

令和 6 年 5 月 31 日現在

機関番号：32619

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03900

研究課題名（和文）低電圧水平電界エレクトロウエッティングによるウイック内液膜伸長技術

研究課題名（英文）Elongation of liquid film in wick by utilizing low-voltage horizontal-field electrowetting technique

研究代表者

小野 直樹（Ono, Naoki）

芝浦工業大学・工学部・教授

研究者番号：20407224

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：スマートフォン等にも使用されているヒートパイプのドライアウトの発生を抑制させることを目的として、本研究では水平電界タイプのエレクトロウエッティング（以下EWと呼ぶ）を低電圧で駆動するように改良し、ヒートパイプ内の密閉な低圧環境でも作動する技術を研究した。EWを組み込んだ特別な実験用ヒートパイプを用い、EW無しでドライアウトが発生する条件において、EWを加えた時の水蒸気の温度と圧力の挙動からドライアウト発生が抑制・遅延できていることが分かった。次にドライアウト発生直前の最大熱輸送量について調べたところ、EWを印加すると最大熱輸送量を2倍程度向上させることが可能であることが分かった。以上

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究がもたらす学術的意義は、エレクトロウエッティング（以下EWと呼ぶ）がヒートパイプのドライアウト現象の抑制・遅延に有効であることを実験的に示したことと言える。ヒートパイプとEWの組み合わせはこれまでに無いものである。社会的意義としては、スマートフォン等の小型IT機器内でも適用が可能となるように、水平電界型のEWを工夫した点と、低電圧で駆動するように極薄の誘電膜を用いて液膜伸長効果が現れることを示した点にある。スマートフォン等のIT機器の今後のCPUの高性能化や小型化・薄型化に伴う高発熱化（高熱流束化）に対応する一つの方策としてこの技術を示すことができた。以上

研究成果の概要（英文）：In this study, horizontal electric field type electrowetting (hereinafter referred to as EW) was developed to be driven by low electric voltage, and the technology to operate in a sealed low-pressure environment inside a heat pipe was investigated with the aim of suppressing the occurrence of dryout in heat pipes used in smartphones, etc. A special experimental heat pipe incorporating EW was used. The behaviour of the temperature and pressure of the water vapour when the EW was applied, showed that dryout was suppressed and delayed under conditions where dryout occurs without the EW. Next, the maximum heat transport immediately before the onset of dryout was investigated, and it was found that the maximum heat transport was increased by about two times when EW was applied. END

研究分野：熱工学

キーワード：ヒートパイプ エレクトロウエッティング 濡れ性 ウイック 誘電膜

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

5G に代表されるように最近の IT 技術に伴う小型電子機器の進歩は目覚ましい。それに伴い、内部の発熱半導体の冷却技術が増々重要視されている。今後のさらなる小型化・高性能化に伴い、発熱密度の増大は顕著になることが予想され、冷却技術に関する研究開発も盛んに行われている。スマートフォンに代表される小型 IT 機器の発熱 CPU 部分の冷却技術として、代表的なものに小型化されたヒートパイプがある。今やその薄さが 1 mm 程度までと薄肉化が進んでおり、発熱 CPU からの熱を筐体外部へ効率的に輸送して、CPU のオーバーヒート等の誤動作を防ぐことができている。しかし今後のさらなる CPU の高性能化および機器の薄肉軽量化に伴う高熱流束化に対応するためには、ヒートパイプの性能向上も急務と言われている。特に超薄型のヒートパイプになると、凝縮部で生じた作動液を蒸発部へ還流させるウイック部分(溝構造を持つ壁面や挿入する金網などのことで、液が濡れて進むのを助ける部分)の毛細管力(この場合は壁面を液が濡らし浸透していく作用)が、還流の流量を維持できなくなり、結果的に蒸発部が乾き、いわゆるドライアウトが生じてしまう危険性が指摘されている。

一方、固体表面の液体の濡れ性の改善について、エレクトロウエッティングと呼ばれる現象が従来から知られている。これは図 1 (これは垂直電界方式と呼ばれる)に示すように、電極板上に誘電体膜(絶縁体膜)を介して置かれた液滴に電圧を印加すると、その接触角が小さくなり、濡れが進み、固体表面を液膜が伸長する現象である。通常印加電圧を数十ボルト以上まで高くすると接触角が非常に小さくなり、急速に固体表面へ濡れていくことが知られている。

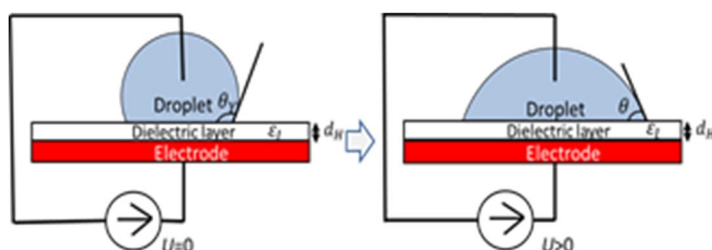


図 1. エレクトロウエッティング (垂直電界方式)

