

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420139

研究課題名(和文) ループヒートパイプにおけるウィック内蒸発に関する研究

研究課題名(英文) Study on evaporation from wick in loop heat pipe

研究代表者

長崎 孝夫 (Nagasaki, Takao)

東京工業大学・工学院・准教授

研究者番号：30155923

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：ループヒートパイプ蒸発器のウィックにおける蒸発特性を基礎的に解明するため、目視観察可能な測定部に設置したウィックの上面を銅製の角柱により加熱して蒸発実験を行い、ウィックの焼結粒子径、材質および作動媒体の相違が蒸発性能に及ぼす影響を明らかにするとともに、数値解析によりウィック材質および作動媒体の差異の影響が説明できることを示した。さらにウィックと加熱板の新たな形状を提案し、その有効性を実験により示した。

研究成果の概要(英文)：In order to clarify fundamental characteristics of evaporative heat transfer in the wick of a loop heat pipe, an experimental study has been performed, in which the upper surface of a wick is heated by a heated square cylinder made of copper in a transparent case for visual observation. As the results, the effects of particle size and material of the sintered metal (stainless and bronze), and the effect of working fluid (ethanol and water) on the evaporative heat transfer were clarified. A numerical analysis has also been made assuming that the wick is saturated with liquid, and several experimental tendencies were explained by the analysis. In addition, a new geometry of wick and heated plate was proposed, and its performance was compared with that of conventional type experimentally.

研究分野：熱工学

キーワード：ループヒートパイプ ウィック 蒸発

1. 研究開始当初の背景

ループヒートパイプ (LHP) は従来のウィック式ヒートパイプに比べ長距離の熱輸送が可能であることから今後の高性能熱輸送デバイスとして注目されている。この LHP について、これまで実際的な蒸発器を対象とした研究は多く行われているが、LHP 蒸発器内の基礎現象に特化した研究は少ない。

2. 研究の目的

本研究では LHP の蒸発器を単純化したモデルについて実験および解析を行い、LHP のウィックにおける蒸発特性を基礎的に明らかにする。さらに蒸発器におけるウィックと加熱板の形状について新規な提案を行い、その性能を調べる。

3. 研究の方法

実験装置は図 1 に示すように、蒸発器、凝縮器、液リザーバーで構成されており、液リザーバーの液体は蒸発器内のウィック下面に供給され、発生した蒸気は凝縮器で液となり、液リザーバーに戻る。凝縮器にはプレート型熱交換器を用い、恒温循環水槽により一定温度の冷却水を供給する。図 2 は参考に蒸発器の外観を示したものであり、蒸発器ケースを透明ポリカーボネイト製とすることにより内部を可視化できるようにしている。蒸

