

## 非加熱面上での液滴の自然蒸発

藤井, 丕夫  
九州大学機能物質科学研究所

富村, 寿夫  
九州大学機能物質科学研究所

<https://doi.org/10.15017/6615>

---

出版情報 : 九州大学機能物質科学研究所報告. 6 (2), pp.103-108, 1993-03-20. 九州大学機能物質科学  
研究所  
バージョン :  
権利関係 :

## 非加熱面上での液滴の自然蒸発

藤井 丕夫・富村 寿夫

### Natural Evaporation of a Sessile Drop on an Unheated Plate

Motoo FUJII and Toshio TOMIMURA

Natural evaporation of a sessile drop on an unheated plate is investigated experimentally and theoretically. The time variations of the mass of the drop and temperature of the plate are measured, and the types of evaporation processes are classified. A very simplified model for drop evaporation system is introduced and then applying the lumped-heat-capacity method to the system, an energy equation is derived to obtain the plate temperature variation. The analytical solutions are obtained for two special types of evaporation processes. Each solution agrees well with the experimental result for the respective type of evaporation process.

#### 1. 緒 言

高温面上での液滴の蒸発に関しては、内燃機関、乾燥、スプレー冷却などに関連して、従来から数多くの研究がなされている<sup>1)</sup>。一方、静止空气中に置かれた非加熱面上での液滴の自然蒸発は、自然乾燥や生体における発汗などに関連した基本的現象と考えられるが、これに関連する研究は比較的少ない。Picknett-Bexon<sup>2)</sup>は液滴と表面との接触角あるいは接触面積が一定の2種類の場合について理論解析を行い、蒸発速度と蒸発時間について実測値との比較を行っている。Yangらは単成分液滴および2成分液滴に関する一連の理論的、実験的研究<sup>3) - 5)</sup>を行っている。液滴体積の経時変化を光学的に測定することにより、蒸発形態を3タイプ(不安定、準安定、安定)に分類している。さらに、3種類のモデル(液滴と面との接触面積が一定、液滴表面の曲率半径が一定、液滴と面との接触角が一定)に基づいて液滴の質量変化と蒸発時間の解析を行い、実測値と比較している。しかし、これらの研

究においては、いずれも液滴がおかれている面の熱容量が大きいためとして、温度の経時変化は考慮されていない。また、Rizza<sup>6)</sup>はスプレー蒸発器の研究に関連して、液滴が付着した伝熱壁内部の二次元非定常熱伝導方程式の数値解析を行い蒸発時間を求めているが、壁温度の経時変化との関係については明らかにされていない。

著者らはシリコンおよびアルミの2種類の平板面上における四塩化炭素など10種類の有機液体の蒸発実験を行い、液滴の蒸発速度および平板の温度変化を測定した。本報はこの測定結果の一例を示すとともに、平板と液滴の複合系に集中熱容量法を適用した簡単なモデルにより非定常のエネルギー方程式を解析的に解いて測定値と比較したものである。

#### 使用記号

- |       |               |
|-------|---------------|
| $A$   | : 平板の表面積      |
| $a_s$ | : 温度伝導率, 式(2) |
| $Bi$  | : ビオー数, 式(2)  |
| $b$   | : 平板の厚さ       |
| $c_s$ | : 比熱          |

受理日 平成4年12月15日

非加熱面上での液滴の自然蒸発

- $h_{fg}$  : 液滴の蒸発潜熱
- $M$  : 時間  $t$  における液滴の無次元質量, 式(2)
- $M_s$  : 平板の無次元質量, 式(2)
- $m$  : 時間  $t$  における液滴の質量
- $\dot{m}$  : 液滴の蒸発速度 ( $= -dm/dt$ )
- $m_0$  : 液滴の初期質量
- $m_s$  : 平板の質量, 式(6)
- $n$  : 蒸発時の液滴形状に依存する指数
- $Q_{in}$  : 自然対流とふく射伝熱による加熱量
- $Q_{out}$  : 液滴の蒸発に伴う冷却量
- $R_b$  : 平板の等価半径と厚さの比, 式(2)
- $r_s$  : 平板の等価半径 ( $=\sqrt{A/\pi}$ )
- $T$  : 平板温度
- $T_\infty$  : 周囲温度
- $t$  : 時間
- $t_0$  : 液滴の蒸発終了時間

