

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)

(水平円柱の場合 その2)

相 場 真 也 五十嵐 聰

1. 緒 言

最近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⁾、この方法は主に単位時間の昇華量の比較的大きい場合に用いられるようである。すなわち、強制対流熱伝達、遠心力場における熱伝達などである。一般自由対流の場合は、昇華量が微少であるためあまり利用されていない。

筆者等は、恒温恒湿室内にて、長時間にわたってナフタリンを昇華させることにより、一般自由対流の場合でも簡便に測定が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⁾では、 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報告したが、今回、 Ra 数 $5 \times 10^2 \sim 5 \times 10^4$ の範囲について実験を行い、次の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、前報とはほぼ同様である。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で仕切った。これに試料を入れ、約 100 ~ 200 時間ボックスを恒温室内に放置し(すなわち昇華させ)、減量を測り、物質伝達率を求めた。

また、これとまったく同じ場で水平円柱の熱伝達の測定を熱量法で併せ行つた。

ナフタリン試料は昇華前後にノギス、鉱山天秤(標量 1 kg, 感量 50 mg, 大正天秤製作所)、1/100 mm ダイヤルゲージ等で測定を行った。

次にナフタリン試料、ボックス、水平円柱の直接測定等について述べる。

2.1 ナフタリン試料

試料形状を図 1 に示す。芯材には各種直径 (25 mm ϕ

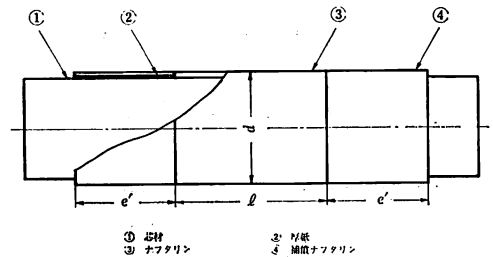


図 1

~ 120 mm ϕ) の硬質ビニール管を使用し、これらに、100°C 前後に熔融したナフタリンをコーティングした後旋盤成形した。なお、成形後のナフタリンの厚さは 1 mm ~ 2 mm 程度であった。

また、局所値を求める場合は芯材を黄銅棒とした。

試料形状で、 l はボックスの大きさにより制限を受けるので $l/d = 1 \sim 2.5$ 程度とした。一般に水平円柱で長さ/直径が小の場合は、いわゆる端部の影響を受け、平均物質伝達率は、無限の長さの場合と較べると大きく出るので、図 1 に示したように端部を補償するようにした。すなわち、芯材の外径と等しい内径の厚紙製の中空円筒を用意し、厚紙の外側にナフタリンを塗布し、これを試片の両端に嵌め合せてやった。減量の測定の際は、補償部分は除外して行うが、昇華中は両端の補償部分により水平軸線方向への拡散がないため、長さ/直径が無限大の場合とはほぼ等価であると考えられる。(なお、両端を補償した場合の平均 Sh 数と l/d との関係を図 6 に示した。)

次にナフタリンの諸性質を表 1 に示す。

2.2 恒温恒湿室

恒温恒湿室の温度は $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 、湿度は $60 \pm 0.5\%$

化学式	$C_{10}H_8$
融点	$80.7^{\circ}C$
分子量	$128.16kg/kmol$
ガス定数 R_v	$6.615kgm/kg^{\circ}K$
昇華の潜熱	$133Kcal/kg$
比重	$1.145gr/cm^3$
(ただし 鑄造したもの $1.11 \pm 0.01gr/cm^3$) ⁷⁾	
空気中への拡散係数	
	$D = 0.0513 \left(\frac{T}{273} \right)^2 \frac{760}{P_0} cm^2/s^8)$
	(ただし $T^{\circ}K, P_0 mmHg$)
蒸気圧 P_v	
	$\log_{10} P_v = 11.7797 - \frac{3812.34}{T_v} - 0.02593 \log_{10} T_v^9)$
	$\log P_v = 11.55 - \frac{3765}{T_v}$ ¹⁰⁾
	(ただし $T_v^{\circ}K, P_v mmHg$)

