

9 流れの中に置かれた物体からの熱伝達

山形大学工学部技術部
物質化学工学科 原田英二

【緒言】

物質化学工学科化学工学専修コース3年生前期に開講されている「化学工学実験」のテーマの一つに『流れの中に置かれた物体からの熱伝達』¹⁾がある。この実験の目的は、物体表面からの伝熱速度が流体速度や物性など種々の因子によって支配されていることを知り、同時期に開講されている『熱移動』の講義内容の理解を深めるものである。ここでは速度が一様な空気流中に置かれた球からの熱移動を取り上げ、熱伝達係数の測定法を体得すると共に、熱伝達係数の概念を理解させる。そのためには伝熱工学的に正しいデータの集積が必要不可欠となる。そこで実験装置および諸量の測定方法に若干工夫を凝らしたので、それらについて報告を行う。

【基礎事項】

本実験で取扱う対流伝熱は熱が固体から気体または液体へ、逆に気体または液体から固体へ移動する場合の伝熱形式である。例えば面積が A で表面温度が t_s の壁から主流温度 t_b の流体に移動する熱量 Q は(1)式で表される。

$$Q = hA(t_s - t_b) \quad (1)$$

移動熱量は伝熱面積と温度差の積に比例するが、式中の比例定数 h が熱伝達係数である。この熱伝達係数は物性値ではないので多くの場合、実験により決定しなければならない。

【非定常法による熱伝達係数の測定原理】

熱伝達係数の測定法は種々提案されている

が、学生実験という限られた時間内に測定を完了する必要がある。そこで今回は非定常法により熱伝達係数の測定を行った。なお、測定原理は以下のとおりである。

いま、質量 W [kg], 表面積 A [m^2], 比熱 C_p [$J/(kg \cdot K)$], 温度 t_s [$^{\circ}C$]の球が、温度 t_a [$^{\circ}C$]の流体にさらされているとする。球内部に温度分布がないものとするれば微小時間 $d\theta$ 間の球の温度変化を dt_s とすると(2)の熱収支式が成り立つ。なお、左辺は物体が失う熱量であり、右辺は流体が持ち出す熱量である。

$$-C_p W dt_s = hA(t_s - t_a) d\theta \quad (2)$$

温度変化がそれほど大きくない場合には、球表面の熱伝達係数 h は一定とみなせ、(2)式を変数分離して積分すると(3)式が得られる。

$$\ln(t_s - t_a) = -(hA/C_p W)\theta + C \quad (3)$$

C は積分定数で、球のある基準時の温度が決まれば定まる。

例えば $\theta = 0$ で $t_s = t_1$ とすると(3)式は(4)式となる。

$$\ln\{(t_s - t_a)/(t_1 - t_a)\} = -(hA/C_p W)\theta \quad (4)$$

したがって、球の温度 t_s [$^{\circ}C$]と経過時間 θ [sec]の関係を逐次測定することにより、(4)式を利用して熱伝達係数 h [$W/(m^2 \cdot K)$]が求められる。

【実験装置および方法】

実験装置の構成を図-1に示す。

球は直径の異なる3種の鉄球(ボールベアリ

ングを焼鈍したもの)で、それらの仕様と物性値(20℃)を表-1に示した。なお、球の表面には放射伝熱の影響を極力小さくするためニッケルメッキを施した。また球を支えるために中心まで6mmの雌ねじを切り、外径6mm、肉厚1mmのステンレス管を支持軸としてねじこみ固定した。空気流および球の温度測定には基準温度計で検定したφ0.5銅-コンスタンタン熱電対とデジタル電圧計を用いたが、球の温度を測定するための熱電対はステンレス軸中を通し、その温接点を球中心まで挿入して半田付けした。球に吹きつける空気流を一樣流とするために送風管内出口付近にはステンレス製の整流格子を3箇所設け、速度の測定にはサーミスター風速計を用いた。また空気流速は送風機の空気取り入れ口に開口径の異なるカップを装着することによって調節できる。

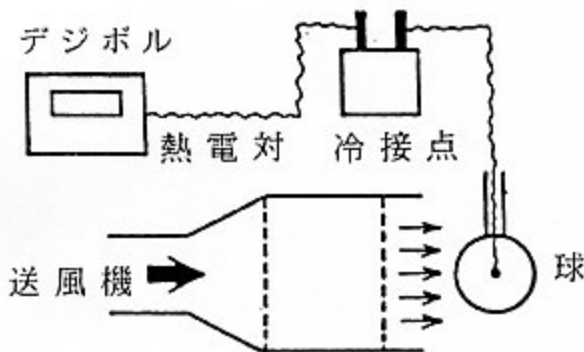


図-1 実験装置の構成

実験は空気流の吹き出し口近くに、予め加熱した球を静置し冷却を行う。その際、球中心に挿入した熱電対により球温度 t_s の経時変化を測定し、得られた冷却曲線から熱伝達係数 h を求める。

