有機溶剤の湿り空気中への蒸発*

吉 田 哲 夫**・兵 働 務**

§ I. 目的および思考の方針

I・1 目的 われわれはさきに空気中の水分が有機溶剤の湿球の読みに非常な影響をあたえるものであり、したがって有機溶剤の湿度線図から溶剤の湿球温度 t_{a1} を推算する場合には、大きな修正を施す必要のあることを提唱したが¹⁰⁾、今回は有機溶剤の液面からの蒸発が空気中の水分によって、どのように影響されるかを検討した。

I・2 思考の方針 溶剤が乾燥空気中へ蒸発する場合の伝熱平衡式は

$$k'r_a(H_{a1}' - H_a) = h_s(t - t_{a1}') \quad (1)$$

つぎに空気中に水蒸気がふくまれると、水分の凝縮などによる熱量 q_w が付加されることが考えられるので

$$k'r_a(H_{a1}' - H_a) = h_s(t - t_{a1}') + q_w \quad (2)$$

とかきうる。(2) 式から (1) 式を引くと、

$$k'r_a(H_{a1}' - H_a) - k'r_a(H_{a1}' - H_a) = q_w - h_s(t_{a1} - t_{a1}') \quad (3)$$

となり、 r_a 、 q_w がともに正の量であり、その上 $q_w > h_s \times (t_{a1} - t_{a1}')$ であるなら、(3) 式より

$$k'(H_{a1} - H_a) > k'(H_{a1}' - H_a)$$

ということが考えられる。つまり、湿潤空気をつかうと $H_{a1} > H_{a1}'$ となって乾燥空気を使う場合より、よけいに蒸発することが予想される。

上のようなことが確かにおこりうるものであるかどうかを有機溶剤としてトルエン、四塩化炭素、エチルアルコール、メチルアルコールを使用し、空気、湿度、温度をかえた場合について確かめ、かつ空気流速をかえた場合の影響をも調べてみた。

§ II. 実験装置

蒸発室 E に完全乾燥空気と湿潤空気をおくために Fig. 1 のごとき装置を組立てた。乾燥空気を送ろうとする場合にはバルブ B_3 、 B_5 を閉じ、バルブ B_2 、 B_4 を開いて $D_1 \sim P_2$ の吸着剤を入れた容器を通し、さらに加熱器 H_3 にて所要の温度にあげて蒸発室 E に導いた。乾燥空気の完全度は、乾

湿度計 R の読みならびにバルブ B_7 付近で空気をぬき出し、これを P_2O_5 に導き、 P_2O_5 の重量をはかることによって検定した。

湿潤空気をおくためにはバルブ B_2 、 B_4 を閉じ、バルブ B_3 、 B_5 を開いてまず空気を加熱器 H_1 におくり、昇温し、それを増湿筒下に導き必要水分をあたえた。F はラシヒリング充填塔で下方の温水タンクの水をポンプ M によって循環する方式である。塔頂より出た空気をサイクロン Y_1 、 Y_2 に通し、同伴された飛沫を除去し、それをさらに加熱器 H_3 で所要の温度にあげて後蒸発室 E に導いた。そのさい乾湿度計 R の読みが所望のものになるよう温度および湿度の調節は S_1 、 S_2 、 S_3 、ならびにギヤーポンプ M の回転数によっておこなった。所要風量はバルブ B_1 で調節し、オリフィス O にてよみとった。

Fig. 2 にしめされているのは蒸発室 E の立面図、平面図であり、E の外枠は木製でその外側を厚さ約 7 cm のガラスウールで保温した。蒸発さすべき溶剤を上部のビューレットからガラス製の蒸発皿に注入し、かつ蒸発時に液準計の読みが一定を保つようにたえずビューレットより液を注入し、その注入量をもって蒸発量とした。湿潤空気についての実験の場合には空気中の水蒸気が液体の形で蒸発皿の中に浸入する。その量は最大の場合で蒸発皿の容積 10.454 cc に対して約 0.036 cc/min であり、したがって液準計のよみは毎分約 0.057 mm くるっ