ギリシャ文字

- $\alpha$  : 熱伝達係数
- $\beta$  : 無次元パラメータ, 式(2)
- $\theta$  : 平板の無次元温度, 式(2)
- $\lambda_s$  : 熱伝導率
- $\rho_s$  : 密度
- $\tau$  : 無次元時間, 式(2)
- $\tau_0$  : 液滴の無次元蒸発終了時間

添え字

- $min$  : 最低値
- $s$  : 平板

2. 実験

本実験では、非加熱面として縦×横×厚さが 27 [mm]×23 [mm]×0.55 [mm] のシリコン板および表面を無電解ニッケルメッキした 35 [mm]×35 [mm]×1.25 [mm] のアルミ板の 2 種類の平板を用い、これらの面上で自然蒸発する液滴としてはクロロホルム (CHCl<sub>3</sub>)、四塩化炭素 (CCl<sub>4</sub>)、ベンゼン (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>)、シクロヘキサン (C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>)、ジクロロメタン (CH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>)、メタノール (CH<sub>3</sub>OH)、エタノール (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH)、アセトン ((CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>CO)、ジエチルエーテル ((C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>2</sub>O)、酢酸エチル (CH<sub>3</sub>COOC<sub>2</sub>H<sub>5</sub>) の 10 種類の有機液体を用いた。

液滴質量の経時変化の測定には電子天秤 (A & D 製, ER-182A 型) を使用し、0.35 秒毎の質量変化を測定した。一方、アルミおよびシリコン板の温度測定は、平板の裏面中心に設けた素線径 50 μm の銅-コンスタンタン熱電対により行い、0.33 秒毎の熱起電力を

デジタルマルチメータ (横河製, 2501A 型) で測定した。測定データはいずれもパーソナルコンピュータで自動的に記録した。

液滴の質量の経時変化の測定例を縦軸に  $(m/m_0)^{1/n}$ 、横軸に  $(t/t_0)$  をとって、Fig.1 ~ Fig.3 に示す。ここで、 $m$  および  $m_0$  は、それぞれ、時間  $t$  における液滴の質量および初期質量であり、 $t_0$  は蒸発終了時間である。 $n$  は蒸発時の液滴形状に依存する指数<sup>5)</sup> である。図において (0, 1), (1, 0) を通る対角線は後述の

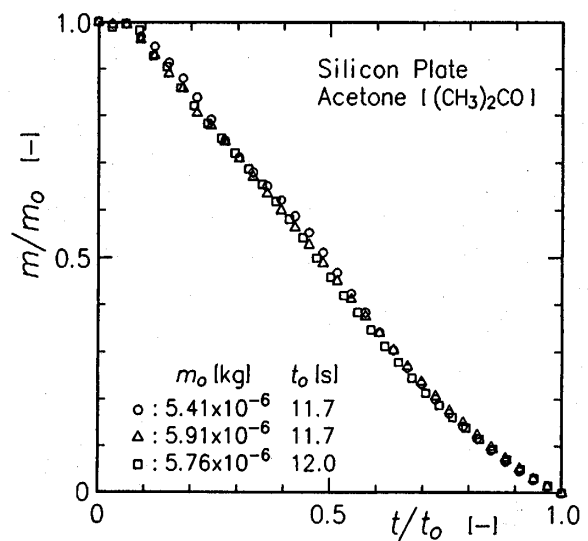


Fig.1 Time history of drop mass of Acetone [(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>CO]

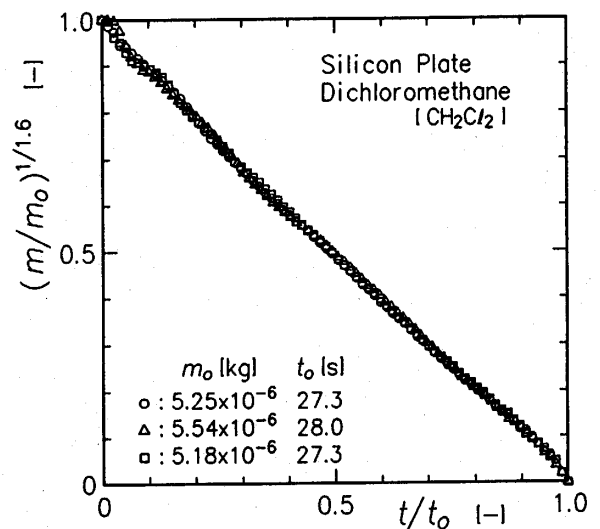


Fig.2 Time history of drop mass of Dichloromethane [CH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>]

