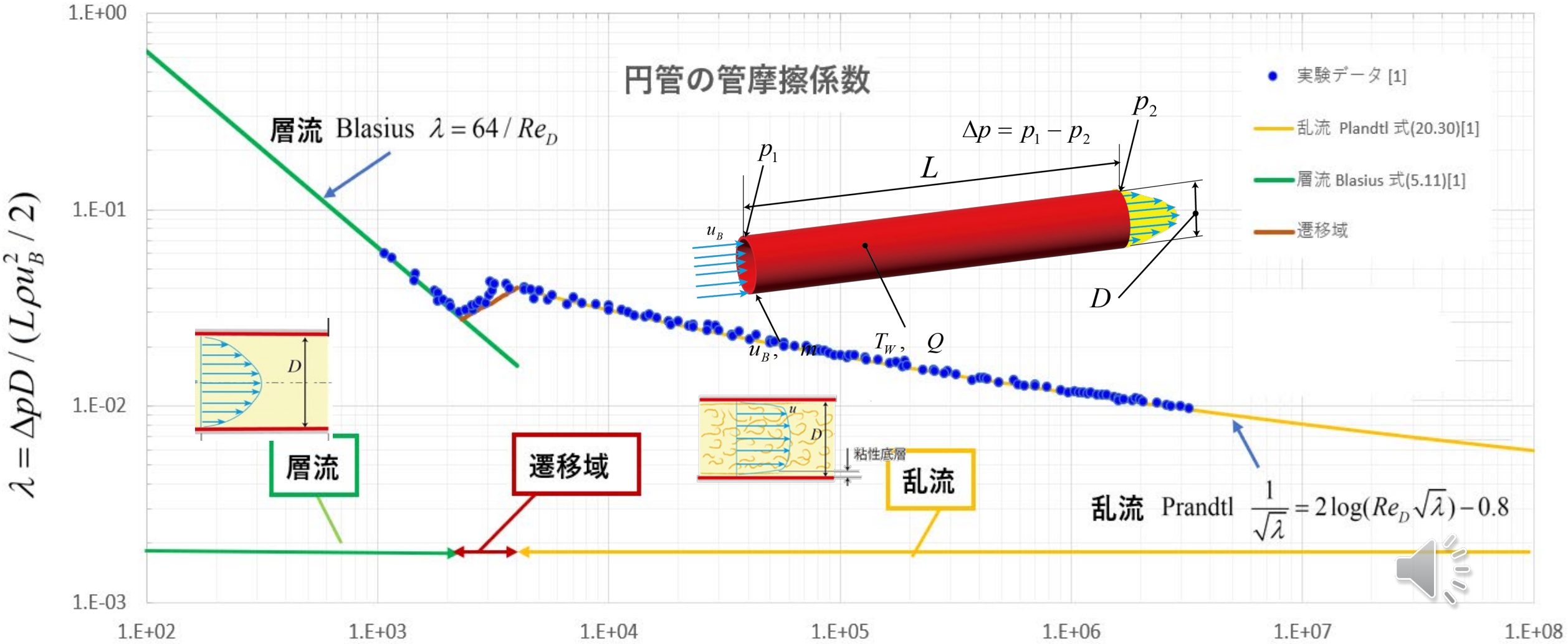
技術者と研究者に向けた伝熱工学の基礎と応用

第3章　対流熱伝達　⑤　　3-5.　強制対流の流動と伝熱の定式化

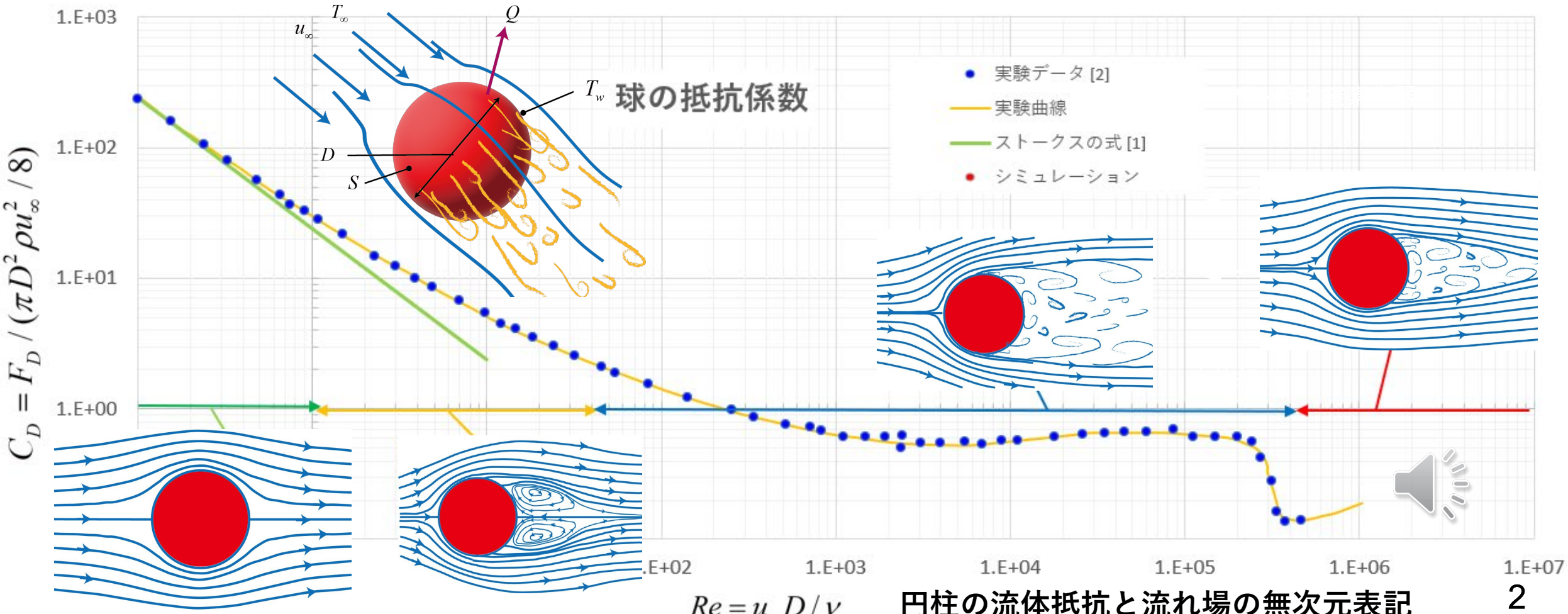


円管管路内圧損の無次元表記

前回の内容

第3章　対流熱伝達　④

3-4.　熱流動の無次元表記



円柱の流体抵抗と流れ場の無次元表記

第3章　対流熱伝達

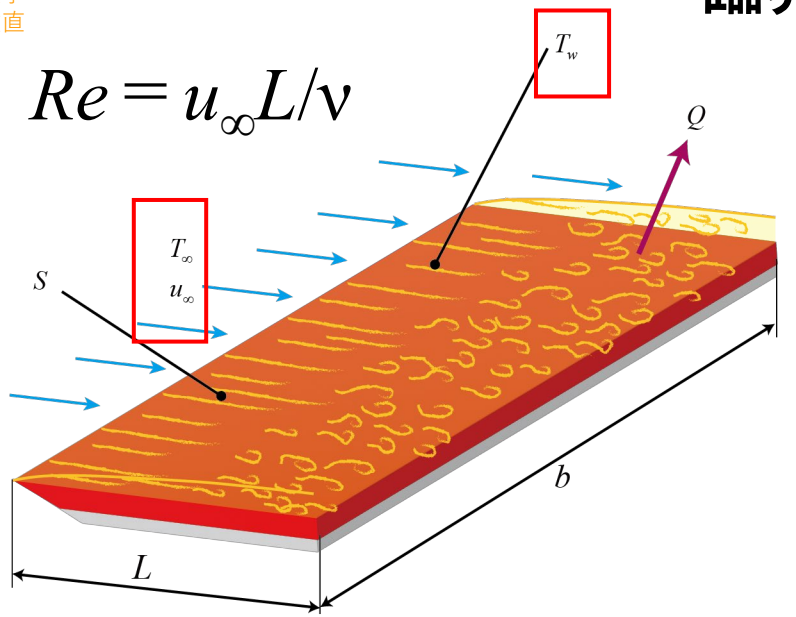
3-1.　対流熱伝達の概要
3-2.　強制対流熱伝達と流動の様相
3-3.　自然対流熱伝達の様相
3-4.　熱流動の無次元表記
3-5.　強制対流の流動と伝熱の定式化
3-6.　自然対流熱伝達の定式化
3-7.　解析ソフトを使った伝熱計算

平板上の強制対流

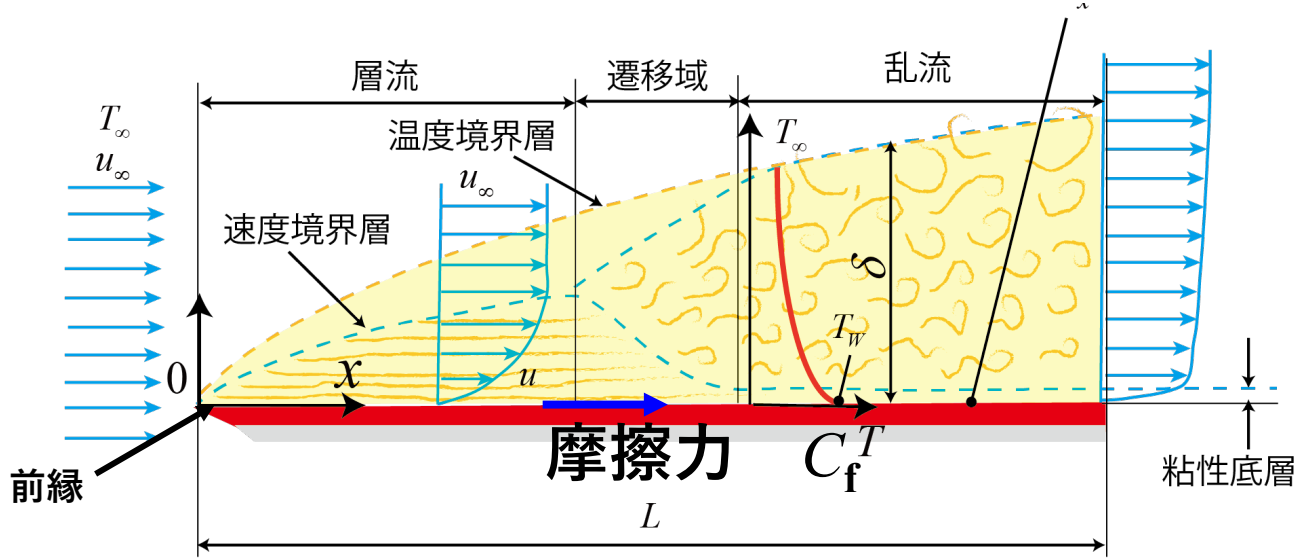
臨界レイノルズ数$Re_{cr} = u_\infty L_{cr}/\nu$

$Nu = h_x x/k$

$Re = u_\infty L/\nu$



平板周りの強制対流熱伝達と流動



