赤外線照射による有機溶剤の蒸発

—蒸発に及ぼす内部加熱効果—

西村 誠・山口 和之
平林 雅彦・平林 芳夫
杉山 幸男*

岐阜大学工学部 合成化学科†

有機溶剤の赤外線照射蒸発実験を行い、実験結果と単色性を考慮に入れた理論解析の結果とを比較検討し、赤外線透過に伴う内部加熱効果について考察を加えた。その結果、本理論解析が十分妥当であることを確認し、また、内部加熱効果が蒸発過程に多大の影響を及ぼすことおよびその程度が赤外線入射スペクトルと試料の赤外線吸収スペクトルの対応関係、試料厚さなどによって異なることを明らかにした。

緒 言

塗装膜、樹脂コーティング膜などの赤外線乾燥においては、赤外線が被乾燥物の内部まで透過し、そのため被乾燥物が内部から加熱を受ける場合が多い。このような赤外線の内部加熱効果については、まず、赤外線入射スペクトルと被乾燥物の赤外線吸収スペクトルとの組み合わせの影響を検討することが重要であると考えられる。従来、このような観点から幾つかの実験的検討^{2,3)}が行われ、適切な組み合わせを選択することによって乾燥時間が短縮されることなどが明らかにされている。しかし、それらは半定量的検討の域を出ず、重要な因子と考えられる被乾燥物の厚さの影響でさえ十分には明らかにしていない。また、内部加熱効果を一般的に検討するためには、ふく射透過性媒体の熱移動論が適用されなければならないが、そのような研究例も見当たらない。

本研究では、赤外線乾燥の内部加熱効果に関して、上記した観点から、まずその基礎となる有機溶剤の蒸発過程を取り上げ、次のような検討を行った。すなわち、赤外線源として赤外線ランプと面ヒーター、蒸発試料として四塩化炭素と酢酸エチルの各2種類の組み合わせを用いて実験を行い、実験結果と単色性を考慮に入れた理論解析の結果とを比較検討して、赤外線入射スペクトルと試料の赤外線吸収スペクトルの組み合わせが蒸発曲線、恒率蒸発速度、正味のふく射エネルギー吸収量などに及ぼす影響について考察を加えた。

1. 理論解析

1・1 基礎式

Fig. 1 に示すように、水平試料層に上部から単色入射ふく射強度 H_0 (全入射ふく射エネルギー $H_0 = \int_0^\infty H_{0\nu} d\nu$) の赤外線を照射して蒸発させる場合を考える。試料および容器壁の温度は、均一で時間のみの関数 $T_s(\tau)$ であると仮定する。試料および容器壁について熱収支をとると、

$$\begin{aligned} & \{c_{ps}\rho_s(x-x_s) + c_{pw}\rho_w(x_s-x_w)\} \frac{dT_s(\tau)}{d\tau} \\ &= \int_0^\infty q_{rv} d\nu - L_v w - h(T_s(\tau) - T_a) - \lambda_2 \left. \frac{\partial T_2(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=x_2} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 q_{rv} は試料および容器壁に吸収される正味の単色ふく射エネルギー、 w は試料の蒸発速度、 L_v は蒸発潜熱、 h は対流伝熱係数である。試料の蒸発速度 w は、試料の蒸気圧 p 、物質移動係数 k_G を用いて次式のように表される。

$$w = -\rho_s \frac{dx}{d\tau} = k_G(p_s - p_a) \quad (2)$$

一方、二つの保温層について、層内の熱流は1次元、物性値は温度に依存しないとして、それぞれの熱収支式を書く、

$$\frac{\partial T_1(x, \tau)}{\partial \tau} = \alpha_1 \frac{\partial^2 T_1(x, \tau)}{\partial x^2} \quad (0 \leq x \leq x_1) \quad (3)$$

$$\frac{\partial T_2(x, \tau)}{\partial \tau} = \alpha_2 \frac{\partial^2 T_2(x, \tau)}{\partial x^2} \quad (x_1 \leq x \leq x_2) \quad (4)$$

初期および境界条件は次のようになる。

† 〒504 各務原市那加門前町

* 名古屋大学工学部 化学工学科

$x = x$	$H_0 = \int_0^{\infty} H_{0\nu} d\nu$	T_a
$x = x_3$	Sample	$c_{ps} \rho_s T_s(\tau)$
$x = x_2$	Vessel	$c_{p3} \rho_3 T_3(\tau)$
$x = x_1$	Insulation	$\lambda_2 \alpha_2 T_1(x, \tau)$
$x = 0$	Insulation	$\lambda_1 \alpha_1 T_1(x, \tau)$
		T_a