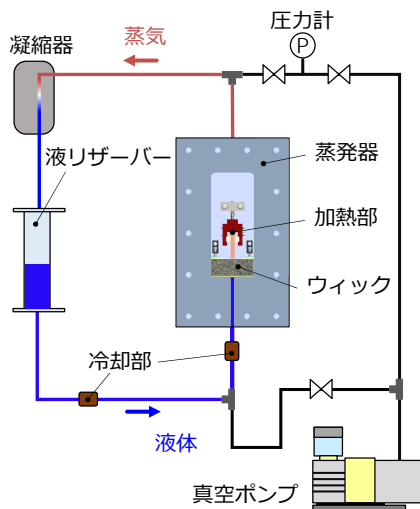


図 1 実験装置の全体

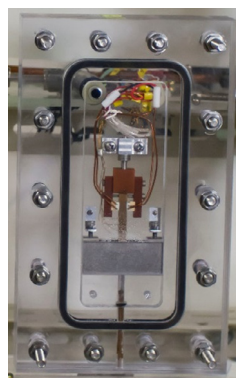


図 2 蒸発器の外観

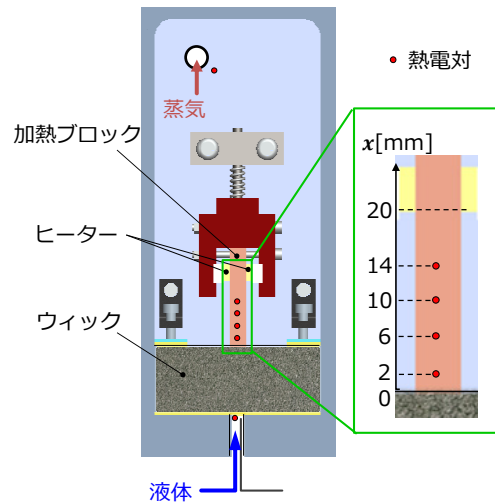


図 3 加熱部詳細

発器内の加熱部の詳細が図 3 に示されており、ウィックの上面に加熱銅ブロック (断面 $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ の角柱) が押しけられている。この加熱ブロックの上端付近を小型セラミックヒーターにより加熱し、図中に示した 4 点に素線径 0.1mm の熱電対を取り付けて軸方向温度分布を測定し、その勾配からウィックへの入熱量 (以下、熱入力)、ならびに銅ブロックとウィックの接触面の温度 (以下、銅ブロック先端温度と呼ぶ) を求める。ウィックの寸法は幅 50mm 、高さ 20mm 、奥行き 5mm であり、本報告で用いたウィックを表 1 に示す。

表 1 ウィックの種類

	SS-1	SS-2	SS-3	B-2
材質	SUS 316			ブロンズ
焼結粒子径 (概略値), μm	70	150	220	150
透過率, $(\mu\text{m})^2$	0.814	2.34	4.64	2.32
空隙率	0.389	0.456	0.484	0.329

さらにウィック・加熱板形状の新提案の実験のための蒸発器を図 4 に示す。ウィックの上面から液を供給し、加熱板の下面をセラミックヒーター (大きさ $25\text{mm} \times 25\text{mm}$) により加熱する。ウィック板の大きさは $48\text{mm} \times$

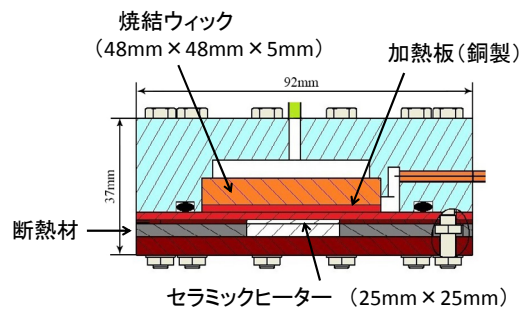


図 4 新提案のウィック・加熱板の実験のための蒸発器

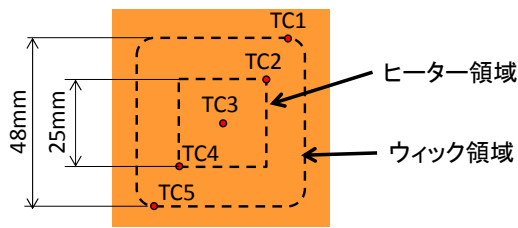
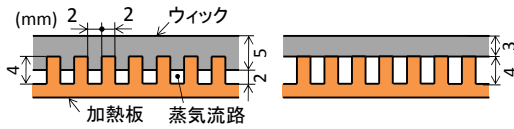


図5 加熱板裏面の熱電対取付け位置



(a) 提案型 (b) 従来型
図6 加熱板とウィックの形状

48mm×5mm であり、ウィックには表1のSS-2を用いた。加熱板の温度を測定するため、図5に示すように加熱板の下面の5か所に熱電対(素線径0.1mm)を取り付け、壁温を測定した。加熱板とウィックの形状として、図6(a)に示すように加熱板の凸部の一部をウィックの中に埋め込み、これによる蒸発促進効果を調べる実験を行った。この提案方式との比較のため、図6(b)のように加熱板の形状は同じであるが、加熱板の凸部をウィックの中に埋め込まない従来型についても実験を行った。