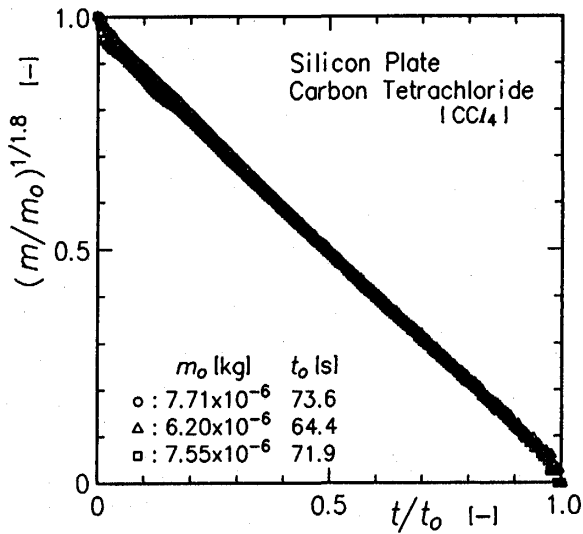


Fig.3 Time history of drop mass of Carbon Tetrachloride [CCl<sub>4</sub>]

式(6)から、 $M^{1/n} = 1 - \tau / t_0$  すなわち  $(m/m_0)^{1/n} = 1 - t/t_0$  で表される。Fig.1はアセトンの場合の結果であり、 $n$ はほぼ1とみなせる。一方、Fig.2はジクロロメタン、Fig.3は四塩化炭素の結果であり、それぞれ  $n$ を約1.6および1.8とすることにより測定値は対角線とはほぼ一致する。

液滴の質量変化に対する平板温度の経時変化を測定した結果、シリコン平板と四塩化炭素、ジクロロメタン、メタノール、ジエチルエーテルなどの組合せにおいては、液滴が蒸発を終了する以前から、平板温度が上昇し始めることがわかった。以下では、液滴の質量変化と平板温度の変化との関係を明らかにするために、行った簡単なモデルによる解析結果を示す。

### 3. 基礎方程式および初期条件

Fig.4(a)に示すように、周囲温度 $T_\infty$ の雰囲気中に置かれた初期温度 $T_\infty$ 、表面積 $A$ 、厚さ $b$ 、密度 $\rho_s$ 、比熱 $c_s$ の平板上で液滴が蒸発速度 $\dot{m}$  ( $= -dm/dt$ ) で自然蒸発する場合の $\dot{m}$ と平板温度 $T$ の関係を検討する。Fig.4(a)に示す実際の系をFig.4(b)に示すような簡単なモデルに置き換え、集中熱容量法(Lumped-Heat-Capacity Method)を適用して解析する。以下に主な仮定を記す。(1) 平板は一様温度 $T$ 、厚さ $b$ 、等価半径 $r_s$  ( $= \sqrt{A/\pi}$ )の円板で近似できる。(2) 液滴の熱容量は円板の熱容量に比べて十分に小さい。(3) 液滴の蒸発は蒸発潜熱 $h_{fg}$ と $\dot{m}$ の積で与えられる熱量を奪う冷却

