

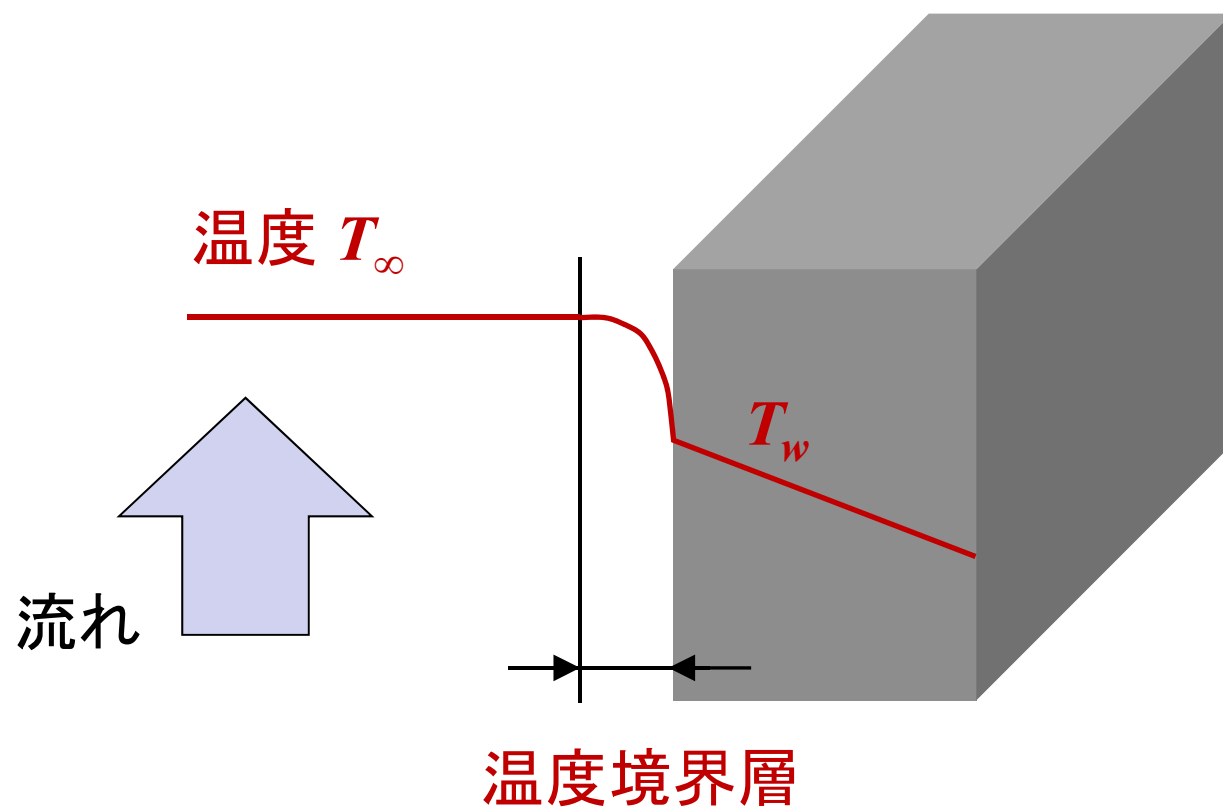


第6章 強制対流熱伝達

- **伝熱工学の基礎：** 伝熱の基本要素、フーリエの法則、ニュートンの冷却則
- **1次元定常熱伝導：** 熱伝導率、熱通過率、熱伝導方程式
- **2次元定常熱伝導：** ラプラスの方程式、数値解析の基礎
- **非定常熱伝導：** 非定常熱伝導方程式、ラプラス変換、フーリエ数とビオ数
- **対流熱伝達の基礎：** 熱伝達率、速度境界層と温度境界層、層流境界層と乱流境界層、境界層厚さ、混合平均温度
- **強制対流熱伝達：** 管内乱流熱伝達、円柱および球の熱伝達、管群熱伝達
- **自然対流熱伝達：** 垂直平板自然対流熱伝達、密閉層内自然対流、共存対流熱伝達
- **輻射伝熱：** ステファン-ボルツマンの法則、黒体と灰色体、輻射率、形態係数
- **凝縮熱伝達：** 鉛直平板膜状凝縮、凝縮数、水平円管膜状凝縮、滴状凝縮
- **沸騰熱伝達：** 沸騰曲線、気泡力学、沸騰熱伝達率



対流熱伝達





ニュートンの冷却則 (Newton's law of cooling)

実験的な事実：（熱移動量） \propto （温度差）

$$Q/A \propto (T_w - T_\infty)$$

比例定数を h とすると、

$$\frac{Q}{A} = h(T_w - T_\infty)$$

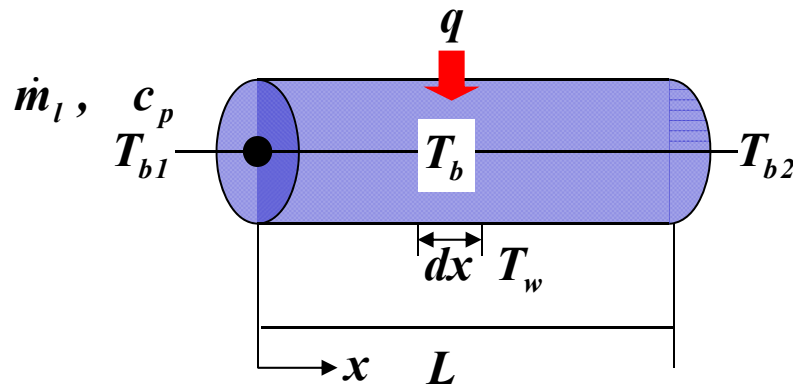
ニュートンの冷却則
(Newton's law of cooling)

ここで、 h [W/(m²·K)] は、熱伝達率と呼ばれる。

$h \rightarrow$ 大： 流体と物体間の熱移動能力 \rightarrow 大

第6章 強制対流熱伝達

管内乱流熱伝達の実験式



混合平均温度を用いた伝熱量評価

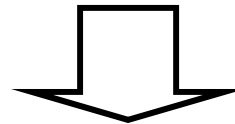
$$q = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{b2} - T_{b1})$$

