非共沸混合媒体用 EHD 熱交換器の研究*

矢 部 彰^{*1}, 高 橋 克 行^{*2}
青 野 秀 文^{*3}, 牧 博 司^{*4}

Experimental Study of EHD Heat Exchanger for Nonazeotropic Mixtures

Akira YABE, Katsuyuki TAKAHASHI,
Hidefumi AONO and Hiroshi MAKI

To realize higher performance heat pump systems utilizing nonazeotropic mixtures, the EHD (Electrohydrodynamic) evaporator and condenser have been experimentally studied. Conventionally manufactured surfaces have not been effective for the evaporation and the condensation of nonazeotropic mixtures because of the accumulation of less evaporative or less condensable components of the mixture near the heat transfer surface. By setting the perforated coaxial cylindrical electrode inside of the 3.75-m-long evaporator tube, the evaporation and boiling heat transfer of the nonazeotropic mixture of HCFC 123 and HFC 134a on the inner surface of the tube have been enhanced by the factor of about 3 times over a wide range of qualities with the application of 7 kV at the electrode distance of 2.5 mm. Furthermore, using the electrically conducting transparent glass, it was clarified that the flow pattern has been changed and that some EHD phenomena such as the EHD surface instability have been observed. As for the condenser, the necessary tube length for condensation outside of the vertical tube has been shortened by two kinds of EHD effects, the increase of the condensation surface and the realization of the thinner film of the condensate.

Key Words: Evaporator, Energy Conservation, Heat Transfer Enhancement, Electric Field, EHD (Electrohydrodynamics), Chlorofluorohydrocarbons

1. 緒 論

非共沸混合媒体を用いてヒートポンプサイクルのロレンツ化を実現させることは、ヒートポンプの COP (成績係数) を向上させ、エネルギーの有効利用を推進するうえで重要である。しかし、非共沸混合媒体を使用すると、蒸発器においては非共沸混合媒体のうち相変化しにくいほうの高沸点成分が伝熱面近傍に蓄積されてしまうため、蒸発熱伝達率が低下してしまう。特に、従来の伝熱促進方法として研究が行われてきた伝熱面表面にトンネル構造、ポーラス構造を作った高性能沸騰面では蒸発しにくいほうの成分が伝熱面近傍にたまるため、非共沸混合媒体にはあまり有効でないことが報告されている^{(1)~(3)}。一方、凝縮器においても、凝縮しにくい成分が伝熱面近傍に蓄積され、不凝縮気体と同様に拡散抵抗を生じて、凝縮熱伝達の大幅な低下をもたらす。このため、蒸発器および凝縮器では、質量速度を上げて強制対流効果により伝熱促進する方

法、プレートフィン形などの単位体積あたりの伝熱面積の大きい熱交換器を使用する方法、また、対向流形熱交換器で出現する二相流の各フローパターンに合せた伝熱促進法を使用する方法等⁽¹⁾が開発されつつある。しかしながら、強制対流効果を使用すると圧力損失が大きくならざるを得ず、圧力損失に相当する飽和温度分だけ蒸発温度および凝縮温度の低下をもたらす、ヒートポンプの性能低下が生じてしまう。

そこで著者らは、蒸発器においては、沸騰熱伝達に高電圧を印加したときの EHD (電気流体力学) 的效果が、伝熱面近傍での気泡のかくはん効果であることを活用し、蒸発しにくいほうの媒体成分が伝熱面近傍に蓄積されるのを防止する可能性をもつことに着目し、EHD 的な沸騰伝熱促進方法が、非共沸混合媒体に対して有効であるかどうかを実験的に検討する。特に、蒸発器においては圧力損失を増大させないために、低質量速度での実験に的を絞って、HCFC 123 と HFC 134 a の非共沸混合媒体および HCFC 123 の単一媒体を使用し、高熱伝達率の実現を目的として、クオリティ (乾き度) と熱伝達率の関係として整理し、考察した。また、圧力損失についての詳細な検討、非共沸混合媒体の EHD 的な蒸発伝熱促進効果に及ぼす潤滑油の影響、さらに、非共沸混合媒体の成分比の違いによって生じ

