

環境・エネルギー産学連携フォーラム in 横須賀 2012
平成24年12月3日 横須賀市産業交流プラザ

熱を効率良く移動させるためには？

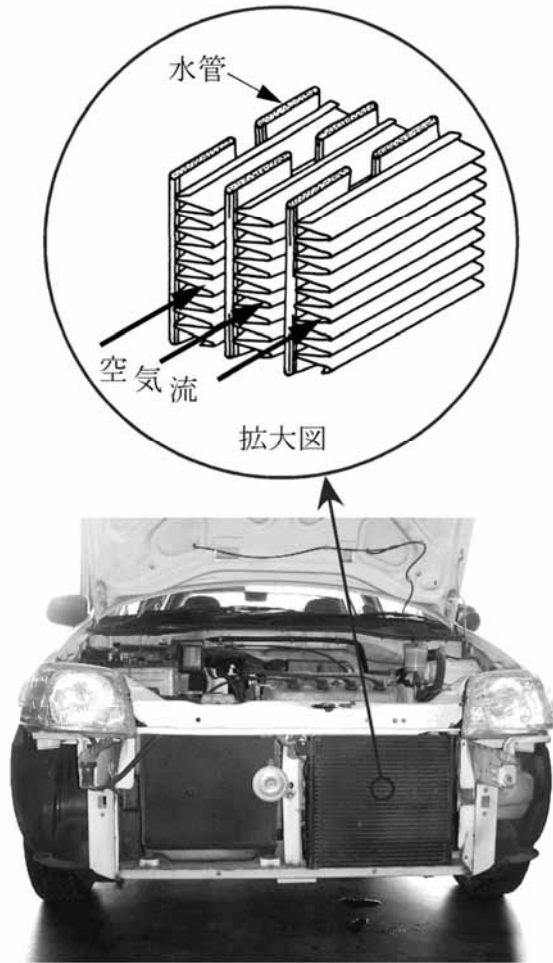
防衛大学校 機械工学科

中村 元

内 容

1. 熱の移動とは？
 - 1) 伝熱の基本3形態
 - 2) 電気回路との相似性
 - 3) 熱抵抗
2. 多くの熱を移動させるには？
 - 1) 熱抵抗を小さくする方法
 - 2) 熱伝達率を高める方法
3. 速く冷ます(暖める)には？
 - 1) 熱容量と時定数
 - 2) ビオ数との関係
4. まとめ

機器にみられる熱移動の例



自動車用ラジエータ
(JSMEテキストシリーズ「伝熱工学」より)

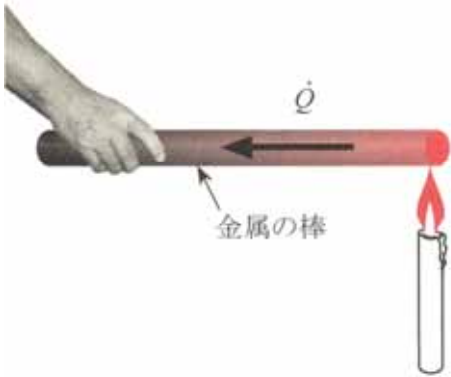


背面

パソコンのチップ冷却

熱の移動とは？

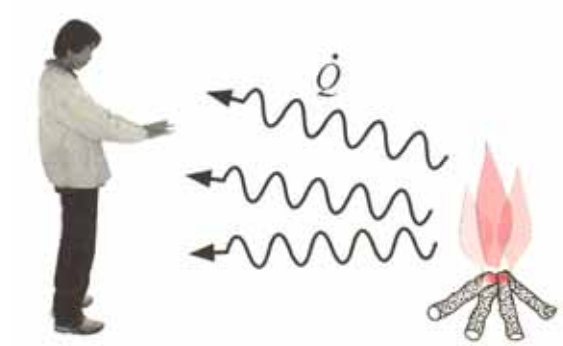
伝熱の基本3形態



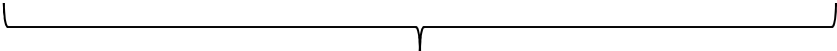
熱伝導



熱伝達



熱放射



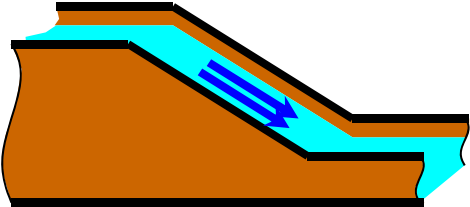
物質内の熱の移動

電磁波による熱の移動

(図はJSMEテキストシリーズ「伝熱工学」より)