要素 dx での伝熱量評価

$$dq = \dot{m} \cdot c_p \cdot dT = h \cdot (2\pi r \cdot dx)(T_w - T_b)$$

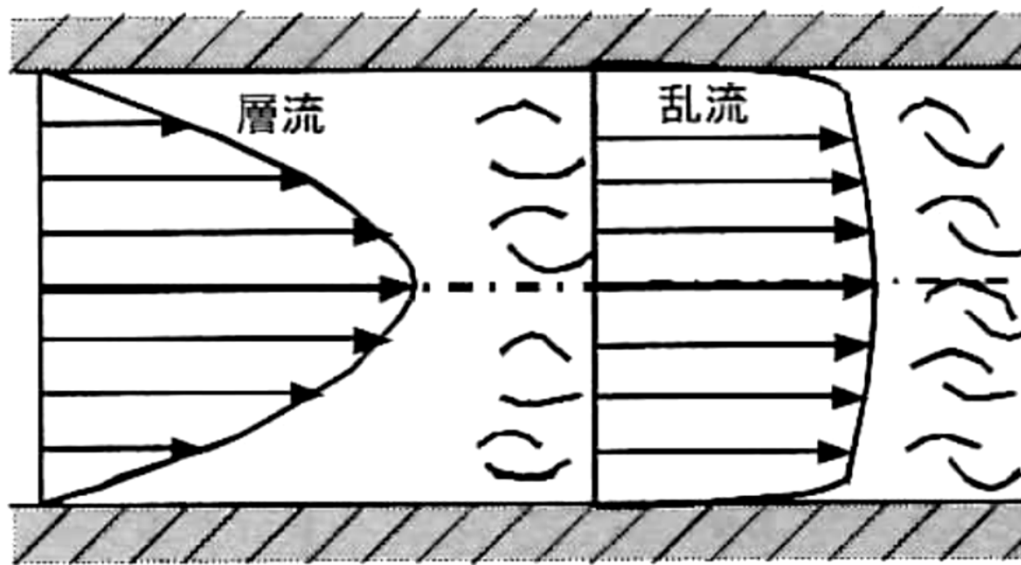
全伝熱量評価

$$q = h \cdot A \cdot (T_w - T_b)$$



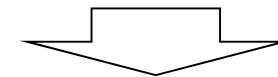
全伝熱量評価 \Rightarrow 熱伝達率の評価

運動量の混合と渦塊



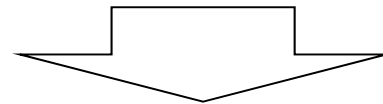
乱流状態

ある流体塊の平均速度が、平均値の周りで不規則な時間変動



運動量の混合

流体が渦塊 (eddies) として運動する形態に対応

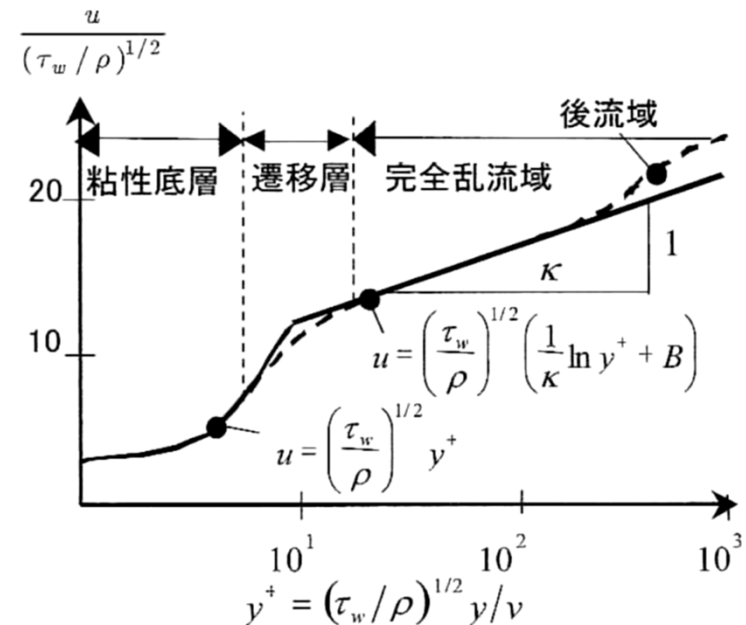
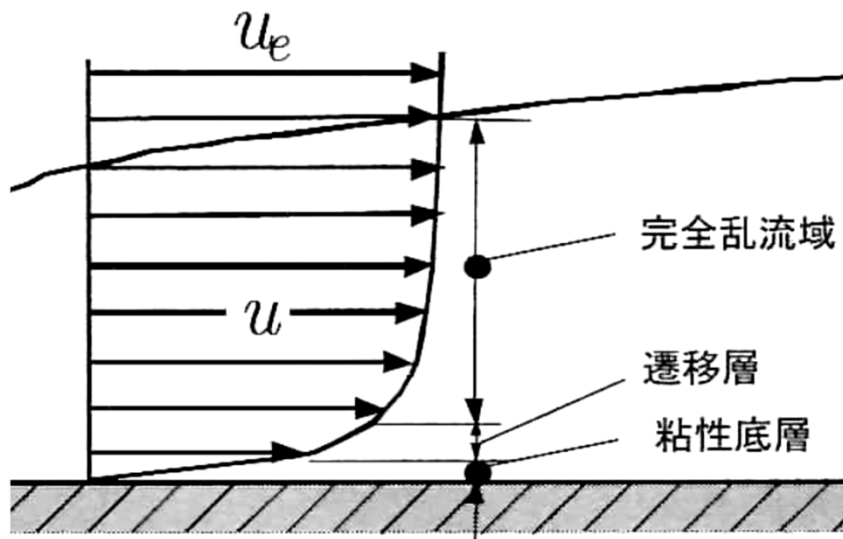


平均速度分布の平坦化

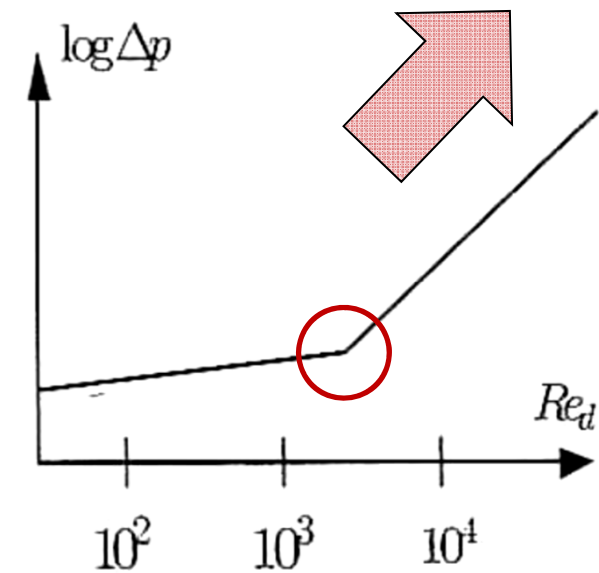
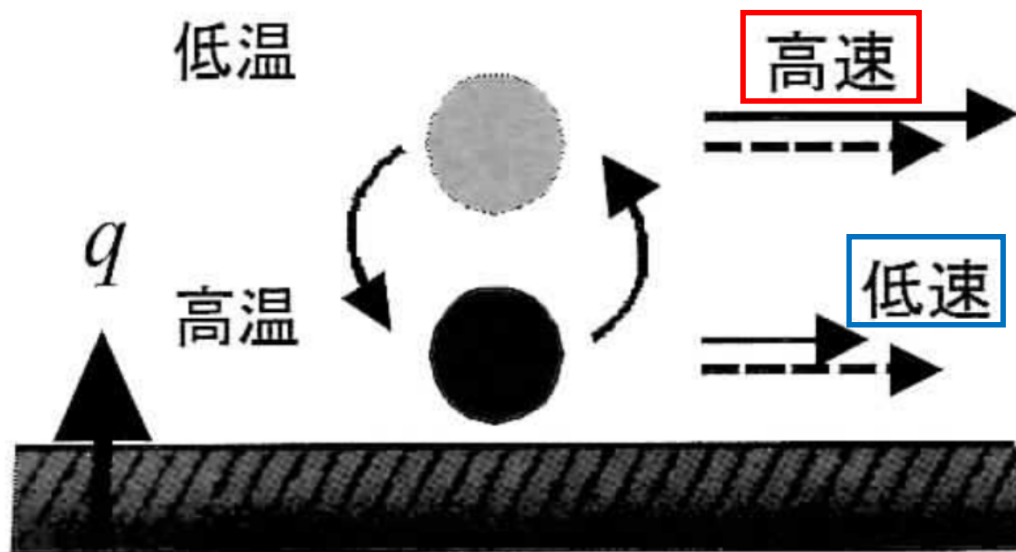
円管内強制対流

完全乱流域内の平均速度(相似な対数速度分布となり、壁法則(law of the wall)と呼ばれる):

$$\frac{u}{(\tau_w / \rho)^{1/2}} = \frac{1}{\kappa} \ln \left\{ \frac{(\tau_w / \rho)^{1/2} y}{\nu} \right\} + B$$



