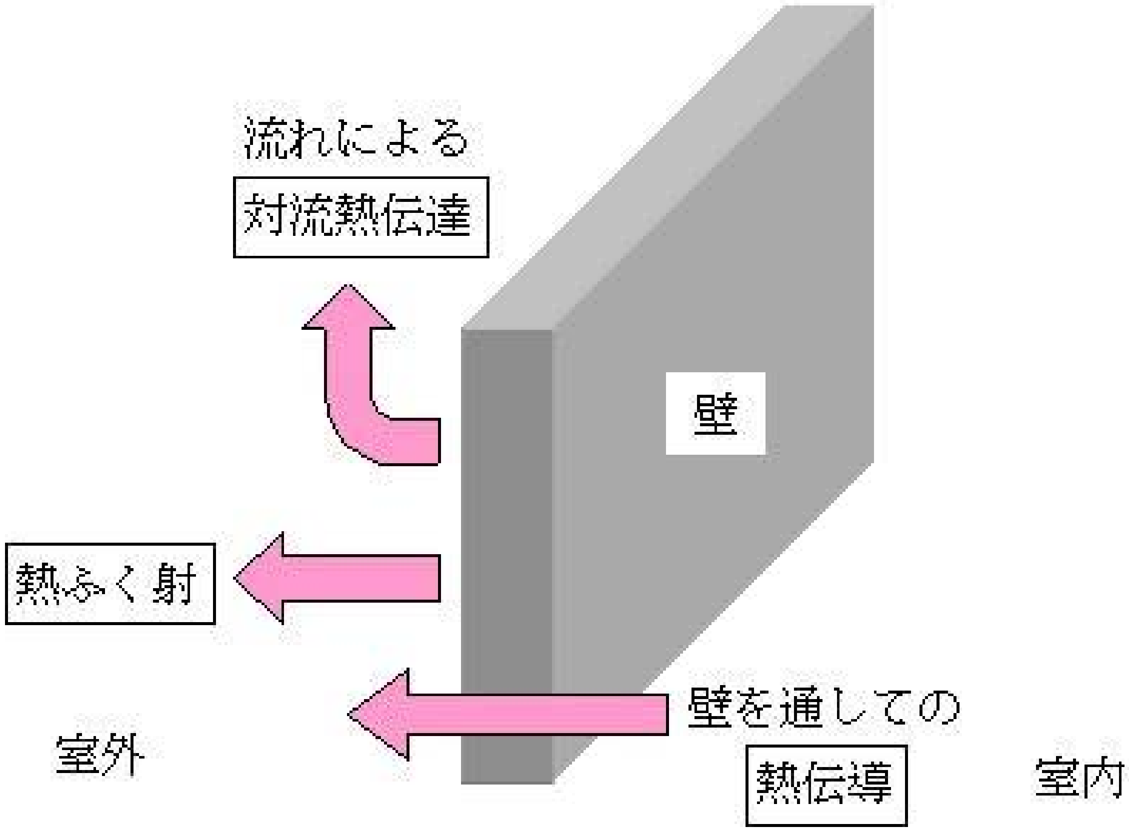
伝熱の基本3形態

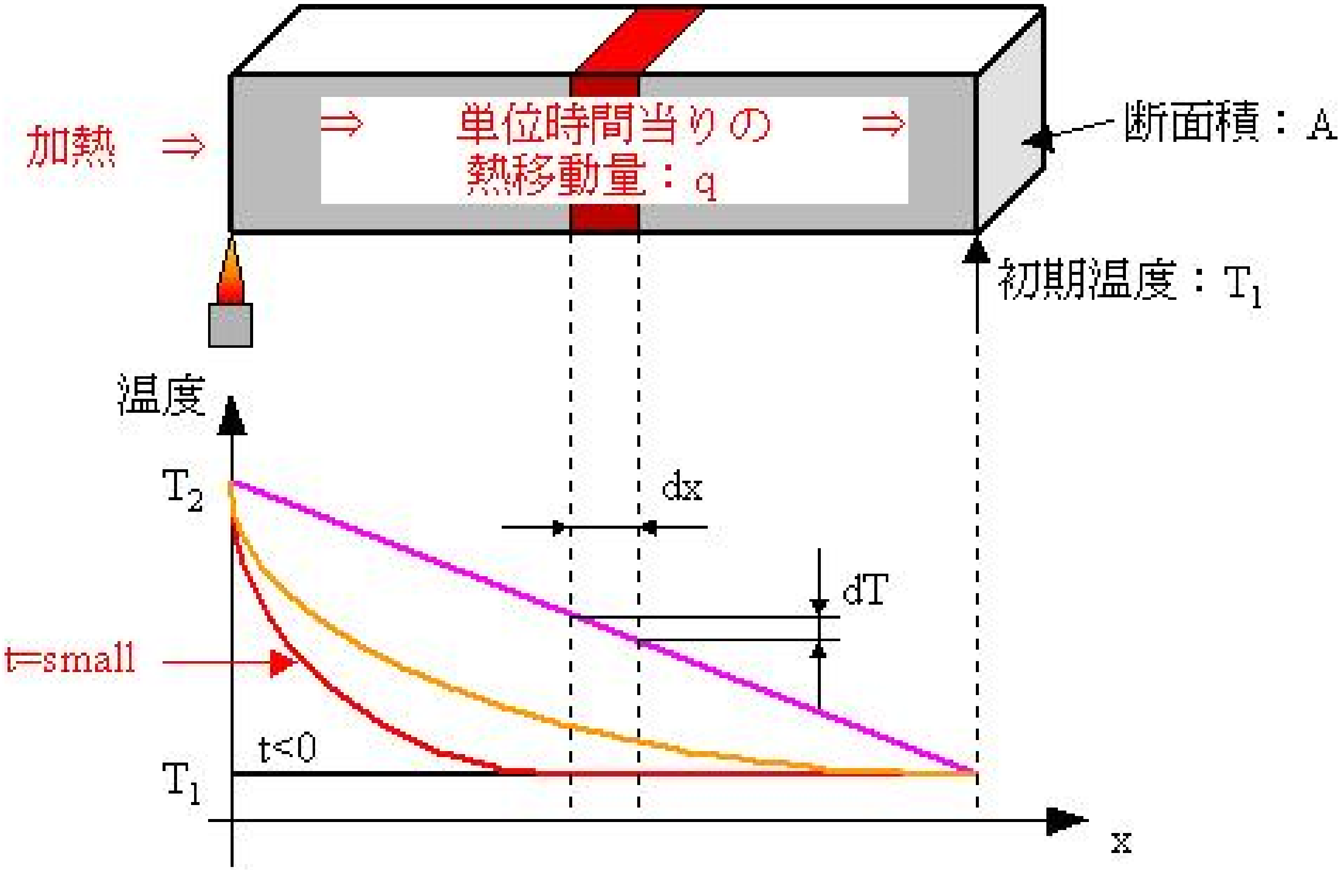
- ●**熱伝導**
  Heat conduction
- ●**熱伝達**
  Heat transfer
- ●**熱輻射**
  Thermal radiation



