

2成分不溶性混合冷媒の凝縮熱伝達に関する研究*

(付着滴の離脱と掃除効果)

林 勇二郎^{*1}, 寺西 恒宣^{*2}
滝本 昭^{*1}, 羽根田 完爾^{*3}

Study on Condensation Heat Transfer of Binary Vapors of Immiscible Liquids

(Analysis of the Sweeping Effect of Sliding Drops)

Yujiro HAYASHI, Tsunenobu TERANISHI,
Akira TAKIMOTO and Kanji HANEDA

After prolonged experiments and theoretical studies on the condensation phenomena of the specially characterized mixture of carbon tetrachloride and water on inclined cooled plates, the area of interest has been shifted to the development of a heat transfer model whose characteristics correlate with the analytical and experimental results. The attached report consists of a critically analyzed model which is considered to be a good proposition for a mixed condensation consisting of water adherent drops and the organic liquid flow. The model has been developed with facing into consideration given to the sweeping effect of sliding drops. The predictions by the model agree well with the experimental results.

Key Words: Thermal Engineering, Condensation Heat Transfer, Binary Vapors, Immiscible Liquid, Azeotropic Mixture, Condensation Model

1. 結 言

有機系冷媒に水などを付加した2成分不溶性混合冷媒は、熱伝導率や潜熱などの熱的性質に優れ、ランキンおよびヒートポンプなどのサイクル性能を向上させることから、近年、作動媒体の候補として注目されている⁽¹⁾⁽²⁾。しかしながら、これらは、互いに不溶性であるがために、有機物の膜状と水の滴状凝縮からなる膜滴混在形(film-drop)あるいは両者ともすじ状に流下するすじ流形(channeling flow)などの複雑な凝縮形態をとり、これまでに数多くの研究が報告されているにもかかわらず^{(3)~(6)}、その伝熱特性についてはまだ一般性をもって議論されるには至っていない。

著者らは、前報⁽⁹⁾において、共沸組成の四塩化炭素-水系(水3.83 mass%)混合蒸気を供試試料とした、鉛直平板上への凝縮実験を行い、凝縮の様相と熱伝達率の結果について報告した。具体的には、壁面上を流下する有機液膜と付着定在する水滴の共存にはじまる凝縮において、後者の水滴は蒸気の直接凝縮、液膜上

に浮遊した微小水滴の流れ込み、さらには滴同士の合体により成長し、やがて離脱流下しすじ流へと移行してゆく動特性、ならびにこれらの凝縮形態との関連づけのもとで伝熱特性が明らかにされた。特に、周囲蒸気-壁面間の温度差が小さく凝縮量が少ない場合には、壁面上に定在する付着滴の存在が熱的な抵抗となるばかりでなく有機液膜流に対する流動抵抗となるため、水の付加による物性的な伝熱向上効果は相殺され、有機物のみ比して熱伝達が逆に低下する。また、温度差が大きく凝縮量が多い場合には、水滴の離脱頻度が高く、滴の掃除が伝熱促進に効果的に作用するが、すじ流への移行とともに熱伝達率が低下する結果となった。

本報は、以上の知見を踏まえて、滴状凝縮と膜状凝縮が共存する複合凝縮に対して物理モデルを提示し、凝縮熱伝達の特性を半理論的に追究するものである。なお、ここでは、付着滴の離脱に代表される液膜流と滴の干渉をより詳細に観察し、さらには冷却面の姿勢を含めた一般論を展開するため、傾斜冷却面に対する凝縮実験を行い、前報の結果を補充した。