4. 研究成果

(1) 実験結果

実験結果として、ステンレス製ウィックを用い、作動媒体をエタノールとした時の温度差と熱入力との関係を図7に示す。この温度差は、銅ブロック先端温度 T_0 と圧力センサーにより測定したウィック上方の蒸気の圧力 P_v に対する飽和蒸気温度 $T_{sat}(P_v)$ の差であり、表1で示した3種類のステンレス製ウィックに対する結果が示されている。なお、 $T_{sat}(P_v)$ は25~26°C程度であった。図7より各ウィックについて温度差と熱入力との関係は、ほぼ直線的であることがわかる。また3種類のウィックを比較すると焼結粒子径が中程度のSS-2が、同一の熱入力に対する温度差が最も小さく、蒸発性能が最も優れていることがわかる。表1より焼結粒子径が小さい程、空隙率および透過率が小さくなっており、ウィック内の微視的な気液界面の面積が減少し蒸発量が低下した可能性が考えられる。一方、焼結粒子径が大きい場合に蒸発量が減少する理由として、毛管力の低下、あるいは空隙率の増加によるウィックの有効熱伝導率の低下が考えられる。

次にウィック材質がステンレスとブロンズの場合の比較を図8に示す。図中の白抜き印と破線は後述の数値解析結果である。図に示されるようにブロンズ製ウィックの方が同一の熱入力に対する温度差が小さく、蒸発

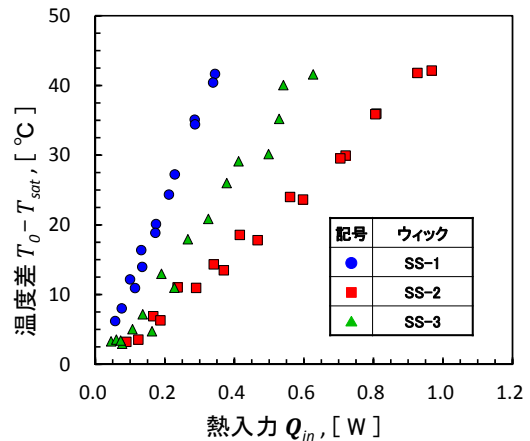


図7 温度差と熱入力の関係
(ステンレスウィック、エタノール)

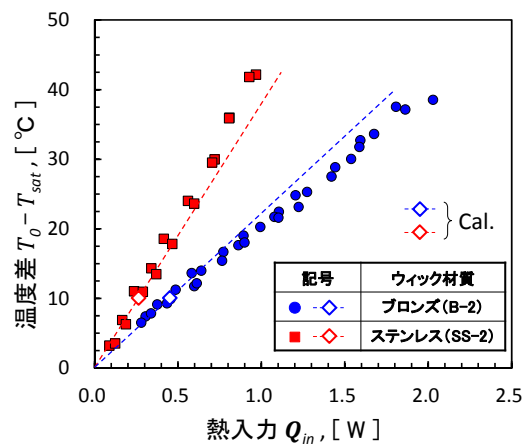


図8 ブロンズ製ウィックとステンレス製ウィックの比較 (エタノール)

性能がよいことがわかる。これはステンレスに比べブロンズは熱伝導率が高いことによるが、これに伴うヒートリークの問題があるため、実用上はその考慮が必要となる。

さらに作動媒体として水を用いた場合の結果をエタノールの場合と比較して図9に示す。図中の白抜き印と破線は後述の数値解析結果である。この実験はウィックの高さを

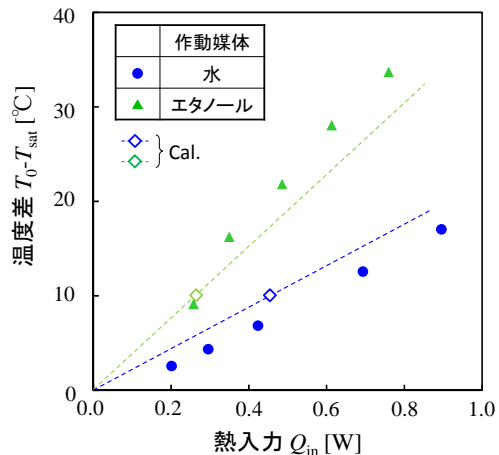


図9 水とエタノールの比較
(ウィック: SS-2)