講義内容

- 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

熱伝導(Heat conduction)



フーリエの法則（Fourier's Law）

- 実験的な事実：

（熱移動量）∝（温度勾配）

$$\frac{Q}{A} \propto \frac{dT}{dx}$$

$$移動熱量：Q(W)$$
$$断面積：A(m^2)$$
$$熱流束：q = Q/A(W/m^2)$$

- 比例定数 k を導入すると、

$$\boxed{\frac{Q}{A} = -k\frac{dT}{dx}}$$

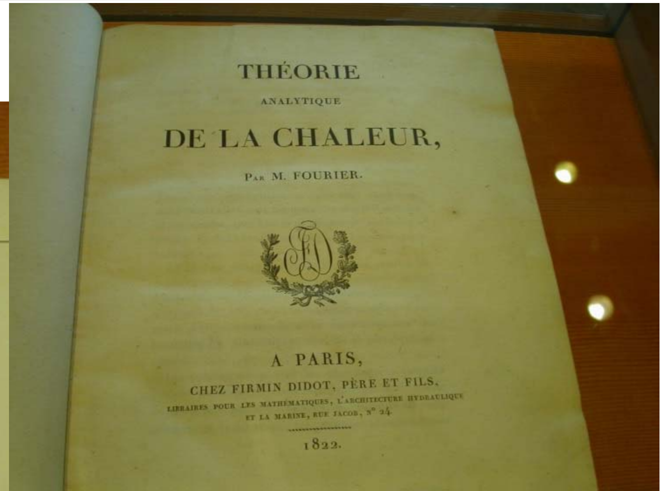
フーリエの法則（Fourier's Law）

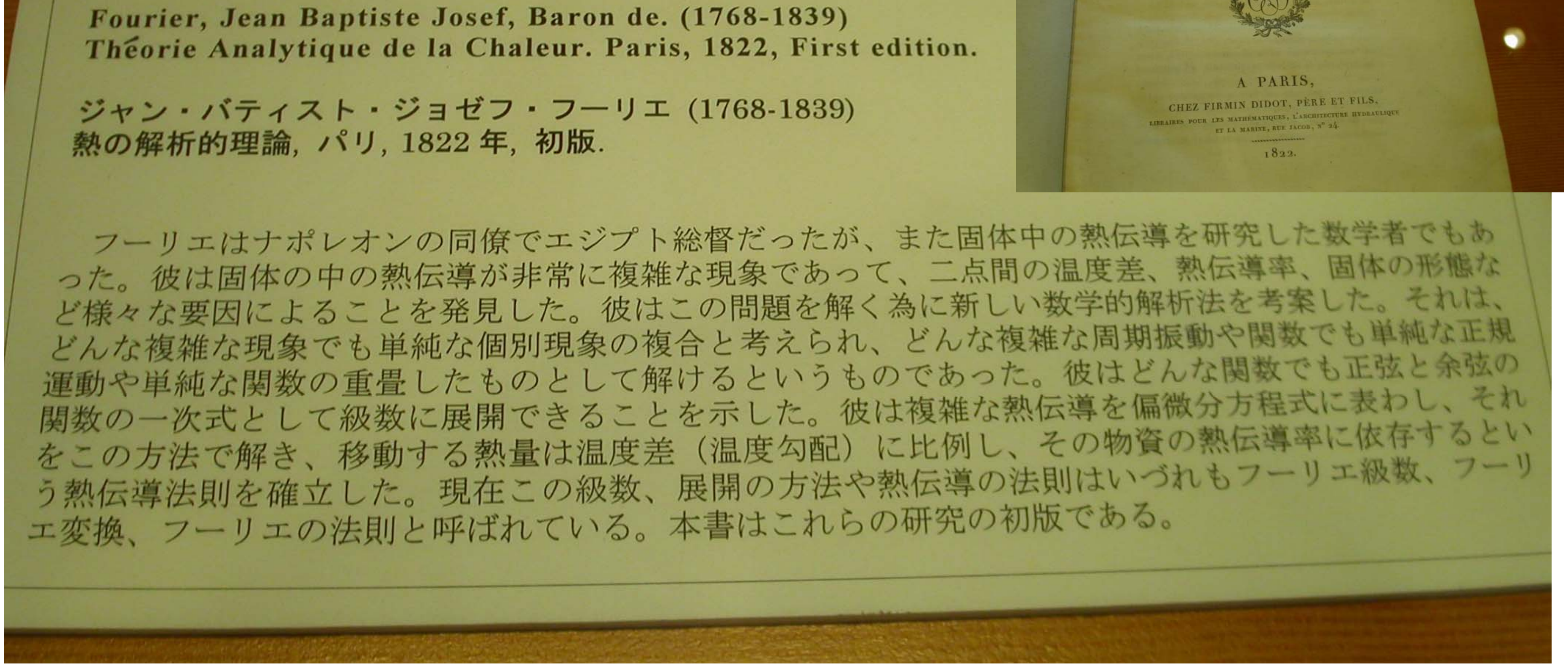
- ここで、

k：***熱伝導率*** $[W/m \cdot K]$ or $[kcal/m \cdot hr \cdot {}^\circ C]$

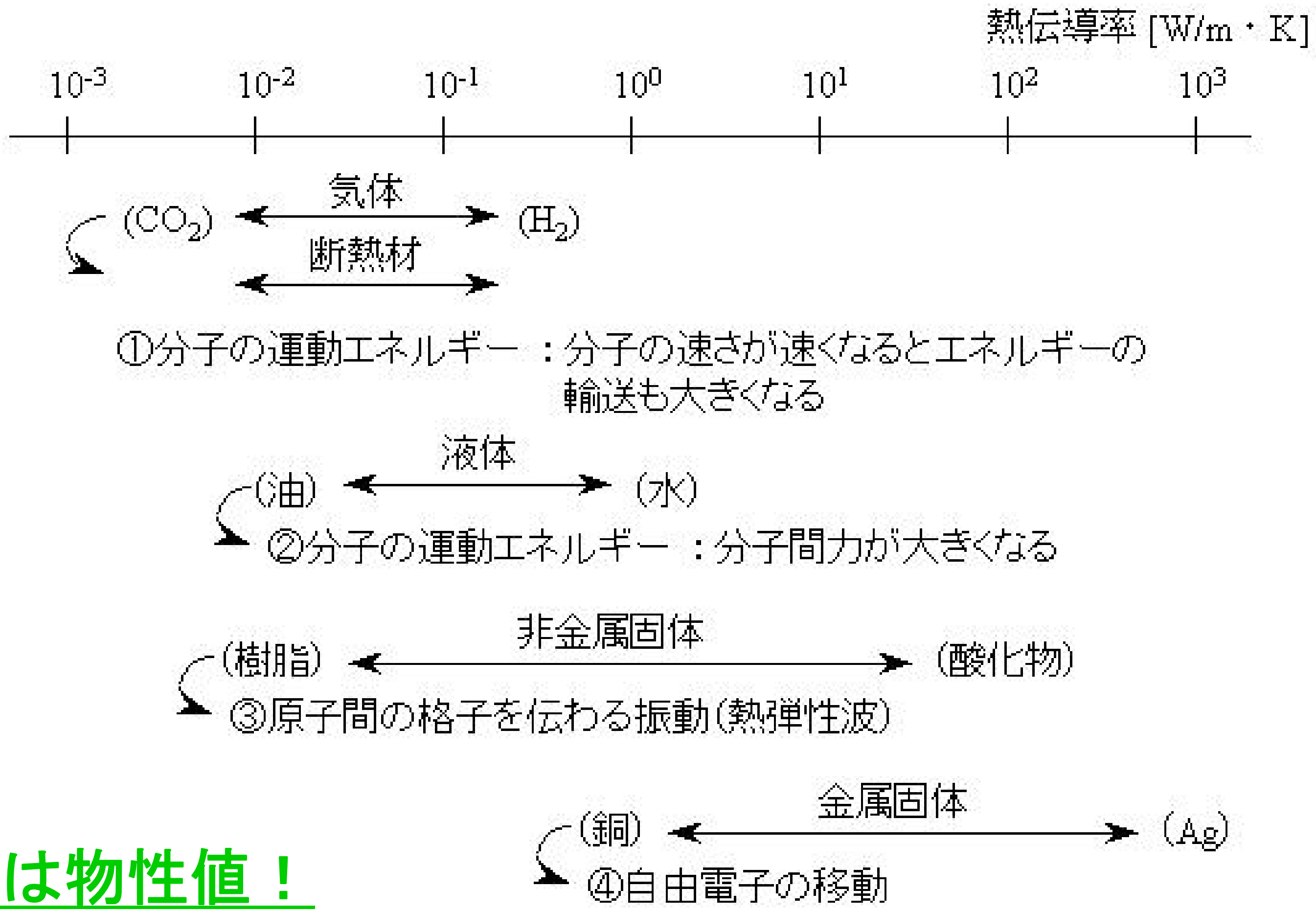
- k →大：　物体内での熱移動能力→大

ジャン・バティスト・ジョセフ・フーリエ(1968−1839)