以下に実験の手順を述べる。

1) サーミスター風速計のプロープを球の静

表-1 球の仕様および物性値²⁾

直径	: 5.08, 4.00, 2.97cm
材質	: 鉄(炭素鋼 1.0C)
比熱	: 4.73×10^2 [J/(kg·K)]
密度	: 7.80×10^3 [kg/m ³]
熱伝導度	: 43.0 [W/(m·K)]

置箇所へ挿入し、送風機の空気取り入れ口の口径を4段階変化させ、それぞれの空気流速を測定する。

- 2) マントルヒーターにより、球を約 50℃まで昇温させる。
- 3) 送風機を始動させて球に空気流を吹き付け、冷却実験を開始する。球の温度と空気流温度測定は空気流吹き付け開始約1分後を冷却開始時刻($\theta=0$)として30秒間隔で球の温度が7~8℃低下するまで行う。なお、 $\theta=0$ の球の温度 t_s を球の初期温度 t_1 とする。
- 4) 上記の手順を空気流速を変えて繰り返す。
- 5) 以上の実験を直径の異なる球についても行う。

【実験結果の整理】

実験で得られた t_s [℃] と θ [sec] を(4)式に従って整理する。すなわち経過時間 θ に対して無次元温度 $(t_s - t_a)/(t_1 - t_a)$ を片対数グラフに点綴し、直線の傾きから熱伝達係数 h [W/(m²·K)] を求める。傾きの算出には最小二乗法を用いる。

図-2は結果の一例であるが良好な直線関係となっており、最小二乗法により直線の傾き $(hA/C_p W) = 1.70 \times 10^{-3}$ [1/sec] の値を得た。 h 以外はそれぞれ既知の値すなわち球の

表面積 A [m^2], 比熱 C_p [$J/(kg \cdot K)$], 質量 W [kg] であるので h が算出できる。

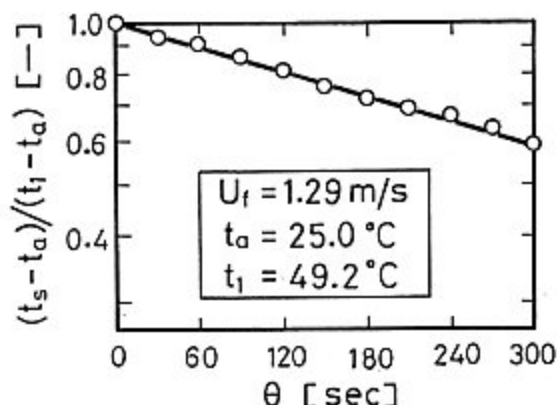


図-2 球の冷却特性
($D=2.97\text{cm}$)

次に一様流れの中に置かれた球の熱伝達係数 h [$W/(m^2 \cdot K)$] を流体の密度 ρ_f [kg/m^3], 粘度 μ_f [$Pa \cdot s$], 比熱 C_p [$J/(kg \cdot K)$], 熱伝導度 λ_f [$W/(m \cdot K)$], 速度 U_f [m/s] および球の直径 D [m] の関数として次元解析を行えば、

$$Nu = f(Re, Pr) \quad (5)$$

$$\text{ここに } Nu = hD / \lambda_f, \quad Re = DU_f \rho_f / \mu_f$$

$$Pr = C_p \mu_f / \lambda_f$$

なる関数が得られ、熱伝達係数とそれに関与する諸因子の関係が、ヌセルト数(Nu), プラントル数(Pr) およびレイノルズ数(Re) という3つの無次元数を用いて表せることが分かる。式の導出過程は省略するがこれらの無次元数の間の関数形は

$$Nu = K \cdot Pr^{1/3} Re^{1/2} \quad (K \text{ は未定係数}) \quad (6)$$

で表示されることが知られている⁴⁾。特に流体が空気の場合には、 Pr は一定値(0.72)とみなせ、また静止流体中の球の Nu は理論的に2と与えられるので、これらを考慮すれば

$$Nu = 2 + K^* \cdot Re^{1/2} \quad (7)$$

の関数形が得られる。上式の未定係数 K^* の値は実験データから決定できるが、0.5~0.6

程度の値となっている^{4), 5)}。

そこで実験結果が(7)式に従うかを確認するため、それぞれの条件で得られた熱伝達係数 h を(5), (7)式で無次元相関する。ただし、空気の物性値は球の温度と気流温度の平均値(境膜温度 t_r)における値を用いる。 t_r は次式で与えられる。