* 原稿受付 平成 5 年 3 月 30 日。

^{*1} 正員, 工業技術院機械技術研究所 (〒305 つくば市並木 1-2)。^{*2} 学生員, 東京理科大学大学院 (〒278 野田市山崎 2641)。^{*3} 元: 東京理科大学, 現: いすゞ自動車(株)大型研究実験部 (〒210 川崎市川崎区殿町 3-25-1)。^{*4} 正員, 東京理科大学。

る影響についても実験的に検討した。

また、凝縮熱交換器においては、非共沸混合媒体用凝縮器の高性能化をEHD的に実現できるかどうかを実験的に検討した。特に、EHD凝縮器のもつ以下の三つの効果が、非共沸混合媒体用凝縮器に対して有効であるかを実験的に検討した。まず、第1に、EHD凝縮器の伝熱管周りに設置される円筒状の電極が、強制対流場での乱流促進体の役割を果たし、伝熱面近傍での混合を促進し、濃度境界層を薄くできるかどうか、第2に、らせん電極の効果で伝熱面から引き離され、導液部を流れ落ちる液体の液温が低いために、凝縮伝熱面積が増大することに相当し、凝縮を促進する効果について、また、第3に、らせん電極と曲板電極の組合せを活用して、電場の効果で凝縮液体を伝熱面からはぎとり、かつ、擬似適状凝縮現象を生じさせて、伝熱面上の凝縮液膜を薄くすることにより、単成分蒸気の凝縮促進の場合と同様に、液膜の熱抵抗を減らして凝縮熱伝達を促進する効果について検討した。以下の実験では、設置面積を小さくでき、EHD凝縮器の適用しやすい鉛直二重管式対向流形管外凝縮器を用い、規制対象フロンではあるが、CFC 113とCFC 114の混合媒体を用いて実験した。

2. 非共沸混合媒体用 EHD 蒸発器の研究

2.1 実験装置および実験方法 単一媒体としては HCFC 123、非共沸混合媒体としては HCFC 123 と HFC 134 a を使用して実験を行った。図 1 に示すように、実験装置は水平二重管式対向流形蒸発器であり、内管を作動流体、外管を熱源用温水が、それぞれのポンプによって循環している。内管(外径 19 mm, 内径 10 mm)の伝熱管の材質は、キュプロニッケルで、外管(外径 40 mm, 内径 24 mm)は断熱性のよいアクリ

図 1 実験装置(蒸発器)の系統図

ルを使用している。また、蒸発器によって蒸発の完了した作動流体を冷却するためにシェルアンドチューブ形の凝縮器を設置した。この実験装置の特徴は、図 2 に示すように、伝熱管の中心に孔のあいた外径 5 mm の円筒状の EHD 電極をテフロン製スペーサで設置し、電極と伝熱管との間に 0 kV から 7 kV の電圧を印加できるように設計されている点で、円筒状の電極の内部も、自由に流体が通れる構造になっている。また、もう一つの特徴は、蒸発器の作動流体の出口に管の内面を金属コーティングされたガラス管が設置され、作動流体に電場の作用した状態で、その挙動を観察できる点である。図 2 には、その蒸発器測定部の詳細図を示す。温水流路に直径 1 mm のシース K 熱電対を挿入し、温水の温度分布を測定でき、伝熱管には直径 0.5 mm のシース K 熱電対が各場所とも、伝熱管の上部 2 本、下部 2 本、側面 2 本の計 6 本ずつ挿入され、壁温分布を測定できる。圧力損失を増大させないための配慮として、EHD 電極を伝熱管の中心に保持するテフロン製スペーサの断面積を極力減少させるために、3 点で電極を伝熱管の中心に固定させる形をとった。なお、蒸発器入口圧力は、ほぼ 1.1 atm として実験を行った。

また、潤滑油混入時の油濃度は、蒸発器入口のサンプリングにより測定した。潤滑油としては HCFC 123 と HFC 134 a とに相溶性のよいポリオールエステル(日本サン石油製 MPA-100)を使用した。圧力損失は、蒸発器の出入口に設けたテフロン製チューブを差圧計に接続し、その差圧をペンレコーダによって測定した。また、非共沸混合媒体の成分比は、作動流体の蒸発器入口でサンプルした媒体によりガスクロマトグラフィー(カラムにはガスクロ工業製ボラパック Q を使用し、カラム温度を 130°C とする)によって分析した。また、クオリティと熱伝達率の算出方法としては、熱源用温水の温度降下から作動流体への入熱量がわかるの