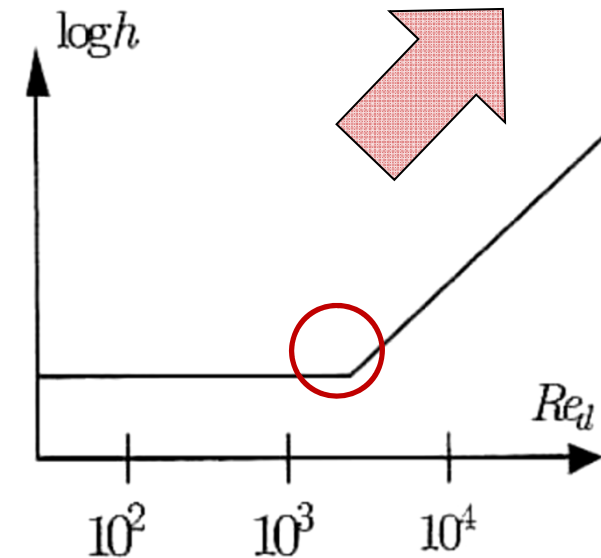
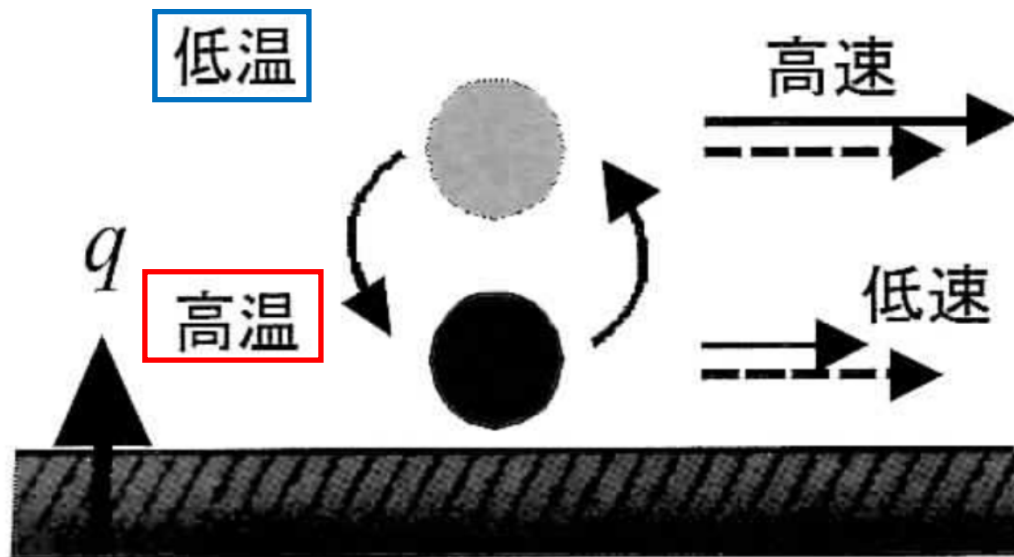
乱流混合と流動抵抗



乱流混合が進むと・・・ 低速の流体塊が高速の流体塊を捕える。

流動抵抗の飛躍的増加

乱流混合と熱伝達率

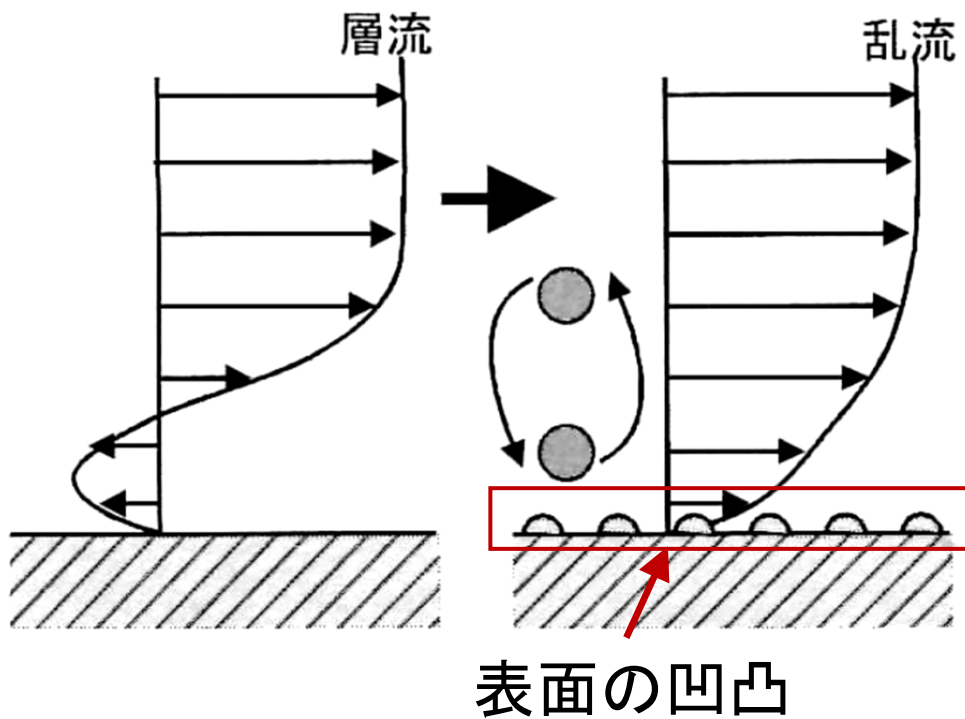


乱流混合が進むと・・・ 低温の流体塊と高温の流体塊の混合が促進

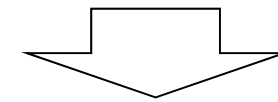
熱伝達率の飛躍的增加

表面の凹凸の効果

円柱や球: (圧力抵抗) \gg (摩擦抵抗)



