

熱環境（温度と湿度）の測定

11. 放射率に関する補足

次ページ以降を参照（出典：参考文献 [1], pp.46～49）。

12. 参考文献（再掲）（〔 〕内は、熊本県立大学附属図書館所蔵情報）

[1] 『環境工学教科書 第二版』（環境工学教科書編集委員会編 彰国社 2000年8月、¥3,675、ISBN：4-395-00516-0）〔開架2, 519；KA 56, 000185180、ただし第一版〕

13. 参考 URL（再掲）

1) 講義資料のダウンロード（<http://www.pu-kumamoto.ac.jp/m-tsuji/kougi.html/jikkenn.html/kyojikkenn.html>）

レポートの締め切りは、10月25日（金）。遅れないように提出すること。

質問・レポートの提出先は、

辻原研究室（環境共生学部棟旧棟（生活科学部棟）4階西南角）まで

（電話：096-383-2929（内線492）、E-mail：m-tsuji@pu-kumamoto.ac.jp）

もしくは、

香川助手室（環境共生学部棟旧棟（生活科学部棟）4階南側中央付近）まで

（電話：096-383-2929（内線482）、E-mail：hirakawa@pu-kumamoto.ac.jp）

C_1 ：定数 $=0.3741 \times 10^{-15}$ [W/m²]

C_2 ：定数 $=0.0143$ [m・K]

λ ：波長 [m]

T ：完全黒体の絶対温度 [K]

図1-6の中から1本の線(ある温度 T)を取り出し、全波長($\lambda: 0 \sim \infty$)が持つエネルギー E_b を求めため積分すると式(1.12)となる。

$$E_b = \int E_{b,\lambda} d\lambda = \delta \times T^4 = C_b \times \left(\frac{T}{100}\right)^4 \quad (1.12)$$

放射の理論的研究を行い、量子力学への道を開いたプランク(1858-1947、独の理論物理学者でノーベル賞受賞)によると、物体から放射される熱線は物体の分子運動に端を発した電磁波で、分子運動がゼロ、すなわち絶対零度でない限り熱線を放射している。同じ温度の物体同士で比べると、艶消して真っ黒い表面を持つ物体ほど熱線を放射する能力が高い。そのうちで、放射能力が最大の割合を示す理想的な表面状態を有する物体を完全黒体という。おそらく、艶消して真っ黒い表面ほど熱線を放射しやすいというのはピンとこないかもしれないが、逆に、艶消して真っ黒い表面ほど熱線を吸収しやすいという方は理解されよう。この関係は後述するように「完全黒体で表面温度が等しいときの、熱線の放射しやすさ(放射率： ϵ [-], 0～1の値)と吸収しやすさ(吸収率： a [-], 0～1の値)は等しい」というキルヒホッフの法則があって、これを援用すると、熱線を完全に吸収($a=1$)する理想的な艶消して真っ黒い表面は、熱線を完全に理想的に放射($\epsilon=1$)するということが導きだされる。

一方、プランクによると絶対温度 T [K] の完全黒体から放射される熱線は、スペクトル(波長 λ [m])が連続した光線と赤外線であり、絶対温度 T と波長 λ が決まれば熱線のエネルギー $E_{b,\lambda}$ は式(1.11)で表される。式(1.11)を絶対温度 T をパラメーターとして図示すると図1-6のようになる。

$$E_{b,\lambda} = \frac{C_1 \times \lambda^{-5}}{\exp[C_2/(\lambda \times T)] - 1} \quad (1.11)$$

δ ：ステファン・ボルツマンの定数 $=5.67 \times 10^{-8}$ [W/m²・K⁴]

C_b ：黒体の放射定数 $=5.67$ [W/m²・K⁴]

結局、完全黒体から放射される熱線のエネルギー E_b は図1-7に示すように、その絶対温度 T の4乗に比例する。この法則をステファン・ボルツマンの法則、その比例定数 δ をステファン・ボルツマンの定数、 C_b を黒体の放射定数と呼んでいる。図1-6で見るとわかるように式(1.11)はエネルギーの最大点を持った、絶対温度 T をパラメーターとする曲線群である。式(1.11)を微分してその値をゼロとする、すなわち、傾きゼロを示す波長 λ_{\max} において放射エネルギーは最大となる。この λ_{\max} と絶対温度 T の積の値は式(1.13)に示すように一定の値を示す。この関係をウィーンの変移則という。

$$\lambda_{\max} \times T = 0.002885 \text{ [m} \cdot \text{K]} = \text{一定} \quad (1.13)$$

