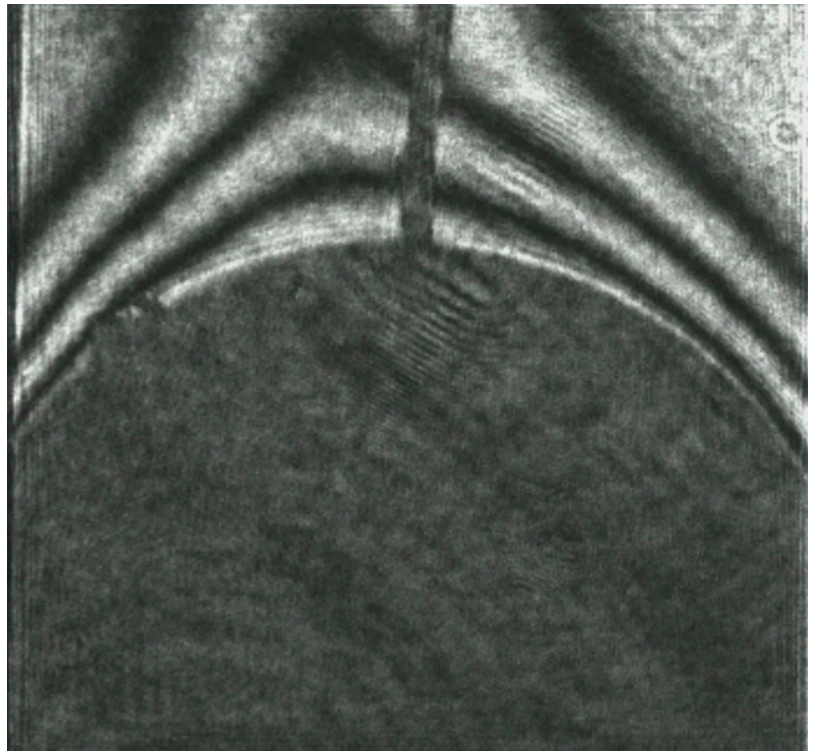
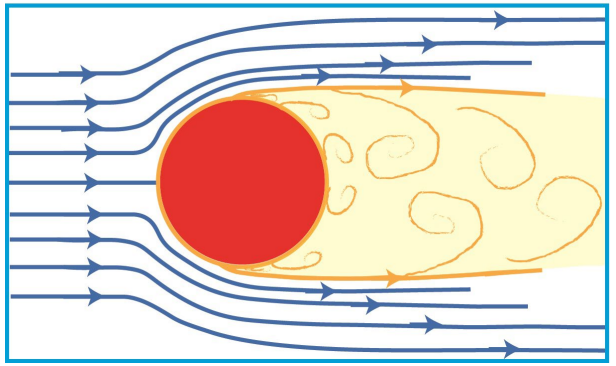
# 第3章　対流熱伝達　②

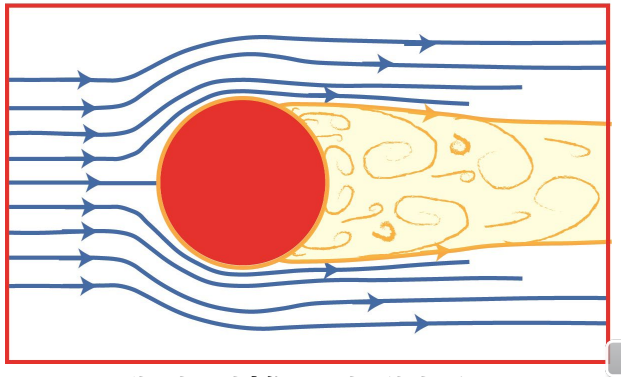
## 3-2.　強制対流熱伝達と流動の様相



加熱された円柱流れの剥離点移動



層流剥離の流動状況



乱流剥離の流動状況

東北大学流体科学研究所の位相シフト大型光干渉装置により撮影した温度可視化画像

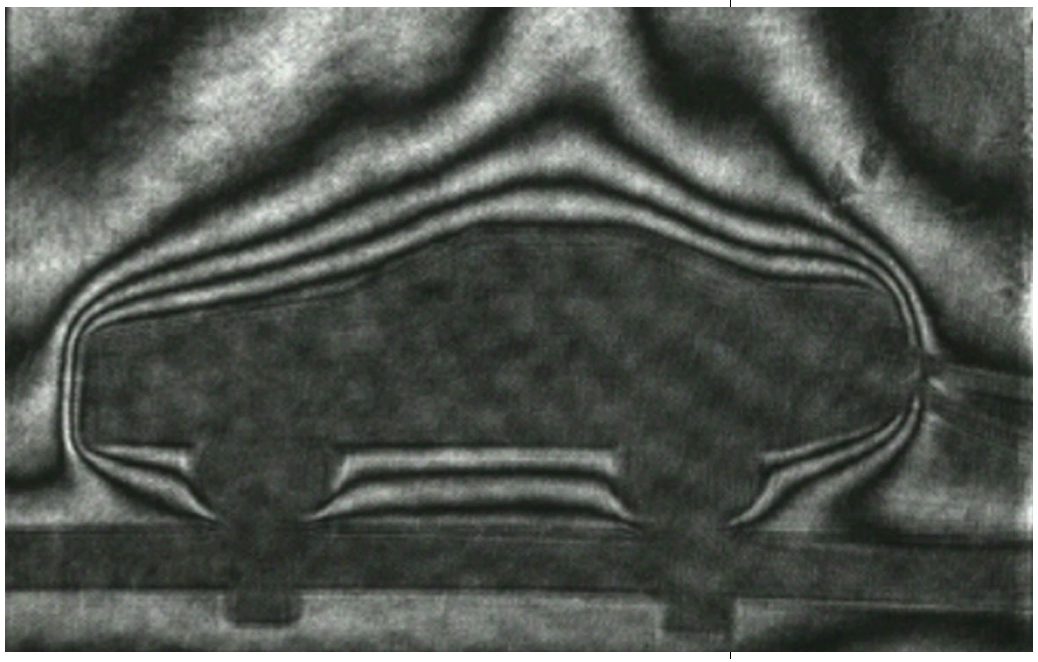
# 技術者と研究者に向けた伝熱工学の基礎と応用



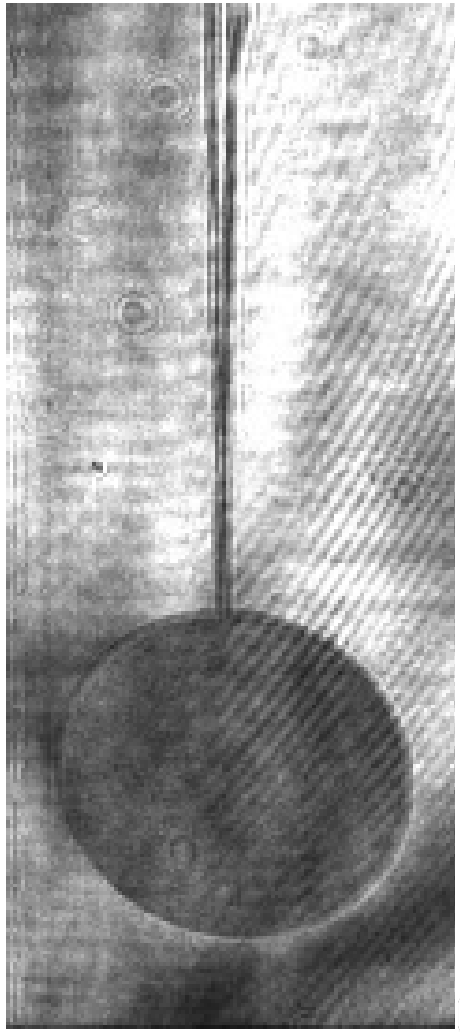
前回の内容

## 第3章　対流熱伝達　①

## 3-1.　対流熱伝達の概要



加熱された自動車モデルの強制対流熱伝達



直径5cmの加熱球周りの自然対流（4.5倍速）

東北大学流体科学研究所の位相シフト大型光干渉装置により撮影した温度可視化画像

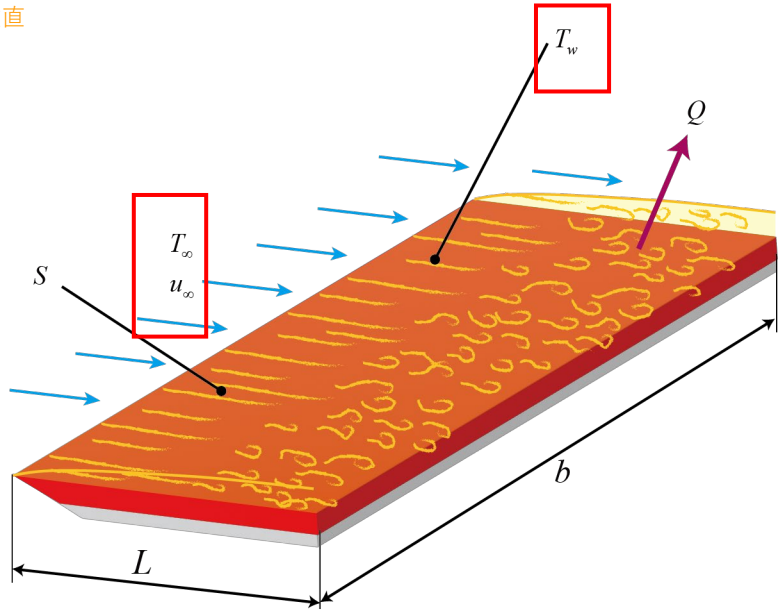
# 第3章　対流熱伝達

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.　自然対流の熱伝達の定式化
3-7.　解析ソフトを使った伝熱計算