流れのはく離を後方に追いや
り、はく離部分を極力抑える

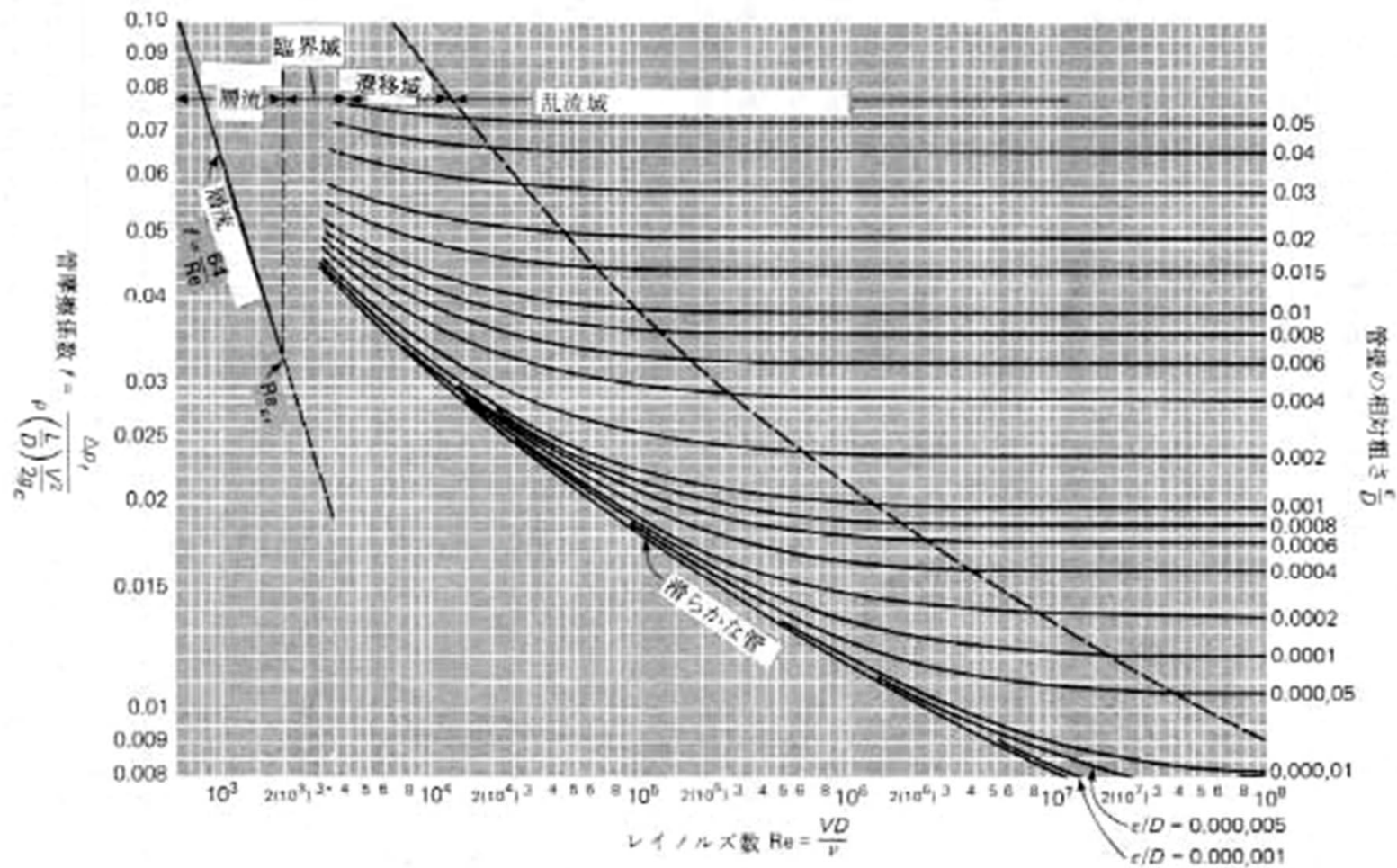


物体が受ける抵抗を軽減

例)

- ゴルフボール表面
- 飛行機の翼上面
(ボルテックス・ジェネレータ)

円管の摩擦係数に及ぼす管内面粗さの影響



管摩擦係数の関係式

Prandtl の式:

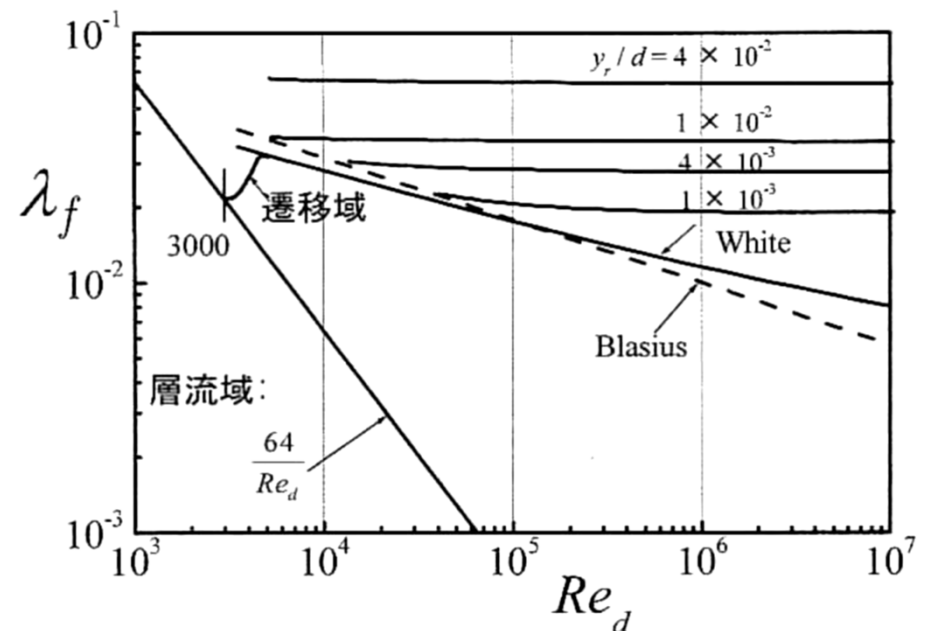
$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_f}} = 2.0 \log_{10} (Re_d \sqrt{\lambda_f}) - 0.80$$

Blasius の式:

$$\lambda_f = 0.3164 Re_d^{-1/4} \quad (3 \times 10^3 < Re_d < 10^5)$$

White の式:

$$\lambda_f = 1.02 (\log_{10} Re_d)^{-2.5} \quad (3 \times 10^3 < Re_d < 10^8)$$

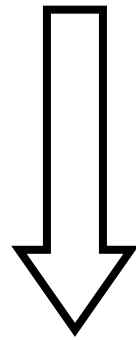




層流熱伝達率の理論式

平板 : $Nu = 0.332 \times Re^{\frac{1}{2}} \times Pr^{\frac{1}{3}}$

円管 : $Nu = \frac{48}{11} = 4.364$



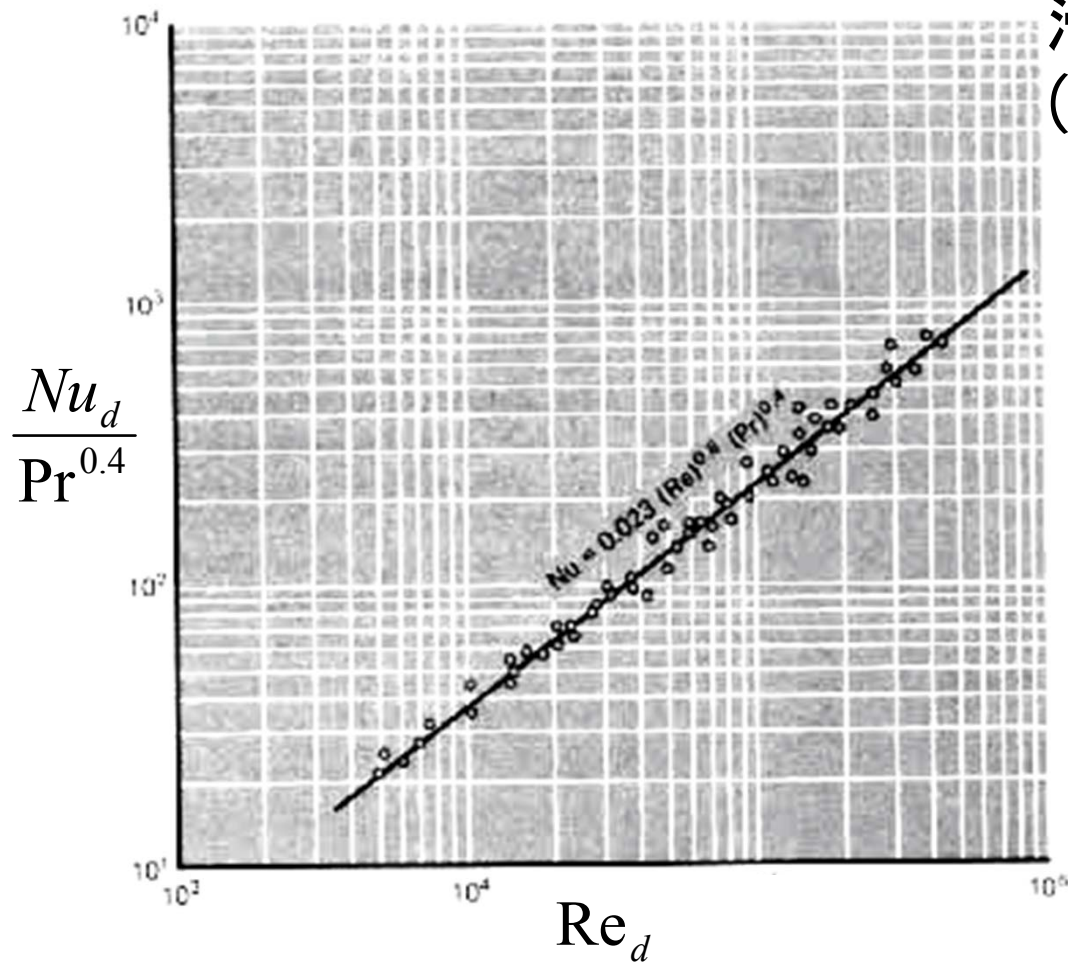
$$Nu = C \times Re^m \times Pr^n$$

レイノルズ数 : $Re = \frac{u_{\infty} d_0}{\nu}$

ヌッセルト数 : $Nu = \frac{h d_0}{k}$

プラントル数 : $Pr = \frac{\nu}{\alpha}$

管内乱流熱伝達の実験式



滑らかな円管内の乱流熱伝達
(Dittus-Boelterの式)

$$Nu_d = 0.023 \cdot Re_d^{0.8} \cdot Pr^n$$

$n = 0.4$: 流体を加熱するとき

$n = 0.3$: 流体を冷却するとき



円管内熱伝達率の実験式

流体の物性値の変化を考慮した式（Sieder-Tateの式）：

$$Nu_d = 0.027 \cdot Re_d^{0.8} \cdot Pr^{1/3} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_\infty} \right)^{0.14}$$

