

## 2成分不溶性混合冷媒の凝縮熱伝達\*

(フィン付き面による伝熱促進)

寺西 恒 宣\*<sup>1</sup>, 滝 本 昭\*<sup>2</sup>  
高橋 信 哉\*<sup>3</sup>, 林 勇二郎\*<sup>2</sup>

### Condensation Heat Transfer of Binary Vapors of Immiscible Liquids on Vertical Plates with Enhanced Fins

Tsunenobu TERANISHI, Akira TAKIMOTO,  
Nobuya TAKAHASHI and Yujiro HAYASHI

In order to pursue the enhancement of condensation heat transfer of binary vapors of immiscible liquids, detailed experiments have been conducted with regard to the condensation of an azeotropic mixture of carbon tetrachloride and water on vertical flat plates with enhanced fins. The condensation mechanism of this kind of vapor on finned surfaces was clarified through measurements of the droplets departure frequency and heat transfer rates. The experimental results indicate that finned surfaces are more effective in the enhancement of condensation heat transfer of binary vapors of immiscible liquids, and that an optimum configuration and dimensions of fins exist.

**Key Words:** Thermal Engineering, Condensation Heat Transfer, Binary Vapors, Immiscible Liquids, Azeotropic Mixture, Enhanced Fin

#### 1. 結 言

中低位熱エネルギーの有効利用は、ランキンサイクルによる発電とヒートポンプによる昇温が考えられるが、これらのサイクルに用いられる有機系の冷媒では、凝縮(蒸発)温度と外部熱源温度の差が小さくなりサイクル効率が低くなる難点がある。現在、この改善を目的とした混合冷媒の実用化が進められているが、有機系の冷媒に水などを付加して物性を向上させる方策もその一環にある<sup>(1)(2)</sup>。しかし、これは相互に不溶性であるために、冷却面上では有機物の膜状と水の滴状凝縮からなる膜滴混在、あるいは両者ともに流下するすじ状など極めて複雑な凝縮形態を呈し、伝熱特性はそれらの動挙動に強く依存する<sup>(3)(4)</sup>。

著者らは、これまでに、平滑な表面を有する冷却平板上への凝縮実験と理論解析を、共沸および非共沸の蒸気組成、蒸気-壁面の温度差(以後、簡単に温度差とする)、平板姿勢(鉛直、傾斜)などの影響を含めて行い、複合凝縮の挙動ならびに熱伝達特性を追究してき

た<sup>(5)(7)</sup>。それより、2成分の蒸気が同時に凝縮するときの熱伝達は、温度差や伝熱面の幾何形状(寸法、姿勢)などの条件によって定まる複合凝縮のあり方に強く依存することが明らかとなった。すなわち、温度差が小さく凝縮量が少ない場合には、壁面に付着した水滴が熱抵抗となるばかりか有機液膜流の流動抵抗となるため、有機物単成分より小さいか同程度の熱伝達となる。温度差の増加により凝縮量が多くなると、付着滴の離脱頻度が増しその掃除効果により熱伝達が単成分に比して2倍近くまで促進される。しかし、それも有機物と水からなるすじ流への移行とともに液膜抵抗が増大し、熱伝達率が低下する結果となった。

本報は、平滑面に対する以上の結果を踏まえて、不溶性混合冷媒の凝縮に対する高性能伝熱面を模索し、その促進機構を追究する。具体的には、単成分に対して有効とされるフィン付き冷却面を導入し、付着滴の離脱や有機液膜流の排除の効果、ならびにそれによる熱伝達率の向上を実験的に確認したものである。なお、実験には共沸組成の四塩化炭素-水の混合蒸気を用い、冷却面には形状と寸法の異なる各種フィン面が供試された。

\* 平成3年5月30日 第28回日本伝熱シンポジウムにおいて講演、原稿受付 平成4年3月19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> 正員、金沢大学工学部 (〒920 金沢市小立野2-40-20)。

<sup>3</sup> 准員、三菱電機(株) (〒661 尼崎市塚口本町8-1-1)。

2. 実験装置および方法

実験装置の概要を図1に示す。装置は前報<sup>(5)</sup>で用いたものと同様であり、鉛直フィン付き冷却平板(W 40×L 80 mm)を内蔵した本体容器、ボイラ、復水器および測定計器類からなる。実験は、1 atmのもとで共沸組成の四塩化炭素-水系( $W_{1E}=3.83\text{mass}\%$ )の混合蒸気を各種形状・寸法のフィン付き冷却平板へ凝縮させ、周囲蒸気-凝縮面温度差  $\Delta T$  を種々変化させ