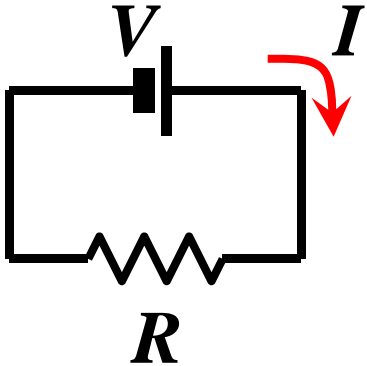
電気回路との相似性

$$\text{流量} = \frac{\text{駆動力}}{\text{抵抗}}$$



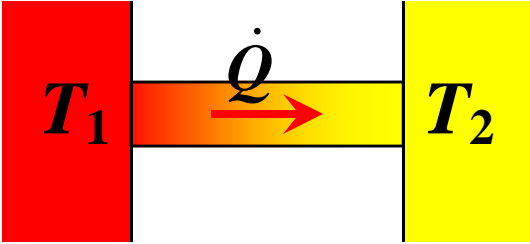
電気の流れ

$$\text{電流} = \frac{\text{起電力}}{\text{電気抵抗}} \Rightarrow I = \frac{V}{R}$$



熱の流れ

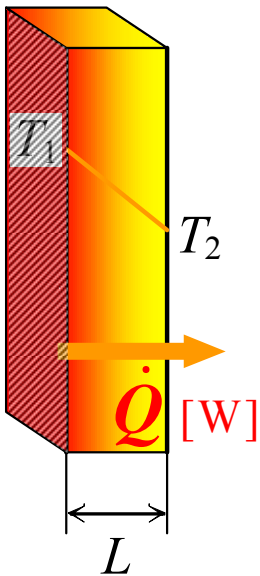
$$\text{熱流量} = \frac{\text{温度差}}{\text{熱抵抗}} \Rightarrow \dot{Q} = \frac{T_1 - T_2}{R}$$



熱抵抗とは？

熱流量 = $\frac{\text{温度差}}{\text{熱抵抗}} \Rightarrow \dot{Q} = \frac{T_1 - T_2}{R}$

熱伝導の場合



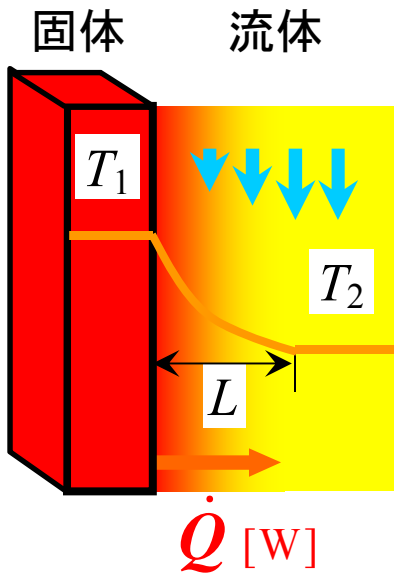
熱抵抗： $R = \frac{L}{k A}$

L : 長さ
 A : 断面積
 k : 物質の熱伝導率

物質の形状 (L, A) と種類 (k) で決まる.