Fig. 1 Physical model and co-ordinate

Fig. 2 Radiosity and incident radiation

$$\left. \begin{aligned} \tau=0 & \quad ; \quad x=x_0, \quad T_s(\tau)=T_a \\ \tau=0, \quad 0 \leq x \leq x_2; & \quad T_1(x, \tau)=T_2(x, \tau)=T_a \\ \tau>0^*, \quad x=0 & \quad ; \quad T_1(x, \tau)=T_a \\ \tau>0, \quad x=x_1 & \quad ; \quad \lambda_1 \partial T_1(x, \tau) / \partial x = \lambda_2 \partial T_2(x, \tau) / \partial x, \\ & \quad T_1(x, \tau)=T_2(x, \tau) \\ \tau>0, \quad x=x_2 & \quad ; \quad T_2(x, \tau)=T_s(\tau) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

1.2 正味の単色ふく射エネルギー q_{rv}

試料および容器壁に吸収される正味の単色ふく射エネルギー q_{rv} を導出するにあたり、問題となっているふく射伝熱系のラジオンティ R およびイラジェイション H を整理すると、Fig. 2 のようになる。移動方程式を適用し、一様反射および一様射出の仮定の下に、 q_{rv} と R および H の関係を求める、

$$q_{rv} = H_{0\nu} - R_{0\nu} = (1 - \rho_\nu') H_{0\nu} - (1 - \rho_\nu) H_{1\nu} \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} R_{0\nu} &= (1 - \rho_\nu) H_{1\nu} + \rho_\nu' H_{0\nu} \\ R_{1\nu} &= (1 - \rho_\nu') H_{0\nu} + \rho_\nu H_{1\nu} \\ H_{1\nu} &= 2R_{2\nu} E_3(\tau_\nu) + e_{b\nu} (1 - 2E_3(\tau_\nu)) \\ R_{2\nu} &= \epsilon_{w\nu} e_{b\nu} + (1 - \epsilon_{w\nu}) H_{2\nu} \\ H_{2\nu} &= 2(1 - \rho_\nu') H_{0\nu} D_3(\tau_\nu) + 2\rho_\nu H_{1\nu} E_3(\tau_\nu) \\ &\quad + e_{b\nu} (1 - 2E_3(\tau_\nu)) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

ここで、 τ_ν は試料の単色光学的厚さで、試料の単色吸収係数 α_ν を用いて表され、 $\tau_\nu = \alpha_\nu (x - x_3)$ 、 $e_{b\nu}$ はプランクの単色ふく射エネルギーで、

$$e_{b\nu} = \frac{2\pi n_\nu^2 \nu^3 h}{c_0^2 \{\exp(h\nu/kT_s(\tau)) - 1\}}$$

また、 ρ_ν および ρ_ν' はそれぞれ試料表面下および表面上の単色反射率、 $\epsilon_{w\nu}$ は容器壁の単色射出率である。さらに、 $E_3(\tau_\nu)$ および $D_3(\tau_\nu)$ は指数積分関数で、それぞれ次のように表される。

$$E_3(\tau_\nu) = \int_0^1 \exp(-\tau_\nu/\mu) \mu d\mu$$

$$D_3(\tau_\nu) = n_\nu^2 \int_{\tau_\nu}^1 \exp(-\tau_\nu/\mu) \mu d\mu$$

* 断熱効果が十分であるとして、近似的にこのような境界条件をとった。

ただし、 μ_c は臨界角の余弦で、 $\mu_c = \sqrt{n_\nu^2 - 1}/n_\nu$ である。

Eq. (7) の連立方程式より、 $H_{1\nu}$ を求めると、

$$H_{1\nu} = \frac{1}{1 - 4\rho_\nu(1 - \epsilon_{w\nu})E_3^2(\tau_\nu)} [4(1 - \epsilon_{w\nu})(1 - \rho_\nu') \times H_{0\nu} E_3(\tau_\nu) D_3(\tau_\nu) + \{1 - 4(1 - \epsilon_{w\nu})E_3^2(\tau_\nu)\} e_{b\nu}] \quad (8)$$

