

フローノズルの国際規格 (ISO5167-3)改正を目指して

産業技術総合研究所
工学計測標準研究部門

古市紀之

第14回 流量計測クラブ
2017.12.8
機会振興会館

Contents

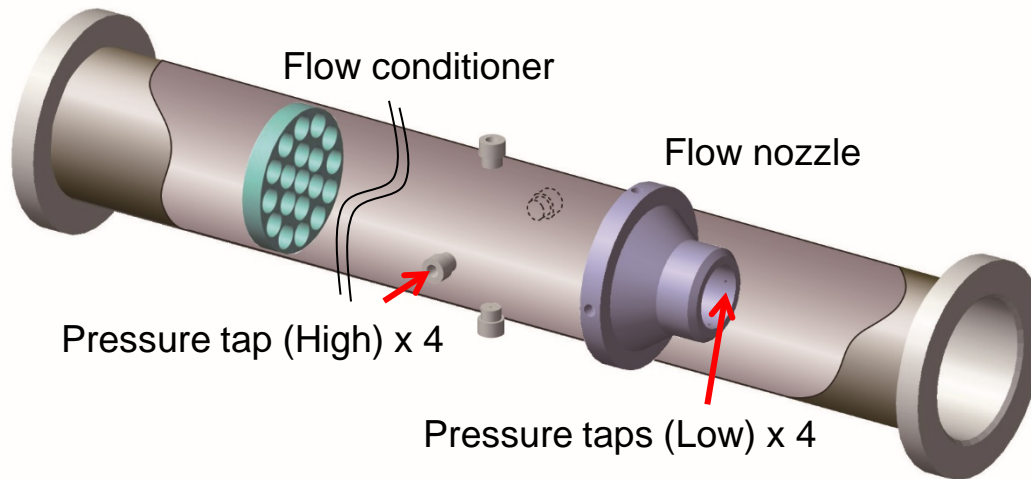
- I. スロートタップ式フローノズル概要
- II. 産総研における実験結果とASME規格への適用性
- III. 実験結果の検証
- IV. 新しい流出係数特性式の提案
- V. まとめと今後

Contents

- I. スロートタップ式フローノズル概要
- II. 産総研における実験結果とASME規格への適用性
- III. 実験結果の検証
- IV. 新しい流出係数特性式の提案
- V. まとめと今後

背景 (概要)

スロートタップ式フローノズル (ASME PTC 6準拠)



➡ 主な用途

- ASME PTC6に見られるような、蒸気タービンの評価
- 原子力発電所における給水流量計測

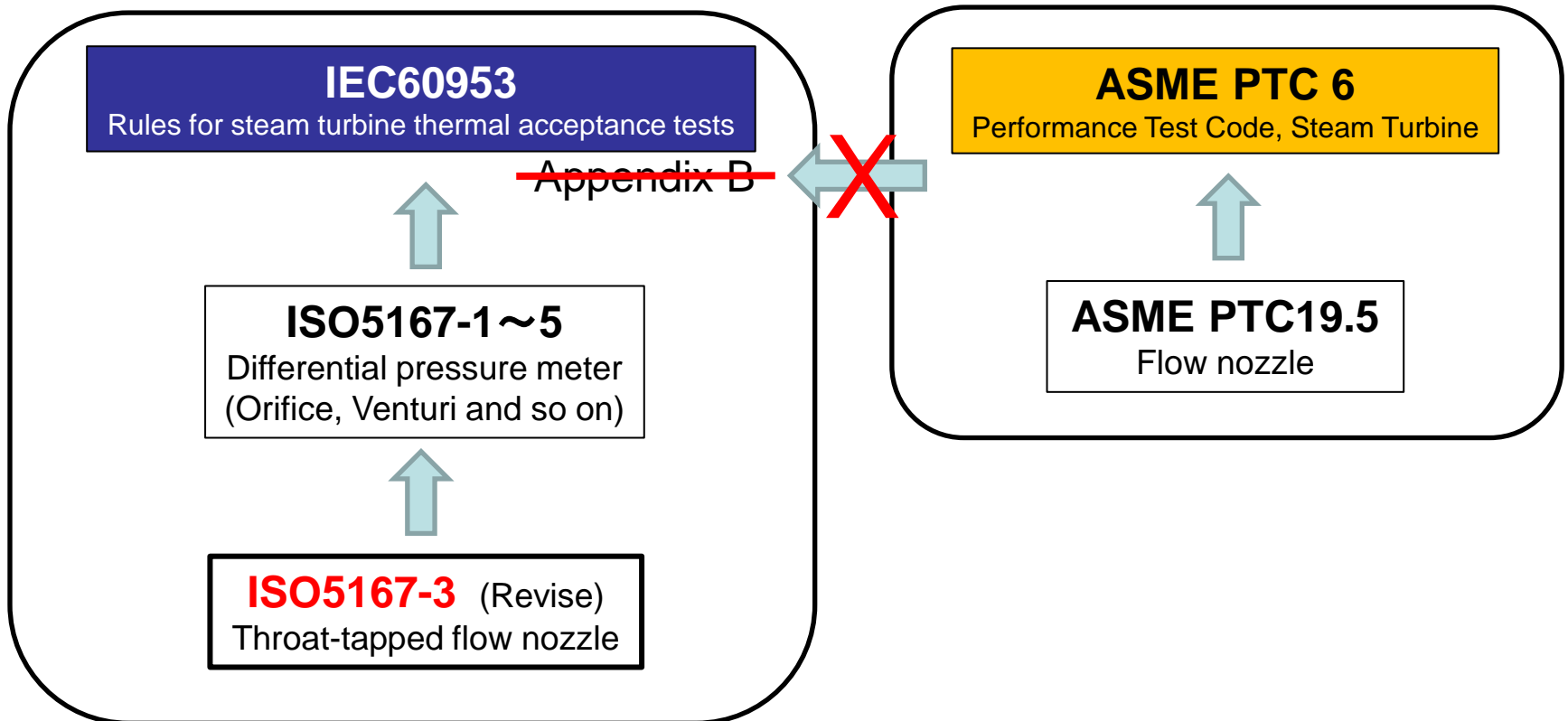
➡ PTC 6準拠スロートタップ式フローノズルの特徴

- 比較的小さい不確かさ* : **0.25%**
- 流出係数を求めるため、または合否判定のために実流校正が必須
- 流出係数のレイノルズ数に関する外挿方法を明記

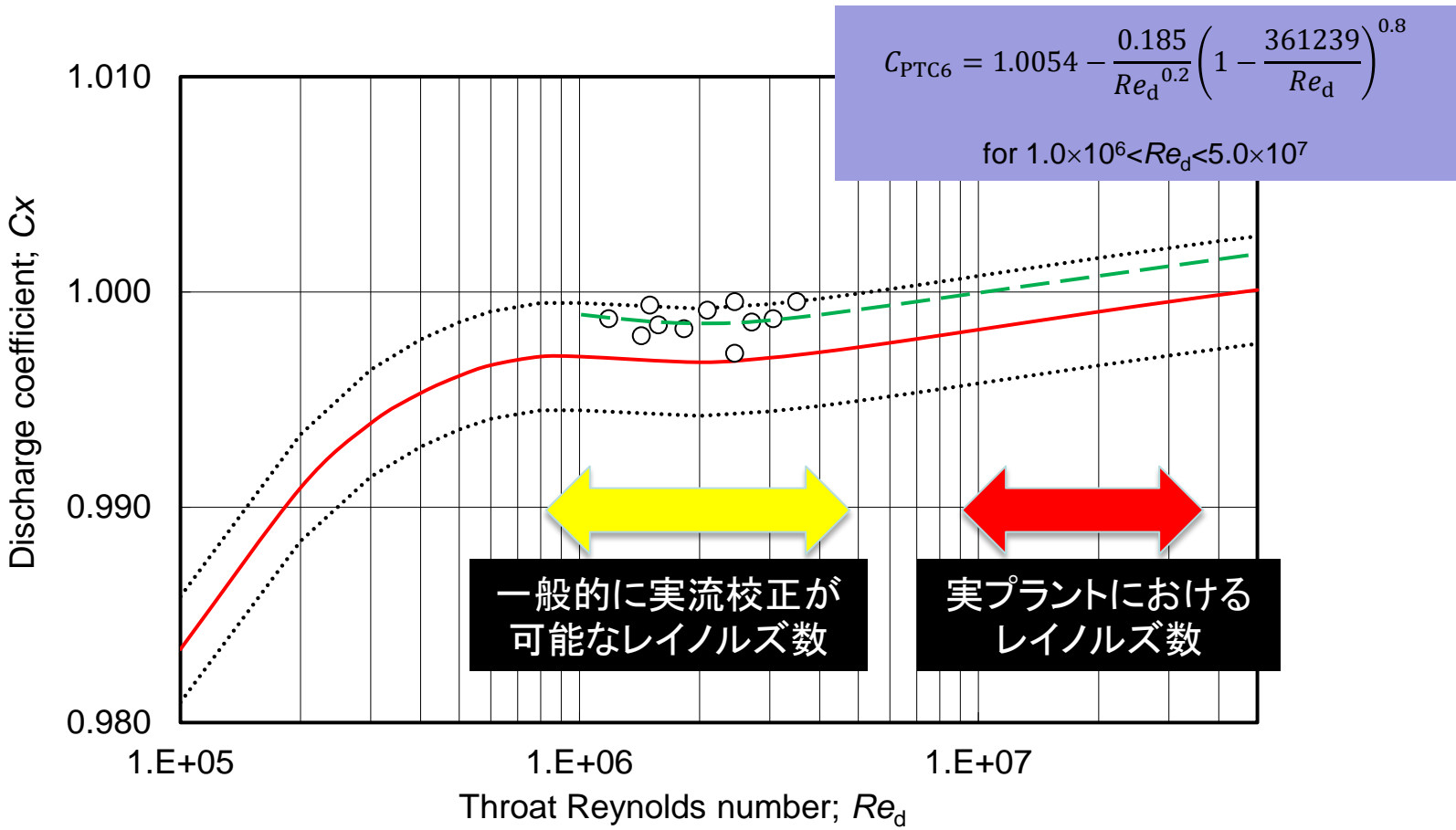
背景 (ISO)