流れが発達しつつある助走区間（Nusseltの式）：

$$Nu_d = 0.036 \cdot Re_d^{0.8} \cdot Pr^{1/3} \cdot \left(\frac{d}{L} \right)^{0.055} \quad 10 < L/d < 400$$

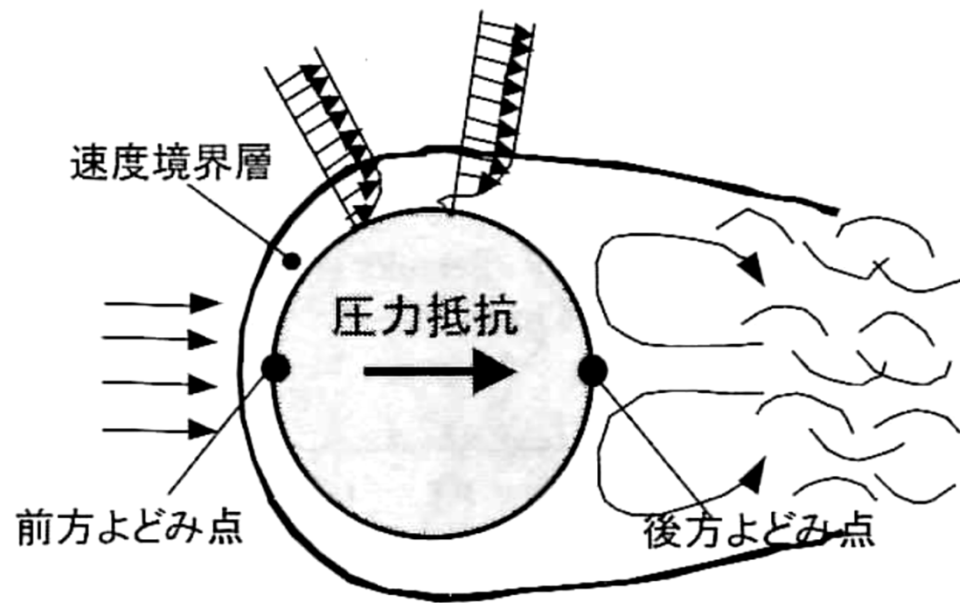
壁温一定条件における発達した層流：

$$Nu_d = 3.66 + \frac{0.0668 \cdot (d/L) \cdot Re_d \cdot Pr}{1 + 0.04[(d/L) \cdot Re_d \cdot Pr]^{2/3}}$$

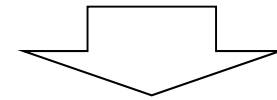
管内層流熱伝達（Sieder-Tateの式）：

$$Nu_d = 1.86 \cdot (Re_d \cdot Pr)^{1/3} \cdot \left(\frac{d}{L} \right)^{1/3} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_\infty} \right)^{0.14}$$

流れのはく離



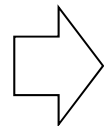
壁面の曲率変化に伴う圧力上昇



粘性境界層内の低運動量の
流体塊が物体壁からはがれる

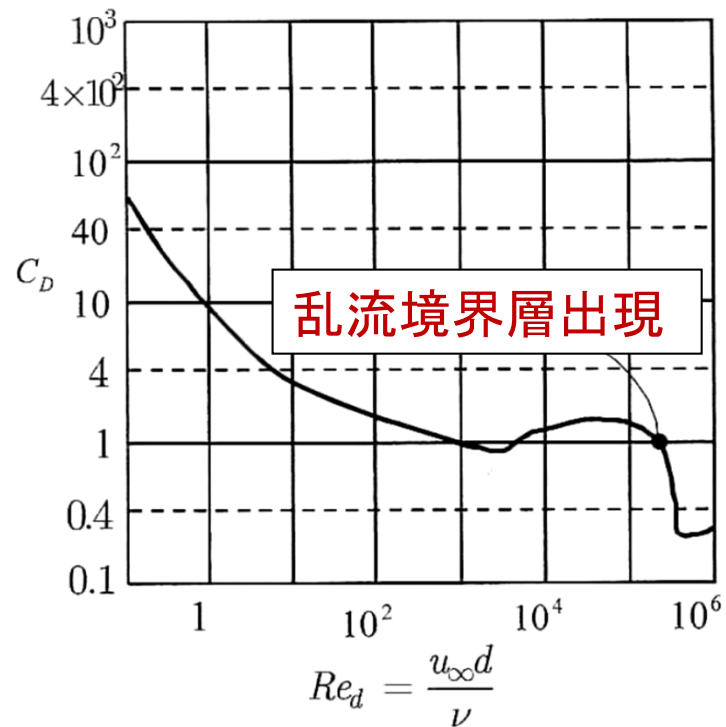
(流れのはく離 : flow separation)

非粘性流れであれば、後方よどみ点で回復されるべき圧力が回復されずに降下

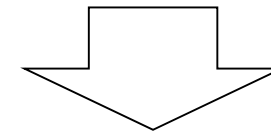


大きな圧力抵抗の発生

円柱の抗力係数(ドラッグ・クライシス)



$Re_d \approx 2 \times 10^5$ を境に、
境界層が層流から乱流に遷移

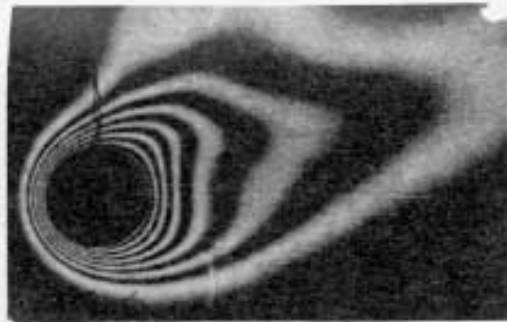


抗力が激減する傾向

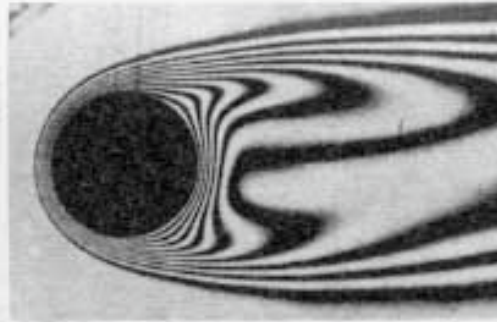
(ドラッグ・クライシス : drag crisis)