$H_{0\nu}$ は与えられるから、Eq. (8) を Eq. (6) に代入すれば q_{rv} が求められる。

なお、容器壁のみに吸収される正味の単色ふく射エネルギー q_{rv}' は次式のようにになる。

$$q_{rv}' = H_{2\nu} - R_{2\nu} = 2\epsilon_{w\nu} \{ (1 - \rho_\nu') H_{0\nu} D_3(\tau_\nu) + \rho_\nu H_{1\nu} E_3(\tau_\nu) - e_{b\nu} E_3(\tau_\nu) \} \quad (9)$$

1.3 数値解法

Eqs. (1)~(4) を解析的に解くことができないので、ここでは次のような方法で数値的に解いた。Eq. (2) 中の蒸気圧 p_s は温度 $T_s(\tau)$ の関数で与えられるから、Eqs. (1), (2) はともに $T_s(\tau)$ 、 $x(\tau)$ を含み、連立微分方程式となる。すなわち、

$$\frac{dT_s(\tau)}{d\tau} = G(T_s(\tau), x(\tau)) \quad (10)$$

$$\frac{dx(\tau)}{d\tau} = J(T_s(\tau), x(\tau)) \quad (11)$$

時間間隔を $\Delta\tau$ として、4 次の Runge-Kutta 法を適用すると、

$$T_s(\tau + \Delta\tau) = T_s(\tau) + (\beta_0 + 2\beta_1 + 2\beta_2 + \beta_3)/6 \quad (12)$$

$$x(\tau + \Delta\tau) = x(\tau) + (\gamma_0 + 2\gamma_1 + 2\gamma_2 + \gamma_3)/6 \quad (13)$$

ただし、

$$\beta_0 = \Delta\tau G(T_s(\tau), x(\tau)), \quad \gamma_0 = \Delta\tau J(T_s(\tau), x(\tau)),$$

$$\beta_1 = \Delta\tau G(T_s(\tau) + \beta_0/2, x(\tau) + \gamma_0/2),$$

$$\gamma_1 = \Delta\tau J(T_s(\tau) + \beta_0/2, x(\tau) + \gamma_0/2),$$

$$\beta_2 = \Delta\tau G(T_s(\tau) + \beta_1/2, x(\tau) + \gamma_1/2),$$

$$\gamma_2 = \Delta\tau J(T_s(\tau) + \beta_1/2, x(\tau) + \gamma_1/2),$$

$$\beta_3 = \Delta\tau G(T_s(\tau) + \beta_2, x(\tau) + \gamma_2),$$

$$\gamma_3 = \Delta\tau J(T_s(\tau) + \beta_2, x(\tau) + \gamma_2)$$

次に、Eqs. (3), (4) を Appendix に示すような方法で近似的に解き、 $T_1(x, \tau + \Delta\tau)$ 、 $T_2(x, \tau + \Delta\tau)$ および $-\lambda_2 \partial T_2(x_2, \tau + \Delta\tau) / \partial x$ を得る。関数 $G(T_s(\tau) + \beta_0/2, x(\tau) + \gamma_0/2)$ 、 $G(T_s(\tau) + \beta_1/2, x(\tau) + \gamma_1/2)$ 、 $G(T_s(\tau) + \beta_2, x(\tau) + \gamma_2)$ 中に含まれる $x = x_2$ の熱流束 $-\lambda_2 \partial T_2(x_2, \tau) / \partial x$ を、 $T_s(\tau) + \beta_0/2$ 、 $T_s(\tau) + \beta_1/2$ 、 $T_s(\tau) + \beta_2$ のそれぞれを $T_s(\tau + \Delta\tau)$ とおいて $-\lambda_2 \partial T_2(x_2, \tau + \Delta\tau) / \partial x$ でもって近似すれば、Eqs. (12), (13)、 $T_1(x, \tau + \Delta\tau)$ および $T_2(x, \tau + \Delta\tau)$ を連立して初期条件を用いて $\tau = \Delta\tau$ から逐次的に計算することによって解が得られる。

逐次計算にあたって、Eq. (1) の右辺第 1 項の q_{rv} の積分はシンプソン則にて行い、指数積分関数 $E_3(\tau_\nu)$ 、 $D_3(\tau_\nu)$ は前報⁵⁾ と同様に Taylor 級数展開法 ($\tau_\nu \leq 0.5$)

Fig. 3 Experimental apparatus

および Gauss-Laguerre 積分法 ($\tau_v > 0.5$) にて求めた。また、 $T_1(x, \tau + \Delta\tau)$, $T_2(x, \tau + \Delta\tau)$ は、 $x_1, x_2 - x_1$ をそれぞれ 10, 5 等分し、それらの等分点について代表的に計算した。