平板上の速度境界層と温度境界層

一様流中に平板をおいた場合の速度境界層は、層流境界層が前縁から発達し、遷移領域をへて乱流境界層となる。

この場合、臨界レイノルズ数より大きい場合、境界層は乱流となる。

温度境界層では、壁面の温度T_Wと境界層外縁温度T_∞の差(T_W- T_∞）と壁面熱流束q_xはほぼ比例関係にあり、その比例定数h_xを局所熱伝達率(local heat transfer coefficient)という。

その無次元数が局所ヌセルト数である。

壁面上の流体に速度分布が生じるので、せん断による摩擦力が作用し、それが平板の摩擦抵抗となる。その無次元数が摩擦抵抗係数C_fである。

平板強制対流の定式化

無次元数：　レイノルズ数：　$Re_x \equiv \dfrac{u_\infty x}{\nu}$　　摩擦係数：　$C_f \equiv \dfrac{F_D}{A\rho u_\infty^2 / 2}$

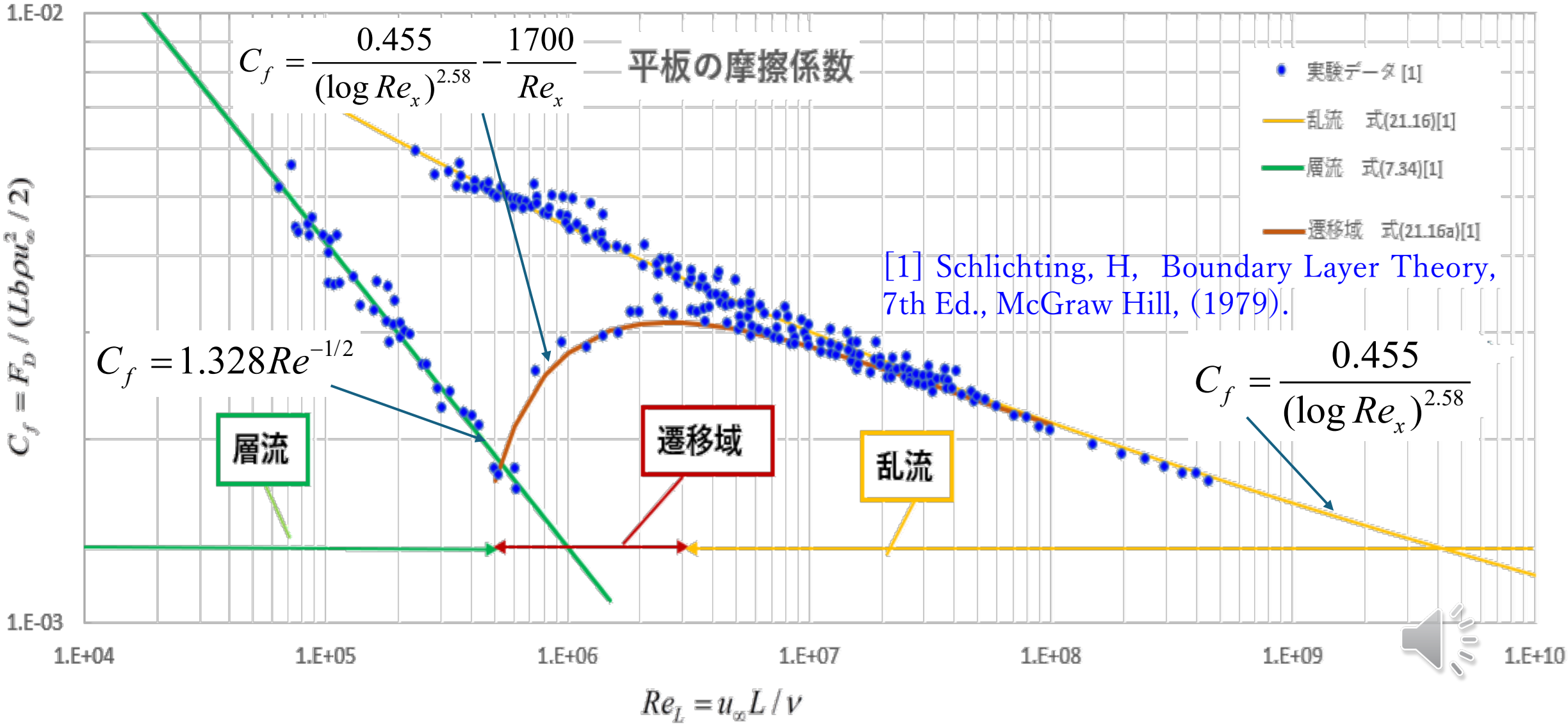
層流　$C_f = 1.328 Re^{-1/2}$　　$Re_x \le 5\times 10^5$　　(1)

