

昇華法による自由対流熱伝達の間接測定 に関する実験 (第二報)

(垂直円筒の場合)

相 場 真 也

1. 緒 言

熱伝達の間接測定法としてナフタリンの昇華がよく用いられているが⁽¹⁾、自由対流の熱伝達測定にはあまり利用されていない。それは、単位時間当りの昇華量が微小であり、しかも自由対流の場の温度が変化するためと考えられる。筆者は恒温恒湿室内にて長時間ナフタリンを昇華させることにより、自由対流の熱伝達の測定が簡便に行えるのではないかという予測に基づき、実験的研究を行っているものである。前報⁽²⁾、⁽³⁾までは水平円筒の場合について報告したが、今回は垂直円筒の場合について、以下に示すような結果を得たので報告する。

2. 実験方法及び材料

実験方法及び材料は前報の場合とほぼ同様である。すなわち、恒温室内においては、強制通風がなされているので、前回同様二重のボックス(図1)に試料を床面に垂直に取付け、約60~150時間放置し、昇華せしめ、物質伝達率を求めた。

ナフタリンの試料は昇華前後に1/100mmダイヤルゲージ、鉱山天秤(標量1kg, 感量500mg, 大正天秤製作所)、精密化学天秤(安並化学衝器製作所, 標量200g, 感量1mg)等で測定を行った。

次にナフタリン試料、ボックス等について述べる。

2-1 ナフタリン試料

試料形状を図2に示す。芯材には各種直径の硬質ビニール管、ガラス管、鋼線、黄銅棒の4種を用い、これらに90°~100°C前後に熔融したナフタリンを被覆したのち、成形した。すなわち、試料直径が3mmφのものには直径2mmφの鋼線、10mmφのものには外径8mmφのガラス管を用い、これらに熔融したナフタリンをコーティングし、薄い刃物で成形した。試料直径が20mmφ以上の場合はコーティングした後、旋盤で成形した。なお成形後のナフタリン厚さは1~2mm程度であった。なお、黄銅棒は局所値を求める場合に用いた。

試料の l は30~500mmの範囲で、 d は3, 10, 20,

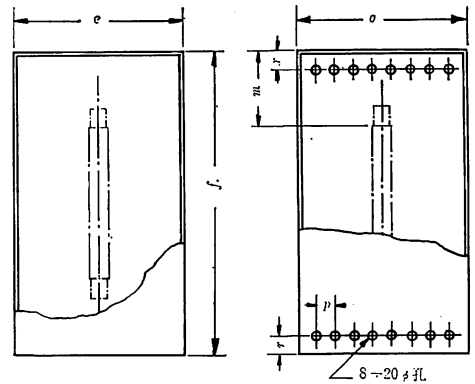


図 1

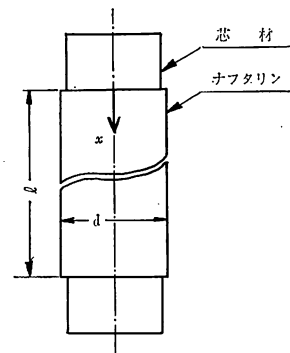


図 2

30, 60, 115mm の 6 種について実験を行った。

次にナフタリンの諸性質を表 1 に示す。

表 1

化学式	$C_{10}H_8$
融点	80.7°C
分子量	128.16 kg/kgmol
ガス定数	$R_v 6.615 \text{ kgm/kg}^\circ\text{K}$
昇華の潜熱	133 Kcal/kg
比重量	1.145 gr/cm ³ (ただし鑄造したもの 1.11 ± 0.01) (gr/cm ³ (4))
空気中への拡散係数	$D = 0.0513 \left(\frac{T}{273}\right)^2 \frac{760}{P_0} \text{ cm}^2/\text{s}$ (5) (ただし T°K, P ₀ mmHg)
蒸気圧	P_v $\log_{10} P_v = 11.7797 - \frac{3812.34}{T_v} - 0.02593 \log_{10} T_v$ (6) $\log P_v = 11.55 - \frac{3765}{T_v}$ (7) (ただし T _v °K, P _v mmHg)

