

曲がり管路内発達乱流の数値解析

Numerical Calculation for Developing Turbulent Flow
in Curved Pipe

正 杉山 均(宇都宮大学大学院工学研究科)

○ 藤田 文暢(宇都宮大学大学院工学研究科)

正 秋山 光庸(宇都宮大学大学院工学研究科)

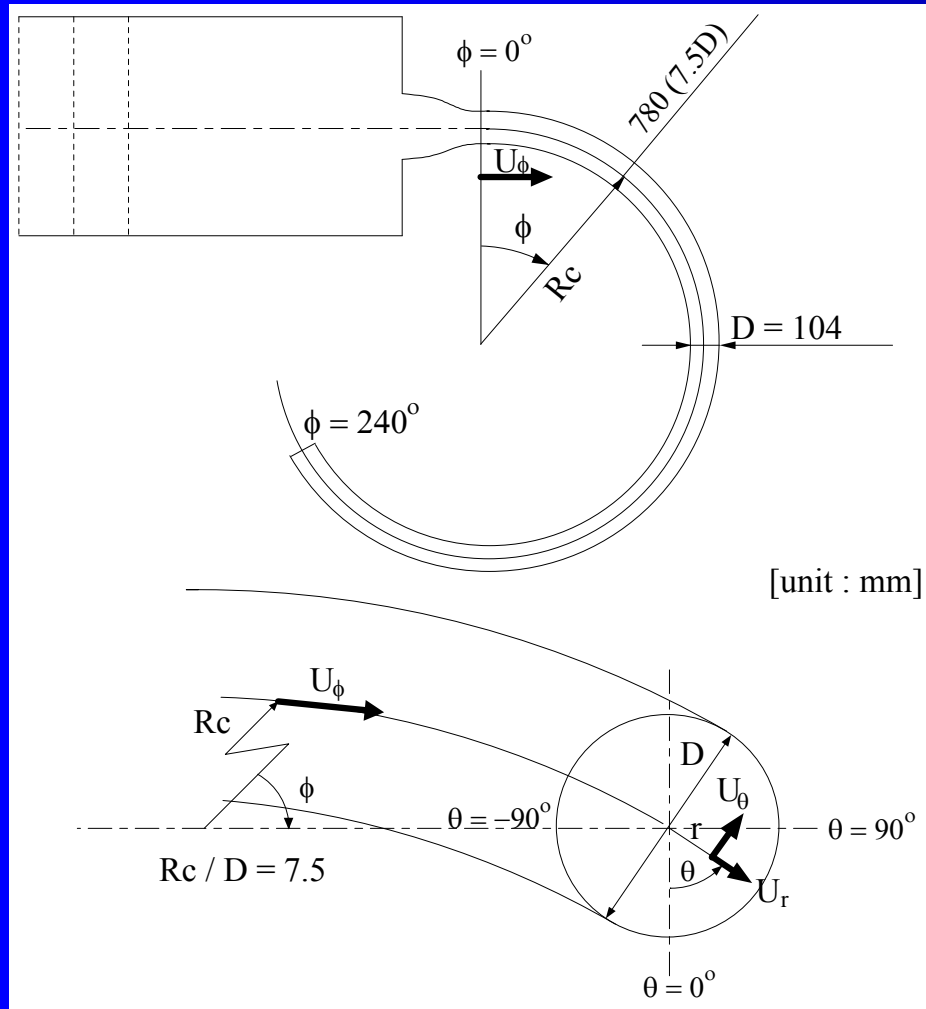
目的

曲がり円管路の流れは工業上重要な流れであり、多くの実験がなされてきた。しかし、それらは十分発達した流れが曲がり管路内に流入する場合が多い。そこで本研究では助走区間を有さず、ほぼ一定な速度分布を持つ変動速度の少ない流体が曲がり管路に流入した場合について流れを予測し、最近発表された須藤-桧原先生らの実験結果と比較しその妥当性を検証する。