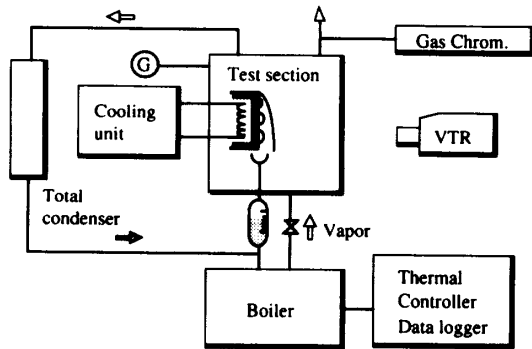
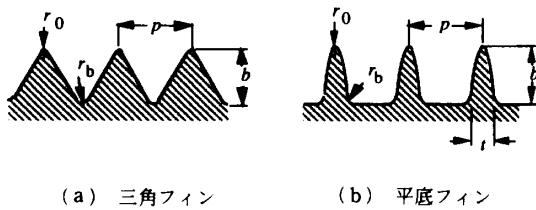


図1 実験装置概要



(a) 三角フィン (b) 平底フィン

図2 フィン形状

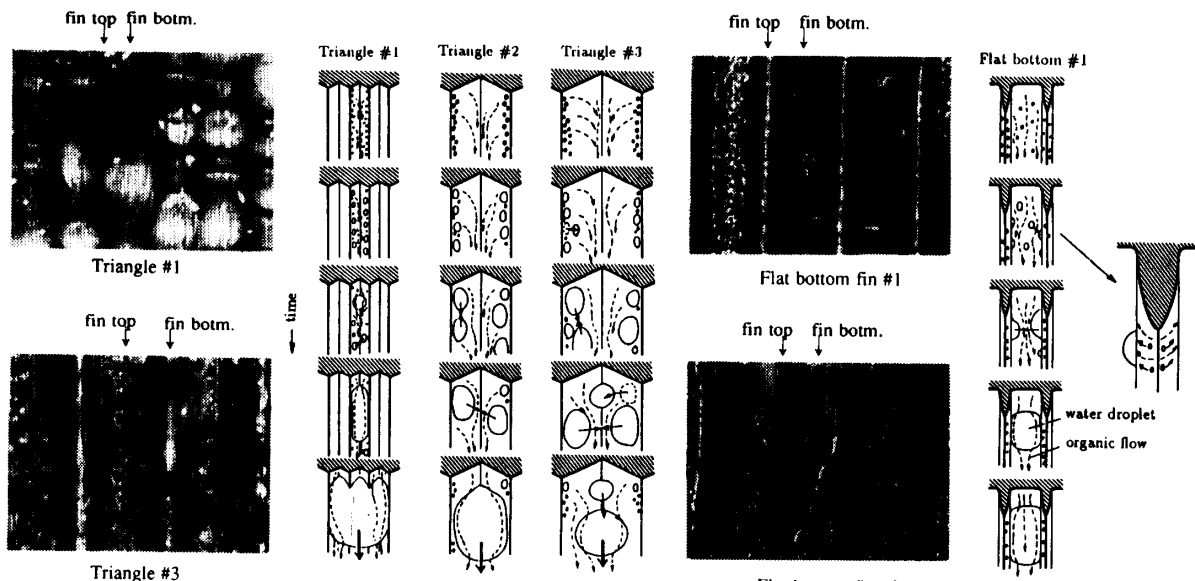
定常状態のもとで、凝縮量の経時変化の測定と凝縮様相の観察をVTRあるいはカメラにより行ったものである。供試フィンには、従来の高性能凝縮面を一つの候補と考え、図2および表1に示すように、黄銅製で機械加工した三角形フィンとワイヤ放電加工した平底フィン<sup>(6)</sup>の2タイプ6種類を供試した。なお、各タイプは主としてフィンピッチ  $p$  をパラメータとしているが、仕上加工の差異(油砥石、電解研磨)により表面粗さも若干異なっている。

3. 実験結果および考察

3.1 凝縮形態 図3に、フィン付き面上での2成分不溶性混合蒸気の凝縮形態の観察写真をスケッチとともに示す。図3(a)は三角形フィン、図3(b)は平底フィンの場合であり、いずれにおける凝縮も平滑面の場合と同様、壁面に沿って流下する有機液膜と壁面に付着する水滴の共存を基本とするが、表面構造全体とのかかわりのもとで観察すると次のようである。まず、液膜流については、フィン先端部で凝縮した有機液は表面張力による圧力差のため先端部(凸部)から溝

