

建築仕上技術者のための

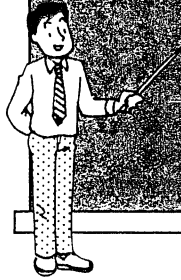
建築物理学講座

第3講「熱の移動」

田中 辰明

柚本 玲

(お茶の水女子大学名誉教授・土博) (お茶の水女子大学田中研究室・博士(生活科学))



はじめに

建築物の断熱計算や評価をするのに、伝熱計算や水蒸気拡散の計算が行われる。ここではドイツ工業規格DIN 4108-5「建築物の断熱」の方法に基づき解説を行う。

建築の伝熱計算には様々な定義があり、それぞれの状況に従って各種の計算が行われる、ここではそれらの計算の整理を行う。

1. 熱抵抗の計算

(1) 単層壁

熱抵抗 $1/\Lambda$ (単に熱伝導抵抗 R_a としても示される)は建築材料の厚さ s と熱伝導率 λ_R から次のように計算される。

$$\frac{1}{A} = \frac{s}{\lambda_R} \quad (1)$$

ここで $\frac{1}{A}$: 熱抵抗 ($\text{m}^2\text{K}/\text{W}$)

s : 厚さ (m)

λ_R : 熱伝導率 (W/mK)

(2) 多層壁

空気層を含まない多層壁では熱抵抗 $1/\Lambda$ は各層の建築材料の厚さ s_1, s_2, \dots, s_n とそれぞれの熱伝導率から次のように計算される。

$$\frac{1}{A} = \frac{s_1}{\lambda_{R1}} + \frac{s_2}{\lambda_{R2}} + \dots + \frac{s_n}{\lambda_{Rn}} \quad (2)$$

ここで $\frac{1}{A}$: 多層壁の熱抵抗 ($\text{m}^2\text{K}/\text{W}$)

2. 熱貫流抵抗の計算

ある建築部材の熱貫流抵抗 $1/k$ (R_k としても表示される)の計算にあたっては、熱抵抗 $1/\Lambda$ に熱伝達抵抗 $1/\alpha_i$ と $1/\alpha_a$ (R_i と R_a としても表示される)を加味して次式により計算される。

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\Lambda} + \frac{1}{\alpha_a} \quad (3)$$

ここで $\frac{1}{k}$: 建築部材の熱貫流抵抗 ($\text{m}^2\text{K}/\text{W}$)

$\frac{1}{\alpha_i}$: 室内側の表面熱伝達抵抗 ($\text{m}^2\text{K}/\text{W}$)

$\frac{1}{\Lambda}$: 単層壁あるいは多層壁の熱抵抗($\text{m}^2\text{K}/\text{W}$)

$\frac{1}{\alpha_a}$: 外気側の表面熱伝達抵抗 ($\text{m}^2\text{K}/\text{W}$)

3. 熱貫流率の計算

(1) 単層壁ならびに多層壁

ある建築部材の熱貫流率 k は式(3)の逆数として次式から求められる。

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\Lambda} + \frac{1}{\alpha_a}} \quad (4)$$

ここで k : 熱貫流率 ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)

$\frac{1}{\alpha_i}$: 室内側の表面熱伝達抵抗 ($\text{m}^2\text{K}/\text{W}$)

$\frac{1}{\Lambda}$: 単層壁あるいは多層壁の熱抵抗 ($\text{m}^2 \text{K}/\text{W}$)
 $\frac{1}{\alpha_a}$: 外気側の表面熱伝達抵抗 ($\text{m}^2 \text{K}/\text{W}$)

ここで q : 熱流束 (W/m^2)
 k : 熱貫流率 ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
 θ_{Li} : 室内空気温度 (Kあるいは℃)
 θ_{La} : 外気空気温度 (Kあるいは℃)

(2) 多数の建築部材よりなる場合

多数の建築部材からなる場合の平均の熱貫流率 k はそれぞれの建築部材の熱貫流率の熱貫流抵抗を k_1, k_2, \dots, k_n とその面積の割合 $A_1/A, A_2/A, \dots, A_n/A$ から次式によって計算される。

$$k = k_1 \frac{A_1}{A} + k_2 \frac{A_2}{A} + \dots + k_n \frac{A_n}{A} \quad (5)$$

