

# 昇華法による自由対流熱伝達の 間接測定に関する実験 (第一報)

(水平円柱の場合 その1)

相 場 真 也  
五 十 嵐 聡

## 1. 緒 言

従来より熱伝達と物質移動の相似性に関する多くの報告、発表がなされていて、最近特にナフタリンの昇華による熱伝達の間接測定法が簡便な方法としてよく用いられている。しかし、この方法は主に単位時間の昇華量が比較的大きい場合、すなわち、強制対流熱伝達、遠心加速度場における対流熱伝達などに利用されているようである。一般自由対流の場合は昇華量が微少であるためか間接測定例はあまり見受けない。

筆者等は、恒温恒湿室内において長時間にわたってナフタリンを昇華せしめることにより、一般自由対流の場合でも簡便に間接測定が行なえるのではないかという予測に基づき、実験的研究を行なっているものである。

まず、 $Ra$ 数 =  $10^{-1} \sim 5 \times 10^2$  の範囲における水平円柱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

温度変化による昇華量の変化の影響を除外する目的で恒温恒湿室内で昇華の実験を行なった。室内は強制的な通風が行なわれているため、室内に2重の仕切りを設け通風を遮断した。すなわち、各種の成形した円柱ナフタリンを図1に示すような厚さ1.5mmの合板製のボックス(S)の中に水平に置き、上下面に多数の小孔のあるボックス(L)(合板製)にSを入れてLを恒温恒湿室内に放置し、約50~150時間昇華せしめた。

ナフタリンの試料は昇華前後に1級マイクロメータ、精密化学天秤(安並化学衡器製作所、標量200gr、感量1mgr)、1/100mmダイヤルゲージ等で測定を行なった。

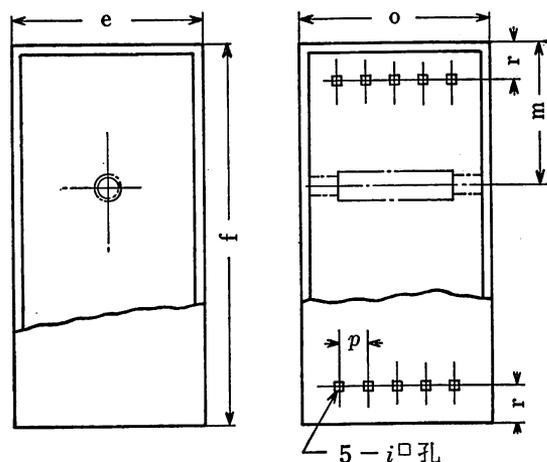


図1

次にナフタリン試料、恒温恒湿室、ボックスについて述べる。

### 2.1 ナフタリン試料

試料形状を図2に示す。芯材には鋼線、ガラス管、硬

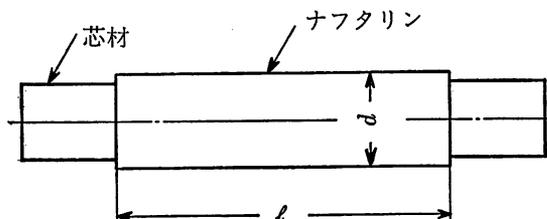


図2

質ビニール管の3種を使用し、これらに100°C前後に熔融したナフタリンを被覆(コーティング)したのち成形した。すなわち試料直径 $d$ が1.4mmφ~4mmφの範囲のものは芯材として鋼線、6mmφ~11mmφのものはガラス管を用

い、これらにナフタリンを0.2mm~0.4mmの厚さにコーティングし、固まった後に薄い刃物で成形した。昇華時間は前者が50時間程度、後者は100時間程度とした。dが20mmφ以上の場合は芯材として硬質ビニール管を用い、汎用旋盤にて切削成形（成形後のナフタリンの厚さ1mm程度）し、昇華時間は150時間程度とした。なお直径dの寸法は6カ所で測定し、その平均直径の3%以上の誤差のある試料は除外した。また、長さℓは直径dの6倍以上とした。（なおℓ/dと昇華量との関係を図7に示す）次にナフタリンの諸性質を表1に示す。

