

## 水平管群における二成分不溶性混合冷媒の凝縮熱伝達\* (イナnderションの影響とモデル化)

寺西 恒 宣\*<sup>1</sup>, 牧野 智 也\*<sup>2</sup>  
滝本 昭\*<sup>3</sup>, 林 勇二郎\*<sup>3</sup>

### Prediction of Condensation Heat Transfer of Binary Vapors of Immiscible Liquids on Horizontal Tube Banks (Condensation Model)

Tsunenobu TERANISHI, Tomonari MAKINO,  
Akira TAKIMOTO and Yujiro HAYASHI

This work was undertaken experimentally and analytically to acquire a better understanding of condensation heat transfer of binary vapors of immiscible liquids on horizontal tube banks. The characteristics of condensation heat transfer on lower tubes, which received condensates inundated at the upper tube banks, were clarified through detailed experiments using an azeotropic mixture of carbon tetrachloride and water as binary vapors. Due to the combination of the organic immutable behavior and the extreme behavior of water droplets, standing droplets and continuously detaching droplets on the surface, a model of condensation was developed taking into account the sweeping effect and the inundation effect. The predictions obtained using by this model agree well with the experimental results.

**Key Words:** Heat Transfer, Condensation, Azeotropic Refrigerant Mixture, Immiscible Liquids, Horizontal Tubes, Inundation

#### 1. 緒 言

中低位熱エネルギーの有効利用において、低沸点有機系冷媒に水のような優れた熱物性をもつ無機物質を混ぜた二成分不溶性混合冷媒が、熱交換器の熱損失を低減しサイクル効率を改善し得るものとして注目されている<sup>(1)</sup>。しかし、それらは相互不溶性で両者の表面張力に差異があるために、冷却面上で有機物の膜状と水の滴状からなる膜滴混在あるいはすじ状流など複雑な凝縮形態を呈する。したがって、冷媒としての実用化にあたっては、熱物性(静的特性)の優劣のみならずこれら凝縮挙動と関連づけた伝熱特性(動的特性)の解明が必要となる。

著者らは、不溶性混合冷媒の凝縮熱交換器への適用およびそれによる高性能化の追究を目的に、以上の観点から不溶性混合冷媒の凝縮伝熱特性について、操作条件(蒸気組成・温度、冷却面温度、蒸気流速、系圧力)、冷却面(形状、姿勢、寸法、配列、表面構造)および混合蒸気の種類などに関連づけ系統的に追究を行っ

てきた。これまでの成果としては、まず、基本的な凝縮形態と伝熱特性が、平滑冷却平板を対象にした凝縮実験により追究され、凝縮形態の出現条件ならびにそれによる伝熱特性の変化が操作条件の影響を含めて明らかにされた<sup>(2)</sup>。さらに、複合凝縮に対して新たなモデルを提示し、それにより伝熱特性が付着滴の離脱流下による掃除効果を含めて理論的に明らかにされた<sup>(3)(4)</sup>。次いで、冷却面表面構造の影響として高性能凝縮面を模索し、各種フィン付き面を供試した凝縮実験により、フィン付き面上における付着滴の発生・成長・合体および離脱流下の凝縮挙動ならびに伝熱特性が、伝熱促進に対する有効性を含めて明らかにされた<sup>(5)</sup>。以上の平板冷却面に対して得られた基本的知見をもとに、さらに、実用化を目指して実機の構成要素である水平単一円管を対象に、伝熱特性に及ぼす冷却面形状・姿勢の影響が明らかにされた<sup>(6)</sup>。

本報は、以上の単一円管の結果を冷却管群に拡張し、管群ゆえに問題となる上段管からの落下液(イナnderション)による凝縮形態および伝熱性能への影響について理論的・実験的に追究したものである。具体的には、不溶性混合媒体として共沸組成の有機物-水系の混合蒸気を用い、一列五段からなる水平平滑管群上へのイナnderションを伴う複合凝縮の様相観察およ

\* 原稿受付 1996年2月9日。

\*<sup>1</sup> 正員、富山工業高等専門学校 (☎ 939 富山市本郷町13)。

\*<sup>2</sup> 准員、佐藤鉄工(株) (☎ 930 02 富山県中新川郡立山町鉾木220)。

\*<sup>3</sup> 正員、金沢大学工学部 (☎ 920 金沢市小立野2-40-20)。

び熱伝達率の測定を行い、鉛直平滑平板に対する凝縮モデルを拡張適用した理論解析結果と比較検討を行ったものである。なお、イナnderションの影響については、単一冷媒を対象にこれまで数多くの研究<sup>(7)~(9)</sup>が報告されているが、複雑な凝縮形態を呈する二成分不溶性混合冷媒に関する研究ははまだ報告されていない。