2. 実験装置および方法

実験装置の概略を Fig. 3 に示す。試料容器は縦 80 mm, 横 80 mm, 深さ 6 mm の銅製容器 (肉厚 0.5 mm) であり、その下面および側面はアスベスト板 (厚さ 3 mm) を内側にウレタンフォーム (厚さ 11 mm) を外側において二重に断熱した。

試料としては、近赤外線域で透過性がよく中間赤外線域で半透明な四塩化炭素 (沸点 76.7°C) と近赤外線域で半透明で中間赤外線域ではほぼ不透明な酢酸エチル (沸点 77.1°C) の 2 種類を用いた。これらの単色吸収係数 α_ν の実測値を Fig. 4 に示す。

赤外線源としては、近赤外線を多く射出する赤外線ランプ (100 V, 375 W) と中間赤外線を多く射出する面ヒーター (国際電気 (株) 製, 100 V, 1.2 kW, 発熱面が金属酸化物で処理されたニクロム線加熱のヒーター, 常用温度 400°C 以下) の 2 種類を用いた。面ヒーターの表面温度を 300°C 一定に設定し、試料容器へ入射する全ふく射エネルギー H_0 を熱流計 (昭和電気 (株) 製, HFM 形, センサーの表面にベルベットブラックペイントを薄く塗布して使用) で測定して、 $H_0 = 3,000 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{hr}$ になるように面ヒーターの位置を定めた。一方、

* 赤外線ランプの温度については、実測の結果、タングステンフィラメントの温度が $2,450^\circ\text{K}$, ガラスの表面温度が 453°K であった。

Fig. 4 Monochromatic absorption coefficient α_ν

Fig. 5 Monochromatic incident radiation $H_{0\nu}$

赤外線ランプは面ヒーターと同一位置に設置して定格 100 V で使用し、 H_0 が面ヒーターの場合と同一になるように赤外線ランプの直下においた絞りを調整した。両赤外線源からの赤外線の入射スペクトル分布を Fig. 5 に示す。ただし、このスペクトル分布は H_0 , 赤外線源温度*, 赤外線源の単色射出率などの実測値から計算で求めたものである。

試料の蒸発量は電子天秤 (島津製作所 (株) 製, D 160 形の改作形), 試料温度は 0.1 mm 径 CA 熱電対 (測定位置は試料容器底面から 0.25 mm の高さ) にてそれぞれ測定し、その出力はともにペンレコーダーにて記録した。

実験装置内の温度を 30°C で一定に保ち、また、蒸発蒸気が試料容器の上部に停滞しないようにするため、試料容器の上部側面で天秤の精度に影響しない程度に局所的吸引を行うとともに、装置の上部でも強制排気を行った。

試料容器の上部にふく射遮蔽板をおいた状態で、試料

Fig. 6 Comparison of the experimental results with the calculated results for the evaporation curve

Fig. 7 Comparison of the experimental results with the calculated results for the evaporation curve

容器の温度を 30°C で一定に保った後、あらかじめ外部で約 30°C に加熱しておいた試料を所定の試料厚さ (1, 3, 5 mm) になるように試料容器へすばやく注入した。注入後、ただちにふく射遮蔽板を取りのぞいて、重量および温度の測定を開始した。

3. 実験結果および考察

3・1 蒸発曲線

四塩化炭素-赤外線ランプ系、四塩化炭素-面ヒーター系、酢酸エチル-赤外線ランプ系および酢酸エチル-面ヒーター系について、それぞれの蒸発曲線の実験結果と理論計算結果との比較を Figs. 6~9 に示す。図において、 τ は赤外線を照射しはじめてからの時間、 ξ は時間 τ における試料重量 W と初期における試料重量 W_0 との比、 θ は時間 τ における試料温度 t と試料の沸点 t_b との比を表す。理論計算にあたって、対流伝熱係数 h には、Fishenden らの自然対流伝熱相関式⁴⁾より算出した伝熱係数 (自然対流と強制対流が共存しているが、吸引速度がかなり小さいので近似的に自然対流のみとした) に顕熱移動効果を考慮したものを入れて、物質移動係数 k_g には、のちに示す恒率蒸発速度 w_e の実験結果より p_a を 0, p_s を恒率蒸発時の試料温度における蒸気圧として算出したものの平均値をあてた。また、試料の光学定数 ρ_v , ρ_v' および n_v はいずれも振動数に依存しないとして、 ρ_v および ρ_v' は Fresnel の式より算出し、 n_v は文献値よりとり、四塩化炭素: $\rho_v=0.573$, ρ_v'

