



## 2.2 対流による熱伝達（教科書 pp.43～45）

\_\_\_\_\_（\_\_\_\_\_体や\_\_\_\_\_体）の\_\_\_\_\_にのって，\_\_\_\_\_温の部分から\_\_\_\_\_温の部分へ熱が移動する現象。浮遊した分子間での熱のやり取りで，真空中ではこのような熱のやり取りはない。

環境工学では主に，\_\_\_\_\_と\_\_\_\_\_の間の熱移動を扱う。

$$\{ \text{_____} \} = \{ \text{_____} \} \times \{ \text{_____} \}$$

$$q_c = \alpha_c \cdot (\theta_1 - \theta_2) \quad (2) \quad (\text{教科書 p.44 の (1.8) 式を書き改めた})$$

ここで，

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

$\alpha_c$ ：対流熱伝達率 [W/(m<sup>2</sup>·K)] 熱の伝わりやすさを示す（ $\alpha$ ：アルファ）

- ・対流熱伝達率  $\alpha_c$  は，状況に応じて大きく変化する係数。例えば，流速が大きくなると対流熱伝達率  $\alpha_c$  も大きくなる。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（教科書 pp.45～50）

\_\_\_\_\_温の物体から\_\_\_\_\_温の物体へと，\_\_\_\_\_（\_\_\_\_\_）の形で熱が移動する現象。真空中でもこのような熱のやり取りはある。

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。

$$\{ \text{_____} \} = \{ \text{_____} \} \times \{ \text{_____} \}$$

$$q_r = \alpha_r \cdot (\theta_1 - \theta_2) \quad (3) \quad (\text{教科書 p.46 の (1.10) 式を書き改めた})$$

ここで，

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

$\alpha_r$ ：放射熱伝達率 [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（教科書 p.50）

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，水の\_\_\_\_\_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，\_\_\_\_\_を変化させるために費やされる熱量。

\_\_\_\_\_：物質の\_\_\_\_\_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（教科書 pp.50～53）

