

## II 熱環境 1 温度と熱移動（教科書 pp.40～53）

### 1. 今日目標

- 1) 熱の移動に3種類+1種類の現象があることを理解しよう。
- 2) 熱貫流量の計算ができるようにしよう。

### 2. 熱の移動

熱の移動の形態には、\_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_による熱伝達, \_\_\_\_\_による熱伝達, \_\_\_\_\_の4種類がある。

#### 2.1 熱伝導

\_\_\_\_\_の部分から\_\_\_\_\_の部分へと、その間に介在する\_\_\_\_\_を伝わって熱が移動する現象。  
環境工学では主に、\_\_\_\_\_中の熱移動を扱う。

$$q_k = \frac{l}{x} (q_1 - q_2)$$

$q_k$  : 単位面積当たりの熱伝導による熱流 [W/m<sup>2</sup>]

$l$  : \_\_\_\_\_ [W/(m·K)] 材料の熱の伝わりやすさを示す

$x$  : 材料の厚さ [m]

$(q_1 - q_2)$  : 温度差 [K]

- ・比重の\_\_\_\_\_物質, すなわち, 分子数が大きく密度が濃い固体ほど熱を\_\_\_\_\_ (= 熱伝導率大きい)。教科書 p.42 の図 1-3 もしくは p.43 の図 1-4 を参照のこと。
- ・静止した\_\_\_\_\_の層があると, 熱を伝えにくい。

#### 2.2 対流による熱伝達

\_\_\_\_\_にのって, \_\_\_\_\_の部分から\_\_\_\_\_の部分へ熱が移動する現象。  
環境工学では主に, \_\_\_\_\_と\_\_\_\_\_の間の熱移動を扱う。

$$q_c = a_c (q_1 - q_2)$$

$q_c$  : 単位面積当たりの対流による熱流 [W/m<sup>2</sup>]

$a_c$  : \_\_\_\_\_ [ W/(m<sup>2</sup>·K) ] 熱の伝わりやすさを示す

- ・対流熱伝達率  $a_c$  は、状況に応じて大きく変化する係数。しかし、設計段階では、教科書 p.45 の表 1-1 のように決めてしまうことが多い。

### 2.3 放射による熱伝達

\_\_\_\_\_ の物体から \_\_\_\_\_ の物体へと、\_\_\_\_\_ ( \_\_\_\_\_ ) の形で熱が移動する現象。

環境工学では主に、固体表面と固体表面の間の熱移動を扱う。

$$q_r = a_r (q_1 - q_2)$$

$q_r$  : 単位面積当たりの放射による熱流 [ W/m<sup>2</sup> ]

$a_r$  : \_\_\_\_\_ [ W/(m<sup>2</sup>·K) ] 熱の伝わりやすさを示す

- ・放射熱伝達の理解はかなり難しいが、興味がある人は、教科書 pp.45～50 を参照。

### 2.4 物質移動

物質の移動によって熱が移動する現象。

環境工学では主に、\_\_\_\_\_ あるいは \_\_\_\_\_ に伴って起こる熱移動を扱う。

< 補足 >

\_\_\_\_\_ : 物質の状態を変えずに、温度を変化させるために費やされる熱量。

\_\_\_\_\_ : 物質の状態変化のとき、温度の変化を伴わないで吸収または放出される熱量。

### 3. 熱貫流

- ・どんな材料の壁を用いれば、要求する室内の気温を実現できるであろうか？
- ・ある材料の壁を使えば、室内の気温は何度になるであろうか？

注) 以下の説明は、教科書を更に簡略化している。教科書では、実際には近似を入れてあるものも説明の際には断っていないので注意。

1) 室内 壁表面での熱移動は、対流と放射によるものがあるが、一緒にまとめる。

$$\begin{aligned} q_{\text{inside}\rightarrow\text{insidewall}} &= a_{c,\text{inside}} (q_{a,\text{inside}} - q_{s,\text{inside}}) + a_{r,\text{inside}} (q_{a,\text{inside}} - q_{s,\text{inside}}) \\ &= (a_{c,\text{inside}} + a_{r,\text{inside}}) (q_{a,\text{inside}} - q_{s,\text{inside}}) \\ &= a_i (q_{a,\text{inside}} - q_{s,\text{inside}}) \end{aligned}$$

