

スプレー型直接接触式蒸発器 の蒸発過程の解析

Analytical Study on Evaporation Process in Spray Type Direct Contact Evaporator

高島 武雄

Takashima Takeo

1. はじめに

熱エネルギーの有効利用を図る方法のひとつに、直接接触式の熱交換器⁽¹⁾の導入があげられる。とくに、温度差が小さくスケールの付着が懸念される地熱発電用の熱交換器としての導入は有効と考えられる。サイクルの作動媒体の蒸発を行う直接接触式蒸発器には、作動媒体と用いる揮発性液体の蒸発が、高温液の内部で沸騰によって進行する容積型と、高温液表面で蒸発するスプレー型（表面型ともいう）とがある。容積型では、円筒形容器内の高温液体に非溶解性の揮発液体を主に下方から注入して蒸発させる。スプレー型では、通常多段の高温液表面に揮発性液体を液滴として滴下し、薄い膜状とすることで短時間に蒸発を行わせるものである。蒸発器の設計においては、運転条件に応じた伝熱面積を見積もる必要があり、そのためには蒸発速度や蒸発時間に関する情報が欠かせない。

一般に高温液面上に滴下された揮発性液滴は、主に高温液温度によって種々の蒸発様相⁽²⁾を示す。このうち膜状に広がったレンズ状液滴の蒸発時の伝熱速度については、Kodres ら⁽³⁾は、蒸発器の設計のために、いくつかの係数を導入した次元解析的手法によって伝熱量を評価する方法を開発した。また、Bentwich ら⁽⁴⁾は、静止水面上のペンタン液滴について、表面過熱度と液滴直径の減少速度の実験と解析を行っているが、計算値と実験結果は一致していない。さらに平澤ら⁽⁵⁾は、流下する水膜に滴下された R113 液滴の蒸発について蒸発速度の実験結果から熱伝達率を求めている。これらの研究では、いずれも蒸発速度におよぼす液滴の形状および形状の変化に重きを

置いていることから、蒸発速度や伝熱量を解析的に求めるまでには至っていない。

本研究では、高温液体面上の膜状の揮発性液滴の蒸発時間を解析的に明らかにすることを目的として、自然対流領域の固体面上の液膜の蒸発過程を液体面に適用することを試みた。解析は比較的容易で、計算結果は実験結果とよく一致することから、この解析によって、液液直接接触式蒸発器の設計に必要な蒸発時間などの情報を得ることができる。

記号

A	: 面積 (m^2)
b	: レンズ状液滴厚さ (m)
C	: モル濃度 (kmol/m^3)
c_p	: 定圧比熱 (J/kgK)
D	: 拡散係数 (m^2/s)
d	: 直径 (m)
g	: 重力加速度 (m/s^2)
Gr	: グラスホフ数
h_{fg}	: 蒸発潜熱 (J/kg)
h_m	: 物質移動係数 (m/s)
h	: 高温液側熱伝達率 ($\text{W/m}^2\text{K}$)
M	: 分子量 (kg/kmol)
m	: 質量 (kg)
N	: モル物質流束 (kmol/s m^2)
Nu	: ヌッセルト数
n''	: 物質流束 (kg/sm^2)
P	: 圧力 (Pa)
Pr	: プラントル数
Q	: 熱流量 (W)
R	: ガス定数 (J/kgK)
R_0	: 一般ガス定数 (J/kmolK)

r : レンズ状液滴の曲率半径(m)

Sc : シュミット数

Sh : シャーウッド数

T : 温度 (K)

t : 時間 (s)

V : 体積 (m^3)

v : 速度 (m/s)

α : 温度伝導率 (m^2/s)

β : 体積膨張係数 ($1/K$)

θ : 角度

λ : 熱伝導率 (W/mK)

ν : 動粘性係数 (m^2/s)

ρ : 密度 (kg/m^3)

τ : 蒸発時間 (s)

ω_A : 質量分率($=\rho_A/\rho$) (-)

添字

c : 対流

d : 拡散

e : 蒸発

l : レンズ状液滴

o : 大気主流

s : 表面

w : 水

∞ : 境界層の外側

2. 解析

2.1 解析モデル Fig.1 に解析モデルを示す.

