

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 16 日現在

機関番号：13904

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2015～2016

課題番号：15H06287

研究課題名(和文) ループヒートパイプ蒸発器内マイクロ濡れ挙動の解明

研究課題名(英文) Study on micro meniscus behavior in the capillary evaporator of a loop heat pipe

研究代表者

西川原 理仁(Nishikawara, Masahito)

豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：50757367

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ループヒートパイプ(LHP)の蒸発器最適設計理論構築のため、蒸発器内部流れを観察し、ケース-ウィック-グループの三相界線におけるメニスカスを考慮した解析モデル構築し、ウィックの最適形状理論を構築した。石英ガラス管を用いた可視化蒸発器によって、LHP動作中においても三相界線にメニスカスが存在し、定常状態においてもメニスカスは10-400 μm の範囲で振動することが観察された。構築した解析モデルによって、メニスカスを考慮すると熱伝達率が80%増加することが分かった。最適形状理論およびLHP実験によって、ある三相界線長さにおいて蒸発器熱伝達率が極大となることが示された。

研究成果の概要(英文)：To develop design method for the capillary evaporator shape in a loop heat pipe, this study observed thermo-fluid behavior in the evaporator and developed a numerical model for heat transfer of the evaporator taking meniscus at a three-phase contact line (TPCL) within the case, wick, and grooves into account and a method to optimize wick shape in the evaporator. The meniscus at the TPCL was observed by developed the visualization evaporator using a quartz glass tube during the LHP operation and the meniscus oscillated with size amplitude of 10-400 μm at a steady state. The developed numerical model showed that evaporator heat-transfer coefficient increased with 80 % when the meniscus was taken into account. The developed optimization method was validated with the experimental results and the evaporator heat-transfer coefficient reached a local maximum in terms of the TPCL length.

研究分野：熱工学

キーワード：ループヒートパイプ 三相界線 気液二相流 蒸発メニスカス 可視化 最適化 蒸発器設計方法

1. 研究開始当初の背景

ループヒートパイプは (LHP) 電力不要、配置の自由度の高さ、輸送距離の長さなどの利点から宇宙機を初めとし、輸送用機器、電子機器の次世代の熱制御機器として利用が期待されている。しかし LHP は蒸発器内の相変化を伴う多孔体内気液熱流動などが理解されていないため、その設計方法が確立されていないという課題が存在する。これまでにケース-ウィック-グループの共有する三相界線における熱輸送が蒸発器全体の熱輸送において支配的であることが明らかになっているが、三相界線においては蒸発メニスカスの存在によって熱輸送機構が複雑になることが予想される。しかしケース-ウィック-グループの三相界線における濡れに関しては研究が進んでいない。この蒸発器流動現象を理解しなければ設計方法の確立は成し得ない。

2. 研究の目的

そこで本研究では、LHP の最重要設計要素である蒸発器最適形状設計理論を構築し LHP の熱輸送能力を最大化すること、蒸発器飽和蒸気中の固相-多孔体液相-気相の三相界線での濡れ・相変化現象を解明することを目的とし、可視化用蒸発器を製作し、LHP 動作中の三相界線におけるマイクロスケール濡れ挙動を観察し、三相界線における濡れを考慮した解析モデル構築した。また、三相界線長さのみを用いた蒸発器ウィックの最適形状理論を構築した。

3. 研究の方法

(1) 可視化装置、観察方法について下記に示す [学会発表④]。LHP 蒸発器のグループおよびウィック表面における可視化実験を行うため、まず LHP 定常解析モデルを構築し、可視化実験装置の設計を行い、装置を構築した。Fig. 1 に示す本実験装置の蒸発器ケースには透明なガラス管を用いることで可視光での観察を可能にした。高熱流束の現象までを可視化するため、蒸発器の最大熱流束が 20 W/cm² となる LHP を設計した。LHP 定常解

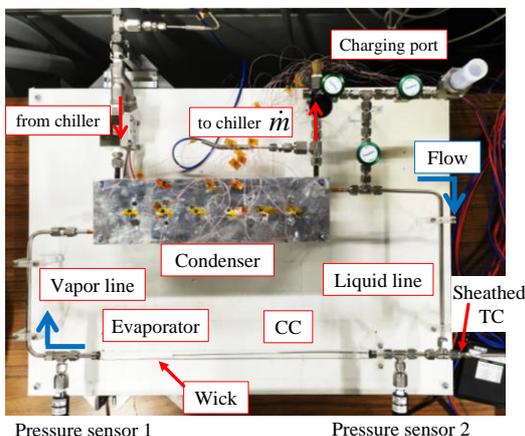


Fig. 1 The developed visualization LHP.