- ▶ 発電所における蒸気タービンの評価コード
IEC 60953
ASME PTC 6

- ▶ この評価には給水流量計測が非常に重要な要素となる

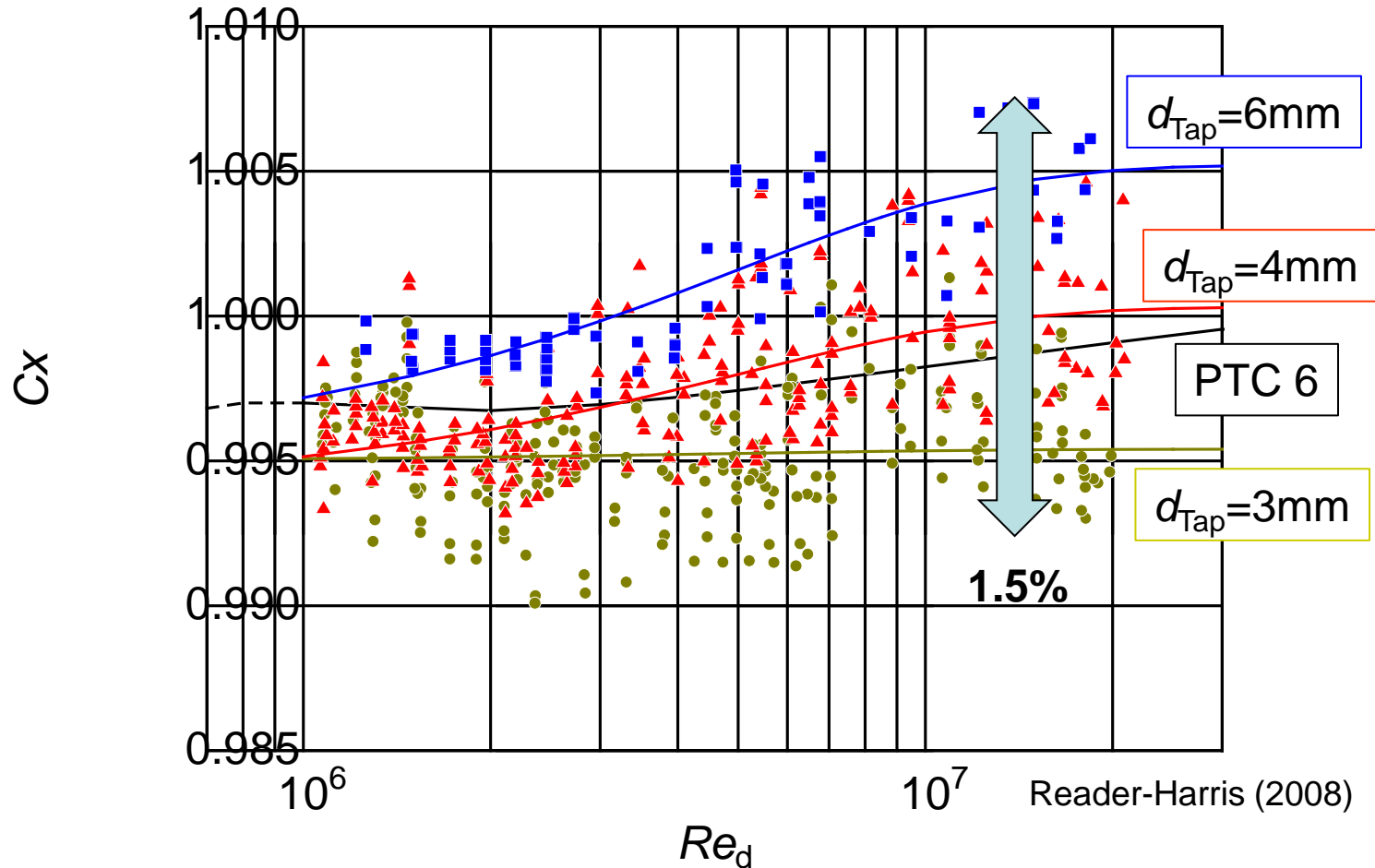


背景 (ASME PTC 6)



背景 (Reader-Harrisの実験結果)

▶ PTC 6において定義されるタップ径 ; $d_{Tap} = 1/8'' \sim 1/4''$ (3.175 mm~6.35 mm)

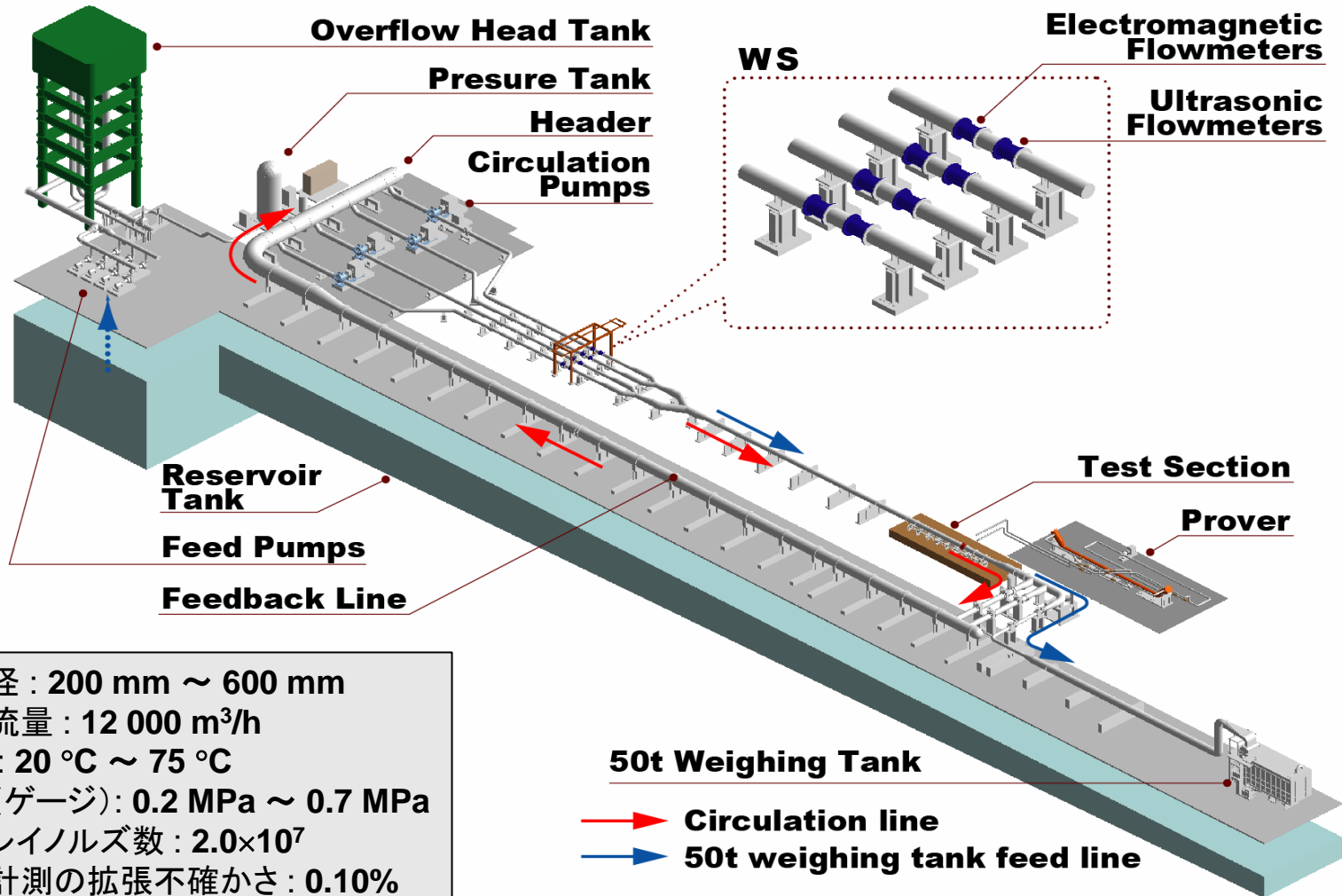


Contents

- I. スロートタップ式フローノズル概要
- II. 産総研における実験結果とASME規格への適用性
- III. 実験結果の検証
- IV. 新しい流出係数特性式の提案
- V. まとめと今後

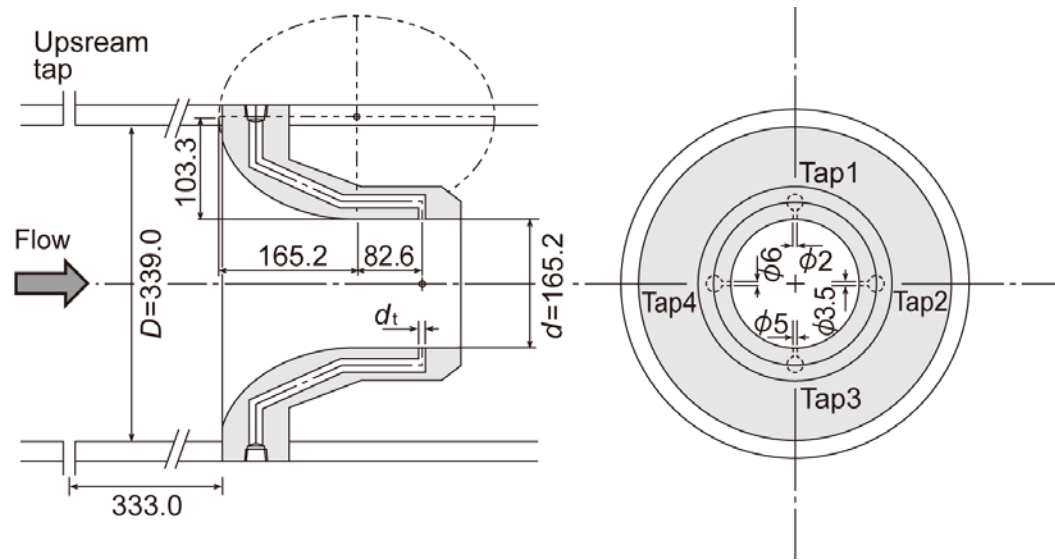
AIST, NMIJにおける実験設備

Hi-Reff (High Reynolds number actual flow facility; 高レイノルズ数実流試験設備)