外気の気温がある温度の時に，

- ・ 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。

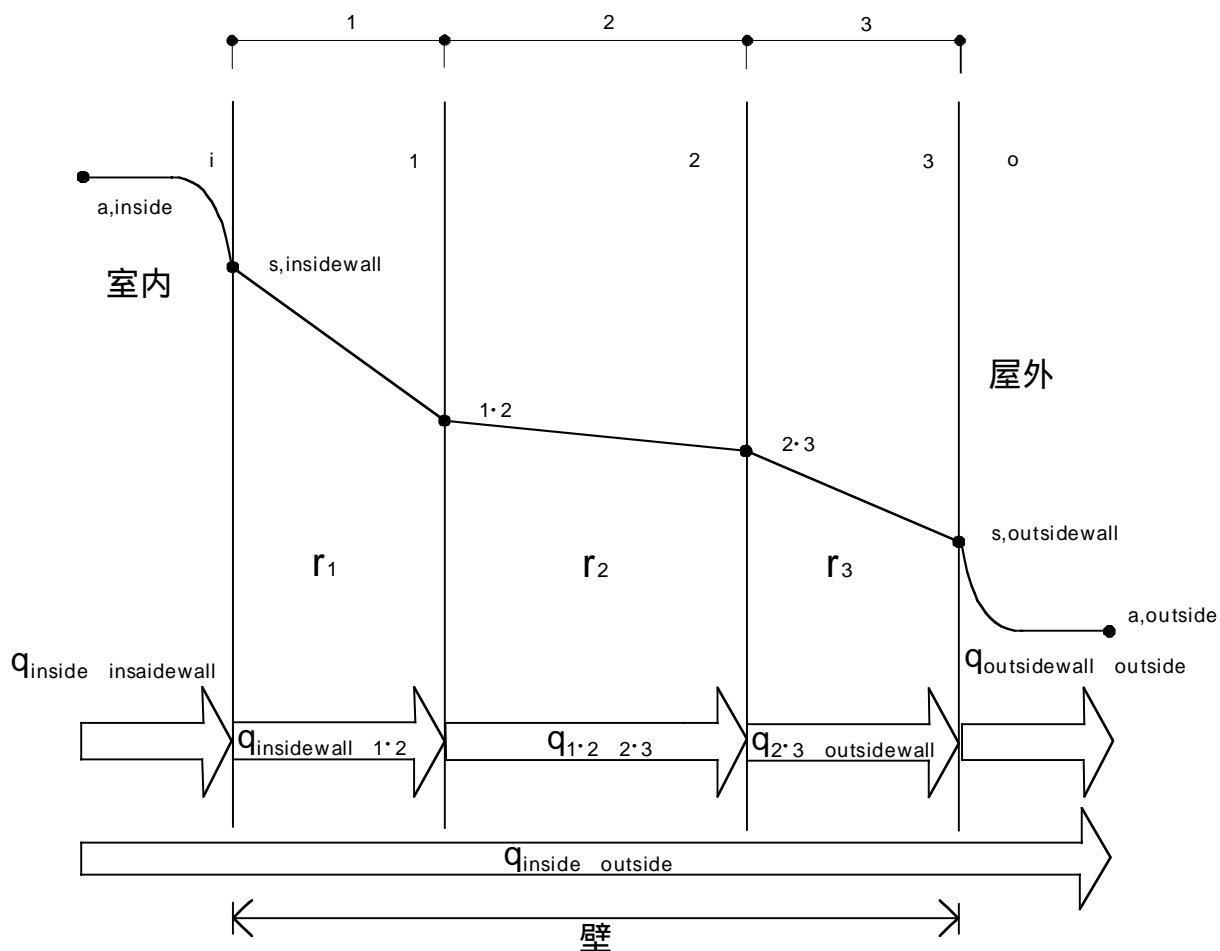


図 熱貫流の計算

前ページの図中の記号は、以下の通り。

- $x_1$  : 1番目の壁の層の厚さ [m] (2番目の壁, 3番目の壁も同様)
- $\lambda_1$  : 1番目の壁の熱伝導率 [W/m·K] (2番目の壁, 3番目の壁も同様)
- $\theta_{1,2}$  : 1番目の壁と2番目の壁との間での温度 [K] (その他の温度の表示も同様)
- $r_1$  : 1番目の壁の熱伝導抵抗 [(m<sup>2</sup>·K)/W] (2番目の壁, 3番目の壁も同様)
- $\alpha_i$  : 室内側側壁の総合熱伝達率 [W/(m<sup>2</sup>·K)]
- $q_{1,2 \rightarrow 2,3}$  : 1番目の壁と2番目の壁との間から2番目の壁と3番目の壁との間へ流れる熱量 [W/m<sup>2</sup>]

(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。

$$\begin{aligned} \{ \quad \quad \quad \} &= \{ \quad \quad \quad \} + \{ \quad \quad \quad \} \\ &= \{ \quad \quad \quad \} \\ &\times \{ \quad \quad \quad \} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_{inside \rightarrow insidewall} &= \alpha_{c,inside} \cdot (\theta_{a,inside} - \theta_{s,inside}) + \alpha_{r,inside} \cdot (\theta_{a,inside} - \theta_{s,inside}) \\ &= (\alpha_{c,inside} + \alpha_{r,inside}) \cdot (\theta_{a,inside} - \theta_{s,inside}) \\ &= \alpha_i \cdot (\theta_{a,inside} - \theta_{s,inside}) \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、

$\alpha_i$  : 室内側側壁の総合熱伝達率 [W/(m<sup>2</sup>·K)]

$$(\{ \quad \quad \quad \text{熱伝達率} \}) = \{ \quad \quad \quad \text{熱伝達率} \} + \{ \quad \quad \quad \text{熱伝達率} \}$$

$$\alpha_i = \alpha_{c,inside} + \alpha_{r,inside} \quad (5)$$

ここで、

$\alpha_{c,i}$  : 室内側側壁の対流熱伝達率 [W/(m<sup>2</sup>·K)]

$\alpha_{r,i}$  : 室内側側壁の放射熱伝達率 [W/(m<sup>2</sup>·K)]

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, *insidewall* : (室内側の) 壁面, *outside* : 屋外, *outsidewall* : (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)

