

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 1 日現在

機関番号：12701

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23656147

研究課題名（和文）二成分蒸気の相変化における自発液滴移動現象を利用する新形式二相ループの創生

研究課題名（英文）New type two phase loop applying spontaneous condensate drop movement in phase change of binary mixture

研究代表者

宇高 義郎 (UTAKA YOSHIO)

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：50114856

研究成果の概要（和文）：

マランゴニ滴状凝縮における、伝熱面温度分布に基づく凝縮液滴の自発移動現象を適用し、ウィックレスの自発液体移動二相流体ループ伝熱デバイスを創生することを目的とする。

重力の影響を小さくするため、気液相変化二相流体ループを水平設置とし、作動液のエタノール濃度、ヒータ加熱量を変化させて実験した。表面張力差液滴移動現象をヒートパイプの作動液輸送に適用することで、ウィックレスヒートパイプが実現できることを示した。ヒートパイプとしての最大熱輸送量は蒸気の高エタノール質量分率において最大値を示し、電子機器の発熱密度と比較して、十分な値の熱輸送量が得られることを示した。

研究成果の概要（英文）：

The objective of the study is to realize the heat transfer device of wickless two phase fluid loop applying the spontaneous condensate drop movement with the temperature distribution on the heat transfer surface in the vapor - liquid phase change system.

The binary mixture of water and ethanol was enclosed in the apparatus as a working fluid. The horizontal arrangement of heat transfer surface was adopted to reduce the effect of gravitational force. As a result, it was shown that the realization of wickless heat pipe was possible by applying the spontaneous condensate drop movement in the water - ethanol binary mixture system with temperature gradient of heat transfer surface. It was shown the enough transportation rate of heat.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学、熱工学

キーワード：熱伝達、マランゴニ凝縮、自発液滴移動、二相流体ループ、水-エタノール

## 1. 研究開始当初の背景

ヒートパイプ、ベーパーチャンバーなど、気液相変化を伴う二相流体ループ伝熱機器においては、凝縮液を蒸発部へ液体の表面張力を利用して戻すウィックが必要である。しかし、水-エタノール系など、いわゆる“positive system”と呼ばれる2成分蒸気系の凝縮に生じるマランゴニ滴状凝縮においては、図1に示すように、伝熱面温度勾配により低温側から高温側へ速やかな液滴移動が生じる。その自発液滴移動現象を相変化を伴う気液二相流体ループに適用することによって、微小重力下あるいは水平設置の伝熱面に適用可能な、ウィックを必要としない自然液体移動二相ループ伝熱デバイスの創生を研究の目的とする。

マランゴニ凝縮現象は1960年代から知られているが、本質的特性・機構は近年申請者らにより明らかにされてきた。非ぬれ面の滴状凝縮とは異なり、ぬれ面で容易に生起し、極めて良好な熱伝達を示す上、温度勾配下の速やかな液滴移動など、本現象の実機器への適用検討は工学的に意義深い。なお、液滴移動関連の系統的研究は申請者らの他になされていない。

## 2. 研究の目的

本研究では、申請者がこれまで解明してきた2成分蒸気のマランゴニ滴状凝縮における、伝熱面温度分布に基づく凝縮液滴の自発移動現象を適用し、ウィックを必要とせず、媒体の気液相変化を伴う自然液体移動二相流体ループ伝熱デバイスを創生する。本デバイスは重力作用が低い微小重力環境あるいは水平置伝熱面への適用可能である。

マランゴニ滴状凝縮現象においては、凝縮

液滴は伝熱面の低温部から高温部へ温度差の存在だけで自発的に移動することから、気液相変化二相流体ループにおいては、外力の存在無しに、凝縮液は液体の減少する高温部である蒸発・沸騰部へ供給され、極めて良好な熱コンダクタンスのもとに気液相変化熱移動を実現することが可能である。

## 3. 研究の方法

- (1) マランゴニ滴状凝縮における伝熱面温度勾配下の液滴移動を利用する気液相変化二相流体ループ伝熱装置の基本構想を確定し、実験・測定装置の設計・製作を行う。
- (2) 気液相変化二相流体ループ伝熱装置の特性評価を行う。主要な装置の支配パラメータとして、伝熱壁温度勾配を支配する壁材の熱的性質、蒸発部と凝縮部間の長さ、装置内作動流体の移動抵抗に関連する装置高さ、装置系の温度範囲を採用し、支配パラメータの作動流体の自然循環特性および伝熱特性への影響を明らかにする。
- (3) 上記(2)項の主要因子の個別的な測定結果に基づいて、気液相変化二相流体ループ伝熱装置としての特性解析を系統的に進め、提案装置の総合的特性を解明する。

## 4. 研究成果

### (1) はじめに

ヒートパイプは、両端をそれぞれ加熱、冷却することにより、内部で作動液の相変化を伴う、気液二相流体ループを形成することで、潜熱による熱輸送を行なう機器で、電子機器などの冷却、放熱に利用される。冷却側で凝縮した作動液を加熱側に戻すには、微小重力場では主にウィック（多孔質体）の毛細管現象を利用する。しかし、ウィック自体が、

