

二成分不溶性混合冷媒の凝縮熱伝達* (水平フィン付き円管上への凝縮)

寺西恒宣*¹, 滝本 昭*², 林 勇二郎*²

Condensation Heat Transfer of Binary Vapors of Immiscible Liquids on Horizontal Tubes

Tsunenobu TERANISHI, Akira TAKIMOTO and Yujiro HAYASHI

In order to enhance the 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 horizontal tubes with enhanced fins. The condensation mechanism of this kind of vapor on horizontal tubes is clarified through the measurement of droplet departure frequency and heat transfer rates. The experimental results indicate that finned tubes are more effective in the enhancement of condensation heat transfer of binary vapors of immiscible liquids, and that an optimum dimension of fins exists.

Key Words: Thermal Engineering, Condensation Heat Transfer, Immiscible Liquid, Azeotropic Mixture, Horizontal Tubes, Enhanced Fin

1. 緒 言

中低位熱エネルギーの有効利用において、低沸点有機物質を作動流体としたランキンサイクルによる発電、ならびにヒートポンプサイクルによる昇温が有力な候補となる。しかし、これらの冷媒では外部熱源温度と凝縮(蒸発)温度との差が大きくなる欠点がある。そのため、水のように優れた物性(大きな潜熱と高い熱伝導率)をもつ無機物質を混ぜた不溶性混合冷媒の利用により、熱損失を小さくして効率を向上させることが考えられる⁽¹⁾⁽²⁾。

不溶性混合蒸気の凝縮伝熱に関する研究は、これまで数多く報告されているが^{(3)~(9)}、それにもかかわらずいまだ一般性をもって議論されるには至っていないのが現状である。このことは、凝縮特性に及ぼす関係因子の数が多く、研究者間の混合冷媒の種類や冷却面形状・寸法などがそれぞれ異なることも一因であるが、主として相互不溶性のために生ずる有機物の膜状と水の滴状凝縮からなる膜滴混在、あるいはまた、両成分

ともにすじ状に流下するすじ流などの複雑な凝縮形態によるものといえる。

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の高性能化を目的に、以上の観点から二成分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との関連づけのもと系統的に追究してきた。まず、基本的な凝縮形態と伝熱特性について、平滑冷却平板を対象に四塩化炭素-水系、あるいはフロン(R113)-水系の2種類の共沸あるいは非共沸組成の混合冷媒を用いた自然対流下での凝縮実験を行い、膜滴複合凝縮に対する付着滴の掃除効果を考慮した凝縮モデルを提案し、それに基づく解析結果との比較を行った。それより、二成分蒸気が同時に凝縮するときの熱伝達は、温度差や冷却面の幾何形状(寸法、姿勢)などの条件によって定まる複合凝縮形態に強く依存することを明らかにした^{(10)~(12)}。次いで、凝縮熱伝達の促進を目的に高性能凝縮面を模索し、形状および寸法の異なる各種フィン付き鉛直平板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機構、さらにそれとの関連づけのもと伝熱特性を明らかにし、不溶性混合冷媒の凝縮

* 平成4年5月29日 第29回伝熱シンポジウムにおいて講演、原稿受付 平成5年10月7日。

*² 正員、富山工業高等専門学校 (〒939 富山市本郷町13)。

*³ 正員、金沢大学工学部 (〒920 金沢市小立野2-40-20)。


に対するフィン付き面の有効性を報告してきた⁽¹³⁾。

本報は、以上の冷却平板に対する結果を踏まえて、実機における構成要素である水平平滑管ならびにフィン付き管上への二成分不溶性混合冷媒の凝縮熱伝達の詳細について実験的に追求したものである。具体的には、共沸組成の四塩化炭素-水系の混合蒸気を用い、前報での鉛直平板との比較のために平板の凝縮面長さならびにフィン形状・寸法とほぼ同一の黄銅製円管を試し、凝縮熱伝達に及ぼす冷却面形状の影響について検討した。

2. 実験装置および方法

図1に実験装置の概要を示す。装置は、試験円管が水平に設置された本体容器、ボイラ、復水器、冷却系および測定観察機器類からなる。ボイラで加熱された混合蒸気は共沸組成となって円筒ガラス製の本体容器(内径 100 mm, 長さ 200 mm)に流入し冷却試験円管上に凝縮した後、計量シリンダを経てボイラに、また、余剰の蒸気は復水器を経てボイラに回収される。試験円管は、黄銅製で凝縮部長さ 100 mm, 直径 25.4 mm の寸法を有する平滑管および谷径 25.4 mm のフィン付き管であり、管内側を流れる低温循環槽からのブラインにより冷却される。フィンには、表1に示す寸法

