

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/m²]

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

x : 材料の厚さ [m]

$(\theta_1 - \theta_2)$: 温度差 [K] (θ : 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。

$$\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] = \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right] \times \left[\text{K} \right]$$

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

ここで，

q_c ：単位面積当たりの対流による熱流 [W/m²]

α_c ：対流熱伝達率 [W/(m²·K)] →熱の伝わりやすさを示す（ α ：アルファ）

→対流：convection

- ・対流熱伝達率 α_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 α_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。

$$\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] = \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right] \times \left[\text{K} \right]$$

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

ここで，

q_r ：単位面積当たりの放射による熱流 [W/m²]

α_r ：放射熱伝達率 [W/(m²·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, _____を变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、

- ・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。

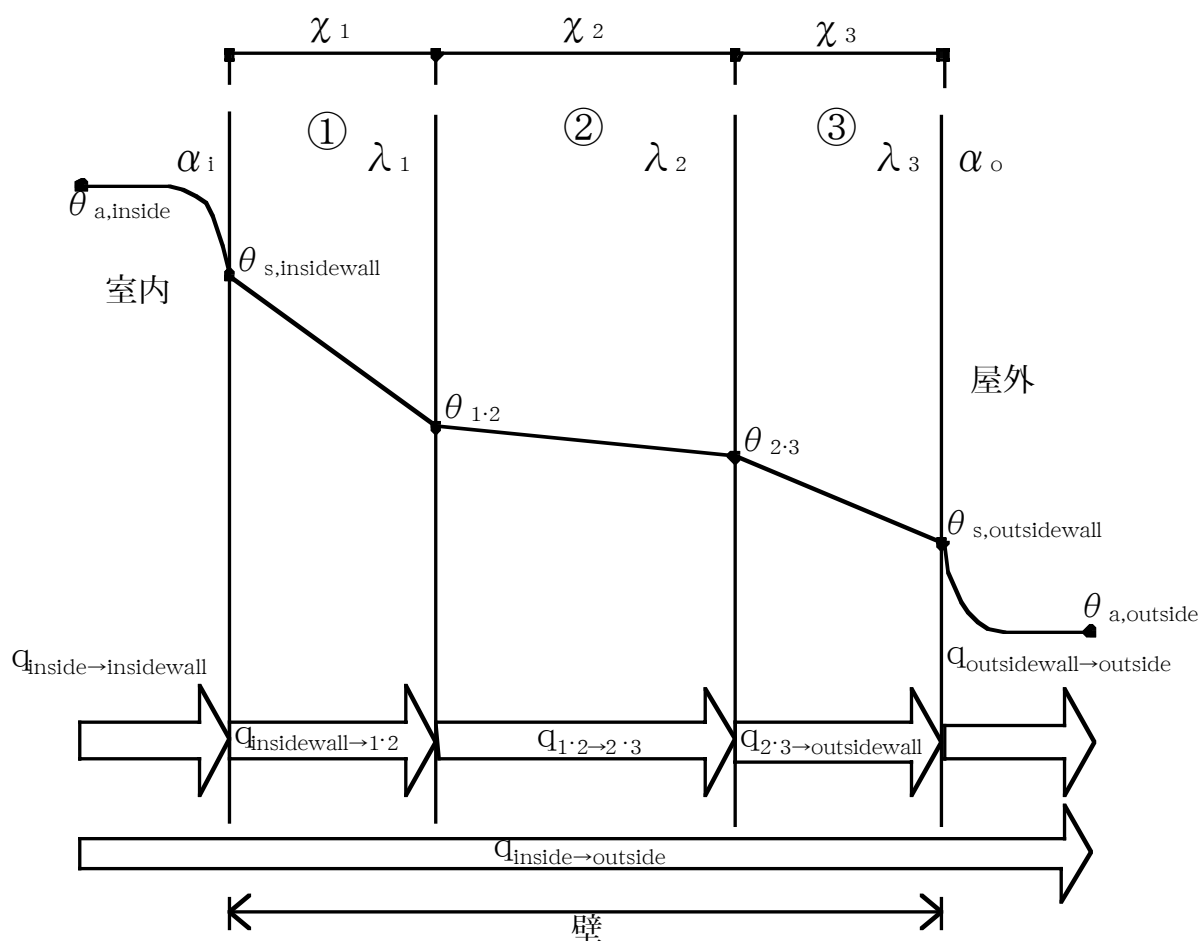


図 熱貫流の計算

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)
- λ_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 [(m²·K)/W] (2番目の壁, 3番目の壁も同様)

α_i : 室内側の側壁の総合熱伝達率 [W/(m²·K)]

α_o : 屋外側の側壁の総合熱伝達率 [W/(m²·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/m²] (その他の熱量の表示も同様)

(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。

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

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

ここで,

α_i : 室内側の側壁の総合熱伝達率 [W/(m²·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/(m²·K)]

$\alpha_{r,inside}$: 室内側の側壁の放射熱伝達率 [W/(m²·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) 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) 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。

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

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

ここで、

α_o : 屋外側の側壁の総合熱伝達率 [W/(m²·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→壁表面での熱移動量] = [壁面内の熱移動量] = [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/(m²·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 [m²]

$$\rightarrow \left[\frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \sum \frac{x_k}{\lambda_k} + \frac{1}{\alpha_o}} \right] = \left[\frac{1}{r_o} \right] \times \left[\frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \sum \frac{x_k}{\lambda_k}} \right] \times \left[\frac{1}{\alpha_o} \right]$$

(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→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。

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

ここで,

r_i : 室内側の _____ [(m²·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。

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

ここで,

r_o : 屋外側の _____ [(m²·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）のままで、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 _____ [(m²・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 : _____ [(m²・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） |