記号

- $d$ : 落下滴直径 m
- $d_0$ : 管直径 m
- $E_n$ : 伝達比  $=q/q_0$
- $g$ : 重力の加速度  $m/s^2$
- $h$ : 熱伝達率  $W/(m^2 \cdot K)$
- $K$ : 無次元凝縮液流量 [式(12)]
- $L_H$ : 凝縮潜熱 kJ/kg
- $M$ : 共沸組成割合
- $m$ : 凝縮速度  $kg/(m^2 \cdot s)$
- $N, N(r)$ : 付着滴の個数分布関数 drops/m<sup>2</sup>/m
- $N_2$ : 単位幅あたりの落下滴頻度 part./(m·s)
- $n$ : 管群の構成段数
- $q_0$ : 有機物単成分蒸気の平滑単管上への平均凝縮熱流束(Nusseltの理論値)  $W/m^2$
- $q_x$ : 局所熱流束  $W/m^2$
- $q_{cx}$ : すじ流域における局所熱流束  $W/m^2$
- $q_{mx}$ : 膜混在域における局所熱流束  $W/m^2$
- $r$ : 滴半径 m
- $r_0$ : 管半径 m
- $S$ : 掃除面積率 [式(6)]
- $\Delta T$ : 周囲蒸気と冷却面との温度差 K
- $t_c$ : 付着滴の離脱周期  $m^2 \cdot s/drops$
- $t_{c2}$ : 管下端からの落下周期  $m^2 \cdot s/drops$
- $u, u_d$ : 液膜, 液滴の流下速度 m/s
- $W$ : 円管全幅 m
- $W_s$ : 離脱流下滴による掃除幅 m
- $X_{crit}$ : 管全幅がすじ流域へ遷移する位置 m
- $\Gamma$ : 管片側を流下する2液の総流量 kg/s
- $\delta$ : 液膜厚さ m
- $\theta$ : 管頂部からの角度 rad
- $\lambda$ : 懸垂滴の間隔 m
- $\lambda_f, \lambda_a, \lambda_m$ : 有機物, 水, 混合液の熱伝導率
- $\mu$ : 粘性係数  $pa \cdot s$
- $\rho$ : 密度  $kg/m^3$
- $\sigma$ : 表面張力 N/m
- $\tau_d$ : 液滴表面での液膜流せん断力  $N/m^2$
- $\tau_w$ : 壁面でのせん断力  $N/m^2$

添字

- $A$ : イナnderションの影響を受ける領域
- $B$ : イナnderションの影響を受けない領域
- $c$ : 離脱臨界値
- $d$ : 水(滴)
- $f$ : 有機物(膜)
- $j$ : 最上段管( $j=1$ )からの段数
- $x$ : 管頂部からの距離  $=d_0\theta/2$

2. 実験装置および実験方法

図1に実験装置の概要を示す。装置は、試験部とボイラ部が一体となった本体容器(W 200×D 350×H 600 mm)、復水器、および冷却系、その他測定・観察機器からなる。本体底部のボイラ部から供給された冷媒蒸気は、試験部中央に設置された管群上に凝縮し、管群の最下段管直下に置かれた受皿に回収され、計量ガラス管で測定された後、ボイラ部に戻る。一方、余剰蒸気は、本体上部から全縮器を経てボイラに回収される。管群は、寸法が外径 16 mm 内径 12 mm の黄銅製の平滑管を中心間距離 32 mm で鉛直一列に配列したものである。試験円管は、低温恒温槽からのブライン循環による冷却系とパイプチューブで接続されており、循環経路の切換えにより冷却本数(単管から五段管まで)を任意に設定可能となっている。また、試験円管には、凝縮部の長さ(100 mm)を固定し凝縮液流量を正確に測定するために、厚さ 10 mm のテフロン板が両側に取付けられており、このテフロン板と円管とのすきま部に表面温度の測定のための C-C 熱電対が、管頂部から 90° ごとの位置に設置されている。また、各段管の両側の水平方向に 20 mm 離れた位置に周囲蒸気温度の測定用の熱電対が合計 10 箇所に設置されている。なお、管群凝縮熱伝達率を評価する際

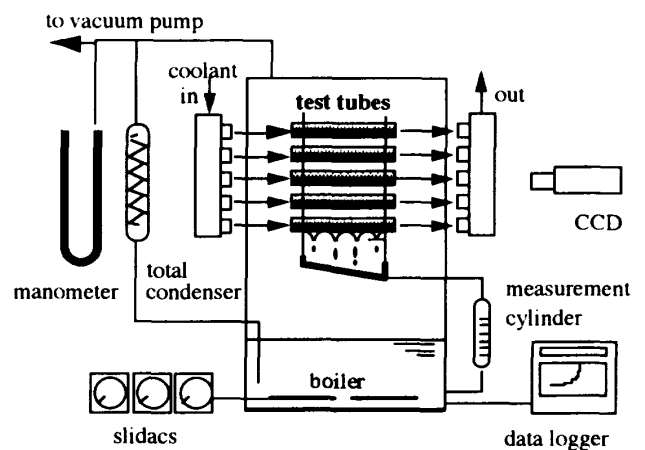


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

の代表温度としてはこれらの平均値が用いられた。

実験は、供試冷媒として四塩化炭素-水の共沸組成混合蒸気( $M_a=3.83$  mass%)を用い、圧力一定(1 atm)、周囲蒸気-冷却面温度差  $\Delta T$  (以後、温度差と称する)を2~50 Kの範囲で種々変化させ、定常状態のもと VTR による管群上の凝縮形態の観察および凝縮量の経時変化の測定(精度 $\pm 0.01$  cc/s)を行ったものである。実験中の容器内の空気残存量および蒸気組成については、ガスクロマトグラフにより常時モニタされ、また、試験円管表面は、実験ごとにアセトンにより脱脂処理した後、四塩化炭素液で十分なじませて供試した。なお、本研究で用いられた有機媒体の一つとしての四塩化炭素については、現在、特定フロンと同様に1996年以降全廃することとされているが、共沸組成における水含有割合が有機系媒体の中でも比較的大きく不溶性の特徴的な現象を観察しやすいこと・価格的に安価であることから使用したものであり、その使用・取扱いにあたってはリークも含めて十分に注意を払った。

