

壁面粗度変化を伴う矩形断面管路内 乱流構造変化の数値解析

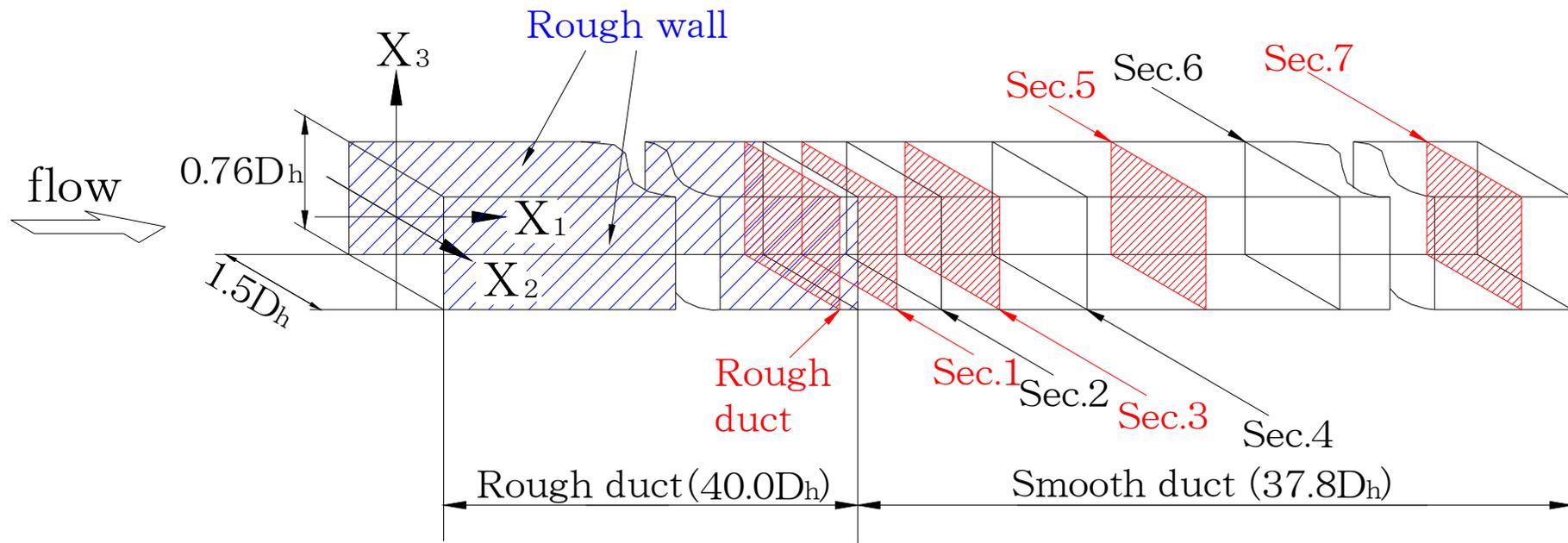
Numerical Analysis of Developing Turbulent Flow in a
Rectangular Duct with Abrupt Change
From Rough to Smooth Wall

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 ○田澤 亨

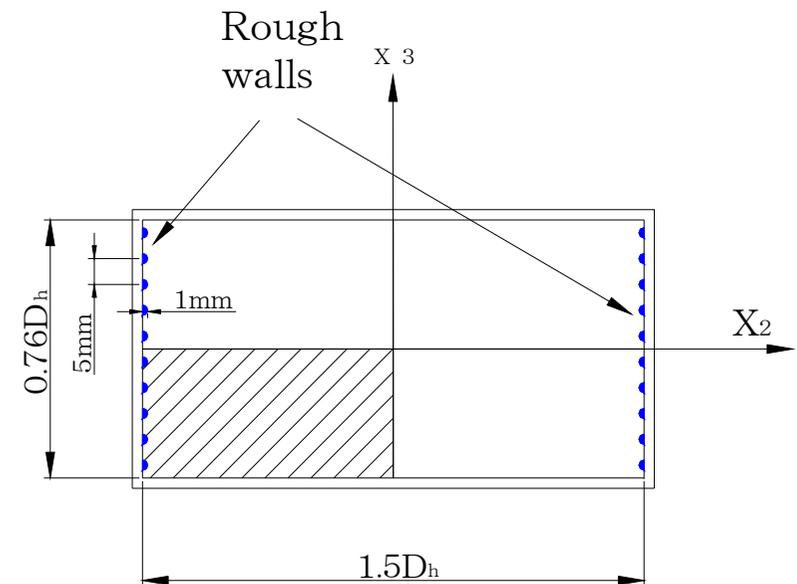
緒言

壁乱流において、壁面の粗度が流路途中にて変化する場合、流れ場は、その乱流構造を変化させながら新たな壁面状態に対する平衡状態へと遷移していく。本解析では、こうした壁面粗度の変化に伴う乱流場を対象にレイノルズ応力輸送方程式を用いて理論的に予測した。また、解析結果は実験結果と比較することにより解析手法、乱流モデルの妥当性を検討するとともに、その弛緩現象について検討を加えた。