互いに溶解しない液体面上の液滴は、さまざまな蒸発様相を示す。液面上で膜状で蒸発する場合は、表面張力の関係によって、両側に曲率を持つレンズ状となることが知られている⁽³⁾。本研究では、高温液に表面張力の大きい水を、揮

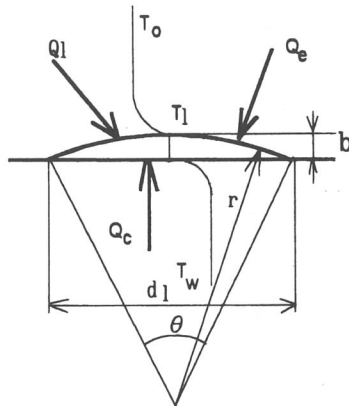


Fig.1 Evaporation model

発液滴に密度の小さい n-ペンタンを用いたことで、レンズの形状を固体面上と同じになるとした。さらに、解析を簡単にするため、以下の仮定を設けた。

1) 蒸発成分の濃度分布は y 方向のみとする。

2) 気体は理想気体とする。

3) 高温液の変形は考慮しない。

4) Fig.1 に示した θ は一定とする。

液滴体積 V は、液滴質量をあらかじめ測定して求める。この液滴が球面を持つレンズ状液膜になったときの液膜直径 d_l 、厚さ b 、体積 V は、それぞれ以下の式となる。

$$d_l = 2r \sin \theta \quad (1)$$

$$b = r(1 - \cos \theta) \quad (2)$$

$$V = \frac{1}{3} \pi b^2 (3r - b) \quad (3)$$

V の値と上式から、滴下時の液膜直径 d_l を測定することで r 、 b 、 θ を得ることができる。

2.2 物質伝達式 基本的には、高温固体面上の液膜の蒸発の解析⁽⁶⁾と同様であるが、文献(6)には解析の詳細が書かれていないのであらためて以下に示した。

フィックの法則から、拡散による液膜のモル物質流束 $N_{l,d}''$ ($kmol/s \cdot m^2$) は、次式となる。

$$N_{l,d}'' = -D_{AB} \frac{\partial C_l}{\partial y} \quad (4)$$

ここで、 D_{AB} は B (空気) に対する A 成分 (液膜) の拡散係数 (m^2/s)、 C_l はレンズ状液滴成分のモル濃度 ($kmol/m^3$) である。

濃度勾配がマイナスとなるので、 $N_{l,d}''$ をプラスにするためにマイナスの記号を付ける。

式(4)は仮定(1)を用いると次式となる。

$$N_{l,d}'' = -D_{AB} \frac{dC_l}{dy} \quad (5)$$

両辺に液滴物質の分子量 M_l ($kg/kmol$) をかけると、物質流束 $n_{l,d}''$ (kg/sm^2) は、次式となる。

$$n_{l,d}'' = -D_{AB} \frac{d\rho_l}{dy} \quad (6)$$

ここで、 ρ_l は蒸発するレンズ状液滴成分の密度 (kg/m^3) である。

式(6)は気体の状態方程式を用いると次式のようにも表せる.

$$n_{i,d}'' = -\frac{D_{AB}}{R_i T} \frac{dP_i}{dy} \quad (7)$$

ここで, P_i は液滴成分の分圧(Pa)である.

一般に成分Aの密度 ρ_A を混合物の密度 ρ で除した $\omega_A = \rho_A / \rho$ は質量分率といわれ, 式(7)に代入すると次式となる.

$$n_{i,d}'' = -\rho D_{AB} \frac{d\omega_i}{dy} \quad (8)$$

y方向に流れがある場合は, 蒸発する液滴成分の物質流束は, 拡散流束と流れによる流束の和となる. 従って, 流速が v の時の液滴成分の物質流束 n_i'' は次式となる.

$$n_i'' = -\rho D_{AB} \frac{d\omega_i}{dy} + v \rho_i \quad (9)$$

同様に周囲の空気(添字Bで表す)の物質流束 n_B'' を考える. 空気は蒸発も凝縮もしないので $n_B''=0$ となるので, 次式となる.