2) 壁表面 屋外での熱移動は、対流と放射によるものがあるが、一緒にまとめる。

$$\begin{aligned} q_{\text{outsidewall}\rightarrow\text{outside}} &= a_{c,\text{outside}} (q_{s,\text{outside}} - q_{a,\text{outside}}) + a_{r,\text{outside}} (q_{s,\text{outside}} - q_{a,\text{outside}}) \\ &= (a_{c,\text{outside}} + a_{r,\text{outside}}) (q_{s,\text{outside}} - q_{a,\text{outside}}) \\ &= a_o (q_{s,\text{outside}} - q_{a,\text{outside}}) \end{aligned}$$

3) 壁面内の熱移動は、2.1の熱伝導の式のまま、次のようになる。

$$\begin{aligned} q_{\text{insidewall}\rightarrow\text{fil}2} &= \frac{l_1}{x_1} (q_{s,\text{insidewall}} - q_{12}) \\ q_{\text{fil}2\rightarrow\text{fil}3} &= \frac{l_2}{x_2} (q_{12} - q_{23}) \\ q_{\text{fil}3\rightarrow\text{outsidewall}} &= \frac{l_3}{x_3} (q_{23} - q_{s,\text{outsidewall}}) \end{aligned}$$

添え字は、以下の通り（できるだけ、教科書にあわせています）。

inside:室内  $a$ :気温  $s$ :壁の表面温度  $i$ :室内側の壁面  $o$ :屋外  $o$ :屋外側の壁面、1・2：1番目の壁と2番目の壁の間（以下同じ）

4) 貫流熱量（熱貫流量）は以下のように算出する。

定常状態（時間とともに変化しない、安定した状態）

の時には、各層を通過する熱流は全て等しいので、

$$q_{inside \rightarrow i} = q_{i \rightarrow s1} = q_{s1 \rightarrow i2} = q_{i2 \rightarrow s2} = q_{s2 \rightarrow i3} = q_{i3 \rightarrow s3} = q_{s3 \rightarrow o} = q_{o \rightarrow outside}$$

となり、温度の項を消去すると、

$$q_{inside \rightarrow outside} = \frac{1}{\frac{1}{a_i} + \frac{x_1}{l_1} + \frac{x_2}{l_2} + \frac{x_3}{l_3} + \frac{1}{a_o}} (q_{a,inside} - q_{a,outside})$$

$$= K (q_{a,inside} - q_{a,outside})$$

$$K = \frac{1}{\frac{1}{a_i} + \frac{x_1}{l_1} + \frac{x_2}{l_2} + \frac{x_3}{l_3} + \frac{1}{a_o}} \quad \text{————— [ W/(m}^2 \cdot \text{K) ] 熱の伝わりやすさを表す}$$

もっと一般的に書くと

$$K = \frac{1}{\frac{1}{a_i} + \frac{x_k}{l_k} + \frac{1}{a_o}}$$

結局、最終的に貫流熱量  $Q_{inside \rightarrow outside}$  [W] は、

$$Q_{inside \rightarrow outside} = q_{inside \rightarrow outside} S_w$$

$$= K (q_{a,inside} - q_{a,outside}) S_w \quad \text{教科書 p.53 の (1.26) '式}$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{a_i} + \frac{x_k}{l_k} + \frac{1}{a_o}} (q_{a,inside} - q_{a,outside}) S_w$$