筆者はこのエレクトロウエッティング技術を、ヒートパイプに組み合わせ、毛細管力を向上させてウイック内の液膜の伸長を促進できないかと考えた。蒸発部近くでのウイック内の液膜を積極的に伸長して導入すれば乾きを抑えることが可能となるからである。また実際の IT 機器等用の小型のヒートパイプでの応用を考えた場合、小型バッテリーで済むレベルの小さな電圧で作動することも求められる。

2. 研究の目的

本研究では上記の問題に対し、図 2 に示す水平電界方式のエレクトロウエッティングを採用し、それを低電圧で駆動するように改変し、ヒートパイプ内の密閉な低圧環境で作動するように組み込んで活用する新しい技術を研究する。具体的には誘電体膜として極薄の酸化チタン膜を使用して低電圧駆動とし、ヒートパイプ内のウイックでの液膜の伸長作用を発現させる。大気圧下ではこの作用の確認は終了しているので、これをヒートパイプ環境下においても有効に発生させる手法と条件を明らかにする。この研究を通じて将来の高発熱半導体を有する小型携帯 IT 機器等に適用可能なヒートパイプ技術の実現に寄与するのが最終的な目的である。

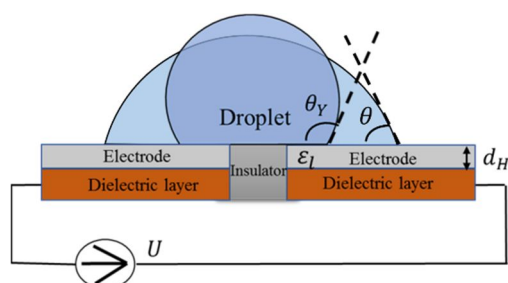


図 2. エレクトロウエッティング (水平電界方式)

3. 研究の方法

実験装置の模式図を図3に示す。図3(b)のEW実験装置と示されている黄銅板は左右に分かれており、その両者間にエレクトロウエッティング（以下EWと表記）のための電圧が印加できるようにになっている。またこの黄銅板の表面および中央で連結している絶縁体（塩化ビニル）の表面にはグルーブウィックが多数本削ってあり、作動液の還流路となっている。

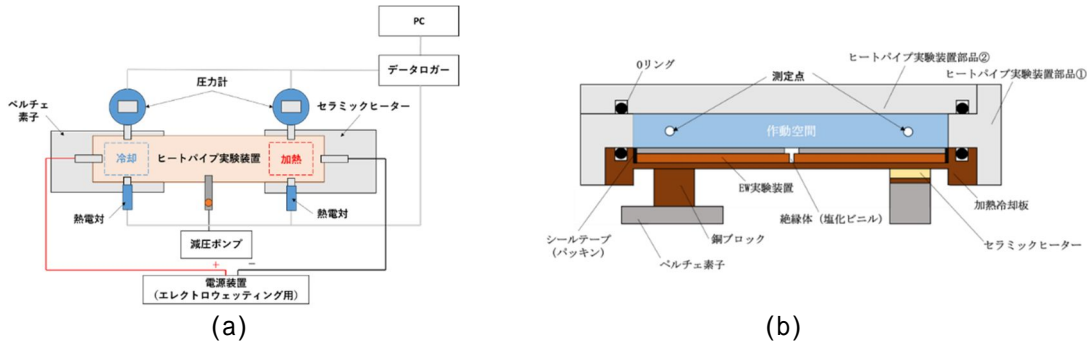


図3. 実験装置概念図，(a)上から見た図，(b)横から見た図。

実験手順は次の通りである。まず実験装置内に作動液を3 ml 作動空間内に注入し、実験装置内部を減圧しヒートパイプ内部の状態を再現する。その後、黄銅板の一端をヒーターで加熱し、他端をペルチェ素子で冷却する。EWありの場合、ドライアウト発生前にEW作動用の電圧を印加する。実験条件は作動液を1.0 wt% NaCl水溶液とし、印加電圧を1.2 Vとした。1.0 wt% NaCl水溶液を用いた理由は、多少ともNaClを加えて電解液的にしないとEWによる液膜の接触角の変化や液膜の伸長効果が低電圧で実現できなかったことによる。指標とするドライアウト発生前の温度については、別途行ったEWなしの実験結果より約50℃とした。評価方法については、実験で測定される水蒸気の温度と圧力のデータと飽和水蒸気圧曲線を比較することで行った。