$$D_h = 66.2 \text{ mm}$$

Section No.	1	2	3	4	5	6	7
X_1/D_h	2	4.3	7.3	14.9	22.4	30	37.5

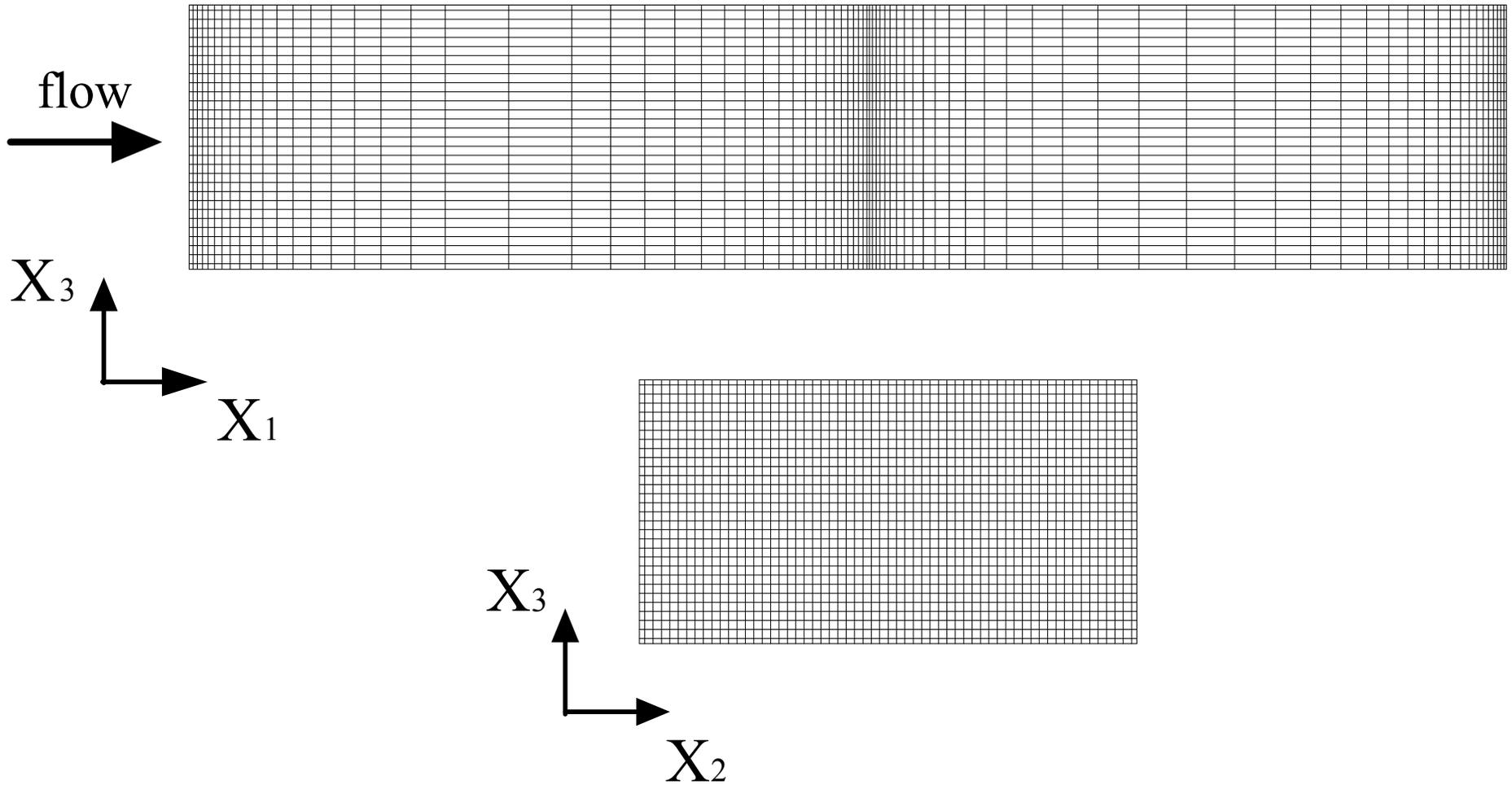


Schematic diagram of Experimental apparatus
and definition of coordinate system

レイノルズ応力輸送方程式の厳密式

$$\begin{aligned}
 \textcircled{1} \frac{D\overline{u_i u_j}}{Dt} &= - \textcircled{2} \left(\overline{u_i u_k} \frac{\partial U_i}{\partial X_k} + \overline{u_j u_k} \frac{\partial U_i}{\partial X_k} \right) + \textcircled{3} \frac{p}{\rho} \left(\frac{\partial u_i}{\partial X_j} + \frac{\partial u_j}{\partial X_i} \right) \\
 \textcircled{4} - \frac{\partial}{\partial X_k} &\left\{ \overline{u_i u_j u_k} - \nu \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial X_k} + \frac{p}{\rho} (\delta_{jk} u_i + \delta_{ik} u_j) \right\} \\
 \textcircled{5} - 2\nu \frac{\partial u_i}{\partial X_k} \frac{\partial u_j}{\partial X_k} &
 \end{aligned}$$

- ① ——— 対流項
- ② ——— $\overline{u_i u_j}$ の平均速度勾配による生産項
- ③ ——— 圧力 - 歪相関項
- ④ ——— $\overline{u_i u_j}$ の拡散項
- ⑤ ——— $\overline{u_i u_j}$ の散逸項