### 3. 実験結果

**3.1 凝縮の様相** 水平平滑管群上への二成分不溶性混合蒸気の凝縮の様相を図2にスケッチで示す。凝縮形態は、基本的にこれまで報告してきたように、壁面に滴状に付着する水滴(以後付着滴とする)とそのまわりを膜状に流下する有機液膜からなる膜滴混在を基本とするが、円管面上では付着滴に作用する重力、付着力および液膜せん断力のバランスから、傾斜の緩い管頂部近傍では大きい付着滴が数多く定在する

膜滴混在域を、また、傾斜角の大きい管下面側では付着滴の離脱性が向上するため両者ともにすじ状に流れるすじ流域を形成する。さらに、このすじ流域は温度差  $\Delta T$  の増加、すなわち凝縮速度の増加とともに管下端部から管頂部へ拡大する傾向を示す。また、管下端部では、付着力の強い水滴が温度差に依存せずほぼ一定の間隔で懸垂し周期的に離脱落下し、有機液は懸垂水滴を覆いそれをつたってより高い頻度で離脱落下する。これらの落下滴(インアンデーション)は、下段管の凝縮形態に影響を及ぼし、管頂部付近に停滞する付着滴の離脱性を誘起しすじ流域を拡大する。これらの傾向は、温度差の増加および下段管ほどより顕著となる。

VTR の画像解析より求めた管群各段における管下端部での懸垂滴の間隔  $\lambda$  および円管単位長さ当たりの落下滴の頻度  $N_2$  の結果をそれぞれ図3(a), (b)に示す。まず、混合蒸気の懸垂滴間隔は、図3(a)に破線で示す単成分蒸気<sup>(8)</sup>とほぼ同程度の値をとる。しかし、 $\lambda$ の管群位置に対する変化は、一定値をとる

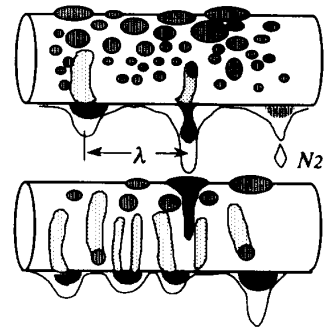
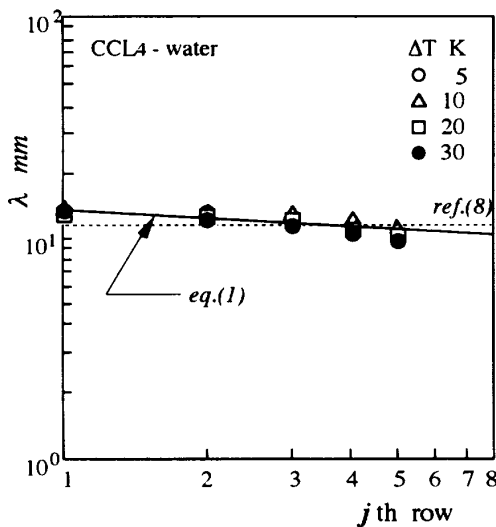
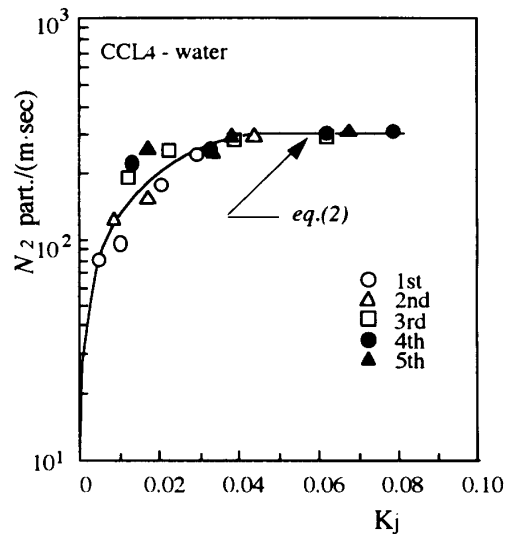