4. 研究成果

図4にEWによる、ドライアウト発生の抑制・遅延効果を示す実験結果を示す。図4(a)はEWなしの場合に印加電力を次第に増して、加熱部（液の蒸発部）近傍での水蒸気の温度と圧力を測定した結果であり、55℃前後で蒸気挙動に不安定が生じ、その後、飽和水蒸気圧曲線の下方側に入り、蒸気は過熱蒸気状態になってドライアウトが発生したことがわかる。一方、図4(b)ではEWありの結果であり、実験データは60℃程度まで過熱蒸気域に入ることがなく、ドライアウトが遅延したことがわかる。

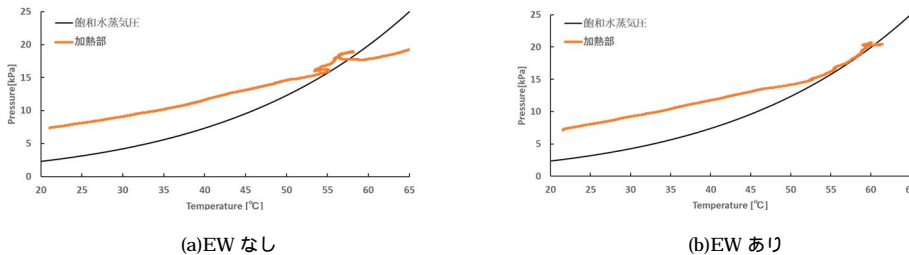


図4. 加熱部近傍の水蒸気の温度と圧力の推移（飽和水蒸気圧曲線との比較）

その後、伝熱的な評価に取り組んだ。つまり、EWによる液膜の延伸作用により、ドライアウト発生直前での最大熱輸送量をどの程度増加させることができたかを調査した。具体的には、液蒸発部へのヒーターによる入熱量 Q と、ヒーター表面から液蒸発部上の蒸気までの熱抵抗 R_{HP} の評価、ヒーター表面温度と蒸気温度の差 ΔT 、および蒸気による熱輸送以外の熱リーク量を評価することで蒸気のみによる熱輸送量を検討した。蒸気による熱輸送以外の熱リーク量を評価する方法としては、装置内に作動液を入れない状態でヒーター電源を入れ、その時に黄銅板や装置の他の部分を伝わって移動する熱量や、装置外表面から大気に逃げる熱量をヒーター電力から測定しておき、これを熱リーク量とする。その後、EWなしとEWありの二条件にてヒートパイプ作動の実験をおこない、ドライアウトが生じるまでヒーター入熱量を増加させる。そしてともにドライアウト発生直前の状態を捉えて、その時点でのヒーター入熱量（これから熱リーク量を差し引く）、ヒーター表面温度および加熱部水蒸気温度から、内部の水蒸気による熱輸送量を評価して比較した。その結果、EWを加えない時の最大熱輸送量が5.18 Wであったものが、EWを印加することで、10.6 Wとなり、約2倍に向上していることが分かった。以上、この研究から、EW

によりドライアウト発生が遅延されていることが温度データから証明できただけでなく、伝熱的效果としてヒートパイプの最大熱輸送量に関して約 2 倍程度の向上が可能であるとのメリットを実験的に示すことができた。

この研究から、スマートフォン等の IT 機器の今後の CPU の高性能化や小型化・薄型化に伴う高発熱化（高熱流束化）に対応する一つの対策案として、ここで扱った低電圧水平電界エレクトロウエッティング技術が有効であることを実験的に示せたと考えている。

以上

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 S.Sakagami, N.Sawano, N.Yoshida, N.Ono
2. 発表標題 Study on a new heat pipe utilizing electrowetting technique
3. 学会等名 The 17th South East Asian Technical University Consortium: SEATUC 2023, 23-24 February, 2023, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, PosterNo.22 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鈴木一弥, 和田将己, 小野直樹
2. 発表標題 エレクトロウエッティング技術を用いたヒートパイプ内のドライアウト現象の抑制
3. 学会等名 第58回日本伝熱シンポジウム（オンライン）, 2021年5月26日（水）, 講演番号E214.
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K.Suzuki, M.Nakahata, K.Yoshida and N.Ono
2. 発表標題 Measurement of temperature and pressure inside a heat pipe equipped with electrowetting technique
3. 学会等名 International Conference on Flow Dynamics(ICFD2021)(online), Oct.21, 2021, Paper Number: GS1-1. (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 坂上信太郎, 澤野なつき, 植木駿矢, 小野直樹
2. 発表標題 エレクトロウエッティング技術を用いた新規ヒートパイプの開発
3. 学会等名 日本機械学会2023年度年次大会（2023年9月3日～6日）, 講演番号S051p-18.
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 澤野なつき, 坂上信太郎, 植木駿矢, 小野直樹
2. 発表標題 エレクトロウェットティング技術によるドライアウト抑制効果の検証とヒートパイプへの応用
3. 学会等名 日本機械学会熱工学コンファレンス2023年(2023年10月14日~15日)、講演番号C115.
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	丹下 学 (Tange Manabu) (70549584)	芝浦工業大学・工学部・教授 (32619)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------