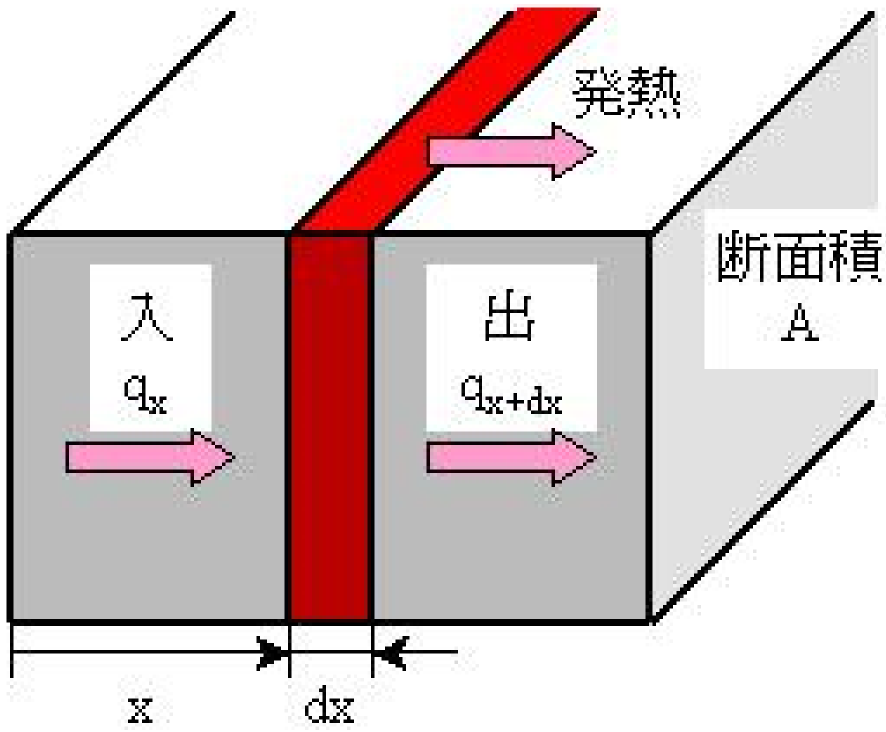


熱伝導率と熱伝導の物理的機構



熱伝導率は物性値！

熱伝導の一般化

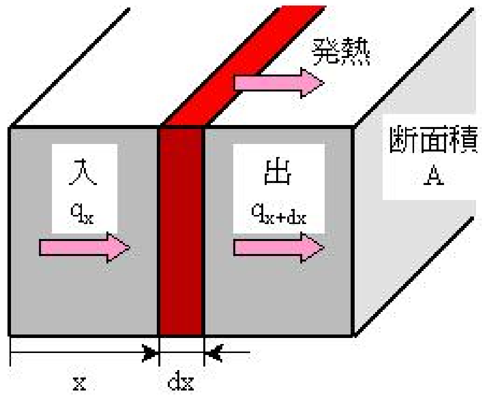


単位体積当りの発熱量：$\dot{q}$

比熱： c [J/kg･K]

密度： ρ [kg/m^3]

熱伝導方程式の導出



斜線の要素内でのエネルギー収支を考える。

（左面から熱伝導で流入する熱量）＋（要素内で発生した熱量）

＝（右面から熱伝導で流出する熱量）＋（要素内のエネルギー変化）

左の面から流入する熱量： $Q_x = -kA\left.\frac{dT}{dx}\right|_x$

要素内で発生した熱量： $Q_{gen} = \dot{q}Adx$

右の面から流出する熱量： $Q_{x+dx} = -kA\left.\frac{dT}{dx}\right|_{x+dx}$

内部のエネルギー変化： $\frac{\partial}{\partial \tau}\left(\rho Adx \cdot c \cdot T\right)$

$$\left\{-kA\frac{dT}{dx}\right\}+\left\{\dot{q}Adx\right\}=\left\{-kA\frac{dT}{dx}-A\frac{\partial}{\partial x}\left\{-k\frac{\partial T}{\partial x}\right\}dx\right\}+\rho cA\frac{\partial T}{\partial \tau}dx$$

Taylor 展開

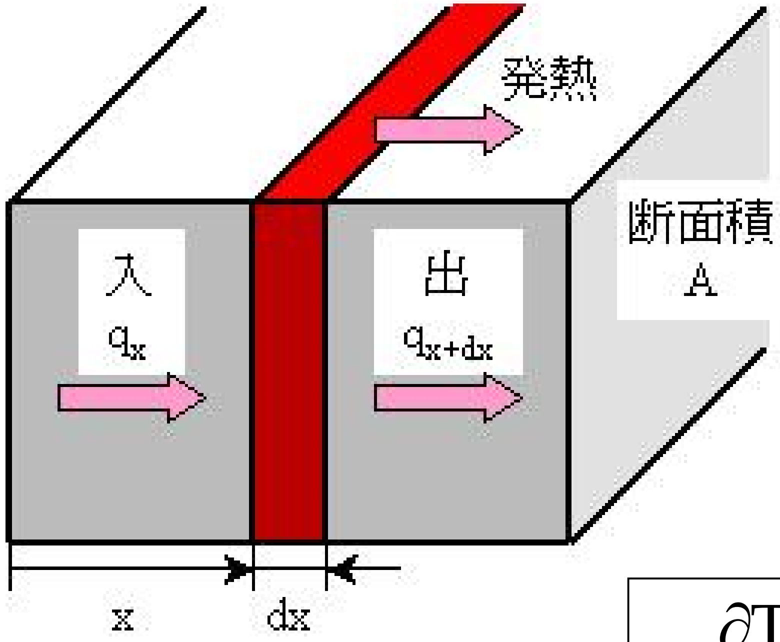
$$f(x+dx)=\sum\frac{f^{(n)}(x)}{n!}(dx)^n = f(x)+\frac{dx}{1!}f'(x)+\cdots$$

より

$$Q_{x+dx} = -kA\left.\frac{dT}{dx}\right|_{x+dx}$$

$$= -kA\left.\frac{dT}{dx}\right|_{x} + \frac{\partial}{\partial x}\left\{-kA\frac{\partial T}{\partial x}\right\}dx$$