Computational mesh layout

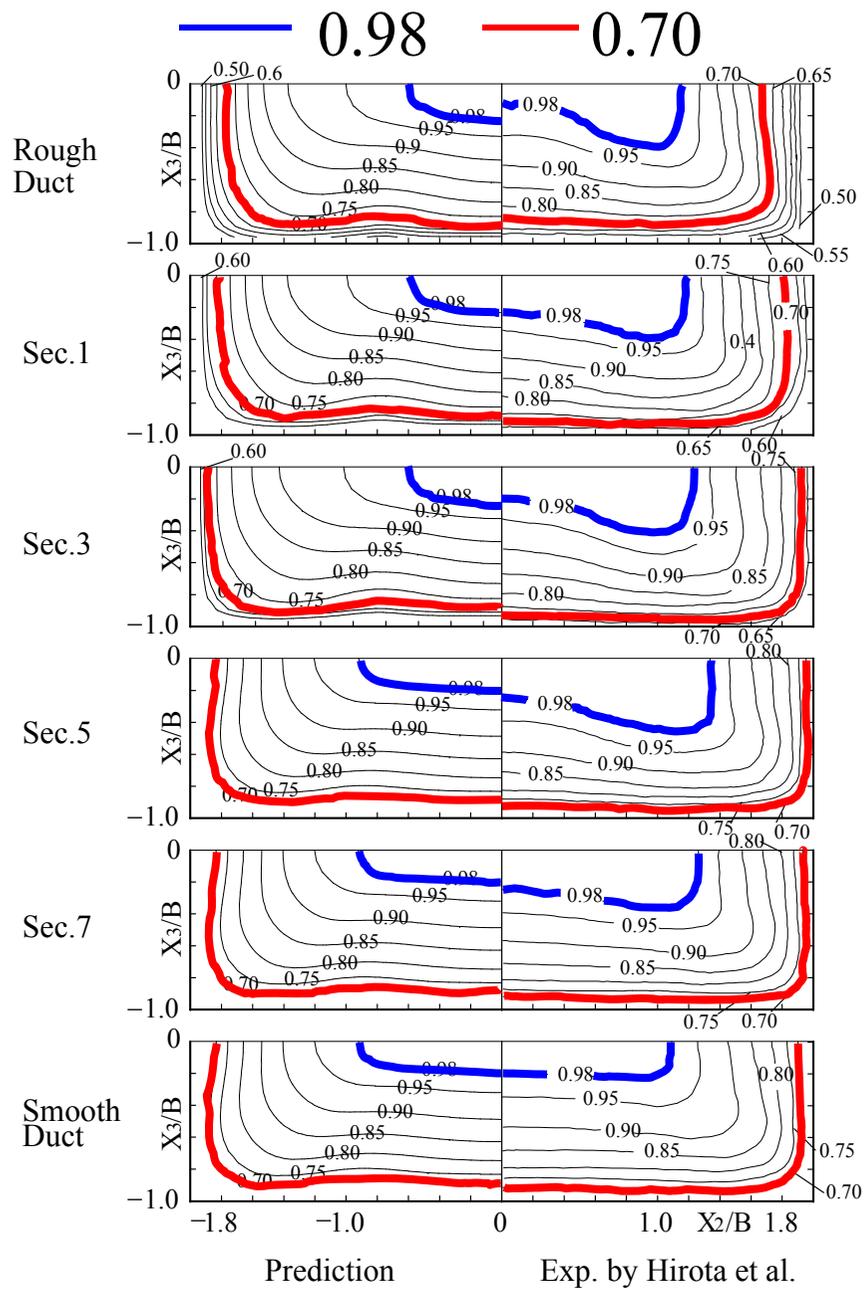
粗面壁に対する対数速度分布

$$\frac{U_1}{U_\tau} = 2.5 \ln \frac{y}{\underline{k_s}} + 8.5$$