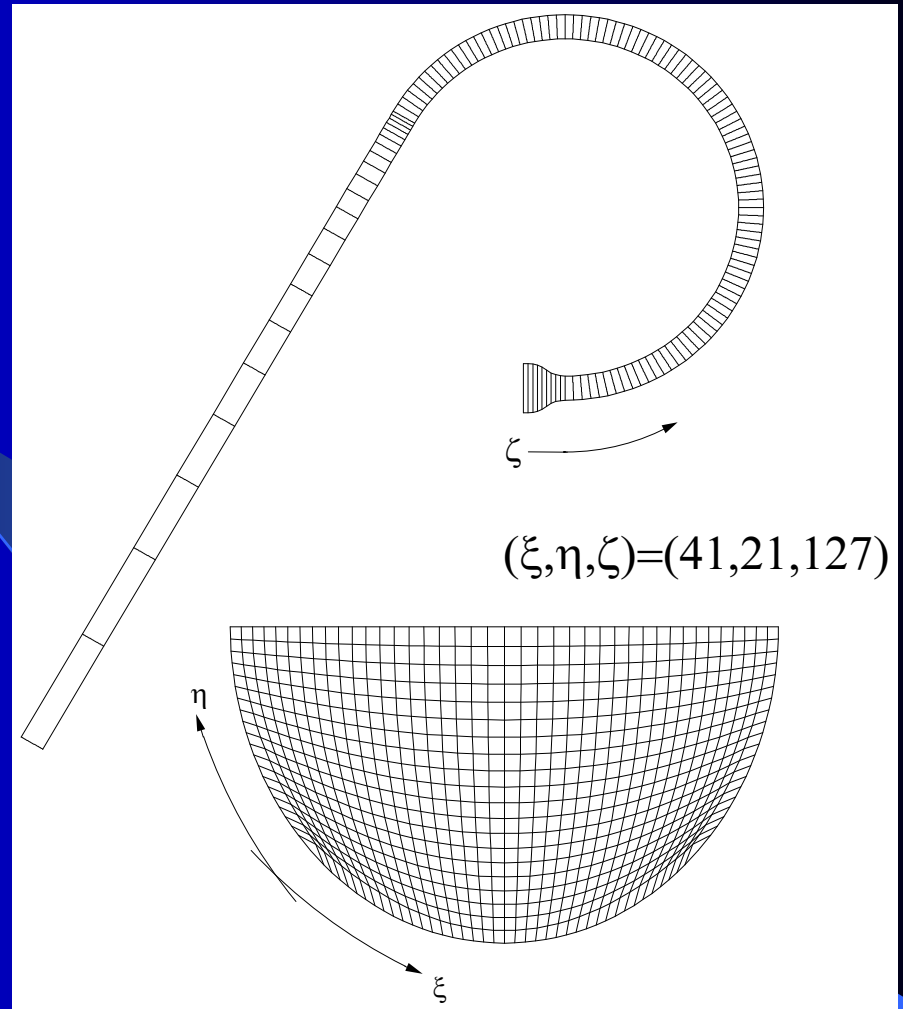
対象実験

- 須藤, 桧原, “曲がり管内流れの発達過程”, 日本機械学会論文集 (B編), 65巻639号 No.99-0244, pp.3629-3636, 1999-11

対象実験の供試空間



計算格子



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

$$\frac{Dk}{Dt} = C'_s \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{k}{\varepsilon} \overline{u_k u_l} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_l} \right) - \overline{u_i u_k} \frac{\partial U_i}{\partial x_k} - \varepsilon$$

●乱流散逸方程式

$$\frac{D\varepsilon}{Dt} = C_\varepsilon \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{k}{\varepsilon} \overline{u_k u_l} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_l} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k}$$