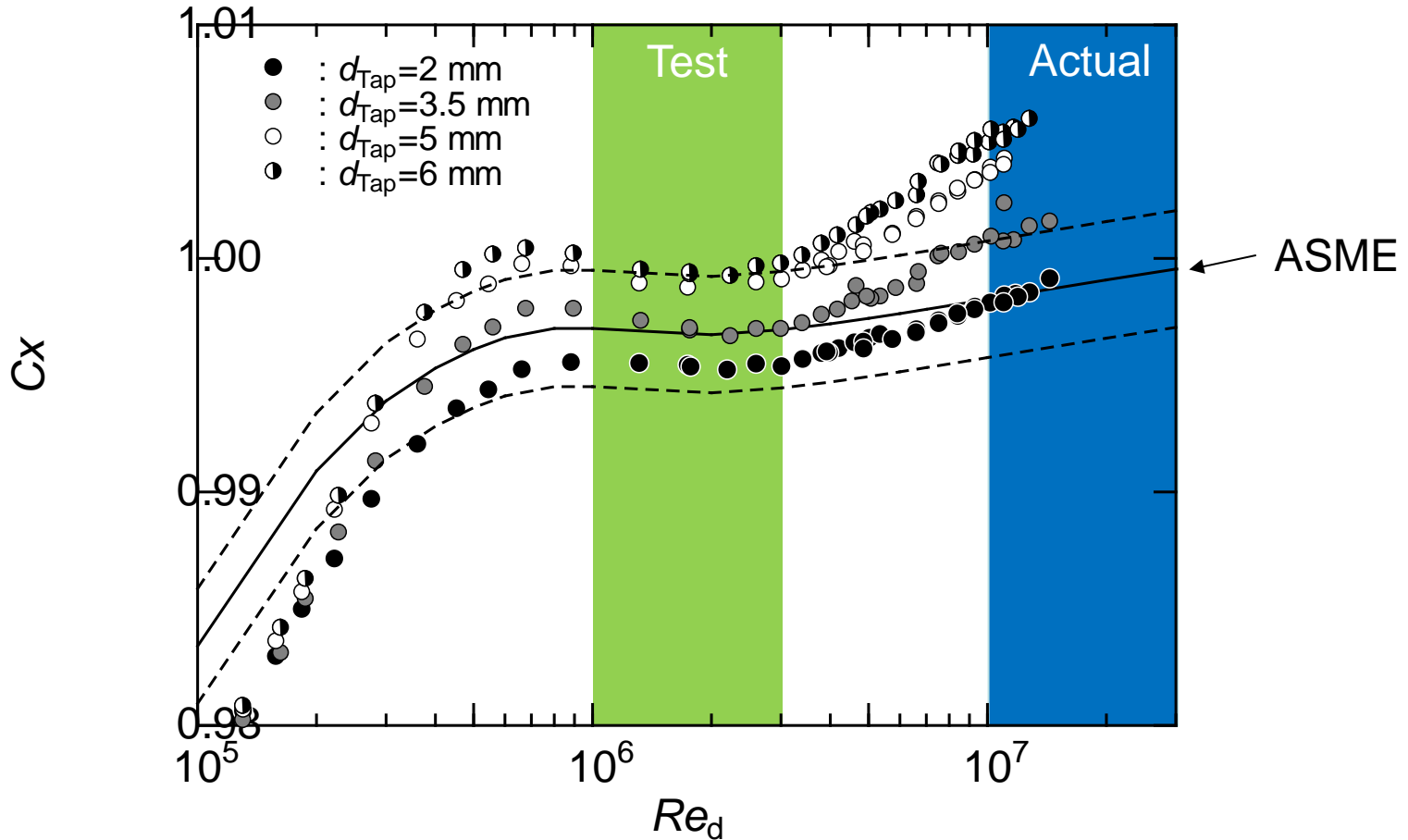
配管径 : 200 mm ~ 600 mm
 最大流量 : 12 000 m³/h
 水温 : 20 °C ~ 75 °C
 圧力(ゲージ) : 0.2 MPa ~ 0.7 MPa
 最大レイノルズ数 : 2.0×10⁷
 流量計測の拡張不確かさ : 0.10%

実験に用いたノズル



		Nozzle A				Nozzle B
Nominal Diameter (mm)		350				200
Eclipse diameter (mm)		165.2 × 103.3				99.9 × 62.5
Throat diameter d (mm)		165.220				99.894
Upstream pipe diameter D (mm)		338.96				199.90
Diameter ratio β		0.4874				0.4997
Throat tap diameter d_{Tap} (mm)		2	3.5	5	6	3.5
Normalized tap diameter d_{Tap}/d		0.012	0.021	0.030	0.036	0.035
Upstream tap diameter d_U (mm)		6				4
Surface roughness	Ra (μm)	0.10				0.06
	Rz (μm)	0.50				0.30

実験結果

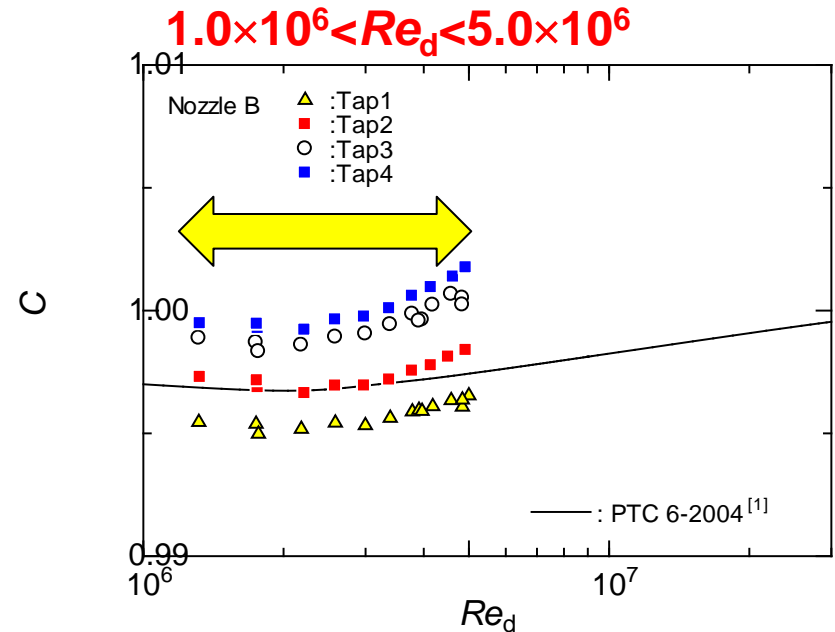
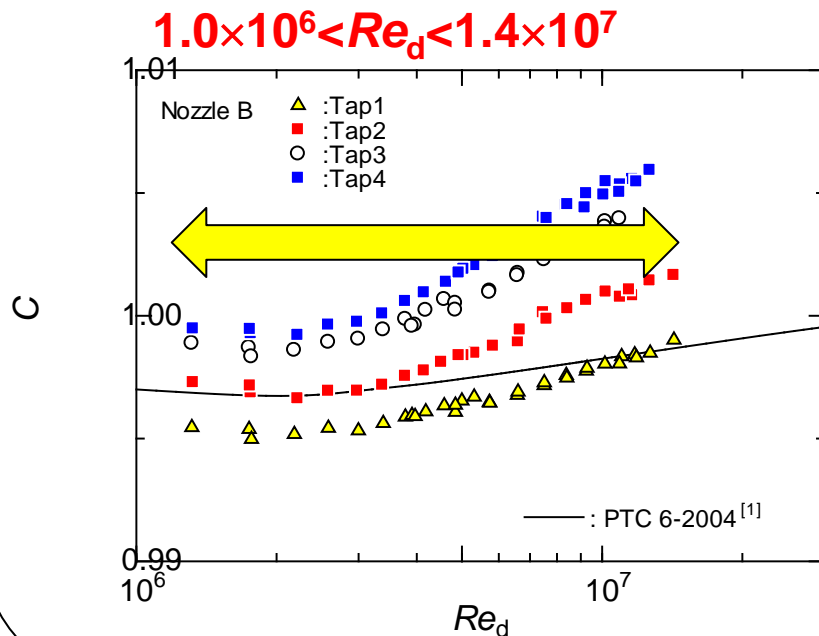


実流試験可能なレイノルズ数域では、±0.25%のASME規格要求を満たす。
 実プラントのレイノルズ数域では、タップ径が大きいほど、規格を満たさない。

PTC 6における試験結果への要求事項

- ➔ PTC 6 ($Re_d > 10^6$)
 - フィッティングカーブが、基準となるカーブの $\pm 0.25\%$ 以内であること
 - フィッティングカーブの傾きが一定値以下であること
 - データのばらつきが一定値以下であること

実験におけるレイノルズ数の範囲は未定義……



PTC 6における試験結果への要求事項

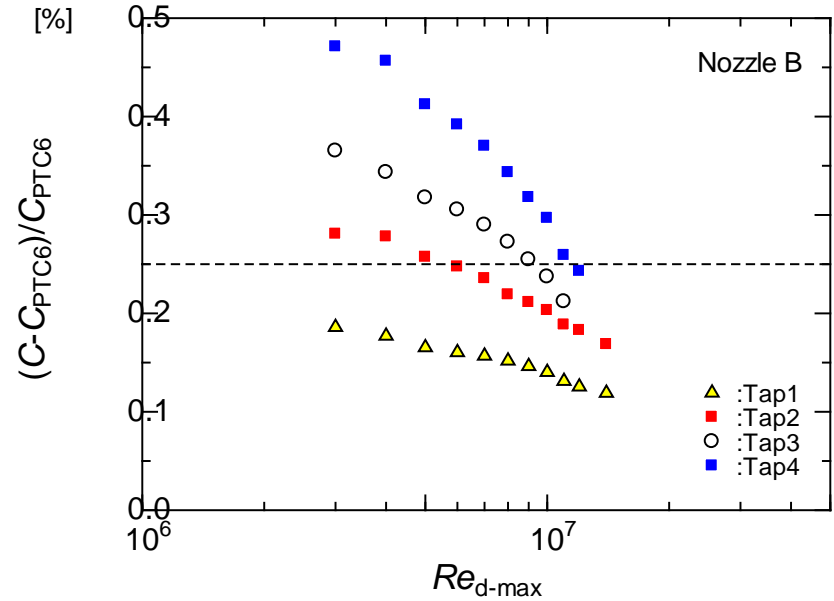
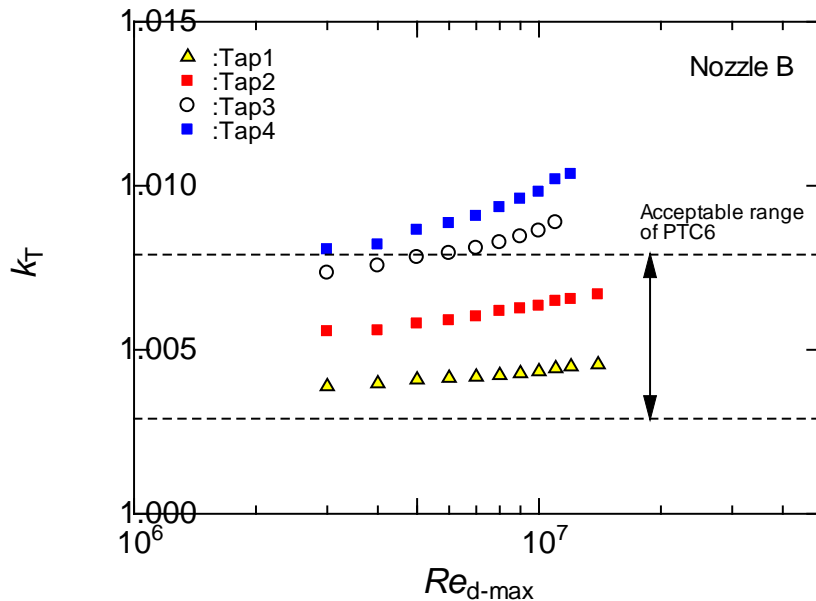
→ $1.0 \times 10^6 < Re_d < Re_{d-max}$ の範囲のデータを使用とする