Fig. 2 Sketch of condensation of binary vapors



(a) Distance between hanging droplets



(b) Frequency of falling droplets

Fig. 3 Characteristics of falling droplets

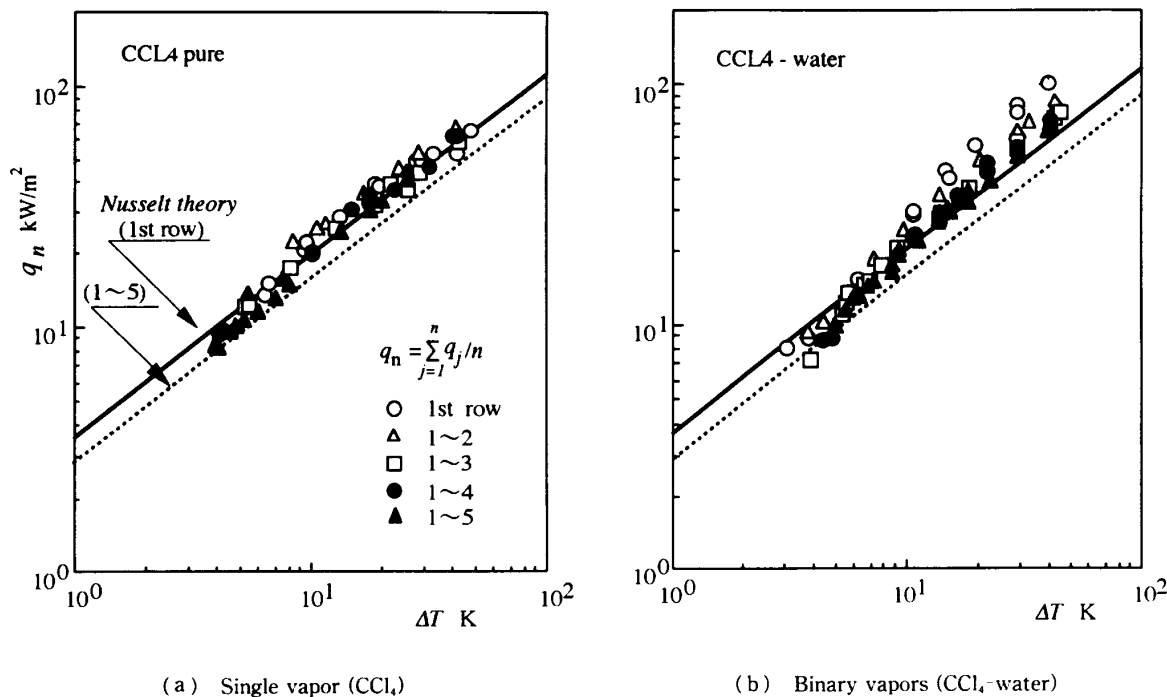


Fig. 4 Experimental results of average heat flux

単成分蒸気に対して混合蒸気では液の落下が管下端部に懸垂する水滴支配となるため、下段管へ行くほど小さくなる傾向を示す。また、懸垂滴間隔  $\lambda$  は、温度差に無関係に管段数  $j$  のみの関係として次の実験式で表される。

$$\lambda = 13.43 \times 10^{-3} j^{-0.128} \dots\dots\dots (1)$$

次いで、落下滴頻度  $N_2$  については、凝縮液流量が大きくなる高温度差の場合および下段管へ行くほど大きくなるが、図 3(b) に示すように無次元凝縮液流量  $K$  [式(12)]<sup>(6)</sup> のみの関数として表され、本実験範囲では次式で近似される。

$$N_2 = 2480 K^{0.658} \quad (K \leq 0.04)$$

$$N_2 = 2.98 \times 10^3 \quad (K > 0.04) \dots\dots\dots (2)$$

**3・2 管群熱伝達率** 図 4(a), (b) に、単成分蒸気および二成分混合蒸気の場合の管群平均熱流束の結果を示す。図 4 中の実線および破線は、単管および五段管群に対する単成分蒸気の膜状凝縮を仮定したヌッセルトのイナンデーション理論<sup>(7)</sup> により求めた解析値である。図 4(a) の単成分蒸気の場合、管群(二~五段)の熱流束は○印で示す第一段管に比してイナンデーションによる被覆作用(液膜の厚膜化)のため、段数の増加とともに低下する傾向を示す。解析値との比較において、実験値は若干大きいもののほぼ一致しているといえる。一方、図 4(b) の混合蒸気の場合、第一段管の結果は単成分蒸気のものに比べて、低温度差では同程度であるが温度差の増加に伴い ( $\Delta T > 10$  K)、伝熱促進されることがわかる。このことは前報<sup>(6)</sup> で

述べたように、低温度差では付着滴の離脱頻度が小さく、それが熱抵抗のみならず有機液膜流の流動抵抗となるため、混合冷媒による伝熱促進の効果がほとんど現れないのに対して、高温度差では付着滴の離脱頻度が高くなり、それによる掃除効果により熱流束の著しい促進をもたらすことによる。管群(二~五段)の結果も不溶性のために生ずる凝縮形態に基づく付着滴の掃除効果により、単成分蒸気に対してより高い熱流束を示す。しかし、イナンデーションによる影響は、凝縮液の厚膜化のほかに付着滴の離脱流下によるすじ流域の拡大のため、段数の増加による熱流束の低下の度合いが大きいものとなっている。