析モデルは LHP の各構成要素におけるエネルギー保存式および圧力損失計算により、各要素での温度や圧力を求めた。LHP の全圧力損失がウィックの最大毛細管力を上回ると毛細管限界となり、その時に輸送した熱量を最大熱輸送量とした。設計した LHP の諸寸法は以下のとおりである。蒸発器の外径、内径はそれぞれ 15 mm, 12.6 mm, 輸送管の外径、内径はそれぞれ 6.4 mm, 4.4 mm, 蒸気管、液管およびコンデンサの長さはそれぞれ 436 mm, 512 mm, 950 mm である。作動流体は圧力損失に影響する物性値や、表面張力などを考慮し、アセトンを用いる。なお設計した LHP の最大熱輸送量は 400 W である。蒸発器ケースのガラス管は石英ガラスを用い、ウィックの材料は石英ガラス多孔体(細孔径分布におけるピーク半径 3.2 μm)を用いた。ウィックを挿入した蒸発器のシール性はバブルポイント試験により検証し、細孔径に対応する毛細管圧まで駆動できることを確認した。蒸発器への加熱方法は、遠赤外線セラミックヒータによる非接触加熱と、蒸発器ガラス管外側のグループ長さ 45 mm の領域に透明導電膜である ITO を成膜した通電加熱の二つの方法で行った。コンデンサはチラーを使用しエチレングリコールにより冷却されたコールドプレートで排熱を行った。冷媒の入口、出口の温度差および質量流量を計測し、コンデンサでの排熱量を算出した。また、ループの各点の温度を T 型熱電対によって計測し、蒸発器前後の圧力を計測した。蒸発器内の観察はマイクロレンズを装着した一眼レフカメラにより行った。

(2) 三相界線における濡れを考慮した解析モデルについて下記に示す [学会発表②]。本研究で扱う計算領域を Fig.2 に示す。大きさが 3.8×5.0 (Lx × Ly) mm² の蒸発器ケース、ウィック、グループから成る蒸発器周期構造の一周周期分である。LHP ウィック内の熱流動モードは、二つに分けられる。蒸発器への熱負荷が低いとき、ウィックが液相のみで満たされる。このとき、三相界線では蒸発メニスカスが形成され、蒸発メニスカス-グループ界面とウィック-グループ界面の二つの気液界面から蒸発が行われると予想される。一方、高熱負荷時は、加熱面付近の液相の加熱度が高くなり、任意の過熱度に達すると、ウィック内で蒸気

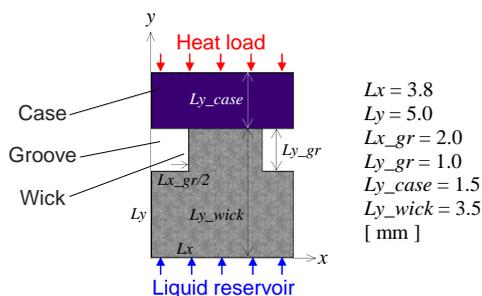


Fig. 2 Computational domain of the evaporator.

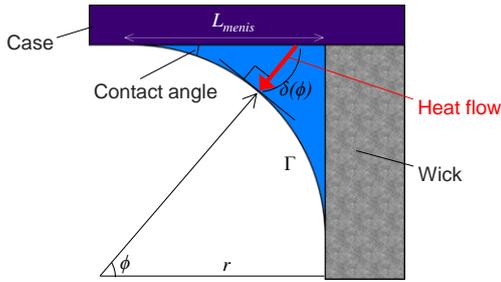


Fig. 3 Schematic of the evaporating meniscus.