表1 フィン寸法

	Triangle fin			
	#1	#2	#3	#4
Fin pitch, <i>p</i> (mm)	1.0	2.0	3.0	4.0
Fin height, <i>b</i> (mm)	0.58	1.43	2.30	3.15
Fin tip radius, <i>r</i> ₀ (mm)	0.09	0.09	0.09	0.09
Fin bot.radius, <i>r</i> _b (mm)	0.19	0.19	0.19	0.19
Roughness, <i>R</i> _{max} (μm)	2.19	2.19	2.19	2.19
Area ratio (-)	1.94	1.88	1.83	1.79

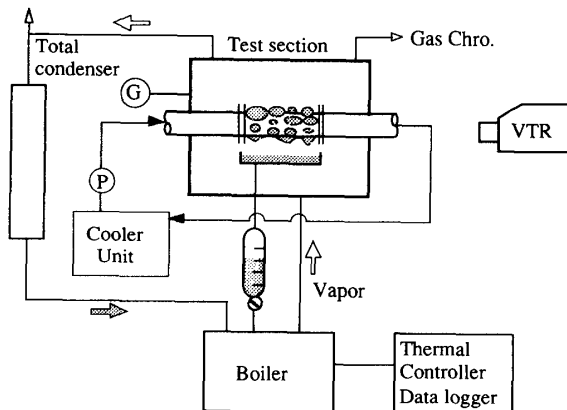


図1 実験装置概要

の機械加工された4種類の正三角形フィンが供せられた。円管凝縮部の両端には凝縮部以外からの計測部への液の流入を防ぐためにフィン加工されたテフロン板が二重に取付けられており、また、表面温度および周囲蒸気温度測定のためにそのテフロン板と円管とのすきまに90°間隔で各4箇所と、容器中の8箇所に直径0.1 mmの銅-コンスタンタン熱電対がそれぞれ取付けられている。

実験は、四塩化炭素-水の共沸組成混合蒸気(水の共沸組成質量割合 $W_{1E}=3.83 \text{ mass\%}$)を供試し、圧力一定(1 atm)、周囲蒸気-凝縮面温度差 ΔT (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、凝縮量の経時変化の測定(精度 $\pm 0.01 \text{ cc/s}$)とVTRおよびカメラによる凝縮形態の観察を行ったものである。なお、容器内の空気の残存および実験中の蒸気組成の確認はガスクロマトグラフによりモニタされ、また、凝縮面は実験ごとにエメリー紙あるいは酸化アルミニウム粉末で研磨されアセトンなどにより表面処理された。

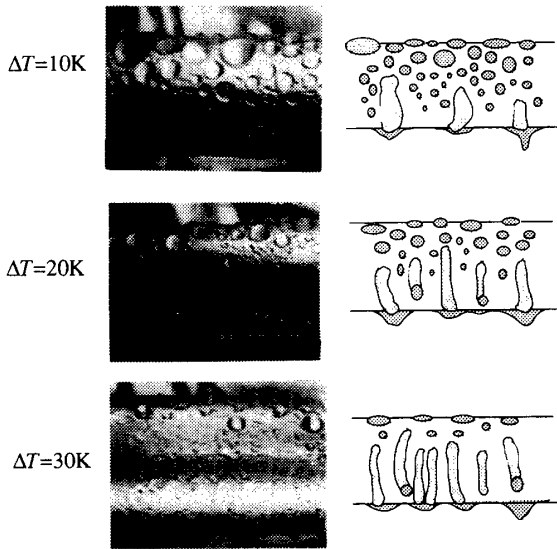
3. 実験結果および考察

3.1 凝縮形態 図2に、円管上への不溶性混合蒸気の凝縮の様相を観察写真でスケッチとともに示す。円管上への混合蒸気の凝縮も、図2(a)の拡大写真に示すようにこれまで報告した平板の場合⁽¹⁰⁾と同様に、水の付着滴と有機液膜からなる膜滴混在状態を基本に、さらに、有機液膜上の水の微小浮遊滴と付着滴上の有機物の微小浮遊滴が加わったものとなる。有機液膜の流れは、厳密には壁面上で成長し離脱・流下を繰り返す付着滴の動挙動と干渉するものであるが、巨視的には凝縮、液膜流動、管下端部からの液の離脱で収支する定常現象であり、この意味では単成分の膜状凝縮と類似のものといえる。一方、壁面に付着した水滴は、蒸気の直接凝縮、有機液膜上の浮遊滴の流れ込み、さらには水滴同士の吸収合体により成長し、やがて表面を離脱・流下する。この付着滴の離脱・流下は、下流側の凝縮面を掃除し、離脱が連続になると有機液と水とが混在したすじ流となり、さらに管下端部では付着力の強い水が壁面に懸垂し、有機液はその外側を覆って流動落下するなど、管下面部の挙動を複雑なものとする。