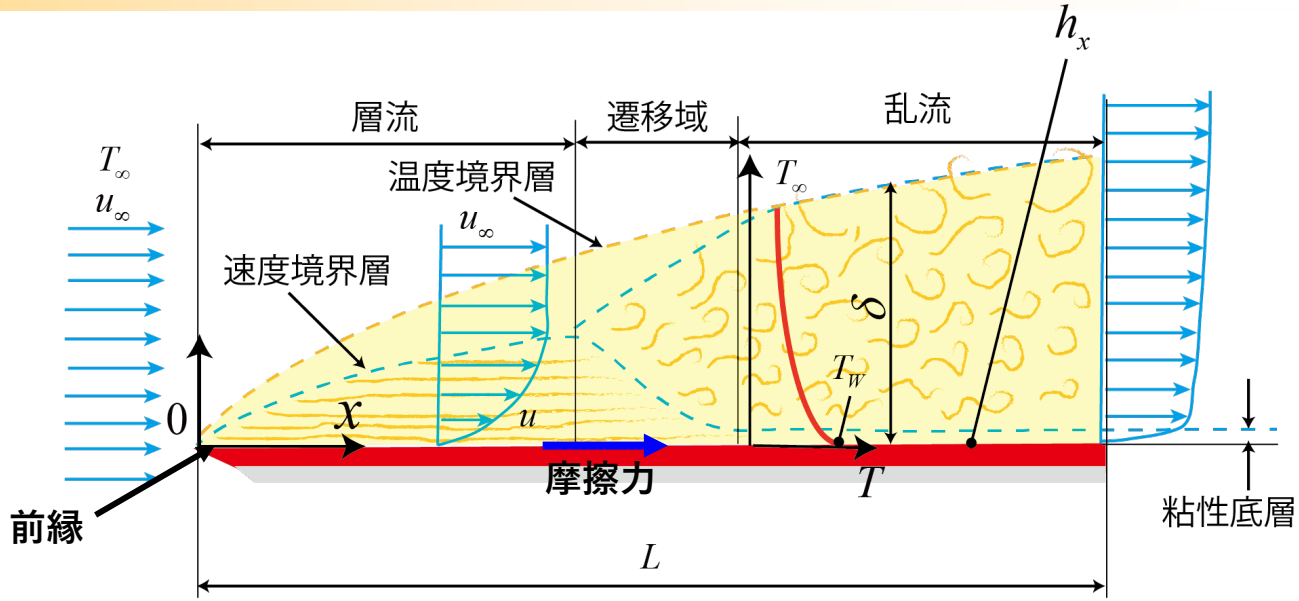


# 平板上の強制対流






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、層流境界層は前縁から発達し、遷移領域をへて乱流境界層となる。乱流境界層の壁面近傍には粘性支配の層流底層が存在する。

温度境界層も前縁から発達する。乱流境界層では温度境界層と速度境界層厚さδはほぼ等しい。

温度境界層では、壁面の温度$T_W$と境界層外縁温度$T_\infty$の差($T_W$- $T_\infty$）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。

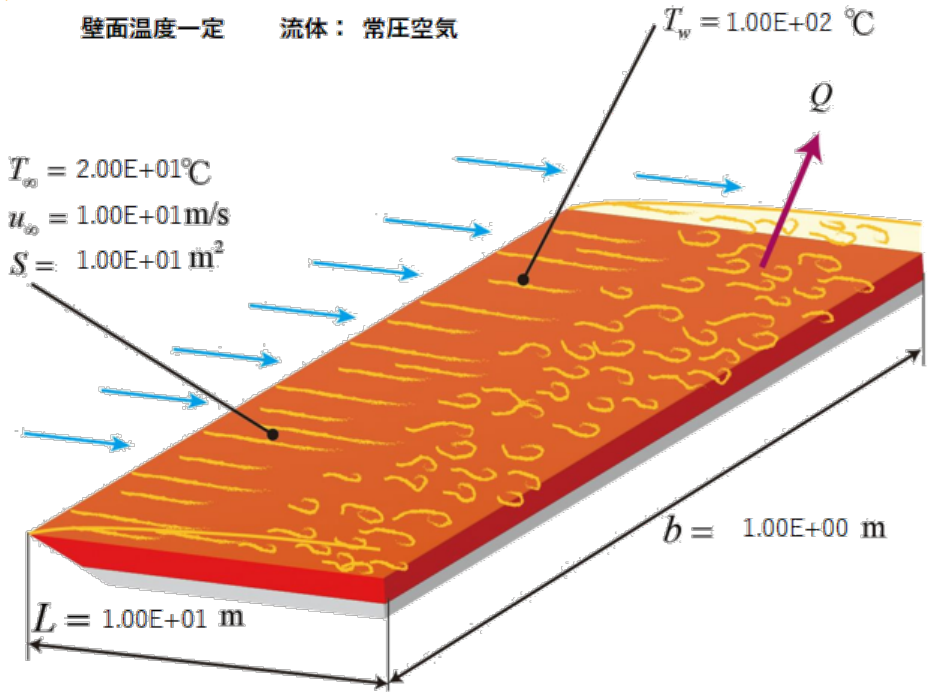
その関係をニュートンの冷却法則という。

ニュートンの冷却法則 $q_x = h_x(T_w - T_\infty)$ (1)

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。

# 平板上の強制対流

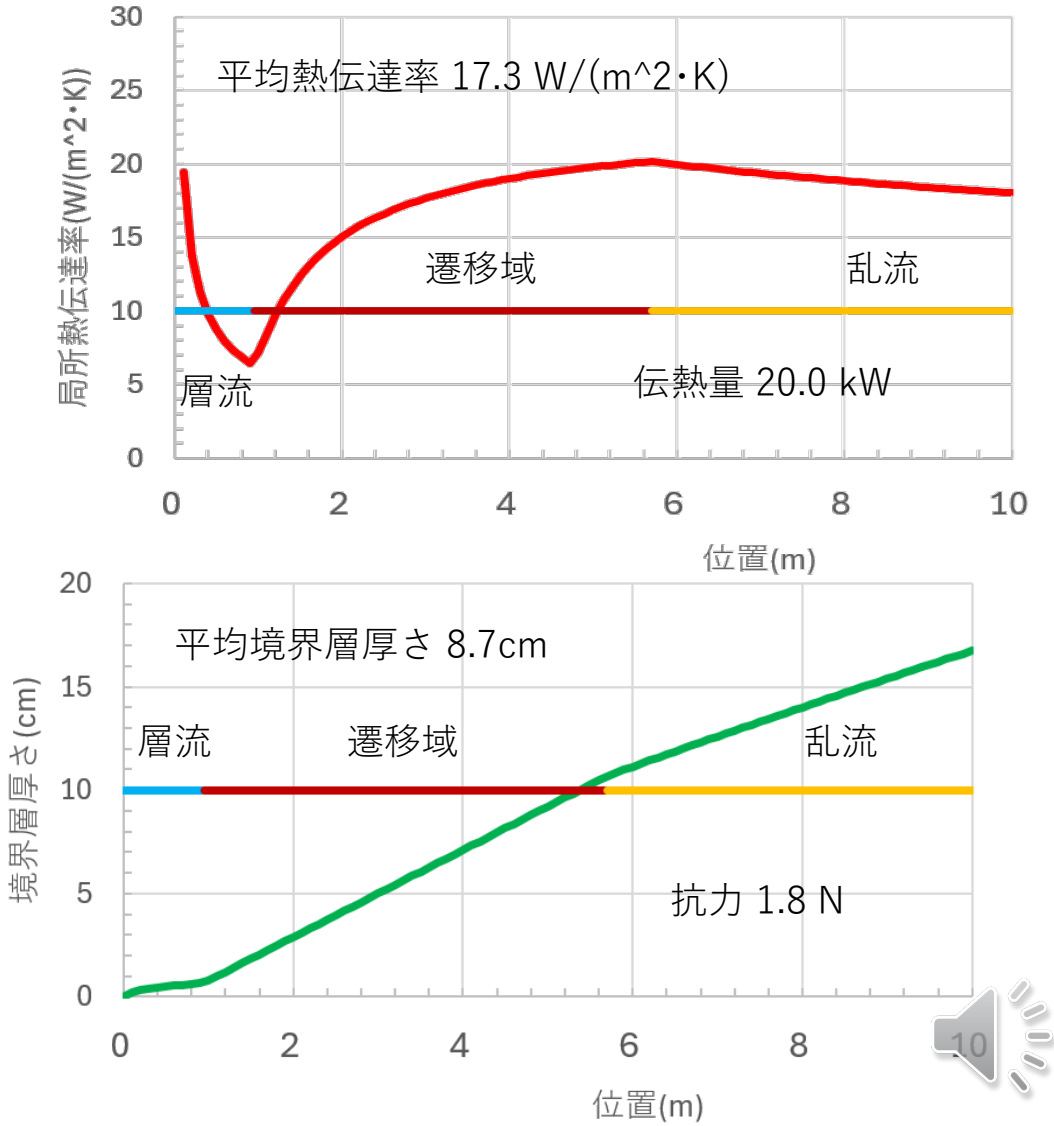





**強制対流平板の解析条件**

層流境界層では、局所熱伝達率 $h_x$ は境界層の厚さの増大と共に $h_x \propto x^{-1/2}$ に比例して減少する。乱流境界層では、局所熱伝達率はほぼ $h_x \propto x^{-1/5}$ に比例して減少する。