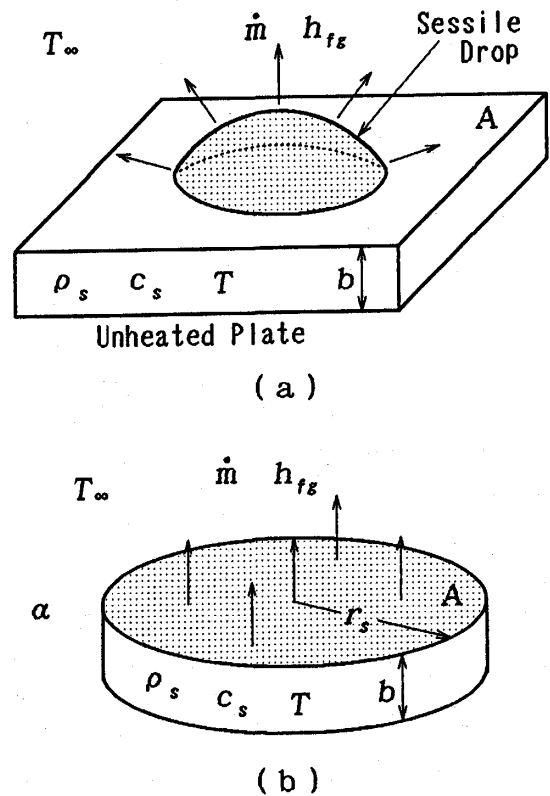


Fig.4 Physical model

源とみなす。(4) 円板は周囲気体による自然対流と周囲空間からのふく射伝熱により表面、裏面および側面から加熱される。その両者を考慮した熱伝達係数を $\alpha$ とする。

以上から、平板温度 $\theta$ に関する無次元化した基礎方程式は次式で与えられる。

$$\frac{d\theta}{d\tau} = -\beta\theta + \frac{1}{M_s} \cdot \frac{dM}{d\tau} \quad (1)$$

右辺第1項は自然対流とふく射伝熱による加熱項であり、第2項は液滴の蒸発に伴う冷却項である。

ここで、

$$\left. \begin{aligned} \theta &= \frac{T - T_\infty}{h_{fg}/c_s}, \quad \tau = \frac{a_s t}{r_s^2}, \quad a_s = \frac{\lambda_s}{\rho_s c_s} \\ M &= \frac{m}{m_0}, \quad M_s = \frac{m_s}{m_0}, \quad \beta = 2R_b(1 + R_b)Bi \\ R_b &= \frac{r_s}{b}, \quad Bi = \frac{\alpha b}{\lambda_s} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

であり、 $a_s$ ,  $\lambda_s$ ,  $m_s$ は、それぞれ、平板の温度伝導率、熱伝導率、質量である。

初期条件は、

$$\theta = 0 \quad \text{at} \quad \tau = 0 \quad (3)$$

である。なお、式(1)の右辺第2項の液滴の無次元質量  $M$  は時間の関数として与えられるものとする。

#### 4. 基礎方程式の解析解および実測値との比較

基礎方程式 (1) と初期条件 (3) から、 $\theta$  は形式的に次式で与えられる。

$$\theta = \frac{\exp(-\beta\tau)}{M_s} \int_0^\tau \exp(\beta\tau) \frac{dM}{d\tau} d\tau \quad \text{for } 0 \leq \tau \leq \tau_0 \quad (4)$$

ここで、 $\tau_0$  は液滴の無次元蒸発終了時間である。

液滴の蒸発が終了した後は、基礎方程式において右辺第2項は零となる。従って、平板は周囲から対流およびふく射によって加熱されるのみで温度が回復する。この場合の解は、 $\tau = \tau_0$  で  $\theta = \theta(\tau_0)$  と置くことにより、 $\theta$  は次式で与えられる。

$$\theta = \theta(\tau_0) \exp\{-\beta(\tau - \tau_0)\} \quad \text{for } \tau_0 < \tau \quad (5)$$

なお、蒸発時の解との接続の条件から、 $\theta(\tau_0)$  は式(4)の  $\tau = \tau_0$  における値となる。

液滴の無次元質量が次式

$$M = \left(1 - \frac{\tau}{\tau_0}\right)^n \quad (6)$$

に従って変化する場合、 $n = 1, 2$  については解析解が以下のように得られる。

##### 4. 1. $n = 1$ の場合

式(4), (6) から、

$$\theta = -\frac{1}{M_s \tau_0 \beta} \left\{ 1 - \exp(-\beta\tau) \right\} \quad \text{for } 0 \leq \tau \leq \tau_0 \quad (7)$$