0.25% 許容差

最大レイノルズ数における実計測との偏差

Acceptable range of PTC 6
 $1.0029 \leq k_T \leq 1.0079$

Deviation should be less than 0.25%



$$k_T = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Cx_i$$

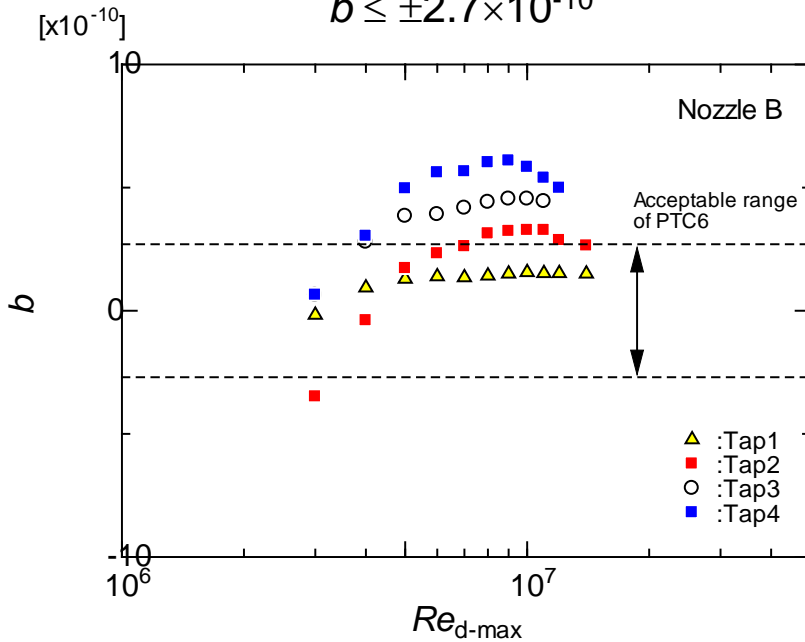
$$Cx_i = C_i + \frac{0.185}{Re_d^{0.2}} \left(1 - \frac{361239}{Re_d} \right)^{0.8}$$

$$C_{PTC6} = k_T - \frac{0.185}{Re_d^{0.2}} \left(1 - \frac{361239}{Re_d} \right)^{0.8}$$

PTC 6における試験結果への要求事項

レイノルズ数に対する依存性

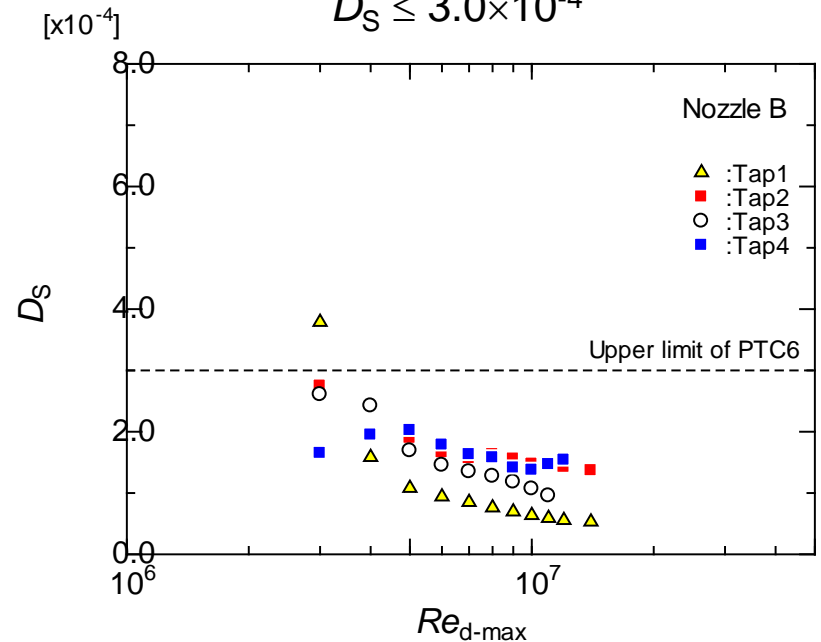
Acceptable range of PTC 6
 $b \leq \pm 2.7 \times 10^{-10}$



Fitted to
 $Cr = a + bRe_d$

データのばらつき

Acceptable range of PTC 6
 $D_s \leq 3.0 \times 10^{-4}$



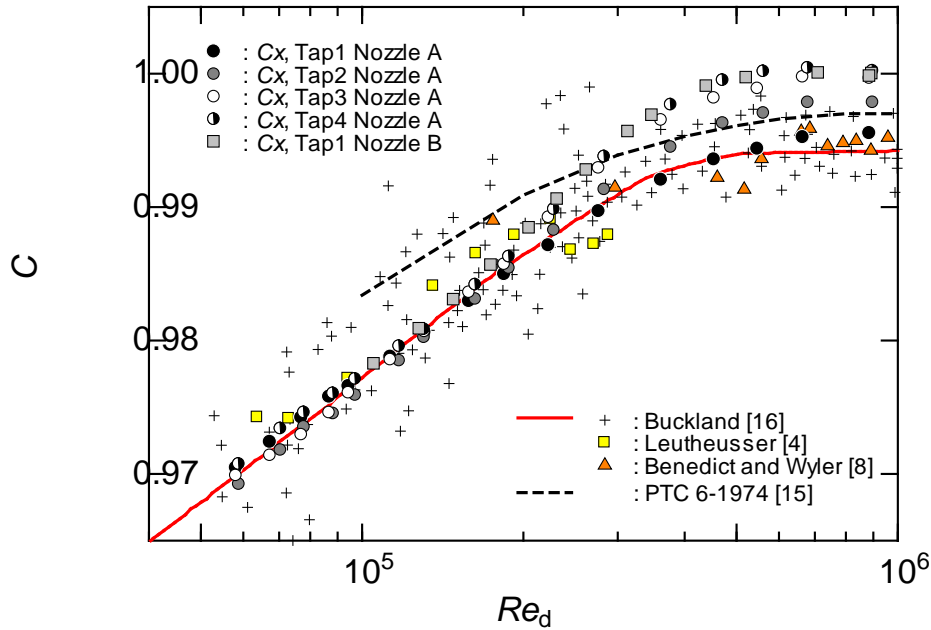
$$D_s = \frac{t_s S_{kt}}{\sqrt{N}} \quad S_{kt} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Cx_i - Cr_i)^2}{(N-2)}}$$

Contents

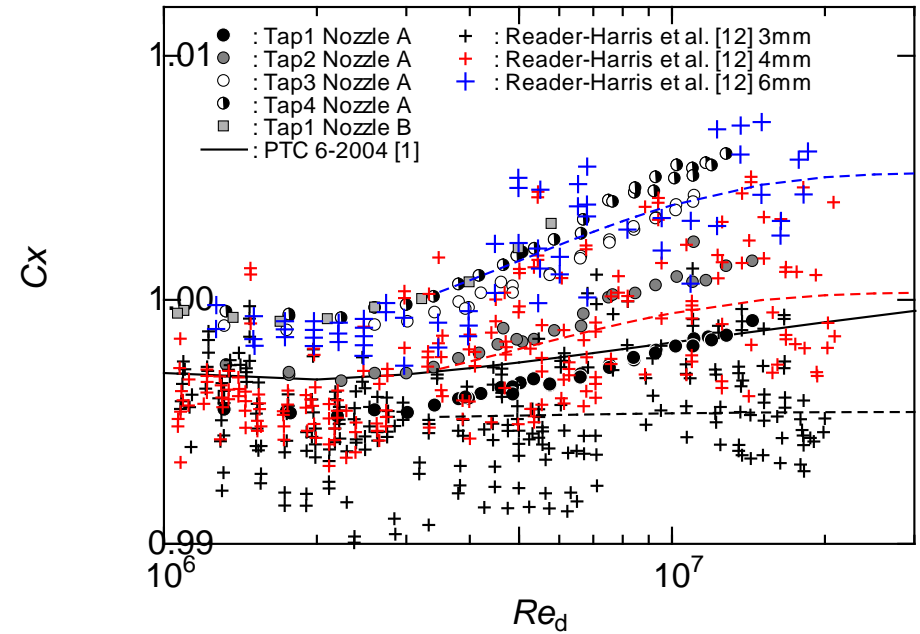
- I. スロートタップ式フローノズル概要
- II. 産総研における実験結果とASME規格への適用性
- III. 実験結果の検証**
- IV. 新しい流出係数特性式の提案
- V. まとめと今後

過去の実験データとの比較

低レイノルズ数域



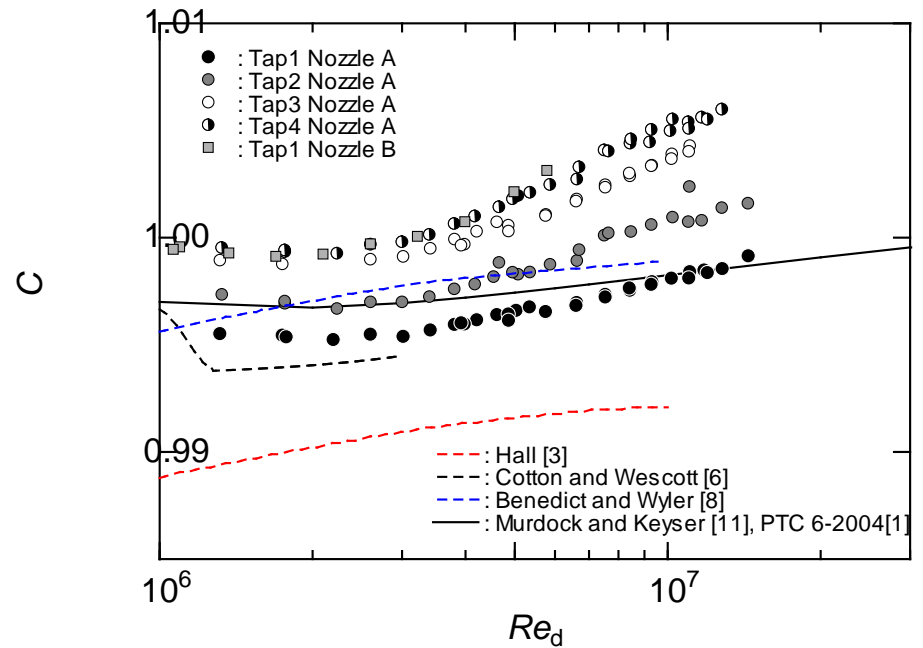
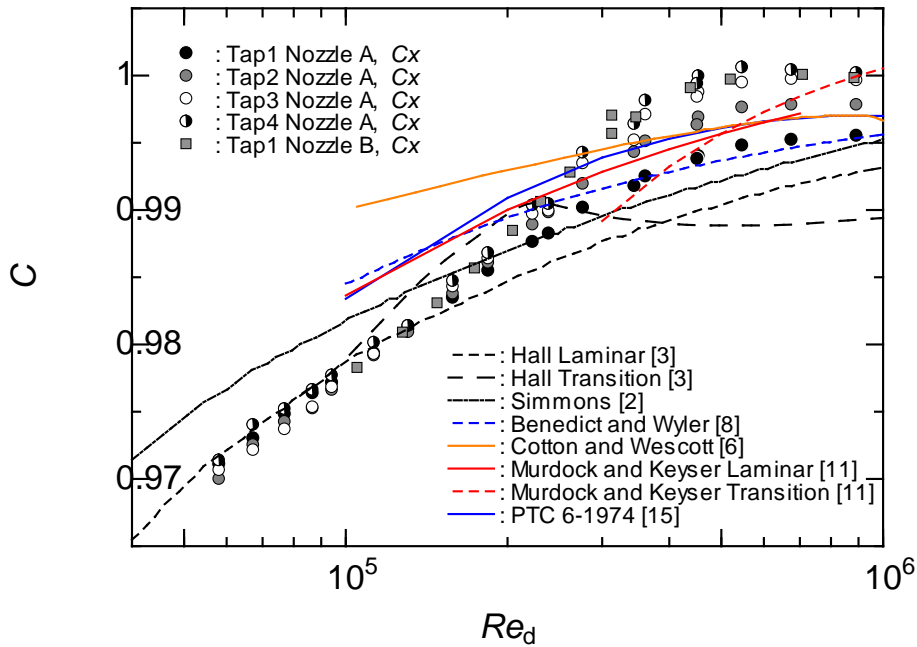
高レイノルズ数域