円柱及び球の熱伝達

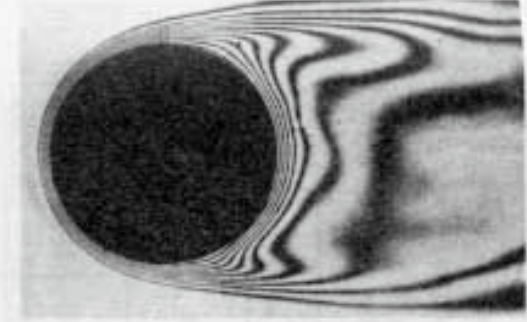
水平加熱円柱周りの温度場の可視化画像



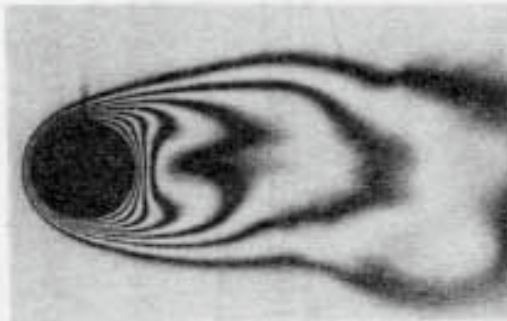
Re = 23 直径 0.5in.
(12.7mm)



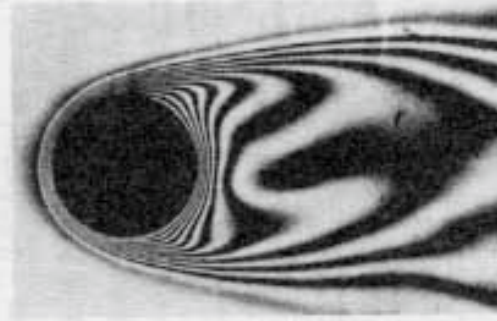
Re = 120 直径 1.0in.
(25.4mm)



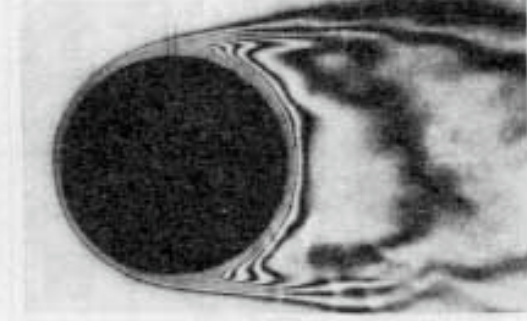
Re = 597 直径 1.5in.
(38.1mm)



Re = 85 直径 0.5in.

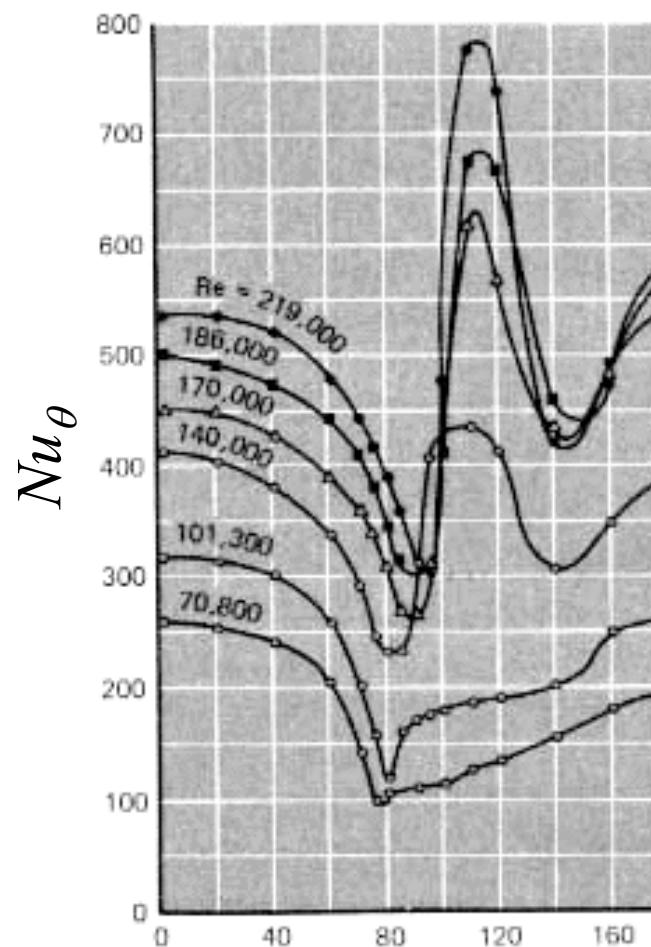
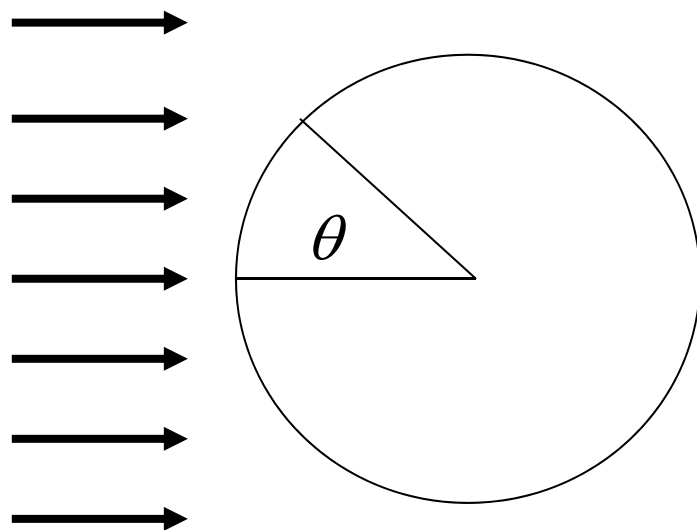


Re = 218 直径 1.0in.



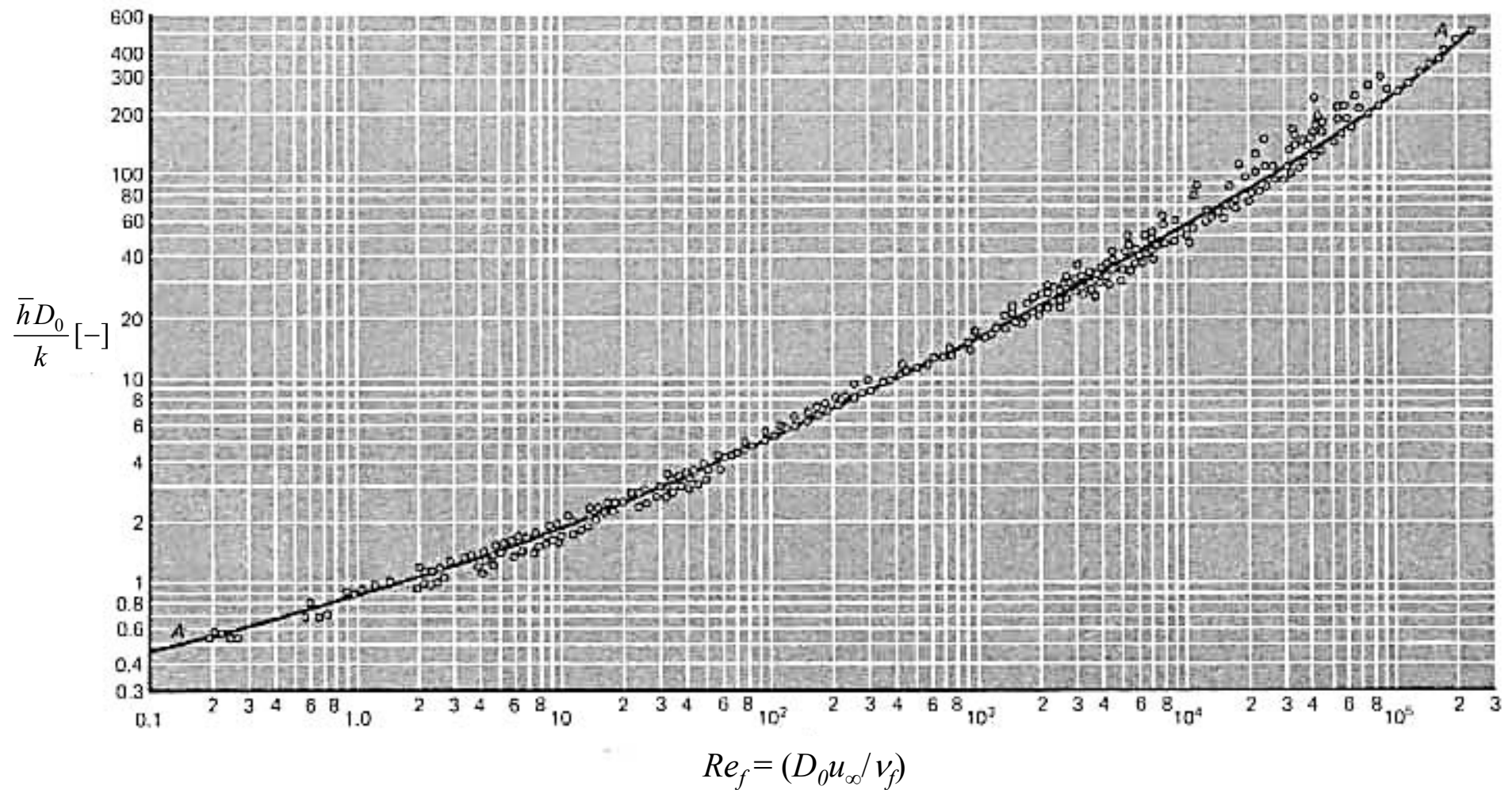
Re = 1600 直径 1.5in.