物質	k (W/m·K)
銅	400
鉄	80
空気(常温)	0.026

熱伝達(固体-流体間)の場合



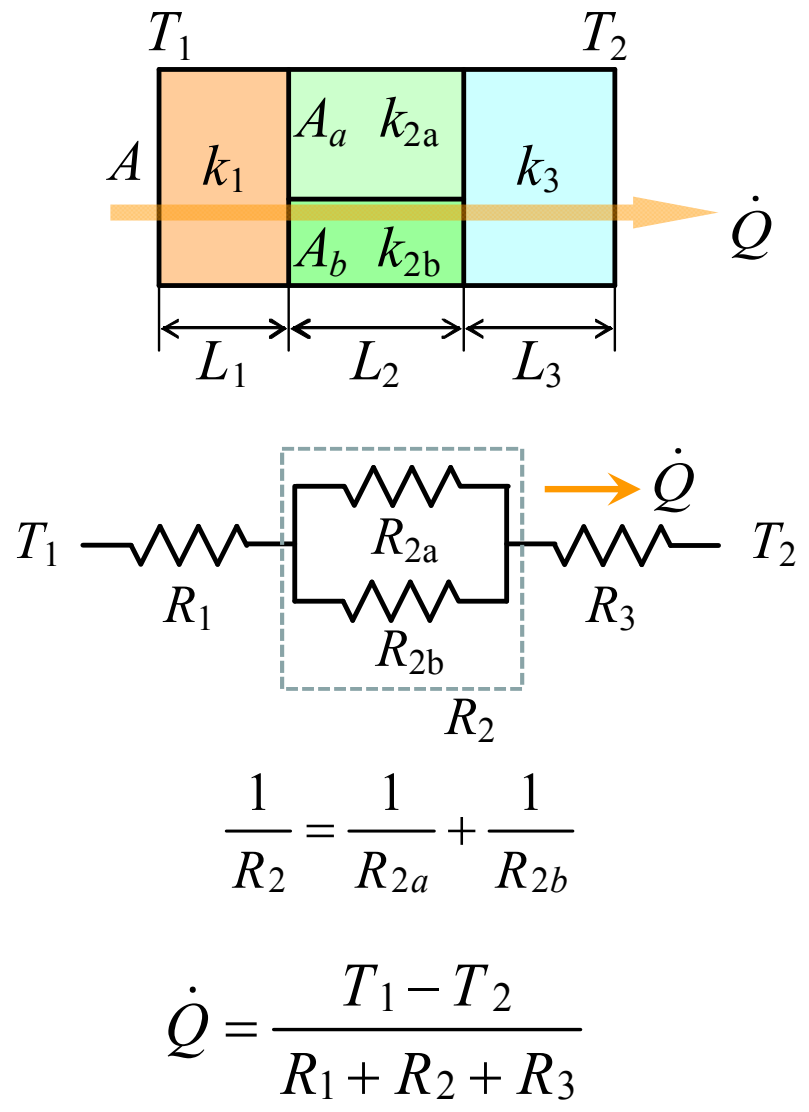
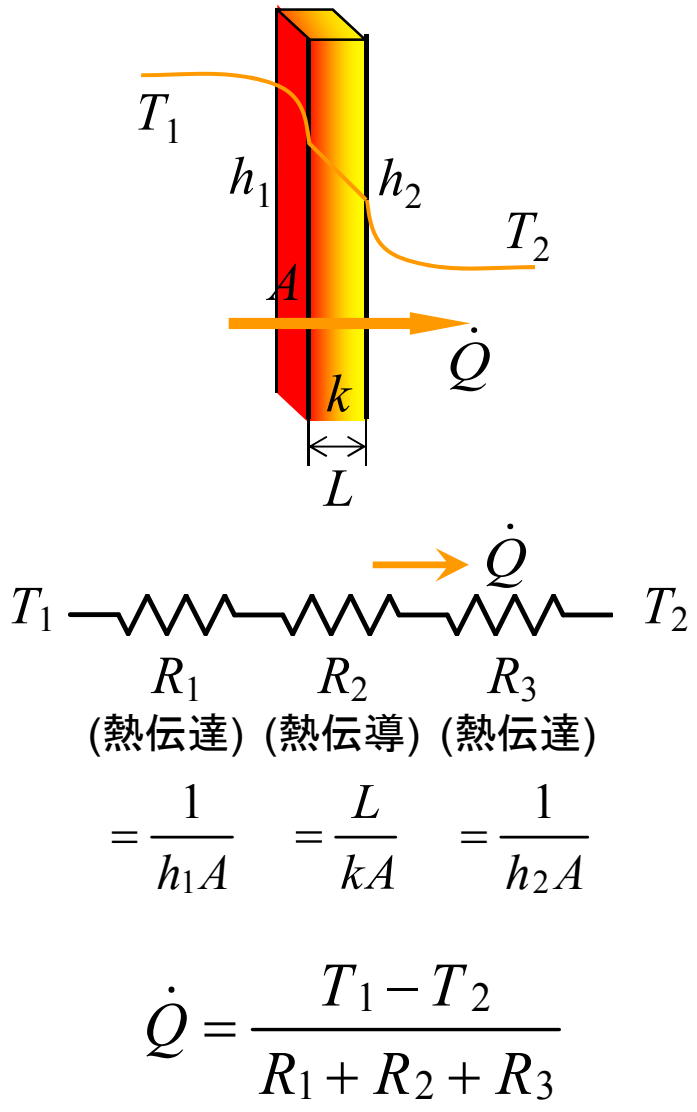
熱抵抗： $R = \frac{1}{h A}$

A : 表面積
 h : 熱伝達率

固体の表面積 (A) と
 流体の種類・流動状態 (h) で決まる.

流体の種類 / 状態	熱伝達率 h (W/m ² K)
気体 / 強制対流	20 ~ 500
液体 / 強制対流	300 ~ 10000
沸騰・凝縮	3000 ~ 100000

熱抵抗網 (定常)



熱と電気の相違点

電気抵抗

$$R = \frac{L}{A} \quad [\Omega]$$

比電気抵抗

$$\rho \quad [\Omega\text{m}] =$$

1.47×10^{-8} (銀)
 $> 10^{16}$ (石英ガラス)

20桁以上変化



制御 (ON/OFF) が容易
(超電導や完全絶縁も可能)

熱抵抗

$$R = \frac{1}{k} \frac{L}{A} \quad [\text{K/W}]$$

熱伝導率

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

427 (銀)
0.026 (空気)