2-2 恒温恒湿室

恒温恒湿室の温度は 20 ± 0.5°C, 湿度は 60 ± 0.5% とした。恒温恒湿室の室内容積は 22m³ であり, 室外に空気調和装置を設置し, ダクトにて給気し設定温度を保持し, 制御機構は電子パネルによる比例制御である。

2-3 ボックス

すでに報告したように強制通風の行われている恒温室内でも, 二重に仕切られた内側のボックス内においては自由対流の場とみなしてよい。ボックスの巾は垂直平板の場合の最大濃度境界層厚さ δ_{\max} を計算し,

$$C > 2\delta_{\max} + d$$

とした。ボックスの高さは

$$h > 1.8 \ell_{\max}$$

とした。実験には 2 種類のボックスを使用し試料の ℓ により使いわけた。

表 2

寸法 (mm)	e	f	o	m	r	p	備 考
I	220	700	270	200	40	30	$\ell = 180$ 以下に使用
II	330	900	340	200	60	30	$\ell = 300$ 以上に使用

表 2 に各ボックスの各寸法を示す。

なお, 外側のボックスは前報と同様のものとした。

3. 実験結果及び検討

3-1 整理方法

一般に, 垂直円筒からの物質移動を表わす平均シャーウッド数 Sh_m は,

$$Sh_m = \frac{\alpha_D \cdot \ell}{D} \dots\dots\dots (1)$$

で表わされ, α_D は定義より

$$\alpha_D = \frac{dW}{\tau \cdot A} \cdot \frac{1}{C_{vw} - C_{v\infty}} \dots\dots\dots (2)$$

で与えられる。また試料より充分離れた位置におけるナフタリン濃度を零と考えると

$$\alpha_D = \frac{dW}{\tau \cdot A} \cdot \frac{1}{C_{vw}} \dots\dots\dots (3)$$

となる。しかるに試料表面ではナフタリンが飽和していると考えられるから

$$C_{vw} = \frac{P_v}{R_v \cdot T_w} \dots\dots\dots (4)$$

が成立する。また, 試料表面温度 T_w は周囲温度とみなしてよいので (3) 式は結局

$$\alpha_D = \frac{dW}{\tau \cdot A} \cdot \frac{1}{C_{vw}} = \frac{dW}{\tau \cdot A} \frac{R_v \cdot T_\infty}{P_v} \dots\dots\dots (5)$$

となる。

以上のことから昇華前後の減量 dW を測り, α_D を計算して Sh_m が求められる。また局所値については, 試料表面に対して垂直方向の昇華前後の減量 ε をダイヤルゲージ等で測定し, α_{Dx} を次式から求めればよい。

$$\alpha_{Dx} = \frac{\varepsilon \cdot \gamma_n}{\tau} \frac{R_v \cdot T_\infty}{P_v} \dots\dots\dots (6)$$

3-2 実験結果及び検討

昇華法により垂直円筒の自由対流物質伝達率を測定した。図 3 は前記のようにして求められた平均 Sh 数を, d をパラメーターにして, Ra 数で整理したものである。図で同一 Ra 数に対しては, d が小さいほど平均 Sh 数が大きくなっていて, $d = 115 \text{ mm}\phi$ の場合を除いて直線群の傾斜はほぼ 1/4 になっている。しかし, $Ra = 10^8$ 附近の実験値 (すなわち $\ell = 30 \text{ mm}$ の場合) は, $d = 10 \text{ mm}\phi$ の場合を除いて各々の直線の値より高い Sh 数になっている。これは, 垂直平板の場合境界層法により導かれた理論解 $Sh = Cs \cdot Ra^{1/4}$ の適用される範囲が, $10^4 < Ra < 10^9$ であり, $Ra < 10^4$ の場合はこの式による場合よりも高い値になり, 垂直円筒の場合も上記の適用範囲が $10^4 < Ra < 10^9$ と考えてよいので, $Ra = 10^8$ 附近の Sh 数の実験値が直線群の値より高いものになっていると考えられる。