が発生しウィック内に気液界面が形成される。この時は、三相界線に蒸発メニスカスが形成されず、ウィック-グループ界面とウィック内部の気液界面から蒸発する。本モデルは、ウィックが液相のみで満たされているモードのみ有効である。支配方程式は、多孔体内流動をダルシー則と質量保存則によって導かれる圧力に関するラプラス方程式、ウィック内のエネルギー保存を対流項を考慮しない熱伝導のみを考慮した方程式を考え、蒸発器ケースの熱伝導方程式も同時に解いた。三相界線メニスカスは Fig.3 に示すような蒸発器ケースまたはウィックからメニスカスの界面までの最短経路、すなわちメニスカス界面の法線方向に熱が伝達する一次元熱伝導を仮定する。すると、メニスカスの局所熱伝達率は液体熱伝導率と距離 δ によって表わされ、これを境界条件として三相界線部分に与えた。この局所熱伝達率は、液膜厚さが薄くなるに従って大きくなる。メニスカスと壁面の接点では液膜厚さが無限小となり、局所熱伝達率が無限大となる。しかし、熱伝導での熱抵抗が非常に小さい薄液膜領域では、界面での熱抵抗や分離圧によって蒸発が抑制され、蒸発量はある液膜厚さで極大を示すことが報告されており、局所熱伝達率は液膜厚さが 4.5 nm で最大となり、その後は急激に減少すると報告しており[1]、本研究でも同じ値を使用した。

(3) 三相界線長さによる蒸発器ウィック形状の最適化理論について下記に示す[雑誌論文②]。これまで行われてきたウィック形状の最適化は、グループ本数、サイズ、接触面積など多くのパラメータによるものであったが、本研究では三相界線において熱輸送が支配的になることを考慮し、その長さのみで最適化が可能であると考えた。すなわち三相界線長さが増加するにつれ、蒸発器の熱伝達率が増加する。しかし、極端に三相界線が長い形状は、グループ幅が小さくなりその圧力損失による飽和温度の増大によって蒸発器の熱伝達率が減少すると考えた。以上のことを定式化し蒸発器熱伝達率 h_{evap} に関する下記の式を得た。

$$h_{evap} = h_{tri} L_{tri} \left[1 - \frac{dT/dP_{sat}}{T_e - T_{sat}(L_z)} \frac{1}{A} \int_0^{L_z} \Delta P_{z-L_z} dA \right]$$

(1)

ここで、 h_{tri} (W/mK)は三相界線における長さあたりのコンダクタンス、 L_{tri} (m)は吸熱面積あたりの三相界線長さ、 dT/dP_{sat} (K/Pa)は流体の飽和蒸気圧曲線の傾き、 T_e (K)は蒸発器壁面温度、 $T_{sat}(L_z)$ (K)はグループ出口における飽和温度、最後の積分項はグループにおける圧力損失の合計である。圧力損失は、流れによるものと蒸発によるものを考慮した。設計理論の検証のため、三相界線長さが異なる 3 つのウィックを用いて LHP 実験を行った。

4. 研究成果

(1)石英ガラス管を用いた透明蒸発器と構築した LHP が遠赤外線セラミックヒータと ITO ヒータそれぞれによる加熱によって正常に動作することを示し、5.6 W/cm²の熱流束まで輸送できることを示した。

(2)一眼レフカメラによる観察によって、LHP 動作中においても三相界線にメニスカスが存在していることが観察された。また、定常状態においてもメニスカスサイズは 1 秒未満の周期で振動することが観察され、メニスカスは 10 - 400 μ m の範囲で振動することが観察された(Fig. 4)。

(3)三相界線におけるメニスカスを考慮した解析によって、蒸発器の熱伝達率におけるメニスカスの有無による影響を明らかにした。蒸発メニスカスによってケースからも蒸発によって熱輸送が行われることで、蒸発器の熱伝達率が大きく上昇することが分かった。

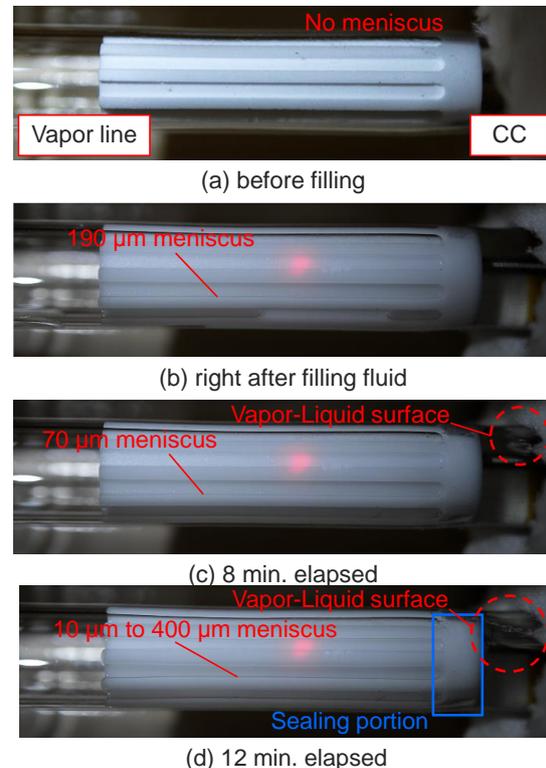


Fig. 4 Oscillation of meniscus at the three phase contact line. Transferred heat flux is 1.3 W/cm².