(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。

$$\begin{aligned} \{ \quad \quad \quad \} &= \{ \quad \quad \quad \} + \{ \quad \quad \quad \} \\ &= \{ \quad \quad \quad \} \\ &\times \{ \quad \quad \quad \} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 q_{\text{outsidewall} \rightarrow \text{outside}} &= \alpha_{c,\text{outside}} \cdot (\theta_{s,\text{outside}} - \theta_{a,\text{outside}}) + \alpha_{r,\text{outside}} \cdot (\theta_{s,\text{outside}} - \theta_{a,\text{outside}}) \\
 &= (\alpha_{c,\text{outside}} + \alpha_{r,\text{outside}}) \cdot (\theta_{s,\text{outside}} - \theta_{a,\text{outside}}) \\
 &= \alpha_o \cdot (\theta_{s,\text{outside}} - \theta_{a,\text{outside}})
 \end{aligned} \tag{6}$$

ここで，

$\alpha_o$ ：屋外側側壁の総合熱伝達率 [W/(m<sup>2</sup>・K)]

(3) 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。

$$\{ \text{ } \} = \{ \text{ } \} \div \{ \text{ } \} \times \{ \text{ } \}$$

$$q_{\text{insidewall} \rightarrow 1.2} = \frac{\lambda_1}{x_1} \cdot (\theta_{s,\text{insidewall}} - \theta_{1.2}) \tag{7}$$

$$q_{1.2 \rightarrow 2.3} = \frac{\lambda_2}{x_2} \cdot (\theta_{1.2} - \theta_{2.3}) \tag{8}$$

$$q_{2.3 \rightarrow \text{outsidewall}} = \frac{\lambda_3}{x_3} \cdot (\theta_{2.3} - \theta_{s,\text{outsidewall}}) \tag{9}$$

(4) 貫流熱量(熱貫流量)は以下のように算出する。

1) 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,

$$\{ \text{室内 壁表面での熱移動} \} = \{ \text{壁面内の熱移動} \} = \{ \text{壁表面 屋外での熱移動} \}$$

$$q_{\text{inside} \rightarrow \text{insidewall}} = q_{\text{insidewall} \rightarrow 1.2} = q_{1.2 \rightarrow 2.3} = q_{2.3 \rightarrow \text{outsidewall}} = q_{\text{outsidewall} \rightarrow \text{outside}} = q_{\text{inside} \rightarrow \text{outside}} \tag{10}$$

となり,温度の項を消去すると,

$$\begin{aligned}
 q_{\text{inside} \rightarrow \text{outside}} &= \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{x_1}{\lambda_1} + \frac{x_2}{\lambda_2} + \frac{x_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_o}} \cdot (\theta_{a,\text{inside}} - \theta_{a,\text{outside}}) \\
 &= K \cdot (\theta_{a,\text{inside}} - \theta_{a,\text{outside}})
 \end{aligned} \tag{11}$$

$$\{ \text{ } \} = \{ \text{ } \} \times \{ \text{ } \}$$

ただし,

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{x_1}{\lambda_1} + \frac{x_2}{\lambda_2} + \frac{x_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_o}} \tag{12}$$

$K$ ：\_\_\_\_\_ [W/(m<sup>2</sup>・K)] 熱の伝わりやすさを表す。

この熱貫流率を、もっと一般的に書くと

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \sum \frac{x_k}{\lambda_k} + \frac{1}{\alpha_o}} \quad (13)$$

2) 結局、最終的に \_\_\_\_\_ ( \_\_\_\_\_ )  $Q_{inside \rightarrow outside}$  [W] は、

$$\begin{aligned} Q_{inside \rightarrow outside} &= q_{inside \rightarrow outside} \cdot S_w \\ &= K \cdot (\theta_{a,inside} - \theta_{a,outside}) \cdot S_w \quad (14) \text{ (教科書 p.53 の (1.26) '式)} \\ &= \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \sum \frac{x_k}{\lambda_k} + \frac{1}{\alpha_o}} \cdot (\theta_{a,inside} - \theta_{a,outside}) \cdot S_w \end{aligned}$$

(ただし、教科書 p.53 の (1.26) '式の  $\sum \frac{x_i}{\lambda_i}$  を、(14) 式では  $\sum \frac{x_k}{\lambda_k}$  としている。)

ここで、

$S_w$  : 外壁の面積 [m<sup>2</sup>]

$$\{ \text{_____ ( _____) } \} = \{ \text{_____} \} \times \{ \text{_____} \} \times \{ \text{_____} \}$$

(5)