式(1.13)は絶対温度 T が高くなると波長 λ_{\max} は短くなることを示している。これは「電気ヒーターへの入力電力を増大して温度を上昇させると、暗赤だった発熱線は徐々に鮮やかな赤に変色し、さらには白っぽい赤へと変化する」など、日常経験する事例でも理解できよう。光の分野ではこの関係を「色温度」と称して扱っている。

通常使用される物体は完全黒体よりも少ないエネ

ルギー E_c を放射している。その中でも図1-8に示すように、 E_b と E_c の比がいずれの波長においても変化しない物体を灰色体とっており、式(1.14)の関係がある。

$$\frac{E_{c,\lambda}}{E_{b,\lambda}} = \frac{E_c}{E_b} = \epsilon_c \quad (1.14)$$

ϵ_c を灰色体の放射率という。前述した完全黒体に対するキルヒホッフの法則も式(1.14)を介して灰色体にも適用範囲が拡大され、表面温度(波長)が等しいときの放射率 ϵ_c と吸収率 a_c は等しいこととなる。この関係を温度 T_b [K] の完全黒体面と温度 T_c [K] の灰色体面が向かい合っている状況を取り、図1-9で概説する。放射率 ϵ_c の灰色体から出た放射エネルギー E_c は、完全黒体表面 ($a_b = 1$) で完全に吸収される。一方、放射率1の完全黒体から出た放射エネルギー E_b は、灰色体表面 ($a_c < 1$) で $a_c \cdot E_b$ だけ吸収され、 $(1 - a_c) \cdot E_b$ だけ反射

される。しかしその反射分 $(1 - a_c) \cdot E_b$ は再び完全黒体に至ると、今度はすべて吸収される。結局、灰色体は $E_c - a_c \cdot E_b$ だけ放射エネルギーを失う。ここで $T_c = T_b$ と仮定すると、温度差がないので熱移動量はゼロ、すなわち、 $E_c - a_c \cdot E_b = 0$ を経て式(1.15)となる。これは灰色体の定義式(1.14)であり、結局、完全黒体および灰色体において、表面温度が等しい場合の放射率 ϵ と吸収率 a は等しいことを意味している。

$$\frac{E_c}{E_b} = a_c = \epsilon_c \quad (1.15)$$

われわれが扱う通常の建材は実用上すべて灰色体と見なせるので、表面温度 T_i すなわち、式(1.14)から放射される熱線の波長が等しいときは $\epsilon_i = a_i$ として扱ってもよい。もちろん、表面温度が等しくない、あるいは灰色体でない場合には $\epsilon_1 \neq a_2$ であるが、温度差が大きくかけ離れていない限り、実用上は $\epsilon_i \approx a_i$ として扱われることが多い。ただし注意すべきは、可視光線を含む短波長成分が支配的な日射による放射を扱う場合は、色の白黒による吸収率の差異が大きいため、日射(短波長)に対する吸収

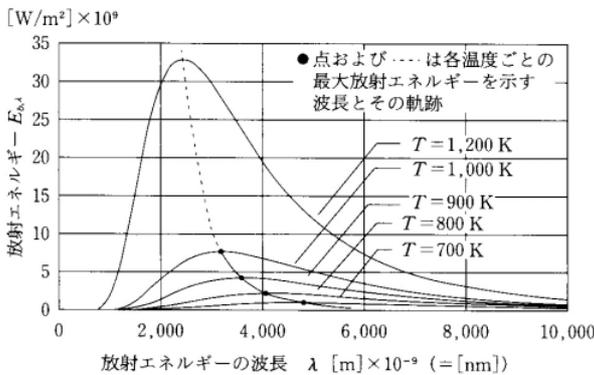


図1-6 波長および温度による放射エネルギーの波長(完全黒体)