が得られる。

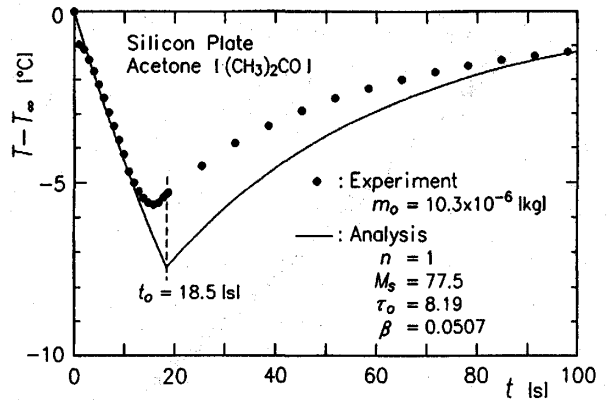


Fig.5 Comparison of analytical Eqs. (7) and (5) with experimental results [(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>CO]

Fig.5は  $n = 1$  とみなせるアセトンについての測定値と比較した結果である。ここで、ビオ数  $Bi$  に含まれる熱伝達係数の値は、仮定(4)で述べたように、自然対流に加えふく射伝熱も考慮し、 $\alpha = 10$  [W/m<sup>2</sup>K] とした。

急激な温度の低下が見られる  $t = 0 \sim 12$  [s] では解析解と測定値とは良く一致しているが、蒸発終了時の温度は解析解の方が35%程低くなっている。これは、式(6)で  $n = 1$  とした場合、蒸発による吸熱量が蒸発過程を通して一定となるが、アセトンの場合  $n$  が厳密には1でないことの差異が顕著に現れているといえる。

##### 4. 2. $n = 2$ の場合

$n = 1$  の場合と同様にして、式(4), (6) から、

$$\theta = -\frac{2}{M_s \tau_0 \beta} \left[ \left(1 + \frac{1}{\beta \tau_0}\right) \left\{ 1 - \exp(-\beta\tau) \right\} - \frac{\tau}{\tau_0} \right] \quad \text{for } 0 \leq \tau \leq \tau_0 \quad (8)$$

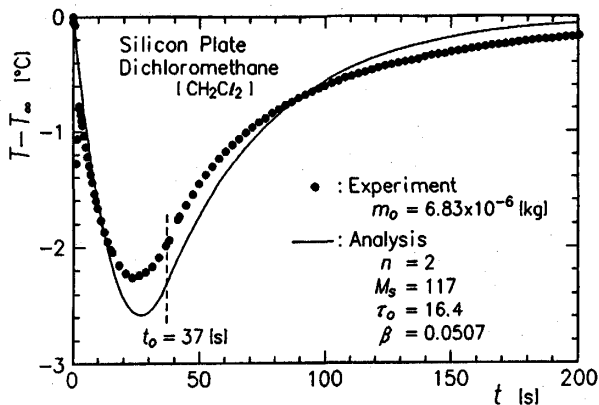
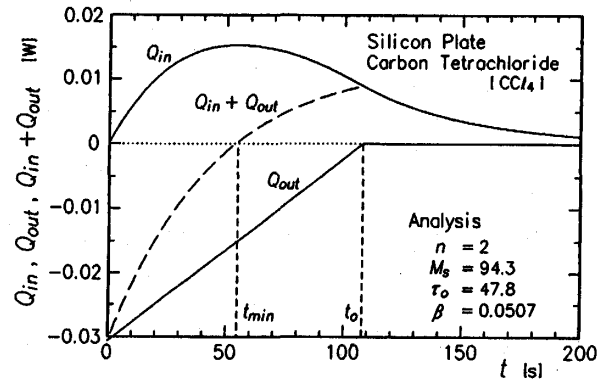
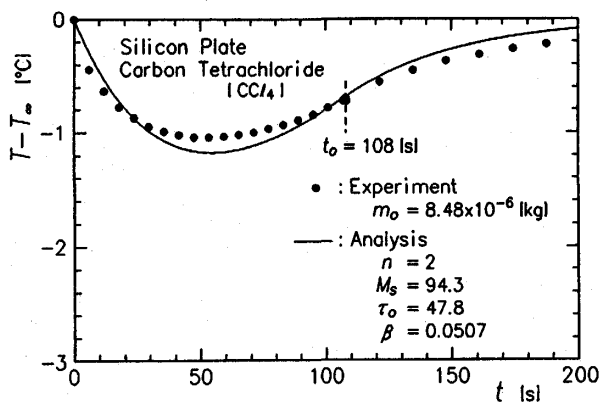
この場合、蒸発の終了時間  $\tau_0$  と平板が最低温度になる時間  $\tau_{min}$  は一致しない。すなわち、

$$\frac{d\theta}{d\tau} = -\frac{2}{M_s \tau_0 \beta} \left\{ \left(1 + \frac{1}{\beta \tau_0}\right) \beta \exp(-\beta\tau) - \frac{1}{\tau_0} \right\} = 0 \quad (9)$$