図 2 蒸発器測定部の詳細図

で、それと HCFC 123 の蒸発潜熱(HFC 134 a の成分比が小さいため非共沸混合媒体の場合にも HCFC 123 単体の場合の蒸発潜熱と同じとする)からクオリティを算出することができる。また、作動流体の温度は、蒸発器の出入口に設置された圧力計で測定された二つの圧力の平均値から、単一媒体の場合には蒸発温度がわかり、非共沸混合媒体の場合には、その局所クオリティから PR 式($K_{ij}=0.051$)を用いて蒸発温度が決定され、それらが作動流体の局所飽和温度となる。よって、これらの入熱量、蒸発温度と壁温からクオリティと熱伝達率の関係が算出される。

2・2 単一媒体の場合の EHD 効果による伝熱促進

HCFC 123 を作動流体として熱伝達実験を行った。媒体の質量速度(m)は圧力損失をなるべく小さく抑えるため、本実験装置が安定に作動する質量速度の下限に近い $33 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ とした。なお、媒体入口の温度は、ほぼ飽和液温度に設定した。電場による熱伝達率の促進効果を図 3 に示すが、EHD 電極に電圧を 5, 7 kV と印加するとクオリティ 0~0.15 の領域で約 10 倍以上の伝熱促進がなされている。クオリティ 0.15~0.6 の領域でも電圧 5 kV の印加で 3 倍以上、7 kV の印加で 5 倍以上の伝熱促進がなされている。また、測定精度は、熱交換器の熱源用温水と作動流体の温度差が小さいため、最大で $\pm 30\%$ 程度の誤差を含んでいる。ブール沸騰における EHD 効果の実験結果⁽⁴⁾より、クオリティ 0~0.3 の領域での伝熱促進は核沸騰における EHD 効果であると予測することができる。この領域において、可視化部では、EHD 効果により気泡は電界のより小さな領域である伝熱面近傍に集まり、かつ、伝熱面上を動き回っている様子が観察された。また、クオリティ 0.3 以上においては、気液界面に不安定が

頻繁に生じて、流動様式が環状流化しやすくなるのが観察され、これらの現象が伝熱促進に寄与していると考えることができる。

2・3 非共沸混合媒体の場合の EHD 効果による伝熱促進 HCFC 123 と HFC 134 a の成分比は HCFC 123 を 97.4 mol%, HFC 134 a を 2.6 mol% として実験を行った。蒸発温度 45°C から 50°C 、凝縮温度 85°C の温度条件では、HFC 134 a の mol 濃度が 5 mol% で、最高の COP (成績係数) を達成することが試算されており、本実験においても、HFC 134 a の mol 濃度を 5 mol% 近傍である 2.6 mol% として実験を行った。媒体の質量速度は $33 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ であり、媒体入口の温度はほぼ飽和液温度を示している。電場による熱伝達率の促進効果を図 4 に示すが、7 kV 印加時に核沸騰が主要である低クオリティから環状流状態である高クオリティ域までの広範囲にわたって、2~3 倍の

図 4 電場による熱伝達率の促進効果
[HCFC 123+HFC 134 a, $m=33 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]

図 3 電場による熱伝達率の促進効果
[HCFC 123 単一媒体, $m=33 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]

図 5 質量速度の違いによる熱伝達率の促進効果
[HCFC 123+HFC 134 a, 印加電圧 7 kV]

HCFC123(97.4mol%)+HFC134a(2.6mol%)

Inlet Pressure : 1.2atm

Working Fluid

Inlet Temperature : 26°C

Outlet Temperature : 29~31°C

Heat Source Fluid

Inlet Temperature : 30~32°C

Outlet Temperature : 28~30°C

Mass Flux : 33kg/m²s
Voltage : 0kV
Outlet Quality : 0.32

Mass Flux : 33kg/m²s
Voltage : 5kV
Outlet Quality : 0.46

Mass Flux : 33kg/m²s
Voltage : 7kV
Outlet Quality : 0.50

図 6 流動状態に及ぼす電場の影響(HCFC 123+HFC 134 a)