4. 管群凝縮伝熱特性のシミュレーション

**4・1 凝縮モデル** 以上の観察および実験結果に基づき、平滑平板に対して前報で提示した二成分不溶性混合蒸気の凝縮モデル<sup>(4)</sup> を水平管群へ拡張適用し、伝熱特性について解析を行う。モデル化のポイントは、初生-成長-離脱を周期的に繰返す水の付着滴と膜状に流れる有機液膜からなる非定常な凝縮形態を、図 5 に示すように管頂部から  $X_{crit}$  までの膜滴混在域と  $X_{crit}$  から管下端部までのすじ流域からなるものとし、前者をさらに付着滴の離脱のない液滴静止域と離脱により恒常的に薄膜のみに覆われる滴離脱掃除域の計 3 領域からなる定常凝縮として取扱うところにある。

イナンデーションの影響を受ける二段管以降につい

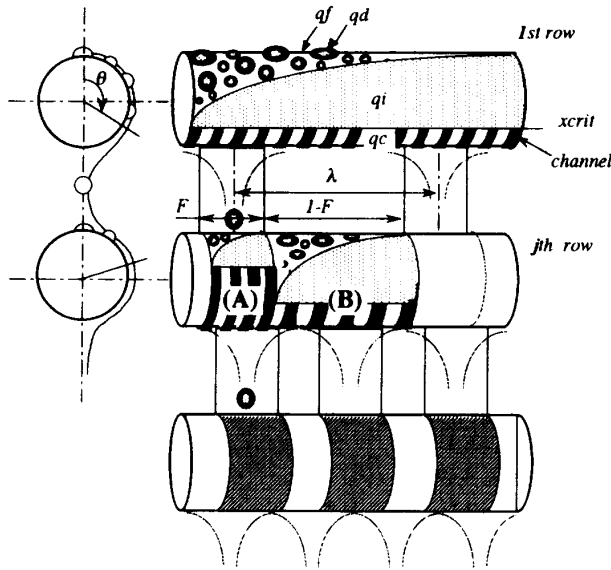


Fig. 5 Physical model for condensation of binary vapors

ては、落下滴としての水は直径  $d$  の滴状で周期的に落下し下段管で水平方向へ広がり、有機物はシート状に連続的に落下するものとし、また、落下途中における滴およびシートと周囲流体間の熱の出入りはなく、すべて下段管に捕獲され飛散しないものと仮定する。これより、二段管以降では、上述の3領域に加えて図5に示すように、イナデーションの影響を受ける領域A(単位幅当たりの割合を  $F_j$ )と影響を受けない領域Bとに分けて取扱われ、 $F_j$ を温度差や管の位置( $j$ 段め)により定まる凝縮液流量  $K_j$ の関数として与えることにより、 $j$ 段めの円管における平均熱流束および平均熱伝達率が次式より求められる。

$$q_j = F_j q_{Aj} + (1 - F_j) q_{Bj} \dots\dots\dots (3)$$

$$h_j = q_j / \Delta T \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $q_A, q_B$ は領域AおよびBにおける平均熱流束であり、それぞれの領域における膜滴混在域とすじ流域の平均として次式で表される。

$$q_k = \frac{1}{L} \left( \int_0^{X_{crit}} q_{mx} dX + C_{ch} \int_{X_{crit}}^L q_{cx} dX \right) \quad (k=A \text{ or } B) \dots\dots\dots (5)$$

式中  $X_{crit}$ は円管全幅  $W$ が膜滴混在域からすじ流域へと遷移する位置であり、前報<sup>(3)</sup>で求めたと同様に、直径  $d_0$ (半周長さ  $L = \pi d_0 / 2$ )の管頂部からの位置  $X = d_0 \theta / 2$ での滴の離脱流下による掃除面積率を  $S$ とすると、 $S=1$ として求められる。

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

$$W_s(X) = \frac{X}{U_d} \int_0^X \frac{2r_c W}{t_c} dX \dots\dots\dots (7)$$

ここで、離脱臨界半径  $r_c$ は前報<sup>(3)</sup>で示した傾斜冷却

平板上での付着滴の離脱条件と同様に、付着滴に働く重力、浮力および液膜せん断力と付着力とのバランスから次式で与えられる。ただし、有機液膜については冷却円管上へのNusseltの膜状凝縮理論を適用し、単一水平円管上で行った前報<sup>(6)</sup>の図3に示す実験結果から  $C_A=4.0, C_B=4.8$ が求められる。

$$r_c \geq \left\{ \frac{C_A}{\sin \theta} - C_B [\Delta T r_0 Z(\theta)]^{1/2} \right\}^{1/2} \times 10^{-3} \dots\dots\dots (8)$$

$$Z(\theta) = \left[ \frac{4}{3} \int_0^\theta (\sin \theta)^{1/3} d\theta + (j-1) \frac{4}{3} \int_0^\pi (\sin \theta)^{1/3} d\theta \right] / (\sin \theta)^{4/3} \dots\dots\dots (9)$$

また離脱周期  $t_c$ は、イナデーションの影響を受けない部分では、同実験結果<sup>(6)</sup>から、離脱頻度がピークを示す角度を  $\theta'$ とすると次式で与えられる。

$$t_c = 1 / [8.9 \Delta T^{1.43} (6.5 \times 10^{-2} + 0.75 \theta' + 1.18 \theta'^2 - 1.01 \theta'^3)] \quad \theta' = \theta / (1.8 \Delta T^{-0.08}) \dots\dots\dots (10)$$