$$0 = -\rho D_{BA} \frac{d\omega_B}{dy} + v \rho_B \quad (10)$$

質量分率の和は1となるから($\omega_i + \omega_B = 1$), $d\omega_B/dy = -d\omega_i/dy$ の関係を式(10)に代入すると, v は次式となる.

$$v = -\frac{1}{1-\omega_i} D_{BA} \frac{d\omega_i}{dy} \quad (11)$$

式(11)を式(9)に代入し, $\omega_i = \rho_i / \rho$ を用い, $D_{AB} = D_{BA} = D$ とみなすと, 次式となる.

$$n_i'' = -\frac{1}{1-\omega_i} \rho D \frac{d\omega_i}{dy} \quad (12)$$

式(12)を, 気体の状態式を用いて, 質量分率を蒸発物質の分圧で表すと, 式(13)となる.

$$n_i'' = -\frac{D}{R_i T} \frac{P}{P-P_i} \frac{dP_i}{dy} \quad (13)$$

一方, 蒸発面($y=0$)では, 物質移動係数 h_m を用いて表した物質流束 n_i'' は次式となる.

$$n_i'' = h_m (\rho_{i,s} - \rho_{i,\infty}) \quad (14)$$

気体の状態方程式から, 式(14)は次式で表すことができる.

$$n_i'' = \frac{h_m}{R_i T} (P_{i,s} - P_{i,\infty}) \quad (15)$$

式(7)(15)から, 表面の分圧勾配は次式となる.

$$-D \left(\frac{dP_i}{dy} \right)_{y=0} = h_m (P_{i,s} - P_{i,\infty}) \quad (16)$$

$P_{i,\infty}=0$ とし, シャーウッド数 Sh を用いて拡散係数 D を表すと, 式(16)は次式となる.

$$\left(\frac{dP_i}{dy} \right)_{y=0} = -\frac{Sh P_i}{d_i} \quad (17)$$

式(13)の圧力勾配を表面でとり, 式(17)を代入し, 面積 A_i をかけて, $m_i = n_i'' A_i$ とし, さらに微小時間 dt の蒸発量を dm_i で表すと, 蒸発速度 dm_i/dt は次式となる.

$$\frac{dm_i}{dt} = \frac{M_i D P S h A_i}{R_0 T_{av} d_i} \frac{P_i}{P - P_i} \quad (18)$$

ここで, R_0 は一般ガス定数(J/kmolK), T_{av} は大気の濃度境界層の平均温度($T_{av} = T_0 + T_i/2$)である.

なお, シャーウッド数 Sh は熱伝達とのアナロジーから次式で求める.

$$Sh = 0.54 (Gr Sc)^{1/4} \quad (19)$$

ここで, Gr はグラスホフ数, Sc はシュミット数で, それぞれ次式で計算される.

$$Gr = \frac{d_i^3 g \beta (T_w - T_\infty)}{\nu^2} \quad (20)$$

$$Sc = \frac{\nu}{D} \quad (21)$$

2.3 熱伝達式 一般に液体と液体が接触している系においては, 固体面と異なり発泡核が存在しないことから, 液膜は飽和温度以上に過熱されることもあり得る. また蒸発速度によって

は、過冷されて飽和温度以下になることも考えられ、滴下後液滴が飽和温度になるとはいえない。このため液膜温度の計算も必要となる。

液膜温度は、高温液から液膜に伝わる熱流量 Q_w が液膜の温度上昇と蒸発に消費されるので、次式となる。

$$Q_w = Q_i + Q_e \quad (22)$$

Q_w は、液側の熱伝達率を h_w (W/m^2K) とすると次式となる。

$$Q_w = h_w A_l (T_w - T_l) = h_w \pi d_l (T_w - T_l) \quad (23)$$

熱伝達率 h_w はヌッセルト数 $Nu = h_w d_l / \lambda_w$ から求め、 Nu は自然対流の次式から求める。

$$Nu = 0.16 (Gr Pr)^{1/3} \quad (24)$$

ここで、 Gr はグラスホフ数である。 Pr はプラントル数で次式で計算される。

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (25)$$

Q_i は次式となる。

$$Q_i = m_i c_p \frac{dT_l}{dt} \quad (26)$$

ここで、 m_i はレンズ状液滴質量、 c_p は比熱である。

蒸発に要する熱流量は次式となる。

$$Q_e = h_{fg} \frac{dm_i}{dt} \quad (27)$$

レンズ状液滴の温度変化は、式(22)と(26)から次式となる。

$$\frac{dT_l}{dt} = \frac{Q_w - Q_e}{m_i c_p} \quad (28)$$

レンズ状液滴の直径の変化は、蒸発面の面積を A_l を用いて次式とする。

$$\frac{dd_l}{dt} = \frac{2 \frac{dm_i}{dt}}{A_l \rho_l \cos\{(\pi - \theta)/2\}} \quad (29)$$