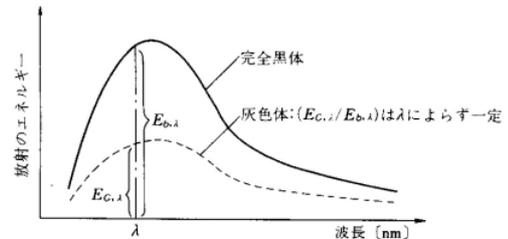


図1-8 放射率 ($\epsilon_c = E_{c,\lambda}/E_{b,\lambda}$) の概念図

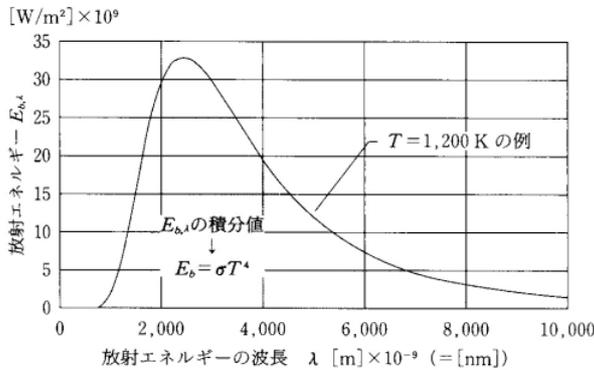


図1-7 完全黒体からの放射エネルギー

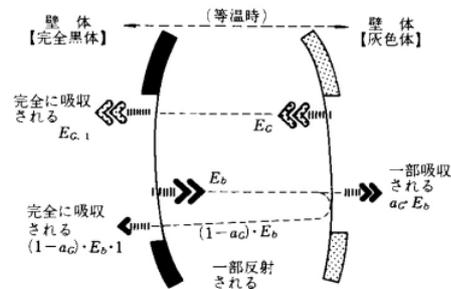


図1-9 放射率 $\epsilon =$ 吸収率 a (等温時) の概念図

率の値を用いる必要がある。一方、長波長成分(赤外線)が支配的な室内では、色の白黒、すなわち、長波長成分に対する放射率や吸収率の差異は無視できると考えるとよい。例えば、屋外で白いシャツを着た人と黒いシャツを着た人の日射の受け方(暑さ)の差異は顕著であるが、室内では白シャツ、黒シャツが暑さを左右するほどではないなど、日常経験する事例でも理解できよう。

表1-2に各種建材等の放射率、吸収率の値を示す。波長により性質が異なる物体の典型例にガラスがある。ガラスは可視光線を透過(透明)が赤外線には不透明である。ガラス張りの温室を考えてみる。可視光線の形でガラスを透過した日射は土や植物を照射する。日射の一部は土や植物の表面で可視光線のまま反射されるが、一部は土や植物に吸収され、その温度を上昇させる。温度が上昇した土や植物からは周囲へ熱を流出する。流出熱の一部は対流で温室内の空気を暖めるが、一部は赤外線の形(土や植物の温度は低いので式(1.13)から長波長)で放射される。しかし、赤外線に対して不透明であるガラスに

よって遮られ、ガラス温度を上昇させる形で温室内に熱を残留させる。一方、土や植物の表面で反射した可視光線の一部は他の土や植物表面を照射し、同様のプロセスを繰り返す。中にはガラスを透過して温室外に散り去る可視光線もある。このようにして温室内の温度は上昇する。しかし、現実には反射、吸収、放射各成分の行方の追及は一般に困難で正確に求めることは難しい。

そこで、通常の室内における放射は長波長域が主で、壁面等の放射率も黒体に近いという仮定から、実用上は $\epsilon \approx a$ として扱われる。図1-10に示す2壁体間の熱授受 $q_{放射}$ は式(1.16)で表されるが、 $\epsilon_1 \approx a_1$ 、 $\epsilon_2 \approx a_2$ を援用するといわゆる4乗則で表され式(1.17)となる。式(1.17)と線形化された式(1.10)(再掲)は等しいので、 α_r は式(1.18)で表せる。式(1.18)中の k の度合いを図1-11に示すが、室内壁面等への適用を考えると通常温度域では 273°C のゲタが T_1 、 T_2 に反映し、 k を定数として扱って大差ないことを示している。

結局、室内壁面の放射率 $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 0.95 [-]$,

表1-2 各種材料の放射率と日射吸収率³⁾(ASHRAE guide book 1969より)

等級	材 料	常 温 用	日射吸収率 α
		放 射 率 ϵ	
0	完全黒体	1.0	1.0
1	大きな空洞にけられた小孔	0.97~0.99	0.97~0.99
2	黒色非金属面 (アスファルト・スレート・ペイント・紙)	0.90~0.98	0.85~0.98
3	赤れんが・タイル・コンクリート・石・さびた鉄板暗色ペイント (赤・褐・緑など)	0.85~0.95	0.65~0.80
4	黄および鈍黄色れんが・石・耐火れんが・耐火粘土	0.85~0.95	0.50~0.70
5	白または淡クリームれんが・タイル・ペイント・紙・プラスター・塗料	0.85~0.95	0.30~0.50
6	窓 ガ ラ ス	0.90~0.95	大部分は透過
7	光沢アルミニウムペイント・金色またはブロンズペイント	0.40~0.60	0.30~0.50
8	鈍色黄銅・銅・アルミニウム・トタン板・磨き鉄板	0.20~0.30	0.40~0.65
9	磨き黄銅・銅・モネルメタル	0.02~0.05	0.30~0.50
10	よく磨いたアルミニウム・ブリキ板・ニッケル・クローム	0.02~0.04	0.10~0.40