等価砂粒粗さ: $k_s = 1.87 \text{ mm}$

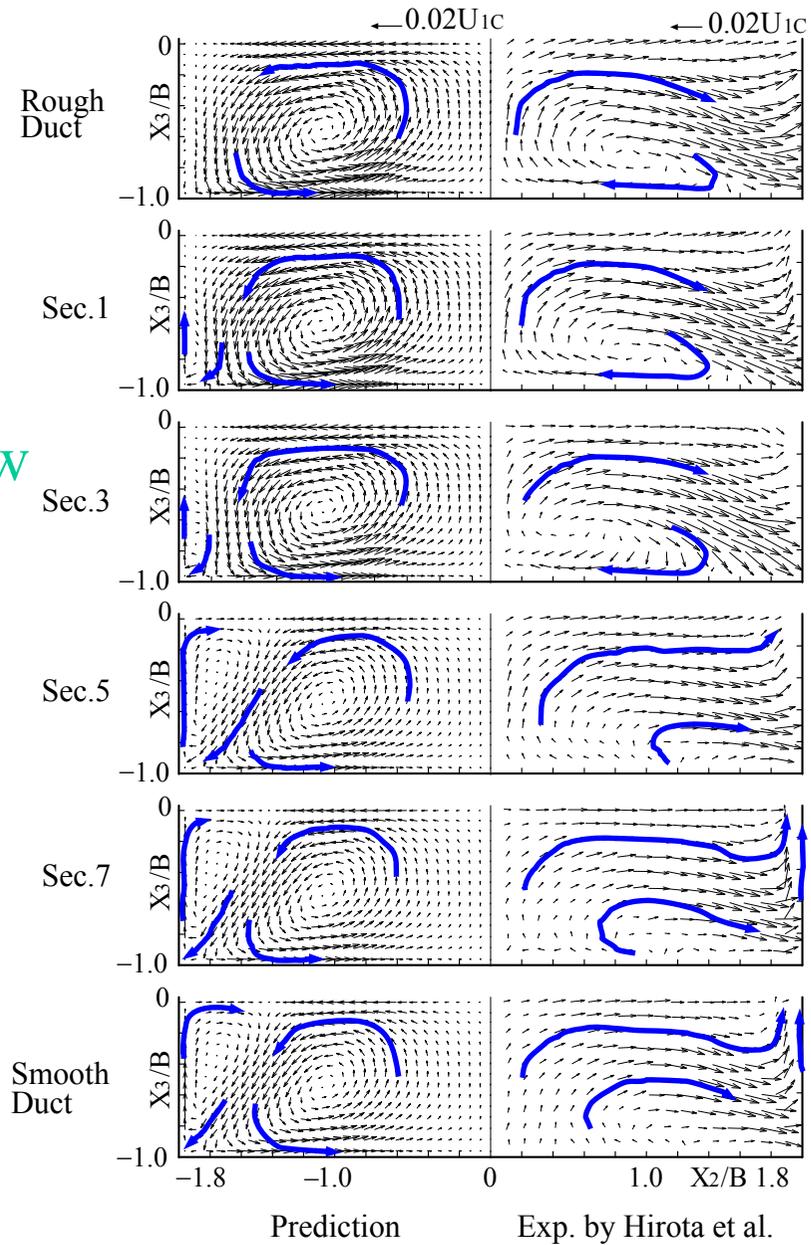
滑面壁に対する対数速度分布

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