記 号

B : 凝縮面の幅 m

* 平成元年6月1日 第26回日本伝熱シンポジウムにおいて講演、原稿受付 平成3年7月2日。

^{*1} 正員、金沢大学工学部 (〒920 金沢市小立野2-40-20)。

^{*2} 正員、富山工業高等専門学校 (〒939 富山市本郷町13)。

^{*3} 准員、松下電器産業(株) (〒925 草津市野路町2275-3)。

- E_n : 伝達比
 g : 重力の加速度 m/s^2
 h : 熱伝達率 $W/m^2 \cdot s$
 L_H : 凝縮潜熱 kJ/kg
 L : 凝縮面の長さ m
 M_i : 凝縮質量割合 $= m_i / (m_1 + m_2)$
 m : 凝縮速度 $kg/m^2 \cdot s$
 N : 個数分布関数 $drops/m^2/m$
 q_x : 局所熱流束 W/m^2
 q_{cx} : すじ流域での局所熱流束 W/m^2
 q_{mx} : 膜滴混在域での局所熱流束 W/m^2
 r : 付着滴半径 m
 S : 掃除面積率
 T : 温度 $^{\circ}C$
 t_c : 離脱周期 $m^2 \cdot s / drops$
 u : 平均液膜流速 m/s
 U_d : 離脱流下滴速度 m/s
 W_s : 離脱流下滴による掃除幅 m
 X : 凝縮面上端からの距離 m
 δ : 液膜原さ m
 θ : 平板傾斜角 $^{\circ}$
 λ : 熱伝導率 W/mK
 μ : 粘性係数 $Pa \cdot s$
 ρ : 密度 kg/m^3
 σ : 表面張力 N/m
 τ_d : 液滴表面での液膜流せん断力 N/m^2
 τ_w : 壁面でのせん断力 N/m^2

添 字

- c : 離脱臨界値
 d : 水に関する値
 f : 有機物に関する値
 l : 液相
 v : 気相
 $-$: 平均値

2. 傾斜冷却面上への凝縮実験

2.1 実験装置および方法 1気圧・共沸組成の四塩化炭素-水系の混合蒸気中に置かれた、傾斜角 $\theta = 30, 60, 90^{\circ}$ の等温冷却平板 (40×40 mm) 上への凝縮実験を、周囲温度-凝縮面温度差 (以下、温度差と称する) ΔT を種々変化させ、定常状態のもとで凝縮量の経時変化の測定と、凝縮形態の観察を VTR あるいはカメラにより行った。なお、実験装置については平板を傾斜させた以外は前報⁽⁹⁾と同様であり、詳細は略す。

2.2 実験結果および考察

(1) 付着離脱について 2成分不溶性蒸気の凝縮は、表面張力差による有機物の膜状と水の滴状凝縮からなる膜滴混在を基本とし、壁面に付着した水滴以後、付着滴と呼ぶ)は成長に伴い壁面を離脱・流下し、離脱が連続的に生ずるとすじ流となる。凝縮面の場所的な差異としては、液膜流の影響が強い下流域ほど膜滴混在形からすじ流形への移行が早く、例えば、上端部付近で付着滴の離脱が間欠的に生じていても、下流域では、上流からの流下滴が累積されすじ流を形成する。温度差および傾斜角の増加は、付着の離脱に対して同様に作用する。

図1に、観察写真より求めた凝縮面上の付着滴の個数分布の結果を示す。傾斜角 $\theta = 30, 60^{\circ}$ については $\Delta T = 20$ K で平板上端からの距離を、また、 $\theta = 90^{\circ}$ については $X = 20$ mm で温度差をパラメータとしている。滴の形状は傾斜角が大きく(垂直)、また凝縮面下方ほどわずかに縦長となるが、ここでは、滴径をだ円近似のもとでの等価径として表す。図1より、測定精度上若干ばらつきはあるものの、付着滴の個数分布関数 $N(r)$ は $r > 0.1 \mu m$ の範囲で傾斜角、温度差および凝縮面上の位置に無関係にほぼ一定となり、それらは式(1)で表される。