●代数応力モデル

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

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

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

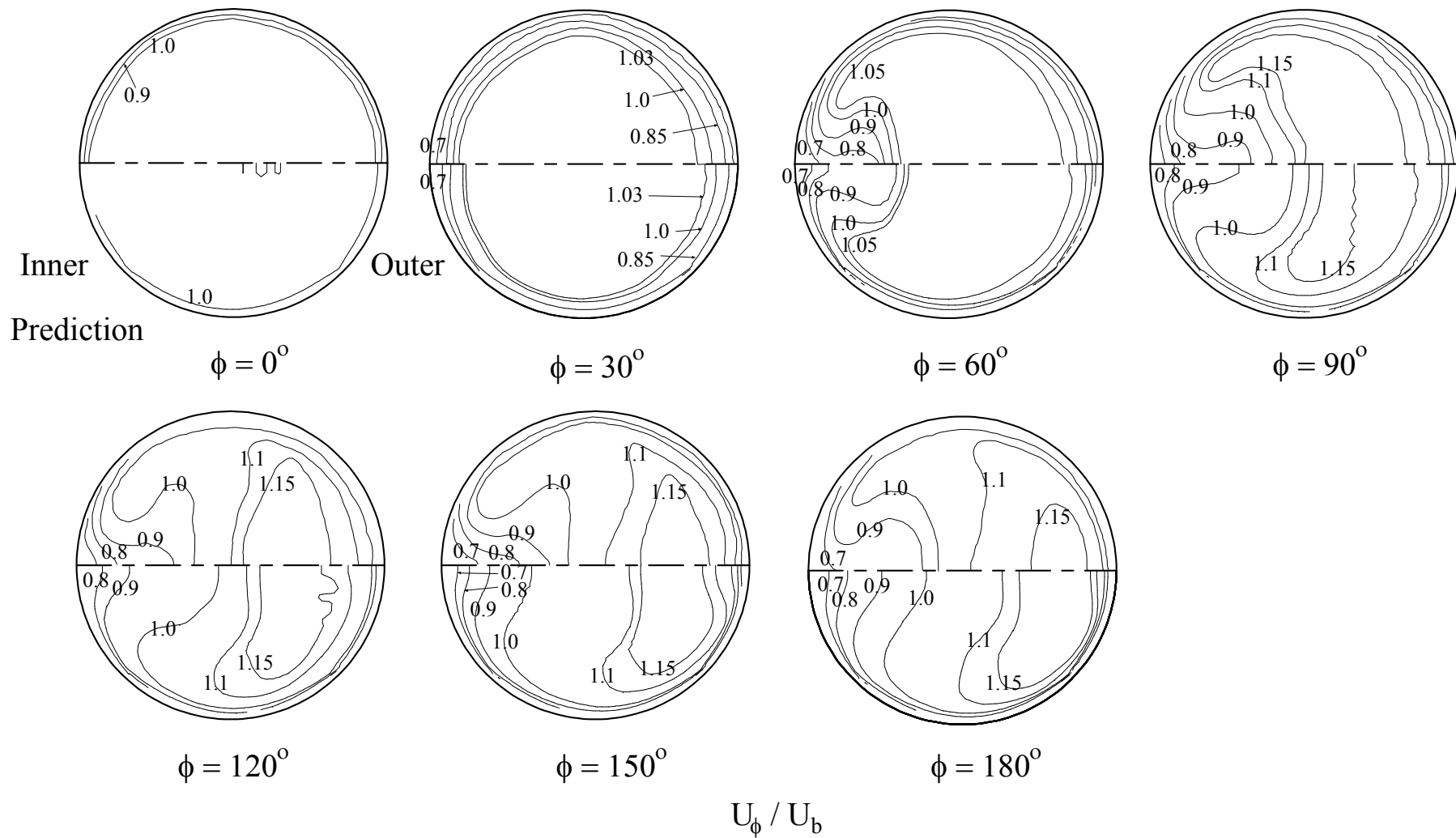
$$P_{ij} = -\overline{u_i u_k} \frac{\partial U_j}{\partial x_k} - \overline{u_j u_k} \frac{\partial U_i}{\partial x_k} \quad D_{ij} = -\overline{u_i u_k} \frac{\partial U_k}{\partial x_j} - \overline{u_j u_k} \frac{\partial U_k}{\partial x_i} \quad P_k = -\overline{u_k u_l} \frac{\partial U_k}{\partial x_l}$$