4桁程度しか変化しない

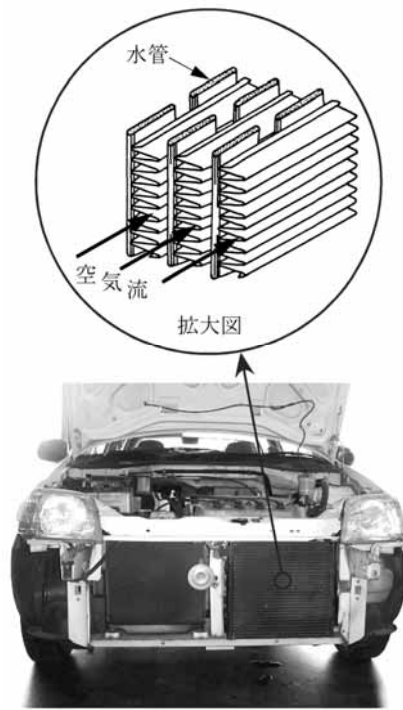


制御 (ON/OFF) が困難
熱移動を制御する技術が重要

多くの熱を移動させるには？

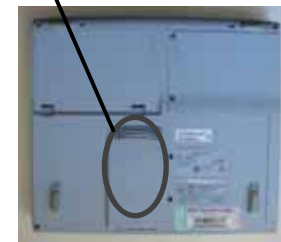
$$\dot{Q} = \frac{T_1 - T_2}{R}$$

与えられた温度差 $T_1 - T_2$ のもとで熱流量 \dot{Q} を大きくしたい時は、熱抵抗 R を小さくする。



自動車用ラジエータ

(JSMEテキストシリーズ「伝熱工学」より)

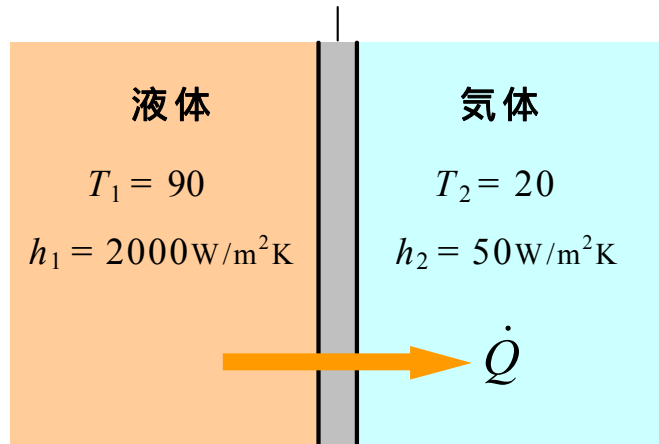


背面

パソコンのチップ冷却

拡大伝熱面（フィン）

固体壁
 $A = 100 \text{ cm}^2, k = 100 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K}), L = 1 \text{ mm}$



$$R_1 = \frac{1}{h_1 A} = \frac{1}{2000 \cdot 100} = 0.05$$

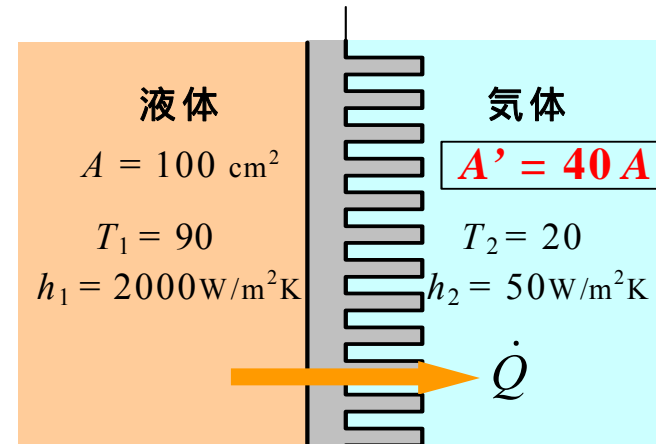
$$R_2 = \frac{L}{k A} = \frac{1}{100 \cdot 100} = 0.001$$

$$R_3 = \frac{1}{h_2 A} = \frac{1}{50 \cdot 100} = 2$$

$$= 2.051 \text{ (K/W)}$$

気体側の熱抵抗 R_3 が支配的

固体壁
 $k = 100 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K}), L = 1 \text{ mm}$



$$R_1 = \frac{1}{h_1 A} = \frac{1}{2000 \cdot 100} = 0.05$$

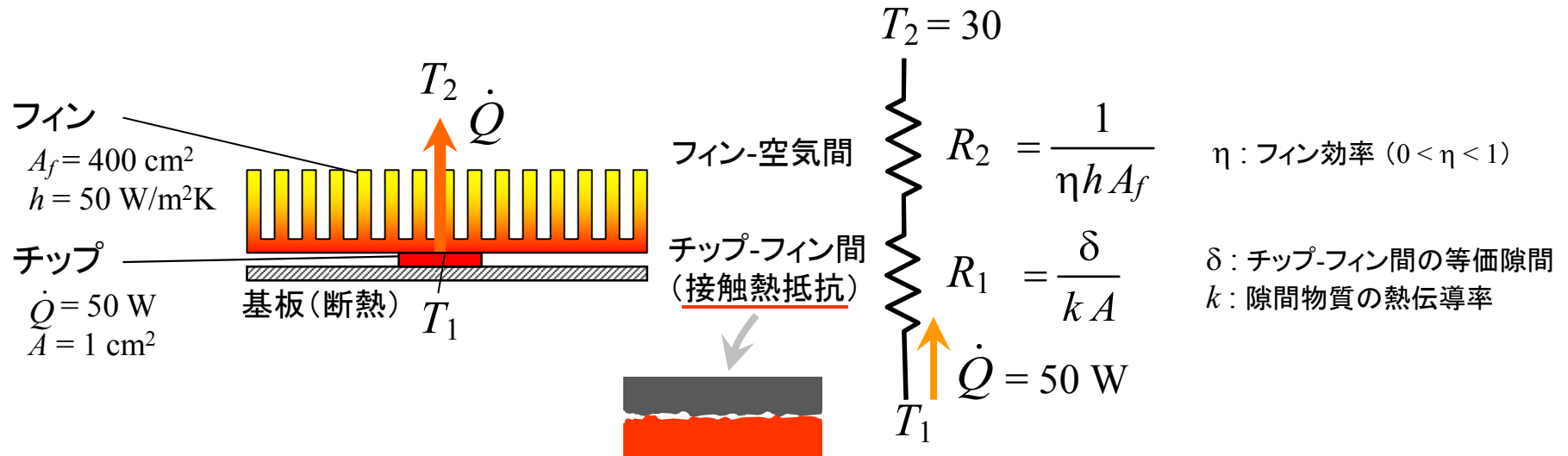
$$R_2 = \frac{L}{k A} = \frac{1}{100 \cdot 100} = 0.001$$