A: Active Carbon-packed Column	M: Gear pump
B_1, B_2, B_3 : Valve	N: Circulating-water tank
C: Rotary blower	O: Orifice
D_1, D_2 : $CaCl_2$ -packed column	P_1, P_2 : P_2O_5 -packed column
E: Vaporization chamber	R: Psychrometer
F: Humidifier	S_1, S_2, S_3 : Slidac
H_1, H_2, H_3 : Electric heater	T: Thermometer
	Y_1, Y_2 : Cyclone

Fig. 1 Sketch of apparatus

* 昭和 32 年 12 月 3 日受理

** 大阪市立大学理工学部

Fig. 2 Vaporization chamber

てくることになるので測定毎にこれを補正した。

蒸発皿の外周には漏紙を6mmの厚さに重ねて巻き、それに上方に配置したタンクより蒸発さすべき溶剤と同じ液を微量ずつ注ぎ、たえず漏紙が湿潤の状態にあるようにし、その蒸発作用によって外熱の侵入を防ぎ、皿の外周ができる限りその液の湿球温度附近にあるようにした。そしてまた漏紙よりの蒸発蒸気が蒸発皿の蒸発に影響をおよぼさぬよう、へだて板を置いて空気流によって速かに外部に放出されるようにした。皿の液温は熱電対(0.1mmφの銅-コンスタンタン)、とポテンショメータで計り、空気温度は皿の前後におかれた2本の細径の水銀温度計で測定し、それらの読みの算術平均をとって空気温度とした。なおスタートにあたって蒸発室の周囲にまかれた電熱線によって蒸発室が通過すべき空気温度にほぼ等しくなるように加熱し、空気を通し始めて後、電流をきるようにした。

§ III. 実験結果と計算式

測定結果の平均値をあらわす線図が、Fig. 3 および Fig. 4 である。これらの図には繁雑をさけるためにメチルアルコールの記入を除外し、かつ四塩化炭素は水より比重が大なるため凝縮した水が液面に浮く関係上、よいデータを得ることができなかった。これについての考察はふいた。両図にみるごとく、いずれの場合においても比較湿度の大きい空気を使った方があきらかに

Fig. 3 Average curves for vaporization rate vs. air temperature (%=Humidity percentage of water vapor in air)

Fig. 4 Average curves for vaporization rate vs. air velocity (%=Humidity percentage of water vapor in air)

蒸発量が多いことを知る。このことはわれわれの予想の正しかったことを上記の三つの溶剤について実験的に裏づけたことになる。

III.1 空気の温度と湿度による影響

(i) 乾燥空気の場合 $Sc, Pr=0.5\sim 2.5$ の範囲において

$$h/k' = (Sc/Pr)^{1/2} \cdot c \quad (4)$$

が成立することがわかっている⁵⁾。われわれの今回の実験もこの範囲に入る。それで(4)式を(1)式に代入すると、

$$r_a(H_{a1}' - H_a) = (Sc/Pr)^{1/2} \cdot c \cdot (t - t_{a1}') \quad (5)$$

(5)式において $r_a (Sc/Pr)^{1/2} \cdot c$ は既知であり、また、溶剤蒸気を含んでいない空気を送っているから $H_a=0$ とおける。よって空気温度 t を指定して、その時の液面温度 t_{a1}' を計算することができる。液表面温度を実測することはむずかしいので、(5)式より計算された温度を

Table 1 Surface Temperature (t_{a1}'), Wet-bulb Temperature, and Liquid Temperature of Solvents in Vaporization Pan, when Perfectly Dry Air Is Used

Air Temp. t °C	Toluene			Methyl-alcohol			Ethyl-alcohol		
	t_{a1}' °C		Liquid Temp. in Vaporization Pan (°C)	t_{a1}' °C		Liquid Temp. in Vaporization Pan (°C)	t_{a1}' °C		Liquid Temp. in Vaporization Pan (°C)
	Value from Eq. (5)	Wet-bulb Temp.		Value from Eq. (5)	Wet-bulb Temp.		Value from Eq. (5)	Wet-bulb Temp.	
30	13.0	14.0	15.0	-2.85	-1.6	-1.0	5.00	7.0	7.4
40	18.0	19.0	21.5	-0.07	1.5	1.8	8.15	10.3	11.1
50	22.5	23.6	25.1	2.30	4.3	5.8	10.71	13.0	13.7
60	26.4	27.3	29.8	4.23	5.0	6.7	13.00	15.3	15.9