遷移域　$C_f = \dfrac{0.455}{(\log Re_x)^{2.58}} - \dfrac{1700}{Re_x}$　　$5\times 10^5 < Re_x < 51\times 10^8$　　(2)

乱流　$C_f = \dfrac{0.455}{(\log Re_x)^{2.58}}$　　$Re_x \ge 1\times 10^8$　　(3)

出典　Schlichting, H, Boundary Layer Theory, 7th Ed., McGraw Hill, (1979).

平板の摩擦係数



平板周りの強制対流の無次元表記

平板強制対流熱伝達の定式化

局所熱伝達率：
$$Nu_x \equiv \frac{h_x x}{k} \qquad (4)$$

$$\left.\begin{array}{ll} Re_x \le Re_{c1} & \text{層流} \\ Re_{c1} < Re_x < Re_{c2} & \text{遷移域} \\ Re_{c2} \le Re_x & \text{乱流} \end{array}\right\} \qquad (5)$$

遷移レイノルズ数

Re_{c1}	3×10^6
Re_{c2}	5×10^5

局所熱伝達率の定数

	A_ℓ	A_t
壁面温度一定	0.332	0.0296
壁面熱流束一定	0.453	0.0308

$Re_x \le Re_{c1}$ ：
$$Nu_{l,x} = A_l Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad [1] \qquad (6)$$

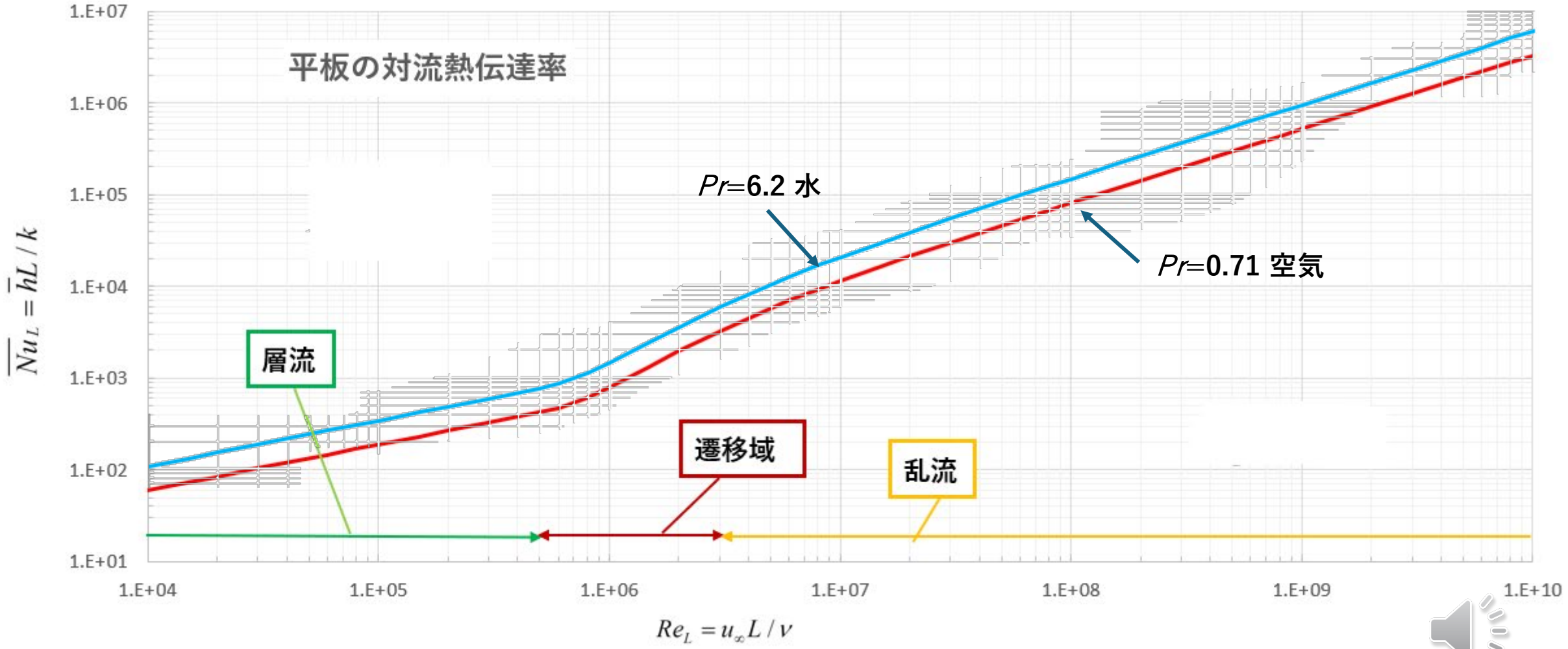
$Re_{c1} < Re_x < Re_{c2}$ ：
$$Nu_x = \frac{(Nu_{t,x}(Re_{c2}) - Nu_{l,x}(Re_{c1}))}{Re_{c2} - Re_{c1}}(Re_{c2} - Re_x) + Nu_{l,x}(Re_{c1}) \qquad (7)$$

$Re_{c2} \le Re_x < 10^8$ ：
$$Nu_x = A_t Re^{4/5} Pr^{1/3} \quad [1] \qquad (8)$$

平均熱伝達率：
$$\overline{h_c} = \frac{k}{L}\int_0^L \frac{Nu_x}{x}\mathrm{d}x, \quad \overline{Nu_L} = \frac{\overline{h_c}}{k}L \qquad (9)$$

[1] Incropera, F.P., et al., Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 7th Ed., John Wiley & Sons, (2007).