化学式	C <sub>10</sub> H <sub>8</sub>
溶融点	80.7°C
分子量	128.16kg/kmol
ガス定数 R <sub>V</sub>	6.615kgm/kg°K
昇華の潜熱	133Kcal/kg
比重量	1.145gr/cm <sup>3</sup>
(ただし鑄造したものの1.11±0.01gr/cm <sup>3</sup> ) <sup>5)</sup>	
空気中への拡散係数	
$D = 0.0513 \left( \frac{T}{273} \right)^2 \frac{760}{P_0} \text{ cm}^2/\text{S}$ <sup>6)</sup>	
(ただし T°K, P <sub>0</sub> mmHg)	
蒸気圧 P <sub>V</sub>	
$\log_{10} P_V = 11.7797 - \frac{3812.34}{T_V} - 0.02593 \log_{10} T_V$ <sup>7)</sup>	
$\log P_V = 11.55 - \frac{3765}{T_V}$ <sup>8)</sup>	
(ただし T <sub>V</sub> °K, P <sub>V</sub> mmHg)	

表 1

2. 2 恒温恒湿室

恒温恒湿室の温度は20°C±0.5°C, 湿度は60%±5%

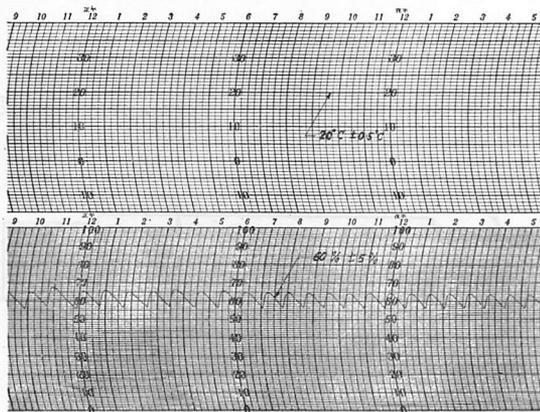


図 3

とした。室内の性能を図3に示し、恒温恒湿化のための空気調和装置の概要を表2に示す。なお室内容積は約

22m<sup>3</sup>である。

概 要	恒温恒湿化のため、室外に空気調和装置を設置、ダクトにて給気し、設定温度を保持する。温湿度条件は 20°C ± 0.5°C, 60% ± 5%
機 器	空気調和機 風量7.1m <sup>3</sup> /min, 冷房容量 2350kcal/hr 暖房容量 2000Kcal/hr
制御機構	電子パネルによる比例制御

表 3

2. 3 ボックス S

熱伝達との相似の場を作るためにはボックスSの各寸法が重要であると考えられる。ボックスSの各寸法の決定については次の通りとした。

巾 e について

Ra < 1000 であるのでLANGMUIRの境界層<sup>2)</sup>が物質移動の場合にも成立すると仮定し

$$\frac{2}{\ln\left(\frac{b}{d}\right)} = Nu \approx Sh$$

より b を求め、e > 2b とした。

高さ f について

GARNER 等<sup>3)</sup>の報告を参考にして

$$f > 15d \text{ とした。}$$

なお、上面より試料の位置までの高さ m は

$$m = 0.4f \text{ とした。}$$

小孔について

1辺2mmの正方形の小孔を図1に示すように設け、r は出来るだけボックスの上下面に近い位置とした。なお、小孔の面積と平均Sh数との関係を図8に示した。

なお、実験には2種類のボックスを用い、試料直径 d により使い分けた。表3にそれらの各々の寸法を示す。

寸法 (mm)	e	o	f	m	r	p	備 考
I	150	150	400	160	20	25	d = 6.0mmφ以上 に使用
II	120	75	200	80	15	15	d = 4.0mmφ以下 に使用

表 3

2.4 ボックスL

ボックスLは上下面に2mmφの多数の小孔(約0.5個/cm<sup>2</sup>)を持ち、これにボックスSを入れた場合、上下に70mm以上の余裕のある大きさとした。すなわち、ボックスLの下面に高さ70mmの金網を置き、その上にボックスSを置いた。巾についてはSを入れて、左右に50mm以上の隙間がとれるようにした。また、ボックスLを恒温恒湿室に入れる場合には、なるべく風が流動しない位置に置き、床から約100mm浮かしておいた。なお、L内の風の流動の状態を四塩化チタンを用いて観察したところ、小孔のある上下面30mm付近まではボックスの外部の影響を受けているようであるが、それ以外の流れは完全密閉容器内のそれと比較してほとんど変わらないことが確かめられた。したがって恒温室内の強制的な空気の流れはボックスS内に対してはほとんど影響を及ぼさないと考えられる。このことはまた、図8に示されている平均Sh数とボックスSの小孔面積との関係で、小孔面積〇の場合のSh数の値が他の場合とあまり変りないことから云えると考えられる。