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

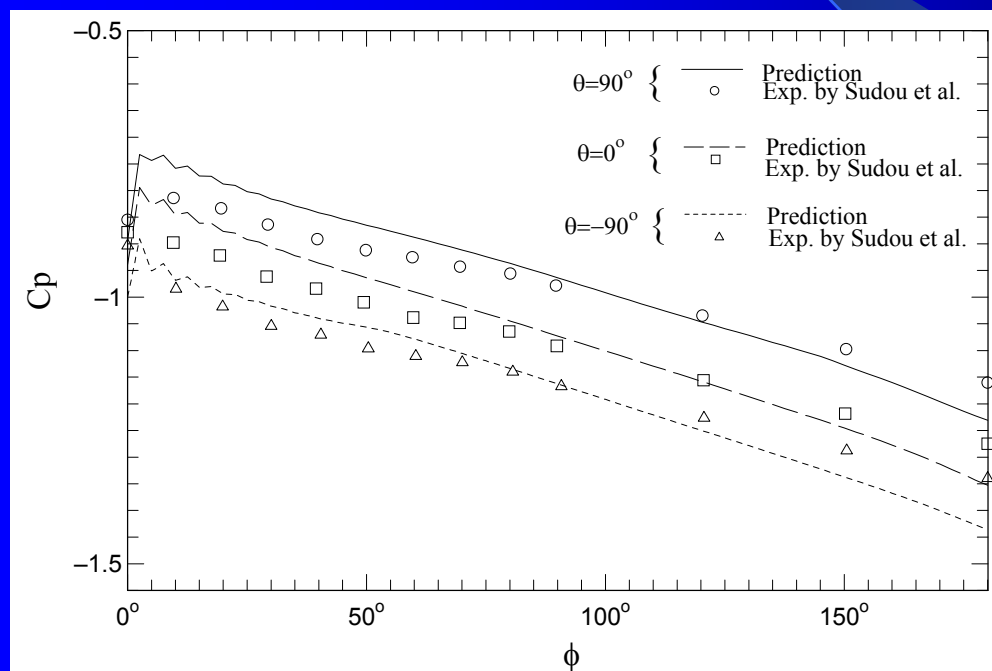
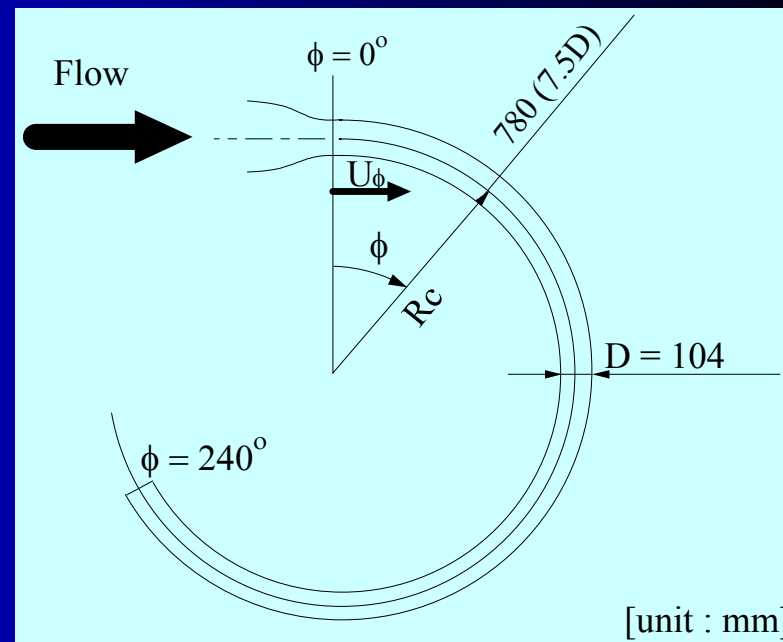
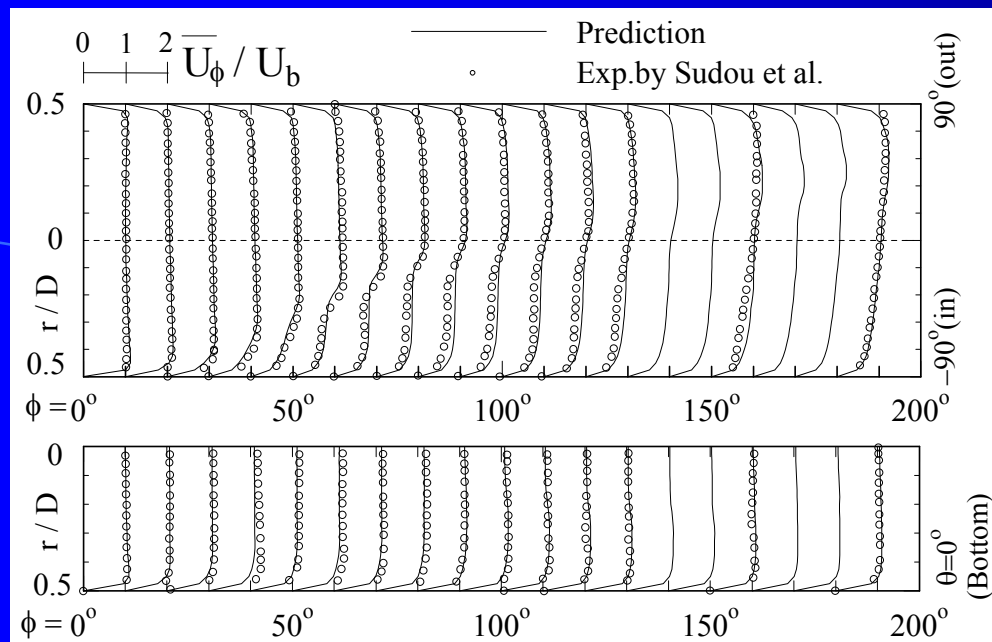
C_μ	σ_k	σ_ε	$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	C_1^*	C_2^*	ζ^*	C_1'	C_2'	ζ'
0.09	1.00	1.30	1.44	1.92	1.40	0.44	0.16	-0.35	0.12	0.10