加熱円柱周りの局所熱伝達率



θ° (前方よどみ点からはかった角度)

一様流中の円柱の平均熱伝達率の実験値





円柱の平均熱伝達率

前方よどみ点近傍の層流境界層域の熱伝達
(Smith-Spalding の式)

$$\frac{hx}{k} = 0.570 Pr^{0.385} \left(\frac{2u_{\infty}(x/R)x}{\nu} \right)^{1/2}$$

よどみ点近傍の層流から乱流を経てはく離に至る円周で
平均した平均熱伝達率 (Zhukauskas の式)

$$\left(\frac{\bar{h}d}{k} \right) / Pr^{0.36} \left(\frac{Pr}{Pr_w} \right)^{1/4} = \begin{cases} 0.51 Re_d^{0.5} & : 40 < Re_d < 10^3 \\ 0.26 Re_d^{0.6} & : 10^3 < Re_d < 2 \times 10^5 \\ 0.076 Re_d^{0.7} & : 2 \times 10^5 < Re_d < 10^6 \end{cases}$$



一様流中の円柱の平均熱伝達率

$$Nu_f = c \left(\frac{u_\infty d}{\nu_f} \right)^n \cdot Pr^{1/3}$$

Re_{df}	c	n
0.4-4	0.989	0.330
4-40	0.911	0.385
40-4000	0.683	0.466
4000-40000	0.193	0.618
40000-400000	0.0266	0.805



円柱の熱伝達率

液体の一樣流れによって円柱が加熱される場合
(Frاندの式) :

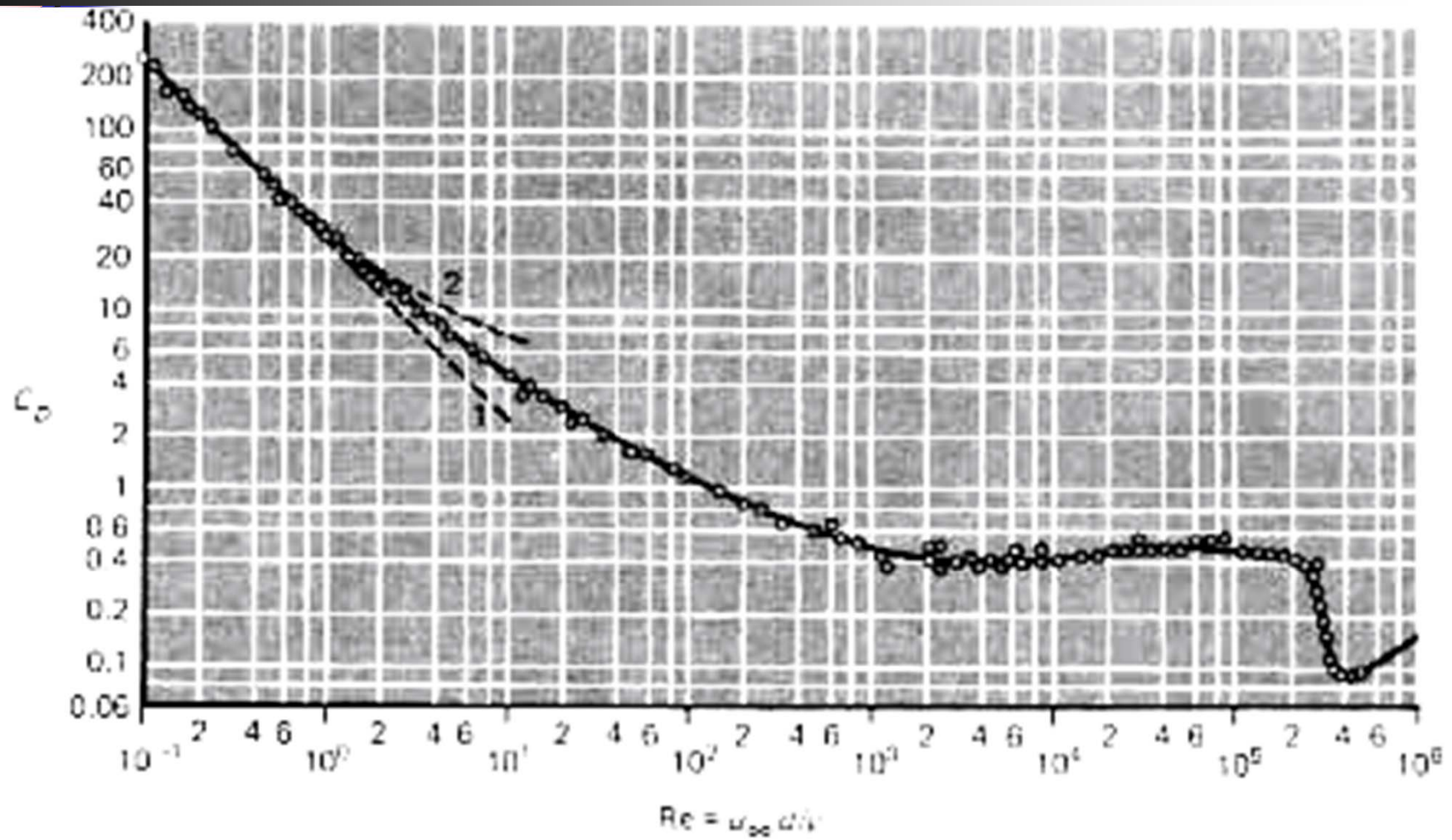
$$Nu_f = (0.35 + 0.56 \cdot Re_f^{0.52}) \cdot Pr_f^{0.3}$$

直交流中におかれた円管からの熱伝達
(Eckert-Drakeの式) :

$$Nu = (0.43 + 0.50 \cdot Re^{0.5}) \cdot Pr^{0.38} \cdot \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0.25} \quad 1 \leq Re \leq 10^3$$

$$Nu = 0.25 \cdot Re^{0.6} \cdot Pr^{0.38} \cdot \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0.25} \quad 10^3 \leq Re \leq 2 \times 10^5$$

球の抵抗係数





球の熱伝達率

一様流中に置かれた球の熱伝達に関する一般式
(Whitaker の式)

$$\frac{\bar{h}x}{k} = 2 + \left(0.4Re_d^{1/2} + 0.06Re_d^{2/3} \right) Pr^{0.4} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{1/4}$$
$$\left(0.71 < Pr < 380, \quad 3.5 < Re_d < 7.6 \times 10^4 \right)$$

