熱とその伝達

１．熱平衡と温度
2. 熱伝達の3形態
３．熱伝導
４．対流
５．熱放射(熱輻射）

R. Okamoto (Emeritus Prof. of Kyushu Inst. of Tech.)
Filename=heat-transfer-summary20151208A.ppt

１．熱平衡と温度

温度： 物体の熱さ、冷たさの相対的な度合いを示す物理量

摂氏温度をtとすると、絶対温度 Tは次のように定義される。

$T= t+273.15$ (注意：科学、技術の文献では，文字tは時間という変数として使われることが多い。)

温度の異なる2つの物体（系）を接触させると徐々に熱が移動し温度が変化する。そして、十分な時間が経過すると2つの物体の温度が同じになり、熱の移動が止まる。この状態を熱平衡状態といい、２つの物体は互いに熱平衡にあるという。

熱力学の第０法則

3つの物体A, B, Cがを考える。AとBが熱平衡にあり、BとCが熱平衡にあれば、AとCを直接接触させるとき、必ずお互いに熱平衡状態になっている。

熱と熱容量

・高温の物体と低温の物体を接触させると、前者は冷え、後者は暖まる.
このとき，高温の物体から低温の物体へ熱が移動したという.

・自然な状態では（＝外部から仕事をしないなど），熱は高温の物体から低温の物体に移動する.

・熱量の単位は1カロリー［cal］や1キロカロリー［kcal］が使われる.
1calとは水1gの温度を1度だけ上げるのに必要な熱量である.

1 kcal=1,000 cal=10^3 cal

・熱量は力学的仕事と等価である．すなわち，熱量Qは力学的仕事Wとは

$W=JQ$

という関係が成立する．ここで，定数J（斜体文字）は熱の仕事等量と呼ばれる定数であり、約J=4.19 J/calである.（正確には，J=4.1855 J/cal ）.
仕事(=エネルギー）の単位J(立体文字）
と混同しないこと. 従って，公式風に記すと次のようになる.

1 cal = 4.19 J, 1J=0.239 cal

以下、熱量の単位は，特にことわらない限り，J(ジュール)で表す。

2. 熱伝達の3形態

２つの物体の間、あるいは1つの物体の内部に温度差がある場合、
高温の部分から低温の部分に熱の伝達が起こる。

熱伝達の3つの形態（方法）

A　対流(convection)
B　熱伝導（thermal conduction）
C　熱放射（熱輻射,radiation）

熱伝達の事例

１）室内の暖房，冷却（エアコン）における室内の温度分布（対流），
　省エネ目的の保温断熱性の高い住宅
　衣服の重ね着，羽毛布団，羽毛ジャケット：熱伝導と熱放射
２）人体の体温調節についての血液循環と血管の膨張収縮（対流，熱伝導）
３）冷え性体質の人体における腰痛の原因のひとつとしての筋肉緊張（熱伝導）
４）地表と大気圏における気象現象（熱放射，熱伝導，対流）
５）原子炉：核燃料ペレットで発生した核エネルギーの冷却水への伝達（熱伝導，強制対流）
６）原発の過酷事故における，炉心溶融物から周囲への熱伝達，対流，熱放射
７）蒸気爆発の仕組みとしての微粒子化による熱伝達速度の増加
８）核爆発の初期過程における熱放射エネルギーの相対的重要性

3.対流

・流体のかたまりが加熱されると，一般には膨張する．膨張により浮力の増加が発生するために，鉛直上方に移動する．これが対流である．

・対流は物質自身の移動を伴う熱の伝達である．

・浮力とは重力が原因で起きる現象であるから、対流は重力のもとで起きる現象である。（例外：無重力状態でも物質の濃度差があると対流が起こる。）

・加熱されて浮き上がった部分は周囲よりも温度が高いので、周囲に熱伝導によって熱を加える。

・温度差による浮力のみに起因する対流を自然対流または自由対流という。

・流体をポンプなどで強制的に流動させる場合を強制対流という。

備考：対流を循環と呼ぶこともある。その場合、自然対流を自然循環、強制対流を強制循環と呼ぶ。

参考：対流の経験的法則

固体の表面温度をT_w,流体の温度をT_f、固体と流体が接触する面積Aの場合、Δt時間に、固体表面を通過する熱エネルギーΔQとすると、熱伝達率（ΔQ/Δt）は両者の温度差と表面積Aに比例する：