ここで k : 平均熱貫流率 ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
 k_1, k_2, \dots, k_n : 各建築部材の熱貫流率 ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
 A_1, A_2, \dots, A_n : 各建築部材の面積 (m^2)
 A : それぞれの建築部材面積 A_1, A_2, \dots, A_n の合計 (m^2)

多数の建築部材からなる場合の平均の熱抵抗 $1/\Lambda$ は式(5)の平均の熱貫流率を用い次式から求められる。

$$\frac{1}{\Lambda} = \frac{1}{k} - \left(\frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\alpha_a} \right) \quad (6)$$

ここで $\frac{1}{\Lambda}$: 単層壁あるいは多層壁の熱抵抗 ($\text{m}^2\text{K}/\text{W}$)
 $\frac{1}{k}$: 建築部材の熱貫流抵抗 ($\text{m}^2\text{K}/\text{W}$)
 $\frac{1}{\alpha_i}$: 室内側の表面熱伝達抵抗 ($\text{m}^2\text{K}/\text{W}$)
 $\frac{1}{\alpha_a}$: 外気側の表面熱伝達抵抗 ($\text{m}^2\text{K}/\text{W}$)

4. 熱流束の計算

外壁を挟んで室内空気温度が θ_{Li} 、外気側空気温度が θ_{La} の場合、定常状態では熱流束 q となる。熱流束は次式により計算される。

$$q = k(\theta_{Li} - \theta_{La}) \quad (7)$$

5. 温度の計算

(1) 室内側表面温度

外壁の室内側表面温度は次式により計算される。

$$\theta_{Oi} = \theta_{Li} - \frac{1}{\alpha_i} q \quad (8)$$

ここで θ_{Oi} : 室内側表面温度 (Kあるいは℃)
 θ_{Li} : 室内空気温度 (Kあるいは℃)
 $\frac{1}{\alpha_i}$: 外壁の室内側表面熱伝達抵抗 ($\text{m}^2 \text{K}/\text{W}$)
 q : 熱流束 (W/m^2)

(2) 外気側表面温度

外壁の外表面温度は次式により計算される。

$$\theta_{Oa} = \theta_{La} - \frac{1}{\alpha_a} q \quad (9)$$

ここで θ_{Oa} : 室内側表面温度 (Kあるいは℃)
 θ_{La} : 室内空気温度 (Kあるいは℃)
 $\frac{1}{\alpha_a}$: 外壁の外気側表面熱伝達抵抗 ($\text{m}^2\text{K}/\text{W}$)
 q : 熱流束 (W/m^2)

(3) 境界面温度

境界面温度 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$ (熱流の方向に数えて) は、それぞれつぎのように算定される。

$$\theta_1 = \theta_{Oi} - \frac{1}{A_1} q \quad (10)$$

$$\theta_2 = \theta_1 - \frac{1}{A_2} q \quad (11)$$

\vdots

$$\theta_n = \theta_{n-1} - \frac{1}{A_n} q \quad (12)$$

ここで $\theta_1 \dots \theta_n$: 多層壁の境界面温度 (Kあるいは℃)
 $\theta_{Oi} \dots \theta_{n-1}$: 室内側表面温度 (Kあるいは℃)