次に、VTR の観察により求めた離脱臨界径と離脱開始位置との関係を種々の傾斜角と温度差に対して図2に示す。いずれも同一の観察時間(5 min)での結果であり、したがって実験点の数は離脱頻度を表す。図3および図4は、これらの結果を凝縮面上端より10 mm 間隔の4領域に分割し、各領域における平均離脱臨界径 r_c 、および平均離脱周期 t_c の結果を示したものである。これらより、離脱滴は凝縮面下方ほど滴径が小さくまたその個数も多く(周期が短く)、

$$N(r) = 25.6 \cdot r^{-2.14} \dots \dots \dots (1)$$

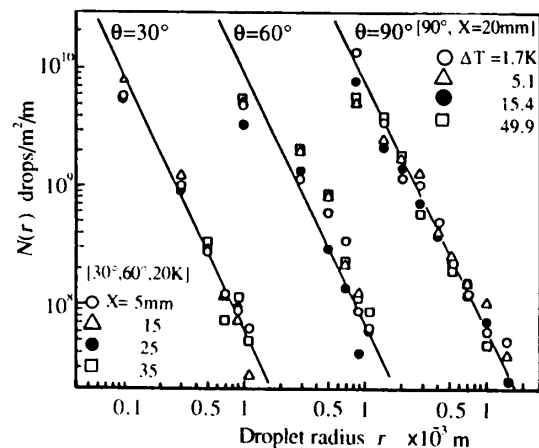


図1 付着滴個数分布

それは傾斜角の増加に伴い、より顕著となること、さらに、温度差の増加に伴い臨界径、周期ともにより小さくなる傾向を示すことがわかる。これらの結果は、2成分不溶性の特徴的な現象であり、温度による特性値の影響が若干あるものの、主として表面張力による付着力と重力とのバランスに加えて有機液膜流によるせん断力が離脱促進に作用しているものと考えられる。

(2) 熱伝達率 図5に平均熱伝達率 \bar{h} の結果を純蒸気(四塩化炭素)の結果と比較して傾斜角をパラ

メータに示す。図5中、黒印が純蒸気を、白印が混合気の実験結果であり、実線は純蒸気に対するヌッセルトの理論値を示す。なお、熱伝達率の実験値は凝縮速度 m の測定値より求めた熱流束 q から算出($\bar{h}=q/\Delta T$)したものである。純蒸気の実験結果は、理論値とほぼ一致しており、本装置が凝縮実験装置として妥当なもののみなすことができる。

混合蒸気と純蒸気との比較において、混合蒸気の熱伝達率は温度差 ΔT の小さい範囲では純蒸気より小さく、 ΔT がおよそ 10 K を境にそれ以上の温度範囲では逆に大きくなる傾向を示す。傾斜角の影響としては、角度が大きいほど混合気の熱伝達率は相対的に高く、また純蒸気と混合気の熱伝達率の大きさが逆転する温度差 ΔT (~ 10 K) は若干小さくなるようである。以上のことは、前報でも明らかにされたように、前述の付着滴の離脱性と関係づけて次のように説明される。すなわち、低温度差での付着滴の存在が熱抵抗と