表1 フィン寸法 (mm 単位)

	Triangle fin				Flat bottom fin	
	#1	#2	#3	#4	#1	#2
Fin pitch, $p$	1.4	2.5	3.7	5.0	2.5	5.0
Fin height, $b$	1.0	2.0	3.0	4.0	1.8	2.0
Fin thk. at botm, $t$	-	-	-	-	0.4	1.0
Fin tip radius, $r_0$	0.03	0.03	0.03	0.1	0.05	0.2
Fin bot. radius, $r_b$	0.25	0.25	0.25	0.25	0.4	0.25
Roughness, $R_{max}(\mu\text{m})$	2.19	2.19	2.19	8.09	12.57	12.57
Area ratio (-)	1.80	1.90	1.98	1.90	2.21	1.54



(a) 三角形フィン (b) 平底フィン

図3 フィン付き面上での凝縮形態

部(凹部)への速度成分が生じ、フィン側面を斜めに横切ったあと溝底部を下方に流れ落ちる。すなわち、液膜流の挙動は基本的には単成分の場合と同じである。他方、凝縮水滴は、先端部から少し離れたフィン側面で安定に付着して成長する。やがて相対するフィン側面の滴同士は干渉により合体して溝部を覆い、さらに成長してある大ききになると溝部に沿って離脱流下し、凝縮面を更新する。なお、小さな曲率をもち薄い液膜で覆われるフィン先端部や、厚くて早い有機液膜流を伴う溝底部付近では水滴の付着・成長は見られない。

以上、フィン付き面上での凝縮は、フィン側面では付着水滴と薄い有機液膜流とからなる膜滴混在の形態をとるのに対して、溝部では両者が入り乱れて離脱・流下する複合流となり、後者の挙動はフィンの幾何形状・寸法に強く依存すると言える。例えば、図3(b)に

示すピッチの大きい平底フィンではフィン側面に付着する水滴同士の干渉はなく、離脱した水滴は溝部を埋めることなく、縦横比がほぼ2:1のだ円形状を維持して流下する。しかし、ピッチが小さくなると、これらの水滴はフィン間に拘束され縦横比が大ききものとなり、間隔が最も小さい三角形フィン#1では、フィンをもたがって合体・成長した水滴が壁面を離脱・流下する。

次に、水滴がフィン付き面から離脱・流下するときの滴径および頻度をビデオ画像より求め、その結果について述べる。図4は、離脱時の水滴の幅  $d'$  とフィンピッチとの関係を示したものである。フィンピッチが約2.5 mm 以下の小さい範囲では、滴がフィン間に拘束されるが、ピッチの増加とともにピッチに無関係に一定値を示していることがわかる。

図5(a)に、凝縮面各位置での付着滴の離脱頻度  $N$  の結果について温度差  $\Delta T = 20$  K の場合を例に示す。離脱頻度は、冷却面を鉛直方向に10 mm 間隔で8等

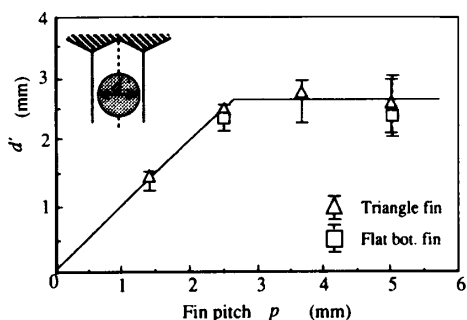
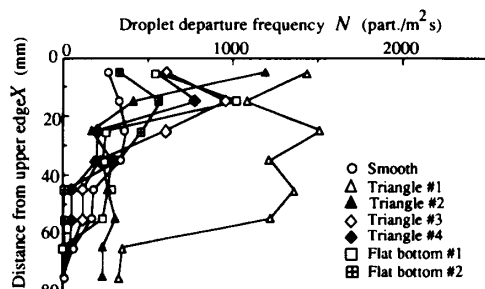
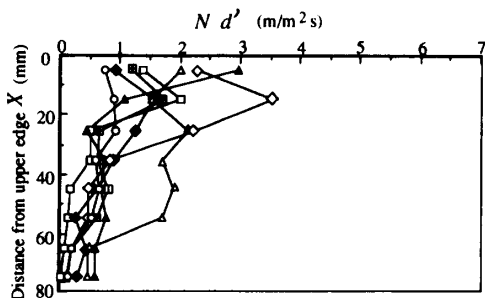