伝熱促進が実現している。また、電圧を印加しない場合、低クオリティ域で単一媒体のときより、熱伝達率が低下している。

なお、電圧印加 7 kV で質量速度が 33, 50, 66 kg/(m²・s) の場合の比較を図 5 に示すが、0.2 以下の低クオリティ域ではあまり差がなく、この領域では、EHD 的な核沸騰の促進効果が主要な熱伝達促進要因であることがわかる。一方、クオリティが大きくなると、強制対流効果により差が現れている。

また、クオリティ 0.3~0.5 の領域の写真を図 6 に示すが、EHD 電極に電圧が印加されていないときには、高クオリティであっても層状流で時折、環状流の流れを呈し熱伝達率が安定しない。それに対して電場をかけると安定して環状流の流れを呈している。また、クオリティ 0.3~0.6 の領域においての電場の効果は、電極と伝熱面の間に液柱を発生させ、その液柱が気体の流れによって吹き飛ばされ、液滴が特に上部の伝熱面に当たり環状流化の促進をもたらしているように見える。電圧印加 5 kV と 7 kV の違いは、電場の強さの違いにより蒸気の流速の速いクオリティ 0.7 以上の領域でも、7 kV は液柱を発生させている。また、クオリティ 0.1~0.5 の領域において、気泡流のときに電場の効果により、単一媒体の観察結果と同様に気泡が伝熱面に抑えつけられて、成長が促進されているのが観察により確認された。この気泡が伝熱面で抑えつけられる現象が、クオリティ 0~0.5 の領域で支配的に伝熱促進効果に影響しており、この領域における気泡の発生は、おもに気液界面における気体の巻込みではなく、核沸騰によって発生しているように観察された。

図 7 電場と強制対流による伝熱促進効果の比較

2.4 圧力損失についての検討 非共沸混合媒体を使用する蒸発器では、蒸発に伴い飽和温度が上昇することにより、高い COP(成績係数)を達成することができる。しかし、従来の強制対流効果を利用した方法による伝熱促進では、圧力損失が増大するために蒸発温度の低下をもたらし、蒸発器の性能低下を生じてしまう。そこで、強制対流効果と EHD 効果による伝熱促進についての比較を行った。

蒸発器の入口でクオリティを零、出口でクオリティをほぼ 1 とするときの蒸発器の圧力損失について考えてみると、圧力損失は、質量速度が増加すれば大きくなり、電極を抜いた状態で 66, 100, 133 kg/(m²・s) の質量速度のときにおける圧力損失を測定してみると、順に、17.5, 22.5, 31.3 kPa となった。一方、電極を挿入して、質量速度 33 kg/(m²・s) で EHD 電極に電圧を 7 kV 印加すると、圧力損失は 15 kPa であった。また、熱伝達性能を比較すると、非共沸混合媒体においては質量速度 33 kg/(m²・s) で EHD 電極の電圧を 7

kV 印加した場合と、質量速度 $66 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ で電圧を印加しなかった場合とが同じ程度である。また、単一媒体の場合は、質量速度 $33 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ で EHD 電極の電圧を 7 kV 印加した場合と質量速度 $133 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ で電圧を印加しない場合とが同じ程度であることが図 7 に示されている。このことから、単一媒体の場合、同じ熱伝達性能を得るのに電場をかけないときには、圧力損失が 31.3 kPa 、電場をかけると電場をかけない場合と比べて少ない流量で同じ熱伝達が達成でき、圧力損失は 15 kPa と減少し、電場による伝熱促進の有効なことが明らかである。また、非共沸混合媒体を作動流体として使用する場合においても、同様に、電場をかけた場合の圧力損失のほうが小さくなっている。なお、この場合の消費電力は、 7 kV 印加時において約 4 m の電極全体で、 7 W 程度であり、ポンプ動力と比較して、十分小さい。