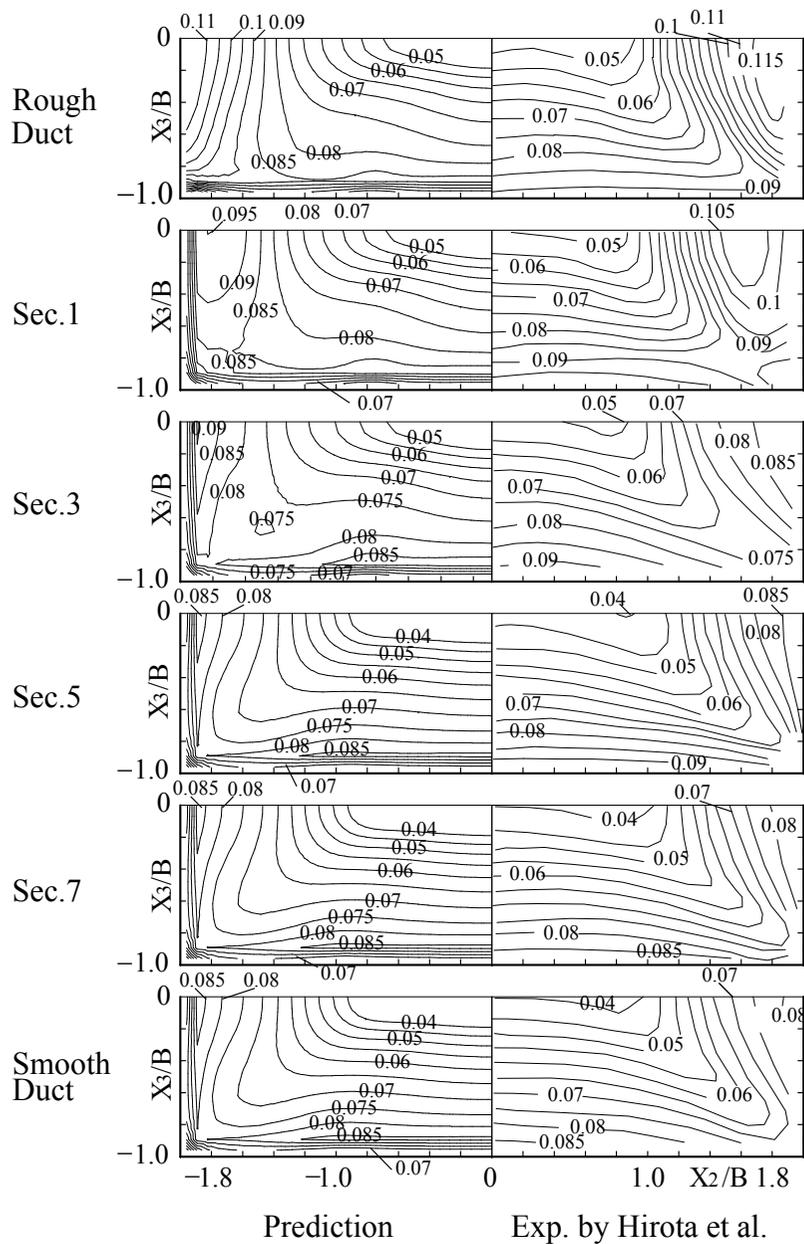


U_1/U_{1c}

Comparison of streamwise mean velocity

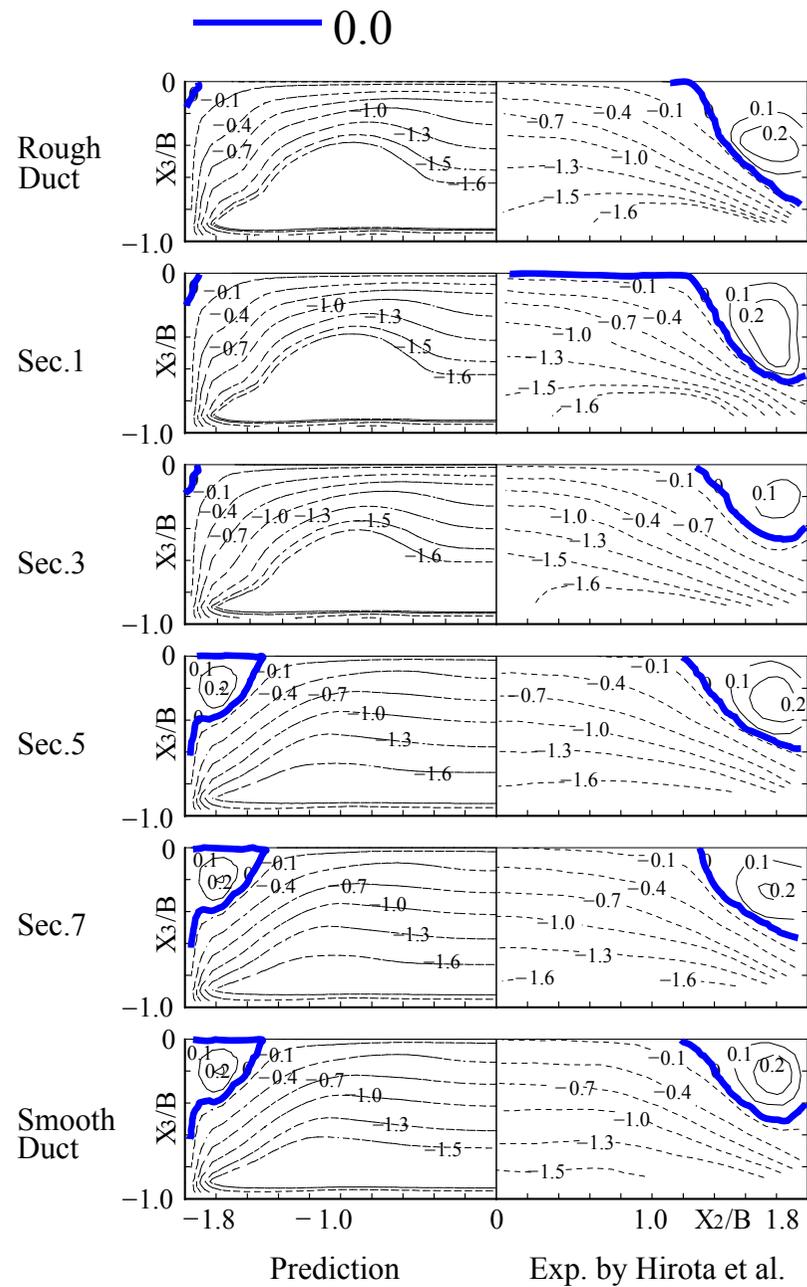