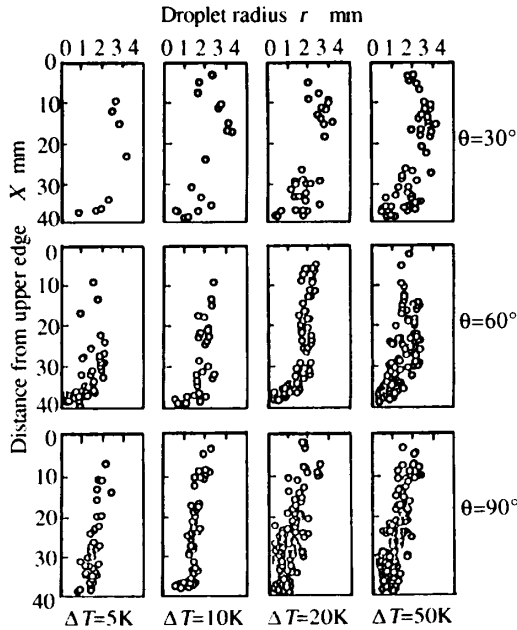


図2 離脱臨界径

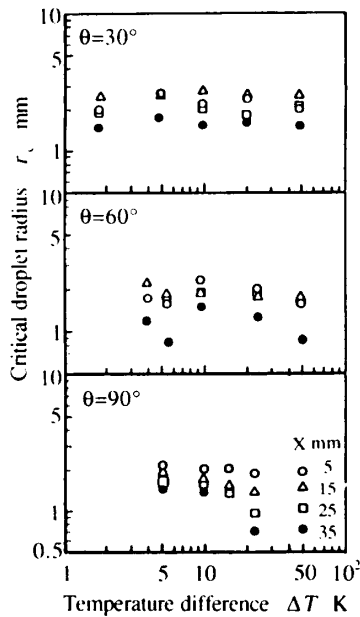


図3 離脱臨界径と温度差

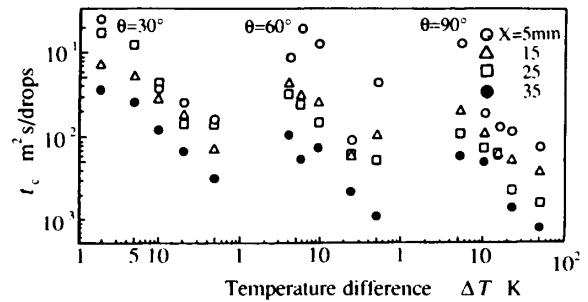


図4 離脱周期と温度差

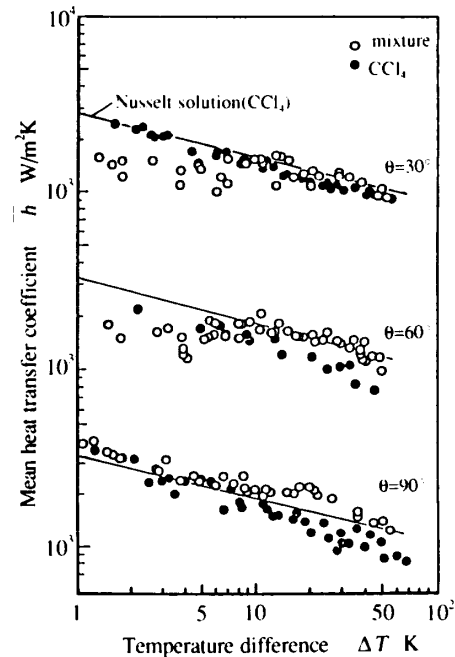


図5 凝縮熱伝達率

なるばかりでなく液膜の流動抵抗となるため熱伝達が低くなるが、温度差および傾斜角の増加は一般に凝縮面上での付着滴の離脱性が高くなり、それによる掃除効果のため熱伝達が促進されるものと考えられる。

3. 凝縮モデルおよび理論解析

以上の結果より得られた滴状と膜状が共存する複合凝縮、すなわち膜・滴混在状態の凝縮についてモデル化し、伝熱特性を理論的に追究する。なお、凝縮面が全面すじ流となる場合については、これまでOgino⁽¹⁾, Bernhardtら⁽¹¹⁾によって理論的に解析されている。

3・1 凝縮モデル モデル化にあたり、以下の仮定をおく。

- 1) 混合蒸気は共沸組成・温度であり、気相中の拡散抵抗層は存在しない。
- 2) 気液界面での温度は付着水滴および有機液膜に無関係に一定一様である。
- 3) 付着水滴は半球形状とし、有機液膜厚さ以下の滴は存在しない。
- 4) 2成分の凝縮速度比は共沸組成比である。
- 5) 付着水滴上および有機液膜上での微小浮遊滴の存在を無視する。
- 6) 有機液膜流は層流定常流である。
- 7) 離脱流下滴間の相互干渉を無視し、その流下速度および滴径は一定である。