Fig. 5 (A) Wet-bulb depression of toluene

Fig. 5 (B) Wet-bulb depression of methyl alcohol

Fig. 5 (C) Wet-bulb depression of ethyl alcohol

もって液表面温度として Table 1 に示した。この表に見られるように溶剤の湿球温度より少し低い値となっている。これらの湿球温度は、われらの前の研究¹⁰⁾によって得られた Fig. 5 (A), (B), (C) によるものである。なお液表面温度が湿球温度より少し低いのは前者が (5) 式より計算されたので、輻射などの影響が全く入っていないためと思われる。

(5) 式からの t_{a1}' あるいは (8) 式からの t_{a1} は輻射などの影響を受けていない値であるから、以後の熱伝達の計算にはこれらの値を用いて行うことにする。

さて蒸発量を W 、蒸発面積を A とすれば、単位面積、単位時間当りの蒸発熱量は $r_a W/A$ となり、これは実験値であるからこれから輻射熱による影響を差引くと

$$r_a W/A - Q_R/A = h_s(t - t_{a1}') \quad (6)$$

なる平衡式が成立する。(6) 式より h_s を算出するにあ

たって t_{a1}' には、上述のごとく (5) 式より計算した値 (Table 1) を使い Q_R/A には国井⁹⁾の輻射伝熱の理論によって計算した値を用いた。しかし Q_R/A は輻射の影響の最も激しい場合で $r_a W/A$ の約 1 割程度である。このようにして、(6) 式より求めた h_s を Fig. 6 に示す。この図に

* 発熱面 (H) から受熱面 (C) への輻射伝熱量は単位受熱面積あたり

$$\frac{Q_R}{A} = \frac{Q_{HC}}{A_C} = \frac{A_H}{A_C} \phi_{HC} (4.96) \left\{ \left(\frac{273+t}{100} \right)^4 - \left(\frac{273+t_{a1}'}{100} \right)^4 \right\} \quad [\text{kcal/m}^2\text{hr}]$$

であるが、ここに A_H [m^2]、 A_C [m^2] はそれぞれ発熱面積および受熱面積であり、 ϕ_{HC} は総括吸収率であって黒度を $\epsilon_H = 0.91$ (木製壁)、 ϵ_C

$= 0.65$ (液体として水を取った) とすれば、本研究での蒸発室の ϕ_{HC} はその角関係より 0.0309 と計算される (ここに t は発熱面 (壁面) 温度であるが空気温度に等しいと考えた)。

たとえば今輻射の影響の激しい場合として、トルエンを 60°C の乾燥空気の流れの中に蒸発させる場合を例にとると、 $t = 60^\circ\text{C}$ 、 $t_{a1}' = 26.4^\circ\text{C}$ 、 $r_a = 97.2 \text{ kcal/kg}$ 、 $W/A = 0.06 \text{ cc/cm}^2\text{min}$ の場合、 (次頁へ)

見るとく、いずれの溶剤についてもこの程度の温度範囲では h_s は空気温度 t にあまり影響されないようである。

(ii) 湿潤空気の場合

空気中に水蒸気がふくまれると、水は自分と非親和性の溶剤、例えばトルエンのごときものには凝縮によって、親和性のアルコールのごときものには吸収によって液体の形で溶剤に入り込む。^{**} このために凝縮熱などの影響をうけるので、次式の伝熱平衡式が成立するものと考えられる。すなわち

$$r_a W/A - Q_R/A = h_s(t - t_{a1}) + q_w \quad (7)$$

ここに $q_w = r_w k'(H_w - H_{wa1})$ である。ただしここには吸収熱を凝縮熱と比較して無視してある。また(7)式の右辺には q_w 以外に水蒸気の Bodily transfer heat が入るが、その熱量は q_w に比べて僅少であるので無視した。