ここまででは、全て熱の伝わり「やすさ」で考えてきたが、

逆に「熱の伝わり「\_\_\_\_\_」 = 「\_\_\_\_\_」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。

$$\begin{aligned} q_{inside \rightarrow insidewall} &= \alpha_i \cdot (\theta_{a,inside} - \theta_{s,inside}) \\ &= \frac{1}{r_i} \cdot (\theta_{a,inside} - \theta_{s,inside}) \end{aligned} \quad (15)$$

ここで、

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

・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。

$$\begin{aligned} q_{outsidewall \rightarrow ioutsidel} &= \alpha_o \cdot (\theta_{s,outside} - \theta_{a,outside}) \\ &= \frac{1}{r_o} \cdot (\theta_{s,outside} - \theta_{a,outside}) \end{aligned} \quad (16)$$

ここで、

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

・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。

$$q_{insidewall \rightarrow 1.2} = \frac{\lambda_1}{x_1} \cdot (\theta_{s,insidewall} - \theta_{1.2}) = \frac{1}{\frac{x_1}{\lambda_1}} \cdot (\theta_{s,insidewall} - \theta_{1.2}) = \frac{1}{r_1} \cdot (\theta_{s,insidewall} - \theta_{1.2}) \quad (17)$$

$$q_{1.2 \rightarrow 2.3} = \frac{\lambda_2}{x_2} \cdot (\theta_{1.2} - \theta_{2.3}) = \frac{1}{\frac{x_2}{\lambda_2}} \cdot (\theta_{1.2} - \theta_{2.3}) = \frac{1}{r_2} \cdot (\theta_{1.2} - \theta_{2.3}) \quad (18)$$

$$q_{2.3 \rightarrow outsidewall} = \frac{\lambda_3}{x_3} \cdot (\theta_{2.3} - \theta_{s,outsidewall}) = \frac{1}{\frac{x_3}{\lambda_3}} \cdot (\theta_{s,insidewall} - \theta_{1.2}) = \frac{1}{r_3} \cdot (\theta_{s,insidewall} - \theta_{1.2}) \quad (19)$$

ここで、

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

・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、

$$q_{inside \rightarrow insidewall} = q_{insidewall \rightarrow 1.2} = q_{1.2 \rightarrow 2.3} = q_{2.3 \rightarrow outsidewall} = q_{outsidewall \rightarrow outside} = q_{inside \rightarrow outside} \quad (20)$$

となり、温度の項を消去すると、

$$\begin{aligned} q_{inside \rightarrow outside} &= \frac{1}{r_i + r_1 + r_2 + r_3 + r_o} \cdot (\theta_{a,inside} - \theta_{a,outside}) \\ &= \frac{1}{R} \cdot (\theta_{a,inside} - \theta_{a,outside}) \\ &= K \cdot (\theta_{a,inside} - \theta_{a,outside}) \end{aligned} \quad (21)$$

ただし、

$$R = r_i + r_1 + r_2 + r_3 + r_o = \frac{1}{K} \quad (22)$$

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

\_\_\_\_\_ は、\_\_\_\_\_ の逆数。

この熱貫流抵抗を、もっと一般的に書くと

$$\begin{aligned} R &= r_i + \sum r_k + r_o \\ &= \frac{1}{\alpha_i} + \sum \frac{x_k}{\lambda_k} + \frac{1}{\alpha_o} = \frac{1}{K} \end{aligned} \quad (23)$$

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

$$\begin{aligned} Q_{inside \rightarrow outside} &= q_{inside \rightarrow outside} \cdot S_w \\ &= \frac{1}{R} \cdot (\theta_{a,inside} - \theta_{a,outside}) \cdot S_w \\ &= K \cdot (\theta_{a,inside} - \theta_{a,outside}) \cdot S_w \end{aligned} \quad (24)$$

p.11 の (14) 式と同じこと。

#### 4 . 参考 URL

[ 1 ] 講義資料のダウンロード

<http://www.pu-kumamoto.ac.jp/m-tsuji/kougi.html/genron.html/setubigen.html>

#### 次回の講義予定

- |        |                          |
|--------|--------------------------|
| II 熱環境 | 2 室温と熱負荷（教科書 pp.54～59）   |
| II 熱環境 | 3 断熱と気密と結露（教科書 pp.60～64） |