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} \propto (T_w - T_f)A$$

$$\rightarrow \frac{\Delta Q}{\Delta t} = h(T_w - T_f)A$$

$$\rightarrow q \equiv h(T_w - T_f):\text{熱流束(thermal flux)}$$

次元 $[q] = \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{m^2K}}$ 熱流束＝単位面積、単位温度あたりに通過する熱エネルギー

h＝熱伝達係数（heat transfer coefficient）

<u>hは非常に複雑な性質の係数であり、物質に固有の値（物性値）ではない。</u>

次元 $[h] = \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2K}} = \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{s \cdot m^2K}}$

自然対流の不思議さ

温度差が小さいときには上昇・下降がランダムだったのが、ある温度差に達すると、巨視的な秩序をもった流れのパターンが自発的に現れる。

ある容器に入った流体が容器の底から加熱されたとする。容器上部と下部には一定の温度差が保たれているとする。流体下部は密度が低くなり、浮力によって浮き上がる。反対に、流体上部の密度の高い部分は相対的に沈下しようとする。上下の温度差が小さいときには、流体の上昇しようとする集団と下降しようとする集団がぶつかり、効率的に移動できにくい状態になる。ところが、上下の温度差が大きくなると、上昇・下降の運動が頻繁に起こる。また、移動しようとする部分があると、近傍の流体は分子間引力によって同じ方向に運動しようとする。そうして、上下温度差があるレベルに達すると、運動方向を合わせあう傾向が巨視的な流れの発展をもたらす。

・対流は温度が高くなったり低くなった集団が集団移動してエネルギーを伝えるので、熱を速く伝える現象と言える。

・やかんでお湯を沸かすとき、熱伝導だけでは水はなかなか沸騰しない。水の中に対流ができるから速く沸く。

・部屋の室内の空気を暖めようとするとき、熱伝導率の低い空気でも強制循環してやれば、部屋全体が効率的に温まる。逆に、冷やそうとするとき、強制循環してやれば、部屋全体が効率的に冷やせる。

・炎の周囲には空気の対流が起こる。これにより炎には新鮮な空気が周囲から流れ込み、燃焼した空気に置き換わり続けるので、燃焼が効率的に進む。

4．熱伝導とその経験的法則

高温部の分子（原子）の激しい熱運動のエネルギーが、分子間力（原子間力）により、次々に隣の分子（原子）に伝えられて低温部まで到達することによる熱の伝達が、接触している物体間の熱伝導である。

温度T_LとT_H（$T_L < T_H$)の２つの物体を、長さL, 断面積(area)Aの棒で結ぶと、時間Δtの間に,棒を伝わる熱量ΔQ

$$\Delta Q \propto A \frac{(T_H - T_L)}{L} \Delta t$$

$$\rightarrow \frac{\Delta Q}{\Delta t} = kA \frac{(T_H - T_L)}{L}, (k : \text{熱伝導率})$$