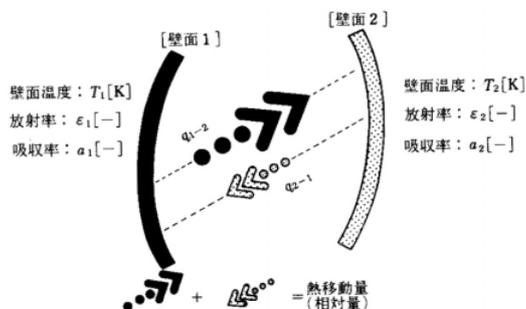


図1-10 2壁体間の放射による熱授受概念図

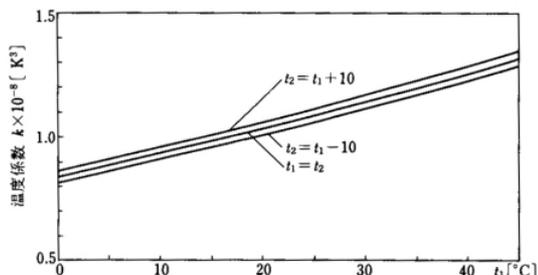


図1-11 温度域によるk値の移行

$\delta = 5.67 \times 10^{-8}$ [W/m²・K⁴], $k = 1.1 \times 10^8$ [K³]
から、設計時の慣用値として $\alpha_r \approx 4.7 \sim 5.8$ [W/(m²・K)] が用いられている。

$$\begin{aligned}
 q_{\text{放射}} &= \text{面1が放射するエネルギー} (\epsilon_1 \cdot \delta \cdot T_1^4 \cdot S_1) \\
 &\quad \text{のうちで面2に吸収される割合} (\varphi_{1 \rightarrow 2} \cdot a_2) \\
 &\quad - \text{面2が放射するエネルギー} (\epsilon_2 \cdot \delta \cdot T_2^4 \cdot S_2) \\
 &\quad \text{の中で面1に吸収される割合} (\varphi_{2 \rightarrow 1} \cdot a_1) \\
 &= q_{1 \rightarrow 2} - q_{2 \rightarrow 1} = \epsilon_1 \cdot \delta \cdot T_1^4 \cdot S_1 \cdot \varphi_{1 \rightarrow 2} \cdot a_2 - \epsilon_2 \cdot \delta \cdot T_2^4 \cdot S_2 \cdot \varphi_{2 \rightarrow 1} \cdot a_1 \quad (1.16)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 q_{\text{放射}} &= q_{1 \rightarrow 2} - q_{2 \rightarrow 1} = \epsilon_1 \cdot \epsilon_2 \cdot \delta \cdot (T_1^4 - T_2^4) \cdot S_1 \cdot \varphi_{1 \rightarrow 2} \\
 &= \epsilon_1 \cdot \epsilon_2 \cdot \delta \cdot (T_1^4 - T_2^4) \cdot S_2 \cdot \varphi_{2 \rightarrow 1} \quad (1.17)
 \end{aligned}$$

$$q_{\text{放射}} = \alpha_r \times \Delta\theta \times S_l \times \varphi_{1 \rightarrow 2} = \alpha_r \cdot (t_1 - t_2) \cdot S_1 \cdot \varphi_{1 \rightarrow 2} \quad (1.10) \text{ (再掲)}$$

$$\alpha_r = \epsilon_1 \cdot \epsilon_2 \cdot \delta \cdot k = \epsilon_1 \cdot \epsilon_2 \cdot \delta \cdot (T_1^3 + T_1^2 \cdot T_2 + T_1 \cdot T_2^2 + T_2^3) \quad (1.18)$$

T : 面の温度 [K] ($t + 273^\circ\text{C}$)

S : 面の面積 [m²]

ϵ : 面の放射率 [-]

a : 面の吸収率 [-]

α_r : 放射熱伝達率 [W/(m²・K)], 設計時の慣用値 4.7～5.8

φ : 形態係数 [-] (見え方の度合いを示す数値で 0～1 の値)

1,2 : 面1, 面2を表すサフィックス

1→2 : 面1から面2を見た場合