(1) 付着滴の離脱 厚さδの有機液膜流を伴う角度θの傾斜冷却面上に付着している半径rの半球形の水滴が離脱流下する条件は、単一滴の取扱いのもと重力、浮力および液膜流せん断力と付着力とのバランスによって次式で与えられる。

$$K_1 \rho g \sin \theta - (K_2 \rho_v g \sin \theta + K_3 \rho_l g \sin \theta) + K_4 \tau_d \geq C 2 \pi r \sigma \dots\dots\dots (2)$$

ここで、Cは定数であり、K₁~K₄は次式で与えられる滴形状および液膜厚さと関係する値である。

$$K_1 = (2/3) \pi r^3, K_2 \approx (2/3) \pi r^3 - \pi r^2 \delta$$

$$K_3 \approx \pi r^2 \delta, K_4 = 2 \pi r \delta$$

式(2)において、ρ ≫ ρ_v, r ≫ δより左辺第2の浮力項を無視し、また、液膜流せん断力をτ_d ~ 2μu/δで近似し、u, δに対してNusseltの解を近似的に適用すると、付着水滴の離脱臨界径は傾斜角θ、凝縮面上端からの位置X、温度差ΔTの関数として次式で与えられる、

$$r_c \geq \left\{ \frac{K_5}{\sin \theta} - K_6 \left(\frac{\Delta T X}{\sin \theta} \right)^{1/2} \right\}^{1/2} \times 10^{-3} \text{ [m]} \dots\dots\dots (3)$$

K₅, K₆を実験結果(図2)より求めると、4.0および

2.12となる。一方、離脱周期についても、r_cと同様にΔT, X, sin θの関数として与えられると仮定すると実験結果(図4)より次式が求められる。

$$t_c = 1.89 \cdot 10^4 \Delta T^{-0.9} \sin \theta^{-2} X^{-1.5} \text{ [m}^2 \cdot \text{s/drops]} \dots\dots\dots (4)$$

(2) 膜・滴混在からすじ流への遷移 臨界半径r_cの付着水滴が、周期t_cで間欠的に離脱流下する膜・滴混在状態は、図6に示すように凝縮面下方では上流からの離脱流下滴の累積によりついにはすじ流状態へと移行する。この遷移位置は、以下のように求めることができる。すなわち、幅Bの凝縮面に対して、凝縮面上端からの位置Xでの離脱流下滴による掃除幅W_sは、最上端の滴がXに到達する時間内(X/U_d)に、0~X間を離脱する滴個数の総和と滴径との積により次式で与えられる。

$$W_s(X) = \frac{X}{U_d} \int_0^X \frac{2r_c B}{t_c} dX \dots\dots\dots (5)$$

また、掃除面積率Sは

$$S(X) = W_s(X)/B \dots\dots\dots (6)$$

となり、したがって、凝縮面全幅が膜滴混在からすじ流へと遷移する位置(X_{crit})は、S=1として求められる。

(3) 熱伝達 冷却面上での複合凝縮の形態マップは、図6に示すように膜滴混在域(0 < X < X_{crit})と(3)すじ流域(X_{crit} < X < L)とからなり、前者はさらに(1)付着滴の離脱のない液滴静置域、および(2)離脱により恒常的に薄膜のみに覆われる滴離脱掃除域からなるとした三つの領域に分けて取扱う。

凝縮熱流束は、先の仮定(1)~(6)のもと、膜滴混在域およびすじ流域においてそれぞれ次のように表される。

$$q_{mx} = m_f L_{Hf} + m_d L_{Hd} \dots\dots\dots (7)$$

$$\left(1 - S - \sum_{r=r_d}^{r_c} N \pi r_i^2 \right) q_f + (1 - S) \sum_{r=r_d}^{r_c} N \pi r_i^2 q_d + S q_i$$

