解説３

押さえておきたい伝熱学の基礎と応用

玉川大学　大久保　英敏*

＊おおくぼ　ひでとし：大学院工学研究科機械工学専攻　教授

はじめに

伝熱学とは，エネルギーの一形態である熱エネルギーに注目し，みかけ上，温度の高い系から温度の低い系にエネルギーが移動する現象を扱う学問である。伝熱学は，機械工学や化学工学・原子力工学の分野で学ぶ機会が多いが，科学技術の進展に従って応用分野が広がり，宇宙や航空・気象・食品・被服などでも必要な学問となっている。

伝熱には，熱伝導と熱放射の2つの基本形態があるが，対流熱伝達を含めて伝熱の基本三形態と呼ぶ場合が多い。また，熱設計に必要な伝熱工学では，相変化を伴う熱事象である沸騰や凝縮などに関する現象も体系的にまとめられてきた。本稿では，伝熱学の基礎である伝熱の基本三形態を説明するとともに，沸騰現象に関する応用事例を紹介する。なお，本稿では伝熱学の基礎を説明しており，すでに基礎を学んだ方々には既知の内容が多いことをあらかじめお断りしておく。

熱伝導と熱放射

1.　熱伝導

物体内に温度差がある場合，物体内の温度勾配によって高温部から低温部に熱が移動する。この伝熱の形態が熱伝導である。このときの熱の移動量は以下の式で求められる。この式は，熱伝導に関するフーリエの法則と呼ばれている。

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \tag{1}$$

ここで，q：単位面積，単位時間当りの熱の移動量［W/m^2］，λ：熱伝導率［W/(mK)］，T：温度［K］，x：断面に垂直な方向の距離［m］である。

qは熱流束と呼ばれており，λは熱伝導率と呼ばれ，熱の伝わりやすさを表す熱物性値である。

熱伝導によって時間的に変化する物体内の温度分布は，熱伝導方程式を用いて求めることができる。三次元直交座標系の熱伝導方程式は以下の式となる。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z}\right) + w \tag{2}$$

ここで，λ：熱伝導率［W/(mK)］，ρ：密度［kg/m^3］，c：比熱［J/(kgK)］，T：温度［K］，w：単位時間，単位体積当りの発熱量［W/m^3］である。

熱伝導方程式を解くためには，時間$\tau = 0$のときの初期条件と空間における境界条件が必要であるが，形状が複雑な物体内の温度分布を求める場合，コンピュータによる数値計算が用いられる。

2.　熱放射

電磁波によるエネルギーの移動が放射伝熱であり，放熱部の固体面表面から放出される電磁波は真空中または媒体を透過し，受熱部で吸収される。放熱部の固体面表面から単位時間，単位面積当り

に放出される放射エネルギーを放射能と呼ぶ。この放射能E［W/m^2］は次式で求められる。

$$E=\int_0^\infty E_\lambda d\lambda \tag{3}$$

ここで，E_λ：波長λの放射能［W/m^2］である。

黒体の表面から放出される単色放射能は，以下の式で求められる。この式は，プランクの法則と呼ばれている。

$$E_{b\lambda}=C_1/\{\lambda^5(e^{C_2/\lambda T}-1)\} \tag{4}$$
$$C_1=2\pi hc^2=3.742\times10^{-16}\ [\mathrm{Wm^2}]$$
$$C_2=hc/k=1.439\times10^{-2}\ [\mathrm{mK}]$$

ここで，c：真空中における光速［m/s］，h：プランク定数［Js/mol.］，k：ボルツマン定数［J/(mol. K)］である。

式(4)を式(3)に代入すると，以下の式が求められる。この式は，ステファン - ボルツマンの法則と呼ばれている。E_bは，黒体が単位面積，単位時間当りに放射する全放射エネルギーである。

$$E_b=\sigma T^4=5.667\left(\frac{T}{100}\right)^4 \tag{5}$$

ここで，σ：ステファン−ボルツマン定数［W/(m^2 K^4)］である。

一方，受熱部側である物体表面に放射エネルギーE［W/m^2］が到達した場合，一部は物体表面で反射され，一部は物体を透過する。残りのエネルギーは物体内部に吸収される。これらのエネルギーをそれぞれ，反射エネルギーR，透過エネルギーT，吸収エネルギーAとすると，エネルギー保存則から次式となる。

$$E=R+T+A \tag{6}$$

入射する放射エネルギーに対する反射，透過および吸収（**図1**）するエネルギーの割合を，それぞれ反射率ρ，透過率τ，吸収率αと呼ぶ。黒体は，吸収率が1であり，反射率と透過率が0となる物体である。

対流熱伝達

気体や液体などの流体が流動している場合，流体の運動によって熱が移動する。この形態が対流熱伝達であり，温度差によって生じる浮力によって発生する対流を自然対流，機械的に発生させた対流を強制対流と呼ぶ。

対流熱伝達の基礎方程式には，連続の式，運動方程式およびエネルギー方程式がある。2次元の強制対流について考えると，これらの式は，それぞれ以下のようになる。

＜連続の式＞

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}=0 \tag{7}$$

＜運動方程式＞

$$u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}=\nu\frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \tag{8}$$

＜エネルギー方程式＞

$$u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial y}=\alpha\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \tag{9}$$

ここで，u，v：x，y方向の速度［m/s］，α：温度伝導率［m^2/s］である。

高温の物体のまわりを低温の流体が流れている場合，物体表面から流体へ熱が移動する。このとき，物体表面から流体への熱伝達は，ニュートンの冷却法則に従う。物体表面の温度をT_w，流体のバルク温度をT_∞とすると，熱伝達の大きさはこれらの差（T_w-T_∞）に比例し，以下の式から求め

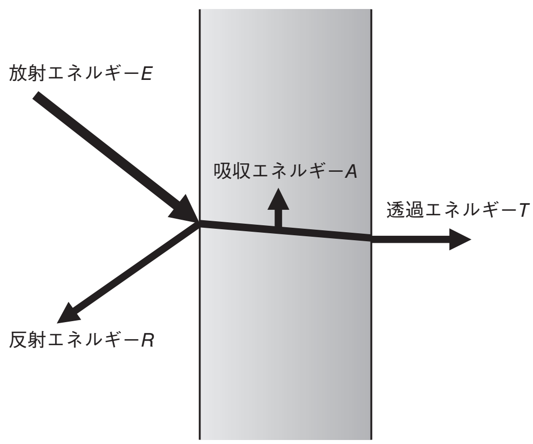

図1　反射，吸収，透過