

1 温度と熱移動 (教科書 pp. 36~43)

「5 熱貫流量 (教科書 pp. 42~43)」の補足

⇒どんな仕組みで、熱貫流率や熱貫流量を求めるのだろうか？

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？

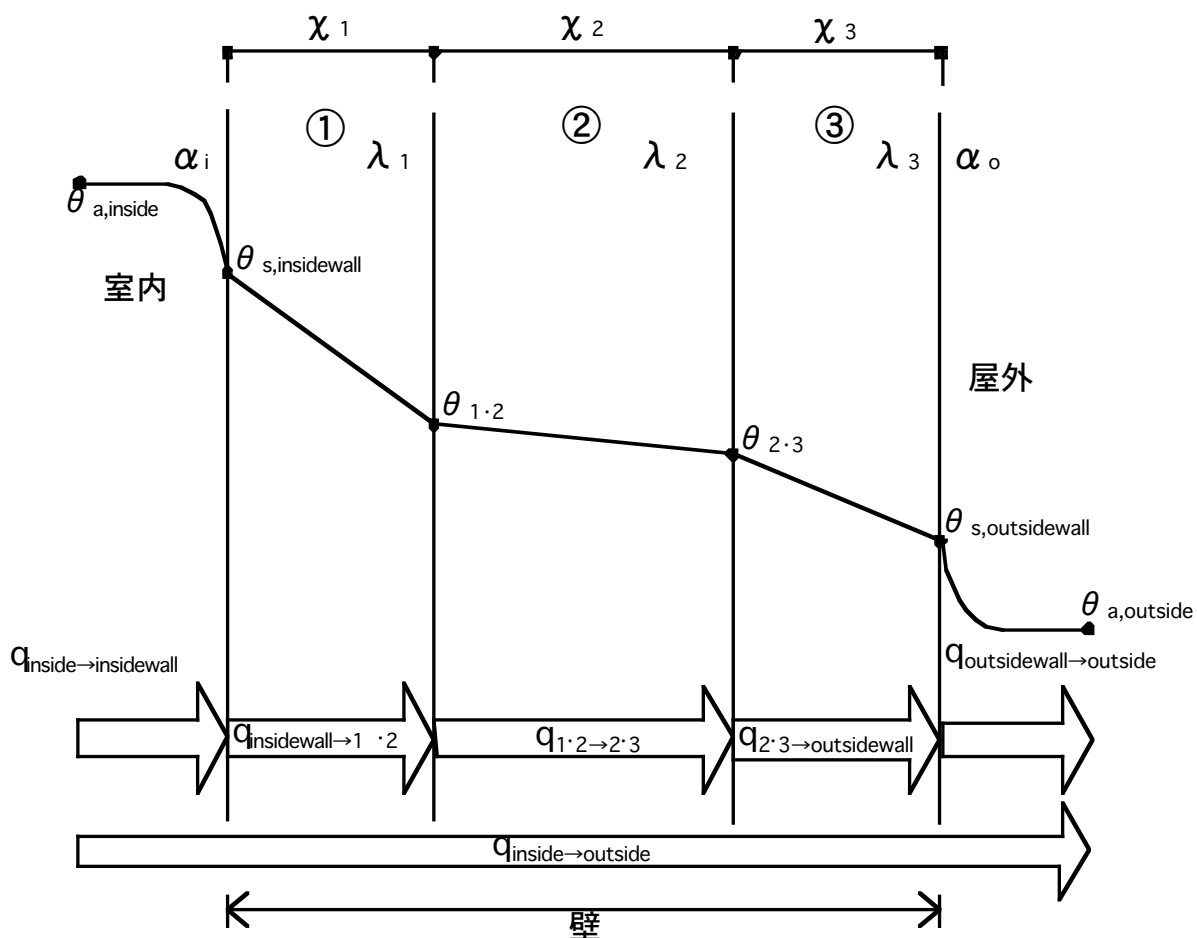


図 熱貫流の計算

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→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。

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

$$\begin{aligned} q_{inside \rightarrow insidewall} &= \alpha_{c,inside} \cdot (\theta_{a,inside} - \theta_{s,inside}) + \alpha_{r,inside} \cdot (\theta_{a,inside} - \theta_{s,inside}) \\ &= (\alpha_{c,inside} + \alpha_{r,inside}) \cdot (\theta_{a,inside} - \theta_{s,inside}) \\ &= \alpha_i \cdot (\theta_{a,inside} - \theta_{s,inside}) \end{aligned} \quad \langle 1 \rangle$$

ここで,

α_i : 室内側の側壁の総合熱伝達率 [W/(m²·K)]

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

$$\alpha_i = \alpha_{c,inside} + \alpha_{r,inside} \quad \langle 2 \rangle$$

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

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)

注) 「放射による熱移動量」の式については, 上記の式は近似式である。すなわち, 先週の範囲である教科書 p. 38 の式も近似式である。正しくは, もう少し複雑であるが, 簡単のため, もしくは実用上問題のない範囲での式を示している。より詳しく知りたい人は, 参考文献[1] ~ [3]などを参照。