摩擦抵抗は、乱流の方が層流より大きく、乱流境界層厚さの増大も大きくなる。

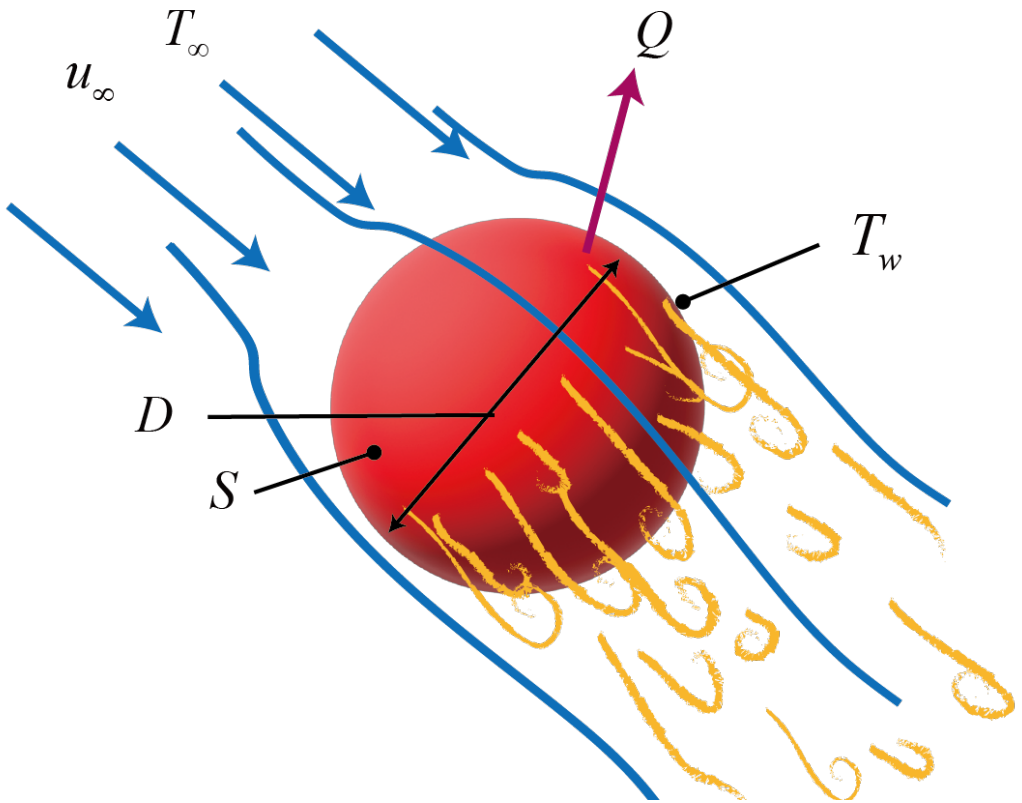



**強制対流平板の境界層厚さと局所熱伝達率**

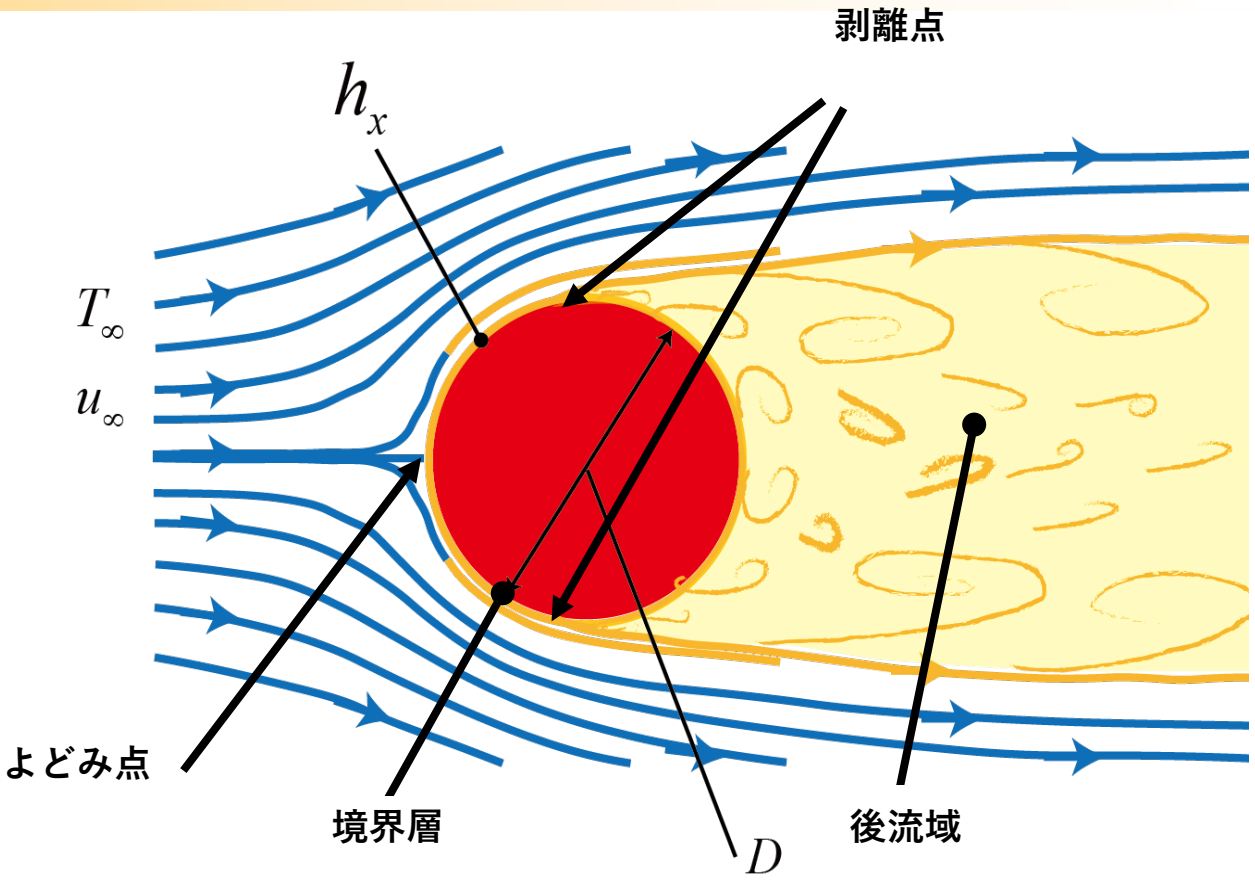
Schlichting, H., Boundary Layer Theory, 7Th Ed., (1979).

# 球周りの強制対流





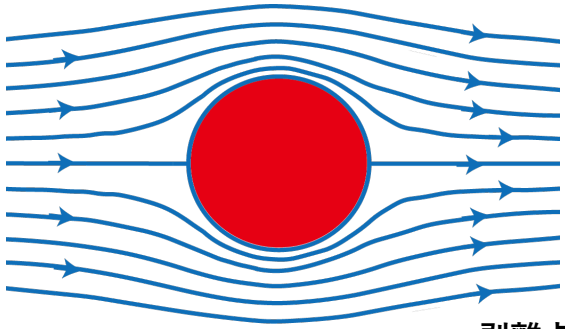

球まわり強制対流と伝熱




球まわり強制対流の断面様相

# 球周りの強制対流の様相

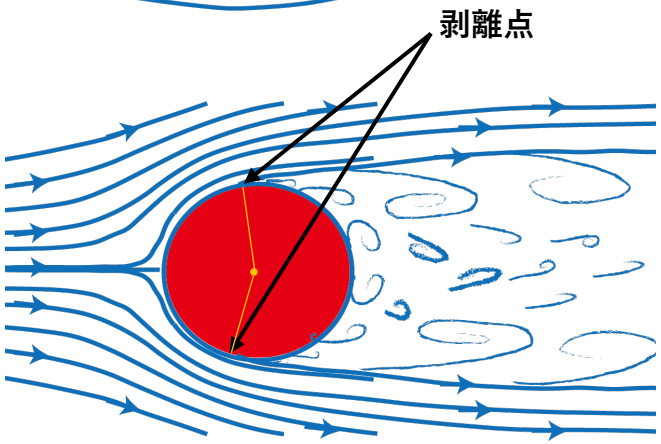




**流速×直径　小**

流れは粘性支配で剥離領域が存在しない。ストークス流れと言われる。

例：　直径50 $\mu$ mの水ミストが空気中を落下する場合
$D$=50 $\mu$ m, $u_\infty$=7.45cm/s, 抵抗力 $F_D$=6.98e-10 N

