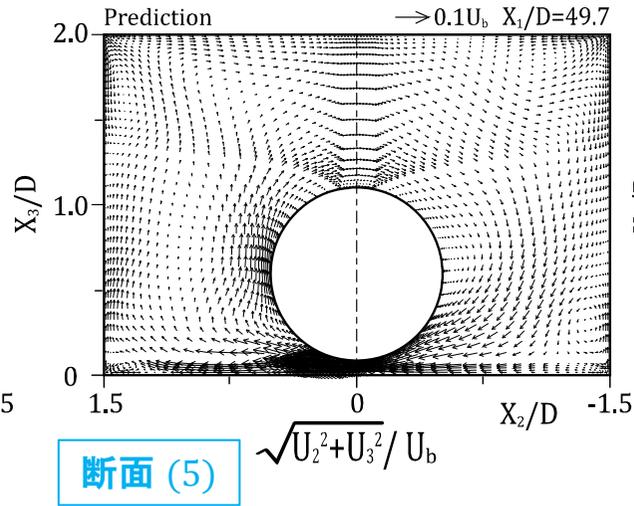
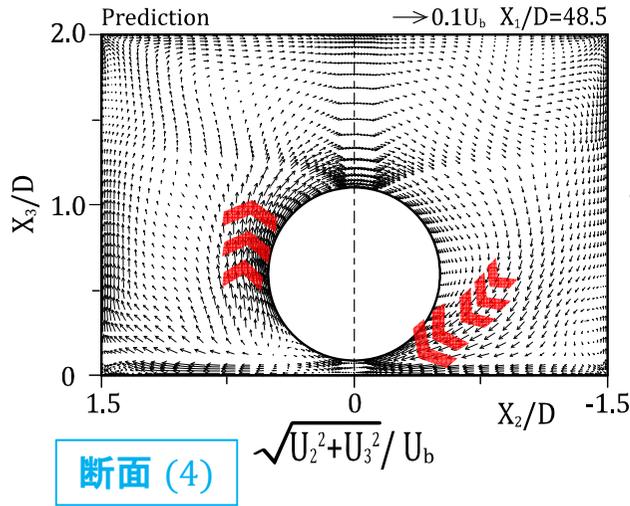
二次流れベクトル線図



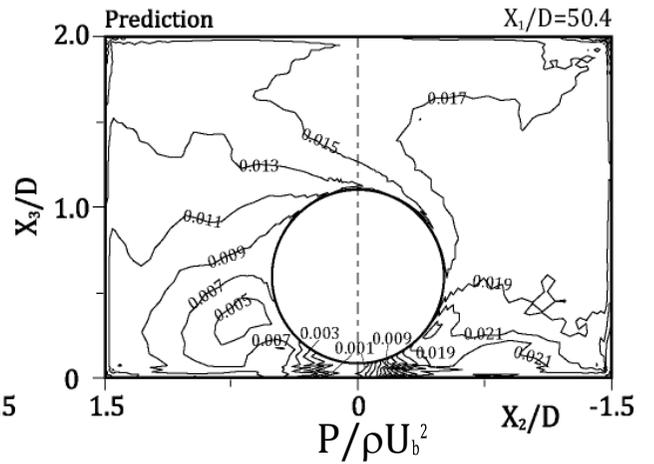
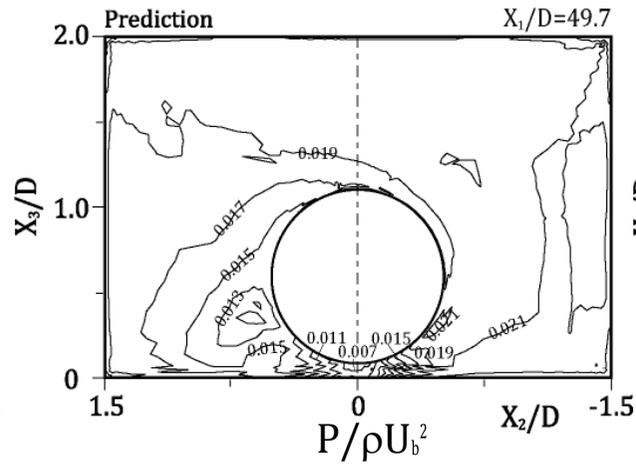
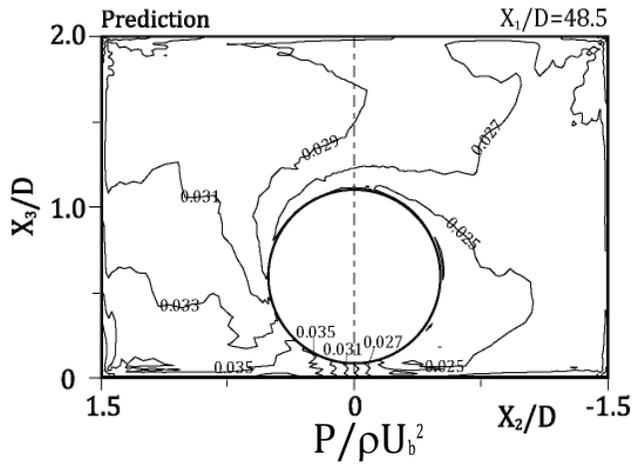
圧力分布