(7) 式において q_w 中の k' に(4)式を入れると、

$$r_a W/A - Q_R/A = h_s(t - t_{a1}) + r_w h_w (H_w - H_{wa1}) / \{ (Sc/Pr)_w^{1/2} \cdot c \} \quad (8)$$

(8) 式において実測値 W の中には、輻射および空気中の水分の影響を含んでいるのでこれらを差し引いてある。そうすると純空気と液面との熱交換のみの熱量となるので h_s には(6)式で求めたそれぞれの t に対する h_s を入れた。なお h_w には溶剤の蒸発の場合と同じ装置で同じ方法で水を蒸発させて得たデータを基にして、(6)式を使って計算したそれぞれの t に対する h_w の値 (Table 2) を入れた。また(8)式中の H_{wa1} は t_{a1} における湿り空気の絶対湿度であるが、これは $H_{wa1} = 0.622 P_{wa1}/$

$\{760 - ((p_{wa1} + p_{a1}))\}$ より計算した。この式中 p_{wa1} , p_{a1} はそれぞれ t_{a1} における水および溶剤の蒸気圧である。(8) 式にこれらの値を入れて t_{a1} を計算したのであるが、この結果が Table 3 にあらわされている。これらは Fig. 5 (A), (B), (C) より求めた溶剤の湿球温度に近い値である (大部分の t_{a1} は湿球温度より低い)。このようにして t_{a1} が求められると、

$$(h_s + h_r)(t - t_{a1}) = \frac{r_a W}{A} - \frac{Q_R}{A}$$

なる伝熱平衡式より

$$h_r = \frac{(r_a W - Q_R)}{A(t - t_{a1})} - h_s \quad (9)$$

となり、(9) 式より凝縮熱による伝熱係数 h_r が算定できる。Fig. 6 には

$$h_t = h_s + h_r$$

として示してある。 h_s は乾燥空気を使った場合の伝熱係数であるから、図より h_r は $h_r = h_t - h_s$ によって求められ、 h_r が h_s に比べていかに大きいかわかりうる。

III-2 空気の流速による影響

Fig. 7 には、蒸発室での平均空気温度 $t = 30^\circ\text{C}$ の場合における空気流速および湿度の熱伝達係数に及ぼす影響がしめされている。この図において湿度が高い場合の方が流速の h_t に対する影響が大きいことを知る。

さて乾燥空気の場合には(4)式のアナロジ式が成立するが、水蒸気による湿潤空気の場合には、われわれがさきに発表した論文¹⁰⁾ にもとづいて、

$$h_t/k' = (Sc/Pr)^{1/2} \cdot c \cdot e^n \quad (10)$$

$$\text{ただし } e = \frac{H_{a1} - H_a}{H_{a1}' - H_a} \frac{t - t_{a1}'}{t - t_{a1}}$$

なる式を提唱し、この関係および(4)式を使って、乾燥空気に対して

$$J = \frac{h_s}{cG} (Pr)^{1/2} = \frac{k'}{G} (Sc)^{1/2} \quad (11)$$

Fig. 6
Heat transfer coefficient vs. air temperature
(% = Humidity percentage of water in air)

(前頁より) $r_a W/A = 3010 \text{ kcal/m}^2\text{hr}$ となり、これに対して $Q_R/A = Q_{RC}/A = 57.6 \times 0.0309 \times 4.96 \times 43.3 = 382.5 \text{ kcal/m}^2\text{hr}$ となる。このように激しいと考えられる状態でも、 Q_R/A は $r_a W/A$ に比べて約 1 割程度となる。空気がしめればしめる程空気温度と液表面温度との差が小となるから Q_R/A はなおさら小となる。

^{**} 水と非親和性のトルエンと親和性のアルコールとは、空気中の水分が溶剤中に入り込む機構が異なる¹⁰⁾。前者は空気の露点とトルエンの

湿球温度より高くなって初めてトルエン液面に水分が凝縮して、トルエンの温度を引き上げるが、後者は露点に関係なく空気中にすこしでも水分があるとアルコールの温度は上昇する。これは恰もガス吸収の様な機構で、水蒸気がアルコールの中に入り込み、しかも侵入した後は液になる。この時に液化熱が出る。小生らの前論文¹⁰⁾ でアルコールに対して熱平衡をとるときに凝縮熱で計算すると、よく実験データと合うところからこの事が云えると思う。