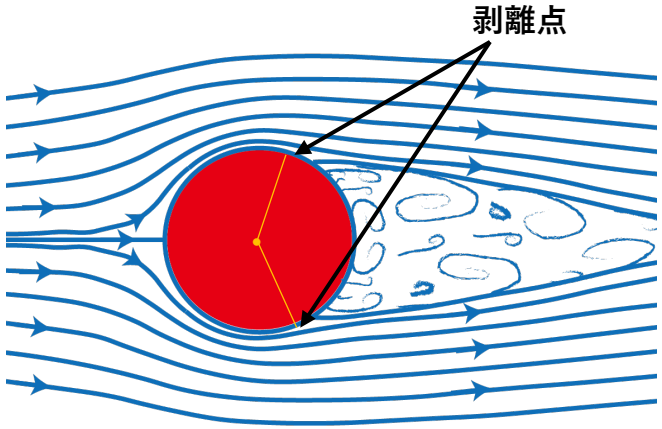



**流速×直径　中**

球表面の境界層は層流で淀み点から約80度で境界層が剥離する。後流域が大きく流体抵抗が大きい。

例：　直径2mmの雨滴が空気中を落下する場合
$D$=2mm, $u_\infty$=5.6m/s, 抵抗力 $F_D$=4.1e-5 N

例：　中学生がサッカーボールを時速67kmでシュートする場合
$D$=22cm, $u_\infty$=18.6m/s, 抵抗力 $F_D$=3.75 N



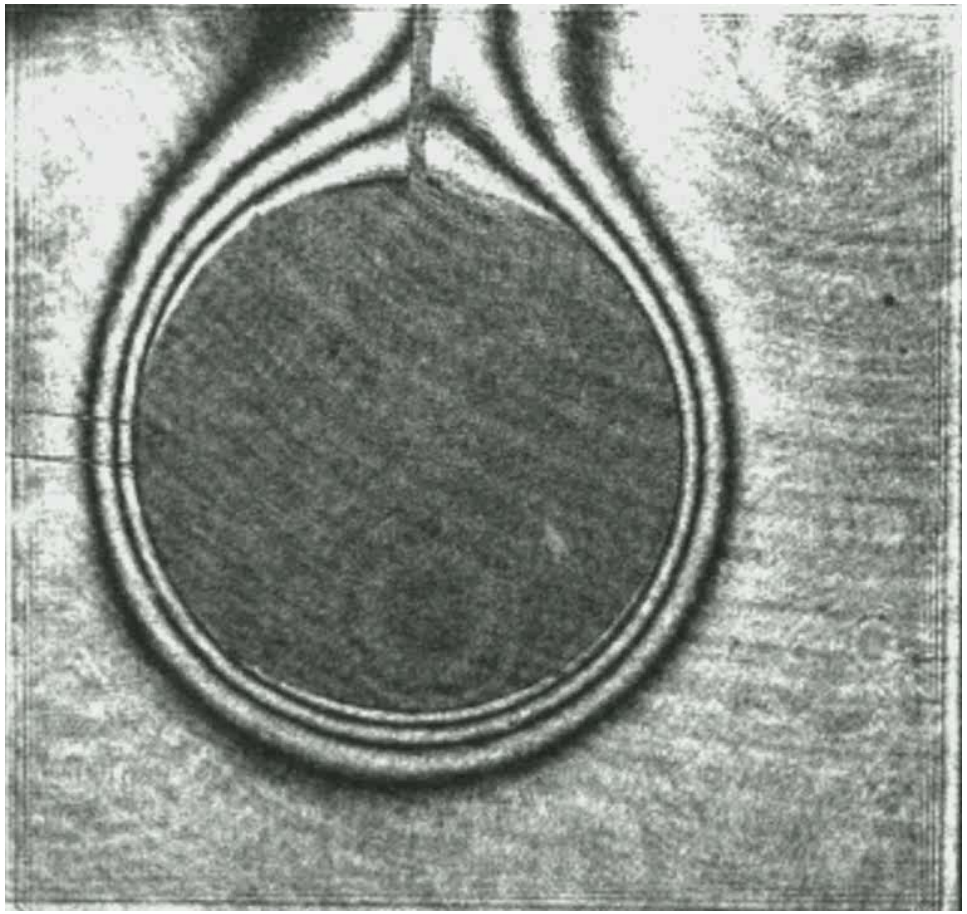

**流速×直径　大**

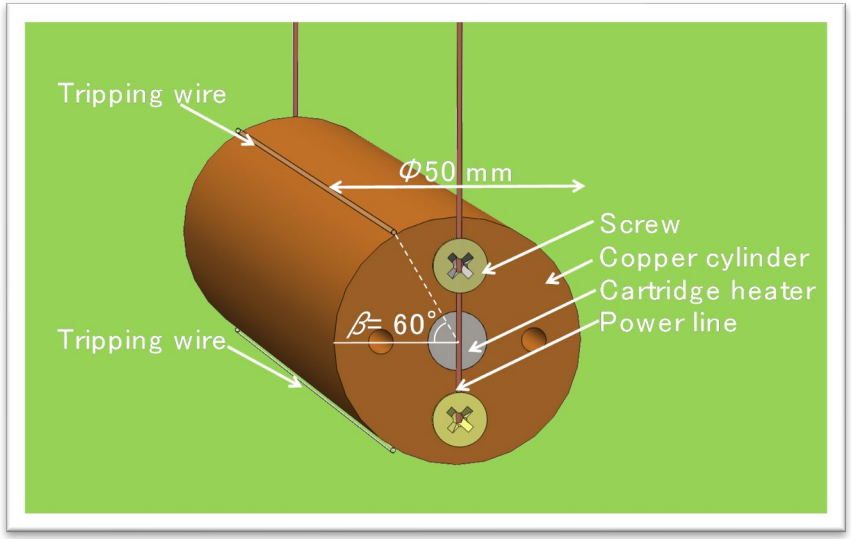
球表面の境界層は乱流に遷移し、淀み点から約110度以上まで境界層が剥離しない。後流域が小さく流体抵抗が小さい。