主流方向速度断面等値線図

Exp.by Sudou et al



主流速度と圧力の管軸方向への変化

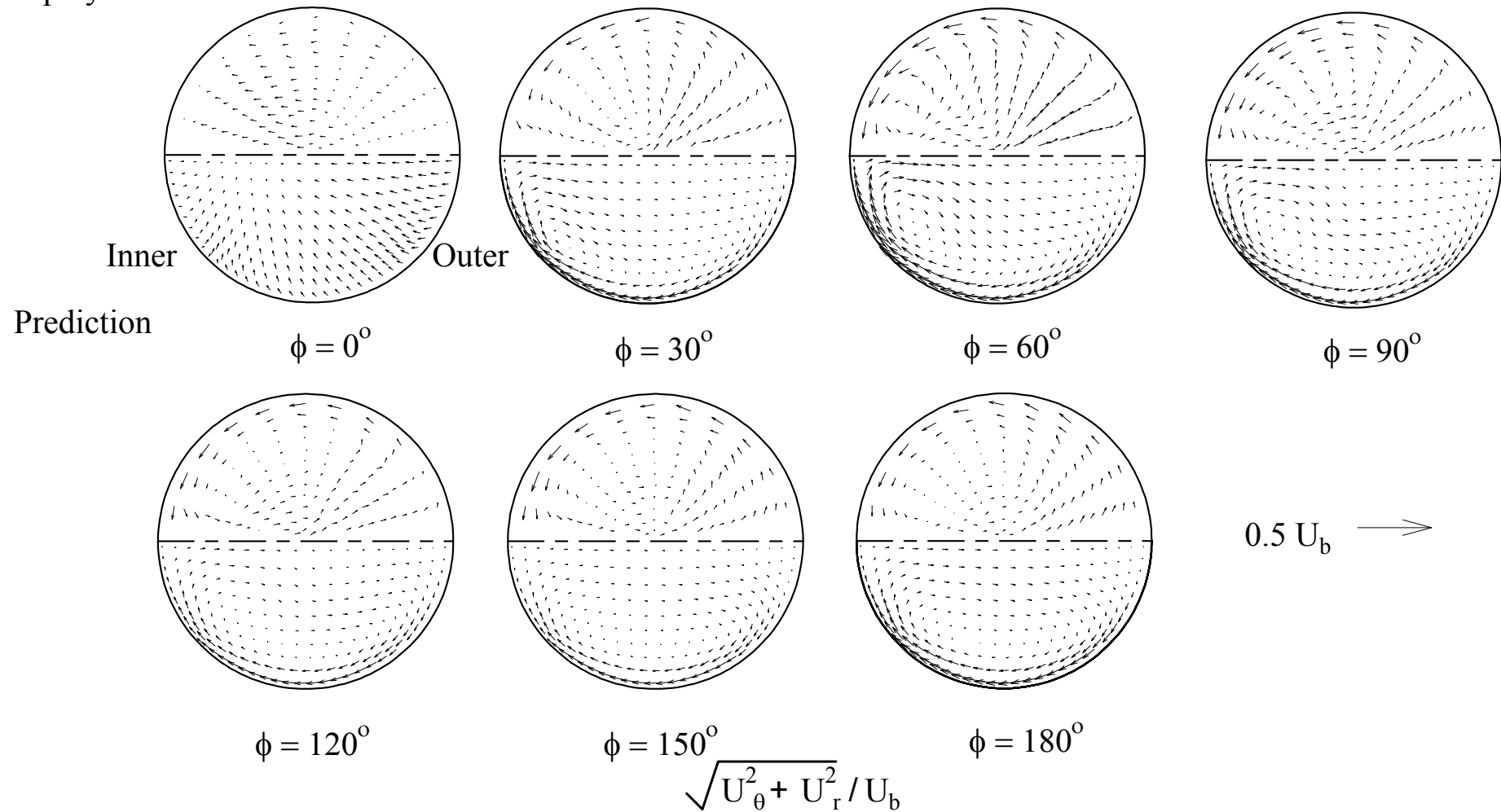


