

第3回目 熱貫流量 (教科書 pp.42~43)

◎ 前期の前半4回分の学修内容

対象: すまい, 住居, 建物そのもの

2回目 熱エネルギーの動きの基本を知ろう (数 cm のスケール)

3回目 簡単な壁を対象に考えよう (10~100cm のスケール)

4回目・5回目 建物全体を対象に考えよう (1~数 10m のスケール)

ポイント: 全体の中での位置付け

0 今日の内容: 熱貫流量 (貫流熱量) を理解しよう

1 今日の目標: 同じ「かたち」の「式」にしたい

2 知っているところまで分割しよう

前回学修した熱伝導, 対流による熱伝達 (対流熱伝達), 放射による熱伝達 (放射熱伝達) と繋げる
にはどうすればよいか?

⇒ いきなり壁全体を一気に考えるのではなく, 部材ごとに分割して考える

3 どうしたら全体を一つにまとめることができるか? を考えよう

→ 何かをしたら, まとめることができる場合の「何か」とは?

4 補足3つ

1 今日の目標: 同じ「かたち」の「式」にしたい

※ 同じ「かたち」の「式」にしたいが, どうすればよいか?

※※ 外気の気温が「ある温度」の時,

・ 室内の温度を「ある温度」にするためには, どんな材料の壁にすればよいか?

・ どんな材料の壁にすれば, 室内の気温は何度になるか?

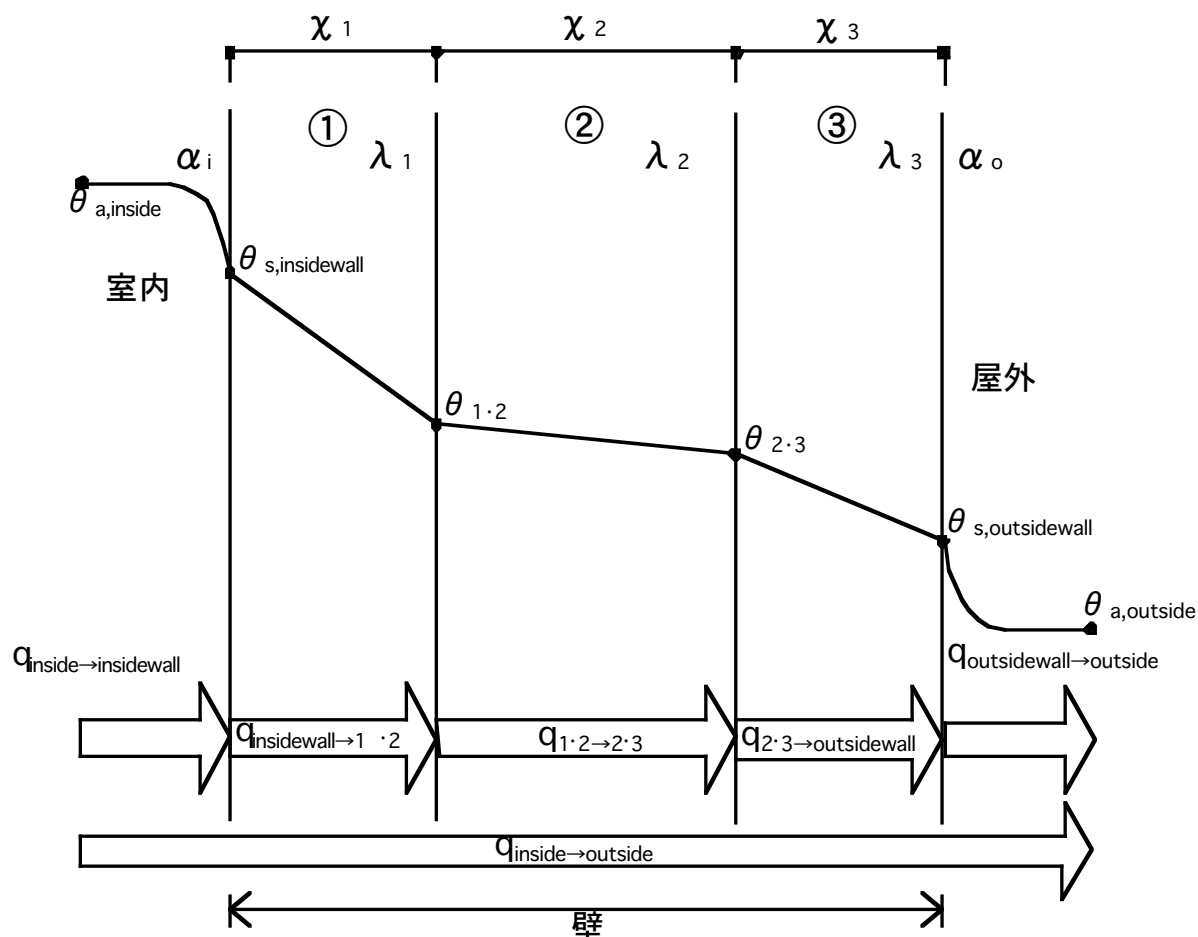
を考えたい。

2 知っているところまで分割しよう

(1) 壁の中と周囲の温度変化の図 ← 基本の図!! しっかり理解しよう!!