一次元熱伝導方程式



単位体積当りの発熱量：$\dot{q}$

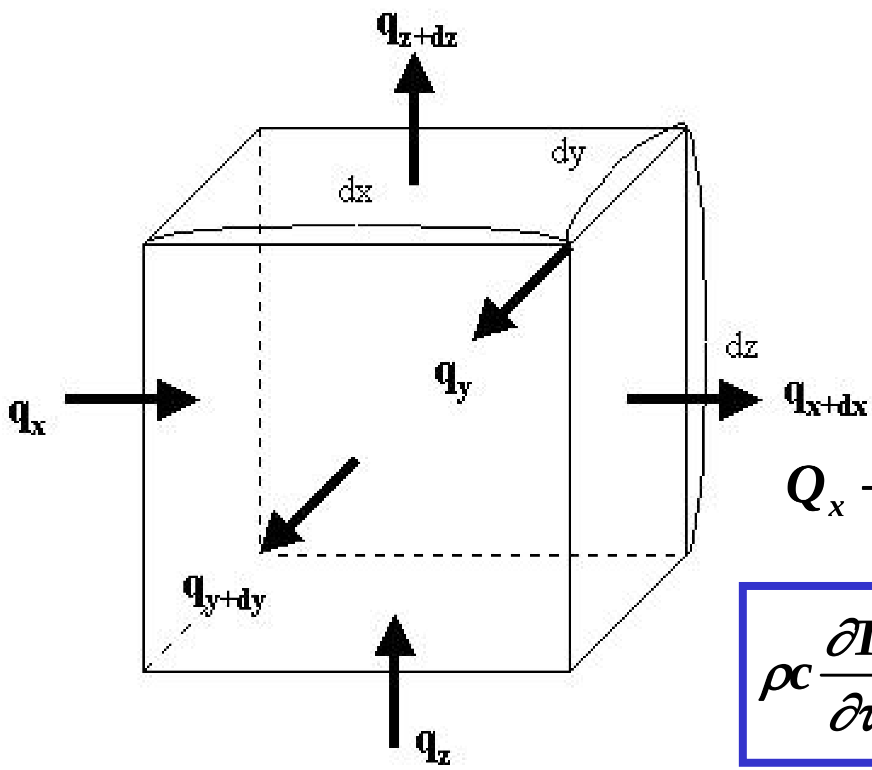
比熱：c [J/kg･K]

密度：ρ [kg/m^3]

$$\boxed{\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}\left\{ k \frac{\partial T}{\partial x} \right\} + \dot{q}}$$

様々な初期条件、境界条件下で、要素内の温度分布温度変化を予測することができる。

三次元熱伝導方程式



熱発生: $Q_{gen} = dxdydz \cdot \dot{q}$

物体内部のエネルギー変化:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho dxdydz \cdot cT\right) = \frac{\partial E}{\partial \tau}$$

エネルギーバランスの関係:

$$Q_x + Q_y + Q_z + Q_{gen} = Q_{x+dx} + Q_{y+dy} + Q_{z+dz} + \frac{\partial E}{\partial \tau}$$

$$\boxed{\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right) + \dot{q}}$$

三次元熱伝導方程式

各座標系における熱伝導方程式

- 熱伝導率が一定とした場合、(ρc :熱容量)
  温度伝導率(Thermal Diffusivity): $\alpha = k/\rho c$ [m2/s]とすると、
- 直交座標系:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) + \frac{\dot{q}}{\rho c}$$

- 円筒座標:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha\left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) + \frac{\dot{q}}{\rho c}$$

- 球座標:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha\left(\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2}{\partial r^2}\left(r^2 T\right) + \frac{1}{r^2 \sin\theta}\frac{\partial}{\partial \theta}\left(\sin\theta \frac{\partial T}{\partial \theta}\right) + \frac{1}{r^2 \sin^2\theta}\frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2}\right) + \frac{\dot{q}}{\rho c}$$

熱伝導方程式の変形

- 非定常一次元熱伝導方程式

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r^n}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^n k \frac{\partial T}{\partial r} \right) + q$$