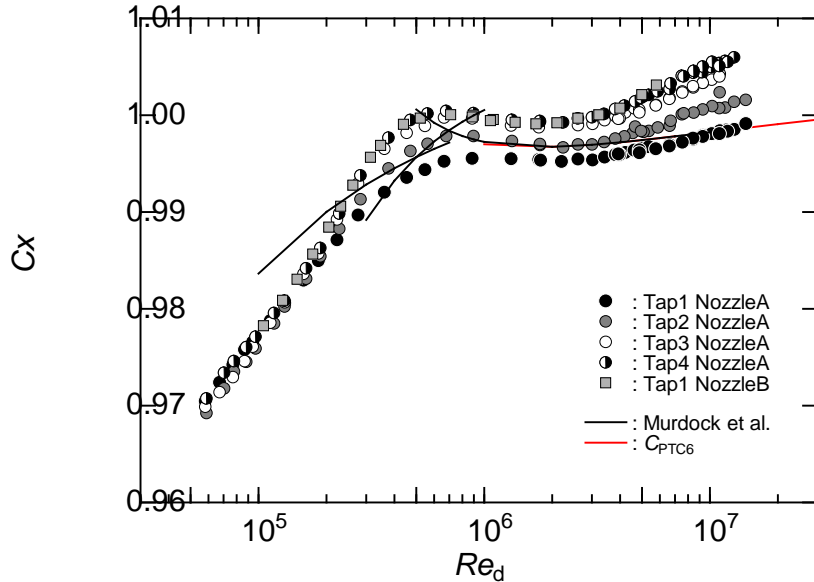
理論との比較

低レイノルズ数域

高レイノルズ数域



ASMEにおける理論 (Murdockら)



$$C_x = C_t + e_{Tap}$$

C_t : Discharge coefficient without tap effect

e_{Tap} : Tap effect

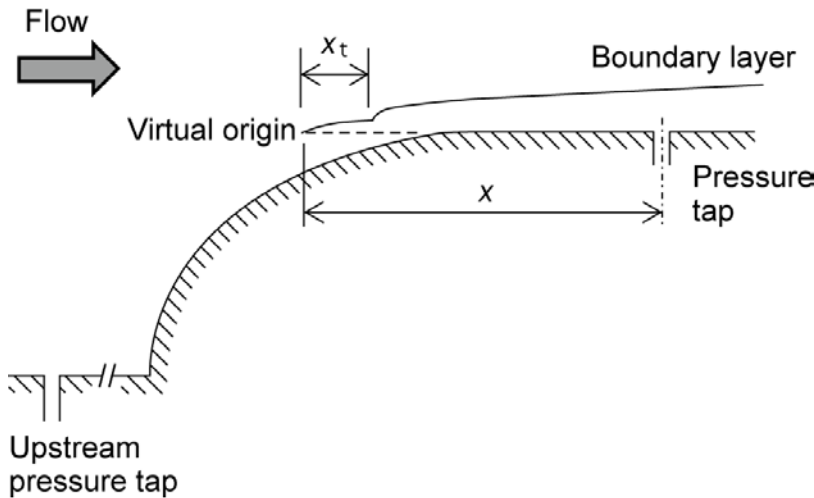
理論的流出係数

仮定 1: 入口流れは一様である

$$C_t = k_T \frac{4\delta^*}{d}$$

δ : Displacement thickness

d : Throat diameter



排除厚さ

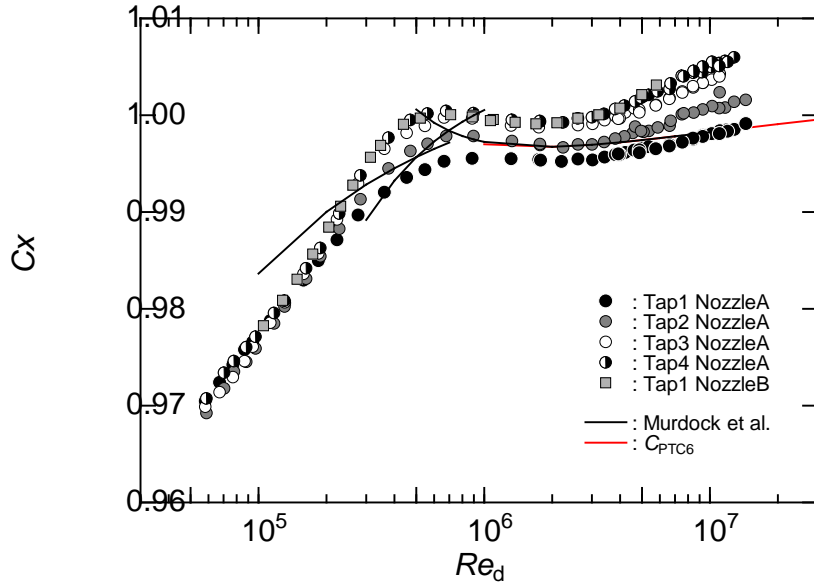
仮定 2: 平板における境界層の発達式に基づく

$$\delta_L^* = \frac{1.7208x}{Re_x^{0.5}}$$

$$\delta_T^* = \frac{0.04625x'}{Re_{x'}^{0.2}} = \frac{0.04625}{Re_d^{0.2}} \left(\frac{x}{d} - \frac{Re_{xt}}{Re_d} \right)^{0.8}$$

Re_{xt} : Transition Reynolds number (≈ 400000)

ASMEにおける理論 (Murdockら)



$$C_x = C_t + e_{\text{Tap}}$$

$$C_{tL} = 1 - \frac{6.88}{Re_d^{0.5}} \left(\frac{x}{d} \right)^{0.5}$$

$$C_{tT} = 1 - \frac{0.185}{Re_d^{0.2}} \left(\frac{x}{d} - \frac{Re_{xt}}{Re_d} \right)^{0.8}$$

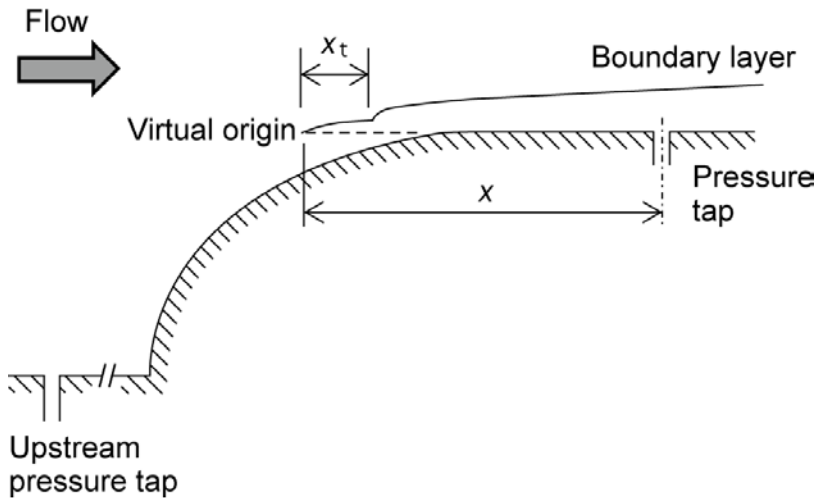
仮定 3: 仮想原点位置は $x=d$ である。

$$C_{tL}' = 1 - \frac{6.88}{Re_d^{0.5}}$$

$$C_{tT}' = 1 - \frac{0.185}{Re_d^{0.2}} \left(1 - \frac{361239}{Re_d} \right)^{0.8}$$

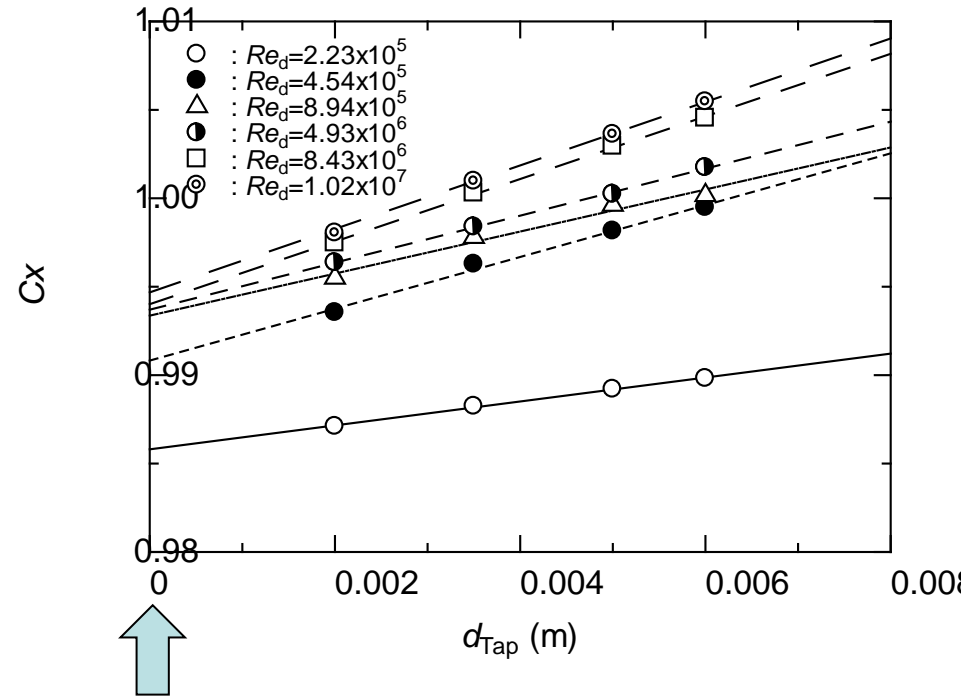
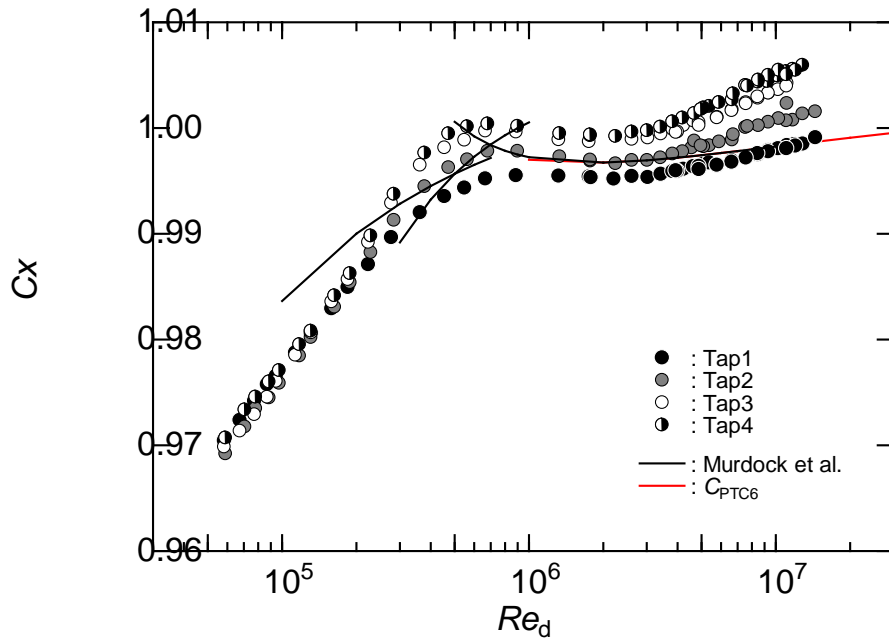
仮定 4: タップ効果 (差圧計測誤差) はタップ径およびレイノルズ数によらず一定である。