Fig. 8 Comparison of the experimental results with the calculated results for the evaporation curve

Fig. 9 Comparison of the experimental results with the calculated results for the evaporation curve

$=0.086$, $n_v=1.461$, 酢酸エチル: $\rho_v=0.508$, $\rho_v'=0.072$, $n_v=1.372$ を用いた。その他の試料、容器および保温層の物性値はすべて便覧や文献の値よりとった (ρ_s , c_{ps} , L_0 に関しては温度依存性を考慮した)。なお、時間間隔 $\Delta\tau$ は $2.0 \times 10^{-4} \sim 8.0 \times 10^{-4} \text{ hr}$ にとり、 q_{rv} の積分は振動数範囲 $10^{13} \leq \nu \leq 7.5 \times 10^{14} \text{ 1/sec}$, 分割数 170 で行った。

さて、本実験系では赤外線源と試料の組み合わせあるいは試料の初期厚さによっては試料内の温度分布が問題となる場合⁹⁾があると考えられ、その意味において本理論解析は不十分ではあるが、蒸発曲線の実験結果と理論計算結果とを比較してみると、両者は傾向的によい一致を示している。

次に、赤外線源と試料の組み合わせによる蒸発曲線の差異を見てみると、赤外線ランプと面ヒーターの全入射ふく射エネルギーが $H_0=3,000 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{hr}$ で同一であるにもかかわらず、四塩化炭素および酢酸エチルのいずれも面ヒーターで照射した場合の方が蒸発が速いことがわかる。また、蒸発の速くなる割合は試料によって異なり、さらに試料の初期厚さ l_0 によっても異なっている。試料温度に関しては、それぞれの組み合わせにおいて、蒸発量変化と対応した特徴ある温度変化が見られる。このような組み合わせによる蒸発曲線の差異は、定性的には、Fig. 4 の試料の赤外線吸収スペクトルと Fig. 5 の赤外線入射スペクトルとの対応関係よりある程度説明されるが、定量的には、正味のふく射エネルギー吸収量に

Fig. 10 Constant evaporation rate

基づいて内部加熱効果の寄与の面から明らかにされなければならない。

3・2 恒率蒸発速度

さきに示した蒸発曲線の実験結果から恒率蒸発速度 w_e を求め、これと恒率蒸発時の平均の試料厚さ $\bar{l}$ との関係を図 10 に示す。また、理論計算により得られた w_e とそのときの試料厚さ $\bar{l}$ との関係を図 10 に併示する。図からわかるように、ここでも実験結果と理論計算結果とは良好な傾向の一致を示している。実験結果を見てみると、四塩化炭素-赤外線ランプ系では、恒率蒸発速度 w_e は平均の試料厚さ $\bar{l}$ の増加に対してほとんど変化しないが、四塩化炭素-面ヒーター系では、 w_e は $\bar{l}$ の増加に対して指数関数的に増加している。一方、酢酸エチル-赤外線ランプ系では、 w_e は四塩化炭素-面ヒーター系の w_e と類似した傾向を示し、酢酸エチル-面ヒーター系では、 w_e は $\bar{l}$ が約 1 mm までは急増し、それより厚くなるとほぼ一定となっている。このような恒率蒸発速度と試料厚さの関係から、本実験の試料厚さの範囲においては、四塩化炭素-赤外線ランプ系以外では正味のふく射エネルギー吸収量が試料厚さによってかなり変化しているものと推定される。

3・3 正味のふく射エネルギー吸収量と内部加熱効果

3・1, 3・2 で示した実験結果や理論計算結果から、赤外線入射スペクトルと試料の赤外線吸収スペクトルの対応関係が蒸発曲線や恒率蒸発速度に大きく影響し、またその影響の程度が試料厚さによって異なることが明らかになった。ここでは、入射スペクトルと吸収スペクトルの対応関係による正味のふく射エネルギー吸収量の差異について検討し、内部加熱効果の寄与について考察してみる。

恒率蒸発時に試料および容器壁に吸収される正味のふく射エネルギー q_r を実験結果より計算し、 q_r/H_0 と $\bar{l}$ の関係を Fig. 11 に示す。ただし、 q_r は恒率蒸発時の蒸発潜熱、試料表面の対流伝熱量（顕熱移動量も含む）