(有機液膜域) (付着滴域) (掃除域)

$$q_{cx} = \frac{\Delta T (M_f L_{Hf} + M_d L_{Hd})}{M_f L_{Hf} / h_f + M_d L_{Hd} / h_d} \dots\dots\dots (8)$$

ここで、mは凝縮速度(m_f/m_d = M_f/M_d = 0.0383)である。また、上式中、q_f, q_dおよびq_iは、有機液膜、付着

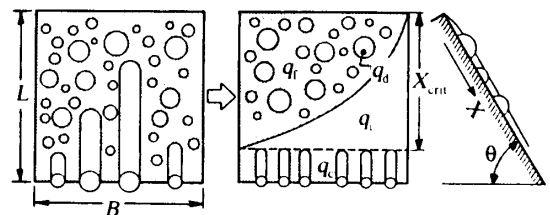


図6 凝縮モデル

水滴および掃除後の薄膜を通過する熱流束であり、次式で現される。

$$q_f = \Delta T \lambda_f / \delta(X) \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$q_a = \Delta T 3 \lambda_a / 2r \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$q_i = \Delta T \lambda_m / \delta' \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここで、 δ' は付着滴離脱後の液膜厚さである。

一方、液膜流に対する質量保存および運動量式は次式で与えられる。

$$m_f = \left(1 - S - \sum_{r_i=\delta}^{r_c} N \pi r_i^2\right) \rho_f \left(u \frac{d\delta}{dX} + \delta \frac{du}{dX}\right) \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$\begin{aligned} &g(\rho_f - \rho_g) \delta \left(1 - S - \sum_{r_i=\delta}^{r_c} N \pi r_i^2\right) \sin \theta \\ &= \tau_w \left(1 - S - \sum_{r_i=\delta}^{r_c} N \pi r_i^2\right) + \tau_a (1 - S) \\ &\times \sum_{r_i=\delta}^{r_c} 2 N \pi r_i \delta - f \sum_{r_i=\delta}^{r_c} N u^2 \quad \dots\dots\dots (13) \end{aligned}$$

ここで、 τ_w 、 τ_a は凝縮面および液滴表面のせん断力 ($\sim \mu u / \delta$)、 f は付着滴による液膜流の屈曲抵抗係数である。

以上により、式(1)、(3)および式(4)で与えられる付着滴の個数分布関数 $N(r)$ 、離脱臨界径 r_c および離脱周期 t_c を用い、式(5)~(11)を $X=0$ で $\delta=0$ 、 $u=0$ の条件のもと数値積分し、液膜厚さ δ および局所熱流束 q_{mx} が求められ、さらに $X=X_{crit}$ での液膜

流量の連続性のもとすじ流域に対する有機液および水膜流のヌッセルトの理論解 (h_f , h_a) を用いて、 q_{cx} が求められる。

したがって、長さ L の凝縮面に対する平均熱伝達率は次式より算出される。ただし、 F はすじ流域での補正係数である。

$$\bar{q} = \frac{1}{L} \left\{ \int_0^{X_{crit}} q_{mx} dX + F \int_{X_{crit}}^L q_{cx} dX \right\} \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$\bar{h} = \frac{\bar{q}}{\Delta T} \quad \dots\dots\dots (15)$$

なお、解析にあたって、式(11)中の付着滴離脱後の液膜厚さ δ' 、式(13)中の液膜流の屈曲抵抗係数 f および式(14)中のすじ流域での補正係数 F が未知であるが、ここでは、熱伝達率の実験結果(図5)よりそれらを定めた。

3.3 解析結果および実験結果との比較

図7(a)に、掃除面積率の解析結果の一例 ($\theta=60^\circ$) を温度差をパラメータに示す。離脱流下滴速度についてはVTRによる測定値 ($U_d=0.03$ m/s) を用いた。