例：　プロ選手がサッカーボールを時速100kmでシュートする場合
$D$=22cm, $u_\infty$=27.8m/s, 抵抗力 $F_D$=2.51 N

# 流速による加熱円柱周りの境界層の変化









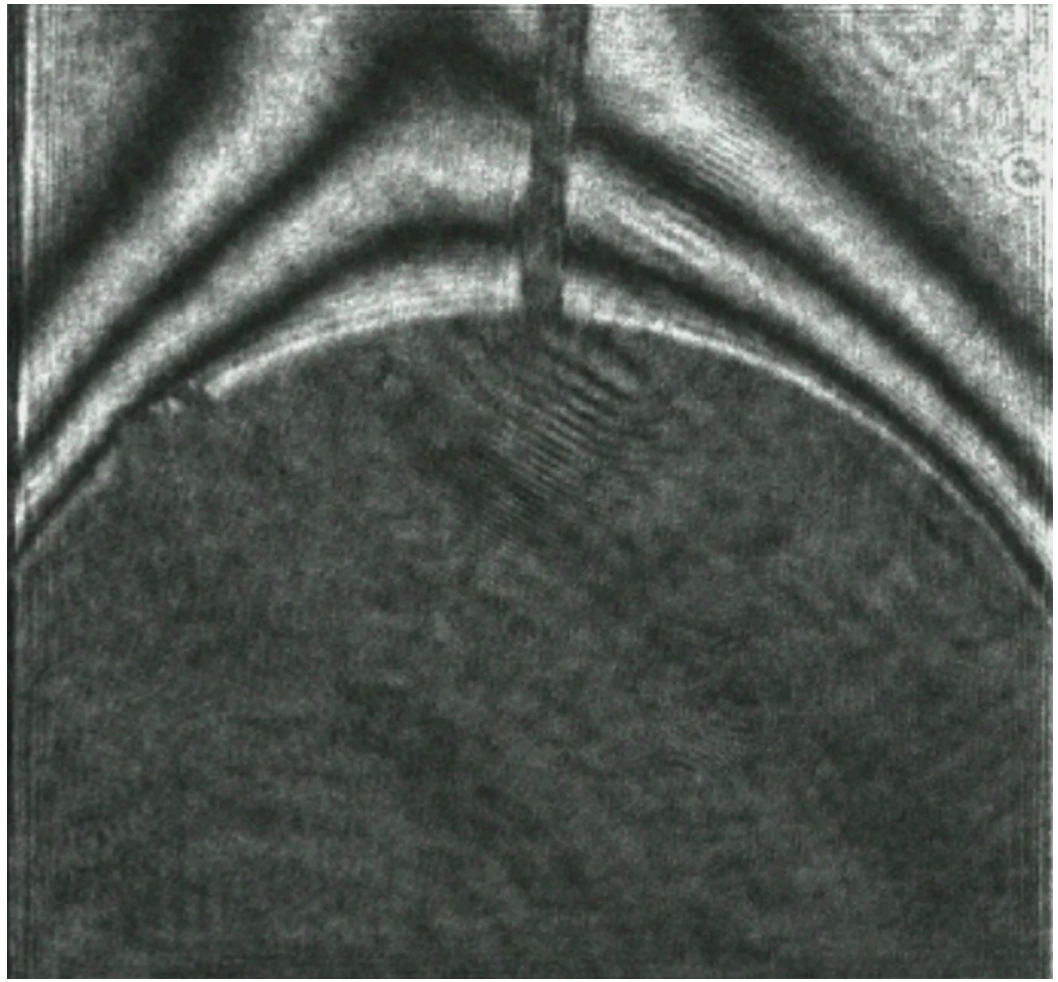


大型光干渉計による加熱円柱周りの温度境界層の光干渉計画像,
東北大学　圓山研究室作成

**始めは層流境界層で剥離点が前方にあるが、流速が増加すると境界層が乱流に遷移するために、剥離点が後方に移動する。**

# 円柱周りの温度境界層の変化

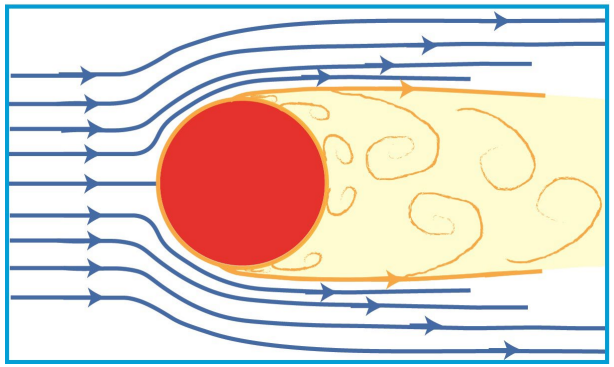




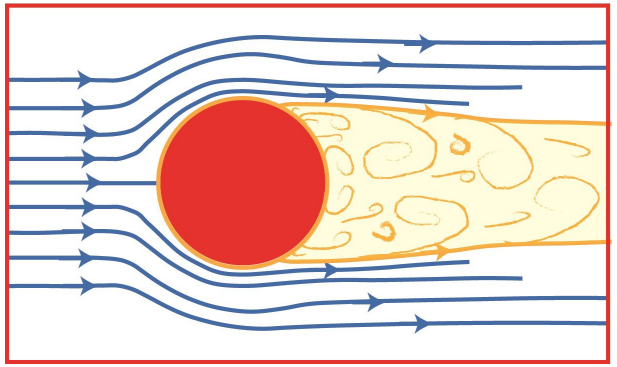
大型光干渉計による加熱円柱周りの温度境界層の可視化画像。剥離点付近の拡大画像。

**実験条件**

温度差10℃,
主流速度: 0 – 20 m/s ($Re_D$: – $6.6 \times 10^4$)
（ただしトリッピングワイアーで境界層を乱流遷移させている）