熱伝導率は物質に固有の値である。

熱の伝達率（ΔQ/Δt）は表面積，温度差に比例し，長さに反比例する．

X方向の温度分布が与えられている場合の表現

$$\frac{dQ}{dt} = -kA \cdot \frac{dT}{dx}, (\frac{dT}{dx} : \text{熱勾配})$$

マイナス符号は熱が高温部分から低温部分に移動することを意味する。

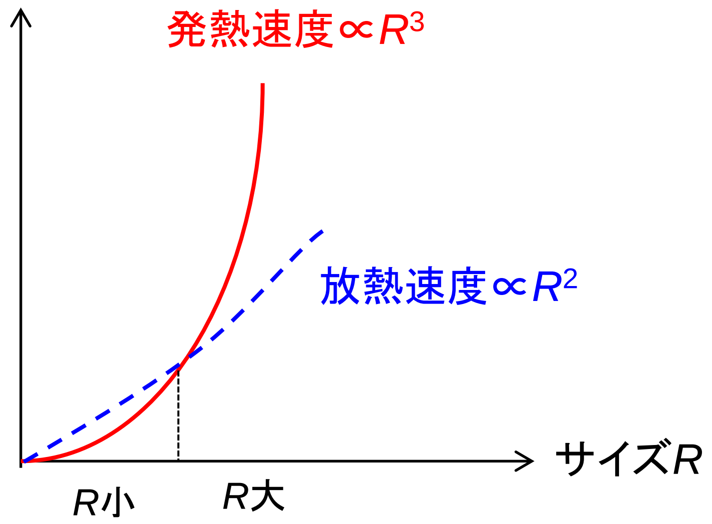
熱伝導は物質を構成する原子分子の運動エネルギーが移動することを通じて起こるが，物質そのものが移動するわけではない．