Comparison of Secondary flow vectors



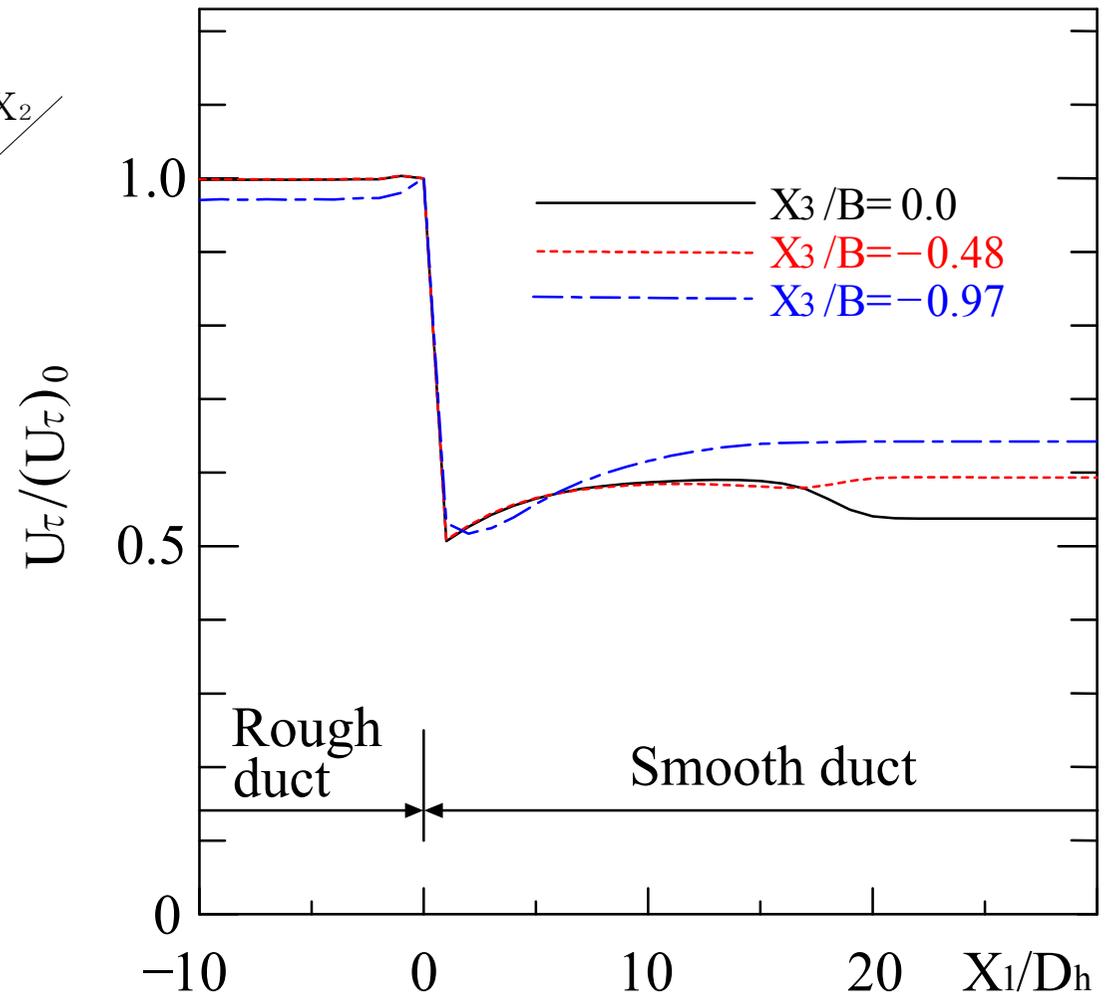
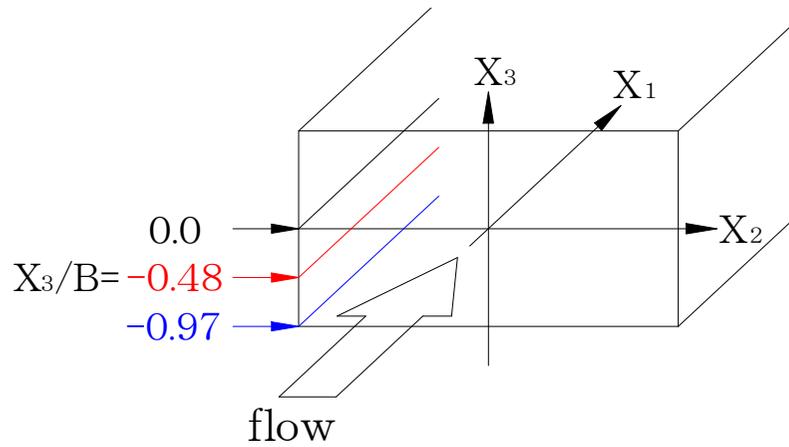
$$\sqrt{\overline{u_1^2}}/U_{IC}$$