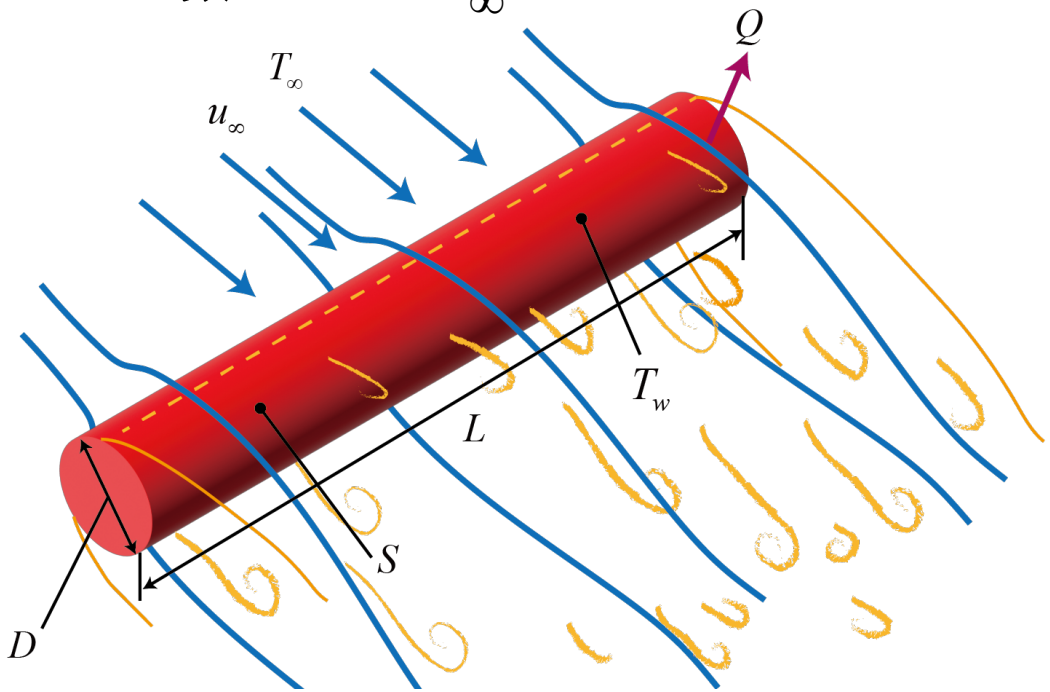
平板の強制対流熱伝達率



平板周りの強制対流熱伝達の無次元表記

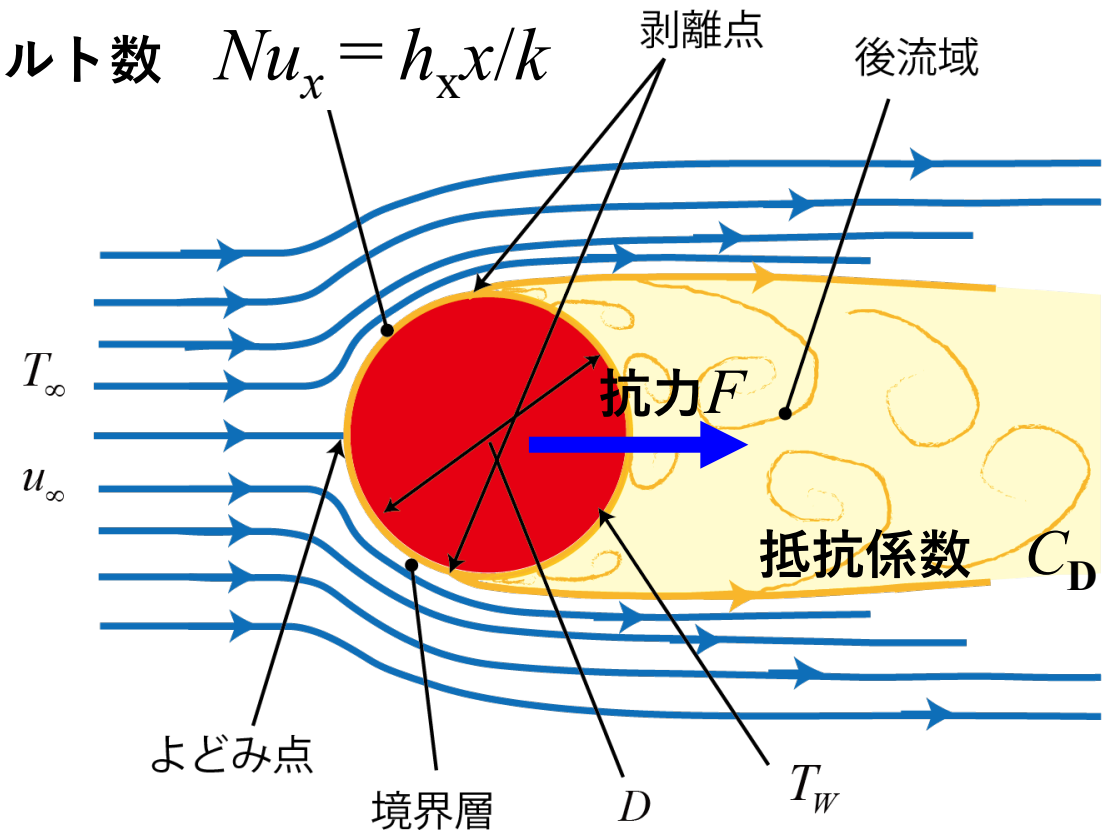
円柱周りの強制対流

レイノルズ数　$Re = u_\infty D/\nu$



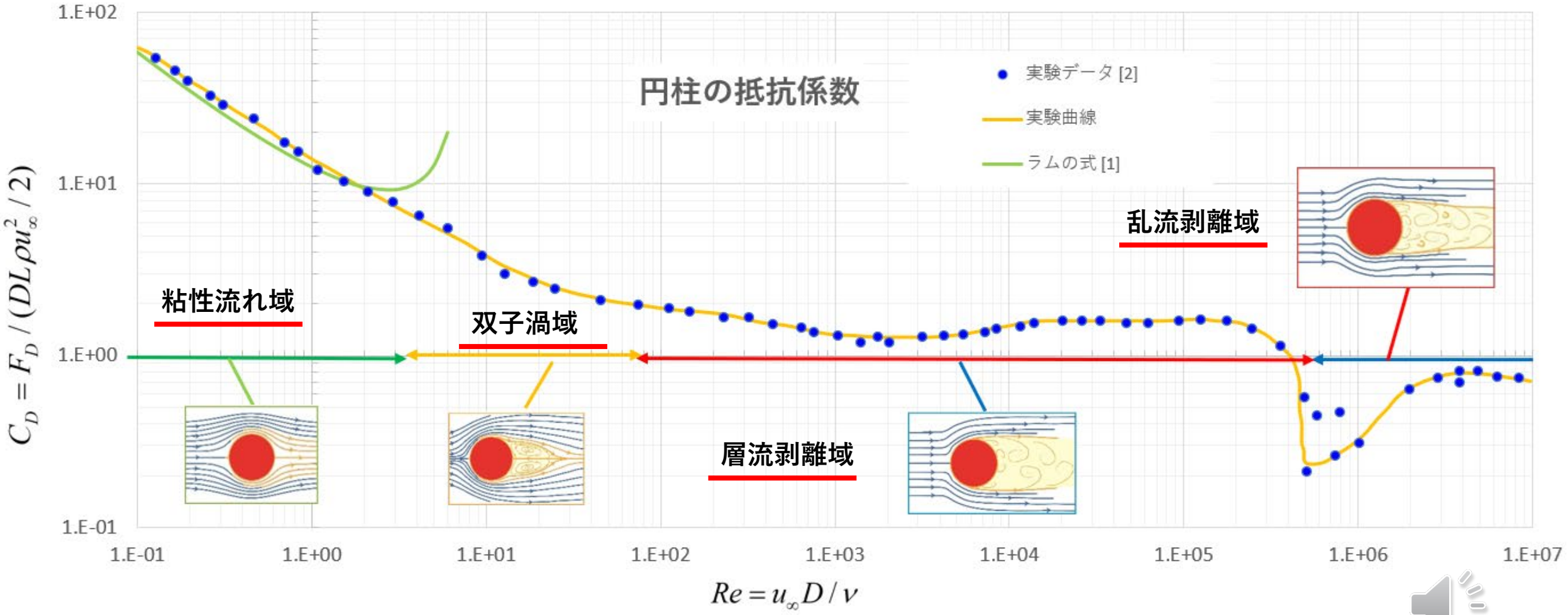
円柱周りの強制対流

局所ヌセルト数　$Nu_x = h_x x/k$



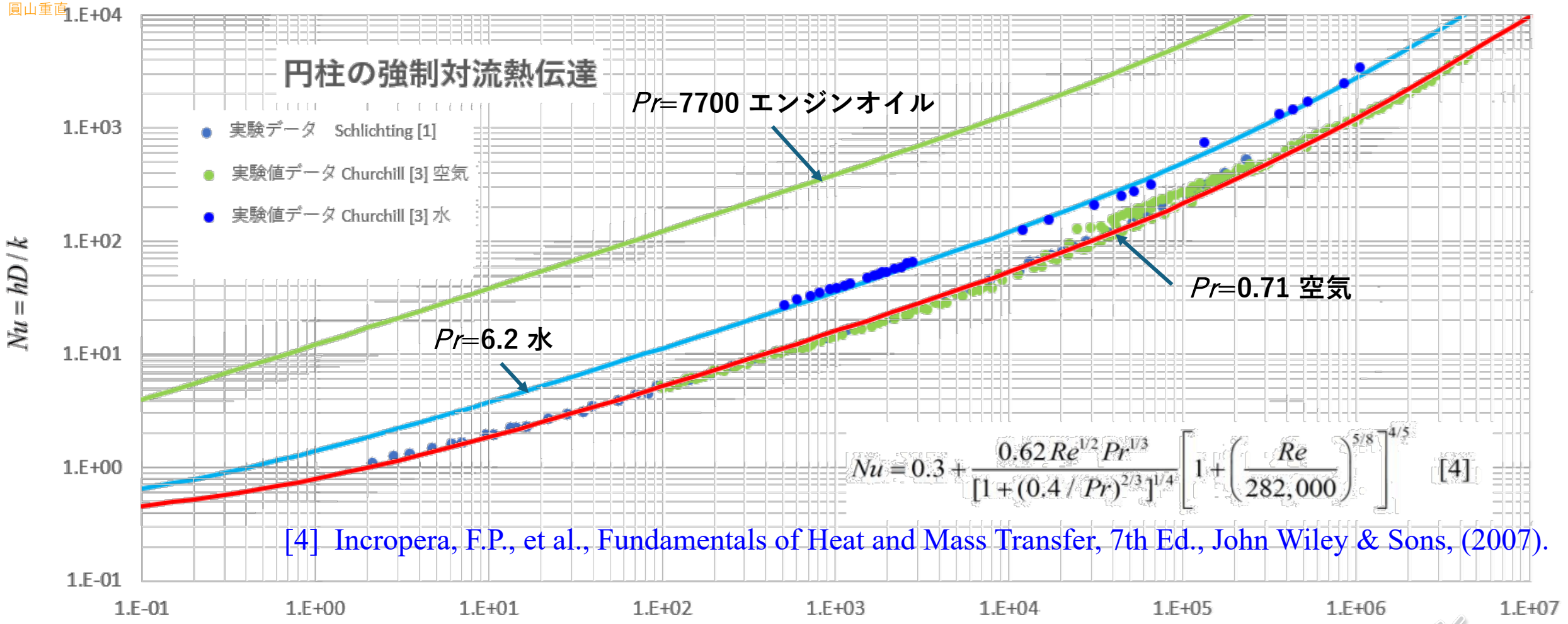
円柱周りの境界層の様相

円柱周りの強制対流



円柱周りの強制対流場と抵抗の無次元表記

円柱強制対流の熱伝達