Fig. 11 Net radiant energy absorbed by both the sample and the vessel wall and absorbed by the vessel wall only

および容器壁から保温層への伝導伝熱量の総和として算出した。なお、蒸発潜熱、対流伝熱量の算出には試料層の表面温度が必要であるが、表面温度を実測していないので、近似的に実測した試料層内温度で代用した。

また、試料温度が 30°C のときに試料および容器壁に吸収される正味のふく射エネルギー q_r ならびに容器壁のみに吸収される正味のふく射エネルギー q_r' をそれぞれ Eqs. (6), (9) より算出し、その結果を図 11 に併示する。理論計算では試料温度を 30°C で統一したが、Fig. 11 において q_r の理論計算結果と実験結果とは傾向的によい一致を示している。また、同図から、 q_r および q_r' が入射スペクトルと吸収スペクトルの対応関係によって大きく異なり、さらに試料厚さによっても異なることがよくわかる。

ところで、試料によるふく射エネルギーの吸収は直接的な内部加熱効果をもたらし、一方、容器壁によるふく射エネルギーの吸収は試料によるふく射エネルギーの吸収と密接に関係しつつおもに容器壁からの伝導や対流による間接的な内部加熱効果をもたらすと考えられる。酢酸エチル-面ヒーター系の場合、試料厚さが約 1 mm 以上では、入射スペクトルの主要な振動数領域において単色光学的厚さ τ_v が十分大きい（光学的に厚い）、 q_r' は 0 となり、直接的な内部加熱効果のみが存在する。四塩化炭素-赤外線ランプ系の場合、試料厚さが約 2 mm 以下では、入射スペクトルの主要な振動数領域において τ_v が十分小さい（光学的に薄い）、 q_r と q_r' とはほぼ一致し、間接的な内部加熱効果が支配的である。その他の場合には、 τ_v が中程度の大きさとなるため、その大きさに応じて直接的な内部加熱効果と間接的な内部加熱効果が一定の割合で寄与していると思われる。

以上、内部加熱効果を q_r や q_r' をもとにして総合的に検討してきたが、今後、さらに試料内の温度分布、容器壁のふく射特性の影響などについて理論的、実験的検

討を行う必要がある。

結 言

有機溶剤の赤外線照射蒸発実験を行い、実験結果と単色性を考慮に入れた理論解析の結果とを比較検討し、赤外線透過に伴う内部加熱効果について考察を加えた。その結果、本理論解析が十分妥当であることを確認し、また、内部加熱効果が蒸発過程に多大の影響を及ぼすことおよびその程度が赤外線入射スペクトルと試料の赤外線吸収スペクトルとの対応関係、試料厚さなどによって異なることを明らかにした。

Appendix

時間 τ における温度 $T_1(x, \tau)$, $T_2(x, \tau)$, $T_s(\tau)$ が既知であるとする。時間 τ を越えた瞬間に、境界面 $x=x_2$ における温度 $T_2(x_2, \tau)=T_s(\tau)$ がステップ状に変化し、また $x=x_1$ における温度 $T_1(x_1, \tau)=T_2(x_1, \tau)$ も対応してステップ状に変化し、その後 $\Delta\tau$ 時間の間、それぞれが $T_2(x_2, \tau+\Delta\tau)=T_s(\tau+\Delta\tau)$, $T_1(x_1, \tau+\Delta\tau)=T_2(x_1, \tau+\Delta\tau)$ で一定であると仮定する。このような場合、保温層内の温度分布 $T_1(x, \tau+\Delta\tau)$, $T_2(x, \tau+\Delta\tau)$ は、H.S. Carslawらの解析解¹⁾を利用すると、次のようになる。

$$\begin{aligned} T_1(x, \tau+\Delta\tau) = & T_a + \{T_1(x_1, \tau+\Delta\tau) - T_a\} \frac{x}{x_1} \\ & + \frac{2}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{T_1(x_1, \tau+\Delta\tau) \cos m\pi - T_a}{m} \sin \frac{m\pi x}{x_1} \\ & \times \exp(-\alpha_1 m^2 \pi^2 \Delta\tau / x_1^2) + \frac{2}{x_1} \sum_{m=1}^{\infty} \sin \frac{m\pi x}{x_1} \\ & \times \exp(-\alpha_1 m^2 \pi^2 \Delta\tau / x_1^2) \int_0^{x_1} T_1(x', \tau) \sin \frac{m\pi x'}{x_1} dx' \end{aligned} \quad (A-1)$$