20mm から 5mm に減らし、液をウィックの横面から供給したものであるが、エタノールについては図 7, 8 の結果とほぼ同じであり、ウィックの厚さの影響はほとんど無いことがわかる。水を用いた場合はエタノールに比べ同一の熱入力に対する温度差が小さく、蒸発性能がよいことがわかる。この理由として水はエタノールに比べて熱伝導率が高いことが主な理由と考えられる。

以上の実験においてはウィック内に蒸気領域の形成は観察されなかった。そこで非加熱状態でウィック内を液で飽和させた後、ウィックへの液の供給を遮断して加熱を開始し、ウィック内の乾き領域の成長を調べる実験（ドライアウト実験）を行った。この実験におけるウィックの様子が図 10 に示されており、時間とともに乾き領域が広がっていくことが分かる。この時の加熱ブロック先端温度 T_0 と熱入力の時間変化が図 11 に示されており、 T_0 は時間とともに上昇することがわかる。この実験ではヒーターへの印加電圧を一定としているが、この実験は非定常のため、銅ブロックの軸方向温度勾配から見積もった熱入力 Q_{in} は安定していない。このようなドライアウトは、液を供給する通常の実験では観察されなかったことから、通常の実験でウィック内に乾き領域が存在するとしても、それは加熱ブロック付近の狭い範囲に限られるものと考えられる。

以上の基礎実験に加え、図 6 で示した新しい形状のウィック・加熱板形状についての実

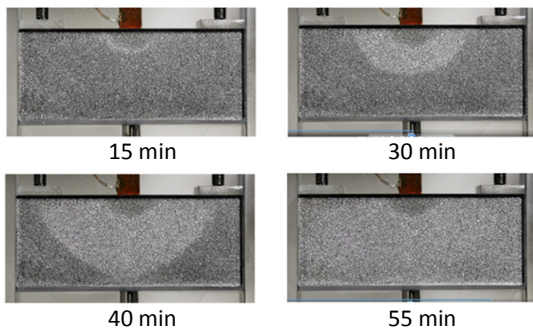


図 10 ドライアウト実験におけるウィックの様子

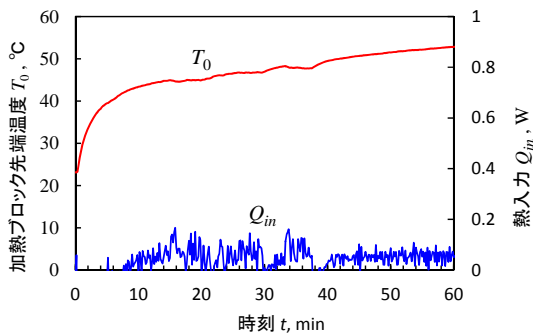


図 11 ドライアウト実験における加熱ブロック先端温度の時間変化

験結果を図 12 に示す。縦軸の熱抵抗 R は実測した系内圧力 P に対する飽和温度 $T_{sat}(P)$ と加熱板のヒーター中心の壁温 $T_{w,center}$ (図 5 中の TC3) を用いて次式で定義される。