図4 付着水滴の離脱時の幅

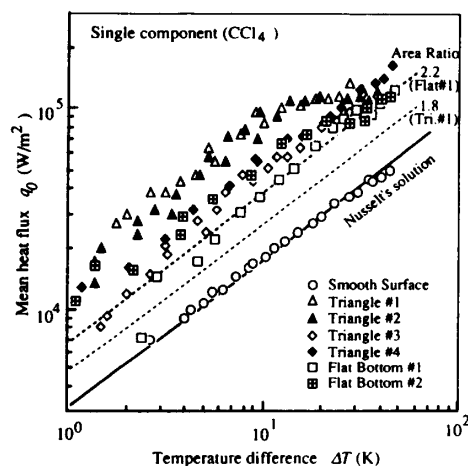


(a) 離脱頻度

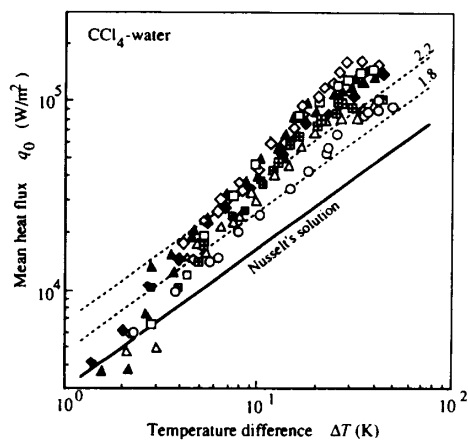


(b) 掃除速度

図5 付着滴の離脱



(a) 単成分蒸気



(b) 混合蒸気

図6 平均熱流束

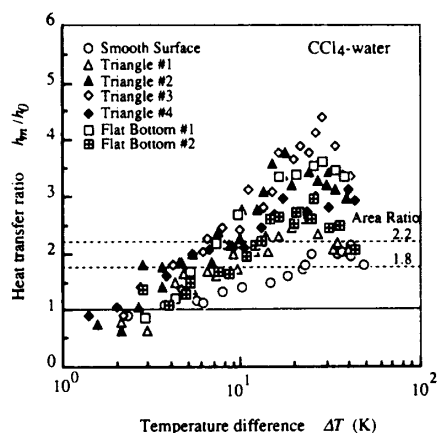


図7 伝達比と温度差

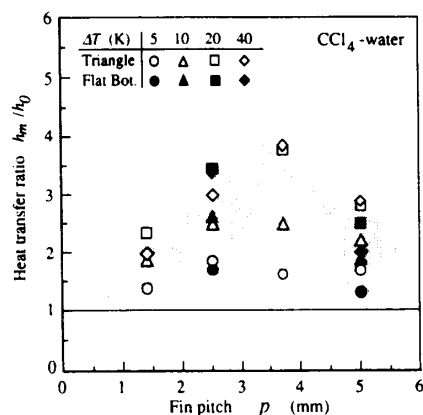


図8 伝達比とフィンピッチ

分し 5 min の離脱個数から算出したもので、投影面積基準の単位面積、単位時間当たりの離脱個数で定義される。○印で示す平滑面の結果に比して、フィン付き面での離脱頻度は凝縮面の先端付近で高く、それもピッチが小さいものほど顕著となっている。このことは、2成分不溶性混合蒸気の凝縮においては、干渉による滴同士の合体が生じ得るフィン付き面が付着滴の離脱促進に有効であると言える。しかし、その反面、溝部における滴の配列化による拘束が、液膜流の抵抗となるのみならず液膜を必要以上に厚くするため、滴離脱への作用も小さく、逆に付着滴の成長(凝縮速度)にマイナスに作用すると考えられる。

フィン付き面による伝熱促進の効果には、以上の水滴の離脱頻度と図4に示した離脱滴の幅  $d'$  との積で与えられる離脱による掃除面積割合(ここでは掃除速度と定義)が実質的なパラメータとなる。図5(b)に示すこの掃除速度の結果から、小さい滴が頻りに離脱するピッチの小さいフィン面より比較的ピッチの大きい三角形フィン#3あるいは平底フィン#1のほうが伝熱促進に効果的であると言える。