動物は体内での発熱量と体表面からの放熱の熱的バランスのもとに体温調節をしている．小さい動物と大きい動物のそれぞれの発熱量と放熱の関係：

簡単のために，同じ形で体長の異なる動物を比較する．
（動物を半径Rの「球」と考える！
この半径は身長や胴回り長さなどを総合した，
特徴的な長さと見なす．）

体重と発熱量は体長の3乗に比例し，
体の表面積は体長の2乗に比例する
と見なすことができる．

(ニュートンの）冷却の法則より，
大きな動物ほど放熱しにくくなるので，
寒冷地では大型動物が生息しやすい．

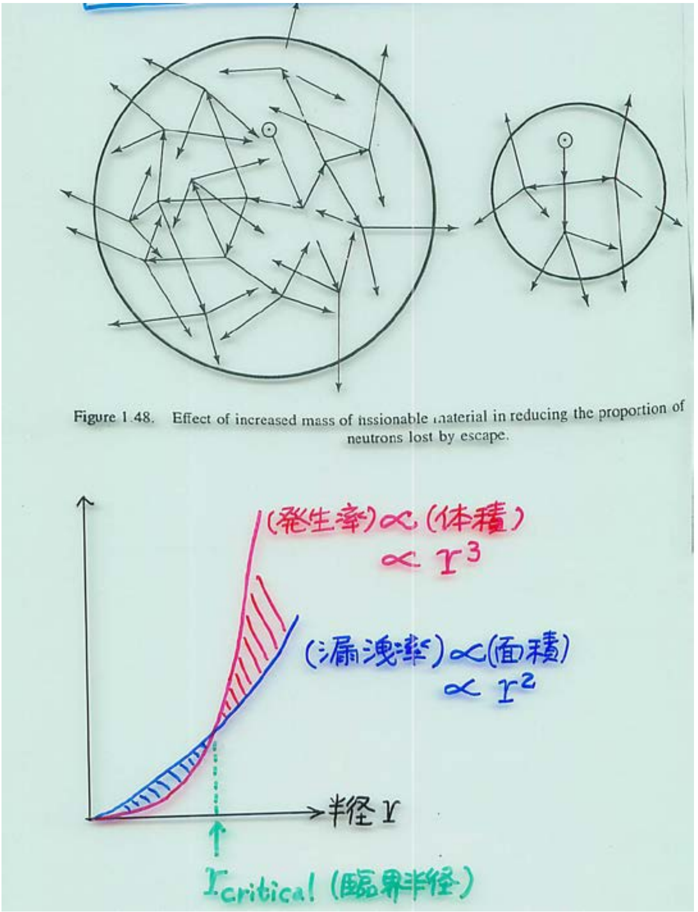


類似のしくみ

核分裂連鎖反応の臨界量

中性子発生率

＞中性子吸収または系外への漏洩



熱伝導率の実例

	熱伝導率 k ［W/mK］
金属（25℃）	
銀	427
銅	397
金	314
アルミニウム	238
鉄	79.5
鉛	34.7

気体（20℃）

水素	0.172
ヘリウム	0.138
酸素	0.0238
窒素	0.0234
空気	0.0234

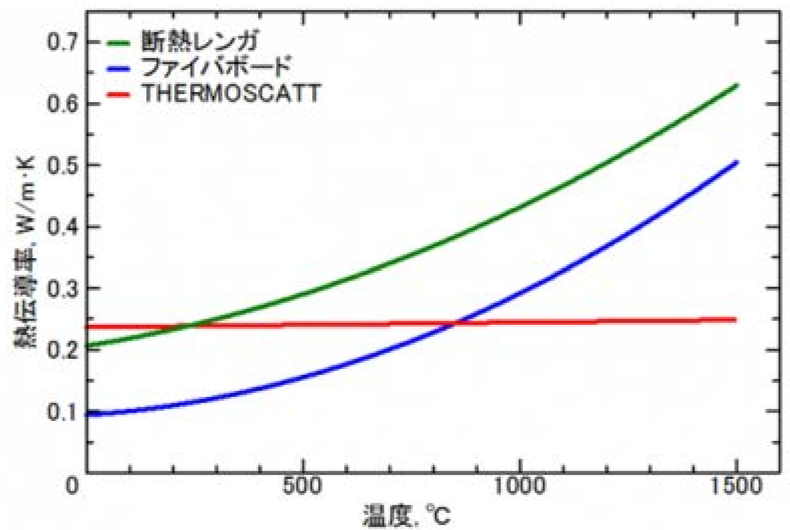
非金属（概略値）

氷	2
コンクリート	0.8
ガラス	0.8
水	0.6
氷(0℃)	2.2
ゴム	0.2
木	0.08
紙	0.06
アスベスト	0.08

・金属を触ると冷たく感じるのは、金属の熱伝導率が非常に大きく、皮膚表面から熱が素早く伝達されるため。
・羽毛ジャケットが保温性に優れている理由は空気の熱伝導率が非常に小さいこと。

参考:熱伝導率の高温における温度依存性

熱伝導率は物質に固有の値である。しかし、必ずしも一定ではなく、従来の耐火断熱レンガなどは、温度の上昇に伴って熱伝導率が増加するため、高温域では断熱性能が低下することが知られている.



出典 http://www.covalent.co.jp/jpn/rd/detail_06.html

複数の材料でできた複合板の場合：熱伝導の法則

家屋などの断熱性を高める場合(断熱設計)、いろいろな熱伝導率をもつ、いろいろな厚さの板からなる複合板を通して熱伝導が起きることを考えねばならない。

厚さがそれぞれL_1,L_2であり、熱伝導率がk_1およびk_2である2枚の板を通す熱伝導の場合、熱伝達率(ΔQ/Δt)は

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = A\frac{(T_{\mathrm{H}} - T_{\mathrm{L}})}{(L_1 / k_1) + (L_2 / k_2)}$$

一般には

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = A\frac{(T_{\mathrm{H}} - T_{\mathrm{L}})}{\sum_i R_i},\ R_i \equiv \frac{L_i}{k_i}$$

*R*はその材料の熱抵抗（または*R*値）と呼ばれる。

この式より，保温性(断熱性)を高くするのには，複数の素材を組み合わせて，その中に，*R*値が大きい素材，すなわち，*k*が小さく，*L*が大きいものを含めるとよいことがわかる．