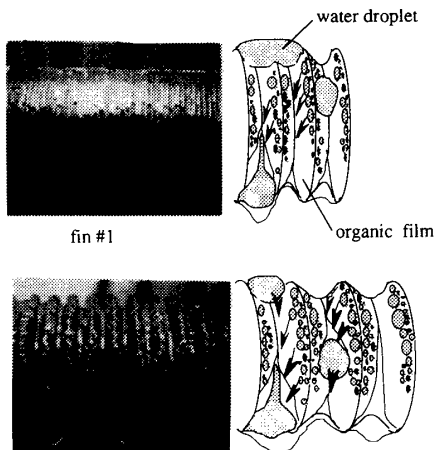
以上の凝縮液の動挙動は、凝縮面の傾斜が上端からの距離によって変化する円管では平板とは異なる。平滑管の場合では、付着滴は平板の場合に比して、傾斜の緩い管上端部付近で横長で大きいだ円形状となり、管下面部ではその数が少なくすじ流状態を呈する。そ



(a) 拡大写真(円管頂部付近)



(b) 平滑管



(c) フィン付き管 ($\Delta T=20\text{ K}$)

図 2 凝縮の様相

れも温度差の増分とともに膜滴混在域が減少し、下部のすじ流域が広がる傾向を示す [図 2 (b)]。

一方、フィン付き管でも、基本的には平滑管と同様であるが、表面構造とのかかわりのもとで有機液膜流ならびに壁面での水滴の付着・離脱の動挙動を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先端部と谷部との圧力差と重力の作用により、フィン側面を斜めに横切ったあと谷底部を流れ落ちる。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り、これに壁面に滴状に付着する水滴の動挙動が加わったものとなる。水滴の動挙動は、先端部(凸部)付近のフィン側面で凝縮付着した微小水滴がある大きさまで成長すると、フィン側面間の滴同士が干渉合体して溝部を覆い、やが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ているフィン先端部や、早い速度で厚い有機液膜が流下する谷部では水滴は育成されない。以上、フィン付き面での膜滴混在はフィン側面での水滴と谷部での液膜流の偏在で特徴づけられ、さらに両者の干渉として理解されてきたすじ流は谷部(フィン間の溝)に拘束されたものとなる。すなわち、この溝部をつたって離脱流下する水滴の形状は、フィンピッチが大きい場合にはほぼ円形となるが、ピッチが小さくなると次第に溝に沿った縦長だ円形となり、フィン付き管 #1 では、図 2 (c) の写真に示すように、管上面部において水滴が溝部を埋めて隣接するフィン間をまたがる形状となる。しかしながら、平滑管でも述べたように、特に管下端部では凝縮液に作用する重力の影響が上面部と相対するため、付着力の強い水が谷部を埋めて懸垂し、その外側を有機液が覆って流下する傾向がより強く現れる。

図 3 に、ビデオ画像の分析から得られた付着滴の離脱臨界径 d_c と離脱頻度 N の結果について示す。ここで、離脱臨界径は壁面に付着している水滴の下流への移動開始時の滴径の水平方向長さであり、平滑管についてのみ示す。また、離脱頻度は管表面を平滑管では 30° 、フィン付き管では 20° ごとに分割した各領域で離脱する付着滴数をカウントし、谷径基準の面積を用い単位時間単位面積当たりに換算したものである。これより平滑管の離脱特性としては、管頂部では臨界径が大きく頻度が小さい、すなわち、大径滴がわずかに離脱するにすぎないが、頂部から離れるにつれ滴径は小さくその数も増し、側面付近 ($\phi=\pi/2$) でそれらはそれぞれ最小および最大値をとることがわかる。さらに、下面部では滴径はほぼ一定値をとり離脱頻度は減少の傾向を示す。また、温度差 ΔT が小さく液膜流の影響が小さい場合には重力の効果が最大となる $\phi=\pi/2$ の位置、すなわち側面が最大離脱点となるが、 ΔT が増加し液膜流の影響が強くなるとそれは管の上方 ($\phi < \pi/2$) にわずかながら移行し滴径も小さくなる傾向を示す。このことは、滴の壁面付着力と滴に作用する液膜流のせん断力および重力とのバランスによるもので