$$R_3' = \frac{1}{h_2 A'} = \frac{1}{50 \cdot 4000} = 0.05$$

$$= 0.101 \text{ (K/W)}$$

気体側の表面積を増やすと効果的

発熱チップからの放熱



$$\dot{Q} = \frac{T_1 - T_2}{R_1 + R_2} \Rightarrow T_1 (\text{チップ温度}) = \dot{Q}(R_1 + R_2) + T_2 \quad R_2 = \frac{1}{\eta h A_f} = 1 \text{ (K/W)} \quad \eta = 0.5 \text{ の場合}$$

- チップ-フィン間の隙間 ($\delta = 5 \mu\text{m}$) が空気 ($k \approx 0.03 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$) の場合

$$R_1 = \frac{\delta}{k A} = 1.7 \text{ (K/W)} \Rightarrow T_1 = 165$$

- チップ-フィン間の隙間 ($\delta = 5 \mu\text{m}$) を $k = 1 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ のグリスで充填した場合

$$R_1 = \frac{\delta}{k A} = 0.05 \text{ (K/W)} \Rightarrow \underline{T_1 = 82.5}$$

熱伝達率 を高める方法

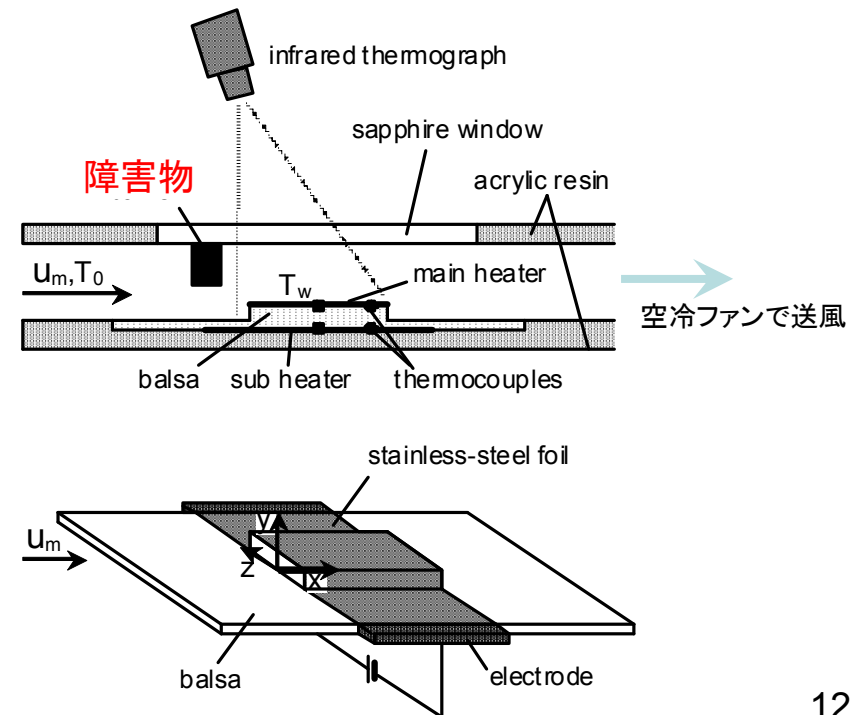
流体の種類 / 状態	熱伝達率 h (W/m ² K)
気体 / 強制対流	20 ~ 500
液体 / 強制対流	300 ~ 10000
沸騰・凝縮	3000 ~ 100000