$$\begin{aligned} T_2(x, \tau+\Delta\tau) = & T_1(x_1, \tau+\Delta\tau) \\ & + \{T_s(\tau+\Delta\tau) - T_1(x_1, \tau+\Delta\tau)\} \frac{x-x_1}{x_2-x_1} \\ & + \frac{2}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{T_s(\tau+\Delta\tau) \cos m\pi - T_1(x_1, \tau+\Delta\tau)}{m} \\ & \times \sin \frac{m\pi(x-x_1)}{x_2-x_1} \exp\{-\alpha_2 m^2 \pi^2 \Delta\tau / (x_2-x_1)^2\} \\ & + \frac{2}{x_2-x_1} \sum_{m=1}^{\infty} \sin \frac{m\pi(x-x_1)}{x_2-x_1} \\ & \times \exp\{-\alpha_2 m^2 \pi^2 \Delta\tau / (x_2-x_1)^2\} \int_{x_1}^{x_2} T_2(x', \tau) \\ & \times \sin \frac{m\pi(x'-x_1)}{x_2-x_1} dx' \end{aligned} \quad (A-2)$$

Eqs. (A-1), (A-2) 中に含まれる $T_1(x_1, \tau+\Delta\tau)$ は、 $x=x_1$ における境界条件より、次のように与えられる。

$$\begin{aligned} T_1(x_1, \tau+\Delta\tau) = & \frac{1}{\frac{\lambda_2 x_1 + \lambda_1 (x_2 - x_1)}{x_1 (x_2 - x_1)} + \frac{2\lambda_1}{x_1} \sum_{m=1}^{\infty} \cos^2 m\pi} \\ & \times \exp(-\alpha_1 m^2 \pi^2 \Delta\tau / x_1^2) + \frac{2\lambda_2}{x_2 - x_1} \sum_{m=1}^{\infty} \\ & \times \exp\{-\alpha_2 m^2 \pi^2 \Delta\tau / (x_2 - x_1)^2\} \\ & \times \left[\frac{\lambda_1}{x_1} + \frac{2\lambda_1}{x_1} \sum_{m=1}^{\infty} \cos m\pi \exp(-\alpha_1 m^2 \pi^2 \Delta\tau / x_1^2) \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \times T_a + \left\{ \frac{\lambda_2}{x_2 - x_1} + \frac{2\lambda_2}{x_2 - x_1} \sum_{m=1}^{\infty} \cos m\pi \right. \\ & \times \exp\{-\alpha_2 m^2 \pi^2 \Delta\tau / (x_2 - x_1)^2\} \left. \right\} T_s(\tau + \Delta\tau) \\ & - \frac{2\lambda_1}{x_1^2} \sum_{m=1}^{\infty} m\pi \exp(-\alpha_1 m^2 \pi^2 \Delta\tau / x_1^2) \\ & \times \cos m\pi \int_0^{x_1} T_1(x', \tau) \sin \frac{m\pi x'}{x_1} dx' \\ & + \frac{2\lambda_2}{(x_2 - x_1)^2} \sum_{m=1}^{\infty} m\pi \exp\{-\alpha_2 m^2 \pi^2 \Delta\tau / (x_2 - x_1)^2\} \\ & \times \int_{x_1}^{x_2} T_2(x', \tau) \sin \frac{m\pi(x' - x_1)}{x_2 - x_1} dx' \left. \right] \quad (A-3) \end{aligned}$$

$x=x_2$ における熱流束は、Eq. (A-2) より、次のようになる。

$$\begin{aligned} -\lambda_2 \frac{\partial T_2(x_2, \tau+\Delta\tau)}{\partial x} = & -\lambda_2 \frac{T_s(\tau+\Delta\tau) - T_1(x_1, \tau+\Delta\tau)}{x_2 - x_1} \\ & - \frac{2\lambda_2}{x_2 - x_1} \sum_{m=1}^{\infty} \{T_s(\tau+\Delta\tau) \cos m\pi - T_1(x_1, \tau+\Delta\tau)\} \\ & \times \cos m\pi \exp\{-\alpha_2 m^2 \pi^2 \Delta\tau / (x_2 - x_1)^2\} \\ & - \frac{2\lambda_2}{(x_2 - x_1)^2} \sum_{m=1}^{\infty} m\pi \cos m\pi \\ & \times \exp\{-\alpha_2 m^2 \pi^2 \Delta\tau / (x_2 - x_1)^2\} \\ & \times \int_{x_1}^{x_2} T_2(x', \tau) \sin \frac{m\pi(x' - x_1)}{x_2 - x_1} dx' \end{aligned} \quad (A-4)$$