n=0：平板座標系
n=1：円筒座標系
n=2：球座標系

- 定常二次元熱伝導方程式

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0$$

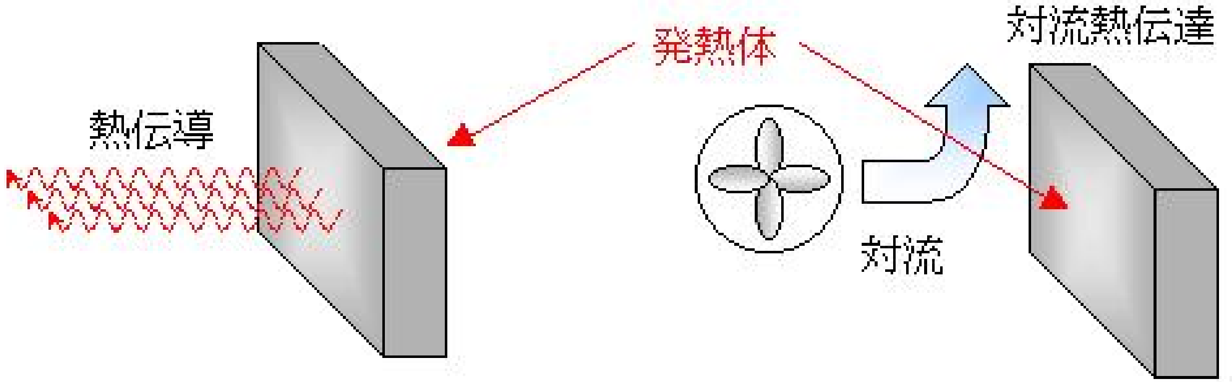
- 非定常一次元熱伝導方程式（発熱なし）

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

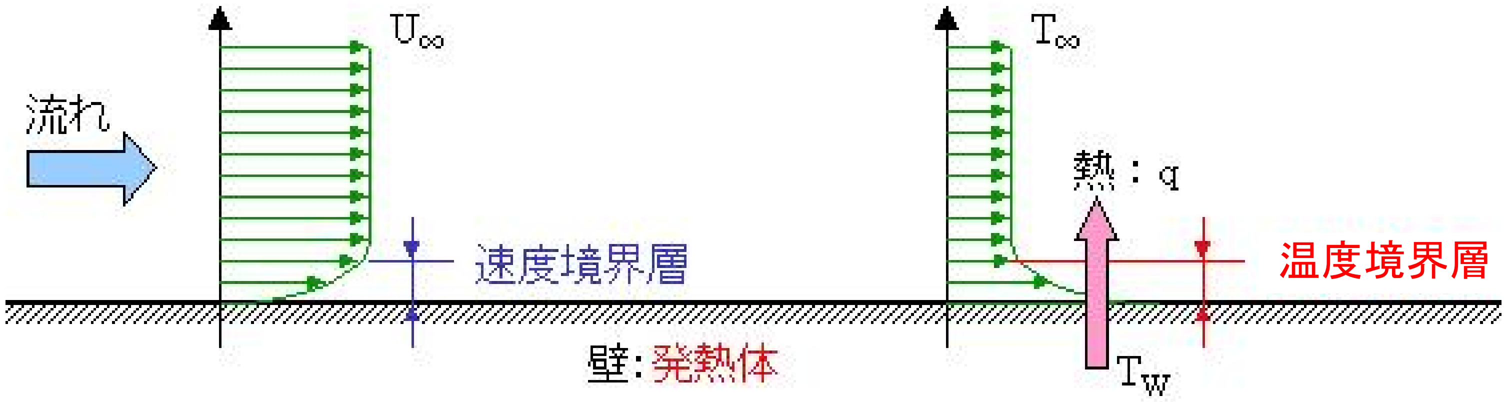
- 定常一次元熱伝導方程式（発熱あり）

$$\frac{1}{r^n}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^n \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + q''' = 0$$

対流熱伝達(Heat transfer)



高温発熱体表面を流れる空気の流速によって熱移動が異なる！ ➡ **なぜ？**



ニュートンの冷却則（Newton’s law of cooling）

実験的な事実：（熱移動量）∝（温度差）

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

比例定数を h とすると、

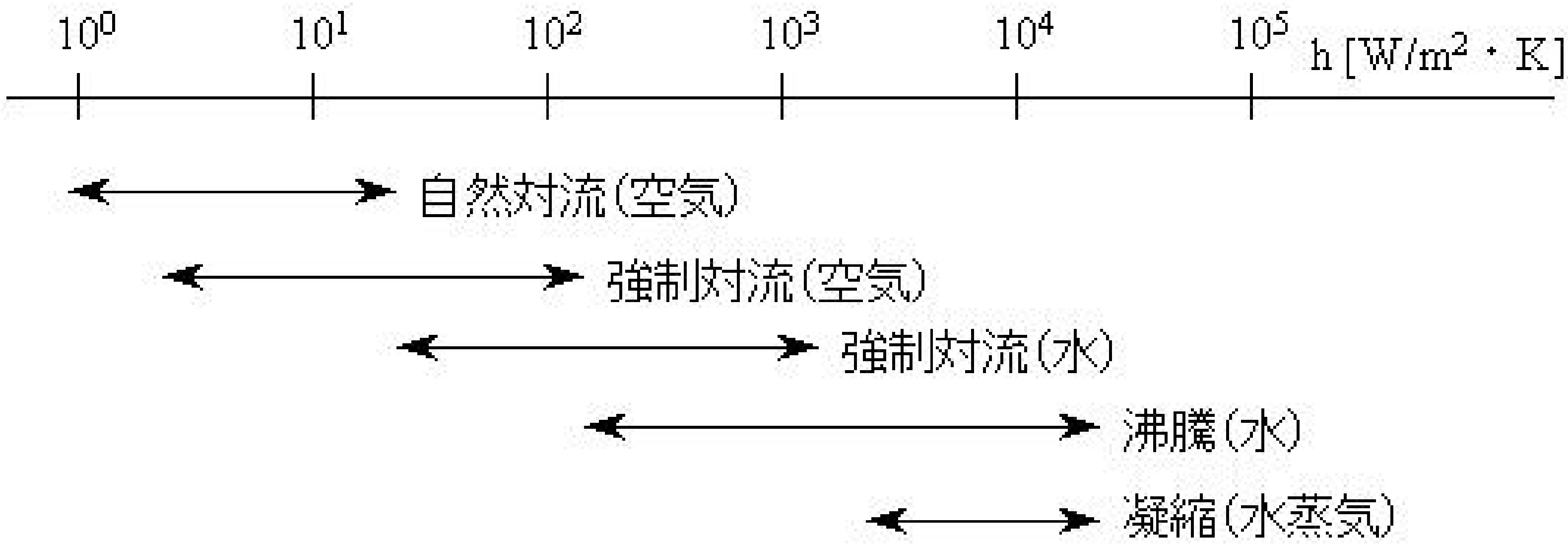
$$\boxed{q = \frac{Q}{A} = h\left(T_w - T_\infty\right)}$$