2.5 EHD 効果に及ぼす潤滑油の影響および成分比を変えた実験 質量速度 $33 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、混合媒体の成分比は HCFC 123 が $94.4 \text{ mol}\%$ 、HFC 134 a が $5.6 \text{ mol}\%$ とし、潤滑油(ポリオールエステル)の蒸発器入口での濃度を $0, 0.25, 0.5 \text{ wt}\%$ として熱伝達実験を行った。なお、媒体中には循環経路で使用されているテトロンブレードホースの可塑剤である DOP(フタル酸ジオクチル)が約 $1.5 \text{ wt}\%$ 溶け込んでいる。熱伝達性能を図 8 に示すが、電圧印加時には潤滑油の影響をあまり受けずに、伝熱促進が 3 倍以上なされている。なお、 $0.25 \text{ wt}\%$ のデータは、 $0 \text{ wt}\%$ と $0.5 \text{ wt}\%$ のほぼ中間に位置している。また、電圧印加なしのときには、単一媒体の場合と同様⁽⁵⁾ に非共沸混合媒体においても、潤滑油濃度の増大とともに熱伝達が促進される傾向が見いだされた。

図 8 潤滑油混入下での電場による熱伝達率の促進効果
[HCFC 123+HFC 134 a, $33 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]

また、図 8 は、HFC 134 a の成分比を $5.6 \text{ mol}\%$ に変えた実験結果をも示しており、潤滑油および電圧の印加のないとき、図 4 に示す HFC 134 a の成分比 $2.6 \text{ mol}\%$ の場合に比べて、熱伝達性能が 50% 程度低下している。また、電圧を 7 kV 印加すると、図 8 と図 4 のデータは、実験したクオリティの範囲内でほぼ等しく、 $2.6 \text{ mol}\%$ から $5.6 \text{ mol}\%$ への成分比の変化の程度であれば、成分比の変化の影響をほとんど受けていないことを示している。

3. 非共沸混合媒体用 EHD 凝縮器の研究

3.1 実験装置および実験方法 鉛直二重管式対向流管外凝縮実験装置の系統図を図 9 に示す。試験凝縮器、補助凝縮器、過熱器以外は、水平二重管式の対向流管内蒸発および凝縮を用いている。試験凝縮器は、図 10 に示すようにキュプロニッケル製の平滑伝熱管(外径 19 mm 、内径 10 mm)と内部を観察できる透明塩化ビニルの外管(外径 38 mm 、内径 31 mm)よりなり、試験区間の長さを 2000 mm とした。伝熱管は、9 分割され、高さ方向 250 mm ごとに直径 0.5 mm のシース K 熱電対が 3 本ずつ埋め込まれ、8 箇所での伝熱管の表面温度および熱流束が求められる。また、外管には、対応する 8 箇所に蒸気成分を分析するためのサンプリングチューブを取付ける穴を設け、直径 2 mm のガラス管を内側に 2 mm 程度突き出るように設置し、ガスクロマトグラフィーに直結した。なお、ガスクロマトグラフィーまでのテフロンチューブは、加熱保温し、蒸気の凝縮を避けた。また、圧力は、半導体圧力計を用い、絶対圧と上下の差圧を測定した。また、高電圧を印加する電極の形状は、液体の

図 9 実験装置(凝縮器)の系統図

図 10 凝縮器測定部の詳細図

引出し効果, 擬似滴状化効果, 乱流促進効果および製作の容易さを考慮に入れ, 従来の EHD 凝縮器の電極を改良した円筒状電極で, 1 本の管(真ちゅう製)から削り出して製作でき, ある部分はらせん電極の役割を果たし, またある部分は曲板電極の役割を果たす構造とした⁽⁶⁾⁽⁷⁾. さらに, 乱流混合効果を促進するため円筒状電極(長さ 260 mm, 内径 22 mm, 外径 23 mm)の外側に, 直径 2 mm の塩化ビニルの棒をらせん状に装着した電極も実験した. また, 各電極は, テフロン製スペーサで両端を保持され, 伝熱管との間隔が 1.5 mm に保たれている. 実験は, なるべく圧力損失を生じさせない目的で, 従来の実験に比べて小さな質量速度で行った^{(8)~(12)}. なお, 蒸気質量速度を $3\sim 12 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ (入口レイノルズ数 $3600\sim 14000$) (蒸気質量流量 $1.4\sim 5.6 \text{ g/s}$) で一定に保ち, 凝縮部をほぼ大気圧にして実験した.