[付 記] 本研究を行うにあたり、昭和 50 年度文部省科学研究費（奨励研究 A）の交付を受けた。記して謝意を表する。

Nomenclature

c_p	= specific heat	[kcal/kg·°C]
D_δ, E_δ	= exponential integral function	[—]
$e_{b\nu}$	= monochromatic black body emissive power	[kcal/m²]
H_0	= total incident radiation	[kcal/m²·hr]
$H_0, H_{1\nu}, H_{2\nu}$	= monochromatic incident radiation	[kcal/m²]
h	= heat transfer coefficient	[kcal/m²·hr·°C]
k_G	= mass transfer coefficient	[kg/m²·hr·mmHg]
l	= thickness of sample	[m]
$\bar{l}$	= average thickness of sample at constant evaporation rate	[m]
n_ν	= monochromatic refractive index of sample	[—]
p	= vapor pressure of sample	[mmHg]
q_r, q_r'	= net radiant energy absorbed by both sample and vessel wall and by vessel wall only, respectively	[kcal/m²·hr]
q_{rv}, q_{rv}'	= net monochromatic radiant energy absorbed by both sample and vessel wall and by vessel wall only, respectively	[kcal/m²]
$R_{0\nu}, R_{1\nu}, R_{2\nu}$	= monochromatic radiosity	[kcal/m²]
T	= absolute temperature	[°K]
t	= temperature	[°C]
W	= weight of sample	[kg]

w, w_c	= evaporation rate and constant evaporation rate of sample, respectively	[kg/m ² ·hr]
x	= co-ordinate	[m]
α	= thermal diffusivity	[m ² /hr]
α_ν	= monochromatic absorption coefficient of sample	[1/m]
$\varepsilon_{w\nu}$	= monochromatic emissivity of vessel wall	[—]
θ	= dimensionless temperature of sample	[—]
λ	= thermal conductivity	[kcal/m·hr·°C]
ν	= frequency	[1/hr]
ξ	= dimensionless weight of sample	[—]
ρ	= density	[kg/m ³]
ρ_ν, ρ_ν'	= internal and external monochromatic reflectivity of air-sample interface, respectively	[—]
τ	= time	[hr]
τ_ν	= monochromatic optical thickness of sample	[—]

<Subscripts>

0	= initial
1	= insulation 1
2	= insulation 2
3	= vessel
a	= ambient
b	= boiling
s	= sample

Literature cited

- 1) Carslaw, H. S. and J. C. Jaeger: *Conduction of Heat in Solids*, 2nd ed., 99, Oxford University Press (1959)
- 2) Jeffery, R. W.: *Modern Plastics*, 8, 103 (1965)
- 3) Luikov, A. V., L. S. Slobodkin, I. S. Skorynina and G. N. Pshenichnaya: ASME Paper No. 73-HT-10, ASME-AIChE Heat Transfer Conference, Atlanta (1973)
- 4) McAdams, W. H.: *Heat Transmission*, 3rd ed., 180, McGraw Hill (1954)
- 5) Nishimura, M., M. Hasatani and S. Sugiyama: *Kagaku Kogaku*, 31, 988 (1967)
- 6) Tanno, S., S. Ohtani and Y. Okamura: *Kagaku Kōgaku*, 38, 787 (1974)

(1976年6月30日受理; 第12回日本伝熱シンポジウム(福岡, 1975年5月)にて発表)

Evaporation of Organic Solvents under Infrared Irradiation

—Effect of internal heating on evaporation—

Makoto Nishimura, Kazuyuki Yamaguchi, Masahiko Hirabayashi,
Yoshio Hirabayashi and Sachio Sugiyama*

Dept. of Orgn. Synthesis, Gifu Univ., Kakamigahara, 504

The experimental results for the evaporation of organic solvents under infrared irradiation were compared with the theoretical results obtained in consideration of the monochromatic radiation properties, and the effect of internal heating on the evaporation due to transmission of incident radiation was discussed. As a result, the present theoretical analysis was found to be valid, and it became clear that the effect of internal heating is greatly concerned in the evaporation process, and its extent is dependent upon the combination of the spectral distribution of incident radiation and the spectrum of the solvent and the thickness of the solvent.

* Dept. of Chem. Eng., Nagoya Univ., Nagoya