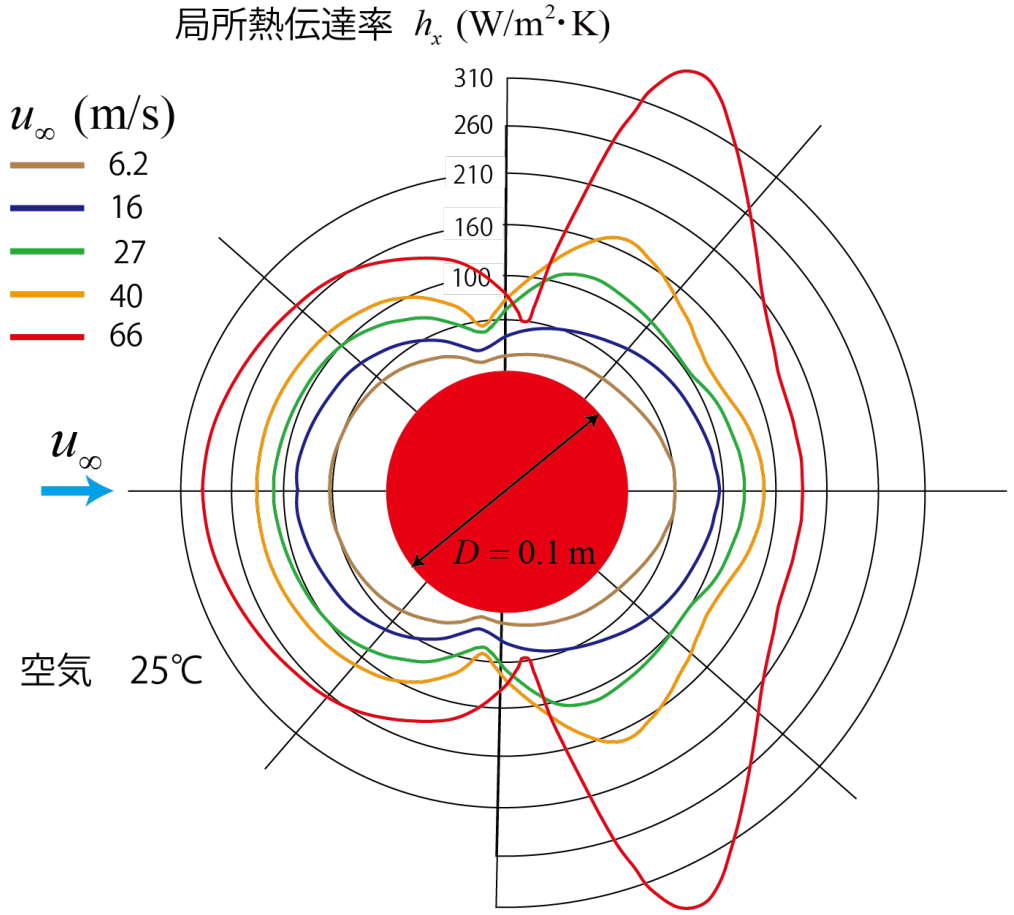
層流剥離の流動状況



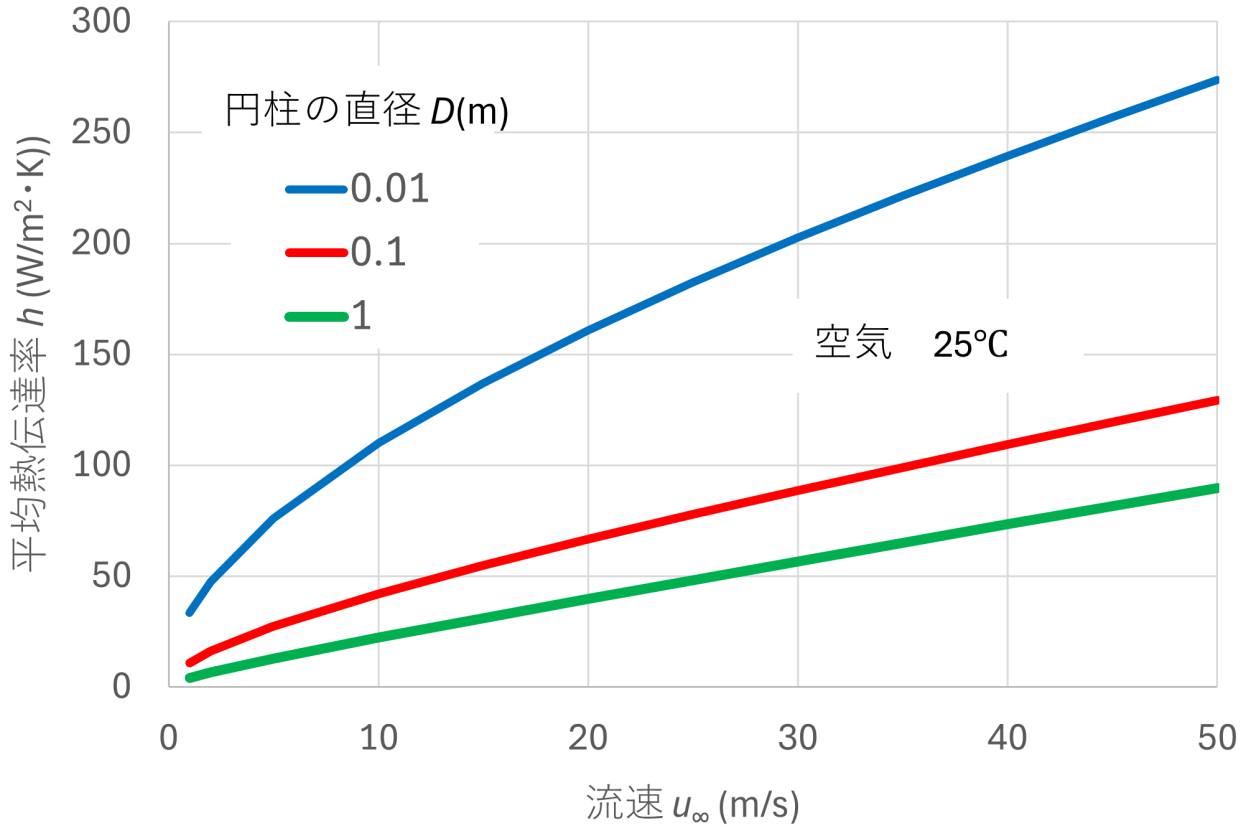
乱流剥離の流動状況

# 円柱の強制対流熱伝達率





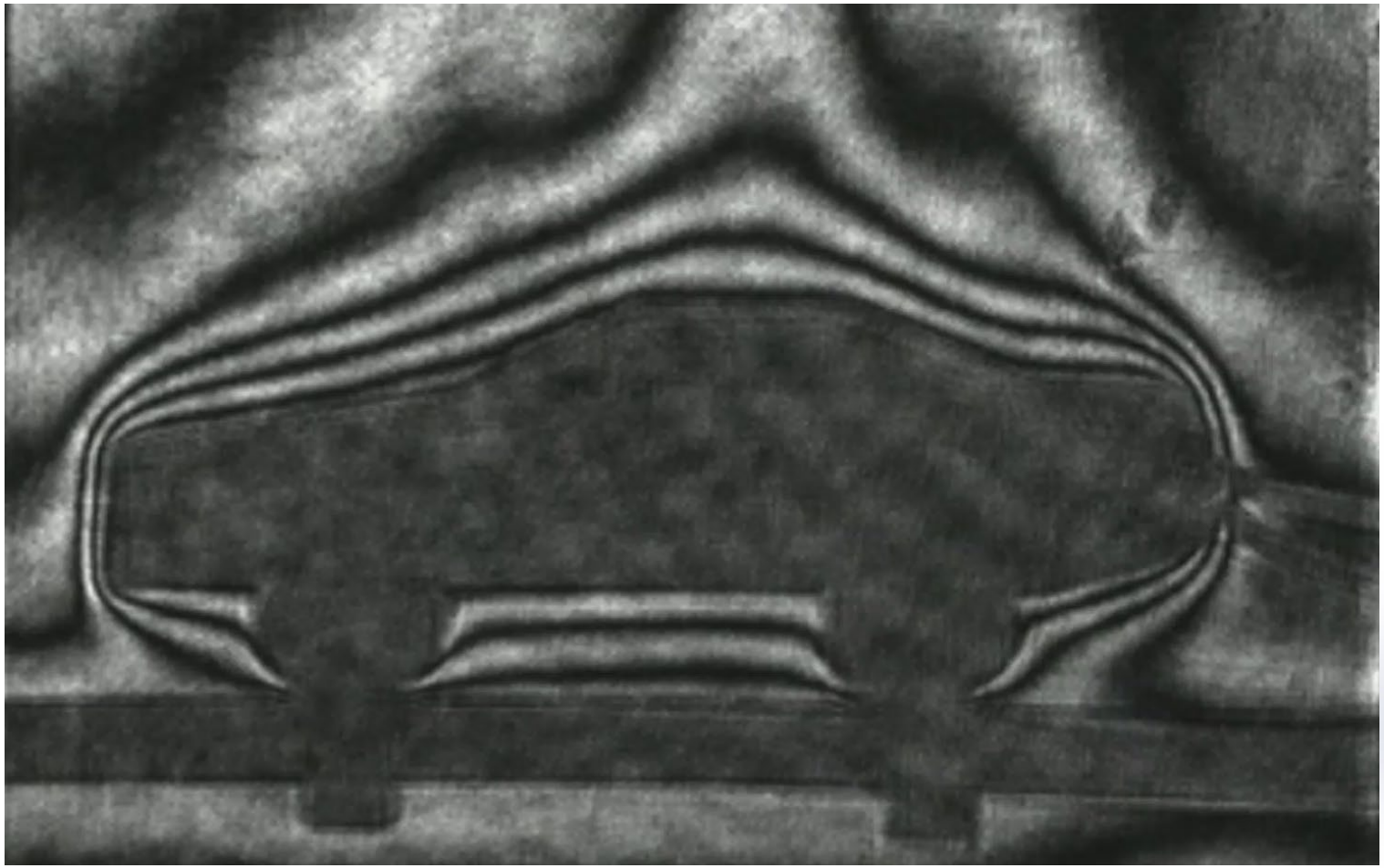

円柱周りの局所熱伝達率の流速による変化




各種直径の円柱周りの平均熱伝達率の流速による変化

# 機械要素周りの温度境界層の変化



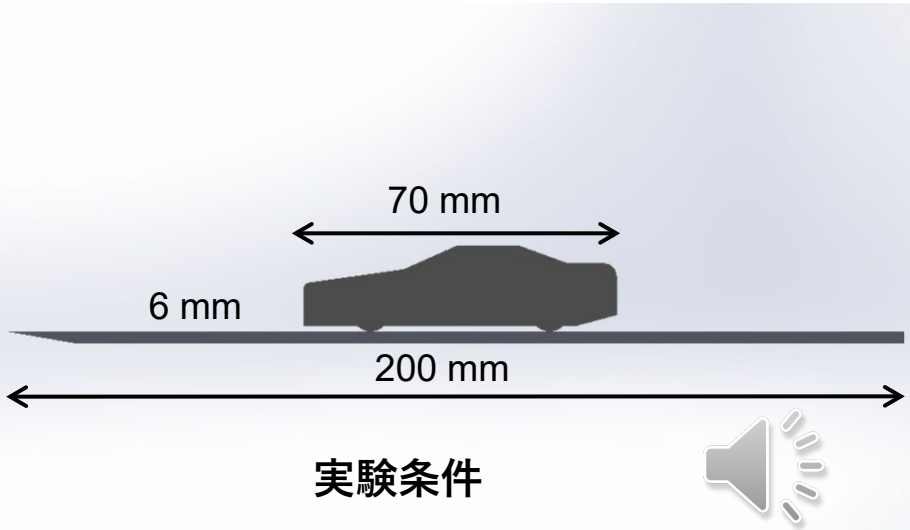


**加熱された自動車モデルの強制対流の可視化**




モデルと気流の温度差: 100 ℃

流速: 0 - 20 m/s

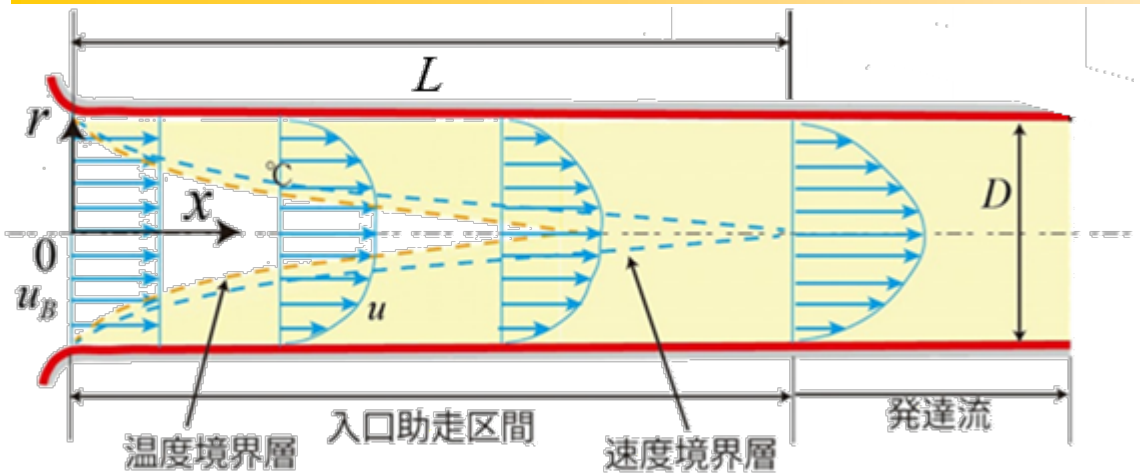



**実験条件**

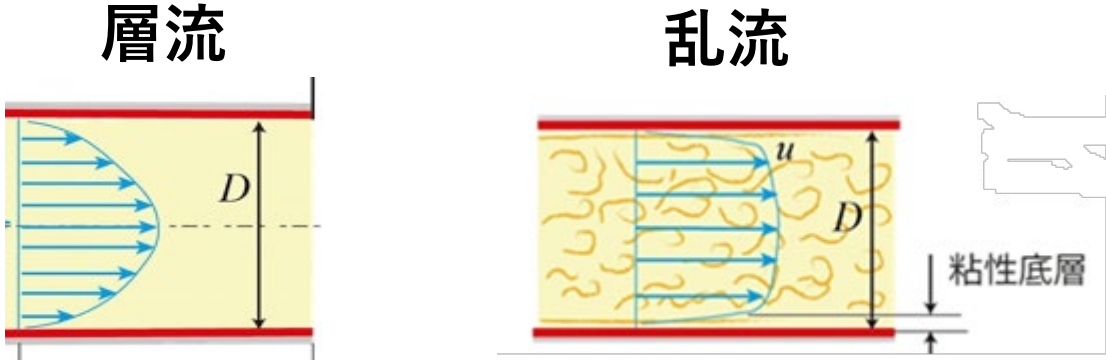
東北大学流体科学研究所の位相シフト大型光干渉装置により撮影した温度可視化画像

# 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




発達した管内流れの速度分布

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。

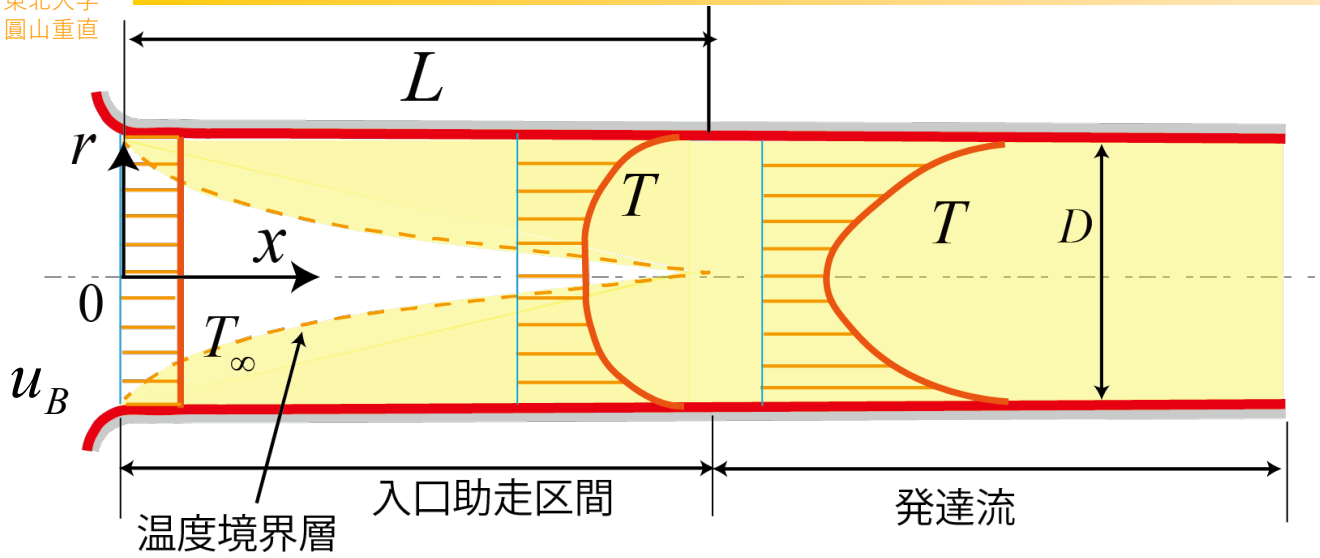