$$C_p = \frac{2(P - P_{ref})}{\rho U_b^2}$$

U_b : 断面平均速度

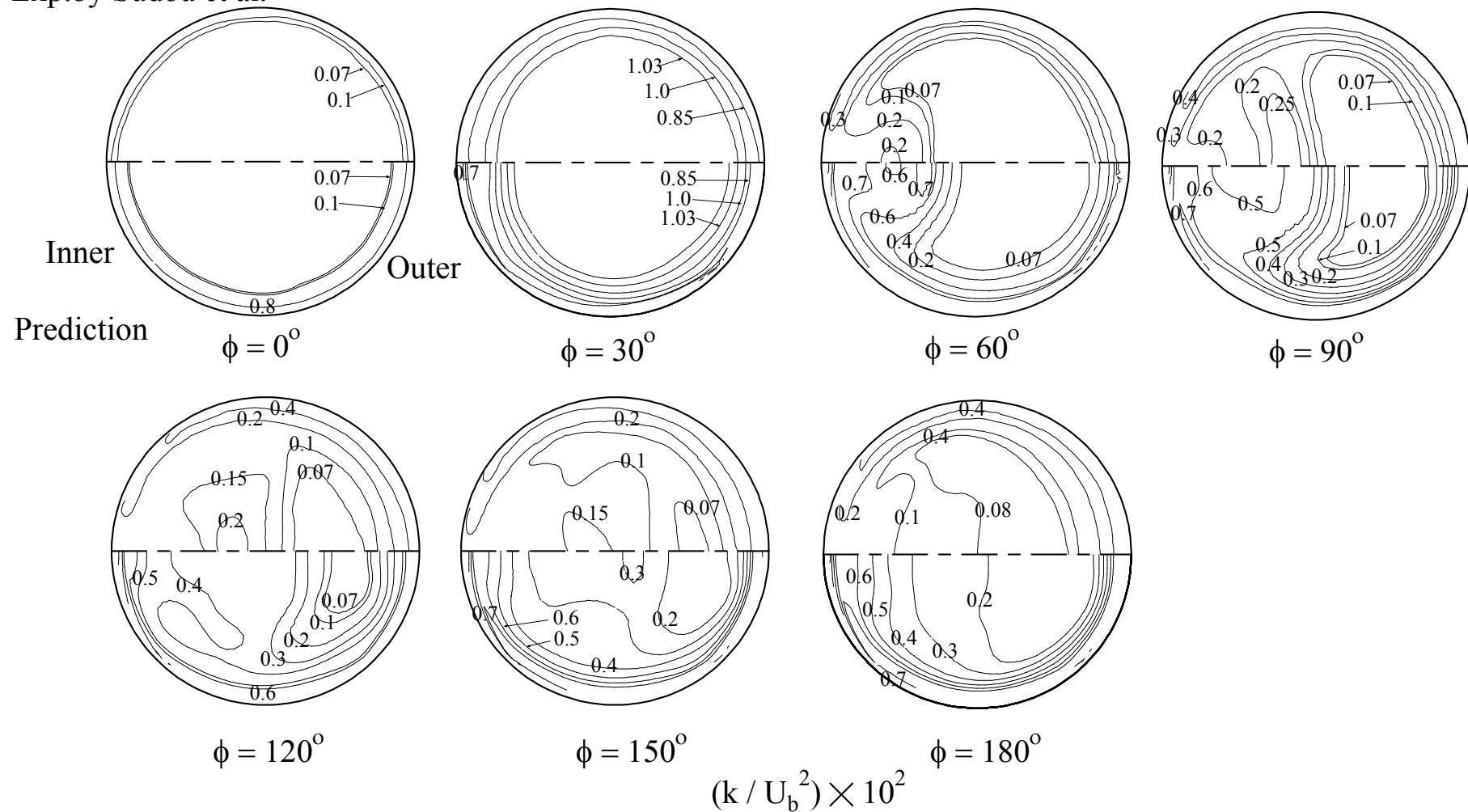
二次流れベクトル

Exp.by Sudou et al.