$$t_r = t_a + \Delta t_{1,m} / 2 \quad (8)$$

ここに

$$\Delta t_{1,m} = (t_1 - t_2) / \ln \{ (t_1 - t_a) / (t_2 - t_a) \}$$

t_2 は測定終了時の球の温度である。

以上の整理方法にならって、 Nu と Re の間の実験式を最小二乗法によって決定する。

図-3はその一例である。全体に既往の結果より1割程度大きな値となっているが Nu が Re の1/2乗に比例するという従来と同様な傾向が認められる。

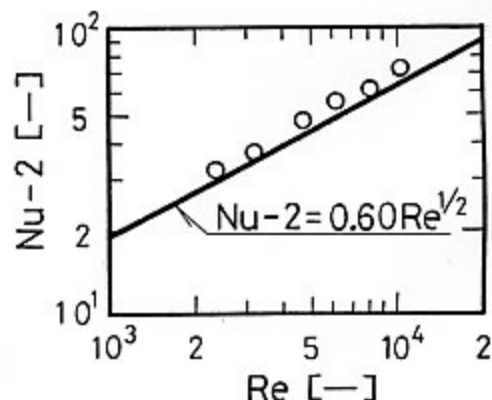


図-3 球の強制対流熱伝達
($D=2.97, 4.00, 5.08\text{cm}$)

【ステンレス軸からの放熱量の推算】

本実験装置は球を静置するため、外径6mm, 肉厚1mmのステンレス軸が球に取り付けてある。この軸から逃げる熱量が球からの熱伝達係数測定誤差の要因となることが予想されたのでその推算を行った。

図-4 にステンレス軸が球に取り付けられている模様を示した。このような場合次の①～④の仮定を設け解析を行った。

- ①ステンレス軸は無限長
- ②軸半径方向の温度分布は無い
- ③軸表面の熱伝達係数は一定
- ④周囲空気温度は一定

以上により熱収支を取ると

$$\frac{d^2 t}{dx^2} - \frac{2\pi r_s h_s}{\lambda_s A_s} (t - t_a) = 0 \quad (9)$$

B. C., $x=0$; $t=t_s$

$x=\infty$; $t=t_a$

ここに r_s : 軸半径, h_s : 軸表面の熱伝達係数, λ_s : 軸の熱伝導度, A_s : 軸の断面積, t_a : 空気流温度

ところで、ステンレス軸から逃げる熱量 q_s は

$$q_s = -\lambda_s A_s \left[\frac{dt}{dx} \right]_{x=0} \quad (10)$$

(9) 式を解き (10) 式に代入すると

$$q_s = \sqrt{h_s 2\pi r_s \lambda_s A_s} (t_s - t_a) \quad (11)$$

ここに t_s : 球表面温度

一方球からの放熱量 q は

$$q = hA (t_s - t_a) \quad (12)$$

ここに h : 球表面の熱伝達係数, A : 球の表面積

したがってステンレス軸から逃げる熱量の割合は (13) 式で表される。

$$\frac{q_s}{q} = \frac{\sqrt{h_s 2\pi r_s \lambda_s A_s}}{hA} \quad (13)$$

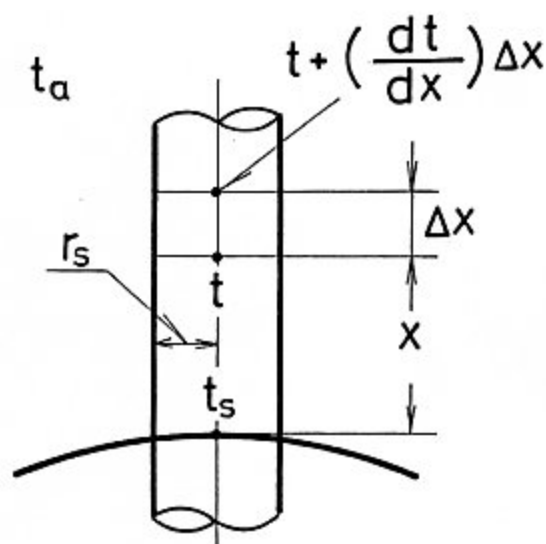


図-4 ステンレス軸からの放熱

具体例としてステンレス軸で支持されている温度 50°C 、直径 0.0297m の球が気温 20°C 、速度 1.29m/s の空気流中にあるとき、ステンレス軸から逃げる熱量の割合を (13) 式により計算した結果 $q_s/q \approx 0.10$ となり、実験条件によっては無視出来ない値となることが分かった。

「謝辞」

今回の講演を行うに際し、懇切なご指導とご助言をいただきました栗山雅文教授、門叶秀樹助手に深謝申し上げます。

【文献】

- 1) 山形大学工学部物質化学工学科: "化学工学実験 改訂第3版" (2002)
- 2) 日本機械学会: "機械工学便覧A6", 丸善 (1985)
- 3) 北浦嘉之ら: 化学工学, 33, 175 (1969)
- 4) Ranz, W.E. and W.R. Marshall: Chem. Eng. Prog., 48, 141 (1952)
- 5) 今野宏卓ら: 化学工学論文集, 4, 221 (1978)