ただし、二段め以降において落下滴の影響を受ける部分を  $0 \leq X \leq d/2$ とし、その範囲における離脱周期は、前述した落下滴頻度の実験結果[式(2)]の逆数で与えられる次式(11)と式(10)との大きいほうの値で与えられるものとする。

$$t_{c2} = 1 / (2480 K_j^{0.658}) \dots\dots\dots (11)$$

$K_j$ は次式で定義される無次元凝縮液流量である。

$$K_j = \Gamma_j (g / \rho_L)^{1/4} \sigma^{3/4} \dots\dots\dots (12)$$

$\Gamma_j$ は  $j$ 段めの管の片側を流下する2液の総流量であり、円管の片側を通過する熱量  $Q_j$ より次式で与えられる。

$$\Gamma_j = \sum_{i=1}^j \frac{Q_j}{L_{Hf} + (m_a / m_f) L_{Hd}} \dots\dots\dots (13)$$

また、円管に付着している滴の個数分布  $N(r)$ は、冷却平板の実験結果から温度差、円管上での位置および円管の大きさに無関係に次式で与えられるものとする。

$$N(r) = 25.6 r^{-2.14} \dots\dots\dots (14)$$

さらに、各領域A, Bにおける膜滴混在域およびすじ流域の熱流束  $q_{mx}, q_{cx}$ はそれぞれ次のように表される。

$$q_{mx} = m_f L_{Hf} + m_a L_{Hd} \left( 1 - S - \sum_{r_i=\delta}^{r_c} N \pi r_i^2 \right) q_f + (1 - S) \sum_{r_i=\delta}^{r_c} N \pi r_i^2 q_a + S q_i \dots\dots\dots (15)$$

$$q_{cx} = \frac{\Delta T (M_f L_{Hf} + M_a L_{Hd})}{M_f L_{Hf} / h_f + M_a L_{Hd} / h_a} \dots\dots\dots (16)$$

$m$ は凝縮速度 ( $m_f / m_a = M_f / M_a$ )、 $q_f, q_a$ および  $q_i$ は、

有機液膜、付着滴および掃除後の薄膜を通過する熱流束であり次式で表される ( $\delta'$  は付着滴離脱後の液膜厚さである)。

$$q_f = \Delta T \lambda_f / \delta(X) \quad \dots\dots\dots (17)$$

$$q_d = 3 \Delta T \lambda d / 2r \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$q_i = \Delta T \lambda_m / \delta' \quad \dots\dots\dots (19)$$

また、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。

$$m_f = \left(1 - S - \sum_{r_i=\delta}^{r_c} N \pi r_i^2\right) \rho_f \left(u \frac{d\delta}{dX} + \delta \frac{du}{dX}\right) \quad \dots\dots\dots (20)$$

$$\begin{aligned} &g(\rho_f - \rho_v) \delta \left(1 - S - \sum_{r_i=\delta}^{r_c} N \pi r_i^2\right) \sin \theta \\ &= \tau_w \left(1 - S - \sum_{r_i=\delta}^{r_c} N \pi r_i^2\right) + \tau_d (1 - S) \sum_{r_i=\delta}^{r_c} 2N \pi r_i \delta \\ &+ C_f (1 - S) \sum_{r_i=\delta}^{r_c} 2N r_i \delta u^2 \quad \dots\dots\dots (21) \end{aligned}$$

$\tau_w, \tau_d$  は冷却面および付着滴表面のせん断力 ( $\sim \mu u / \delta$ ),  $C_f$  は付着滴による液膜流の屈曲抵抗係数である。

以上の式(6)~(21)を数値積分することにより、液膜厚さ  $\delta$  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 Nusselt の理論解 ( $h_f, h_d$ ) を用いて  $q_{cx}$  が求められ、さらに、イナundationの影響を受ける領域 A と受けない領域 B それぞれの平均熱流束  $q_A, q_B$  が算出される。なお、 $F_j$  値は最上段管では  $F_1 = 0$ 、二段め以降の各管では次式で与えられる。