入口助走区間では、発達した流れより圧力低下が大きく、熱伝達率も大きい。発達流れでは、圧力低下と熱伝達率は一定値となる。

速度助走区間の距離は、層流で$L \fallingdotseq 0.05 Re_D D$，乱流では$L \fallingdotseq 10D$が一応の目安とされる.
ここで、$Re_D = uD/\nu$，$D$は管直径，$u$は断面平均流速，$\nu$は動粘度

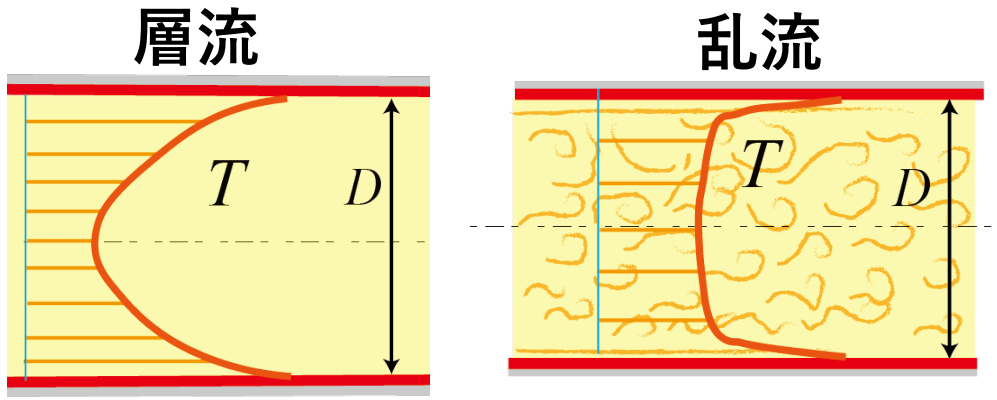
管内の速度分布は直径と流速が小さいときに層流、大きいときに乱流となる。乱流は層流より圧力低下が大きく、熱伝達率も大きい。

# 円管内の流れと境界層の発達






管内の入口助走区間と温度分布




発達した管内流れの温度分布

温度場にも助走区間が存在する．加熱開始点より温度境界層が発達し，管断面中央で合流するが，それまでの区間を温度助走区間と呼び，それより下流の温度場を発達した温度場と呼ぶ．

管内流においては，参照温度差として，管壁温$T_w$と流体の混合平均温度$T_B$との差をとる。

混合平均温度は，次式で定義される。

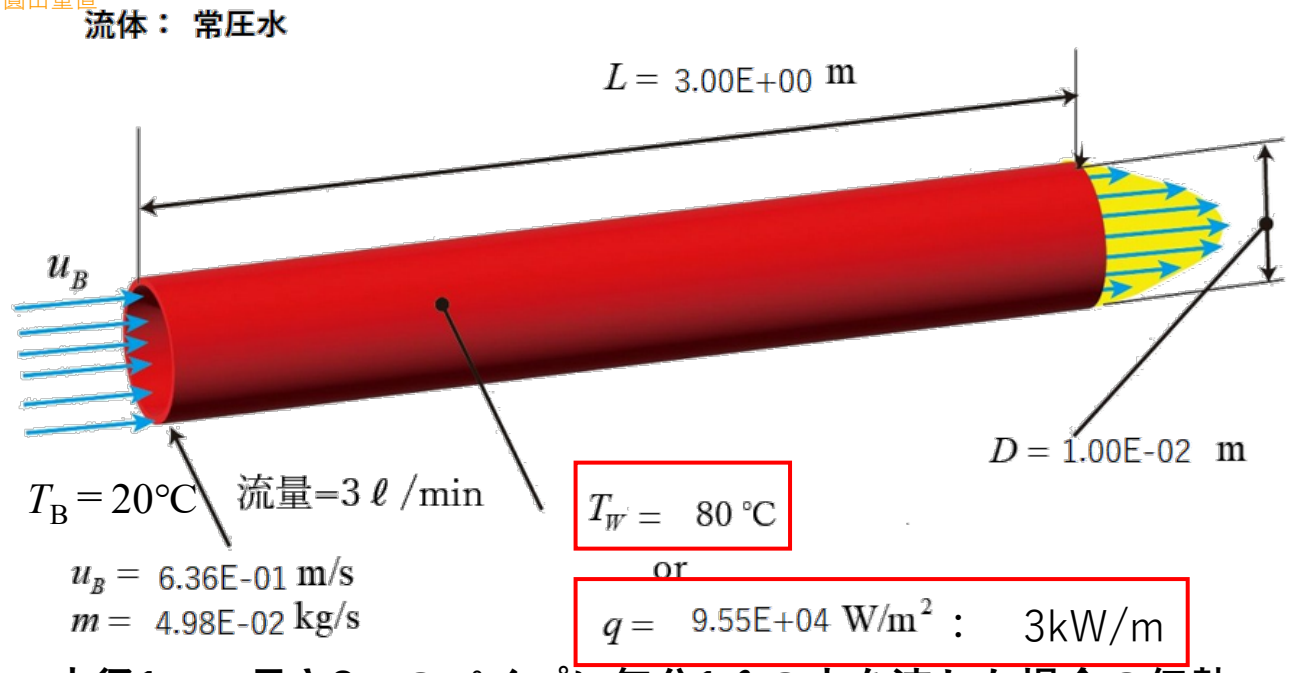
$$T_B \equiv \frac{\int_A \rho c_p u T \, dA}{\int_A \rho c_p u \, dA} = \frac{\int_A uT \, dA}{u_B A} \qquad (2)$$