(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。

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

$$\begin{aligned} q_{\text{outsidewall} \rightarrow \text{outside}} &= \alpha_{c,\text{outside}} \cdot (\theta_{s,\text{outside}} - \theta_{a,\text{outside}}) + \alpha_{r,\text{outside}} \cdot (\theta_{s,\text{outside}} - \theta_{a,\text{outside}}) \\ &= (\alpha_{c,\text{outside}} + \alpha_{r,\text{outside}}) \cdot (\theta_{s,\text{outside}} - \theta_{a,\text{outside}}) \quad \langle 3 \rangle \\ &= \alpha_o \cdot (\theta_{s,\text{outside}} - \theta_{a,\text{outside}}) \end{aligned}$$

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、教科書 p. 39 の熱伝導の式のまま、次のようになる。

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

$$q_{\text{insidewall} \rightarrow 1.2} = \frac{\lambda_1}{x_1} \cdot (\theta_{s,\text{insidewall}} - \theta_{1.2}) \quad \langle 4 \rangle$$

$$q_{1.2 \rightarrow 2.3} = \frac{\lambda_2}{x_2} \cdot (\theta_{1.2} - \theta_{2.3}) \quad \langle 5 \rangle$$

$$q_{2.3 \rightarrow \text{outsidewall}} = \frac{\lambda_3}{x_3} \cdot (\theta_{2.3} - \theta_{s,\text{outsidewall}}) \quad \langle 6 \rangle$$

(4) 熱貫流量 (貫流熱量) は以下のように算出する。

注) 熱流の単位

熱流の単位 : [W] (ワット)

注) 1 W = 1 J/s (1 秒間に消費されたり, 使用されたりするエネルギー。J は熱量の単位。)

なお, 「100V40W」と書いてある白熱電球は, 100V で使う時の消費電力が 40W との意味。

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]

$$q_{inside \rightarrow insidewall} = q_{insidewall \rightarrow 1.2} = q_{1.2 \rightarrow 2.3} = q_{2.3 \rightarrow outsidewall} = q_{outsidewall \rightarrow outside} = q_{inside \rightarrow outside} \quad \langle 7 \rangle$$

となり, 温度の項を消去すると,

$$q_{inside \rightarrow outside} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{x_1}{\lambda_1} + \frac{x_2}{\lambda_2} + \frac{x_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_o}} \cdot (\theta_{a,inside} - \theta_{a,outside}) \quad \langle 8 \rangle$$

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

→ [] = [] × []

ただし,

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{x_1}{\lambda_1} + \frac{x_2}{\lambda_2} + \frac{x_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_o}} \quad \langle 9 \rangle$$

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,

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \sum \frac{x_k}{\lambda_k} + \frac{1}{\alpha_o}} \quad \langle 10 \rangle$$

※定常と非定常 :

ストローでジュースを吸い上げる時を想像してみよう。最初は徐々に, ジュースが口に近づく (非定常) が, 一旦ジュースが口に入ってしまったら暫く同じ量のジュースが同じスピードで口の中に入ってくる (定常)。

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

$$\begin{aligned} Q_{inside \rightarrow outside} &= q_{inside \rightarrow outside} \cdot S_w \\ &= K \cdot (\theta_{a,inside} - \theta_{a,outside}) \cdot S_w \\ &= \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \sum \frac{x_k}{\lambda_k} + \frac{1}{\alpha_o}} \cdot (\theta_{a,inside} - \theta_{a,outside}) \cdot S_w \end{aligned} \quad \langle 11 \rangle$$

ここで,

S_w : 壁の面積 [m²]

$$\begin{aligned} \rightarrow [\text{_____} (\text{_____})] &= [\text{_____}] \\ &\quad \times [\text{_____}] \times [\text{_____}] \end{aligned}$$

→→ 「屋外気温」と「室内気温」だけで考えれば良いので便利

(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。

$$\begin{aligned} q_{inside \rightarrow insidewall} &= \alpha_i \cdot (\theta_{a,inside} - \theta_{s,inside}) \\ \rightarrow &= \frac{1}{r_i} \cdot (\theta_{a,inside} - \theta_{s,inside}) \end{aligned} \quad \langle 12 \rangle$$

ここで,

r_i : 室内側の _____ [(m²·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。

$$\begin{aligned} q_{outsidewall \rightarrow outside} &= \alpha_o \cdot (\theta_{s,outside} - \theta_{a,outside}) \\ \rightarrow &= \frac{1}{r_o} \cdot (\theta_{s,outside} - \theta_{a,outside}) \end{aligned} \quad \langle 13 \rangle$$