Table 3 Surface Temperature (t_{a1}), Wet-bulb Temperature, and Liquid Temperature of Solvents in Vaporization Pan, When Water-wet Air Is Used

Percentage Humidity %	Air Temp. t °C	Toluene			Methyl-alcohol			Ethyl-alcohol		
		t_{a1} °C		Liquid Temp. in Vaporization Pan (°C)	t_{a1} °C		Liquid Temp. in Vaporization Pan (°C)	t_{a1} °C		Liquid Temp. in Vaporization Pan (°C)
		Value from Eq. (8)	Wet-bulb Temp.		Value from Eq. (8)	Wet-bulb Temp.		Value from Eq. (8)	Wet-bulb Temp.	
20	30	13.0	$=t_{a'1}$	15.0	4.0	5.6	7.1	10.4	13.0	14.1
	40	18.0		21.5						
	50	22.5		25.1						
40	60	29.7	29.9	31.8	20.1	19.2	22.0	26.2	28.0	31.8
	30	20.4	21.6	23.0						
	45	24.2	25.8	26.3						
70 (for Toluene) or 65 (for Others)	50	29.1	30.5	32.2	28.4	26.0	28.8	35.2	34.8	37.5
	55	34.0	34.2	35.8						
	60	39.2	39.0	42.1						
100	30	27.15	27.80	28.3	7.75	9.4	10.7	14.85	16.0	18.3
	40	31.60	34.00	32.5						
	45	36.50	37.40	38.4						
	50	42.45	42.20	44.6	26.25	24.7	27.2	33.00	33.3	35.4
	55	47.60	47.00	48.5						
	60	53.6	52.8	53.5						
	30	23.0	24.0	24.5	12.1	13.8	14.8	19.2	20.8	21.2
	40	32.5	33.4	33.6						
	50	42.3	43.1	44.0						
	60	53.6	52.8	53.5	31.1	30.0	32.0	39.0	39.2	41.5

Fig. 7

Heat transfer coefficient vs air velocity
(% = Humidity percentage of water vapor in air)

湿潤空気に対して

$$J = \frac{h_t}{cG} (Pr)^{1/2} = \frac{k'}{G} (Sc)^{1/2} \epsilon^a \quad (12)$$

とかくと、これら両式は J 因子の関係をあらわすことになる。今 $h/(cG) = St$ (Stanton 数) である故両式の左辺を

$$St(Pr)^{1/2} = b_1(Re)^m \quad (13)$$

Fig. 8 Relation between $Nu/Pr^{1/2}$ and Re in Eq. (14)

Slope of each linear line is represented by $(m+1)$ which is equal to 0.8

1... 0% 5... 0% 9... 0%
2... 40% 6... 40% Ethyl- 10... 40% Methyl-
3... 80% 7... 65% alcohol 11... 65% alcohol
4... 100% 8... 100% 12... 100%

(% = Percentage humidity of water vapor in air)

とおき、 $St = Nu/(Re \cdot Pr)$ の関係を入れると、

$$Nu = b_1(Re)^{m+1}(Pr)^{1/2} \quad (14)$$

(14) 式に実験値を入れてこの式の関係を画くと Fig. 8 のごとくなり $m+1 \div 0.8$ となり、この値は Colburn²⁾, Brown¹⁾, Shepherd³⁾, 水科等⁶⁾ のしめした値と同一である。この場合には (13) 式の m は -0.2 となり、Jurges, Elias, Fage and Falkner の平板上の伝熱実験値をもとにして作った Hopf²⁾ の式にも一致している。

