

## II 熱環境 1 温度と熱移動（教科書 pp. 40～53）

## 1. 今日の目標

- 1) 3種類の熱の移動の仕組みを理解しよう。
- 2) 熱貫流量の計算ができるようにしよう。

## 2. 熱の移動（教科書 pp. 41～50）

熱の移動の形態には、\_\_\_\_\_, 熱伝達（主として、\_\_\_\_\_による熱伝達）、\_\_\_\_\_（以上の3つを「熱移動の三形態」や「熱移動の基本形態」などと呼ぶことが多い）などがある。

→オームの法則を思い出してみよう。

$$[\text{ }] = 1 / [\text{ }] \times [\text{ }]$$

## 2. 1 熱伝導（教科書 pp. 41～43）

物質内部に温度差があるとき、\_\_\_\_\_の部分から\_\_\_\_\_の部分へ（隣り合う分子を通じて）熱が移動する現象。

→環境工学では主に、\_\_\_\_\_中の熱移動を扱う。

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

$$q_k = \frac{\lambda}{x} \cdot (\theta_1 - \theta_2) \quad (1) \quad (\text{教科書 p. 41 の (1.7) 式を書き改めた})$$

ここで、

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

$\lambda$  : 熱伝導率 [W/(m·K)] →材料の熱の伝わりやすさを示す ( $\lambda$  : ラムダ)

$x$  : 材料の厚さ [m]

$(\theta_1 - \theta_2)$  : 温度差 [K] ( $\theta$  : シータ)

・比重の\_\_\_\_\_物質，すなわち，分子数が大きく密度が大きい固体ほど熱を伝え\_\_\_\_\_（＝熱伝導率が高い）。→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。

→比重：ある物資の質量と同じ体積の4℃の純水の質量の比

・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（教科書 pp. 43～45）

\_\_\_\_\_とそれに触れる\_\_\_\_\_（\_\_\_\_\_体や\_\_\_\_\_体）の間に温度差があるとき、\_\_\_\_\_の部分から\_\_\_\_\_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あり、真空中ではこのような熱のやり取りはない。

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

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

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 : convection

- ・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 のようにある程度決めてしまうことが多い。

## 2. 3 熱放射（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。

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

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

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 : radiation

- ・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 の説明を参照。

## 2.4 相の変化に伴う熱の移動

\_\_\_\_\_ : 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。

【復習】液体から気体に状態が変わる時 : \_\_\_\_\_ 熱 ( \_\_\_\_\_ 熱)

気体から液体に状態が変わる時 : \_\_\_\_\_ 熱

固体から液体に状態が変わる時 : \_\_\_\_\_ 熱

液体から固体に状態が変わる時 : \_\_\_\_\_ 熱

\*\*\*\*\* メモ \*\*\*\*\*

3. 熱貫流（教科書 pp. 50～53）

外気の気温がある温度の時に、次のようなことを考える。

- ・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、教科書の記述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。