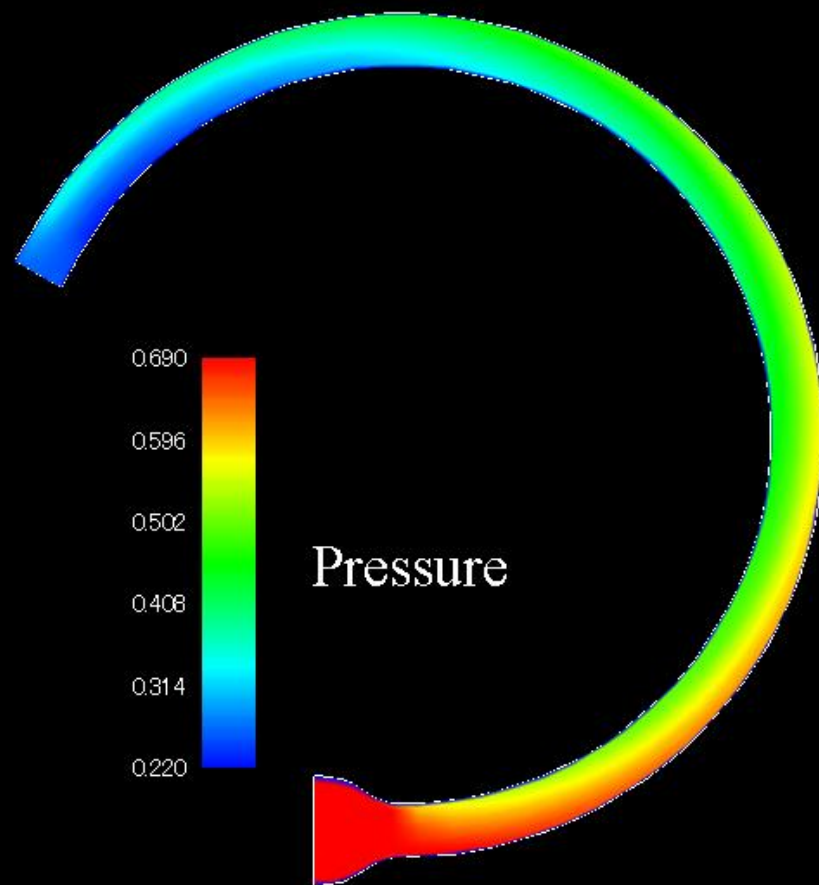


乱流エネルギー断面等値線図

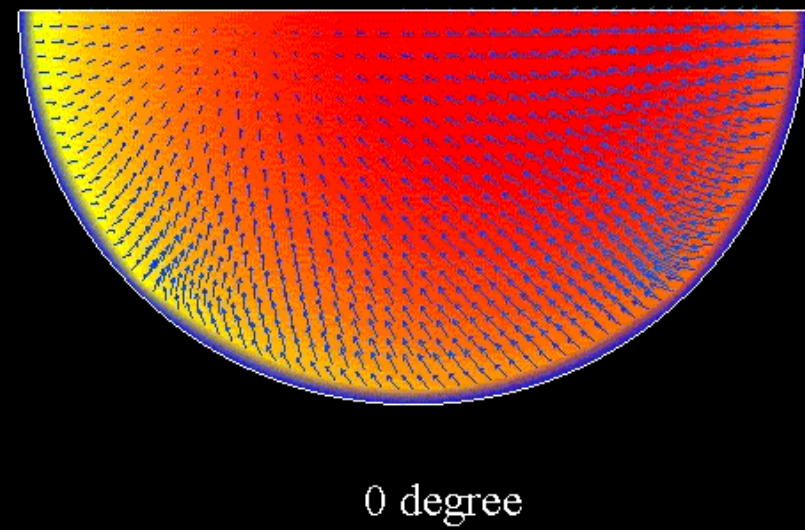
Exp.by Sudou et al.