3. 実験結果

3.1 整理方法及び実験結果

一般に自由対流熱伝達において水平円柱の平均ヌセルト数Nuは

$$Nu = C_1 (Gr \cdot Pr)^n \quad (1)$$

の形で与えられることが多い。

一方物質移動においても水平円柱の平均数Shが

$$Sh = C_2 (Gr \cdot Sc)^n \quad (2)$$

なる形で与えられるとすると(1)(2)式より

$$Nu = \frac{C_1}{C_2} \cdot Sh \cdot \left(\frac{Pr}{Sc}\right)^n \quad (3)$$

が得られる。

また  $Sh = \frac{\alpha_D d}{D}$  (4)

であるから(3)式は

$$Nu = \frac{C_1}{C_2} \cdot \frac{\alpha_D d}{D} \cdot \left(\frac{Pr}{Sc}\right)^n \quad (5)$$

となりα<sub>D</sub>を測定することによりNu数を間接的に知ることが出来る。

また、α<sub>D</sub>は定義より

$$\alpha_D = \frac{\Delta W}{\tau A} \cdot \frac{1}{C_{vw} - C_{v\infty}} \quad (6)$$

で与えられ、試料より充分離れた位置におけるナフタリンの濃度を○と考えると

$$\alpha_D = \frac{\Delta W}{\tau A} \cdot \frac{1}{C_{vw}} \quad (7)$$

となる。一方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

$$C_{vw} = \frac{P_v}{R_v T_w} \quad (8)$$

が成立する。試料表面温度 T<sub>w</sub>は福井等<sup>1)</sup>によれば周囲温度と考えてよいから結局(7)式は

$$\alpha_D = \frac{\Delta W}{\tau A} \cdot \frac{1}{C_{vw}} = \frac{\Delta W}{\tau A} \cdot \frac{R_v T_\infty}{P_v} \quad (9)$$

となる。

以上のことよりτ時間のナフタリンの減量ΔWを測定し、α<sub>D</sub>を求め、平均Sh数をRa数で整理した結果が図4である。図4に示すように平均Sh数は

$$10^{-1} < Gr \cdot Sc < 5 \times 10^2 \text{ において}$$

$$Sh = 0.93 (Gr \cdot Sc)^{1/8} \quad (10)$$

で表わされ、シャーウッド数とヌセルト数との相似性が成立している。この範囲において、間接的にヌセルト数を求める場合は、α/α<sub>D</sub> = 1.27として計算すればよい。

また局所値については、試料表面に対して垂直方向の変化量εを測定することにより求められる。すなわち局所物質伝達率をα<sub>LD</sub>とすると

$$\alpha_{LD} = \frac{R_v T_\infty}{P_v} \cdot \frac{\epsilon \gamma_n}{\tau} \quad (11)$$