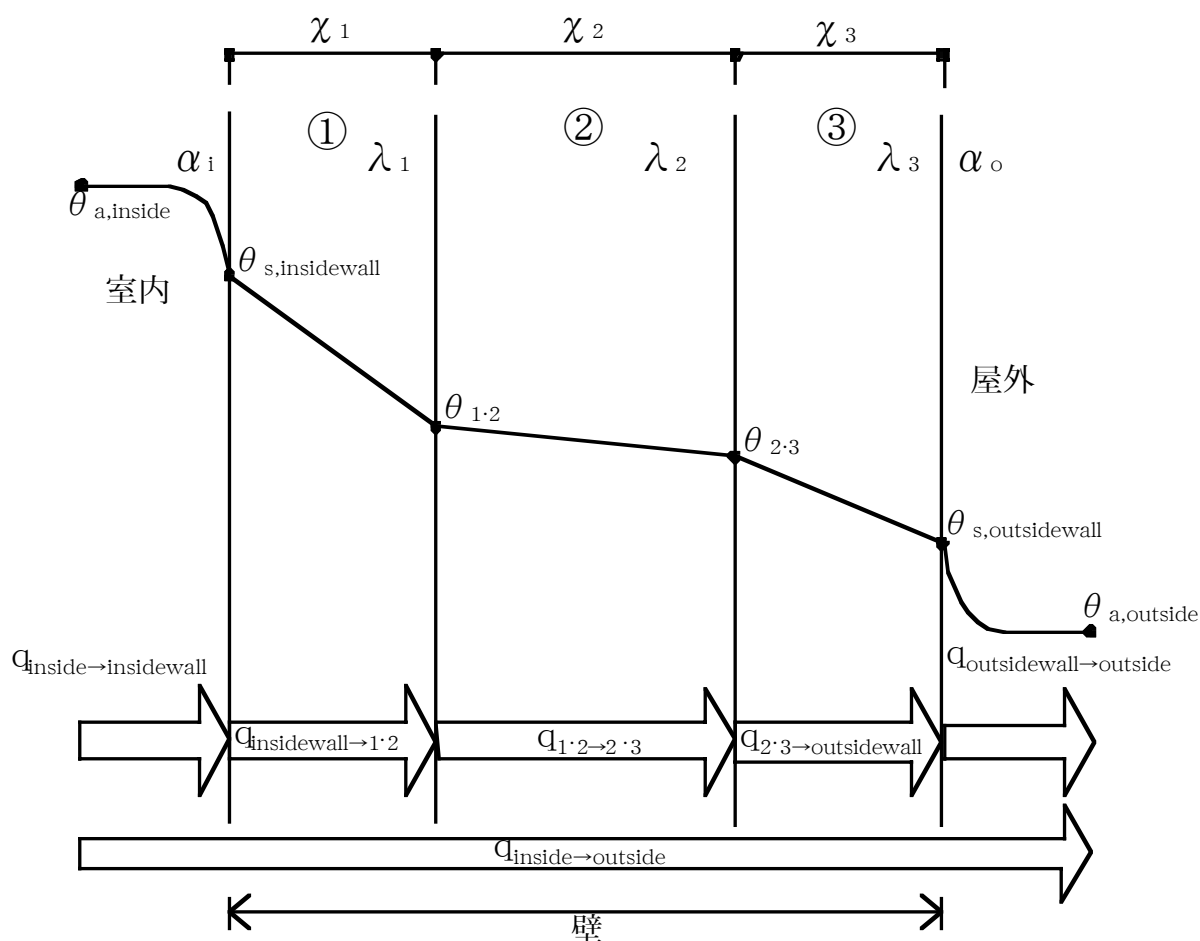


図 熱貫流の計算

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] (2 番目の壁と 3 番目の壁との間での温度も同様)

$\theta_{a,inside}$  : 室内側の気温 [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)

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

$\alpha_o$  : 屋外側の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>] (その他の熱量の表示も同様)

(1) 室内→側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。

$$\begin{aligned} \rightarrow \{ \underline{\hspace{10em}} \} &= \{ \underline{\hspace{10em}} \} + \{ \underline{\hspace{10em}} \} \\ &= \{ \underline{\hspace{10em}} \} \\ &\quad \times \{ \underline{\hspace{10em}} \} \end{aligned}$$

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

ここで,

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

$$(\{ \underline{\hspace{2em}} \text{熱伝達率} \}) = \{ \underline{\hspace{2em}} \text{熱伝達率} \} + \{ \underline{\hspace{2em}} \text{熱伝達率} \}$$

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

ここで,

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

$\alpha_{r,inside}$  : 室内側の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* : 側壁の表面温度, *insidewall* : (室内側の) 側壁面, *outside* : 屋外, *outsidewall* : (屋外側の) 側壁面, 1・2 : 1番目の壁と2番目の壁の間 (以下同じ)

(2) 側壁表面→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。

$$\begin{aligned} \rightarrow [\text{ }] &= [\text{ }] + [\text{ }] \\ &= [\text{ }] \\ &\quad \times [\text{ }] \end{aligned}$$

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

ここで、

$\alpha_o$  : 屋外側の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（配付資料 p.9 の(1)式)のまま、次のようになる。

$$\rightarrow [\text{ }] = [\text{ }] \div [\text{ }] \times [\text{ }]$$

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

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

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

(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、それぞれの層を通過する熱流は全て等しいので、

→ [室内→側壁表面での熱移動量] = [壁面内の熱移動量] = [側壁表面→屋外での熱移動量]

$$q_{inside \rightarrow insidewall} = q_{insidewall \rightarrow 1.2} = q_{1.2 \rightarrow 2.3} = q_{2.3 \rightarrow outsidewall} = q_{outsidewall \rightarrow outside} = q_{inside \rightarrow outside} \quad (10)$$

となり、温度の項を消去すると、

$$q_{inside \rightarrow outside} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{x_1}{\lambda_1} + \frac{x_2}{\lambda_2} + \frac{x_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_o}} \cdot (\theta_{a,inside} - \theta_{a,outside}) \quad (11)$$

$$= K \cdot (\theta_{a,inside} - \theta_{a,outside})$$

→ [ ] = [ ] × [ ]

ただし、

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

$K$  : [ ] [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,

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

(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,

$S_w$  : 壁の面積 [m<sup>2</sup>]

$$\rightarrow [ \text{_____} ( \text{_____} ) ] = [ \text{_____} ] \times [ \text{_____} ] \times [ \text{_____} ]$$

(5)

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「\_\_\_\_\_」 = 「\_\_\_\_\_」で考えるとどうなるか？

・室内→側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。

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

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。

・側壁表面→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。

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

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（配付資料 p.9 の（1）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、

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

→配付資料 p.15 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） |