ニュートンの冷却則（Newton’s law of cooling）

ここで、h $\left[W/m^2 \cdot K\right]$ は、***<u>熱伝達率</u>*** と呼ばれる。

h →大： <u>流体と物体間</u>の熱移動能力→大

熱伝達率



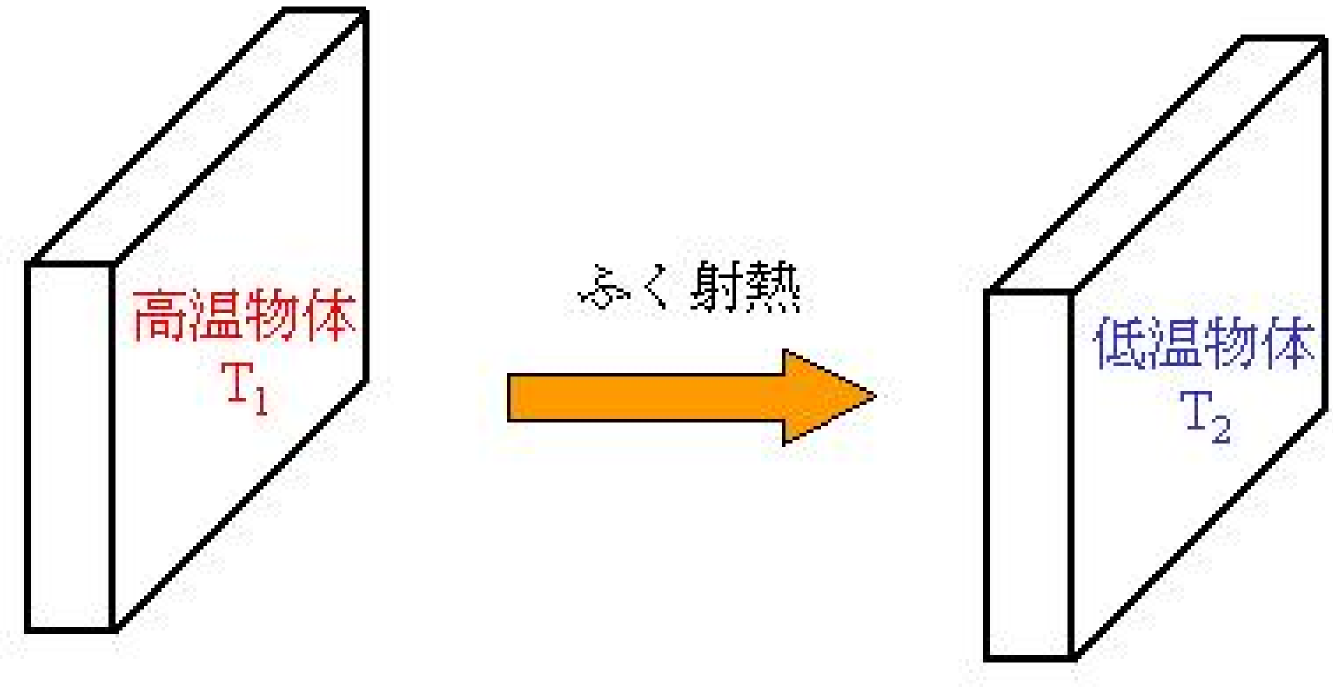
熱伝達率は物性値ではない！

流速、圧力、表面形状によって変化する

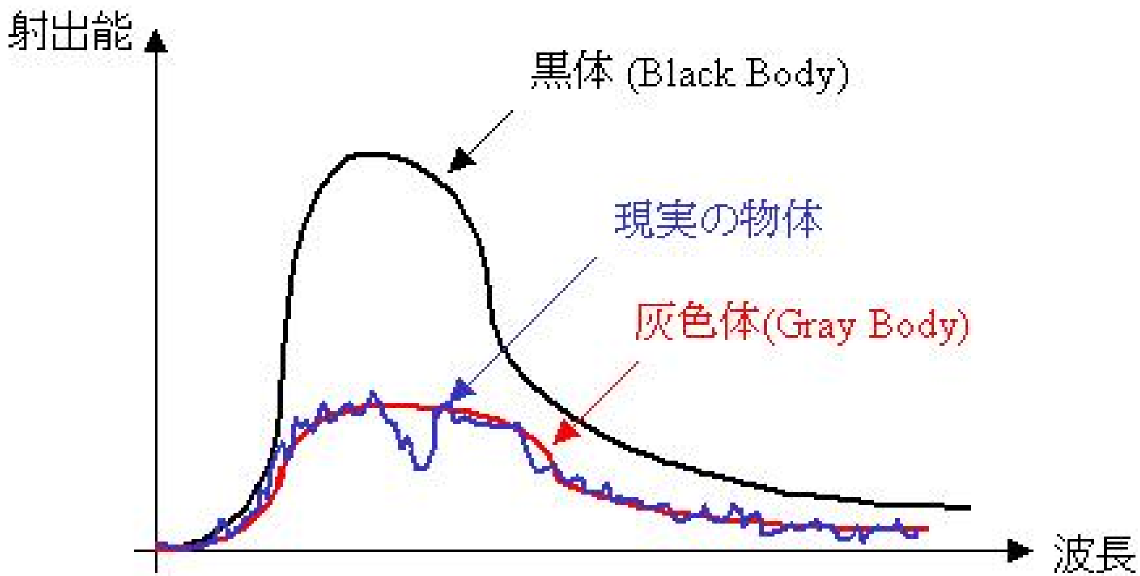
熱輻射／輻射伝熱(Thermal radiation)

電磁波によるエネルギー伝播のうち、
温度差に基づいて生じる熱移動。

真空中でも熱移動できる



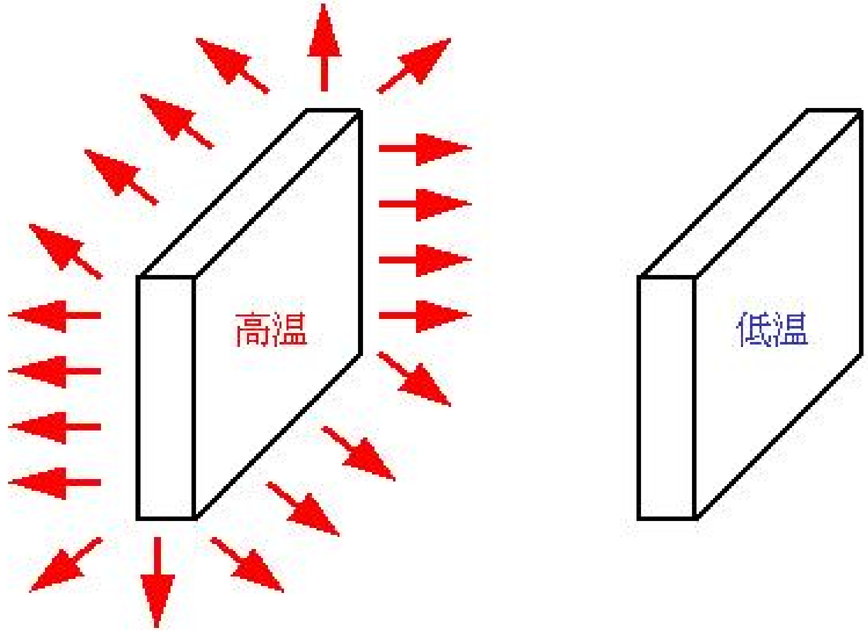
ステファン—ボルツマン則（Stephan-Boltzman’s law）



$$\frac{Q}{A} = \sigma\left(T_1^4 - T_2^4\right) \quad \sigma = 5.669 \times 10^8 \quad \left[W/m^2 \cdot K^4\right]$$