$$C_{\text{PTC6}} = 1.0054 - \frac{0.185}{Re_d^{0.2}} \left(1 - \frac{361239}{Re_d} \right)^{0.8}$$



実験データの再検証

$$C_x = C_t + e_{\text{Tap}}$$

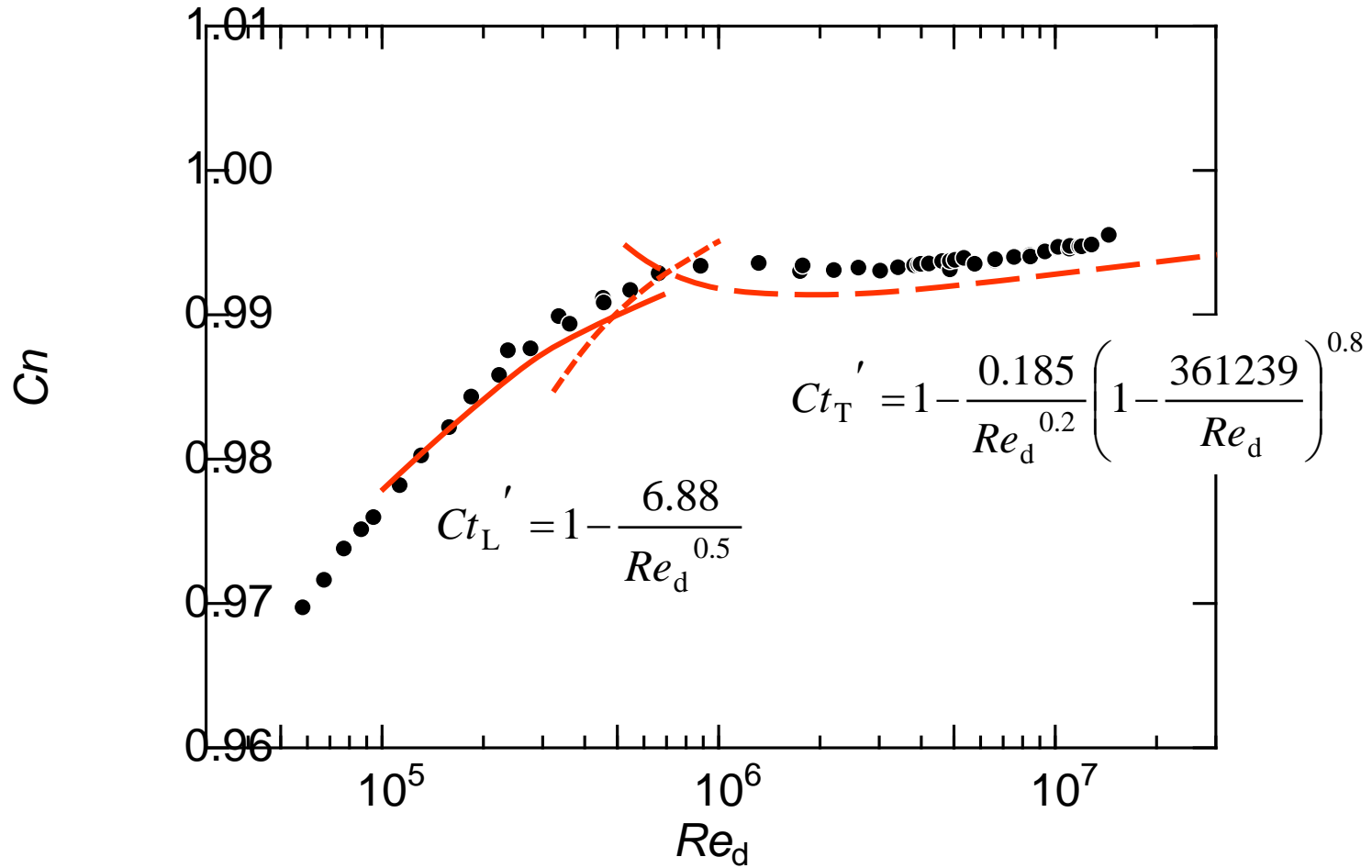


タップ径が無限小 = タップ無し



Nominal discharge coefficient; C_n

実験データの再検証



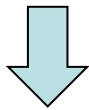
実験データの再検証

$$Cx = Cn + e_{\text{Tap}}$$

$$Cn_{f,L} = k_T - \frac{6.88}{Re_x^{0.5}} \frac{x}{d}$$

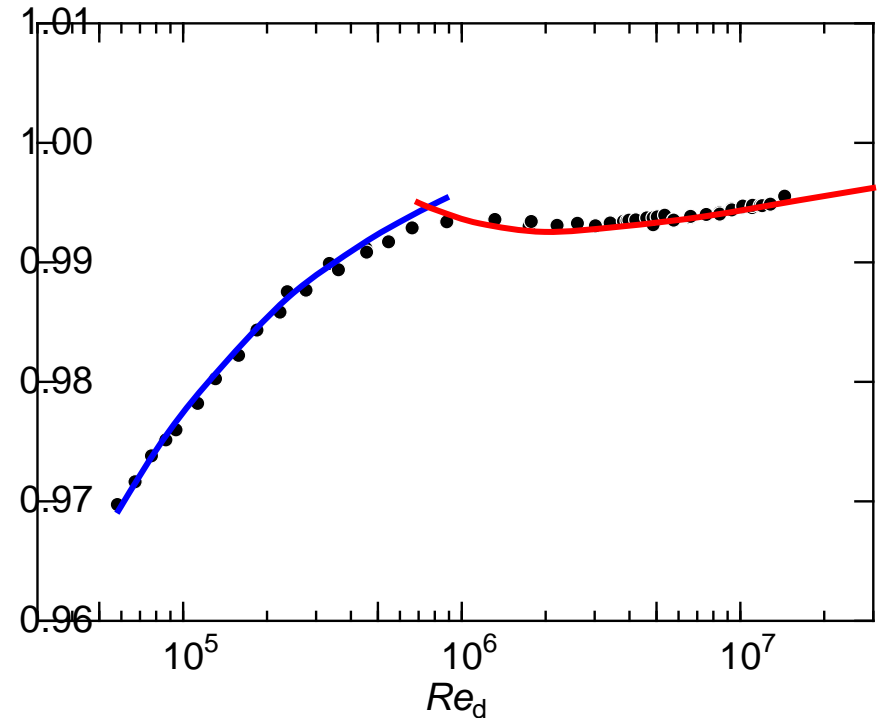
$$Cn_{f,T} = k_T - \frac{0.185}{Re_d^{0.2}} \left\{ \frac{x}{d} \left(1 - \frac{Re_{dt}}{Re_d} \right) \right\}^{0.8}$$

$$Re_{dt} = Re_{xt} d/x = 4.0 \times 10^5$$



$$k_T = 1.0042$$

$$x = 1.49d$$



タップ効果とは

タップ効果とは？

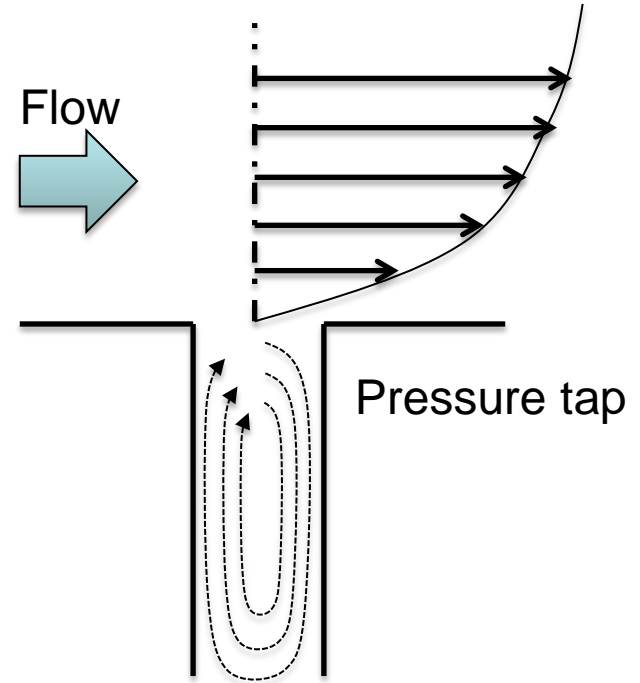


静圧の測定誤差, e

- Shaw (1960)
- |
- McKeon et al (2002)