離脱流下滴による掃除面積は、凝縮面下方に行くにしたがい広がり、それはまた温度差の増加とともにより拡大している。全凝縮面に対する滴離脱掃除域の割合は、図7(b)に示すように温度差の増加とともに大きくなるが、やがてすじ流域の出現により頭打ちとなり、それ以上の温度差においてはほぼ一定割合となる。

図8に、平均熱流束と温度差との関係についての解析結果の一例を内訳とともに示す。図8中の破線は四塩化炭素純蒸気に対するヌッセルトの理論値を示す。これより、混合気の凝縮熱流束は、温度差 $\Delta T=5$ K 以上において純蒸気 of 値を上回り、掃除域の拡大とともに増加するが、やがてすじ流域の出現により (ΔT

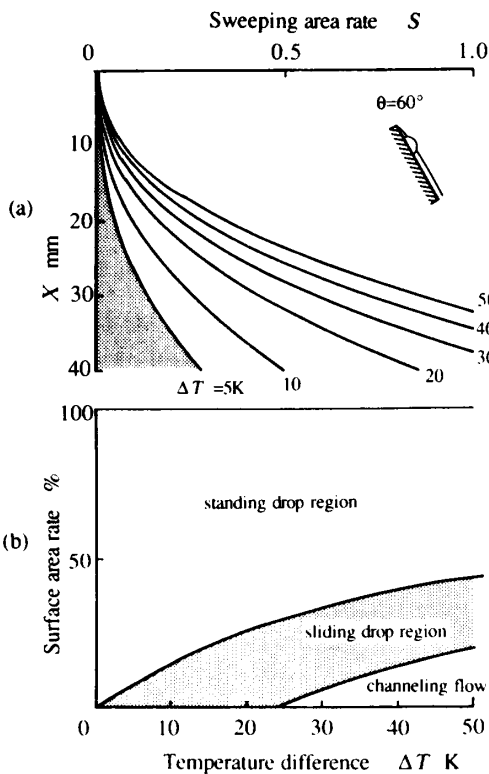


図7 掃除分布と面積割合

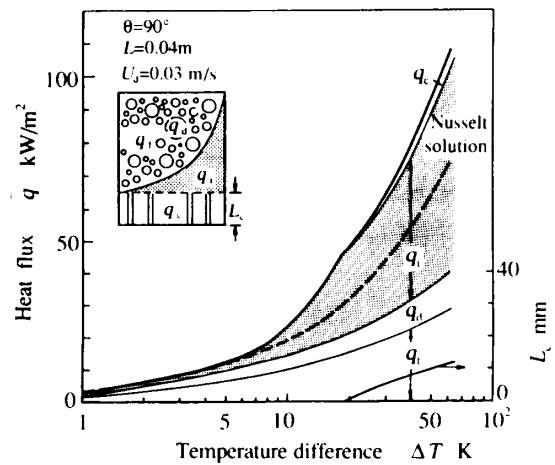


図8 平均熱流束

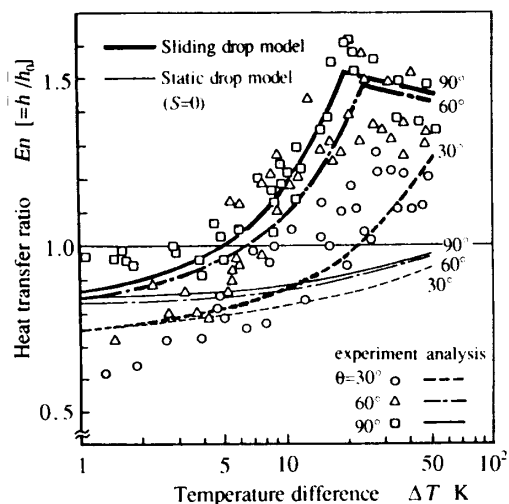


図9 伝達比(理論と実験との比較)