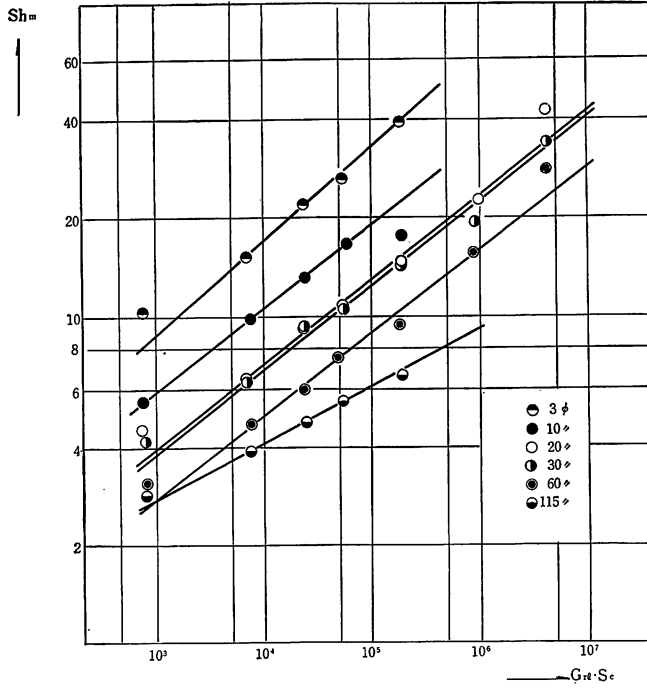


図 3

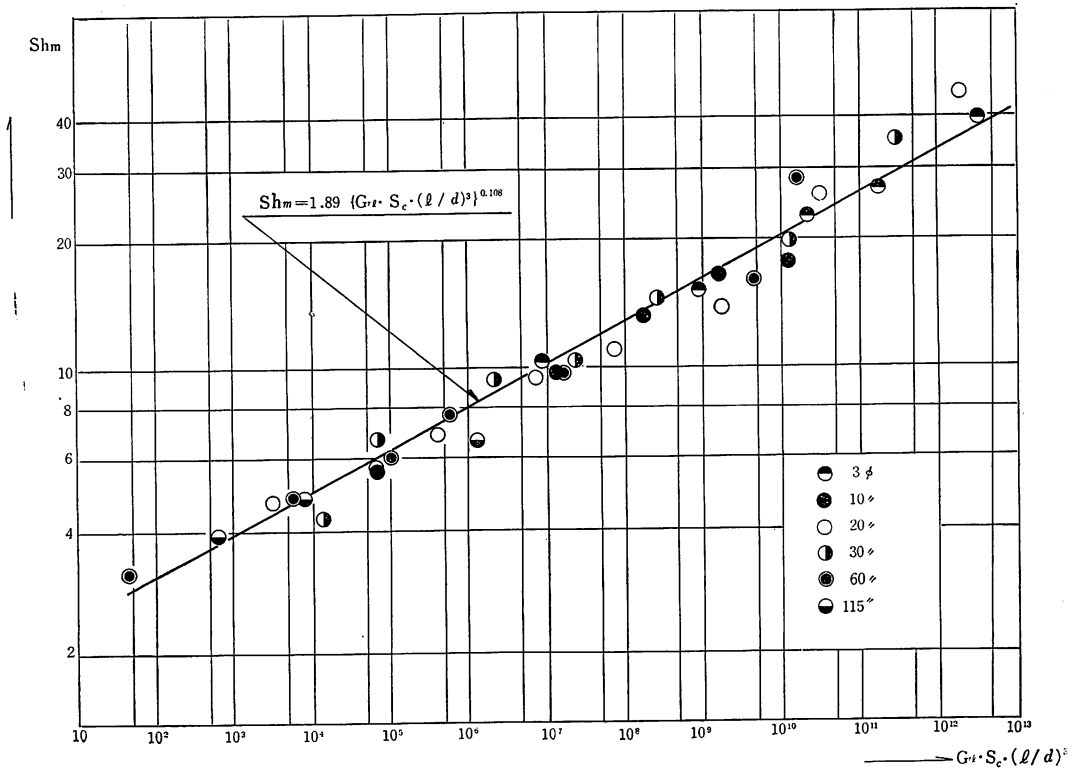


図 4

また $d = 115 \text{ mm}\phi$ の場合の傾斜が他の場合よりも緩い傾斜になっているのは、前記の内側のボックスの大き

さが試料に比し小さくなっているからと考えられ、この意味で試料に対するボックスの大きさの決定が重要なも

のになると考えられる。

図4は平均 Sh 数と、試料長さ l と円筒半径 $d/2$ との比を考慮に入れた変形 Ra 数で整理したものである。ややバラツキがあるが、ほぼ一本の直線で表わすことが出来、次のような実験式を得た。すなわち $5 \times 10 < Ra$
 $\left(\frac{l}{d}\right)^3 < 5 \times 10^{12}$ で

$$Sh_m = 1.89 \left\{ Ra \cdot \left(\frac{l}{d}\right)^3 \right\}^{0.103} \dots\dots\dots (7)$$

次に熱伝達を表わす Nu 数と、Sh 数との相似性について考察する。

垂直円筒の伝熱面からの自由対流熱伝達に関する研究は、これまで種々なされていて(8)(9)、最近では藤井ら(10)が総括を行っている。しかし、境界層の厚さ δ と円筒半径 $d/2$ の比が $\delta/d/2 > 1$ の場合の明快な解決はなされていない。

ナフタリンを用いる間接測定は表面温度一定の熱伝達に対応するので、SPARROW & GREGG(8)による理論解との相似性について確かめてみる。SPARROW & GREGGによると、表面温度一定の場合、垂直円筒の自由対流平均熱伝達率を与える理論解は

$$\frac{Num, cy}{Num, fp} = 1 + \frac{3}{4} \cdot \xi_l \cdot \frac{\theta_1'(0)}{\theta_0'(0)} + \frac{3}{5} \cdot \xi_l \cdot \frac{\theta_2'(0)}{\theta_0'(0)} + \dots\dots\dots (8)$$