Comparison of normal stress $\overline{u_1^2}$



$$(\overline{u_1 u_3}/U_{IC}^2) \times 10^3$$

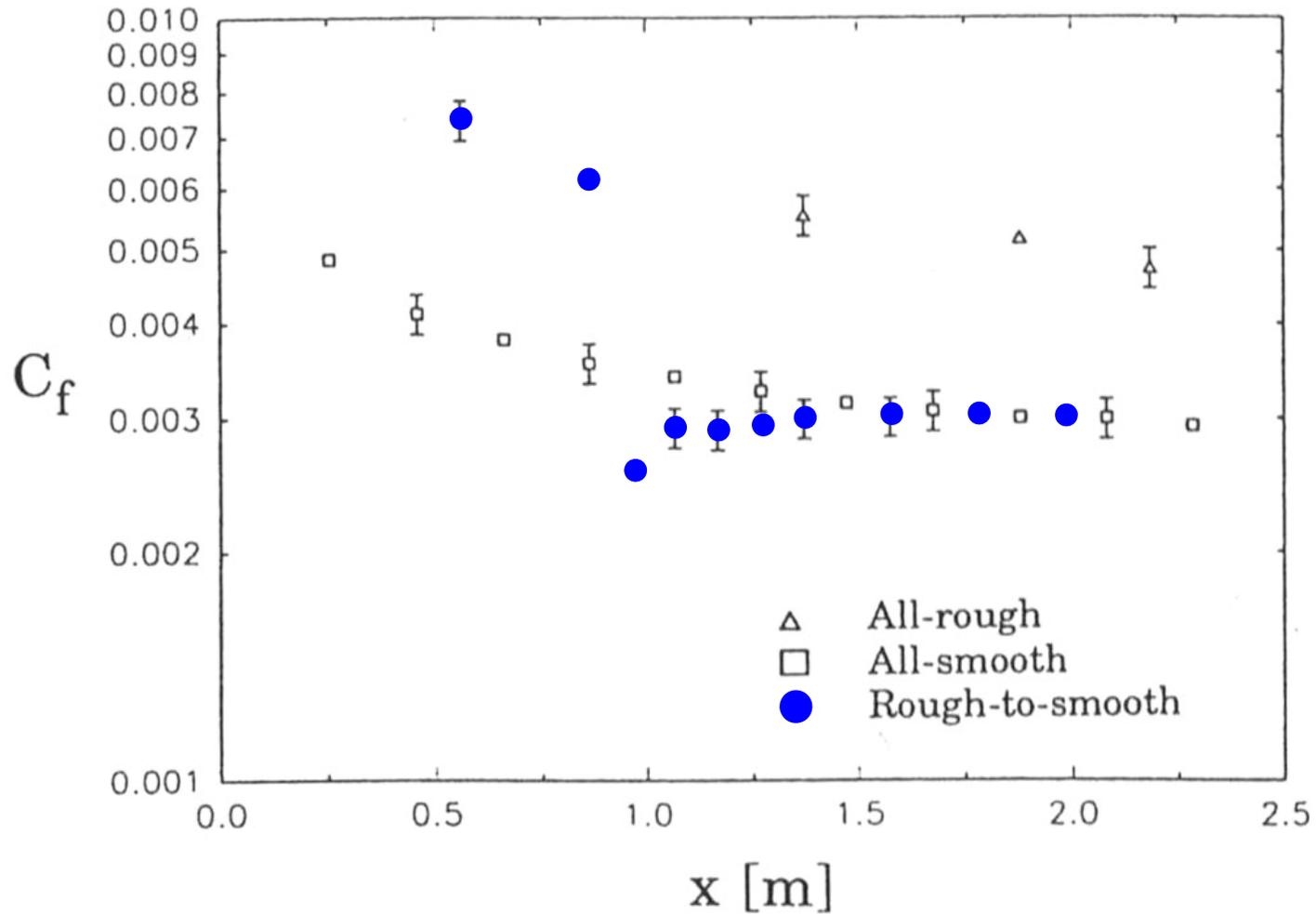
Comparison of shear stress $\overline{u_1 u_3}$