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、教科書 p. 39 の熱伝導の式のままで、次のようになる。

$$q_{\text{insidewall} \rightarrow 1.2} = \frac{\lambda_1}{x_1} \cdot (\theta_{s,\text{insidewall}} - \theta_{1.2}) = \frac{1}{\frac{x_1}{\lambda_1}} \cdot (\theta_{s,\text{insidewall}} - \theta_{1.2}) = \frac{1}{r_1} \cdot (\theta_{s,\text{insidewall}} - \theta_{1.2}) \quad \langle 14 \rangle$$

$$q_{1.2 \rightarrow 2.3} = \frac{\lambda_2}{x_2} \cdot (\theta_{1.2} - \theta_{2.3}) = \frac{1}{\frac{x_2}{\lambda_2}} \cdot (\theta_{1.2} - \theta_{2.3}) = \frac{1}{r_2} \cdot (\theta_{1.2} - \theta_{2.3}) \quad \langle 15 \rangle$$

$$q_{2.3 \rightarrow \text{outsidewall}} = \frac{\lambda_3}{x_3} \cdot (\theta_{2.3} - \theta_{s,\text{outsidewall}}) = \frac{1}{\frac{x_3}{\lambda_3}} \cdot (\theta_{s,\text{insidewall}} - \theta_{1.2}) = \frac{1}{r_3} \cdot (\theta_{s,\text{insidewall}} - \theta_{1.2}) \quad \langle 16 \rangle$$

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、

$$q_{\text{inside} \rightarrow \text{insidewall}} = q_{\text{insidewall} \rightarrow 1.2} = q_{1.2 \rightarrow 2.3} = q_{2.3 \rightarrow \text{outsidewall}} = q_{\text{outsidewall} \rightarrow \text{outside}} = q_{\text{inside} \rightarrow \text{outside}} \quad \langle 17 \rangle$$

となり、温度の項を消去すると、

$$\begin{aligned} q_{\text{inside} \rightarrow \text{outside}} &= \frac{1}{r_i + r_1 + r_2 + r_3 + r_o} \cdot (\theta_{a,\text{inside}} - \theta_{a,\text{outside}}) \\ &= \frac{1}{R} \cdot (\theta_{a,\text{inside}} - \theta_{a,\text{outside}}) \\ &= K \cdot (\theta_{a,\text{inside}} - \theta_{a,\text{outside}}) \end{aligned} \quad \langle 18 \rangle$$

ただし、

$$R = r_i + r_1 + r_2 + r_3 + r_o = \frac{1}{K} \quad \langle 19 \rangle$$

$R :$ _____ [(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、

$$\begin{aligned} R &= r_i + \sum r_k + r_o \\ &= \frac{1}{\alpha_i} + \sum \frac{x_k}{\lambda_k} + \frac{1}{\alpha_o} = \frac{1}{K} \end{aligned} \quad \langle 20 \rangle$$

(6)

最終的に熱貫流量 (貫流熱量) $Q_{inside \rightarrow outside}$ [W] は, 以下のようにまとめることができる。

$$\begin{aligned} Q_{inside \rightarrow outside} &= q_{inside \rightarrow outside} \cdot S_w \\ &= \frac{1}{R} \cdot (\theta_{a,inside} - \theta_{a,outside}) \cdot S_w \\ &= K \cdot (\theta_{a,inside} - \theta_{a,outside}) \cdot S_w \end{aligned} \quad \langle 21 \rangle$$

【教科書の訂正】(第 3 版第 2 刷→第 3 版第 3 刷で訂正)

・ p. 42①熱貫流抵抗の上から 4 行目

【誤】

壁表面 (室内・屋外) の熱伝達抵抗 = $1 /$ (総合熱伝達率 (p. 38) の和 (屋外 + 室内))

【正】

壁表面 (室内・屋外) の熱伝達抵抗 = $1 /$ (屋外の総合熱伝達率 (p. 38))
+ $1 /$ (室内の総合熱伝達率 (p. 38))

・ p. 43 の一番下の囲いの真ん中の式

【誤】

熱貫流率 (K) = $1 /$ 熱貫流抵抗 (R) = $1 /$ ($1 /$ 熱伝達率 + 材料の厚さ / 熱伝達率)

【正】

熱貫流率 (K) = $1 /$ 熱貫流抵抗 (R)
= $1 /$ ($1 /$ 室内の熱伝達率 + 材料の厚さ / 熱伝達率 + $1 /$ 屋外の熱伝達率)

【参考文献】 (順に, タイトル, 編著者名, 出版社, 発行年月, 価格, ISBN。[] 内は熊本県立大学学術情報メディアセンター図書館所蔵情報)。

[1] 『環境工学教科書 第二版』(環境工学教科書研究会編著, 彰国社, 2000 年 8 月, ¥3,500 + 税, ISBN: 4-395-00516-0) [開架 2, 525.1 || Ka 86, 0000275620, 0000308034]

[2] 『最新 建築環境工学 [改訂 3 版]』(田中俊六・武田仁・岩田利枝・土屋喬雄・寺尾道仁, 井上書院, 2006 年 3 月, ¥3,000 + 税, ISBN: 4-7530-1742-7) [開架 2, 525.1 || Ta 84, 0000300425]

[3] 『エース建築工学シリーズ エース建築環境工学 II-熱・湿気・換気-』(鈴木修一・池田徹郎・新田勝通, 朝倉書店, 2002 年 3 月, ¥3,800 + 税, ISBN: 4-254-26863-7) [開架 2, 525.1 || H 82, 0000263289]