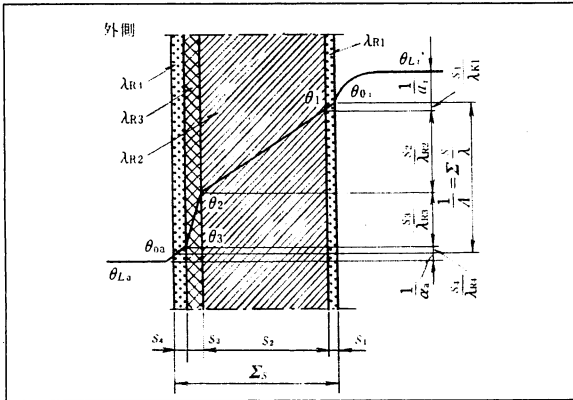


Fig. 1 各層の厚さ、熱伝導率の違いによる多層壁内の温度分布

$$\frac{1}{A_1} \dots \frac{1}{A_n} : \text{外壁の熱伝導抵抗 (m}^2\text{K/W)}$$

$$q : \text{熱流束 (W/m}^2\text{)}$$

各層の厚さ、熱伝導率の違いによる多層壁内の温度分布をFig. 1に示した。

6. 外壁内表面での結露防止

外壁内表面に結露を発生させないために必要な熱抵抗 $1/\Delta$ は次式で算定される。

$$\frac{1}{A} = \frac{1}{\alpha_i} \cdot \frac{\theta_{Li} - \theta_{La}}{\theta_{Li} - \theta_s} - \left(\frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\alpha_o} \right) \quad (13)$$

- ここで θ_{O_i} : 室内側表面温度 (Kあるいは℃)
 θ_{L_i} : 室内空気温度 (Kあるいは℃)
 $\frac{1}{\alpha_i}$: 外壁の室内側表面熱伝達抵抗 (m²K/W)
 q : 熱流束 (W/m²)

7. 円筒の壁

Fig. 2に多層の円筒の壁の温度状況を示す。

(1) 多層の円筒の壁の熱流

$$Q = \frac{2\pi L \Delta t}{\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2} + \dots + \frac{1}{\lambda_n} \ln \frac{d_{n+1}}{d_n}} \quad (14)$$

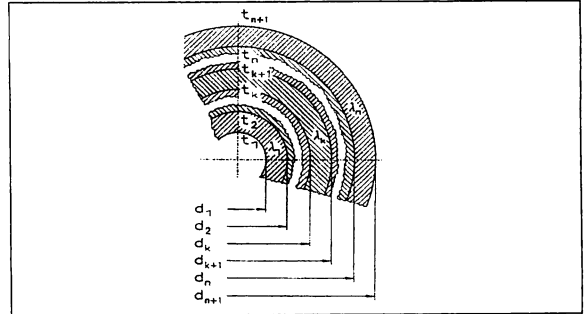


Fig. 2 多層の円筒の壁

- ここで Q : 熱流 (W)
 L : 円筒の長さ (m)
 d : 直径 (m)
 Δt : 温度差 (K)
 λ : 熱伝導率 (W/mK)

(2) 多層の円筒壁の温度状況

各層の温度状況は別々に計算できる。

$$\Delta t_k = \frac{Q}{2\pi L \lambda_k} \ln \frac{d_{k+1}}{d_k} \quad (15)$$

- ここで Δt_k : 温度差 (Kあるいは℃)
 Q : 熱流 (W)
 L : 円筒の長さ (m)
 d : 直径 (m)
 λ : 熱伝導率 (W/mK)

(3) 各層間の温度

$$t_{k+1} = t_k - \frac{Q}{2\pi L \lambda_k} \ln \frac{d_{k+1}}{d_k} \quad (16)$$

例 $t_2 = t_1 - \frac{Q}{2\pi L \lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} \quad (17)$

ここで $t_1, t_2, \dots, t_k, t_{k+1}$: 温度 (℃)

8. 接触温度¹⁾

(1) 熱侵入率

2つの温度の異なる材料が接すると、境界で接触温度が生じる。接触温度は2つの材料の熱侵入率に依存する。

$$b = \sqrt{\lambda \rho c} = \frac{\lambda}{\sqrt{a}} \quad (18)$$

ここで b : 熱侵入率 ($Ws^{0.5}/mK$)
 λ : 熱伝導率 (W/mK)
 c : 比熱 (J/kgK)
 ρ : 密度 (kg/m^3)
 a : 温度伝播率 (m^2/s) $a = \lambda / (c\rho)$

(2) 接触温度

$$t_k = \frac{b_1 t_1 + b_2 t_2}{b_1 + b_2} \quad (19)$$

ここで b_1, b_2 : 熱侵入率 ($Ws^{0.5}/mK$)
 t_1, t_2, \dots, t_k : 温度 ($^{\circ}C$)