Calculated results of friction velocity
along the flow direction

結論

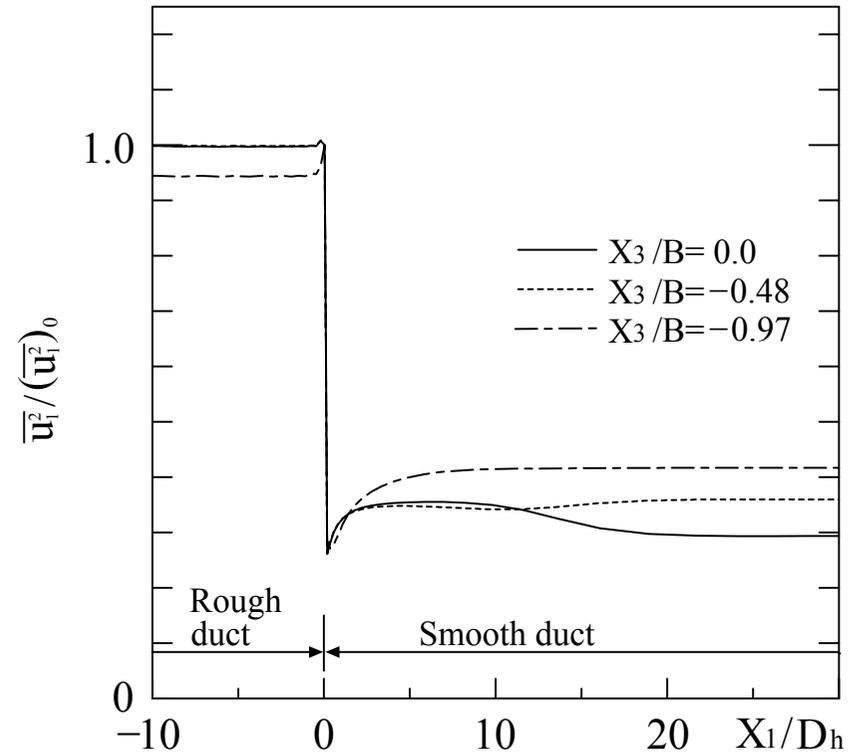
1. 粗面管路から全滑面管路に流入すると、粗面壁近傍の主流方向速度は増速され高速流体が占めるようになるが、こうした特徴的な現象を計算も再現している。
2. 第2種二次流れにより主流方向速度等値線は歪まされるが、計算は実験ほど顕著には等値線の歪みを再現できていない。一様粗面として半球突起を考慮していないことによると考えられる。
3. 摩擦速度は、粗面管路から全滑面管路に流入すると、急激に減少し、滑面管路の摩擦速度値をアンダーシュートして最小値を示し、その後滑面管路の摩擦速度に徐々に回復する現象を計算も再現した。
4. 等価砂流粗さを用いて粗面壁乱流場を解析することが可能であることを示した。



Comparison of skin friction coefficient versus X for the rough-to-smooth, All-rough, all-smooth surfaces for $U_\infty=12\text{m/s}$

定常状態における 境界層の運動量方程式

$$U_1^2 \frac{d\theta}{dX_1} + (2\theta + \delta^*) U_1 \frac{dU_1}{dX_1} = \frac{\tau_w}{\rho}$$



主流方向速度成分の
流れ方向への発達

管壁の粗い円管の乱流速度分布

$$\frac{u}{u_\tau} = 2.5 \ln \frac{y}{k_s} + B$$

(i) 流体力学的に滑らかな領域 (Hydraulically smooth regime)

$$0 \leq ku_\tau / \nu \leq 5 \quad B = 5.5 + 2.5 \ln \frac{k_s u_\tau}{\nu}$$

(ii) 遷移領域 (Transition regime)

$$5 \leq ku_\tau / \nu \leq 70$$

(iii) 完全に粗い領域 (Completely rough regime)

$$70 \leq ku_\tau / \nu \quad B = 8.5$$

実験管路の粗面部の管摩擦係数

$$\lambda = \frac{-2dP}{dX_1} \times \frac{d_h}{\rho U_b^2}$$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1.74 - 2.0 \log \left[\frac{18.7}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} + \frac{k_s}{d_h} \right]$$

$$k_s / d_h = 0.0283 \quad (k_s = 1.87 \text{ mm})$$

$$k^+ = U_\tau k_s / \nu \cong 140 \quad (\text{粗さレイノルズ数})$$