である。ここで Num, cy は垂直円筒の平均熱伝達を与える Nu 数、Num, fp は垂直平板の平均熱伝達率を与える Nu 数であり、 ξ_l は境界層厚さと円筒半径との比を示す無次元変数であり、次式で与えられる。

$$\xi_l = \frac{23/2}{Gr_l^{1/4}} \cdot \frac{l}{(d/2)} \dots\dots\dots (9)$$

$\theta_1'(0)/\theta_0'(0)$, $\theta_2'(0)/\theta_0'(0)$ の数値計算結果は示されていないが、同論文の図より推定される値は $Pr = 1$ の場合、 $\theta_1'(0)/\theta_0'(0) = 0.392$, $\theta_2'(0)/\theta_0'(0) = -0.0367$

である。また、Num, fp は $Pr = 1$ に対しては OSTRACH(11)の解

$$Num, fp = 0.535 Gr_l^{1/4} \dots\dots\dots (10)$$

を用いると(8), (9), (10)式より

$$\frac{Num, cy}{Gr_l^{1/4}} = 0.535 (1 + 0.294 \xi_l - 0.022 \xi_l^2 + \dots\dots) \dots\dots (11)$$

がえられる。いま、縦軸に $Num, cy/Gr_l^{1/4}$, 横軸に ξ_l をとると(11)式は図5の太い実線のように示される。しかし、(8)式は摂動法で解かれたものであり、 $\xi_l < 1$ の場合より適用されないと推論されている。

さて、物質伝達率を示す Sh 数について同様の整理を行った結果、同図に示すように、バラツキはあるが、 $\xi_l \leq 1$ の範囲で SPARROW 等の理論値との相似性が確認された。 $\xi_l \leq 1$ の場合の実験点は $d = 115 \text{ mm}\phi$, $60 \text{ mm}\phi$ に相当するが、前記のように、 $115 \text{ mm}\phi$ の場合においては、ボックスとの関係で l の大の場合ほど、 $Sh_m/Gr_l^{1/4}$ が逆に小さくなっている。