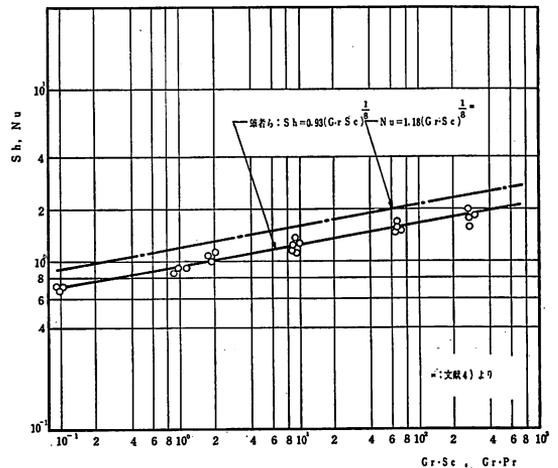


図4

で与えられ、局所Sh数は

$$Sh = \frac{\alpha_{LD} \cdot d}{D} \quad (12)$$

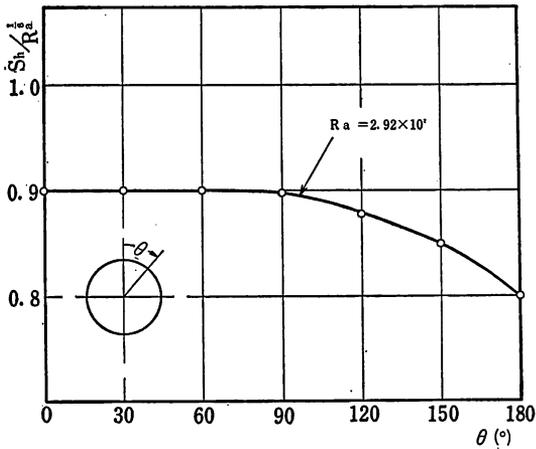


図 5

で与えられる。

円周上の各位置における局所値の測定例を図 5 に示す。測定例の Ra 数が比較的小なので  $\theta$  に対する局所 Sh 数の変化の割合が少ないことが観察される。

次にこの実験に影響を及ぼすと考えられる諸因子の関係を実験的に求めた結果について述べる。

### 3. 2 昇華時間と平均 Sh 数の関係

昇華時間と平均 Sh 数との関係を図 6 に示す。

単位時間当りの昇華量が大きい場合は、試料の形状の変化などのため、長時間気流にさらすことは好ましくないとされているが、図 6 に示すように昇華時間による影響は少ない。逆に昇華時間が極端に短い場合は昇華量が微小で、測定誤差が大となる恐れがある。昇華時間が長いことによる悪影響というより変形量の大小により考慮すべきものと考えられる。

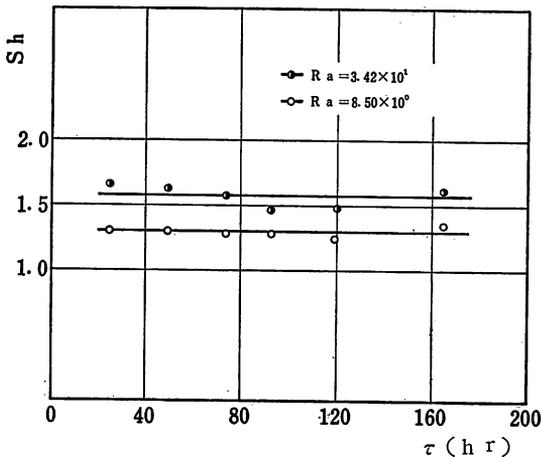


図 6

### 3. 3 試料の l/d と平均 Sh 数との関係

試料の  $l/d$  と平均 Sh 数との関係を図 7 に示す。

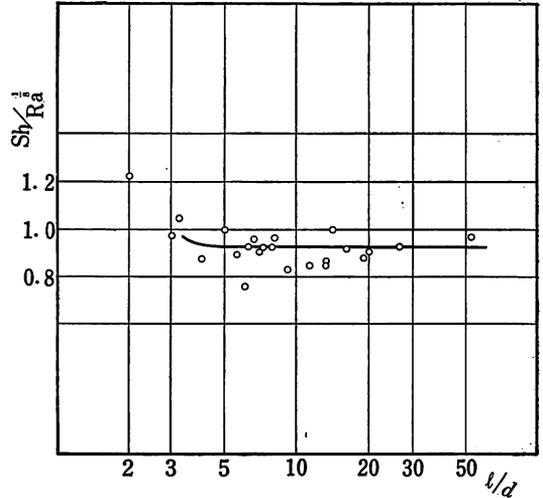


図 7

$l/d$  が無限大で試料の端部の昇華による影響は、無限長さの円柱の場合に対して  $\circ$  になるが、実験範囲においては、 $l/d > 6$  で端部の影響は急激に小になり無視出来るとした。