表 1

とした。また恒温恒湿室の概要は前報の通りである。

2.3 ボックス

二重のボックスのうち、内側のボックス(s)を図2に、

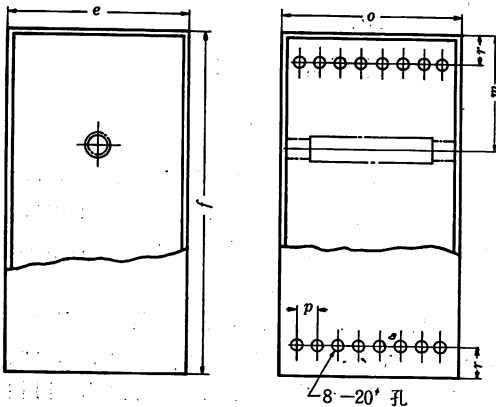


図 2

各寸法は表2に示した。前報では、境界層の厚さがdに

記号	e	o	f	m	r	p	備考
寸法	230	270	700	250	40	30	単位 mm

表 2

比し厚い範囲を扱ったので、ボックスの巾eは、試料直径dに比し大きいものとしたが、今回はdに比し境界層の厚さは比較的薄いので $e > 2d$ とした。ボックスの高さfは $f > 6d$ とした。また、小孔については20mmφの孔を図のように設けた。前報の実験より推定して、この小孔の影響は少ないものと考えた。外側のボックス

(L)については前報と同様にして各部寸法を定めた。

2.4 熱伝達の直接測定

昇華実験とまったく同じ場で、物質移動と熱伝達との相似性を確かめる目的で、水平円柱の対流熱伝達の直接測定を行った。

また、恒温室とは別の実験室で自由対流熱伝達の実験をも行った。

次に直接測定の概要について述べる。

2.4.1 実験方法及び材料

恒温室内において、ナフタリン試料の場合と同様ボックスS内で熱伝達実験を行った。すなわち、S内の同位置で供試円柱を水平に支え、円柱内部に電熱線を入れて加熱し、定常状態における放熱量を測った。図3に供試

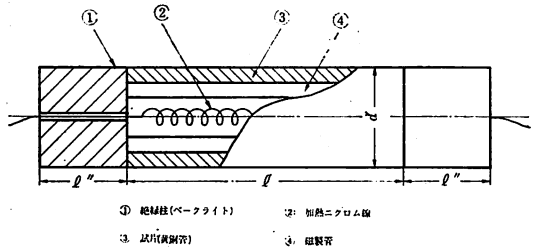


図 3

円柱の構造を示すが、試片は厚肉黄銅管とし、内部に磁製管を入れ、加熱コイルを保持させた。また両端はベークライトを用い熱絶縁材とした。熱電対は径0.065mmの銅-コンスタンタン線を用い、試料表面温度、両端の絶縁部材の表面温度、絶縁部と試片との境の温度等を精密級電位差計を用いて測った。また表面に熱電対を取付ける方法は、接着材を用いて、薄い銀紙で熱電対を接着させた。なお、表面に熱電対を埋め込み、表面温度を測る方法が一般的であるが、この方法と比較したところでは差がないので前述の方法を取った。気温は水銀温度計で測定した。

次に実験結果の整理方法について述べる。加熱コイルを流れる電流Iアンペア、両端の電位差Vボルトの場合、発生熱量 Q_0 、試片表面よりふく射で失われる熱量 Q_r は、それぞれ次式で表わされる。

$$Q_0 = 0.86VI \dots\dots\dots (1)$$

$$Q_r = C \cdot \pi d l' \left\{ \left(\frac{T_s}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\infty}}{100} \right)^4 \right\} \dots\dots (2)$$

ここで黄銅管表面は鏡面仕上を行ったので、 $C=0.033$ を用いた。

また試片の片側から伝導で Q_c が失われるとすると、

試片から対流のみで失われる熱量は（内柱外部の加熱線、絶縁柱部のふく射等による損失は無視して）

$$Q = Q_0 - (Q_r + 2Q_c) \dots\dots\dots (3)$$

で表わされる。

ここで Q_c は次式より算出した。いま絶縁柱の試片側の温度を Θ とした場合に、伝導で失われる熱量は

$$Q_c = \lambda' \cdot m' \cdot \Theta \cdot F \dots\dots\dots (4)$$

である。ただし

$$m' = 2 \sqrt{\frac{\alpha_1}{\lambda' \cdot d'}} \dots\dots\dots (5)$$

で与えられ、 λ' はベークライトの熱伝導率で、0.2を採用した。

(5)式中の α_1 は絶縁柱の表面の平均温度をとり、Mc Adams³⁾の整理式

$$Nu = 0.53 (Gr \cdot Pr)^{1/4} \dots\dots\dots (6)$$

より求めた。

結局試片表面の対流のみによる熱伝達率は、(3)式より

$$\alpha = \frac{Q}{\pi \cdot d' \cdot l' \cdot (T_s - T_\infty)} \dots\dots\dots (7)$$