また (12) 式において ε^* を左辺に移し, $J=h/(cG) \cdot Pr^{1/2} \cdot 1/\varepsilon^*$ として

$$St(Pr)^{1/2} = b_2(Re)^m \varepsilon^* \quad (15)$$

とおくことができる。よって (14) 式と同様に

$$Nu = b_2(Re)^{m+1}(Pr)^{1/2} \varepsilon^* \quad (16)$$

となしうる。

今 $m+1=0.8$ として各項に実験値を入れて図をかくと Fig. 9 のごとくなり, ε のべき数 n は水に非親和性のトルエンの場合には 1 となり, 水に親和性のエチルアルコールおよびメチルアルコールの場合には, それぞれ 0.8, 0.84 となる。この n の値はわれわれがさきに¹⁰⁾ 湿球を使って求めたそれぞれの $(t-t_{w1})$ 対 $(t-t_{a1})$ 線図 (Fig. 5 (A), (B), (C)) の直線の傾斜をしめす値に等しくなるようである。(16) 式は

$$Nu = b_2(Re)^{0.8}(Pr)^{0.5} \varepsilon^n \quad (17)$$

となり, また (15) 式は (18) 式となる。すなわち

$$J = St(Pr)^{0.5} = b_2(Re)^{-0.2} \varepsilon^n \quad (18)$$

なお (17), (18) 式中の b_2 , n の値は Table 4 のごとくなる。

n の値についての比較は上に述べたのであるが, b_2 の値については固体壁と空気²⁾, 固体壁と蒸気³⁾ においてそれぞれ 0.036, 0.0235 の値が得られているが, われわれの値 (Table 4) はこれより大となっている。これは蒸発皿の縁や液面のみだれの影響のためと考えられる。ちなみに Millar⁴⁾ によって, 風洞中の蒸発器について求められた値は 0.051 である。また ε は空気中の水蒸気の有機溶剤に対する影響をしめすもので (17) 式においてこの項と Re の項の相乗積が大きく Nu に影響することを知る。Fig. 7 もよくそれを物語っている。

計算にあたって Sc や Pr 中に含まれる α , ν は空気のそれぞれの温度におけるものを取り, D はおのおのの溶剤の蒸気について物性定数推算法⁷⁾ によって計算したものである。

§ IV. 結 論

① トルエン, エチルアルコール, メチルアルコールの蒸発率は乾燥空気によるよりも, 水蒸気を含んだ空気による方が大である (Fig. 3, 4)。この主因は水蒸気の凝縮熱によるものである。

② 空気による液の蒸発には Sc , $Pr=0.5 \sim 2.5$ の範囲において (10) 式が適用される。ただし乾燥空気の場合には $n=0$ であり, 水科, 中島⁵⁾ によって導かれた (4) 式になる。水蒸気を含んだ空気の場合には蒸発すべき液の種類によって n が異なる。

③ 水蒸気の凝縮熱の h_i に対する影響は非常に大きい。とくに飽和空気の場合には $h_r \gg h_i$ (Fig. 6, 7)。

Fig. 9 Relation between $Nu/(Pr^{0.5} Re^{0.8})$ and ε in Eq. (17)

Table 4
Values of b_2 and n in Eq. (17), (18)

Air Condition	Liquid in Vaporization Pan	b_2	n
Water-wet Air	Toluene	0.0367	1.00
	Ethyl-alcohol	0.0401	0.80
	Methyl-alcohol	0.0629	0.84
Dry Air	Toluene	0.0367	0
	Ethyl-alcohol	0.0401	0
	Methyl-alcohol	0.0629	0

④ 実験結果はほぼ (17), (18) 式によってあらわされる (Fig. 9 参照)。

Nomenclature

- A : Area of vaporization surface [m²]
 α : Thermometric conductivity of air [m²/hr]
 b_1, b_2 : Constant
 c : Specific heat of air [kcal/kg°C]
 D : Diffusivity of air [m²/hr]
 G : Mass velocity [kg/m²hr]
 H_a : Absolute humidity of solvent [kg solvent/kg dry air]
 H_{a1}, H_{a1}' : Absolute humidity of solvent at t_{a1} , t_{a1}' , respectively [kg solvent/kg dry air]
 H_w : Absolute humidity of water [kg water/kg dry air]
 $H_{w a1}$: Absolute humidity of water at t_{a1} [kg water/kg dry air]
 h : Coefficient of heat transfer [kcal/m²hr°C]
 h_r : Coefficient of heat transfer of solvent when affected by latent heat of water vapor, as shown by Eq. (9) [kcal/m²hr°C]