冬の場合を考える

注) ギリシア文字は教科書 p.140 を確認(参照)



図中の記号は、以下の通り

x_1 : 1 番目の壁材の層の厚さ [m] (2 番目の壁, 3 番目の壁も同様) **単位に注意!**

λ_1 : 1 番目の壁材の熱伝導率 [W/m·K] (2 番目の壁, 3 番目の壁も同様)

$\theta_{1,2}$: 1 番目の壁材と 2 番目の壁材が接するところでの温度 [K] (2 番目の壁材と 3 番目の壁材が接するところでの温度も同様)

$\theta_{a,inside}$: 室内側の気温 [K] (その他の温度の表示も同様)

r_1 : 1 番目の壁材の熱伝導抵抗 [(m²·K)/W] (2 番目の壁材, 3 番目の壁材も同様)

α_i : 室内側の壁の総合熱伝達率 [W/(m²·K)]

α_o : 屋外側の壁の総合熱伝達率 [W/(m²·K)]

$q_{1.2 \rightarrow 2.3}$: 1 番目の壁材と 2 番目の壁材が接するところから, 2 番目の壁材と 3 番目の壁材が接するところへ移動する「熱エネルギーの移動量」 [W/m²] (その他の「熱エネルギーの移動量」の表示も同様)

(2) 「室内→室内側の壁表面」での熱エネルギーの移動

→「対流（熱伝達）」と「放射（熱伝達）」の2つで熱エネルギーが移動!!

[室内→室内側の壁表面での熱エネルギーの移動量]

$$\begin{aligned} &= [\text{対流による熱エネルギーの移動量}] + [\text{放射による熱エネルギーの移動量}] \\ &= ([\text{対流熱伝達率}] \times [\text{温度差}] + [\text{放射熱伝達率}] \times [\text{温度差}]) \\ &= [\text{室内側の壁の総合熱伝達率}] \times [\text{室内気温と室内側の壁の表面温度との差}] \end{aligned}$$

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

ここで,

α_i : 室内側の壁の総合熱伝達率 [W/(m²・K)]

([総合熱伝達率] = [対流熱伝達率] + [放射熱伝達率])

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

ここで,

$\alpha_{c,\text{inside}}$: 室内側の壁の対流熱伝達率 [W/(m²・K)] (対流: convection)

$\alpha_{r,\text{inside}}$: 室内側の壁の放射熱伝達率 [W/(m²・K)] (放射: radiation)

なお, 添え字は, 以下の通り

inside: 室内, *insidewall*: (室内側の) 壁面

outside: 屋外, *outsidewall*: (屋外側の) 壁面

a: 気温 (空気: air)

s: 壁の表面温度 (表面: surface)

1・2: 1番目の壁材と2番目の壁材が接するところ (以下, 同じ)

注)

- ・先週の配付資料 17 頁の補足の通り, 「放射による熱エネルギーの移動量」の上記の式は近似式
- ・教科書 p.38 の式も近似式
- ・正しくは, もう少し複雑であるが, 上記の式で, 実用上は問題ない
- ・詳しく知りたい人は, 参考文献 [1] ~ [3] などを参照
- ・ギリシア文字は, 教科書 p.140 を参照
- ・ローマ字の筆記体の書き方をインターネットで検索して確認しておこう

(3) 「屋外側の壁表面→屋外」での熱エネルギーの移動

→「対流(熱伝達)」と「放射(熱伝達)」の2つで熱エネルギーが移動!!

→(2)と同じ考え方

[屋外側の壁表面→屋外での熱エネルギーの移動量]

= [対流による熱エネルギーの移動量] + [放射による熱エネルギーの移動量]

(= [対流熱伝達率] × [温度差] + [放射熱伝達率] × [温度差])

= [屋外側の壁の総合熱伝達率] × [屋外気温と屋外側の壁の表面温度との差]

$q_{outsidewall \rightarrow outside}$

$$= \alpha_{c,outside} \cdot (\theta_{s,outside} - \theta_{a,outside}) + \alpha_{r,outside} \cdot (\theta_{s,outside} - \theta_{a,outside})$$

$$= (\alpha_{c,outside} + \alpha_{r,outside}) \cdot (\theta_{s,outside} - \theta_{a,outside})$$

$$= \alpha_o \cdot (\theta_{s,outside} - \theta_{a,outside})$$

〈3〉

ここで,

α_o : 屋外側の壁の総合熱伝達率 [W/(m²・K)]

(4) 「壁の中」での熱エネルギーの移動

→固体と固体が接しているので, 熱伝導のみ!!