$$F_j = \frac{C_2 d}{\lambda} \quad \dots\dots\dots (22)$$

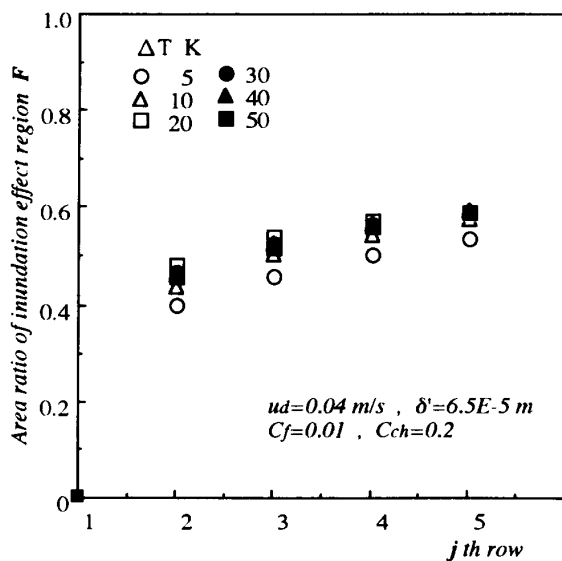


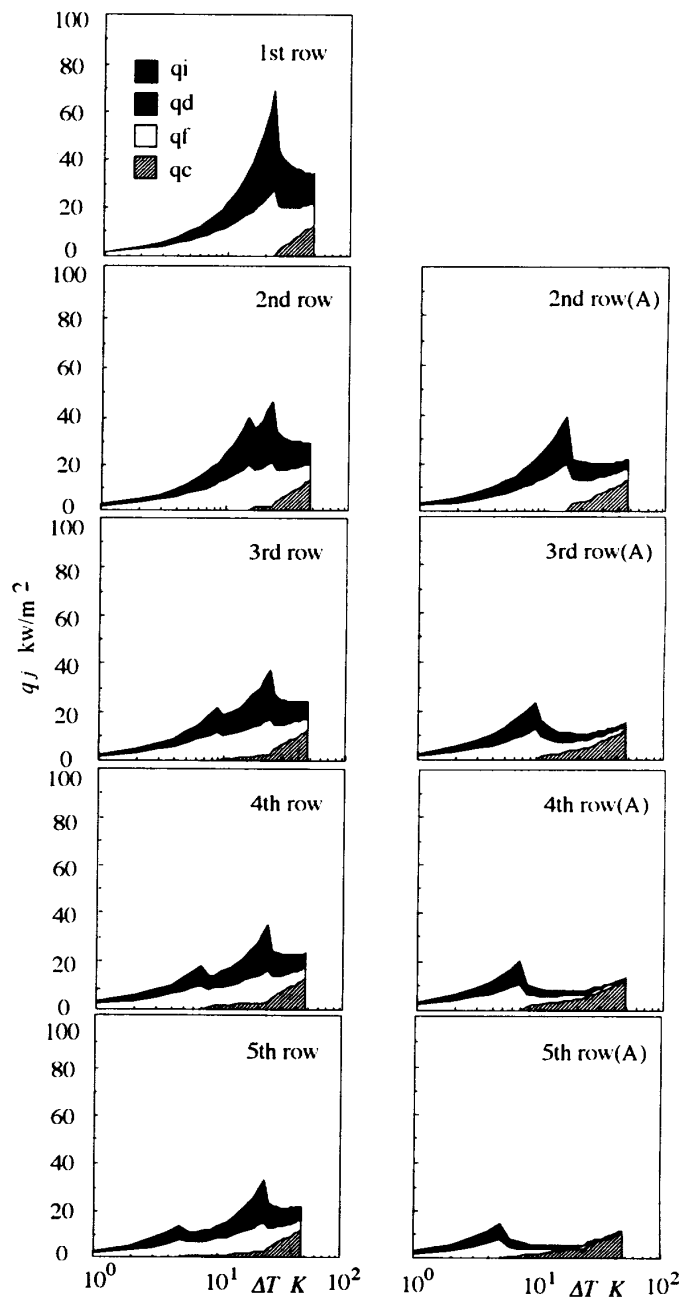
Fig. 6 Analytical results of area ratio of inundation effect region

$$d = 2 \left( \frac{3v}{4\pi} \right)^{1/3} \quad \dots\dots\dots (23)$$

$$v = \frac{2\Gamma_j}{\rho N_2} \quad \dots\dots\dots (24)$$

ここで、 $C_2$  は落下滴の水平方向への広がり係数である。

4.2 シミュレーション結果 管群への混合蒸気の凝縮熱伝達について、離脱滴速度  $u_d = 0.04$  m/s、付着滴離脱後の液膜厚さ  $\delta' = 6 \times 10^{-5}$  m、液膜流の屈曲抵抗係数  $C_f = 0.015$  およびすじ流域での補正係数を  $C_{ch} = 0.2$  として求めたシミュレーション結果を以下



(a) Whole surface of tube (b) Inundation region  
Fig. 7 Analytical results of heat flux at each row of tube bundle

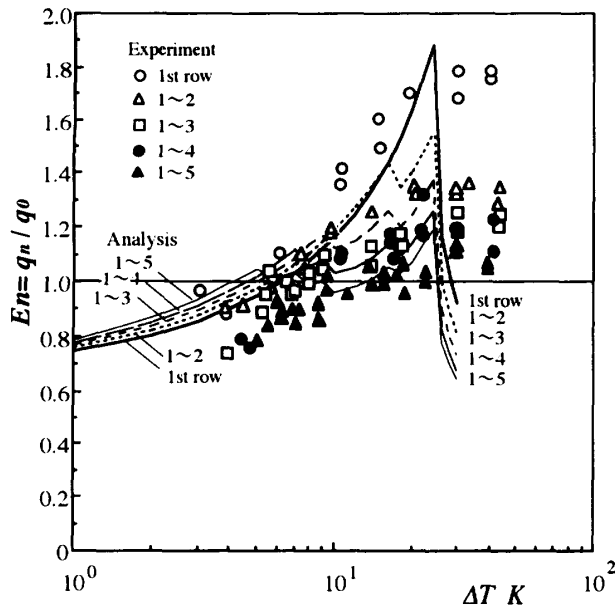


Fig. 8 Comparison of experimental results with analytical results of heat transfer ratio