ノズルやベンチュリ

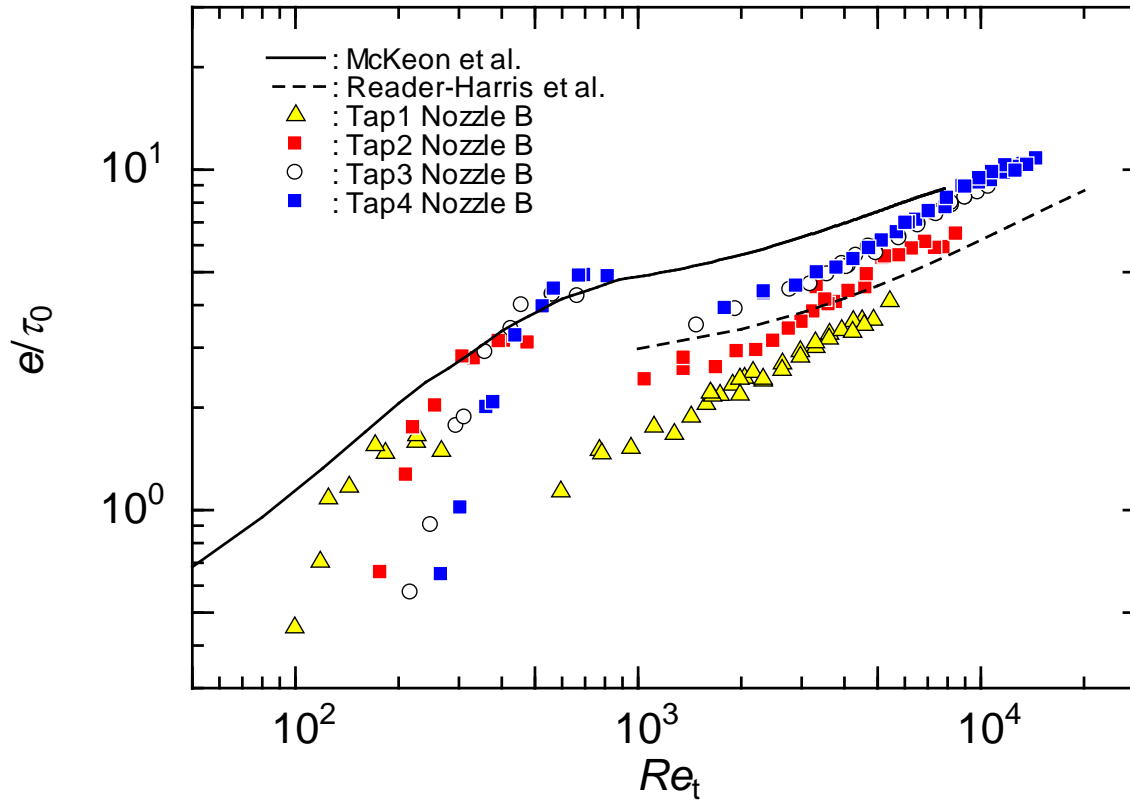
- Benedict et al (1978)
- Gibson et al (1999)
- Reader-Harris et al (2001)



壁面せん断応力, τ_0 , とタップレイノルズ数に相関性がある

$$\frac{e}{\tau_0} \propto Re_t \left(= \frac{\sqrt{\tau_0 / \rho}}{\nu} d_{Tap} \right)$$

Tap effect



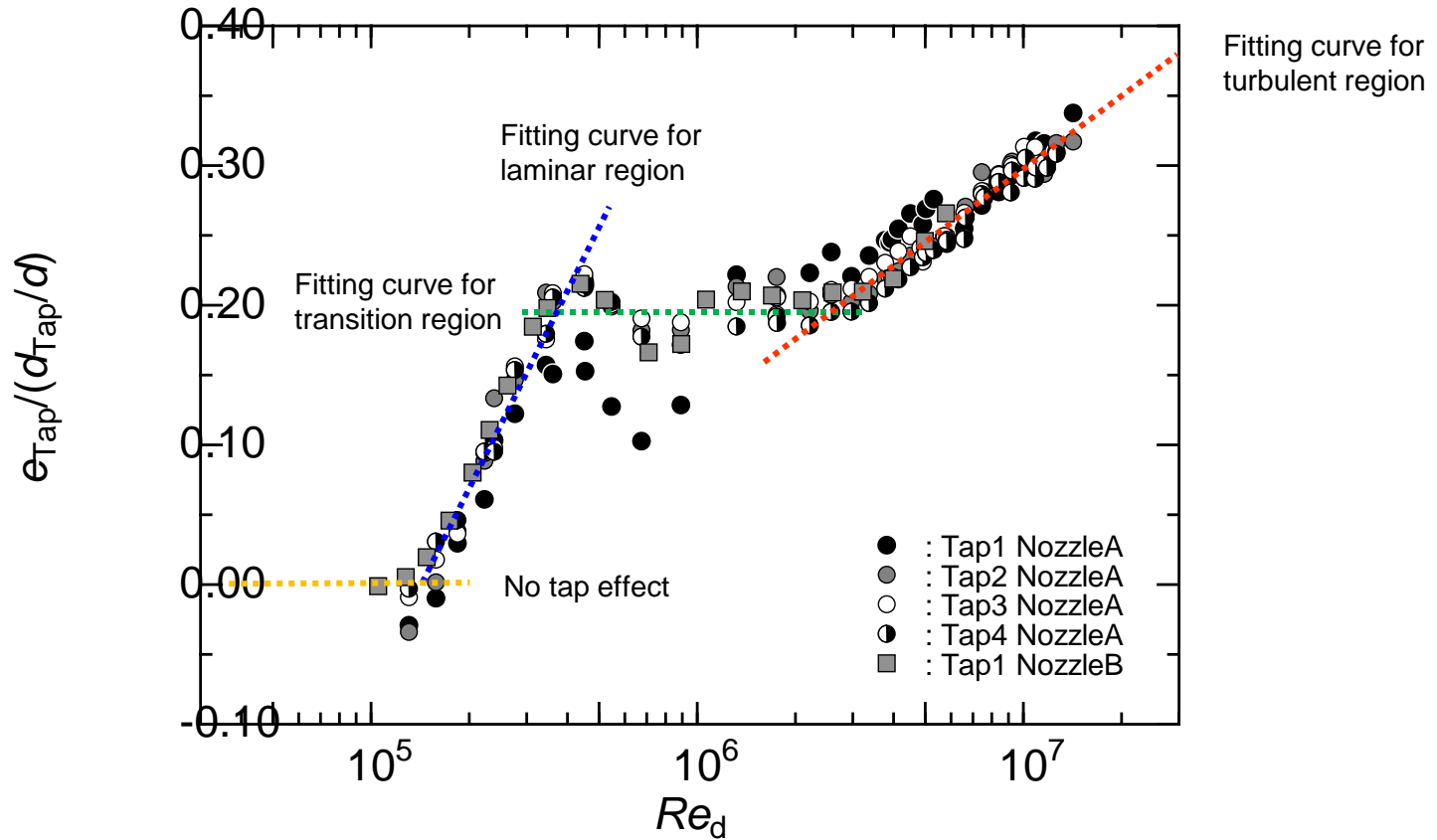
- McKeonらによる結果に漸近する。
- Reader-Harrisらのベンチュリに対する解析に良く一致する。

Contents

- I. スロートタップ式フローノズル概要
- II. 産総研における実験結果とASME規格への適用性
- III. 実験結果の検証
- IV. 新しい流出係数特性式の提案**
- V. まとめと今後