$$\text{熱伝達の熱抵抗} : \frac{1}{hA}$$

- ・ 流速を高める
- ・ 流れを乱流化する
- ・ 流れのはく離・再付着の利用

事例（薄型流路内の伝熱促進）

ノートPCを模擬した薄型流路内に
発熱チップを模擬した加熱ブロックを
設置し、その伝熱促進を試みた実験

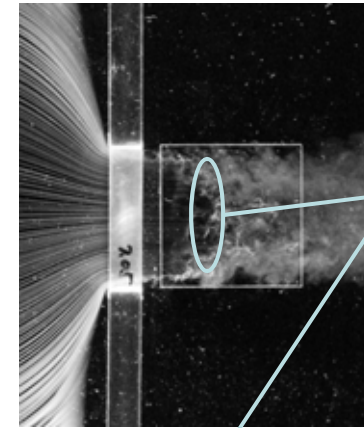
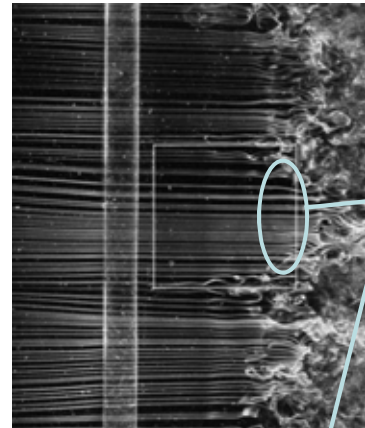
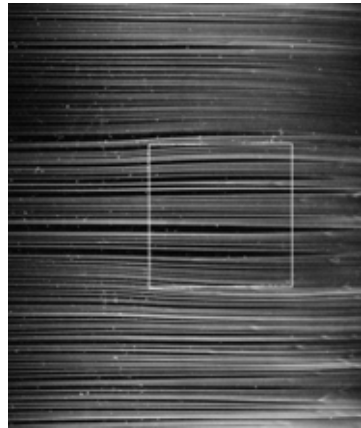


障害物なし

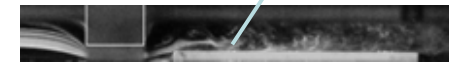
2D障害物(乱流化)

3D障害物(はく離・再付着)

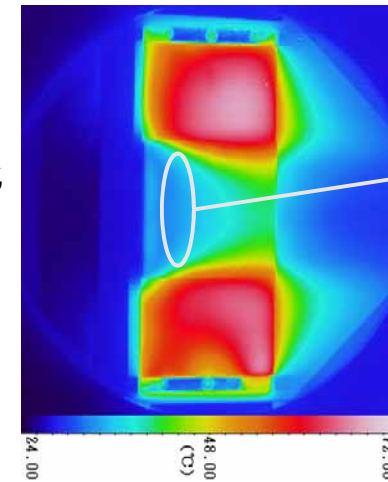
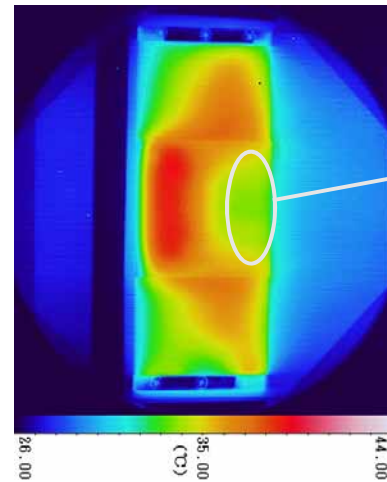
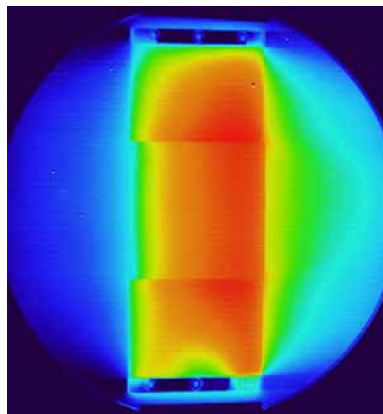
上面からの可視化



断面の可視化



温度分布



加熱熱流束

$$\dot{q}_{gen} = 277 \text{ W/m}^2$$

$$\dot{q}_{gen} = 310 \text{ W/m}^2$$

$$\dot{q}_{gen} = 1495 \text{ W/m}^2$$

平均熱伝達率

$$\bar{h} = 18.7 \text{ W/m}^2\text{K}$$

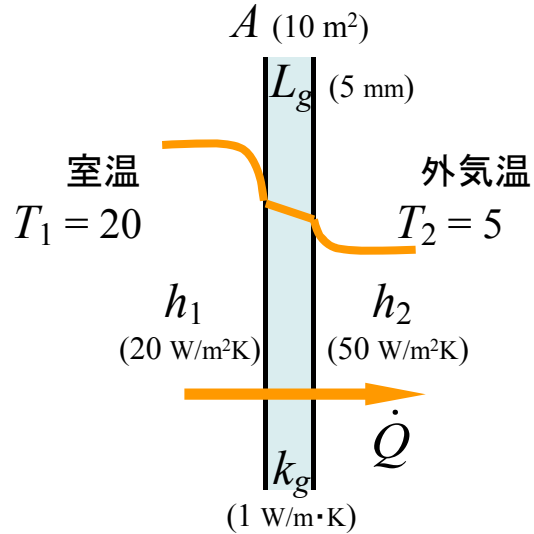
$$\bar{h} = 22.1 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\bar{h} = 76.1 \text{ W/m}^2\text{K}$$