製造工程の複雑化や熱抵抗の増加を招く原因となる。したがって、ウィックを必要としないヒートパイプの開発が求められる。

そこで、マランゴニ滴状凝縮の液滴移動現象を利用することでウィックレスヒートパイプが実現出来る可能性がある。水-エタノールなどの表面張力の異なる“Positive system”を形成する二成分蒸気の凝縮において、凝縮液表面の濃度・表面張力の不安定により凝縮形態が滴状等を取り、熱伝達が促進される現象である。この現象において、伝熱面に温度勾配を与えると、液滴の両端に表面張力差が生じ、液滴が低温側から高温側に外力なしに移動する現象が見られる。図1にその様子を示す。

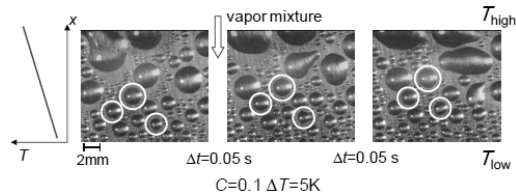


図1 凝縮液滴移動の様子

本研究ではウィックに代わって、二成分蒸気の凝縮液滴移動現象をヒートパイプにおける、冷却側から加熱側への作動液の輸送に適用する。両端をそれぞれ加熱、冷却することによりできる温度勾配を作動液の移動の駆動力として利用する。この新たな形式でのウィックレスヒートパイプの実現可能性および、その適用可能範囲や熱輸送量などの伝熱特性を実験により明らかにすることが本研究の目的である。

## (2) 実験装置及び方法

図2に実験装置概略図、図3に試験部詳細を示す。作動液には、水-エタノール溶液を使用する。試験部の加熱は電気ヒータ、冷却は恒温水槽により水を循環させて行なう。また、作動液の封入、内部空気の除去は真空ポンプを用いて行なう。試験部は伝熱面、冷却水流路、壁面、断熱スペーサ、内部観察ガラ

スで構成される。伝熱面の長さ方向、厚さ方向にそれぞれ、熱電対を挿入し、温度分布を測定する。また、圧力計を取り付け、試験部内圧力を測定する。試験部内の作動液の様子は高速度デジタルカメラにより撮影する。実験は、加熱部、冷却部長さをそれぞれ20mm、試験部全体の長さを100mm、高さ10mm、幅20mm、冷却水温度20℃、流量1L/minの条件で行なわれ、作動液のエタノール濃度、ヒータ加熱量を変化させて行なった。

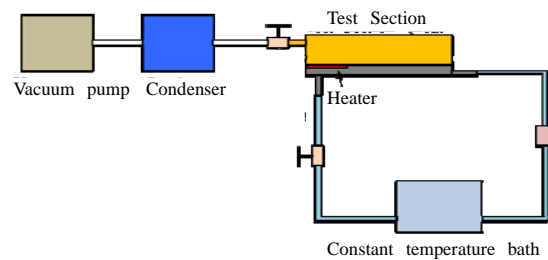


図2 実験装置

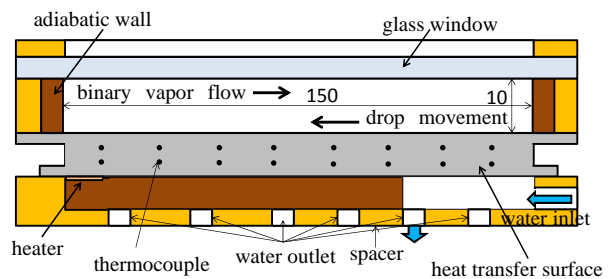


図3 テストセクション

## (3) 結果と考察

図4にエタノール濃度  $C_f=0.20$ 、加熱量  $Q=60W$  の時の試験部内作動液の様子を示す。伝熱面を加熱、冷却して温度勾配を与えることで、右側の冷却部で凝縮した作動液が、左側の加熱部（沸騰領域に）に移動していることが確認された。したがって、水-エタノール蒸気の表面張力差による凝縮液滴移動を利用する形式での、ヒートパイプの実現性が明らかになった。また、加熱量を大きくしていくと加熱側の作動液が少なくなり、ドライアウトする現象が見られた。これは、ヒートパイプとしての限界点であると考えられる。

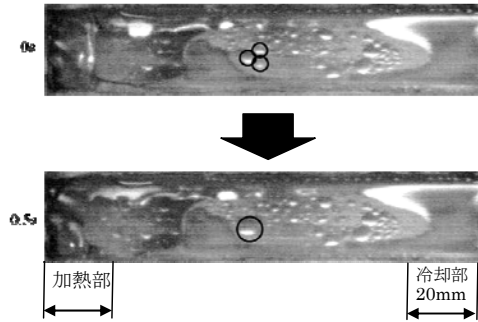


図4 現象の様子 ( $C_V=0.02$ ,  $Q=60W$ )