[4] Incropera, F.P., et al., Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 7th Ed., John Wiley & Sons, (2007).

流速1m/s中の直径0.1mの円柱の熱伝達率

$Re = u_\infty D / \nu$

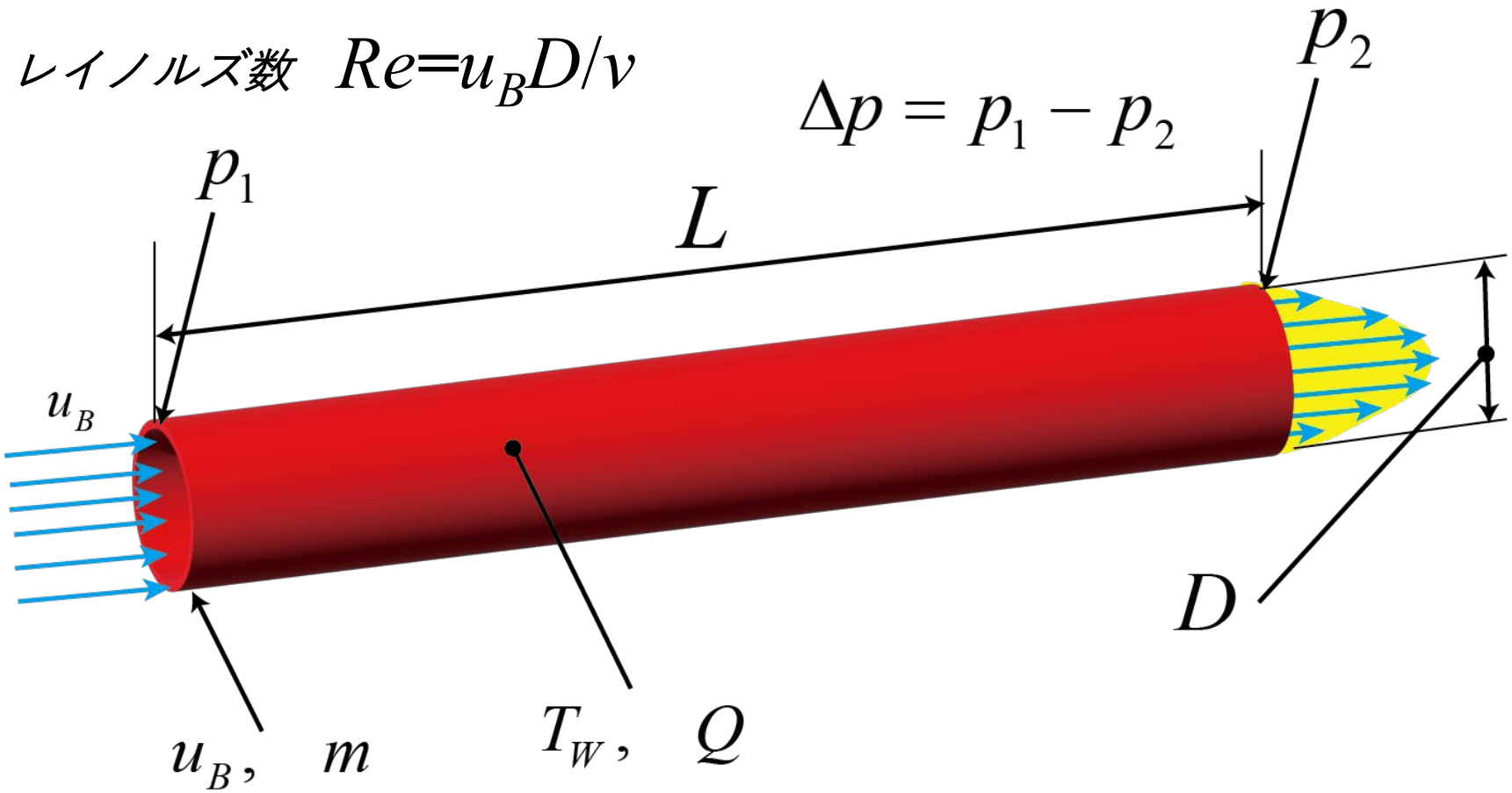
流体	Pr	Re	Nu	h
常圧空気	7.13E-01	6.41E+03	4.21E+01	1.10E+01
常圧水	6.18E+00	1.11E+05	5.22E+02	3.17E+03
エンジンオイル	7.71E+03	1.50E+02	1.52E+02	2.20E+02