また、(11)式は $\xi_l \leq 1$ の場合、次式のように簡略化しても誤差は小さい。

$$\frac{Num, cy}{Gr_l^{1/4}} = 0.535 (1 + 0.272 \xi_l) \dots\dots (12)$$

(12)式で表わされる簡略式を同図に一点鎖線で示した。図において、 $\xi_l \leq 1$ の場合は太実線で示した(11)式とほとんど一致し、重なってしまう。また、 ξ_l が1より大きい範囲まで延長した(12)式(一点鎖線)と、 $1 < \xi_l < 6$ の間接測定による実験値との間にも相似性が認められることは注目すべきことと考えられる。

なお、 $d = 3 \text{ mm}\phi$ の場合 ($\xi_l > 13$ の場合に相当)も、ほぼこのことが認められたが、 $6 < \xi_l < 13$ の実験がなされていないので、図5からは割あいた。

また、 $\xi_l > 1$ の場合の熱伝達の測定を行う場合、円筒

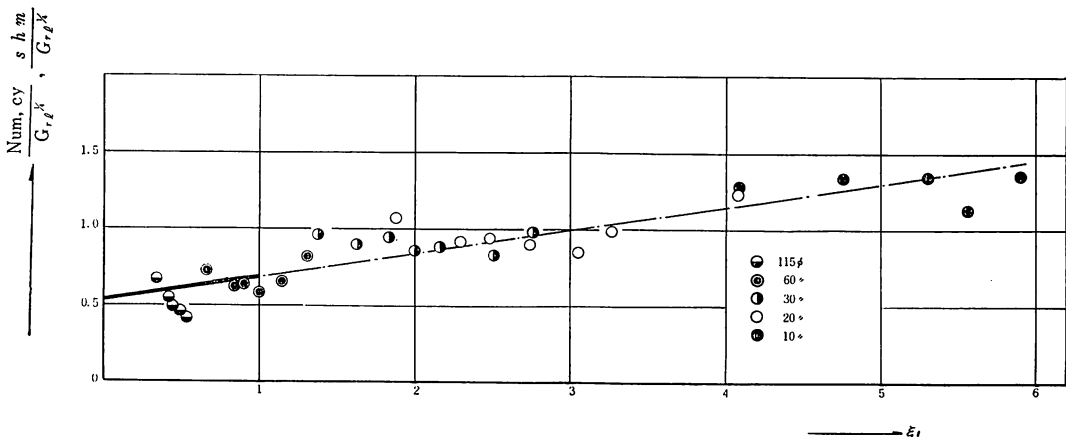


図 5

直径の小さいものを用いる必要があるが、実験技術的に表面温度測定が困難であることなどから、簡便なこの方法が有効と考えられる。

次に局所値について行った測定結果の一例を図6に示す。減量を縦軸に、横軸に試料の測定位置を示した。

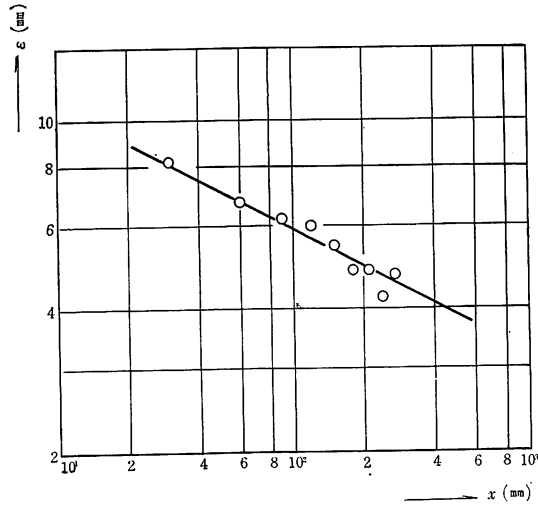


図 6

ただし、位置のとり方は図1のようにとってある。

図6より、 $\epsilon \propto x^{-1/4}$ の関係が認められるが、このことは $Sh_x \propto \epsilon \cdot x$, $Sh_x \propto Gr_x^{1/4}$ のことから当然である。