あり、凝縮面の傾斜が上端からの距離によって変化する円管特有の傾向であるといえる。

一方、フィン付き管の離脱頻度は、図3(b)に▲、■印で示すように、同一温度差 ($\Delta T = 20\text{ K}$) での平滑管の結果と比較して、傾斜の緩い管頂部付近ではほぼ同じ値を示すものの、下流にいくに従いフィン間での干渉による滴の合体と液膜流の集中化のため、より急激に増加し約 45° 付近で最大値をとった後減少する傾向を示す。また、図3(c)に示すほぼ同一形状・条件で前報⁽¹³⁾でのフィン付き鉛直平板(三角形フィン #2, ピッチ 2.5 mm)と比較しても、その特性は管頂部付近では大きく異なるが、離脱頻度特性はほぼ同程度の

値をとる。これより、水平円管においてもフィン付き面が付着滴の離脱促進に有効であることがわかる。

3・2 熱伝達 各フィン寸法を有する円管表面に単成分蒸気(四塩化炭素)および共沸組成にある二成分混合蒸気が凝縮したときの平均熱流束 q の実験結果を、温度差 ΔT との関係で図4(a), (b)に示す。平均熱流束は、フィン形状による影響を明確に表し、実験機での公称面積の基準となることから、フィン先端径基準の面積を用いて凝縮速度の測定値から算出したものである。図4中の実線は単成分蒸気の平滑管上へのNusseltの膜状凝縮理論解を、破線はこれにフィンによる表面積増加分を乗じたものであり、一例としてフ