$h_t = h_s + h_r$ [kcal/m²hr°C]
 h_s : Coefficient of heat transfer of solvent
 when not affected by water vapor in air
 [kcal/m²hr°C]
 h_w : Coefficient of heat transfer of water
 [kcal/m²hr°C]
 h/k' : Psychromatic ratio
 k' : Coefficient of mass transfer [kg/m²hrΔH]
 L : Length of vaporization surface parallel
 to the direction of flow [m]
 $Nu = hL/\lambda$: Nusselt number
 $Pr = \nu/a$: Prandtl number
 Q_R : Heat transferred by radiation [kcal/hr]
 q_w : Heat transferred mostly by condensation
 of water vapor [kcal/m²hr]
 $Re = GL/\mu$: Reynolds number
 r_s, r_w : Latent heat of solvent and that
 of water respectively [kcal/kg]
 $Sc = \nu/D$: Schmidt number
 $St = h/(c.G.)$: Stanton number
 t : Temperature of air [°C]
 t_{a1} : Wet-bulb temperature of air, containing
 water vapor as measured with wet-bulb of
 solvent, and surface temperature of
 evaporation pan [°C]
 t_{a1}' : Wet-bulb temperature of air, containing no

water vapor as measured with wet bulb of
 solvent, or Wet-bulb temperature of air not
 affected by water vapor in air [°C], and
 surface temperature of evaporation pan [°C]

t_{w1} : Temperature of water-wet air as
 measured with wet-bulb of water [°C]
 W : Vaporization rate [kg/hr]
 $\epsilon = \{(H_{a1} - H_a)/(H_{a1}' - H_a)\} \cdot \{(t - t_{a1}')/(t - t_{a1})\}$
 λ : Thermal conductivity of air [kcal/mhr°C]
 μ : Viscosity of air [kg/mhr]
 ν : Kinematic viscosity of air [m²/hr]

Literature cited

- 1) Brown, G. G. : "Unit Operation," p. 569 (1951)
- 2) Colburn, A. P. *Trans. Am. Inst. Chem. Eng.*, **29**, 174 (1933)
- 3) Hopf, L., in Geiger, H. and Scheel, K. : "Handbuch der Physik," **7**, 158 (Springer, 1927)
- 4) Millar, I. G. : Canadian Meteorological Memorials, **1**, 43 (1937)
- 5) Mizushima, T. & Nakajima, M. : *Chem. Eng. (Japan)*, **15**, 30 (1951)
- 6) Mizushima, T. et al : *Chem. Eng. (Japan)*, **17**, 152 (1953)
- 7) Satō, K. : "Bussei-Teisu-Suisanho," (Estimation Method of physical Properties), p. 129 (Maruzen Co., Japan, 1954)
- 8) Shepherd, et al : *Ind. Eng. Chem.*, **30**, 388 (1938)
- 9) Yagi, S. & Kunii, D. : "Kagaku-Kōgaku-To-Kagaku-Kikai," (Chemical Engineering and Chemical Apparatus), **8**, 11 (Soc. of Chem. Eng., Japan)
- 10) Yoshida, T. & Hyōdō, T. : *Chem. Eng. (Japan)*, **20**, 536 (1956)

Vaporization, in Water-Wet Air, of Organic Solvents

Tetsuo Yoshida* and Tsutomu Hyōdō*

In our previous report⁽¹⁾ we made it clear that water vapor contained in air greatly influenced the wet-bulb temperatures of organic solvents. Based on the idea that one might obtain higher rate of vaporization by using water-wet air rather than dry air, our studies were continued with a view to throwing light on how the vaporization of organic solvents into water-wet air would be affected by water-vapor content thereof.

The present results obtained with toluene, ethyl-alcohol and methyl-alcohol clearly proved that we were right in supposing that water-wet air would bring about higher rate of vaporization than dry air, as shown in Figs. 3 & 4. Here the curves for methyl-alcohol are omitted in order to avoid complication.