3.2 単成分媒体による伝熱促進 実験装置の性能の確認と比較のため, CFC 113 の単成分媒体による実験を行った. EHD 電極を設置しない場合の熱伝達率分布は Nusselt の解に近く, 下側ほど熱伝達率は低下する. また, 蒸気流量がより少ないと熱伝達率も低下するが, これも Nusselt の解に近い値にとどまった. EHD 電極を設置し, 6.5 kV の電圧を印加すると, 壁温分布は図 11 に示すように, 凝縮終了までに距離が電圧印加しない場合に比べて短くなっている. この場合の熱伝達は, 温度分布から凝縮終了までに必要な距離 L を出し, その距離の伝熱管の両端の温度分布を使って, 対数平均温度差 ΔT , 平均熱伝達率 h を算出し, 整理した. 蒸気質量流量 G が 4.18 g/s の場合,

図 11 壁温分布に与える電場の影響
(CFC 113 単一媒体, $G=4.18 \text{ g/s}$)

電圧を印加しないとき, ΔT は 28.2 K , L は 1.45 m , h は $252 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ の性能が, 電圧 6.5 kV 印加することにより, ΔT は 24.0 K , L は 0.963 m , h は $447 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ となり, 同一膜レイノルズ数の条件で熱伝達率は 1.8 倍に増大している.

また, 図 11 に示されているように, 壁温分布はほぼ直線的に変化し, また, 凝縮器蒸気入口(測定点 H)での壁温は電圧を印加した場合としない場合で異なっている. これは, 凝縮過程において, 熱流束がほぼ一定の条件で生じており, その熱流束の値は温度こう配より電圧が印加されたほうが 2.4 倍程度大きいことを示している. また, この熱流束は, 蒸気と伝熱面の温度差と熱伝達率の積で表され, 蒸気温度約 48°C と伝熱面温度の差は, 蒸気入口付近で電圧を印加することにより 20% 以上小さくなっていることから, 局所熱伝達率は, 約 3 倍増大していることが予測され, この値は基礎実験結果⁽⁸⁾ともほぼ一致している. また, 冷却水温度が出口で同一にならない理由については, 電圧の有無にかかわらず凝縮器出口付近で, 伝熱面温度は冷却水温度にほぼ等しく一定であるが, 現象としては過冷却の液相と未凝縮の蒸気で構成されており, 電場をかけることにより凝縮器出口の圧力が低下し, また, 凝縮しきれないで補助凝縮器に入る蒸気量が少なくなるため, 冷却水の温度上昇が大きくなるものと考えられる.

3.3 非共沸混合媒体の凝縮促進性能 CFC 113 と CFC 114 の混合媒体の成分比は, ヒートポンプとしての性能の高い成分比に近づけ⁽¹⁾, CFC 113 を 62 mol%, CFC 114 を 38 mol% として実験を行った. 図 12 に伝熱管の壁温分布を示すが, 電圧を 6.5 kV 印加

図 12 壁温分布に与える電場の影響
(CFC 113+CFC 114, $G=3.55$ g/s)

図 14 壁温分布に与える電場の影響
(CFC 113+CFC 114, $G=3.6$ g/s)

図 13 熱流束分布に与える電場の影響
(CFC 113+CFC 114, $G=3.6$ g/s)

(a) 電極を設置しない場合 (b) 電圧を7kV印加した場合
図 15 伝熱管に沿う濃度分布に与える電場の影響

することにより、凝縮終了までの距離が57%まで減少しており、熱伝達がEHD効果により促進されていることがわかる。なお、このとき、伝熱管下端で液体と気体が共存したが、これは凝縮液体の過冷却が生じて、二相のまま凝縮器を出ているためと思われる。 3.55 g/sの同一蒸気質量流量に対して、電場をかけない場合、 ΔT は 11.5 K、 L は 1.39 m、 h は 548 W/($\text{m}^2 \cdot \text{K}$)の性能が、電圧 6.5 kVを印加することにより、 ΔT は 8.7 K、 L は 0.80 m、 h は 1200 W/($\text{m}^2 \cdot \text{K}$)と2.3倍の伝熱促進が実現される。また、電圧を 6.5 kV印加した状態で、蒸気質量流量を、 2.37 g/sから 5.33 g/sまで変化させたところ、凝縮終了までの距離は流量に比例して増大し、 0.5 mから 1.15 mまで伸びた。