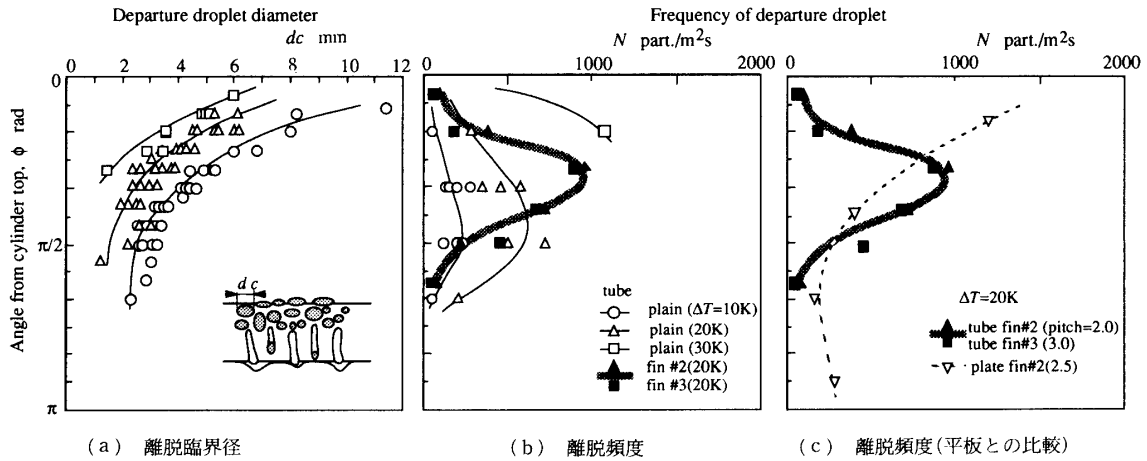


図3 付着滴の離脱特性

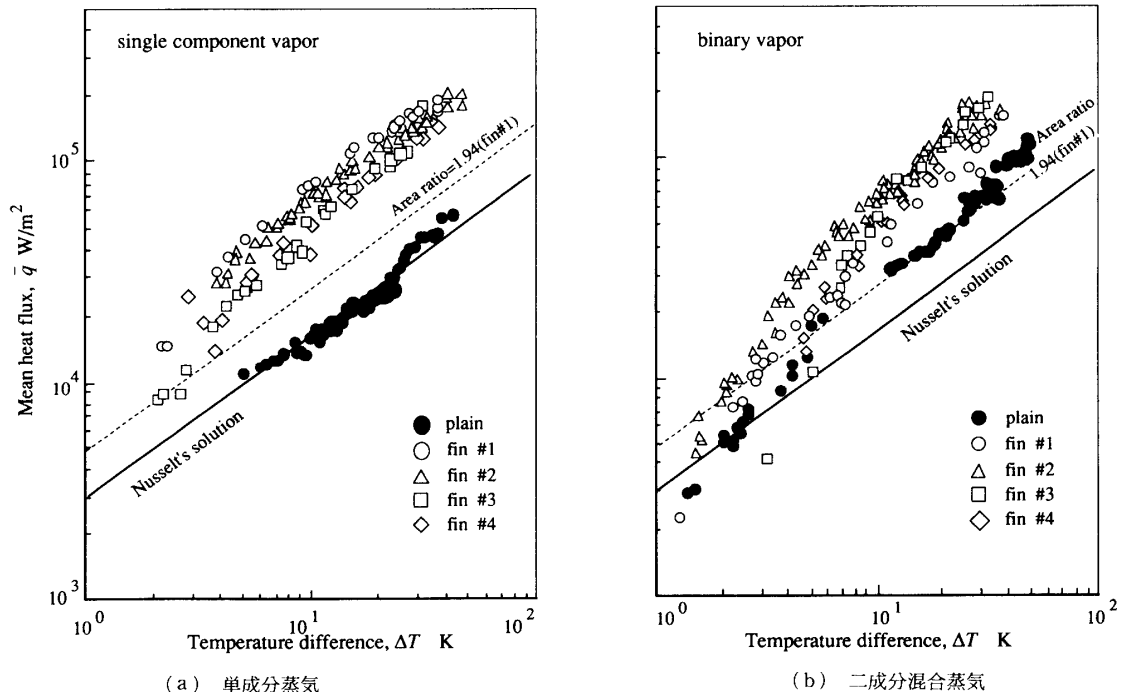


図4 平均熱流束

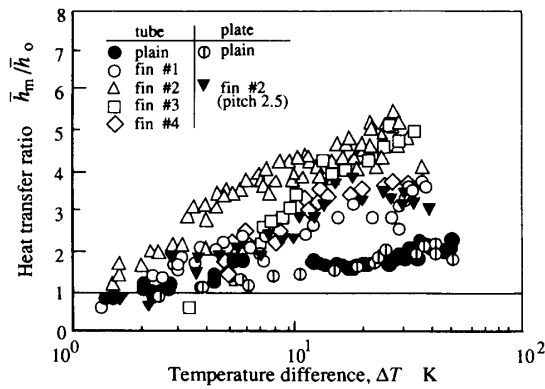


図5 伝達比と温度差

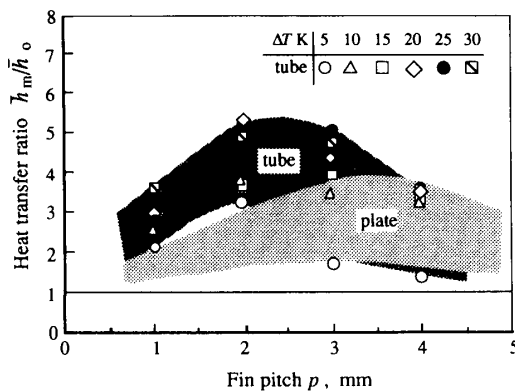


図6 伝達比とフィンピッチ

フィン付き管 #1 の場合を表す。

単成分蒸気の場合では[図4(a)], 平滑管の結果は, Nusselt の解とほぼ一致しており本装置が凝縮実験装置として妥当であることが確認される。フィン付き管については, 従来報告されているように^{(14)~(16)}, いずれの結果もフィン効果によって表面積増加分を超える高い伝熱促進が得られており, それもフィンピッチの小さいフィン密度が高いものほど顕著となっている。なお, フィン付き管の低温度差での熱流束の結果がいくぶん低い値を示すことについては, フィン溝部に微量の不凝縮ガスが残留し積った影響とも考えられるが, 詳細は不明である。

図4(b)に示す二成分蒸気の場合, 平滑管に対する結果は, 3・1節で述べたように, 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膜の流動抵抗となるため, 四塩化炭素単成分(Nusselt の解)の熱流束とほぼ同程度の値を採る。温度差が大きくなると液膜流による付着滴の離脱頻度が増し, 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。他方, フィン付き管でも, 同様の効果に加えて表面積の増加, 表面張力に