[壁面内のそれぞれの壁材での熱エネルギーの移動量] = [熱伝導率] ÷ [材料の厚さ] × [温度差]

$$\boxed{\text{材1}} \quad q_{insidewall \rightarrow 1.2} = \frac{\lambda_1}{x_1} \cdot (\theta_{s,insidewall} - \theta_{1.2}) \quad \langle 4 \rangle$$

$$\boxed{\text{材2}} \quad q_{1.2 \rightarrow 2.3} = \frac{\lambda_2}{x_2} \cdot (\theta_{1.2} - \theta_{2.3}) \quad \langle 5 \rangle$$

$$\boxed{\text{材3}} \quad q_{2.3 \rightarrow outsidewall} = \frac{\lambda_3}{x_3} \cdot (\theta_{2.3} - \theta_{s,outsidewall}) \quad \langle 6 \rangle$$

※(1)の図の「壁の中」では, **3つの部材**を考えているので, **3つの式**が出てくる

3 どうしたら全体を一つにまとめることができるか?を考えよう

(1) 今日の目標を今一度確認

「1 今日の目標」で考えた通り,

[壁の前後での熱エネルギーの移動量] = [] × [温度差] の形にしたい

→できれば, 熱伝導, 対流熱伝達, 放射熱伝達の時の式と同じ「かたち」で表したい!!

(2) 分割したそれぞれの部分での熱エネルギーの移動量の間にはどんな関係があるか?

定常状態(時間とともに変化しない, 安定した状態)の時:

分割したそれぞれの部分での熱エネルギーの移動量は**全て等しい**

さらに

壁全体(壁の前後, 室内外)での熱エネルギーの移動量とも**等しい**

※定常状態 ↔ 非定常状態

(3) 熱貫流率の求め方

[室内 → 室内側の壁表面での熱エネルギーの移動] = [壁面内のそれぞれの壁材での熱エネルギーの移動量]

= [屋外側の壁表面 → 屋外での熱エネルギーの移動量]

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

$$= q_{\text{inside} \rightarrow \text{outside}}$$

〈7〉

等式を解くと, 1つの式になる

⇒必ず自分で計算してみること!

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

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

〈8〉

[室内 → 屋外での熱エネルギーの移動量] = [熱貫流率] × [屋外気温と室内気温の差]

ただし,

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

〈9〉

K: 熱貫流率 [W/(m²・K)] → 壁の前後全体での熱エネルギーの移動の「容易さ」(楽さ加減)を表す

→この値が大きいと, 楽に(少ないパワーで)熱エネルギーの移動が可能

参考) 対流熱伝達率, 放射熱伝達率の単位: W/(m²・K)

熱貫流率を, もっと一般的に書くと,

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

※ただし, ここまでは, 1m^2 あたりの壁の話を考えていることに注意

(4) 熱貫流量の求め方

熱貫流量 (貫流熱量) は, **壁全面** についての話なので,

熱貫流量 (貫流熱量) $Q_{\text{inside} \rightarrow \text{outside}}$ [W] は,

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

ここで,

S_w : 壁の面積 [m^2]

つまり,

[熱貫流量 (貫流熱量)] = [熱貫流率] × [屋外気温と室内気温の差] × [壁の面積]

※「屋外気温」と「室内気温」だけを考えればよいので, とても便利

注)「断熱材」 (= 熱エネルギーの移動に力が必要 (温度差を大きくする必要あり)) はどれか? といわれて思い出したいこと

※(2)の「熱エネルギーの移動量が等しい」点について

陸上の 4×100m リレーを考えてみよう

第1走者, 第2走者, 第3走者, 第4走者のそれぞれが運ぶバトンは1つ

それぞれの走者が 100m 走るのにかかる時間はバラバラ

400m で運ばれる (最初と最後の) バトンも一つ

4 補足3つ

(1) 補足の1つ目 ⇒ 「熱エネルギーの移動の「しにくさ」や「大変さ」(難しさ加減)」

=「抵抗」で考えると

→補足: 配付資料 29~30 頁, 教科書 pp.42~43 (特に, p.43 の③熱貫流量の図) を参照

◎熱貫流量(貫流熱量) $Q_{inside \rightarrow outside}$ [W] は,

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

ここで,

R : 熱貫流抵抗 [(m²・K)/W] → 熱エネルギーの移動のしにくさ(大変さ, 難しさ加減)

(2) 補足の2つ目 ⇒ 「定常」と「非定常」

⇒ 「定常の時は, どこでも熱エネルギーの移動量は等しい」

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うと,
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)。

┌ 定常: 時間が経過しても状態は変化しない(特別な場合, 今日やったのはこちら(簡単))

└ 非定常: 時間の経過とともに状態も変化する(現実の世界はこちら, でも考えるのは難しい)

⇒ 定常のときは, どこでも熱エネルギーの移動量が等しい, とはどういうこと?