~20 K)その増加の割合は変化し緩慢となることがわかる。

図9に、混合蒸気の平均熱伝達率 \bar{h} を純蒸気の場合の値 \bar{h}_0 (実験値) との比、すなわち伝達比 E_n として表し、本凝縮モデルによる解析結果を実験値と比較して示す。図9中、太い線および細い線はそれぞれ液滴離脱流下モデルおよび滴の離脱を無視した場合 ($S=0$) の解析結果を示す。実験値との比較において、前者の液滴離脱流下モデルがここでの凝縮挙動を良くとらえていることがわかる。すなわち、温度差の増大による付着滴の離脱掃除効果が凝縮熱伝達を促進させるが、離脱頻度が高くなりすじ流が伝熱面を覆うようになると、特性が逆転して伝達比が低下する。なお、未定数 (δ', f, F) については、伝達比のピークをとる温度差から $\delta' = 50 / \sin \theta$ [μm] が、伝達比の大きさから $f = 0.01$ が、また、ピーク後の伝達比の変化から $F = 0.2$ がそれぞれ関係づけられて求められた。これら各値の意味については、さらに詳細な検討を要する。

4. 結 論

2成分不溶性混合冷媒として、共沸組成の四塩化炭素-水系を用いた等温傾斜冷却面上への凝縮伝熱実験を行い、凝縮現象のモデル化のもとで伝熱特性について理論的に解析し、以下の結論を得た。

(1) 2成分不溶性混合冷媒は、有機物の液膜流と水の滴状からなる複合凝縮形態を示し、その付着水滴の個数分布関数 $N(r)$ は、 $r > 0.1 \mu\text{m}$ の範囲において平板傾斜角、温度差および凝縮面上の位置に無関係で、滴半径のみの関数となる。

(2) 動特性としての付着滴の離脱は、有機液膜流によるせん断力により、凝縮面下方ほど滴径が小さくまたその個数も多くなり(周期が短く)、それはまた、傾斜角の増加、さらに温度差の増加に伴いより顕著となる。

(3) 混合蒸気の伝達率は、純蒸気と比較して温度差の小さい場合には純蒸気のものより小さく、温度差が大きい場合には付着滴の離脱性が向上し、その掃除効果により大きくなるが、すじ流への移行とともにピーク値をとった後低下する。その傾向は傾斜角の減少に伴い顕著となる。

(4) 付着滴の離脱による掃除効果を考慮した凝縮モデルが提示され、解析結果と実験との比較によりその妥当性が明らかにされた。

おわりに、本研究は、科学研究費補助金エネルギー重点領域研究「熱エネルギーの超高効率利用のための基礎技術」の分担課題として補助を受けて行われたものであり、謝意を表する。

文 献

- (1) Ogino, F., ほか3名, *Proc. 3rd CAPCCE*, (1984), 165.
- (2) Ogino, F., *FPEY*, **23**(1987), 33.
- (3) Akers, W. W. and Turner, M. M., *AIChE J.*, **8-5**(1962), 587.
- (4) Polley, G. T. and Caults, W. F., *Proc. 6th Int. Heat Transf. Conf.*, **2**(1987), 471.
- (5) Kirkbride, C. G., *Ind. Eng. Chem.*, **25**(1933), 1324.
- (6) Baker, E. M. and Tsao, U., *Ind. Eng. Chem.*, **32-8**(1940), 1115.
- (7) Tobias, M. and Stoppel, A. E., *Ind. Eng. Chem.*, **46-2**(1954), 1450.
- (8) Sykes, J. A. and Marchello, J. M., *Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev.*, **9**(1970), 63.
- (9) 滝本・寺西・羽根田・林, *機論*, **57-535**, B(1991), 1009.
- (10) Rose, J. W., *Int. Heat Mass Transf.*, **19**(1976), 1363.
- (11) Bernhardt, S. H., ほか2名, *Proc. AIChE Symp.*, **68-118**(1972), 21.