で求められる。

供試円柱は $d' = 10 \sim 25\text{mm}$ であり、 l' は、泉⁴⁾によれば $l'/d' > 6$ で無限長さの円柱と考えてよいので $l'/d' = 10$ とした。 $T_s - T_\infty < 150^\circ\text{C}$ の範囲で($4 \times 10^3 < Ra < 5 \times 10^4$)で実験を行い整理した結果を図4に示す。

また、水平円柱の自由対流熱伝達の測定 ($3.6\text{m} \times 5.4\text{m} \times 10.8\text{m}$ の実験室を高さ1.5m、巾1.0mのカーテンで四方を仕切り、この中で試片を床から1.0m附近に水平に支えて行った。なお、カーテンの下端は0.3mあけておいた。)を行い、整理した結果を図4に示しておいた。

図4より、恒温室にて行った場合と、普通の実験室で行った自由対流熱伝達実験の結果とでは、限られた範囲

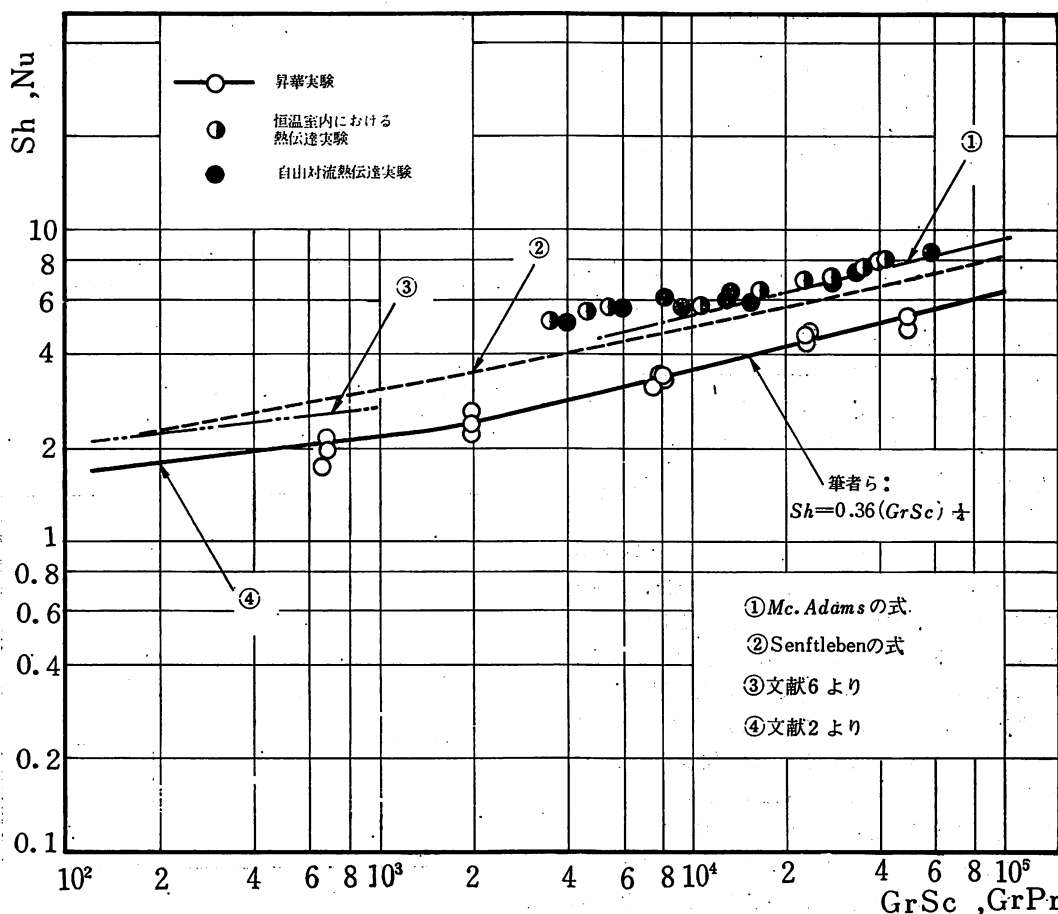


図 4

ではあるが、よく一致している。したがって、恒温室内のボックスSの中において行う実験は、自由対流の場で行う実験と同じと考えてよい。

3. 実験結果

3.1 整理方法及び実験結果

一般に、物質移動を表わす Sh 数は

$$Sh = \frac{\alpha_D \cdot d}{D} \dots\dots\dots (8)$$

であり、 α_D は定義により

$$\alpha_D = \frac{\Delta W}{\tau \cdot A} \cdot \frac{1}{C_{vw} - C_{v\infty}} \dots\dots\dots (9)$$