円柱周りの強制対流熱伝達の無次元表記

円管内強制対流熱伝達と流動

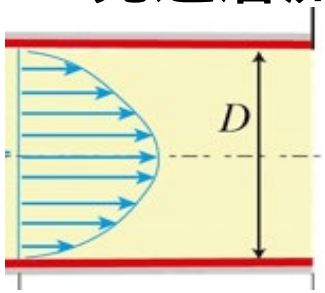
圧力損失係数 $\lambda = \Delta p L/(D\rho U^2/2)$

レイノルズ数 $Re = u_B D/\nu$

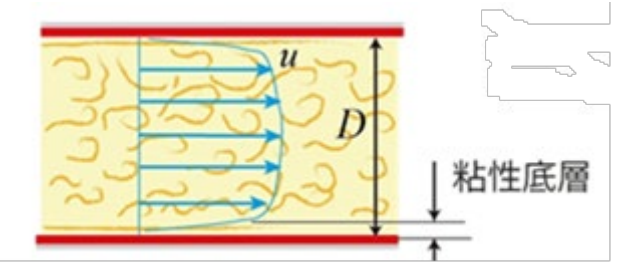


発達した平滑円管内の強制対流熱伝達と流動

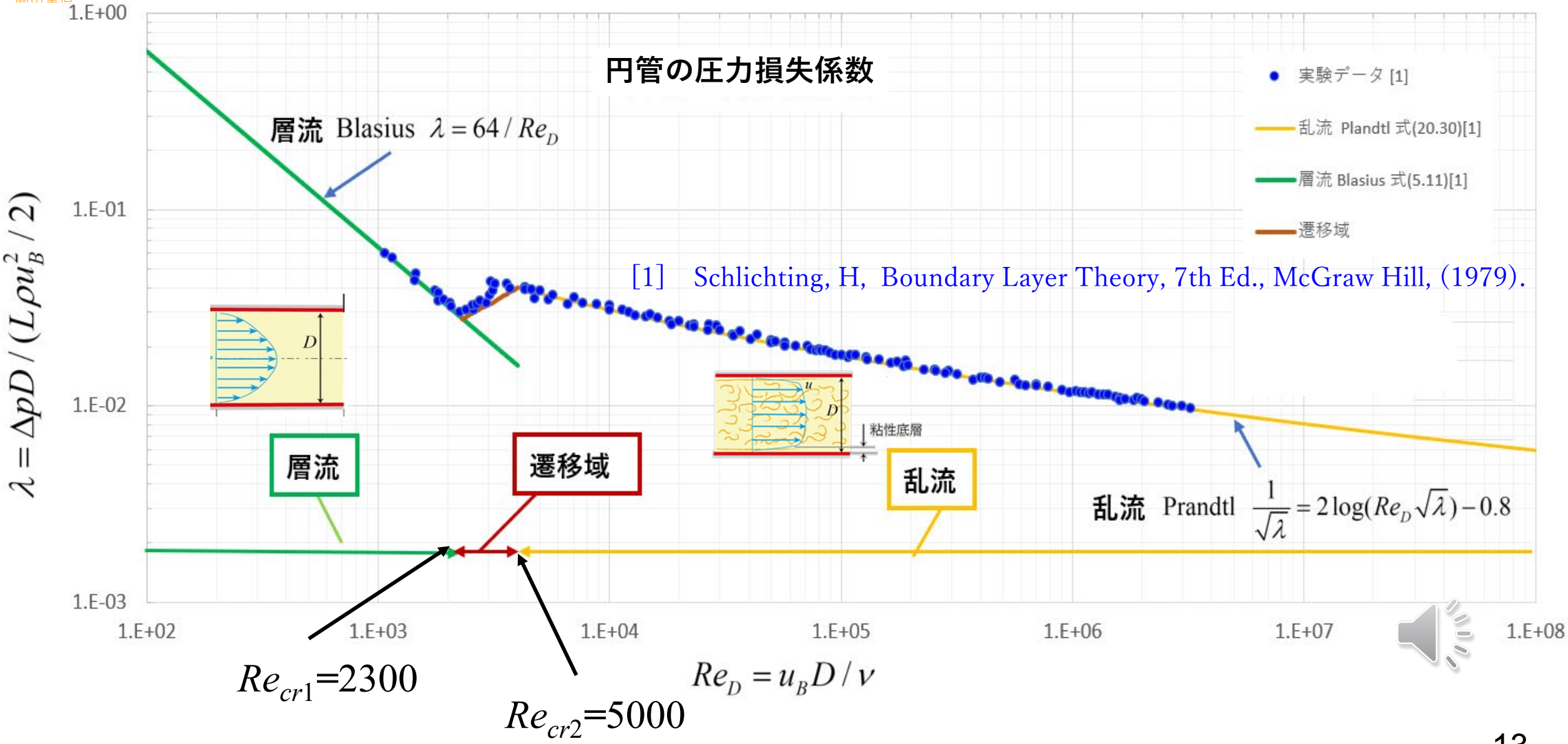
発達層流



発達乱流

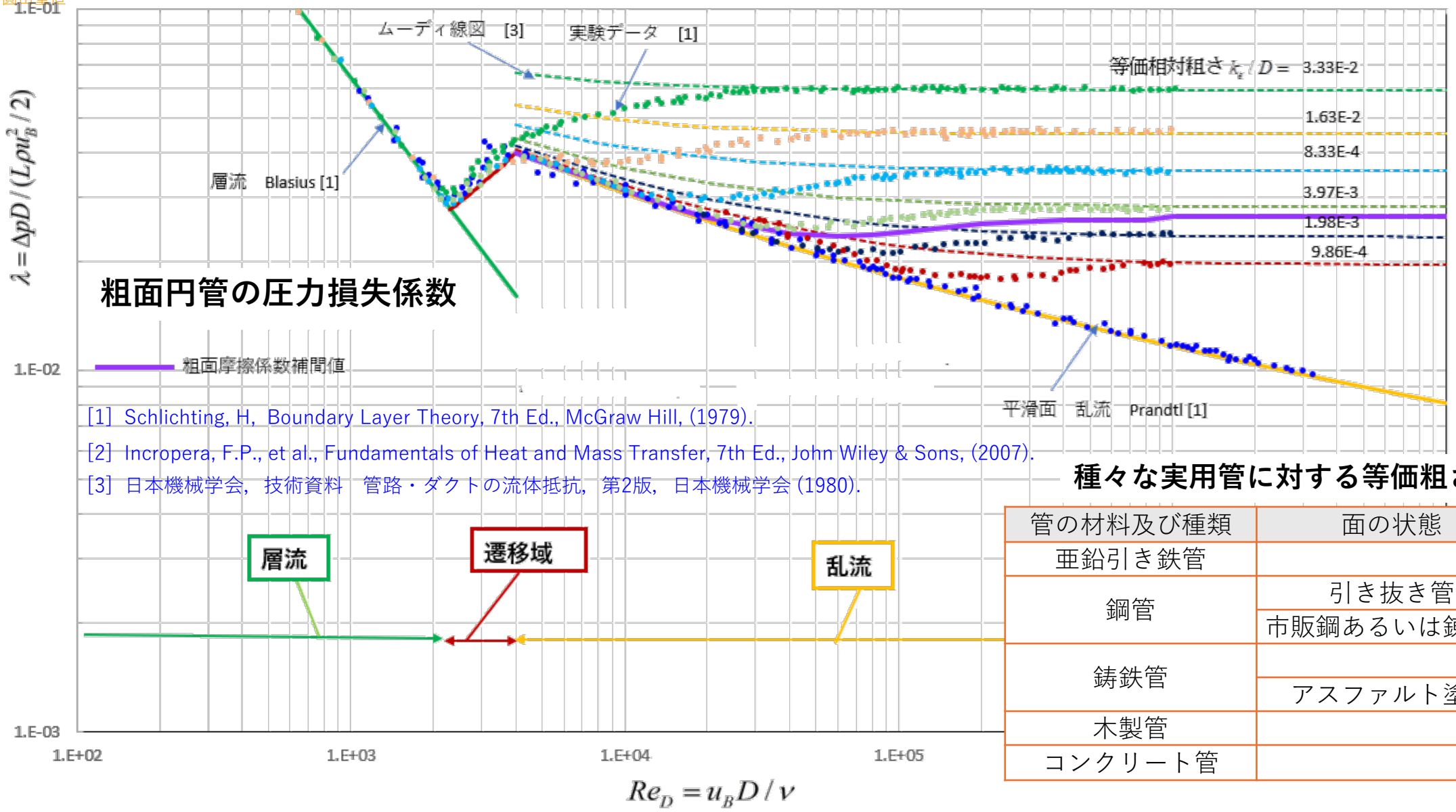


発達した平滑円管の圧力損失係数