液滴が自由落下する際の熱伝達 (Ranz-Marshall の式)

$$\frac{\bar{h}x}{k} = 2 + 0.6Re_d^{1/2} Pr^{1/3}$$
$$\left(0.6 < Pr < 380, \quad 1 < Re_d < 10^5 \right)$$



球の熱伝達率

気流中の球からの熱伝達（McAdams の式）：

$$Nu_f = 0.37 \cdot Re_f^{0.6} \quad 17 < Re_d < 70000$$

液流中の球からの熱伝達（Kramers の式）：

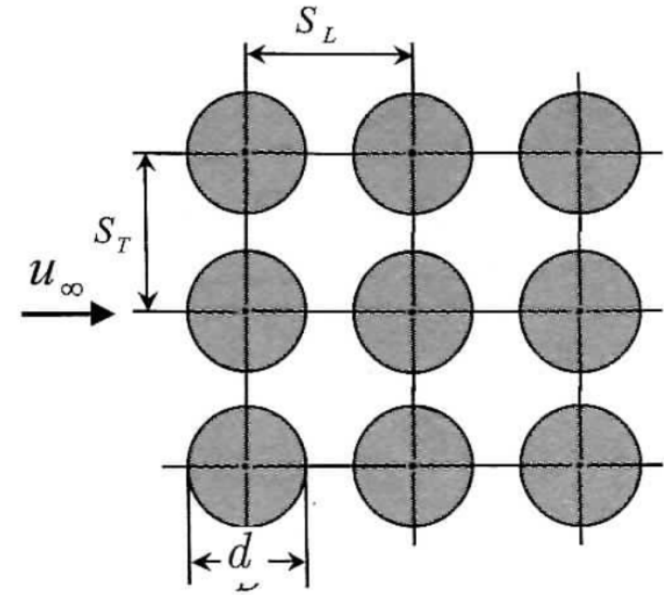
$$Nu = Pr^{0.3} \cdot (0.97 + 0.68 \cdot Re^{0.5}) \quad 1 < Re_d < 2000$$

液体が水と油の場合の球の熱伝達率
（Vliet-Lappert の式）：

$$Nu = Pr^{0.3} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_{\infty}} \right)^{0.25} \cdot (1.2 + 0.53 \cdot Re_d^{0.54}) \quad 1 < Re_d < 200000$$

円管群の熱伝達率

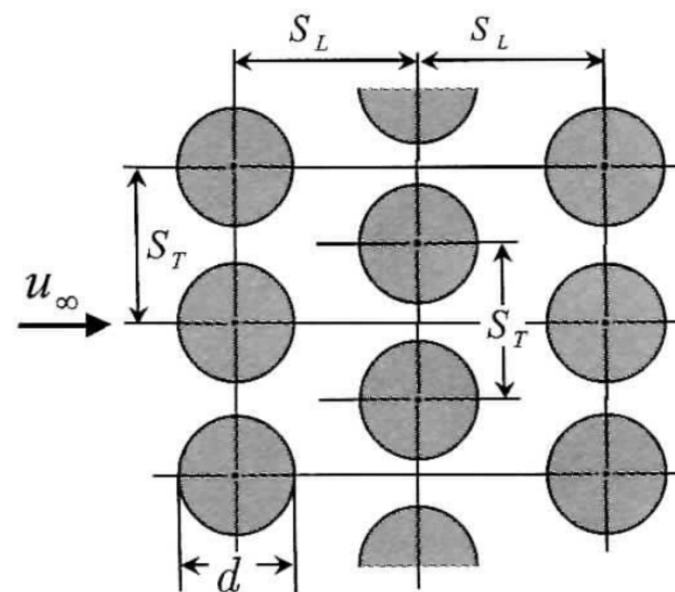
基盤配列における円管群の熱伝達
(Zhukauskas の式)



$$\frac{\left(\frac{\bar{h}d}{k}\right)}{Pr^{0.36}\left(\frac{Pr}{Pr_w}\right)^{1/4}} = \begin{cases} 0.80Re_{d\max}^{0.4} & : 10 < Re_{d\max} < 10^2 \\ 0.51Re_{d\max}^{0.5} & : 10^2 < Re_{d\max} < 10^3 \\ 0.27Re_{d\max}^{0.63} & : 10^3 < Re_d < 2 \times 10^5 \quad (S_T/S_L > 0.7) \\ 0.021Re_{d\max}^{0.84} & : 2 \times 10^5 < Re_d < 2 \times 10^6 \end{cases}$$

円管群の熱伝達率

千鳥配列における円管群の熱伝達
(Zhukauskas の式)



$$\frac{\left(\frac{\bar{h}d}{k}\right)}{Pr^{0.36}\left(\frac{Pr}{Pr_w}\right)^{1/4}} = \begin{cases} 0.90Re_{d\max}^{0.4} & : 10 < Re_{d\max} < 10^2 \\ 0.51Re_{d\max}^{0.5} & : 10^2 < Re_{d\max} < 10^3 \\ 0.35(S_T/S_L)^{0.2} Re_{d\max}^{0.60} & : S_T/S_L < 2, 10^3 < Re_d < 2 \times 10^5 \\ 0.40Re_{d\max}^{0.60} & : S_T/S_L > 2, 10^3 < Re_d < 2 \times 10^5 \\ 0.022Re_{d\max}^{0.84} & : 2 \times 10^5 < Re_d < 2 \times 10^6 \end{cases}$$



問題6-1

圧力2(atm)、温度200℃の空気が、直径2.5(cm)の円管内を10(m/s)で流れながら加熱されている。壁面熱流束は一定、壁温は空気の温度より常に20(℃)高いとする。

- (1) このときの単位長さ当たりの伝熱量を計算しなさい。
- (2) 管の長さ3(m)当たりの混合平均温度の上昇を求めなさい。
ただし、200(℃)の空気の物性値を以下の値とする。

$$\rho = 1.493(\text{kg} / \text{m}^3)$$

$$\mu = 2.57 \times 10^{-5}(\text{kg} / \text{m} \cdot \text{s})$$

$$k = 0.0386(\text{W} / \text{m} \cdot \text{K})$$

$$Pr = 0.681$$

$$C_p = 1.025(\text{kJ} / \text{kg} \cdot \text{K})$$



問題6-2

高さが1.5 m、幅が50 cmで、表面温度が75°Cに一定に保たれた垂直壁がある。静止した周囲の空気の温度が15°Cであるとき、この垂直壁からの自然対流による放熱量を求めよ。ただし、45°Cにおける空気の動粘度を $1.75 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 、体膨張率 β を $(15+273)^{-1} \text{ 1/K}$ 、プラントル数を $Pr = 0.711$ とし、重力加速度を 9.807 m/s^2 とする。なお、垂直平板におけるChurchill-Chuの式

$$\overline{Nu} = \left(0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{1/6}}{\left\{ 1 + (0.492/Pr)^{9/16} \right\}^{8/27}} \right)^2$$

または乱流自然対流の式 ($10^9 < Ra_L < 10^{12}$)

$$\overline{Nu}_L = 0.13 Ra_L^{1/3}$$

を用いてよい。



問題6-3

内径 10 cm で長さ 6 m の円管の中を温風が質量流速 0.05 kg/s で流れている. 外気温度 20 °C で, 管の外壁と外気間の熱伝達率は 10 W/(m²·K) とする. 出口地点の, 管外壁から外気への熱流束が 350 W/m² であるとき, 出口の気体温度はいくらか. また, 温度変化による物性値の変化も少ないものとする. 気体の物性値として以下を用いてよい:

$$\mu = 2.0 \times 10^{-5} \quad [\text{Pa} \cdot \text{s}]$$

$$k = 0.0286 \quad [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$$

$$Pr = 0.7$$



定期試験

- 日時： 平成27年6月26日(金)5・6限
- 場所： 3B402
- 教科書・資料・ノート等： 持ち込み不可
- 電卓： 持込可

- 提出物： 回答用紙＋授業アンケート用紙