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 0 と考えると、

$$\alpha_D = \frac{\Delta W}{\tau \cdot A} \cdot \frac{1}{C_{vw}} \dots\dots\dots (10)$$

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

$$C_{vw} = \frac{P_v}{R_v \cdot T_w} \dots\dots\dots (11)$$

が成立する。試料表面温度 T_w は福井等¹⁾ によれば、周囲温度と考えてよいから、(10)式は結局

$$\alpha_D = \frac{\Delta W}{\tau \cdot A} \cdot \frac{1}{C_{vw}} = \frac{\Delta W}{\tau \cdot A} \cdot \frac{R_v T_\infty}{P_v} \dots\dots\dots (12)$$

となる。

以上のことにより、 τ 時間のナフタリンの昇華前後の減量 ΔW を測定し、 α_D を計算し、平均 Sh 数を Ra 数で整理した結果を図4に示す。図に示すように、平均 Sh 数は $2 \times 10^3 < Gr \cdot Sc < 5 \times 10^4$ において

$$Sh = 0.36 (Gr \cdot Sc)^{1/4} \dots\dots\dots (13)$$

で表わされる。 $5 \times 10^2 < Gr \cdot Sc < 2 \times 10^3$ の範囲においては、やや(13)式よりは高い値を与え、前報の式 $Sh = 0.93 (Gr \cdot Sc)^{1/8}$ とは $Gr \cdot Sc = 10^3$ 付近で滑らかに接するようである。

また、直線①は Mc・Adams の整理式、曲線②は Senftleben の式を示したものであるが、ほぼ、シャーウッド数とヌセルト数との間に相似性が成立している。間接的にヌセルト数を求める場合は、 $\alpha / \alpha_D \approx 1.47$ として計算すればよい。しかし、筆者等の直接測定の結果は Ra 数 $> 10^4$ の範囲では、Mc・Adams の式ときわめてよく一致しているのであるが、Ra 数 $> 10^4$ では若干高い値を示した。これは Mc・Adams の整理式の下限が Ra 数 $= 10^4$ 付近であること、Senftleben の式でもみられるように曲線の傾きがこの付近を境にして緩くなっていること等を考えると Mc・Adams の式との差があるのは当然であるが、その差が大き過ぎるよう

も考えられる。これらの傾向が間接測定においては、Ra 数 $= 2 \times 10^3$ 付近に現われている。

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 を測定し、 α_{LD} を次式で計算した。

$$\alpha_{LD} = \frac{R_v \cdot T_\infty}{P_v} \cdot \frac{\varepsilon \cdot r_n}{\tau} \dots\dots\dots (14)$$

円周上の各点における ε を測り整理したものの一例を図5に示す。

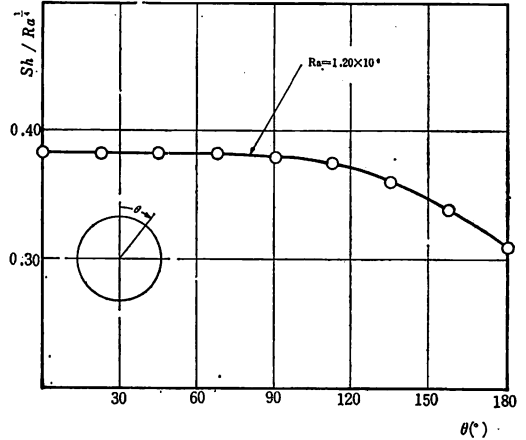


図 5

3.2 l/d と平均 Sh との関係

両端を補償しない場合に $l/d = 1 \sim 2.5$ 程度では、端部の影響を無視出来ない。すなわち、前報にも示したように無限長さの場合より大きい α_D を与える。筆者等は、前述のように両端を補償してやることにより端部の影響を除外した。次に補償してやった場合の l/d と平均 Sh 数との関係を図6に示す。