[1] Schlichting, H, Boundary Layer Theory, 7th Ed., McGraw Hill, (1979).

発達した粗面円管の圧力損失係数

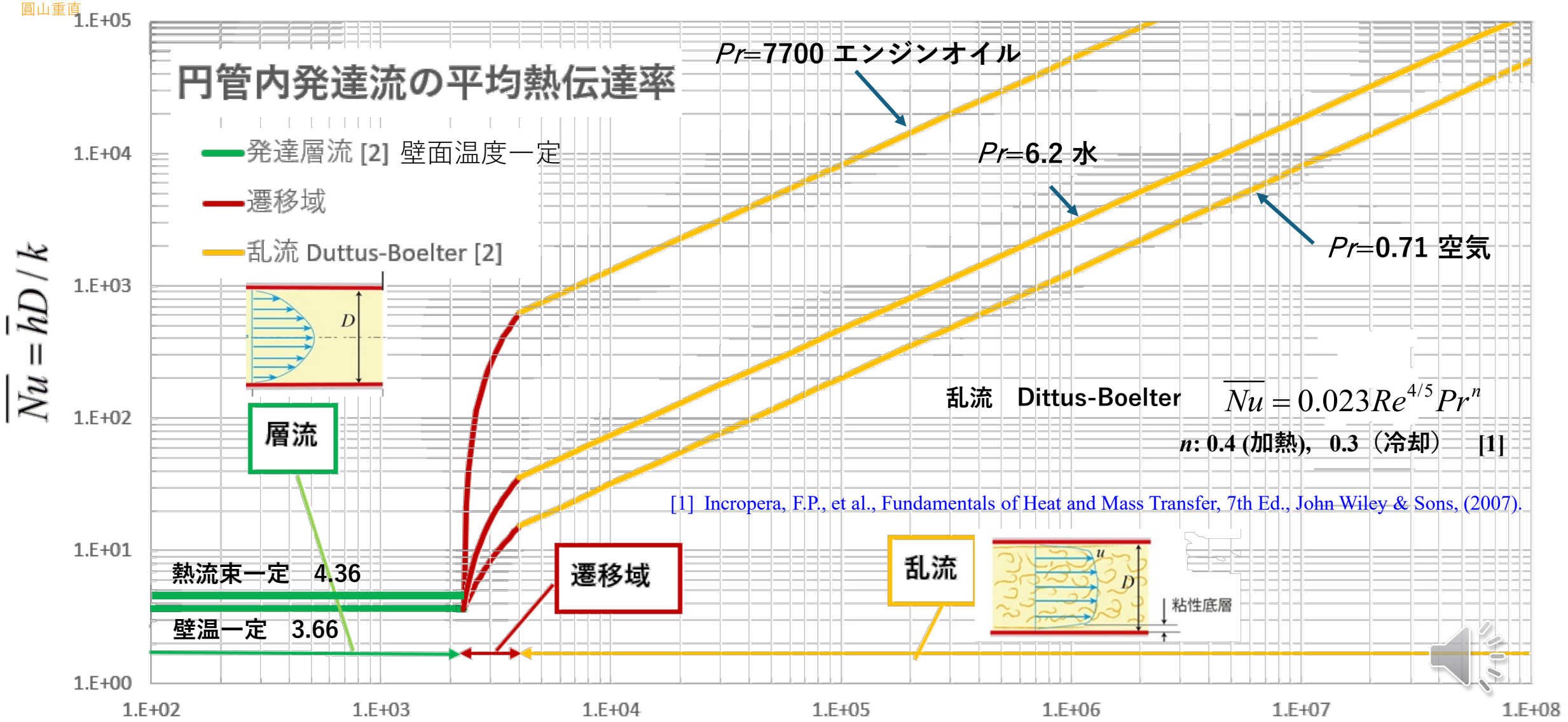


[1] Schlichting, H, Boundary Layer Theory, 7th Ed., McGraw Hill, (1979).
[2] Incropera, F.P., et al., Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 7th Ed., John Wiley & Sons, (2007).
[3] 日本機械学会, 技術資料 管路・ダクトの流体抵抗, 第2版, 日本機械学会 (1980).