熱を移動させたくない場合

→ 熱抵抗を大きくする

単板ガラス

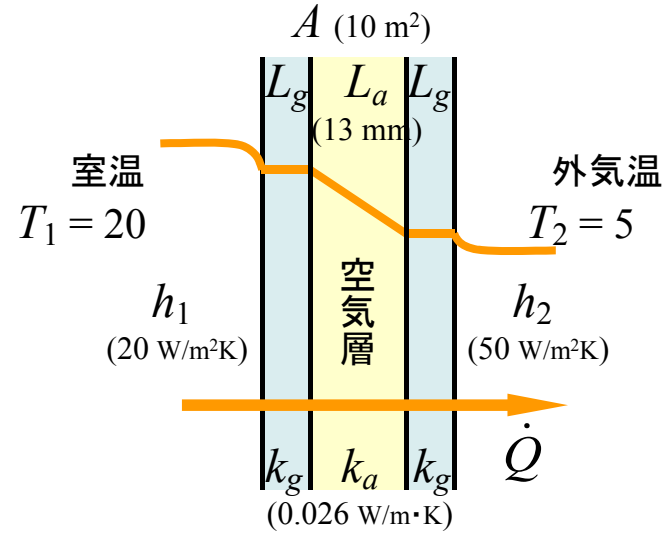


$$R_1 = \frac{1}{h_1 A} \quad R_2 = \frac{L_g}{k_g A} \quad R_3 = \frac{1}{h_2 A}$$

$$5 \times 10^{-3} + 5 \times 10^{-4} + 2 \times 10^{-3} = 0.0075 \text{ (K/W)}$$

$$\dot{Q} = \frac{T_1 - T_2}{R_1 + R_2 + R_3} = 2000 \text{ (W)}$$

二重サッシ



$$R_1 = \frac{1}{h_1 A} \quad R_{2g} = \frac{L_g}{k_g A} \quad R_{2a} = \frac{L_a}{k_a A} \quad R_{2g} = \frac{L_g}{k_g A} \quad R_3 = \frac{1}{h_2 A}$$

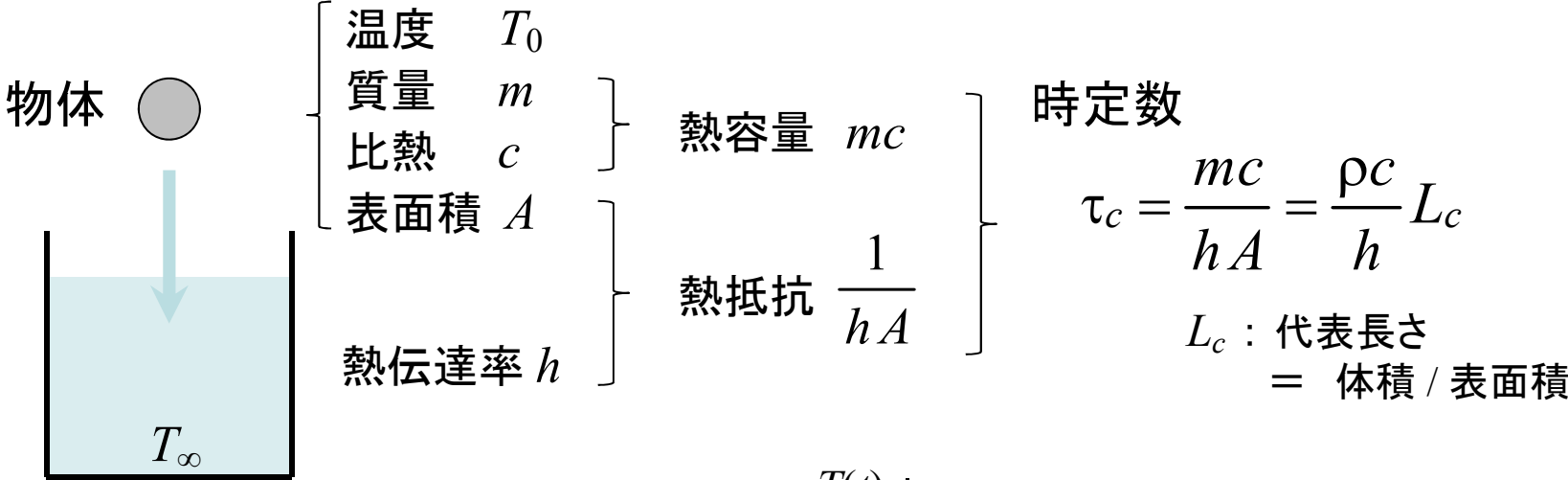
$$5 \times 10^{-3} + 5 \times 10^{-4} + \underline{5 \times 10^{-2}} + 5 \times 10^{-4} + 2 \times 10^{-3} = 0.058 \text{ (K/W)}$$