Table1 各種材料の熱侵入率b

材 料	b(kWs ^{0.5} /mK)	材 料	b(kWs ^{0.5} /mK)
ガラス繊維	0.06	コンクリート	1.8…2.2
コルク	0.10	ガラス	1.3…1.5
木材(トウヒ)	0.1…0.5	たたき	1.7
ゴム	0.6	レンガ壁	1.1…1.4
大理石	2.5	鋼、鉄、鋳鉄	14.0
人間の皮膚	1.0…1.3	銅	36.0

例題)

人間の手 ($t_1=30^{\circ}C$ 、 $b_1=1.1kWs^{0.5}/mK$)が一方は5 $^{\circ}C$ の鉄板 ($t_2=5^{\circ}C$ 、 $b_2=14.0kWs^{0.5}/mK$)、一方はコルク板 ($t_2=5^{\circ}C$ 、 $b_2=0.10kWs^{0.5}/mK$)に接する。接触温度は何 $^{\circ}C$ か。

$$a) \quad t_k = \frac{1.1 \cdot 30 + 14.0 \cdot 5}{1.1 + 14.0} = 6.8$$

$$b) \quad t_k = \frac{1.1 \cdot 30 + 0.10 \cdot 5}{1.1 + 0.10} = 27.9$$

結果、鉄板に接する手は皮膚温度30 $^{\circ}C$ よりはるかに低い6.8 $^{\circ}C$ であるので冷たく感じる。

9. 外壁隅角部の内表面温度¹⁾

長い外壁の内表面温度は次式で求められる(Fig. 3参照)。

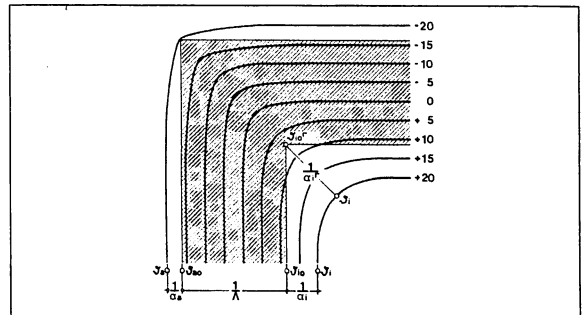


Fig.3 外壁隅角部の内表面温度

$$\theta_{io} = \theta_i - \frac{\theta_i - \theta_a}{\frac{1}{\alpha_a} + \frac{1}{\Lambda} + \frac{1}{\alpha_i}} \cdot \frac{1}{\alpha_i} \quad (20)$$

ここで θ_{io} : 外壁内表面温度 ($^{\circ}C$)
 θ_i : 室内空気温度 ($^{\circ}C$)
 θ_a : 外気温度 ($^{\circ}C$)
 α_a : 外気側熱伝達率 (W/m^2K)
 α_i : 室内側熱伝達率 (W/m^2K)
 Λ : 熱コンダクタンス (W/m^2K)

外壁隅角部の内表面は室内空気との熱の授受が、外表面と外気との熱の授受に比べて少ない。また隅角部の室内側表面熱伝達抵抗は外側の表面熱伝達抵抗に比べて大きくなる。Schild氏らは一般平面の内側表面熱伝達抵抗の2.5倍になるとした²⁾。すなわち

$$\frac{1}{\alpha_i^r} = 2.5 \cdot \frac{1}{\alpha_i} \quad (21)$$

従って隅角部の内表面温度は次式で表され、室内空気温度を20 $^{\circ}C$ 、外気温度を20 $^{\circ}C$ とした場合の外壁内温度分布はFig.3のようになる。

$$\theta_{io}^r = \theta_i - \frac{\theta_i - \theta_a}{\frac{1}{\Lambda} + 2.5 \cdot \frac{1}{\alpha_i}} \cdot \frac{1}{\alpha_i} \quad (22)$$

<文献>

- 1) H. Recknagel, E. Sprenger und E. R. Schramek; Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik; Oldenbourg Industrieverlag (2006)
- 2) E. Schild, H. F. Casselmann und G. Dahmen, Pohlenz; Bauphysik, Planung und Anwendung; Vieweg (1990)