5. 熱放射（熱輻射）とその法則

・熱が電磁放射によって伝達される現象を熱**放射（または熱輻射）**という。
・放射は真空でも物質中でもエネルギーを伝える。(夜空の星が見える理由の一つ。）

1）ウィーンの変位則（Wien's displacement law）

・物体はその温度が高くなるにしたがって、経験則として、色が暗赤、赤、橙、黄、緑、青、紫へ(すなわち、波長の短い方へ）と変化していく。

・物体がある絶対温度Tの場合、放射の強さ（＝単位時間、単位面積あたりの放射エネルギー）が最大になる波長をλ_{max}とすると、次の関係式が成立する。

$$\lambda_{\max} \cdot T = \text{constant} = 2.8976 \times 10^{-3}\ \text{mK}$$

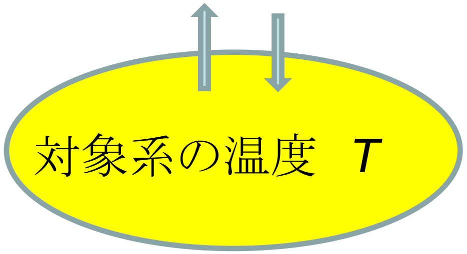
・適用例
1） 太陽表面では最大強度は可視光(波長は約4800A(ｵﾝｸﾞｽﾄﾛｰﾑ)で、
   太陽表面温度は約6000度。
2） 波長約1ミリの「電波雑音」はビッグバン宇宙の残光（＝宇宙背景放射）

2）シュテファン・ボルツマンの法則

・あらゆる物体は,絶対零度でないかぎり、単位時間あたり、単位面積あたり、その絶対温度の4乗に比例するエネルギーを外部に放出する(emission)。

・物体の放射、吸収のしやすさ(放射率、吸収率）は、その物体の表面の性質に依存する。滑らかな面よりも粗い面の方が、放射・吸収しやすい。これは粗い面はミクロな凹凸が多いので表面積が多いこと、凸凹が表面内での多重散乱を起こし、何回も吸収が起きることによる。

T_0　外部(環境）の温度



表面積A

単純なエネルギー放射率（＝単位時間あたりのエネルギー放出）

$$P_{\mathrm{emi}} = e \cdot A \cdot \sigma T^4$$

次元　$[P_{\mathrm{emi}}] = \mathrm{W} = \dfrac{\mathrm{J}}{\mathrm{s}}.$

σ：シュテファン・ボルツマン定数

$$\sigma = 5.67032 \times 10^{-8} \, \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2 K^4}}$$

e :放射率または吸収率。現実の物体では$0<e<1$.
$e=1$の理想的物体を黒体（black body）といい、
$e=0$の理想的物体を完全反射体という.

・物体は、自ら放射すると同時に、外部からの放射を吸収する（absorption) 。

外部(環境）から対象系が吸収するエネルギー吸収率

$$P_{\mathrm{abs}} = e \cdot A \cdot \sigma T_0^4$$

対象系の，正味のエネルギー放射率

$$P_{\mathrm{net}} = e \cdot A \cdot \sigma (T^4 - T_0^4)$$

・周囲よりも温度の高い物体は、周囲から吸収するよりも放射のエネルギーが上回る。
・放射によって物体の内部エネルギーは低下していき、物体の温度が下がる。
・物体の温度が周囲の温度と等しくなると、物体は放射するのと同じだけのエネルギーを周囲から吸収し、温度変化が止まる。

放射の実例：
1）地球は内部の熱を表面から宇宙に放射している。その一方で、地表は太陽からの放射によって暖められ、生命活動や気象現象が起きている。
2）焚き火をすると、火の上は対流によって非常に熱くなっていますが、火の周囲の空気はそれほど温度が高くありません。しかし炎からの放射によって周囲に立つ人を適度に暖めてくれます。

（より詳しくは）

・電磁波はその振動数により、振動数が低くエネルギーの低い方から、電波、マイクロ波、赤外放射、可視光線、紫外放射、X線、γ線といった種別される。通常、熱放射と呼ばれるのは赤外線である。