A_l は次式となる (Fig.1 参照)。

$$A_l = 2\pi r b \quad (30)$$

以上の解析から、式(28),(29)を解くことによって、液膜の温度 T_l 、液膜直径 d_l の変化を計算することができる。

3. 解析結果

3.1 蒸発時間と液滴温度 Fig.2~5 に、温度の異なる水面上に n-ペンタン液滴を滴下した場合の蒸発時間の実験値⁽⁷⁾と計算値を比較した。液滴の温度変化の計算値もあわせて示した。n-ペンタ

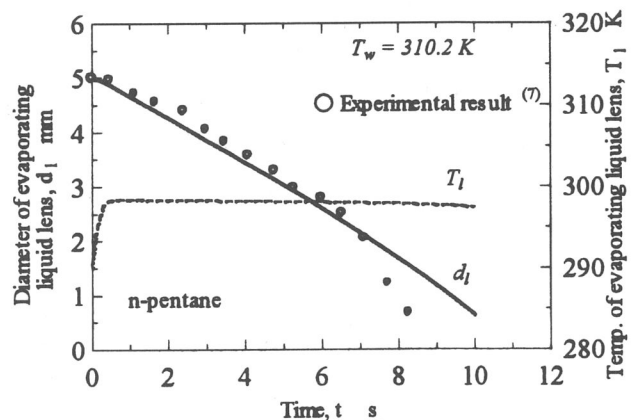


Fig.2 Comparison between experimental result and calculated result for the change of diameter and temperature of evaporating n-pentane lens when water temperature is 310.2 K.

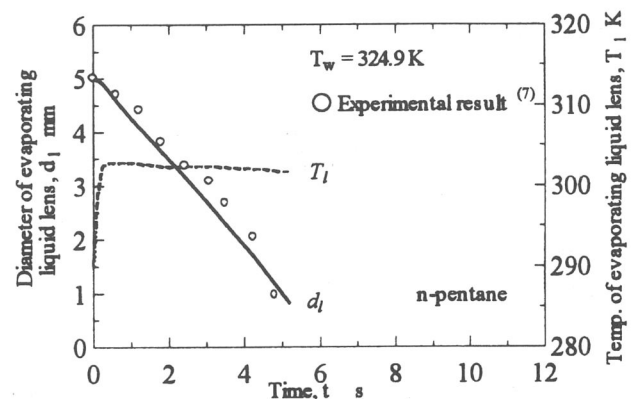


Fig.3 Comparison between experimental result and calculated result for the change of diameter and temperature of evaporating n-pentane lens when water temperature is 324.9 K.

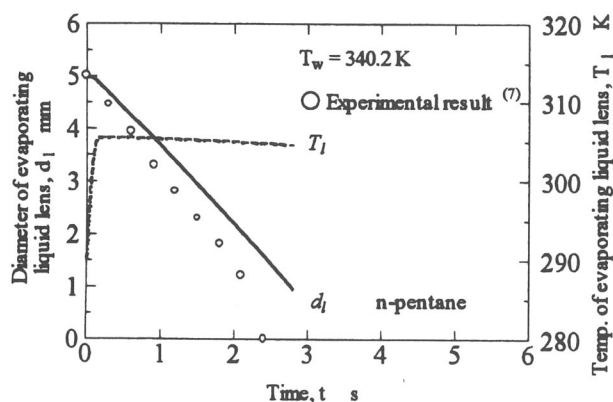


Fig.4 Comparison between experimental result and calculated result for the change of diameter and temperature of evaporating n-pentane lens when water temperature is 340.2 K.