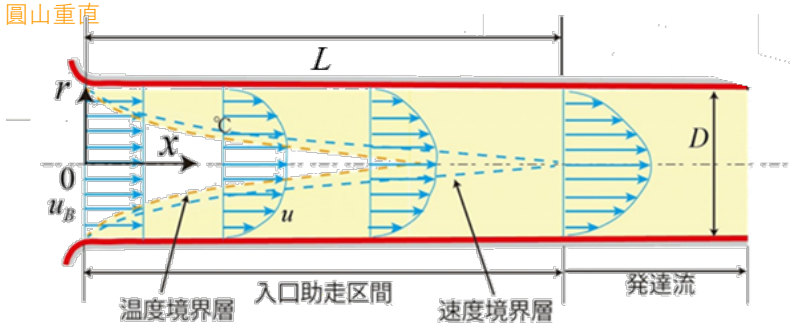
種々な実用管に対する等価粗さ(Moody)[3]

管の材料及び種類	面の状態	ke mm
亜鉛引き鉄管		0.15
鋼管	引き抜き管	0.0015
	市販鋼あるいは錬鉄管	0.05
鋳鉄管		0.26
	アスファルト塗装	0.12
木製管		0.18～0.91
コンクリート管		0.30～3.05

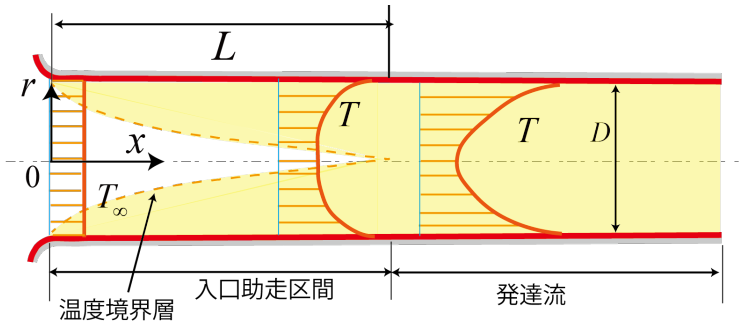
平滑円管内の強制対流熱伝達率



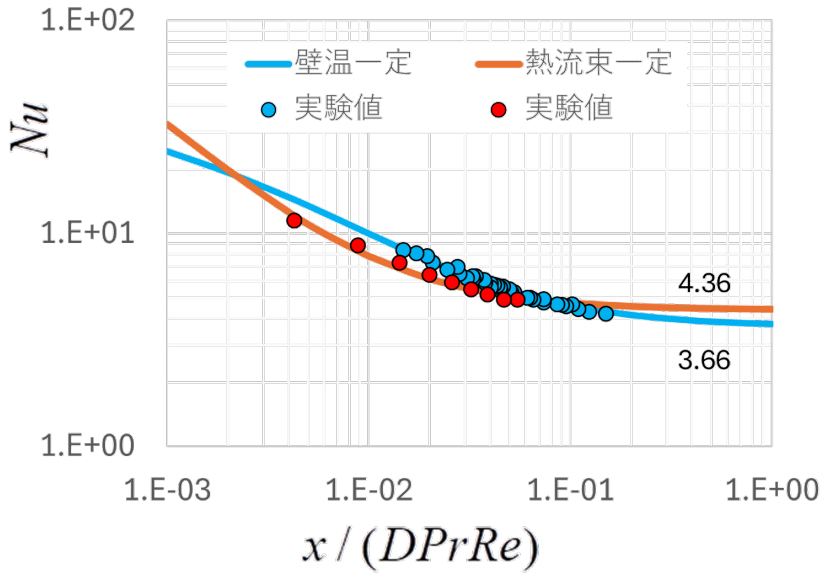
助走区間における管路内の流れと境界層の発達



管内の入口助走区間と速度分布



管内の入口助走区間と温度分布



助走区間の平均ヌセルト数

管路・ダクトの入口においてはまず壁面から境界層が発達し，それが合体し，流速分布や温度分布が変化しない発達した流れとなる。入口から発達流れまでの区間Lを入口助走区間という。

層流の入口助走区間熱伝達　[3]

$$\overline{Nu} = 3.66 + \frac{0.104(Re_D \,\mathrm{Pr}\, D/x)}{1+0.016(Re_D \,\mathrm{Pr}\, D/x)^{0.8}} \quad \text{(壁温一定)} \qquad (10)$$

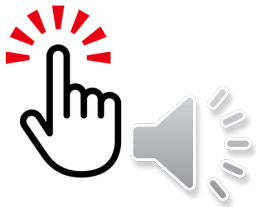
$$Nu_x = 4.36 + \frac{0.036(Re_D \,\mathrm{Pr}\, D/x)}{1+0.011(Re_D \,\mathrm{Pr}\, D/x)^{0.8}} \quad \text{(熱流束一定)} \qquad (11)$$

[3] Kays, W. M., Transactions of ASME, Vol. 77, pp.1265-1274, (1955).

次回予告

第3章　対流熱伝達

3-1.　対流熱伝達の概要
3-2.　強制対流熱伝達と流動の様相
3-3.　自然対流熱伝達の様相
3-4.　熱流動の無次元表記
3-5.　強制対流の流動と伝熱の定式化
3-6.　自然対流熱伝達の定式化
3-7.　解析ソフトを使った伝熱計算



技術者と研究者に向けた伝熱工学の基礎と応用

「もっと見る」欄に記載の今回の要約とホームページのpdf資料で理解を深めることができる。

技術者と研究者に向けた伝熱工学の基礎と応用

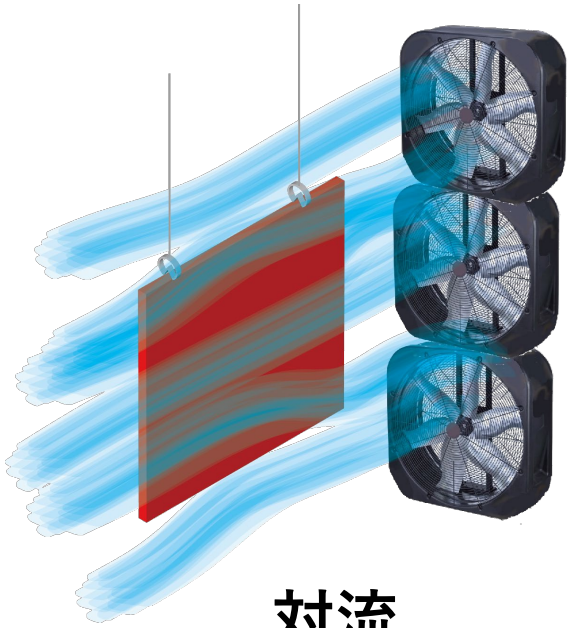
東北大学未来科学技術共同研究センター レクチャーシリーズ

— 熱プロセスを習得したい人のための入門と実践的応用 —

伝熱現象



熱伝導



対流



熱ふく射

講師　圓山重直

東北大学未来科学技術センター　シニアリサーチ・フェロー
東北大学名誉教授・八戸高専名誉教授