から、

$$\tau_{min} = \frac{1}{\beta} \ln \left( 1 + \beta \tau_0 \right) (< \tau_0) \quad (10)$$

であり、平板の最低温度は次式で与えられる。

Fig.6 Comparison of analytical Eqs. (8) and (5) with experimental results [ $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ ]Fig.8 Relation between energy input by natural convection and radiation  $Q_{in}$  and energy output by natural evaporation  $Q_{out}$ Fig.7 Comparison of analytical Eqs. (8) and (5) with experimental results [ $\text{CCl}_4$ ]

$$\begin{aligned} \theta_{min} &= -\frac{2}{M_s \tau_0 \beta} \left\{ 1 - \frac{\ln(1 + \tau_0 \beta)}{\tau_0 \beta} \right\} \\ &= -\frac{2}{M_s \tau_0 \beta} \left( 1 - \frac{\tau_{min}}{\tau_0} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

Fig.6は $n \approx 1.6$ であるジクロロメタン, Fig.7は同じく $n \approx 1.8$ の四塩化炭素の実験結果を $n = 2$ の場合の解析解と比較したものである。解析解と測定値の間には良好な一致がみられる。なお, いずれの場合も蒸発終了時間 $t_0$ より以前に平板温度の上昇がみられる。

Fig.8はFig.7に示す解析解における熱量バランスを示したものである。 $n = 2$ の場合, 蒸発による吸熱量は時間に関してリニアに減少する。従って, この温度上昇は, 時間 $t_{min}$ 以後においては自然対流とふく射伝

熱による加熱量 $Q_{in}$ が液滴の蒸発に伴う冷却量 $Q_{out}$ を上回ることに起因する。

## 5. 結 言

非加熱板上での液滴の自然蒸発に関する実験と理論解析を行った。非加熱板と液滴の複合系に集中熱容量法を適用した簡単なモデルにより, 2種類の蒸発パターンに対する系の非定常温度変化に関する解析解を得た。実測値との比較から, 簡単なモデルにもかかわらず, 本解析により面の温度変化を良好に予測できることを示した。本報の結果は, 面上での液滴の自然蒸発を利用した固体の熱物性値の測定法あるいは逆に液滴の蒸発に伴う面の温度変化を利用した蒸発速度の測定法の開発の可能性を示すものである。ただし, 実際には, 蒸発時間に関する指数 $n$ は整数ではないので, より正確な予測をするためには数値解析が必要である。

おわりに, 本研究所 張 興 助手, 濱野 光司 技官, 当時大学院生 渡辺 忠和 氏 (現 シーケーディ (株)), 鈴木 大一郎 氏 (現 九州松下電器 (株)) には実験装置の製作と実験に協力して頂いた。

## 引用文献

- 1) 戸田三郎, 伝熱工学の進展 Vol. 3, 養賢堂, 211-330 (1974).
- 2) R. G. Picknett and R. Bexon, "The Evaporation of Sessile or Pendant Drops in Still Air", *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol.

- 61, No. 2, 336-350 (1977).
- 3) N. Zhang and W. J. Yang, "Natural Convection in Evaporating Minute Drops", *Transactions of the ASME, Journal of Heat Transfer*, Vol. 104, 656-662 (1982).
  - 4) N. Zhang, Y. Xu and W. J. Yang, "Thermal Stability in Binary Droplet Vaporization on a Flat Plate by Real-Time Holographic Interferometry", *Heat Transfer 1986*, San Francisco, Vol. 2, 525-530 (1986).
  - 5) W. J. Yang, K. H. Guo and T. Uemura, "Theory and Experiments on Evaporating Sessile Drops of Binary Liquid Mixtures", *International Journal of Heat Mass Transfer*, Vol. 32, No. 7, 1197-1205 (1989).
  - 6) J. J. Rizza, "A Numerical Solution to Dropwise Evaporation", *Transactions of the ASME, Journal of Heat Transfer*, Vol. 103, 501-507 (1981).