$$\dot{Q} = \frac{T_1 - T_2}{R_1 + 2R_{2g} + R_{2a} + R_3} = 259 \text{ (W)}$$

速く冷ます(暖める)には？

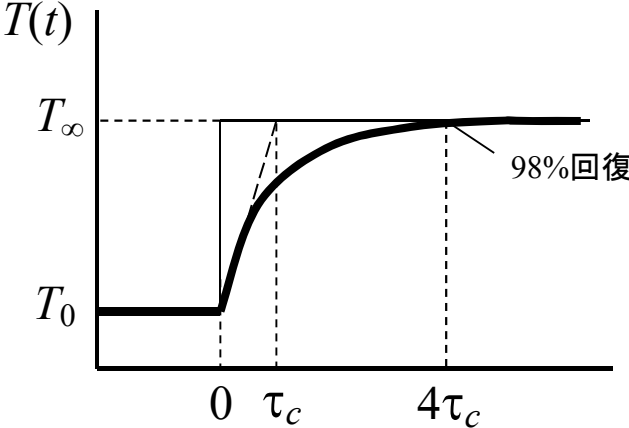
時定数 = 熱容量 × 熱抵抗

物体内の温度が一様の場合



時刻 t における物体温度を $T(t)$ とすると
(物体内の温度は一様と仮定)

$$\frac{T(t) - T_0}{T_\infty - T_0} = 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_c}\right)$$



電気回路との相似性

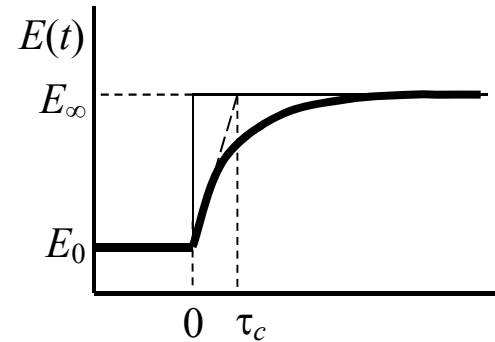
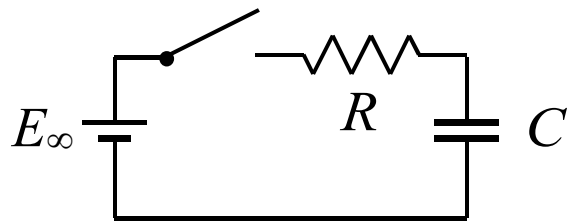
$$\text{時間} = \text{容量} \times \text{抵抗}$$

熱の場合

$$\text{時定数} = \text{熱容量} \times \text{熱抵抗}$$
$$\tau_c \quad mc \quad \frac{1}{hA}$$

電気の場合

$$\text{時定数} = \text{静電容量} \times \text{電気抵抗}$$
$$\tau_c \quad C \quad R$$



時定数

時定数 = 熱容量 × 熱抵抗

$$\tau_c = mc \frac{1}{hA}$$

温度を速く変化させたい時は、熱容量および熱抵抗を小さくする。

温度変化する物体	流体 (流速 m/s)	熱伝達率 h (W/m ² K)	時定数 τ_c (s)	98% 回復 $4\tau_c$ (s)
パチンコ玉 直径 11 mm 質量 5.5 g	空気 (1.4 m/s)	45	150	600
	水 (0.09 m/s)	2000	3.4	14
熱電対接点 直径 0.5 mm 質量 0.5 mg	空気 (1.4 m/s)	290	1.1	4.3
	水 (0.09 m/s)	11000	0.028	0.11

ビオ数との関係

$$\text{ビオ数 } Bi = \frac{R_{(\text{熱伝導})}}{R_{(\text{熱伝達})}} = \frac{(L/kA)}{(1/hA)} \rightarrow \frac{hL_c}{k} \quad \begin{array}{l} L_c : \text{代表長さ} \\ = \text{体積} / \text{表面積} \end{array}$$

$Bi \ll 1$ ($Bi < 0.1$) の場合、
物体内の温度は一様と
みなせる。

例) 小さな金属物体

$$\text{時定数 } \tau_c = \frac{\rho c}{h} L_c \propto \frac{L_c}{h}$$



冷却(加熱)時間は、
およそ物体の大きさ L_c の
1.5乗に比例する

$Bi \gg 1$ ($Bi > 10$) の場合、
物体表面と内部には大きな
温度差が生じる。

例) 食品の加熱・冷却

$$\text{所要時間 } t \propto \frac{L_c^2}{\alpha} F_o \propto L_c^2$$

F_o : フーリエ数
 α : 熱拡散率



冷却(加熱)時間は、
およそ物体の大きさ L_c の
2乗に比例する

ま と め

1. 与えられた温度差のもとで熱を多く移動させたい時は、熱抵抗を小さくする。

熱抵抗網に置き換えて考えると理解しやすい

2. 温度を速く変化させたい時は、熱容量および熱抵抗を小さくする。