### 3. 4 ボックス S の小孔と平均 Sh 数の関係

ボックス S の小孔の面積と平均 Sh 数との関係を図 8 に示した。

このことから小孔面積の大小による本実験に与える影響は少ないと考えられる。

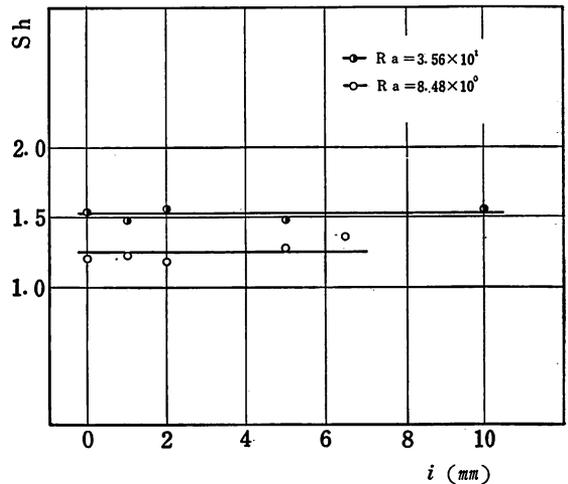


図 8

## 4. 結 言

限られた範囲ではあるが、水平円柱の場合の自由対流の熱伝達の間接測定が一定温度のもとに、長時間ナフタリンを昇華させることにより、簡便に行なえることを示した。その結果、水平円柱の自由対流の物質移動を表わす無次元数、平均Sh数は、 $10^{-1} < Gr \cdot Sc < 5 \times 10^2$  において

$$Sh = 0.93 (Gr \cdot Sc)^{1/8}$$

で表わされることを示した。

なお、 $Ra > 5 \times 10^2$  の場合については目下実験継続中であり次の機会に報告する予定である。

## 5. 記号説明

$Gr = \frac{d^3 g}{\nu^2} \cdot \left  \frac{\rho_{\infty} - \rho_w}{\rho_{\infty}} \right $	: グラスホフ数
$Sc = \frac{\nu}{D}$	: シュミット数
$Sh = \frac{\alpha_D d}{D}, \frac{\alpha_{LD} d}{D}$	: シャーウッド数
$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda}$	: ヌセルト数
$Pr = \frac{\nu}{a}$	: プラントル数
$Ra = Gr \cdot Sc$	: レイレイ数
$g$	: 重力加速度 ( $m/hr^2$ )
$\nu$	: 動粘性係数 ( $m/hr^2$ )
$\rho_{\infty}$	: 空気密度 ( $kg \cdot s^2/m^4$ )
$\rho_w$	: 試料表面の流体密度 ( $kg \cdot s^2/m^4$ )
$D$	: 空気中へのナフタリン蒸気の拡散係数 ( $m^2/hr$ )
$\alpha_D$	: 物質伝達率 ( $m/hr$ )
$\alpha$	: 熱伝達率 ( $Kcal/m^2 hr^{\circ}C$ )
$\alpha_{LD}$	: 局所物質伝達率 ( $m/hr$ )
$\lambda$	: 熱伝導率 ( $Kcal/mhr^{\circ}C$ )
$a$	: 温度伝達率 ( $m^2/hr$ )
$\Delta W$	: 物質移動量 ( $kg$ )
$\tau$	: 昇華時間 ( $hr$ )

$A$	: 試料表面積 ( $m^2$ )
$C_{vw}$	: 試料表面における濃度 ( $kg/m^3$ )
$C_{v\infty}$	: 試料より充分離れた位置における濃度 ( $kg/m^3$ )
$T_{\infty}$	: 恒温恒湿室内温度 ( $^{\circ}K$ )
$T_w$	: 試料表面温度 ( $^{\circ}K$ )
$P_v$	: ナフタリンの飽和蒸気圧 ( $kg/m^2$ )
$R_v$	: ナフタリンのガス定数 ( $kg m/kg^{\circ}K$ )
$\epsilon$	: 試料表面に垂直方向の減量 ( $m$ )
$\gamma_n$	: ナフタリンの比重量 ( $kg/m^3$ )
$\theta$	: 円柱頂点よりの角度 ( $^{\circ}$ )
$C_1, C_2$	: 定数
$n$	: 指数
$d$	: 試料直径 ( $m$ )
$l$	: 試料長さ ( $m$ )
$b$	: 円柱周りのLANGMUIRの境界層の外径 ( $m$ )

## 参考文献

- 1) たとえば 福井, 森下, 機械学会誌 65—525 (昭和37—10), 1480
- 2) ELENBAAS : J. Appl. Phys., 19, 1148, (1948)
- 3) GARNER, F. H. & J. M. HOFFMAN : *ibid.*, 7, 148 (1961)
- 4) M. Mikheyev : 基礎伝達工学 (1966) 東京図書
- 5) H. H. Sogin & V. S. Subramanian, *Trans. ASME, Series C*, 83—4 (1961—11), 483
- 6) 化学工学便覧, (昭33), 化学工学協会
- 7) S. G. Thomas, *J. Soc. Chem. Indust.*, 35—9 (1916), 506.
- 8) T. K. Sherwood & O. A. Träss, *Trans. ASME, Series C*, 82—4 (1960—11), 313