なお、凝縮形態に及ぼす三角形フィンと平底フィンとの表面粗さの違いは、観察ならびに図4の結果などにおいても明確な差異は現れなかった。

**3・2 熱伝達率** 各種フィン形状をもつ冷却面に、単成分および共沸組成にある2成分混合蒸気が凝縮したときの平均熱流束  $q_m$  の結果を温度差  $\Delta T$  の関係として図6(a), (b)に平滑面の結果とともに示す。図6中の実線は四塩化炭素単成分蒸気の平板への Nusselt の理論解を、破線はフィンによる表面積増加分を考慮したもの(平底フィン#1および三角形フィン#1)である。なお、熱流束の算出には投影面積を基準に用いた。同図6(a)の単成分蒸気(四塩化炭素)の場合には、いずれのフィン形状、寸法においても表面張力による

液排除の効果が現れ、表面積の増加分を超えた高い熱流束が得られており、それも三角形フィン#1, #2, #3の順で示されるようにフィン密度が高いものほど大きい結果となっている。なお、三角形フィン#3と#4および平底フィン#1と#2とでは両者の関係は逆となっているが、これはフィン加工処理の際表面性状に差異が現れたためと考えられる。温度差に対する影響としては、凝縮量が小さい低温度差では表面張力の効果が十分ではないが、温度差の増加とともにこの効果も増大し、平滑面に対する熱流束の増加の度合いが大きくなる。しかし、より高温度差では凝縮液が溝部を充填し液排除の処理能力を超えるため、再び低下する傾向を示す。なお、平底フィン#1と三角形フィン#3の低温度差域の値が極端に小さくなっているが、これについては不凝縮ガスの影響による可能性もあり、詳細は不明である。

図6(b)の2成分蒸気では、○印で示す平滑平板については、前報までに報告し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、単成分の熱流束より小さいか同程度の値にとどまるが、温度差が大きくなると付着滴の離脱流下が始まり、この掃除効果が物性効果と相まって熱流束を増加させる結果となっている。それに比してフィン付き面の場合には、同様の効果に加えて表面積の増加、表面張力にもとづく液排除のため、熱流束は  $\Delta T=5$  K 以下を除き平滑面に比してさらに伝熱促進される。それも、単成分蒸気の場合とは異なりフィンピッチが比較的大きい三角形フィン#3が良好であることがわかる。しかし、2成分蒸気の凝縮に対するフィン効果は単成分蒸気に対するものほどではない。

伝熱促進に及ぼす操作条件としての温度差、あるいはフィン形状・寸法の影響をより明確にするために、

各フィン付き面の2成分共沸組成蒸気の熱伝達率を平滑面の四塩化炭素成分蒸気(Nusseltの理論解)との比で表し、温度差との関係を図7に、またフィンピッチとの関係を図8に示す。図7より、フィン付き面の伝熱特性が平滑面に比して4倍以上までに向上し、また、伝達比のピーク値をとる温度差も若干ではあるが低温度差に移行することがわかる。さらに、図8では、フィンピッチの増加に伴い伝熱比は増加し、最大値をとったあと減少しており、これよりフィンピッチに最適値が存在することがわかる。なお、フィン形状については、両者に明確な差異は見られず、今後さらに検討が必要と言える。

#### 4. 結 論

2成分不溶性混合蒸気の凝縮熱伝達の促進を目的に、形状および寸法の異なる各種フィン付き冷却平板を対象に、四塩化炭素-水系の共沸組成混合蒸気の凝縮実験を行い、以下の結論を得た。

(1) 有機物の膜状と水の滴状凝縮からなる複合凝縮形態が明らかにされるとともに、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

縮機構が明らかにされた。

(2) 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るとともに、伝熱促進効果におけるフィン付き面の有効性が示された。なお、2成分蒸気に対するフィン付き面の伝熱促進効果は単成分ほどではなく、今後さらなる検討が必要と言える。

終わりに、本研究は科学研究補助金エネルギー重点領域研究「熱エネルギーの超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。

#### 文 献

- (1) Ogino, F., *SPEY*, **23**(1987), 33.
- (2) Sardesai, R. G., ほか1名, *Chem. Eng. Sci.*, **37-4**(1982), 529.
- (3) 土方・森・姫野・ほか2名, *機論*, **52-477**, B(1986), 2195.
- (4) Hijikata, ほか2名, *JSME Int. J.*, **30-270**(1987), 1951.
- (5) 滝本・寺西・林・ほか1名, *機論*, **57-535**, B(1991), 1009.
- (6) 林・寺西・滝本・ほか1名, *機論*, **58-545**, B(1992), 199.
- (7) 滝本・寺西・林・ほか1名, *機論*, **58-545**, B(1992), 205.
- (8) Mori, Y. and Hijikata, K., ほか2名, *Trans. ASME, J. Heat Transf.*, **103**(1981), 96.