4. 結 言

垂直円筒の自由対流熱伝達の間接測定が、恒温室内で長時間ナフタリンを昇華させることにより、簡便に行え、その結果、垂直円筒の平均物質伝達率を表わす平均 Sh 数は、変形 Ra 数が $5 \times 10 < Ra (\ell/d)^3 < 5 \times 10^2$ の範囲において

$$Sh_m = 1.89 \{Ra \cdot (\ell/d)^3\}^{0.103}$$

で表わされることを示した。

また、SPARROW & GREGG の表面温度一定の場合の解と、間接測定による実験値との相似性を確かめた。

5. 記号説明

- ℓ : ナフタリン試料長さ (m)
- d : 直径 (m)
- δ : 境界層厚さ (m)
- $Sh = \alpha_D \cdot L/D$: シャーウッド数
- $Sh_m = \alpha_D \cdot \ell/D$: 平均シャーウッド数
- $Sh_x = \alpha_{Dx} \cdot x/D$: 局所
- α_D : 物質伝達率 (m/hr)
- α_{Dx} : 局所物質伝達率 (m/hr)
- x : 試料上端からの距離 (m)
- D : ナフタリン蒸気の拡散係数 (m²/hr)
- ΔW : 減量 (kg)

τ : 昇華時間 (hr)

$A = \pi d \ell$: 試料表面積 (m²)

C_{vw} : 試料表面における濃度 (kg/m³)

$C_{v\infty}$: 試料より充分離れた位置における濃度 (kg/m³)

R_V : ナフタリンのガス定数 (kg-m/kg^oK)

T_W : ナフタリン試料表面温度 (°K)

T_∞ : 試料より充分離れた位置における室温 (°K)

P_V : ナフタリンの飽和蒸気圧力 (kg/m²)

γ_n : ナフタリンの比重量 (kg/m³)

ϵ : 試料表面に垂直方向の減量 (m)

$Ra = Gr_\ell \cdot Sc, Gr_\ell \cdot Pr$: レイレイ数

$Gr_\ell = \frac{\ell^3 \cdot g}{\nu^2} \cdot \left| \frac{\rho_\infty - \rho_W}{\rho_\infty} \right|$: グラスホフ数

$Gr_x = \frac{x^3 \cdot g}{\nu^2} \cdot \left| \frac{\rho_\infty - \rho_W}{\rho_\infty} \right|$:

$Nu = \alpha \cdot L/\lambda$: ヌセルト数

$\xi \ell = \frac{2^{3/2}}{Gr_\ell^{1/4}} \cdot \frac{\ell}{(d/2)}$: 境界層厚さと円筒半径との比を示す無次元数

$Sc = \nu/D$: シュミット数

$Pr = \nu/a$: プラントル数

g : 重力の加速度 (m/hr²)

ν : 動粘性係数 ()

ρ_{∞} : 空気密度 ($\text{kg}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4$)
 ρ_w : 試料表面の流体密度 ($\text{kg}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4$)
 α : 熱伝達率 ($\text{Kcal}/\text{m}^2\text{hr}^{\circ}\text{C}$)
 a : 温度伝達率 (m^2/hr)
 L : 代表長さ (m)
 λ : 熱伝導率 ($\text{kcal}/\text{mhr}^{\circ}\text{C}$)
 C_s : 定数

参 考 文 献

- (1) たとえば, 福井, 森下, 機誌, 65-525, 1480
- (2) 相場, 五十嵐, 秋田工業高等専門学校紀要, 第3巻, 21
- (3) 〃 〃 第4巻, 45
- (4) H. H. Sogin & V. S. Subramanian, Trans. ASME, Series C, 83-4 (1961-11), 483
- (5) 化学工学便覧, (昭33), 化学工学協会
- (6) S. G. Thomas, J. Soc. Chem. Indust., 35-9 (1916), 506.
- (7) T. K. Sherwood & O. A. Träss, Trans. ASME, Series C, 82-4 (1960-11), 313
- (8) E. M. SPARROW AND J. L. GREGG, Trans. ASME, vol 78 (1956), 1823
- (9) 原, 機械学会論文集, 23, 132 (昭32-8), 549
- (10) 藤井ほか2名, 機械学会論文集, 32, 236 (昭41-4), 652.
- (11) OSTRACH, NACA TR, No. 1111 (1953)