二次流れベクトル線図

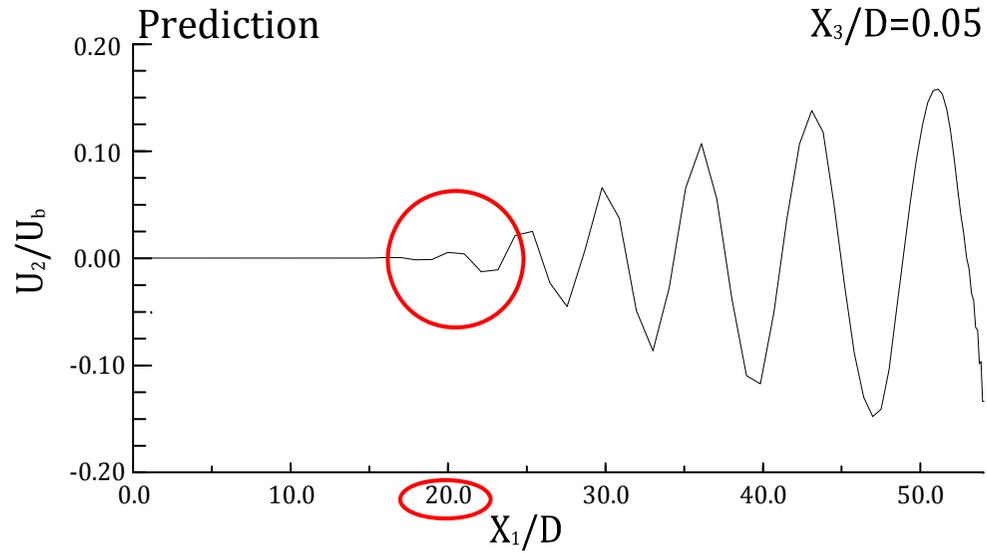


圧力分布

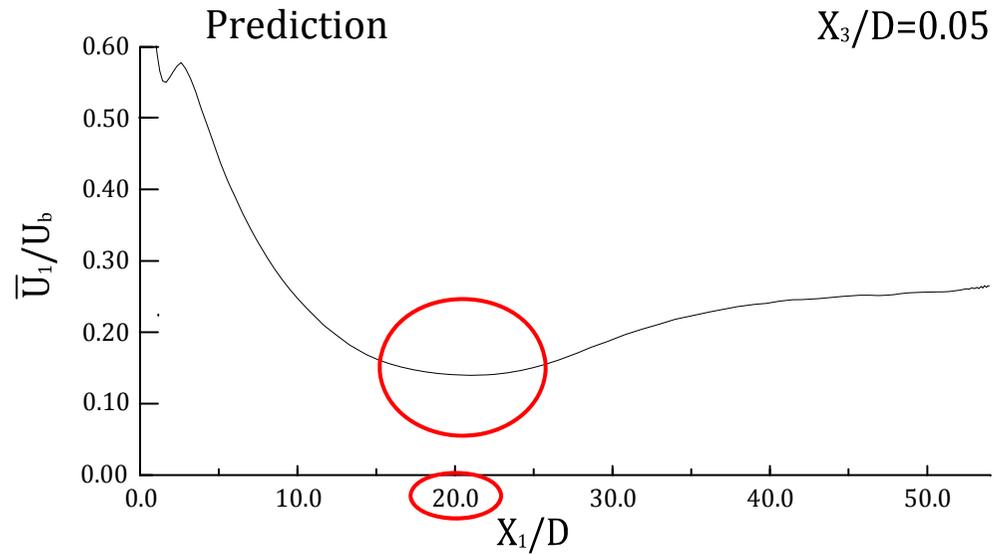


圧力変化に追従するように二次流れが変化する

水平方向速度変動

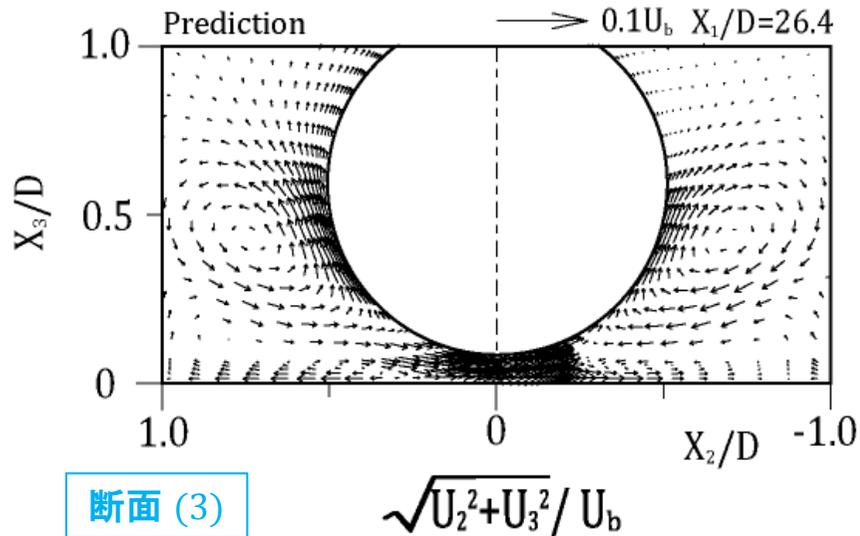
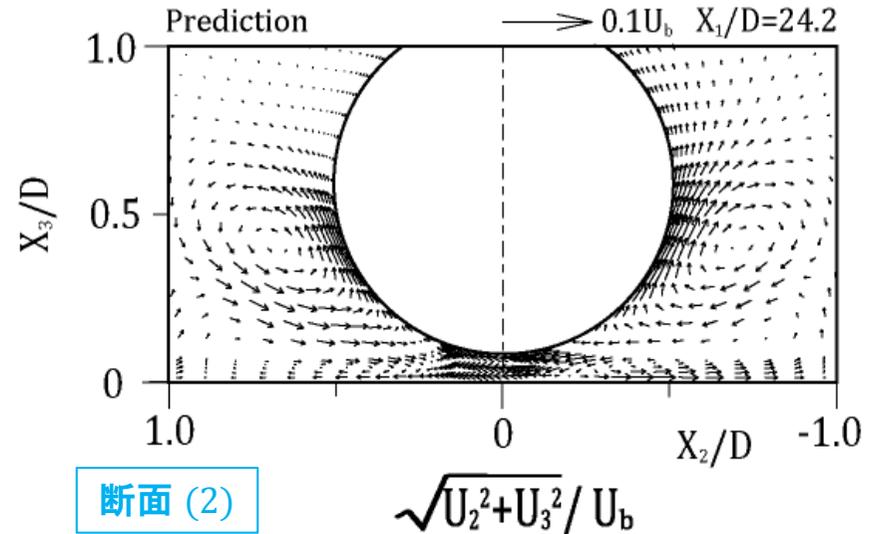
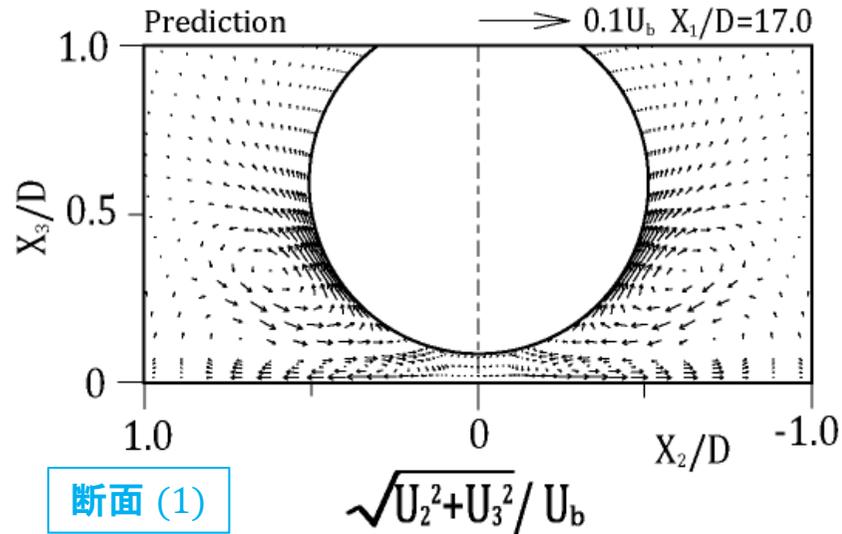


主流方向平均速度の変化



脈動流の開始点と平均速度が最小値をとる点が一致している

二次流れベクトル線図($X_1/D=20$ 付近)



$X_1/D=20$ 近傍で間隙領域に二次流れが流入し、**非対称流れ場**が生じる

結論

- 実験結果との比較から、多少の差異もみられるが、主流方向速度場とレイノルズ応力を予測できた。
- 非等方性乱流に特徴的な、第2種二次流れを予測し、再現可能であることを示した。
- 脈動流を再現可能であることを示し、本解析手法の妥当性、有効性を示した。

本研究は経済産業省資源エネルギー庁からの受託事業平成26年度「発電用原子炉等安全対策高度化技術基盤整備事業(水素安全対策高度化)」の成果である。