・物体の分子・原子は熱運動しており、振動運動したり加速されている。分子・原子は電荷を持つので、これが振動運動すると電磁波を放射する。これが赤外線である。（マイクロ波も分子運動により放射される。さらにミクロなレベルで、電子の振動からは可視光線や紫外放射が発生する。

・温度の高い物体ほど分子運動が激しいので、放射の振動数も高くなる。温度の高い物体は振動数が高く波長の短い放射を発生し、温度の低い物体は振動数が低く波長の長い放射を発生する。
・放射を浴びた物体はどうなるか。赤外線を照射された物体の分子は、電磁波に揺さぶられて分子運動が激しくなる。従って、赤外線を放射する物質と吸収する物質とは、直接接触してなくとも、電磁波によってエネルギーが伝達される。

・そうすると放射によって物体の内部エネルギーは低下していき、物体の温度が下がる。物体の温度が周囲の温度と等しくなると、物体は放射するのと同じだけのエネルギーを周囲から吸収し、温度変化が止まる。

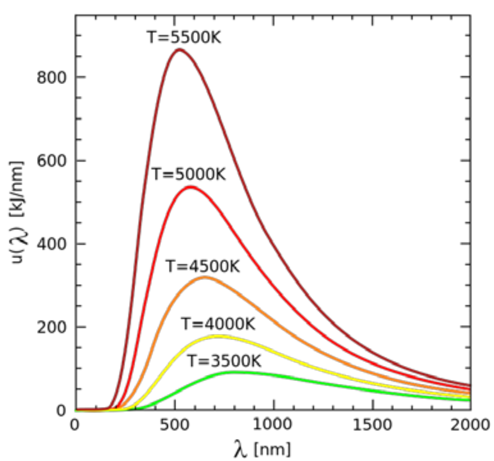
3）吸収率と放射率の関係ーキルヒホッフの法則

・ある温度の黒体からの熱放射が同じ温度の他の物体表面にあたるとき、その表面の吸収率aはその面の放射率eに等しい。

4）黒体放射についてのプランクの法則

・絶対温度Tの黒体から放出される波長λからλ＋dλの範囲にある放射の強さ（＝単位時間、単位面積あたりの放射エネルギー）をu(λ)dλとすると

$$u(\lambda)d\lambda = \frac{2hc^2}{\lambda^5}\frac{1}{\mathrm{e}^{ch/\lambda k_B T}-1}d\lambda\left(=\frac{8\pi f^3}{c^3}\frac{hf}{\mathrm{e}^{hf/k_B T}-1}df\right), \lambda f = c$$



ここで、cは真空中の光速、k_B は気体定数R、アボガドロ数N_Aの比として定義されるボルツマン定数とよばれ、巨視的世界と微視的世界の結節点というべき普遍定数のひとつである。

$$k_B \equiv \frac{R}{N_A}$$

さらに、この式におけるhは(熱伝達率ではなく！)，プランク定数と呼ばれる普遍定数の一つで，量子力学で重要な定数である。

(図の出典：ウイキペディア　プランクの公式）

1nm=10^{-9} m

ウイーンの変位則、シュテファン・ボルツマンの法則はプランクの黒体放射の法則から理論的に導かれる。

$$\sigma \equiv \frac{2\pi^2 k_B^4}{c^2 h^3} = 5.67032\times 10^{-8}\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2\mathrm{K}^4}$$

引用参考文献

[木下03] 木下紀正「大学の物理ー基礎と応用」裳華房，2003年.
特に，pp. 216-219.

[徳岡78] 徳岡善助他「物理学」学術図書出版社，1978年.
特に，pp. 143-147.

[伊東95] 伊東敏雄「な～るほど！の熱学」学術図書出版社，1995年.
特に，pp. 14-22.

［Serway01］R.A.Serway,「科学者と技術者のための物理学II(熱力学）」
学術図書出版社，2001年. 特に，pp.558-564.

［ハリディ02］D.ハリディ，R.レスニック，J.ウォーカー「物理学の基礎［２］波・熱」
培館，2002年. 特に，pp.130-134.