ン（飽和温度は 309.3 K）の滴下温度は 290.2 K であった。水温表面温度とペンタンの飽和温度の差を過熱度とする。

結果から、水温が高いほど実験値と計算値の差が大きくなることがわかる。また蒸発が進行して、レンズ状液滴径が小さくなると、計算値は実験値から離れていく。この理由は、液滴が水面上を動き回るため、自然対流として計算した熱伝達率がより大きくなるためと考えられる。

3.2 熱伝達率 高温液表面とレンズ状液滴間の熱伝達率の計算値を Fig.6 に示した。温水のバルク温度にほぼ比例して増加している。過熱度が 36 K（バルク温度 345 K に相当）で約 $1200 \text{ W/m}^2\text{K}$ となり、水の低過熱度時の核沸騰熱伝達率に相当する値となった。

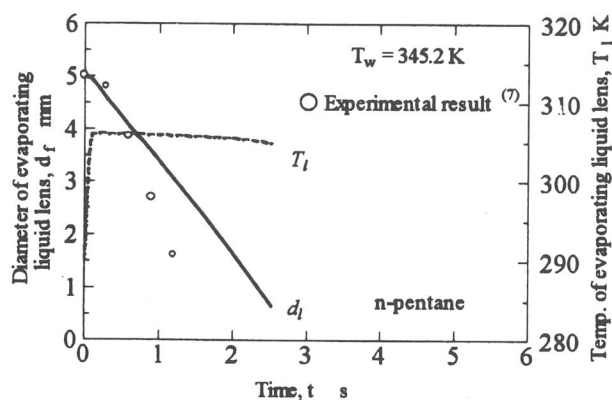


Fig.5 Comparison between experimental result and calculated result for the change of diameter and temperature of evaporating n-pentane lens when water temperature is 345.2 K

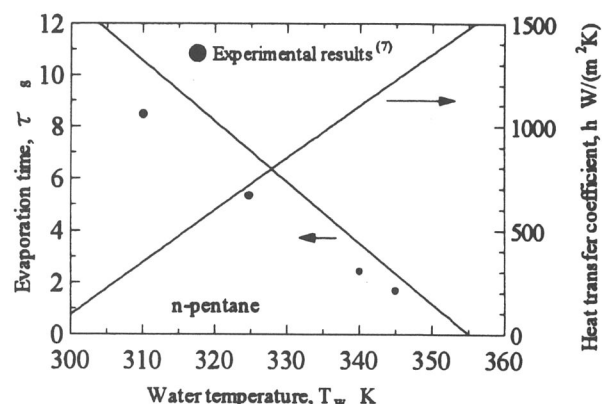


Fig.6 Comparison between experimental results and calculated result for the evaporation time and calculated heat transfer coefficient between hot liquid and evaporating liquid lens during quasi-steady state.

4. まとめ

スプレー型直接接触式蒸発器の蒸発過程の解析を行い、以下の結果を得た。

- 1) レンズ状液滴の直径の減少過程の解析値と実験値は比較的よく一致し、解析の妥当性が確認できた。
- 2) 解析から蒸発中の液滴温度は、温水バルク温度の増加とともに上昇するものの、飽和温度以下であり過冷却状態であることがわかった。
- 3) 温水と液滴間の熱伝達率は温水温度にほぼ比例する。

本研究を行うに当たって、助言と実験データの提供をいただいた横浜国立大学工学部生産工学科鳥居薫教授に感謝の意を表する。

文 献

- (1) 飯田・高島, 化学工学, 49-4 (1985), 282.
- (2) 高島・飯田, 機論 B, 52-475 (1986), 1372.
- (3) C.A. Kodress et al., Trans. of the ASME J. Energy Resources Technology, 103 (1981), 128.
- (4) M. Benwich et al., Int. J. Heat Mass Transfer, 13 (1970), 945.
- (5) 平落・ほか 2 名, 機論 B, 54-503 (1988), 1814.
- (6) 廣安・角田・千田, 機論 (第 2 部), 39-328 (1973), 3779.
- (7) 諸乃祥, 横浜国立大学工学部修士論文 (1979).

takasima@oyama-ct.ac.jp

〔受理年月日 2001 年 9 月 28 日〕