に示す。ただし、これらの数値は結果的に実験値との比較により求められたものであるが、物理的には離脱滴速度  $u_d$  は付着水滴が壁面を離脱し冷却面上を流下する速度を、液膜厚さ  $\delta'$  は水滴の離脱直後の有機液膜の厚さを、液膜流の屈曲抵抗係数  $C_f$  は水滴が付着している冷却面上を流れる有機液膜流に対する流動抵抗係数を、およびすじ流域での補正係数  $C_{ch}$  は水および有機物ともすじ状に流下する際の相互干渉に関する補正值をそれぞれ意味するものであり、これら各値の妥当性については、さらに詳細な測定と検討が必要と考えている。

図6に、イナnderションの影響を受ける領域割合  $F_j$  についての解析結果を示す。式(22)中の水の落下滴の水平方向への広がり係数は観察結果から  $C_2=1.5$  とした。イナnderションの影響を受ける領域は40~60%程度の値を示し、温度差が大きくと下段管へ行くほど増加する傾向を示す。

図7(a), (b)に、管群各段ごとの平均熱流束  $q_j$  [式(3)] および同じくイナnderションの影響を受ける領域Aのみを対象とした平均熱流束 [式(3)右辺第1項] の解析結果を示す。図7中の網掛けは熱流束の内訳を意味し、 $q_a$  は膜滴混在域の付着滴を、 $q_f$  は膜滴混在域の液膜を、 $q_i$  は滴離脱掃除域をおよび  $q_c$  はすじ流域の平均熱流束をそれぞれ表す。図7(a)に示すように熱流束は、冷却管上に出現する凝縮形態と関係し、温度差の増加とともに膜滴混在が支配的な状態 ( $q_a+q_f$ ) から、付着滴の離脱流下の掃除効果  $q_i$  により増加しピーク値をとった後、すじ流域の拡大  $q_c$

により低下し、さらに、それは下段管ほど全体的に小さくなることがわかる。また、二段管以降では、熱流束は二つのピーク値を有しているが、これは、図7(b)のイナnderション域の熱流束の結果との比較より、低温度差側のピークが領域Aでのすじ流状態への移行を、高温度差側が領域Bでのものに対応することがわかる。

図8に、 $n$ 段からなる管群の平均熱流束  $q_n$  を単管における単成分蒸気の膜状凝縮の理論値  $q_0$  との比、すなわち伝達比  $E_n$  として表し、解析結果と実験値と比較して示す。伝達比の解析結果は、これまで述べてきたようにイナnderションの影響により付着滴の離脱が促進されすじ流への移行が早まる結果、より小さな温度差で最大となり、管段数の増加に伴い全般的に低下する傾向を示す。また、管段数が増加するにつれて、各段ごとのピークが相互に干渉し、総合的に伝達比のピークが幾重にも出現している。実験結果との比較においては、実験値はこのようなピークが顕著に現れておらず、また温度差が小さな範囲 ( $\Delta T < 5$  K) での比較は困難であるが、有機物の液膜流と付着滴の定在や離脱が相互に干渉する複雑な凝縮現象をイナnderションの影響も含めてモデル化した本シミュレーション結果は、滴の掃除効果による熱伝達率の促進やすじ流状態の拡大による熱伝達率の低下など実験結果と傾向的にほぼよく一致しており、これより本モデルの妥当性が明らかといえる。

## 5. 結 論

二成分不溶性混合冷媒の水平管群上への凝縮熱伝達について実験的・理論的に検討を行い、以下の結果を得た。

(1) 水平に置かれた平滑五段管群上への四塩化炭素-水系共沸組成混合蒸気の凝縮実験を行い、有機物の膜状と水の滴状凝縮からなる複合凝縮形態、および熱伝達特性に及ぼすイナnderションの影響が明らかにされた。

(2) 凝縮様相の詳細な観察に基づきイナnderションの影響を含めた管群上での凝縮モデルが提案され、実験結果との比較検討により、モデルの妥当性が確認された。しかしながら、シミュレーションにおいて用いた実験式の適用範囲ならびに種々の未知数の代入、ならびに実験における測定精度などの問題点が残されており今後さらなる検討が必要といえる。

## 文 献

- (1) Ogino, F., *SPEY*, 23(1987), 33-39.

- (2) 滝本昭・寺西恒宣・羽根田完爾・林勇二郎, 機論, 57-535, B(1991), 1009-1013.
- (3) 林勇二郎・寺西恒宣・滝本昭・羽根田完爾, 機論, 58-545, B(1992), 199-204.
- (4) 滝本昭・寺西恒宣・松田達也・林勇二郎, 機論, 58-545, B(1992), 205-210.
- (5) 寺西恒宣・滝本昭・高橋信哉・林勇二郎, 機論, 58-554, B(1992), 3123-3127.
- (6) 寺西恒宣・滝本昭・林勇二郎, 機論, 60-575, B(1994), 2479-2484.
- (7) 藤井哲・小田鶴介, 機論, 50-452, B(1984), 1062-1066.
- (8) 本田博・野津滋・武田泰仁, 機論, 53-488, B(1987), 1320-1328.
- (9) 斉藤真秀・棚沢一郎, 機論, 53-488, B(1987), 1270-1275.
-