図5は  $C_V=0.04$  の時の伝熱面の温度測定結果である。x軸を加熱部からの伝熱面長さ方向、y軸を沸騰、凝縮面からの厚さ方向に取ったものである。加熱側と冷却側で、温度が逆転し、それぞれ熱の輸送を起きていることが分かる。また、加熱量が増加すると、加熱側の温度が上昇し、作動温度が高くなることがわかる。また、全体としての温度差も大きくなっている。

図6はドライアウトが起こった加熱量の一つ前の加熱量をヒートパイプとしての最大熱輸送量  $Q_{max}$  とし、エタノール蒸気濃度ごとにプロットしたものである。濃度が小さくなるほど、最大熱輸送量が大きくなる傾向が見られる。ドライアウトが起こるのは、沸騰の速度が凝縮液の移動速度よりも大きくなった時である。加熱量が大きくなると、沸騰速度は大きくなる。しかし、伝熱面の温度差が大きくなるため、表面張力差も大きくなり、凝縮液の移動速度も大きくなると考えられる。すなわち、加熱量が大きくなると、ドライアウトを起こす要因と防ぐ要因が双方共に大きくなるため、この二つの兼ね合いから、最大熱輸送量が決まると考えられる。表面張力はエタノール濃度が小さいほど大きく、さらに温度の違いによる表面張力勾配も大きくなる。したがって、エタノール濃度の小さい領域では、温度勾配の増加による表面張力差の増加の影

響が大きいいため、最大熱輸送量が大きくなると考えられる。

また、実験結果から低濃度領域 ( $C_V=0.02\sim 0.06$ ) では最大熱輸送量  $Q_{max}=100W$  以上を実現できることが分かった。これを加熱部の面積から熱流束にすると  $q_{max}=2.5\times 10^5$

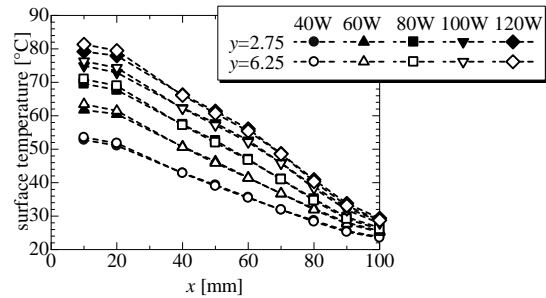


図5 伝熱板内温度分布 ( $C_V=0.04$ )

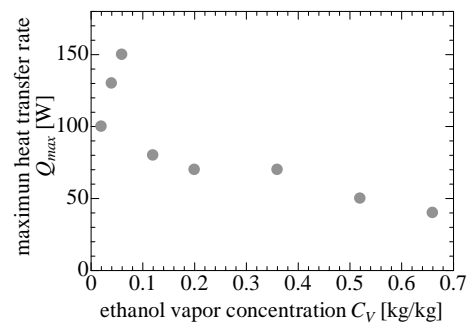


図6 最大伝熱速度

$W/m^2$  以上となる。CPUや通信機器などの電子機器の発熱密度は概ね  $10^4\sim 10^5$  の範囲にあり、本研究で得られた最大熱輸送量で満たすことができる。したがって、このタイプのヒートパイプが実際に電子機器の冷却に使用できる範囲にあることが分かる。

#### (4) 結論

二成分蒸気におけるマランゴニ滴状凝縮液滴移動現象を利用したウィックレスヒートパイプの実験を行ない、以下の結論が得られた。

① 水-エタノール混合蒸気の凝縮時の、温度勾配による表面張力差液滴移動現象をヒートパイプの作動液の輸送に適用することで、ウ

イックレスヒートパイプが実現できる。

② ヒートパイプとしての最大熱輸送量はエタノール濃度が小さくなるほど増加する傾向が見られ、 $C_1=0.06\%$ において最大値 $Q_{max}=150W$ の値を示した。

③ 電子機器の発熱密度と比較して、低濃度領域では、十分な値の熱輸送量が得られたため、機器としての実用性が示された。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計1件)

- ① 陳志豪、宇高義郎、Characteristics and Mechanism on Condensate Drop Movement Under Bulk Surface Temperature Gradient in Marangoni Dropwise Condensation, International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, Malta, (2012) 5049-5059.

[図書] (計1件)

- ① 宇高義郎、陳志豪、An overview of heat transfer phenomena, Chapter 10: Condensate Drop Movement by Surface Temperature Gradient on Heat Transfer Surface in Marangoni Dropwise Condensation Heat Transfer, pp. 219-248, Edited by Salim N. Kazi, ISBN 978-953-51-0827-6, Intech (2012) 219-248.

[その他]

ホームページ等

<http://er-web.jmk.ynu.ac.jp/html/UTAKAYoshio/ja.html>

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

宇高 義郎 (UTAKA YOSHIO)

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：50114856

(2) 研究分担者

陳 志豪 (CHIN SHIGOU)

横浜国立大学・大学院工学研究院・研究教員

研究者番号：60611275