$$R = [T_{w,center} - T_{sat}(P)] / Q \quad \dots(1)$$

図 12 に示されるように提案型の蒸発器の熱抵抗は従来型に比べて小さく、ウィックの中に加熱板突起部先端を埋め込むことにより蒸発性能が向上することがわかった。

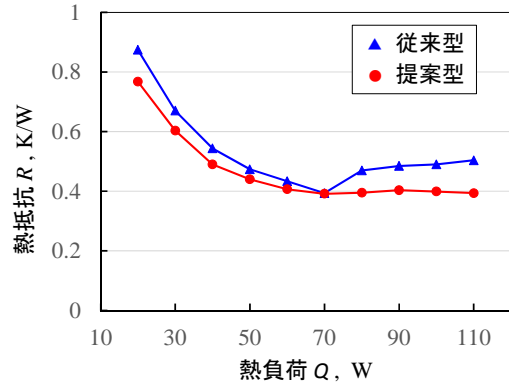


図 12 新提案のウィック・加熱板の実験結果

(2) 解析結果

以上の実験結果を理論的に検討するため、数値解析を行った。その計算領域と計算格子を図 13, 14 に示す。図 14 に示すように、固体（加熱銅ブロック）・ウィック・蒸気の三相界線（以下、三相界線と略記）近傍を細かいメッシュで解くため、段階的にメッシュが細くなる複数の細メッシュ領域を用いて

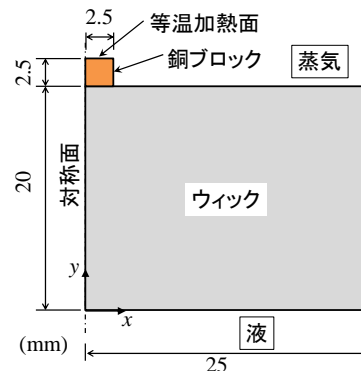


図 13 計算領域

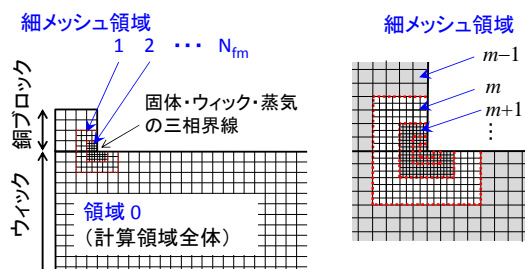


図 14 計算メッシュ

解いた。各細メッシュ領域の格子点数は同じであるが、メッシュサイズが1/2 ずつ小さくなっていく。これにより三相界線近傍を非常に細かいメッシュで解くことができる。

ウィックが液で飽和している場合を考え以下の基礎式（対流項は無視）と境界条件を用いて温度場を解く。

基礎式（銅ブロック、ウィック）：

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad \dots(2)$$

銅ブロックとウィックの界面：

$$\lambda_{wick} \frac{\partial T}{\partial y} = \lambda_s \frac{\partial T}{\partial y} \quad \dots(3)$$

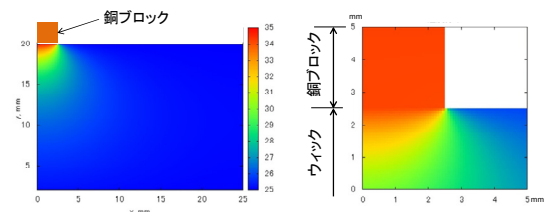
ウィックと蒸気の界面：

$$\lambda_{wick} \frac{\partial T}{\partial y} = h_{int} [T - T_{sat}(P_v)] = q_{eva} \quad \dots(4)$$

ここで λ_{wick} は液で飽和したウィックの有効熱伝導率、 λ_s は銅の熱伝導率、 h_{int} は界面蒸発熱伝達係数⁽¹⁾、 q_{eva} は蒸発熱流束である。 h_{int} に含まれる蒸発係数の値はエタノール、水ともに 0.03 とした⁽¹⁾。温度場に加え、ダルシー流れを仮定して圧力場の計算も行った。なお温度の定義点はセル中心ではなくセル頂点とした。本計算では加熱ブロック上面を等温加熱面としてその温度 T_h を与え、ウィックへの熱入力 Q_{in} は計算結果として求められる。以下では $T_{sat}(P_v) = 25^\circ\text{C}$ 、 $T_h = 35^\circ\text{C}$ とした場合の結果を示す。