また、図12ではEHD電極を設置するだけでは、凝縮終了までの距離は、変化していないことから、電極

による混合効果を増大させる目的で、EHD電極に塩化ビニルの丸棒を巻き付けた電極での実験も行った。しかし、本実験で扱った小蒸気流量範囲では、電極による混合効果は、あまり期待できないことが実験的に確認された。図13に熱流束の分布、図14にそのときの壁温分布を示すが、熱流束分布は、電場の効果で伝熱管からの熱流束が2倍程度に増大している。この伝熱促進の原因は、凝縮液膜が薄くなり、擬似滴状凝縮が生じる効果と、凝縮液体が伝熱管表面で膜状に引き出され、らせん電極に沿って流れ落ちるときの蒸気の混合効果によるものであると考えられる。また、凝縮液体の多くは、伝熱管から取り除かれ透明塩化ビニル製外管の内側を過冷却状態で流れ落ちるので、伝熱面積を増大させる効果も期待できる。また、図15には、濃度分布の測定値を示すが、電場をかけることにより、

伝熱管下部でのCFC 114の濃度が減少していることがわかる。なお、7 kVでの実験は、CFC 114の濃度が、約20%の状態で行った。

4. 結 言

非共沸混合媒体用蒸発器および凝縮器の伝熱促進をEHD(電気流体力学)的に実現する方法について検討し、以下の結論を得た。

(1) 非共沸混合媒体の蒸発器の性能をクオリティと熱伝達率で整理することにより、質量速度 $33 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ の場合、電場を7 kV印加することで、幅広いクオリティの範囲にわたって3倍程度の伝熱促進を実現できることを明らかにした。

(2) 蒸発器において、同じ伝熱性能を電場による効果と強制対流効果とで実現する場合を比較すると圧力損失は、電場をかけた場合のほうが小さいことを明らかにした。また、このときの、電圧印加による電場の消費電力は、ポンプの消費電力と比較して十分小さい。

(3) 蒸発器では、潤滑油混入時においても、EHD的な伝熱促進効果は、ほとんど影響を受けないことを明らかにした。

(4) 電場による蒸発促進のメカニズムとしては、気泡の運動による伝熱面近傍のかくはん効果と気液界面の不安定化による環状流化の促進が有効であること

を明らかにした。

(5) 非共沸混合媒体の凝縮器の凝縮熱伝達に対して電場を印加することにより、凝縮性能を平均熱伝達率で比較すると、凝縮性能が倍以上に増大することを明らかにした。

(6) 電場による凝縮伝熱促進のメカニズムとしては、引き出した凝縮液体が外管の内側を流れ落ちるときに、蒸気を凝縮させる効果と、凝縮液体を引き出し除去することにより凝縮液膜を薄くしたり、伝熱面近傍の蒸気を混合する効果が有効であることを明らかにした。

文 献

- (1) 新エネ機構(NEDO), スーパーヒートポンプエネルギー集積システム成果報告書, (1990).
- (2) 村田・橋詰, 日本機械学会熱工学部門講演会講演論文集, No. 900-71(1990), 15.
- (3) 橋詰・ほか2名, 日本機械学会熱工学部門講演会講演論文集, No. 900-71(1990), 17.
- (4) 緒方・矢部, 機論, 57-533, B(1991), 250.
- (5) 遠藤・矢部, 機論, 58-546, B(1992), 509.
- (6) 竹谷・ほか4名, 機論, 52-477, B(1986), 2207.
- (7) Yabe, A., ほか4名, *Proc. 8th IHTC*, 6-2957(1986).
- (8) 本田・野津, ヒートポンプ調査研究報告書, (1987), 125, 日本冷凍協会.
- (9) 望月・ほか2名, ヒートポンプ調査研究報告書, (1987), 157, 日本冷凍協会.
- (10) 藤井・ほか3名, ヒートポンプ調査研究報告書, (1987), 107, 日本冷凍協会.