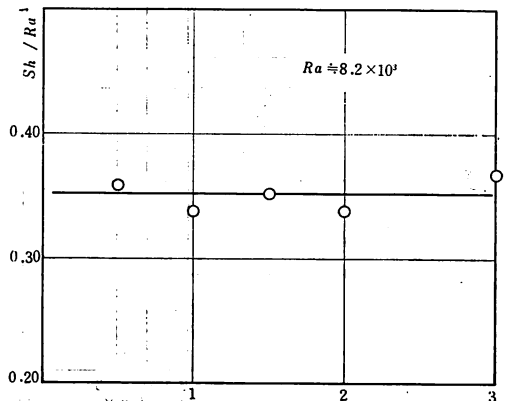


図 6

4. 結 言

前報において、Ra 数 $10^{-1} \sim 5 \times 10^2$ の範囲で、水平円柱の自由対流の物質移動を表わす平均 Sh 数は、 $Sh = 0.93 (Gr \cdot Sc)^{1/4}$ で表わされることを示したが、今回 Ra 数 $= 5 \times 10^2 \sim 5 \times 10^4$ の範囲で実験を行い、Ra 数 $= 2 \times 10^3 \sim 5 \times 10^4$ の範囲で $Sh = 0.36 (Gr \cdot Sc)^{1/4}$ で表わされることを示した。

実験範囲においてはヌセルト数とシャーウッド数とが相似を示しており簡便に間接測定が行えることを示した。

5. 記号説明

Ra = GrSc, GrPr	: レイレイ数
l	: ナフタリン試片長さ (m)
d	: ナフタリン試片直径 (m)
I	: 電流 (アンペア)
V	: 電圧 (ボルト)
Q ₀	: 発生熱量 (kcal)
Q _v	: ふく射で失われる熱量 (kcal)
C	: ふく射率
Q	: 試片から対流のみで失われる熱量 (kcal)
⊖	: 試片側の絶縁柱 (ベークライト) 端温度 (°C)
λ'	: ベークライト熱伝導率 (kcal/mhr°C)
m'	: $2\sqrt{\frac{\alpha_1}{\lambda' \cdot d'}}$
F	: 絶縁柱部の軸方向に対して直角の断面積 (m ²)
α ₁	: 絶縁柱部の平均熱伝達率 (kcal/m ² hr°C)
d'	: 試片直径 (m)
l'	: 試片長さ (m)
Gr = $\frac{d^3 g \rho_\infty - \rho_w }{\nu^2} \left \frac{d^3 g T_s - T_\infty }{\nu^2} \right $: グラスホフ数
Pr = $\frac{\nu}{a}$: プラントル数
Nu = $\frac{\alpha \cdot d'}{\lambda}$: ヌセルト数
α	: 試片の平均熱伝達率 (kcal/m ² hr°C)
T _s	: 試片表面平均温度 (°K)
T _∞	: 試片より充分離れた室温 (°K)

Sh = $\frac{\alpha_D \cdot d}{D}, \frac{\alpha_{LD} \cdot d}{D}$: シャーウッド数
α _D	: 物質伝達率 (m/hr)
D	: ナフタリン蒸気の拡散係数 (m ² /hr)
ΔW	: 減量 (kg)
τ	: 昇華時間 (hr)
A = πdl	: 試料表面積 (m ²)
C _{vW}	: 試料表面における濃度 (kg/m ³)
C _{v∞}	: 試料により充分離れた位置における濃度 (kg/m ³)
R _v	: ナフタリンのガス定数 (kg-m/kg°C)
T _w	: ナフタリンの試料表面温度 (°K)
Sc = $\frac{\nu}{D}$: シュミット数
ε	: 試料表面に垂直方向の減量 (m)
P _v	: ナフタリンの飽和蒸気圧 (kg/m ²)
γ _n	: ナフタリンの比重量 (kg/m ³)
g	: 重力の加速度 (m/hr ²)
a	: 温度伝達率 (m ² /hr)
ν	: 動粘性係数 (m/hr ²)
ρ _∞	: 空気密度 (kg-s ² m ⁴)
ρ _w	: 試料表面の流体密度 (kg-s ² m ⁴)
λ	: 空気熱伝達率 (kcal/mhr°C)
θ	: 円柱頂点よりの角度 (°)

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) Mc·Adams: "Heat Transmission" (Mc Graw-Hill, 1942), p.243, 244
- 4) 泉 機論文集 21巻 109号, 658
- 5) Seuffleben, H.: Die wärmeabgabe Von Körpern Verschiedener Form in Flüssigkeiten und Gassen bei freier Strömung. Z. angew. Phy., 3 (1951) s. 361

- 6) M. Mikheyev : 基礎伝達工学(1966)東京図書
- 7) H. H. Sogin & V. S. Subramanian,
Trans. ASME, Series C, 83—4 (1961—11),
483
- 8) 化学工学便覧, (昭33), 化学工学協会
- 9) S. G. Thomas. J. Soc. chem. Indust.,
35—9 (1916), 506.
- 10) T. K. Sherwood & O. A. Träss, Trans.
ASME, Series C, 82—4 (1960—11), 313