この温度差で熱流束$q$を除したものを熱伝達率　$h=q/(T_w-T_B)$　と定義する。

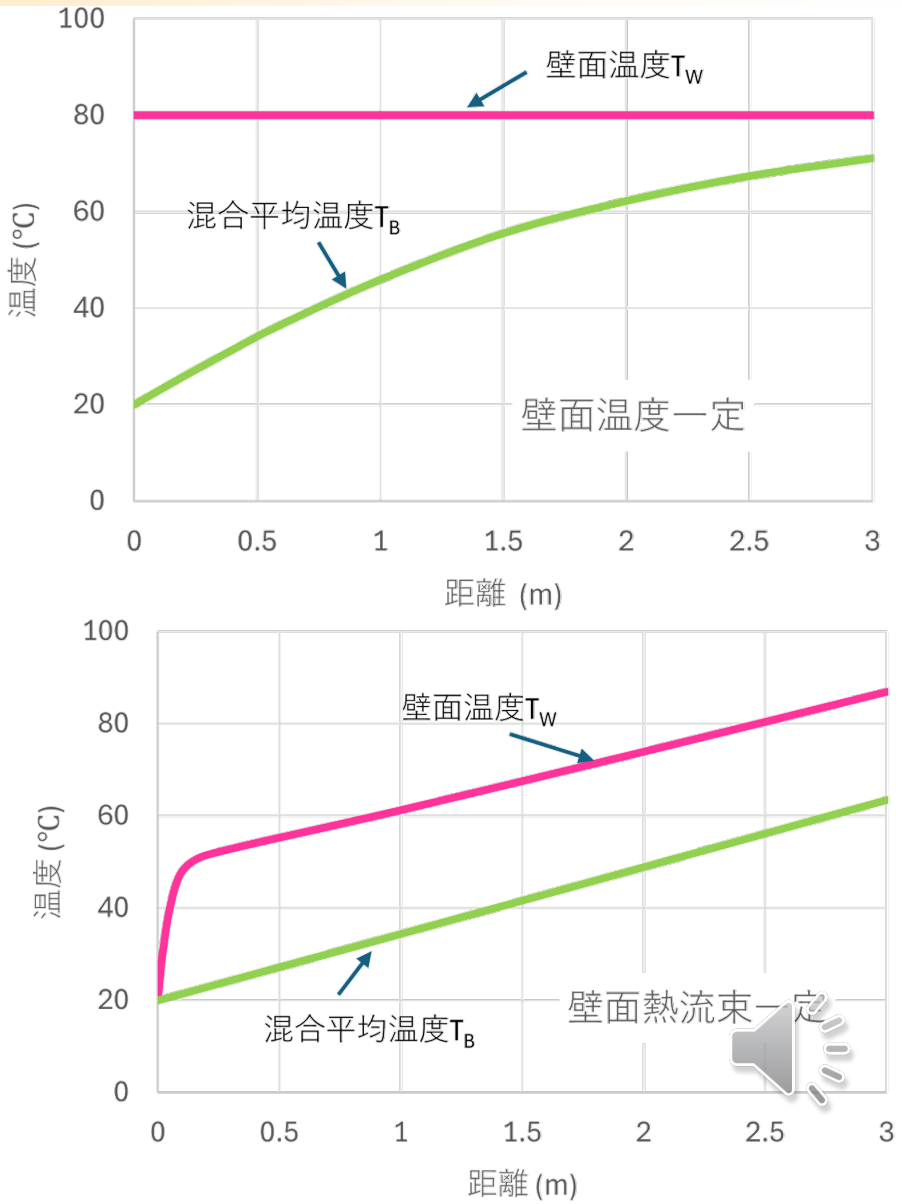
十分に発達した温度場では温度分布が相似となるため熱伝達率が一定となる。

# 管路壁面の熱条件と混合平均温度






**内径1㎝、長さ3mのパイプに毎分1ℓの水を流した場合の伝熱**




**管路の管壁温度と混合平均温度の変化**

壁面の加熱に関しては，　等温壁条件と等熱流束壁条件とがある．

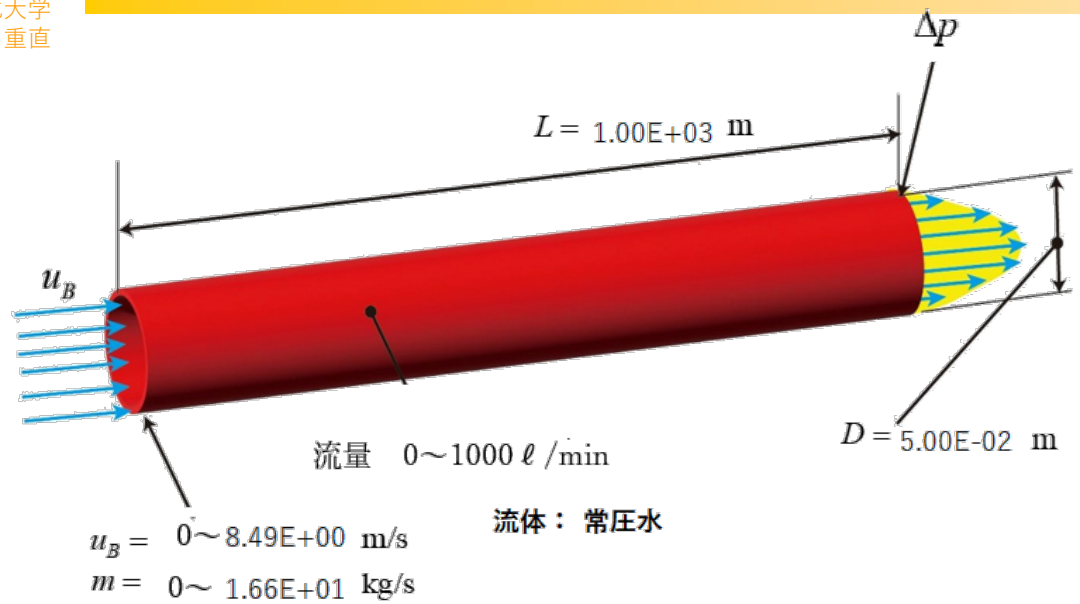
等温壁条件では流体への伝熱量が問題となる場合が多い。

等熱流束壁条件では、混合平均温度の増加は流路長さに比例する。

工学的観点からは、管路出口における壁温が問題となる場合が多い。

# 平滑管と粗面管路の圧力損失





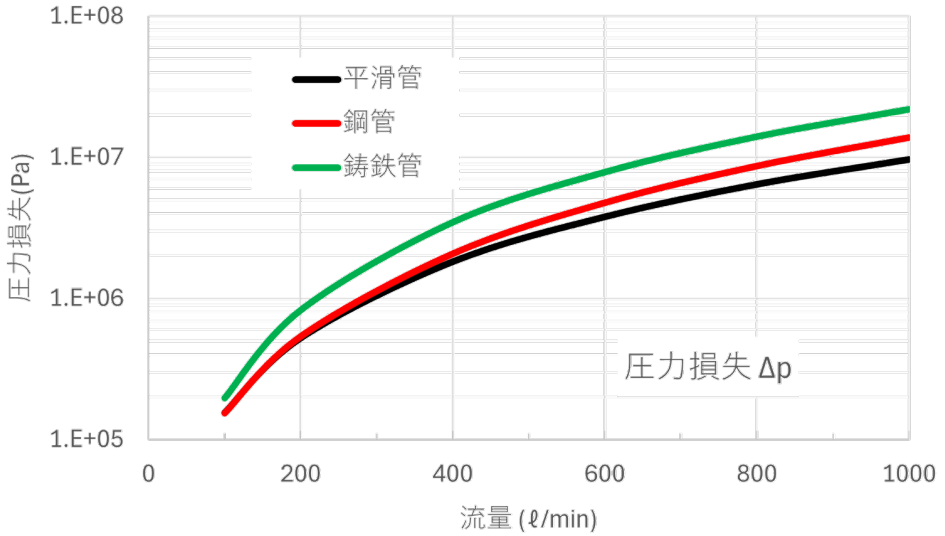

**内径5㎝、長さ1kmのパイプに水を流した場合の圧力損失 $\Delta p$**

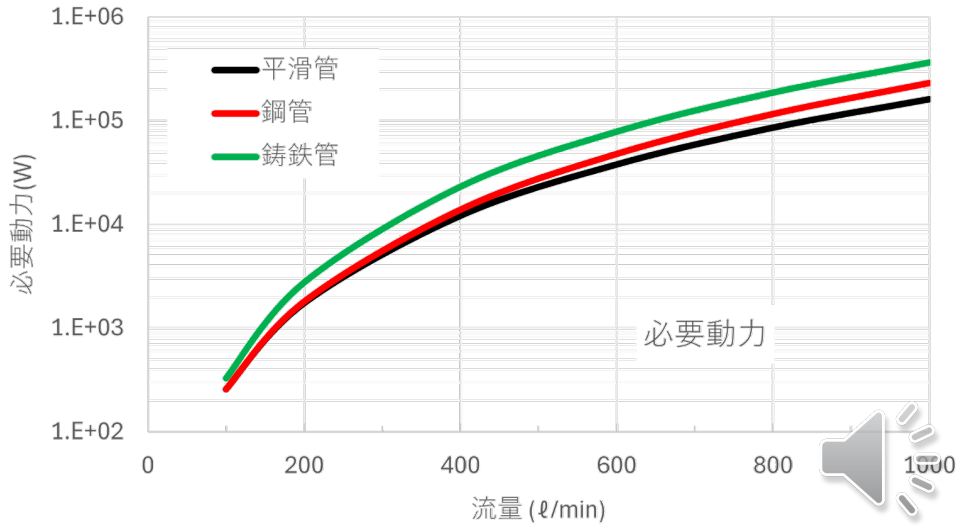
| 管路の種類 | 表面粗さ $k_s$(mm) |
|---|---|
| 平滑管 | — |
| 鋼管 | 0.05 |
| 鋳鉄管 | 0.26 |

日本機械学会，技術資料，管路ダクトの流体抵抗，(1980)

毎秒$V$の流体を輸送したときの必要最小動力 $P$ (W)

$$P = \frac{dV}{dt}\Delta p = \frac{dm}{\rho dt}\Delta p \quad (3)$$



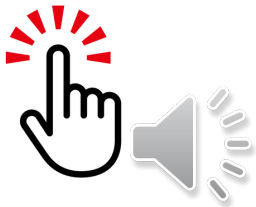




**流量による管路の圧力損失と必要動力の変化**

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.　自然対流の熱伝達の定式化
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

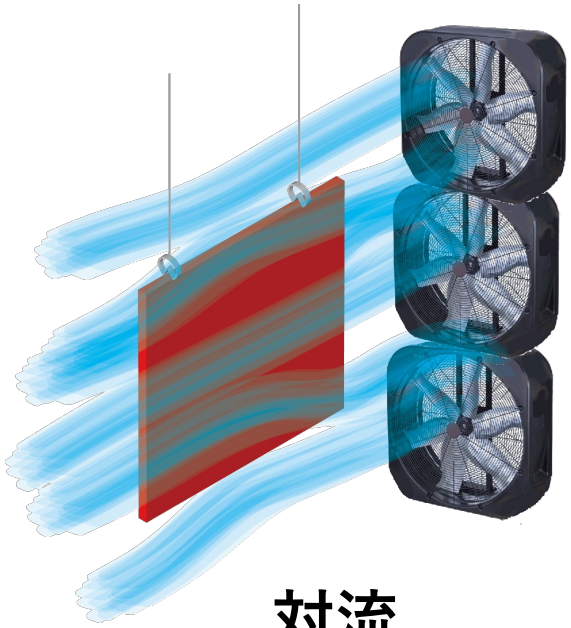
## 東北大学未来科学技術共同研究センター レクチャーシリーズ

— 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