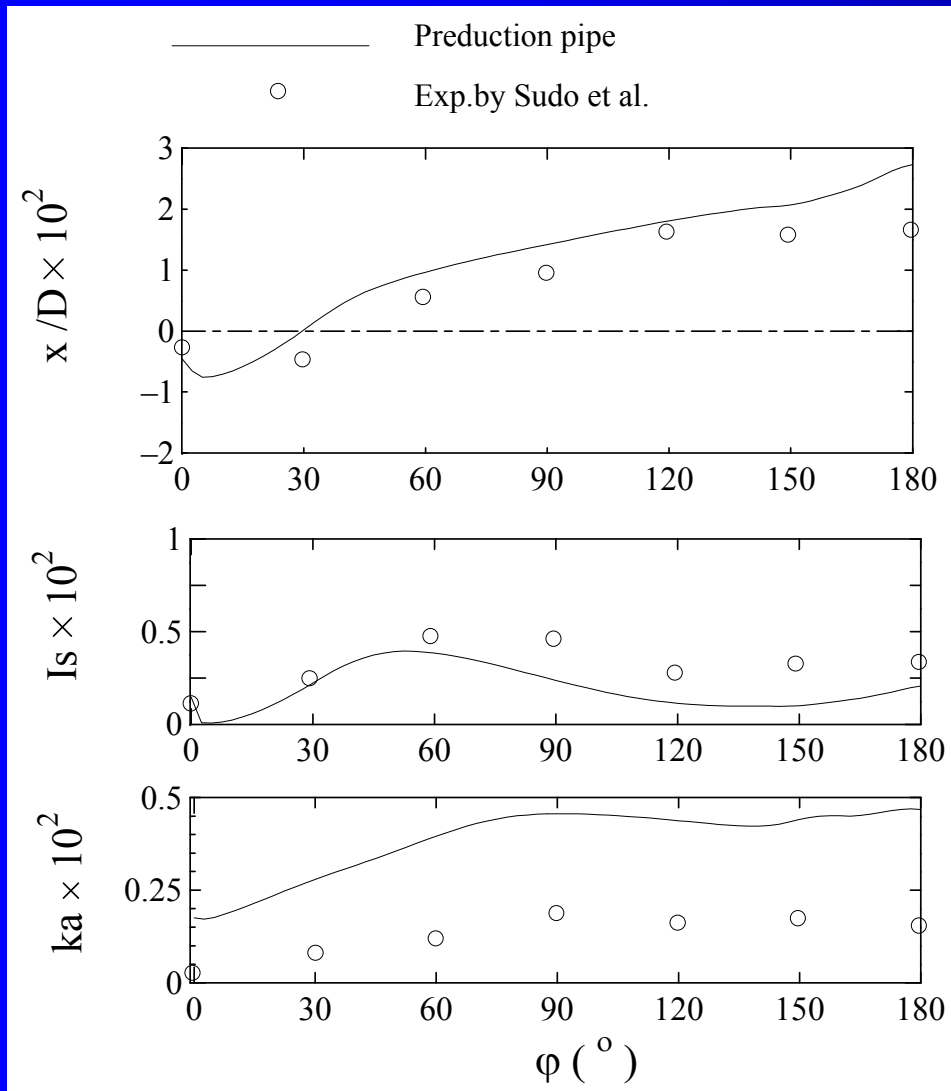
主流方向圧力分布



二次流れと圧力分布(動画)



断面平均量



$$\frac{x}{d} = \frac{8}{\pi D^2 U_b} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^{D/2} \left(\frac{r \sin \theta}{D} \right) \overline{U_r} dr d\theta$$

$$Is = \frac{8}{\pi D^2 U_b^2} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^{D/2} \left(\overline{U_{\phi}^2} + \overline{U_r^2} \right) r dr d\theta$$

$$ka = \frac{8}{\pi D^2 U_b^2} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^{D/2} \frac{1}{2} \left(\overline{u_{\phi}'^2} + \overline{u_r'^2} + \overline{u_{\theta}'^2} \right) r dr d\theta$$

結論

- (1)主流方向速度は曲がり管入り口で圧力勾配の影響により高速領域がIn側に現われ、それ以降は遠心力による要因も加わりOut側へ遷移する。本解析手法もこうした曲がり管路特有の現象を再現した。
- (2)二次流れの発達において管断面内で圧力勾配により、壁面付近ではOut側からIn側へ、管中央部では遠心力の影響も加わりIn側からOut側への二次流れが発生し、一對の渦を形成して下流へいたるが、本解析手法もこうした特徴的な流れを再現した。
- (3)圧力分布は曲がり管入り口で下流の影響を受けIn側で順圧力勾配により低圧、Out側で逆圧力勾配により高圧の分布を示すが、このような特徴もとらえる事ができた。
- (4)乱流エネルギー分布は曲がり管入り口から壁面付近の高い領域が、In側からOut側へと遷移し、また本解析手法も同様な結果を示した。定量的評価では乱流エネルギーの値は実験値より高い値を予測した。