

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？

⇒一度に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

※※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？

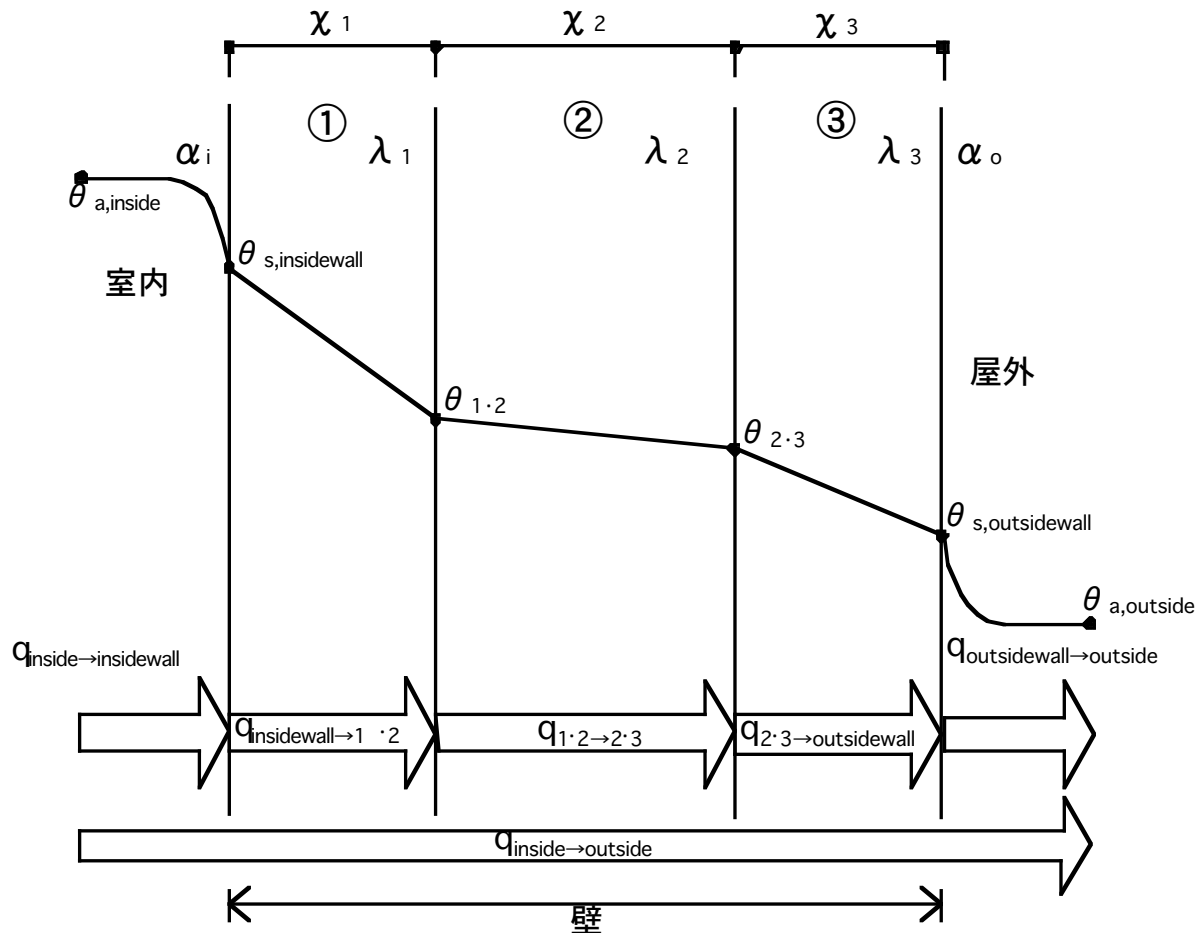
を考えたい。

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]

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

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

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)]

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

添え字は, 以下の通り

inside: 室内, *a*: 気温, *s*: 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]

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

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

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]

$$= [\text{熱伝導率}] \div [\text{材料の厚さ}] \times [\text{温度差}]$$

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

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

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

※ (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]

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

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!

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

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

[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,

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

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) 熱エネルギーが移動

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、1 m²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) $Q_{inside \rightarrow outside}$ [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]

[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)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 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)。

┌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, 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】】

1 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、

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

ここで、

r_i : 室内側の壁の総合熱伝達抵抗 [$\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$] → 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、

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

ここで,

r_o : 屋外側の壁の総合熱伝達抵抗 [(m²・K)/W] → 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,

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

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

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

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 [(m²・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,

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

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

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 [(m²・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」(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、

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

【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-』(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) [和書(2F), 525.1||H 82, 0000263289]

復習プリント

学年：_____ 学籍番号：_____ 名前：_____

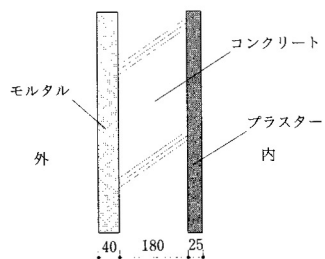
今日の講義の内容を，自分なりに，整理してください。まとめてください。

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。

$\alpha_i = 9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	$\alpha_o = 23 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
モルタル： $\lambda_1 = 1.3 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	$l_1 = 0.04 \text{ m}$
コンクリート： $\lambda_2 = 1.1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	$l_2 = 0.18 \text{ m}$
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。