計算結果の一例として、温度分布を図 15 に示す。作動媒体はエタノール、ウィックは SS-2 であり、ウィック内の銅ブロック先端付近が高温となっていることが分かる。図 16 は三相界線付近のウィック表面の温度分布と蒸発熱流束分布を示したものであり、三相界線から 0.2mm 程度の距離内で蒸発熱流束が大きく、特に三相界線近傍で熱流束が急峻に変化することが分かる。これらの結果は細メッシュ化を 10 段行い、最小格子幅 Δx_{min} を $0.076\mu\text{m}$ とした結果であるが、細メッシュ化の段数 N_{fm} を変化させ最小格子幅 Δx_{min} が計算結果に及ぼす影響を調べた結果を図 17 に示す。この結果より、最小格子幅 Δx_{min} が $5\mu\text{m}$ 程度で、ほぼ厳密な解が得られることが分かる。以上の計算結果が図 8、9 に白抜き印で示されており、実験値と近い値となることが分かる。ただし図 7 で示したウィックによる違いについて、温度差 10°C の時の熱入力の計算値が SS-1, SS-2, SS-3 に対し 0.30W, 0.26W, 0.25W となり、空隙率の違いによる有効熱伝導率の差異では図 7 のような実験結果を説明できなかつた。この理由の一つとして本解析では従来の多くの研究と同

じく多孔体について有効熱伝導率が適用できるような巨視的なモデル化をしていることが考えられる。この取扱いは対象とする現象の空間スケールがウィックの微視的スケールに比べて十分大きい場合には妥当であるが、図 16 に示されるように三相界線近傍での急速蒸発は 0.1mm 程度の距離内で生じており、マクロ的な扱いに問題が生じている可能性がある。実用的には三相界線近傍のマクロモデルの誤差は蒸発係数により補正するとし、使用するウィックの蒸発実験結果に合わせ蒸発係数をフィッティングすることにより性能予測および形状最適化が可能になるとも考えられるが、今後の課題として多孔体の微細構造を忠実に考慮した解析も望まれ、その場合の比較対象として本研究のような単純化した系での実験は有用と考えられる。



(a) ウィック全体 (b) 三相界線付近
図 15 温度分布

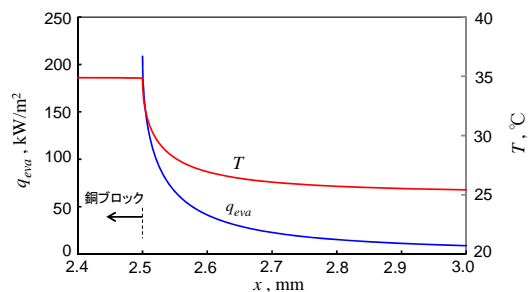


図 16 ウィック表面の温度分布と蒸発熱流束分布

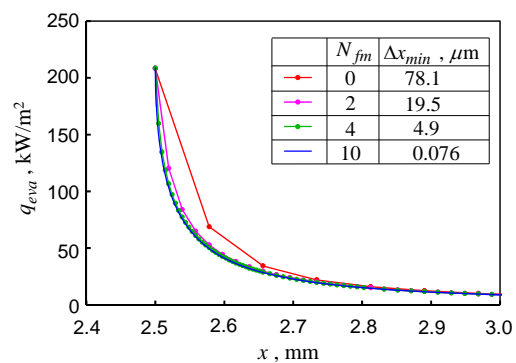


図 17 最小格子サイズの影響

文献

(1) V.P.Carey, 1992, "Liquid-vapor phase-change phenomena," Taylor & Francis

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)

[雑誌論文] (計 0件)

[学会発表] (計 0件)

[図書] (計 0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0件)

名称 :

発明者 :

権利者 :

種類 :

番号 :

出願年月日 :

国内外の別 :

○取得状況 (計 0件)

名称 :

発明者 :

権利者 :

種類 :

番号 :

取得年月日 :

国内外の別 :

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長崎 孝夫 (NAGASAKI, Takao)

東京工業大学・工学院・准教授

研究者番号 : 3 0 1 5 5 9 2 3

(2) 研究分担者

()

研究者番号 :

(3) 連携研究者

()

研究者番号 :

(4) 研究協力者

()