基づく液排除のため, 熱流束は $\Delta T = 5 \text{ K}$ 以下の低温度差を除き平滑管に比してさらに伝熱促進される。それも, 単成分の結果とは異なり比較的フィンピッチの大きいフィン #2 ないし #3 が促進に有効であることがわかる。

伝熱促進に及ぼす操作条件としての温度差, あるいはフィン寸法の影響をより明確にするために, 各種フィン付き管の二成分共沸組成蒸気に対する平均熱伝達率 h_m を平滑管の四塩化炭素単成分蒸気に対する Nusselt の解 h_o との比で表し温度差との関係で図5に, またフィンピッチとの関係で図6に示す。図5, 6中比較のためにほぼ同じ凝縮面積をもつ鉛直平板の結果も併せ示す。温度差に対しては, 図5よりいずれの結果も温度差の増加とともに付着滴の流下・離脱による掃除効果によって伝達比が向上し, 最大値をとった後ある一定値に漸近する傾向を示す。促進の度合いは, フィン付き管の伝熱特性が平滑管に比して2倍以上に向上し, また, フィン付き平板に比しても優れている。なお, 平滑面の円管と平板の比較においては, $\Delta T = 10 \text{ K}$ 付近で若干円管のほうが大きい値を示すが, その差はフィン付き面ほどではなくほぼ同一の結果となっている。

フィンピッチに対しては, 図6に示すようにフィン付き管の伝達比はピッチの増加とともに向上し, およそ2~3 mm 付近において最大値をとった後減少する傾向を示す。これより最適フィンピッチの存在が明らかといえる。また, 同一のフィン形状をもつ鉛直フィン付き平板⁽¹³⁾と比較して, ピーク値すなわち最適ピッチは円管のほうが小さい値を示しているが, これについては, 付着滴の離脱, 凝縮面からの液離脱および表面加工精度などの影響によるものと考えられ, より詳細な検討が必要といえる。

4. 結 論

二成分不溶性混合冷媒として, 四塩化炭素-水共沸組成蒸気を用いた水平に置かれた平滑管ならびにフィン付き円管上への凝縮伝熱実験を行い, 以下の結論を得た。

(1) 水平円管上における有機物の膜状および水の滴状からなる膜滴混在あるいはすじ流としての凝縮形態の出現が明らかにされた。

(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, 水平フィン付き円管の凝縮伝熱促進に対する有効性が確認された。なお, 水平フィン付き円管は二成分不溶性混合蒸気の凝縮伝熱促進に対しても有効ではあるが, 単成分蒸気に対するほど効果

的ではなく、さらに何らかの工夫が必要といえる。

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。

文 献

- (1) Ogino, F., ほか 3 名, *Proc. 3rd CAPCCE*, (1984), 165.
- (2) Sardesai, R. G. and Webb, D. R., *Chem. Eng. Sci.*, **37-4** (1982), 529.
- (3) Kirkbride, C. G., *Ind. Eng. Chem.*, **25**(1933), 1324.
- (4) Tobias, M. and Stopple, A. E., *Ind. Eng. Chem.*, **46-2** (1954), 1450.
- (5) Akers, W. W. and Turner, M. M., *AICHEJ.*, 8-5(1962), 587.
- (6) Sykes, J. A. and Marchello, J. M., *Ind. Eng. Chem.*, **9** (1970), 63.
- (7) Bernhardt, S. H., ほか 2 名, *Proc. AIChE Symp.*, **68-118** (1972), 21.
- (8) Diah, I. G., ほか 2 名, *Wearme Stoff.*, **7-2**(1974), 94.
- (9) Ponter, A. B., ほか 2 名, *Wearme Stoff.*, **13-2**(1980), 125.
- (10) 滝本・寺西・羽根田・林, 機論, **57-535**, B(1991), 1009.
- (11) 林・寺西・滝本・羽根田, 機論, **58-545**, B(1992), 199.
- (12) 滝本・寺西・松田・林, 機論, **58-545**, B(1992), 205.
- (13) 寺西・滝本・高橋・林, 機論, **58-554**, B(1992), 3123.
- (14) 吉川・河合・町山, 早稲田大学理工学研究所報告書, **79** (1977), 18.
- (15) 木皿儀・塩治・ほか 4 名, 機講論, No. 780-1(1978-1), 1.
- (16) 本田・野津・光森, 機論, **49-445**, B(1983), 1937.