I. Effects of Temperature of Air and Its Water-vapor Content upon ht :

(i) In Dry Air :

The surface temperatures of liquids in the vaporization pan were calculated by means of Eq. (5), derived from Eq. (1) and Mizushima & Nakajima's Eq. (4)⁽²⁾, which is said to be applicable over the region where $Sc, Pr = 0.5 \sim 2.5$. The results tabulated in Table 1 show that these surface tem-

peratures are 1~2°C lower than the wet bulb temperatures of the same organic solvents, which we measured in our previous experiments¹⁰²—Cf. Fig. 5-(A), (B) & (C). Of these two kinds, the lower temperatures seem to be the real surface temperatures, uninfluenced by radiation heat, etc. The values of h_s , calculated by using Eq. (6), are plotted in Fig. 6.

(ii) In Water-wet Air :

In Table 3 are shown the surface temperatures (t_{s1}) calculated by using Eq. (8), where h_s is the value obtained from Eq. (6) and where the absorption heat etc. are ignored because they are negligibly small as compared with condensing heat. Here again the surface temperatures (t_{s1}) are almost 1~3°C lower than the wet bulb temperatures. hr can be obtained from Eq. (9). These data are plotted in Fig. 6 as $h_t = h_s + h_r$ vs. dry bulb temperatures of air. The values of hr are known to be considerably larger than those of h_s .

II. Effects of Air Velocity upon h_t :

The experimental data are plotted in Fig. 7 and correlated as shown in Figs. 8 & 9, by means of dimensional group in Eqs. (17) & (18); b_2 and n appearing in these are shown in Table 4, too. ϵ in the equations is a factor to show the effect of water-vapor content of air upon the vaporization of organic solvents and is equal to 1 when the experiment is conducted in dry air. The powers of Reynolds number in these equations agree with the results obtained by other workers^{1,2,5,83}. The power of Prandtl number is what Mizushima and Nakajima⁵³ proposed in their report. The values of n , which are the power of ϵ , seem to agree with values represented by the slopes of linear lines in the diagrams obtained formerly by us¹⁰². These lines show the relation between the wet-bulb depression of organic liquids ($t - t_{s1}$) and the wet-bulb depression of water ($t - t_{w1}$)—Cf. Fig. 5 (A), (B) & (C).

* Institute of Polytechnics, Osaka City University

R. E. JOHNSTONE & M. W. THRING :

Pilot Plants, Models, and Scale-up Methods in Chemical Engineering

McGRAW-HILL CO. INC.

本書は例の McGRAW-HILL 社の Chem. Eng. Series の 1 巻として、1957 年発刊され、307 頁よりなっている。

著者が本書において企てたのは、小規模なパイロットプラントから大規模なプロセスプラントへ開発していくのに役立つ定量的な方法論を組立て、さらにそれを使い易い形で表示することである。

それには他の工学特に造船、航空などにおいて確立されている模型理論をケミカルプロセスの分野に新しく導入して、この企てを成功させた。

すなわち新しいケミカルプロセスをパイロットプラントから大規模な工業装置に開発していく分野、ならびに既設の工業装置内の熱や物質の未開明の挙動を、模型を使って研究する分野などにおいて、この模型理論を導入した新しい方法を展開して、独創的な成果をあげた。

内容的には、前段の数章で相似性原理、次元解析、微分方程式、支配概念 (Regime Concept)、相似基準と縮尺方程式 (Scale Equation)、境界効果などについて詳

述している。後段を化学工学の各種の単位操作に、上述の諸概念を適用した解析的、かつ定量的な取扱いの説明にあて、著者の新しい企ての成功を実証している。

本書にはかなりの量の数学的取扱いが含まれているが、著者もことわっているように、最後の相似模型の章を除いては大して難しいものではないようである。

単位操作の各章には適当に具体的説明事項や数量的取扱いの例題が与えられて、数学的取扱いの理解を容易にする配慮がされてはいる。しかしさらに数多くの例題が盛り込まれることにより、著者の新しい企てに対する読者の安心感を確かにする必要があるはしなかったかと感じる。また化学工学関係の著書にしては図表による説明の少ないのも珍らしい感じがしたし、もっとその点を考慮してはしなかったと感じた。

とにかく本書は化学工学においては最も困難であるがゆえに、最も論文、著書などの少い分野の真に得難い労作であると考えるので、同学の方達の一読を熱望する。

(鈴木 明)