ステファン—ボルツマン係数

輻射率と形態係数



$$\boxed{Q = \varepsilon \cdot E_G \cdot \sigma A\left(T_1^{\,4} - T_2^{\,4}\right)}$$

E_G :形態係数(View Factor)

ε :輻射率

空力加熱(1)

オイラーの運動方程式、熱力学の第一法則ならびにエンタルピーの定義式より

$$\frac{u^2}{2} + h = const.$$

理想流体(完全気体、非粘性、相変化なし)に対するエンタルピは、

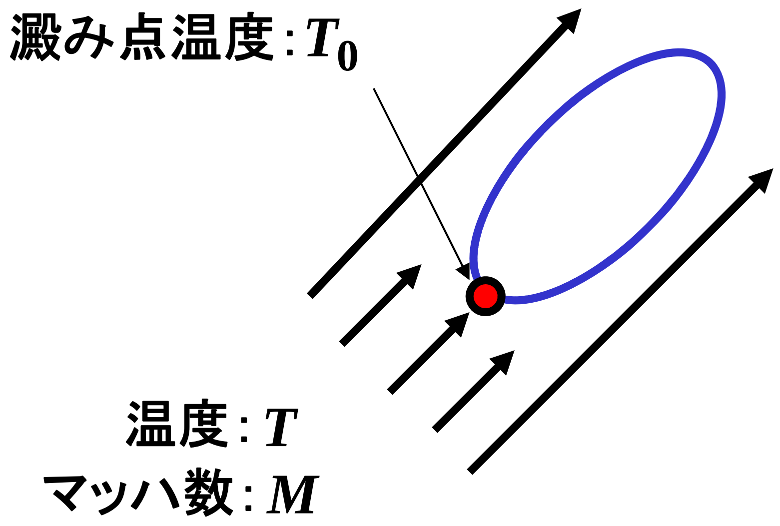
$$h = \frac{\gamma}{\gamma - 1} RT = \frac{\gamma}{\gamma - 1}\frac{P}{\rho}$$

であるから

$$\frac{u^2}{2} + \frac{\gamma}{\gamma - 1} RT = const.$$

速度が0の時の温度を T_0 (全温度あるいは淑み点温度)とすると、

$$\boxed{\frac{u^2}{2} + \frac{\gamma}{\gamma - 1} RT = \frac{\gamma}{\gamma - 1} RT_0}$$



空力加熱(2)

理想流体の音速は、

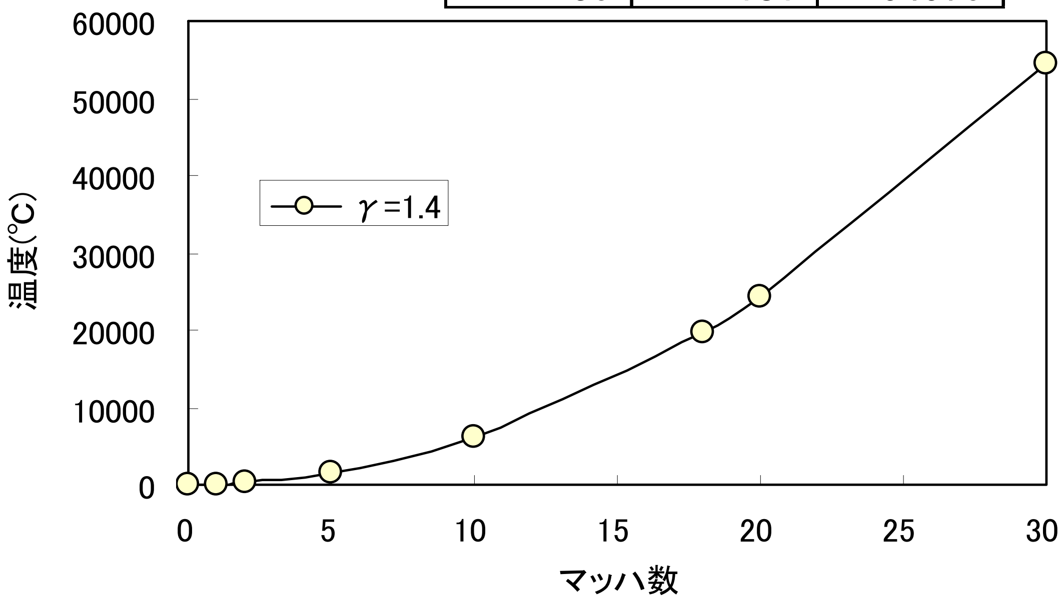
$$c^2 = \gamma \frac{P}{\rho} \gamma RT$$

であるから、マッハ数を、 $M \equiv u/c$
として、澱み点温度は、

$$\boxed{\frac{T_0}{T} = 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2}$$

となる。

M	T0/T	T0=30℃
0	1	30
1	1	91
2	2	272
5	6	1545
10	21	6090
18	66	19664
20	81	24270
30	181	54570



問題1-2

- 熱伝導率の定義を述べよ。
- 対流熱伝達率の定義を述べよ。
- 気体および固体内での熱伝導の機構を説明せよ。
- 対流熱伝達の機構について論じなさい。

フーリエの法則
（Fourier’s Law）

$$\frac{Q}{A} = -k\frac{dT}{dx}$$

問題1-3

- フーリエの法則が成り立つ体系において、熱流束が温度の一価関数であった場合、比例定数を α として、次式が成り立つものとする。

$$-\alpha T = \frac{dT}{dx}$$

- この式の解を、境界条件 $T(x=0)=T_0$ の下で求め、その物理的な意味について考えなさい。

問題1-4

- スペースシャトルが宇宙から地球に帰還する際、再突入時の空力加熱によって、空気の温度は1万度に達し、ノーズキャップや主翼前縁部は1370℃を越えることになる。
- このような過酷な熱環境に耐えるために必要となる伝熱条件について考察しなさい。