（ただし、 $\frac{x_i}{l_i}$  を  $\frac{x_k}{l_k}$  としている。）

ここまでは、全て熱の伝わり「やすさ」で考えてきたが、  
逆に「熱の伝わり「にくさ」=「抵抗」で考えるとどうなるか？

- ・室内 壁表面での熱移動は、対流と放射によるものがあるが、一緒にまとめる。

$$\begin{aligned} q_{inside \rightarrow inside\ wall} &= a_i (q_{a,inside} - q_{s,inside}) \\ &= \frac{1}{r_i} (q_{a,inside} - q_{s,inside}) \end{aligned}$$

- ・壁表面 屋外での熱移動は、対流と放射によるものがあるが、一緒にまとめる。

$$\begin{aligned} q_{outside\ wall \rightarrow outside} &= a_o (q_{s,outside} - q_{a,outside}) \\ &= \frac{1}{r_o} (q_{s,outside} - q_{a,outside}) \end{aligned}$$

- ・壁面内の熱移動は、2.1の熱伝導の式のままで、次のようになる。

$$q_{inside\ wall \rightarrow 1} = \frac{l_1}{x_1} (q_{s,inside\ wall} - q_{1,2}) = \frac{1}{\frac{x_1}{l_1}} (q_{s,inside\ wall} - q_{1,2}) = \frac{1}{r_1} (q_{s,inside\ wall} - q_{1,2})$$

$$q_{1,2 \rightarrow 2,3} = \frac{l_2}{x_2} (q_{1,2} - q_{2,3}) = \frac{1}{\frac{x_2}{l_2}} (q_{1,2} - q_{2,3}) = \frac{1}{r_2} (q_{1,2} - q_{2,3})$$

$$q_{2,3 \rightarrow outside\ wall} = \frac{l_3}{x_3} (q_{2,3} - q_{s,outside\ wall}) = \frac{1}{\frac{x_3}{l_3}} (q_{s,inside\ wall} - q_{1,2}) = \frac{1}{r_3} (q_{s,inside\ wall} - q_{1,2})$$

定常状態の時には、各層を通過する熱流は全て等しいので、

$$q_{inside \rightarrow inside\ wall} = q_{inside\ wall \rightarrow 1} = q_{1,2 \rightarrow 2,3} = q_{2,3 \rightarrow outside\ wall} = q_{outside\ wall \rightarrow outside} = q_{inside \rightarrow outside}$$

となり、温度の項を消去すると、

$$\begin{aligned} q_{inside \rightarrow outside} &= \frac{1}{r_i + r_1 + r_2 + r_3 + r_o} (q_{a,inside} - q_{a,outside}) \\ &= \frac{1}{R} (q_{a,inside} - q_{a,outside}) \\ &= K (q_{a,inside} - q_{a,outside}) \end{aligned}$$

$$R = \frac{1}{K} \quad \text{_____} [ (m^2 \cdot K) / W ] \quad \text{熱の伝わりにくさを表す}$$

$$r_i : \text{_____} [ (m^2 \cdot K) / W ] \quad \text{熱の伝わりにくさを表す}$$

$r_o$  : \_\_\_\_\_ [ (m<sup>2</sup>·K)/W ] 熱の伝わりにくさを表す

$r_1, r_2, r_3, \dots$  : \_\_\_\_\_ [ (m<sup>2</sup>·K)/W ] 熱の伝わりにくさを表す

もっと一般的に書くと

$$K = \frac{1}{\frac{1}{a_i} + \frac{x_k}{l_k} + \frac{1}{a_o}}$$

$$= \frac{1}{r_i + r_k + r_o} = \frac{1}{R}$$

最終的に貫流熱量  $Q_{inside \rightarrow outside}$  [W] は、

$$Q_{inside \rightarrow outside} = q_{inside \rightarrow outside} S_w$$

$$= K (q_{a,inside} - q_{a,outside}) S_w$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{a_i} + \frac{x_i}{l_i} + \frac{1}{a_o}} (q_{a,inside} - q_{a,outside}) S_w$$