タップ効果のまとめ

$$e_{\text{Tap}} = Cx - Cn$$



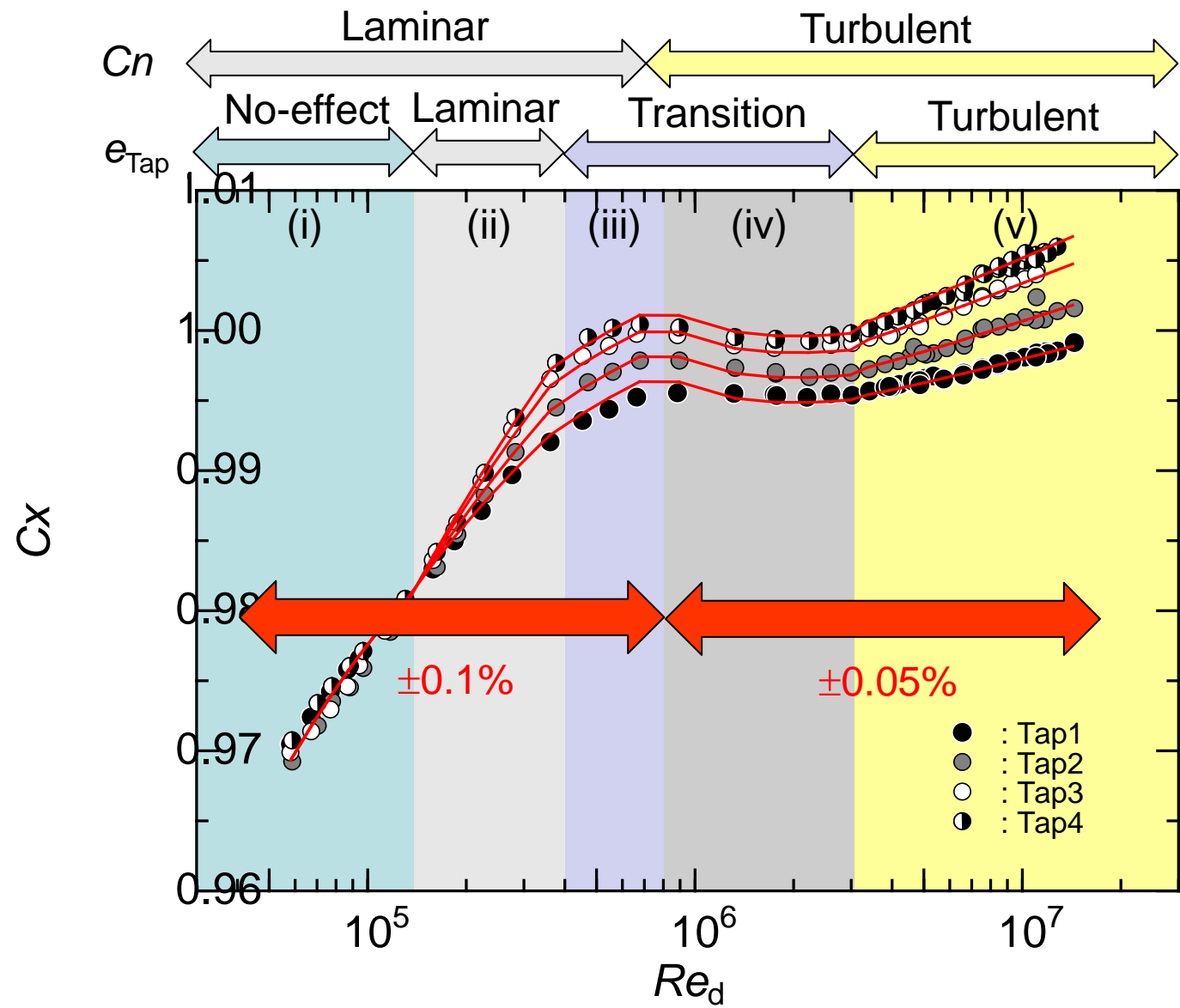
新しい流出係数特性式

$$C_f = Cn + e_{\text{Tap}}$$

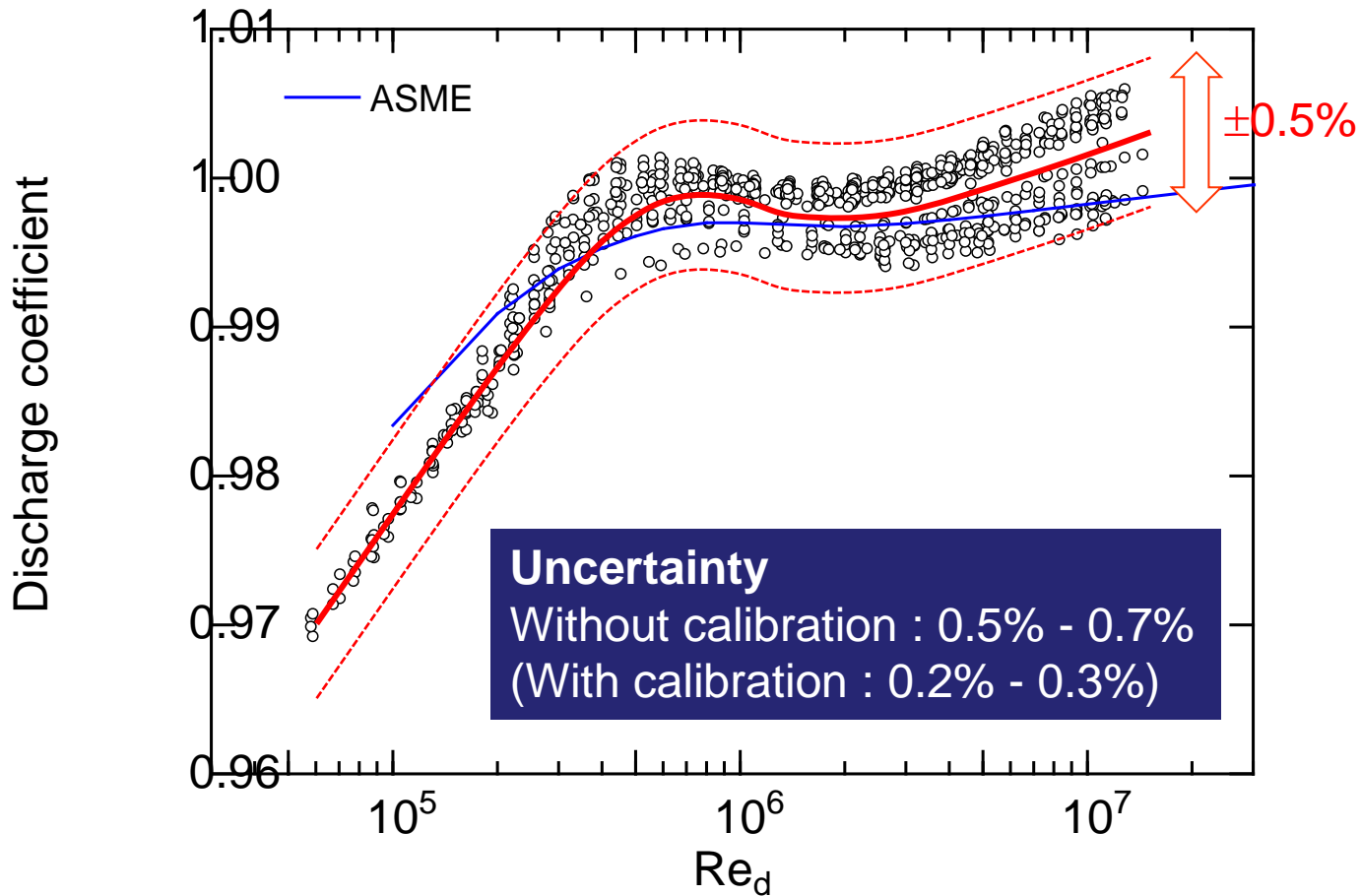
C_f : Discharge coefficient
 Cn : Ideal discharge coefficient
 e_{Tap} : Static pressure error
 d : Diameter of throat
 d_{Tap} : Diameter of wall tap
 Re_d : Reynolds number

	Equation	Reynolds number range
(i)	$C_f = 1.0042 - \frac{8.41}{Re_d^{0.5}}$	$Re_d < 1.3 \times 10^5$
(ii)	$C_f = 1.0042 - \frac{8.41}{Re_d^{0.5}} + (0.2053 \ln(Re_d) - 2.4344) \frac{d_{\text{Tap}}}{d}$	$1.3 \times 10^5 < Re_d < 4.0 \times 10^5$
(iii)	$C_f = 1.0042 - \frac{8.41}{Re_d^{0.5}} + 0.196 \frac{d_{\text{Tap}}}{d}$	$4.0 \times 10^5 < Re_d < 8.0 \times 10^5$
(iv)	$C_f = 1.0042 - \frac{0.255}{Re_d^{0.2}} \left(1 - \frac{400000}{Re_d}\right)^{0.8} + 0.196 \frac{d_{\text{Tap}}}{d}$	$8.0 \times 10^5 < Re_d < 3.0 \times 10^6$
(v)	$C_f = 1.0042 - \frac{0.255}{Re_d^{0.2}} \left(1 - \frac{400000}{Re_d}\right)^{0.8} + (0.0746 \ln(Re_d) - 0.9051) \frac{d_{\text{Tap}}}{d}$	$3.0 \times 10^6 < Re_d$

New equation for discharge coefficient



NMIJにおいて計測した実験データまとめ



ISOとして提案予定の流出係数特性式

$$C_f = Cn + e_{\text{Tap}}$$

C_f : Discharge coefficient
 Cn : Ideal discharge coefficient
 e_{Tap} : Static pressure error
 d : Diameter of throat
 d_{Tap} : Diameter of wall tap
 Re_d : Reynolds number

	Equation	Reynolds number range
(i)	$C_f = 1.0042 - \frac{8.41}{Re_d^{0.5}}$	$Re_d < 1.3 \times 10^5$
(ii)	$C_f = 0.9458 - \frac{8.41}{Re_d^{0.5}} + 0.00492 \ln(Re_d)$	$1.3 \times 10^5 < Re_d < 4.0 \times 10^5$
(iii)	$C_f = 0.9995 - \frac{8.41}{Re_d^{0.5}}$	$4.0 \times 10^5 < Re_d < 8.0 \times 10^5$
(iv)	$C_f = 0.9995 - \frac{0.255}{Re_d^{0.2}} \left(1 - \frac{400000}{Re_d} \right)^{0.8}$	$8.0 \times 10^5 < Re_d < 3.0 \times 10^6$
(v)	$C_f = 0.9824 - \frac{0.255}{Re_d^{0.2}} \left(1 - \frac{400000}{Re_d} \right)^{0.8} + 0.0018 \ln(Re_d)$	$3.0 \times 10^6 < Re_d$

Contents

- I. スロートタップ式フローノズル概要
- II. 産総研における実験結果とASME規格への適用性
- III. 実験結果の検証
- IV. 新しい流出係数特性式の提案
- V. まとめと今後

ISO規格化に関して

- Geometry of flow nozzle and installation
 - Definition of surface roughness of flow nozzle
 - Flow conditioner
 - Pipe diameter definition (D)?
 - ➔ Examined. No influence.
 - ➔ According to ASME.
 - ➔ Over 100 mm

- Pressure tap
 - How many taps needed?
 - Shape of tap?
 - Range of tap diameter?
 - Should pressures be equalized?
 - ➔ 4 taps. According to ASME.
 - ➔ According to ASME
 - ➔ Examined. 2mm – 7 mm.
 - ➔ Pressure equalization is required.

- Standard equation of discharge coefficient
 - With tap diameter
 - Upstream tap?
 - Throat diameter effect (d_{Tap}/d)?
 - ➔ Yes.
 - ➔ Examined. No influence.
 - ➔ Examined. d_{Tap}/d definition is required.

- Validation check procedure?
 - Requirement of actual flow calibration?
 - Extrapolation method?
 - ➔ If smaller uncertainty is necessary.
 - ➔ According to proposed equation.

- Uncertainty
 - Is 0.25% reasonable?
 - ➔ 前のスライド参照.

今後の予定

これまでの活動

- 2015.5. TC30/SC2 (London) プレゼン
- 2017.6. TC30/SC2 (上海) プレゼン
→ ISO5167-3に組み込む方針を決定

今後の予定(想定)

- ドラフトを 2018.3までに作成
- ドラフトレビューとリバイス 2018～2019
- 2019～2020にパブリッシュ

参考文献

- 1) Comparison of high temperature and high Reynolds number water flows between PTB and NMIJ, Furuichi, N., Cordova L., Lederer, T., Terao, Y., *Flow Measurement and Instrumentation*, 52 (2016), 157-162
- 2) Further investigation of discharge coefficient for PTC 6 flow nozzle in high Reynolds number, Furuichi, N., Terao, Y., Nakao, S., Fujita, K., Shibuya, K., *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 138 (2016), 041605-1-11
- 3) Further investigation of discharge coefficient for PTC 6 flow nozzle in high Reynolds number, Furuichi, N., Terao, Y., Nakao, S., Fujita, K., Shibuya, K., Proceedings of the ASME 2015 Power and Energy Conversion Conference, POWER2015-49174, June 28-July 2 (2015), San Diego, California, US
- 4) Bi-Comparison for High Temperature Water Flow between PTB and NMIJ, Furuichi, N., Terao, Y., Cordova, L., Lederer, T., Proceedings of 9th International Conference on Fluid Flow Measurement, April 14-17 (2015), Arlington, US
- 5) Static pressure measurement error at a wall tap of a flow nozzle for a wide range of Reynolds number, Noriyuki Furuichi, Yoshiya Terao, *Flow Measurement and Instrumentation*, 46 (2015), pp.103-111
- 6) Experimental results of flow nozzle based on PTC 6 for high Reynolds number, Furuichi, N., Cheong, KH., Terao, Y., Nakao, S., Fujita, K., Shibuya, K., Proceedings of the ASME 2014 Power Conference, Power2014-32116, July 28-31, 2014, Baltimore, Maryland, USA
- 7) スロートタップ式フローノズルの流出係数特性および高レイノルズ数外挿性に関する実験的研究, 古市紀之, チョンカーウィー, 寺尾吉哉, 中尾農一, 藤田啓司, 渋谷和雄, 日本機械学会論文集B編, 79, 808 (2013), pp.143-154
- 8) New Discharge Coefficient of Throat Tap Nozzle Based on ASME Performance Test Code 6 for Reynolds Number From 2.4×10^5 to 1.4×10^7 , Furuichi, N, Cheong, KH, Terao Y., Nakao, S., Fujita, K., Shibuya, K., *Journal of Fluid Engineering*, 136(1), 011105 (2013), doi:10.1115/1.4025513

謝辞

本研究に対するご協力

フローエンジニアリング株式会社（渋谷様、藤田様）

流量計測研究所フローコル（中尾様）