再び, ジュースとストローで考えると,

(3) 補足の3つ目 ⇒ 熱エネルギーの移動量の単位

単位時間あたりの「熱エネルギーの移動量」の単位: [W] (ワット)

- ・ $1\text{W} = 1\text{J/s}$ (1秒間に消費されたり, 使用されたりするエネルギー。[J] (ジュール) は熱エネルギーの単位。)
- ・ 「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
- ・ 座っている人間の発熱量は1人あたりおおよそ 100W 程度

【【補足】】

I 温度と熱移動 (教科書 pp.36~43)

5 熱貫流量 (教科書 pp.42~43)

「①熱貫流抵抗」の補足 (求め方)

- ・ 「室内→室内側の壁表面」での熱エネルギーの移動は, 「対流 (熱伝達)」と「放射 (熱伝達)」によるものがあるので,

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

ここで,

r_i : 室内側の壁の総合熱伝達抵抗 $[(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}] \rightarrow$ 熱エネルギーの移動の「大変さ」(しにくさ, 難しさ加減)

- ・ 「屋外側の壁表面→屋外」での熱エネルギーの移動も, 「対流 (熱伝達)」と「放射 (熱伝達)」によるものがあるので,

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

ここで,

r_o : 屋外側の壁の総合熱伝達抵抗 $[(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}] \rightarrow$ 熱エネルギーの移動の「大変さ」(しにくさ, 難しさ加減)

・「壁面内のそれぞれの壁材」での熱エネルギーの移動は、熱伝導のみなので、

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

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

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

ここで、

r_1, r_2, r_3 : 壁面内のそれぞれの壁材の熱伝導抵抗 $[(m^2 \cdot K)/W]$ → 熱エネルギーの移動の「大変さ」(しにくさ, 難しさ加減)

・定常状態の時には、それぞれの層を通過する熱エネルギーの移動量は全て等しいので、

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

の関係をを用いて、 $\langle 12 \rangle$ から $\langle 16 \rangle$ を整理すると、

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

ただし、

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

R : 熱貫流抵抗 $[(m^2 \cdot K)/W]$ → 熱エネルギー移動の「大変さ」(しにくさ, 難しさ加減)

→ 熱貫流抵抗は、熱貫流率(熱エネルギーの移動の「容易さ」(しやすさ, 楽さ加減))の逆数

この熱貫流抵抗を、もっと一般的に書くと、

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

【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) [書庫(4F), 525.1||Ka 56, 0000308034]

→ 第3版あり(2020 年2月, ISBN: 978-4-395-32146-9) [和書(2F), 525.1||Ka 56, 0000387929] [電子ブック, 5000001065]

[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) [和書(2F), 525.1||Ta 84, 0000300425]

→ 改訂4版もあり(2014 年2月, ISBN: 978-4-7530-1757-7) [シラバス環境(3F), 525.1||Ta 84, 0000375755]

[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-』(鉾井修一・池田徹郎・新田勝通, 朝倉書店, 2002 年3月, ¥3,800+税, ISBN: 4-254-26863-7) [和書(2F), 525.1||H 82, 0000263289]

建築環境工学 I (第3回目) [火曜日・08:40~10:10・中講義室2]

2025.04.22

環境共生学部・居住環境学専攻

辻原万規彦

復習プリント

学年: _____ 学籍番号: _____ 名前: _____

今日の講義の内容を, 自分なりに, 整理してください。まとめてください。

学年: _____ 学籍番号: _____ 名前: _____

演習問題

〈3-1〉 次の図の外壁 (面積 40 m^2) で, 外気温を 0°C , 室内気温を 20°C とした場合の熱貫流量を求めなさい。

$$\alpha_i = 9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

$$\alpha_o = 23 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

$$\text{モルタル: } \lambda_1 = 1.3 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$$

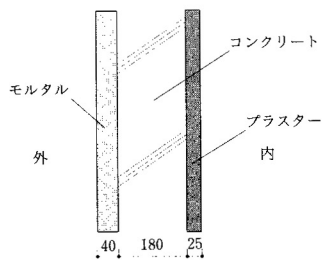
$$l_1 = 0.04 \text{ m}$$

$$\text{コンクリート: } \lambda_2 = 1.1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$$

$$l_2 = 0.18 \text{ m}$$

$$\text{プラスター: } \lambda_3 = 0.62 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$$

$$l_3 = 0.025 \text{ m}$$



演習問題

注) 上の問題文中の l_i を, 教科書では d_i , 配付資料では x_i としている。