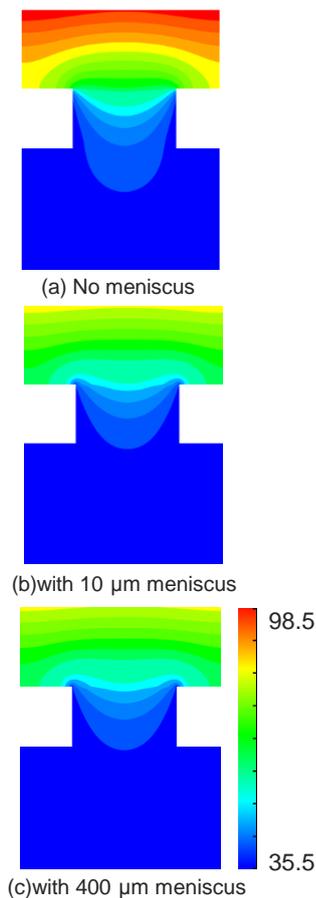


Fig. 5 Temperature distribution. (a) nomeniscus, (b) with 10 μm meniscus, and (c) with 400 μm meniscus. Transferred heat flux is 1.3 W/cm^2 .

蒸発メニスカスを考慮すると、蒸発器の熱伝達率が 78 % (メニスカスサイズ 10 μm) - 84 % (400 μm) 増加することが分かった。また解析モデルは蒸発器ケースとウィックとの接触熱伝達率をフィッティングすることにより、実験結果と一致し解析モデルの妥当性が示された (Fig. 5)。

(4) 構築した最適形状理論によって、熱伝達の高い三相界線領域の増加による蒸発器熱伝

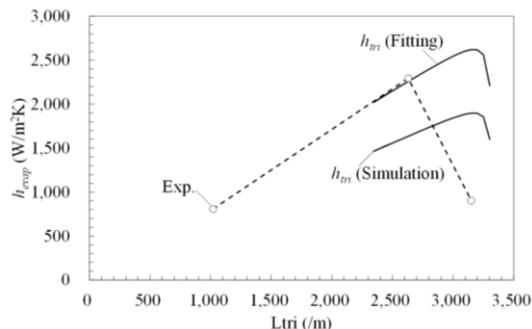


Fig. 6 Evaporator heat-transfer coefficient as a function of the TPCL length. $h_{tri} = 0.87$ is obtained from the calculated results fitted to experimental ones, and $h_{tri} = 0.63$ is obtained from calculated results using a three-dimensional evaporator simulation [Paper ①].

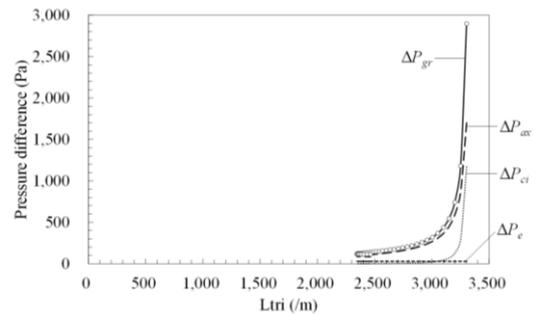


Fig. 7 Groove pressure loss as a function of the TPCL length.

達率の増加と、グループ幅減少、グループでの圧力損失の増加による蒸発器熱伝達率の減少によってある三相界線長さにおいて蒸発器熱伝達率が極大となることが示され、実験結果においても同様の特性が示された (Figs. 6 and 7). 最適形状設計における必要な値 h_{tri} は、蒸発器ケース材料、ウィック材料、作動流体によって異なると考えられる。過去の文献より、代表的な材料の組合せにおける h_{tri} を算出した。

<引用文献>

[1] 白樫了他 2 名, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2013 講演論文集, 2013

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① M. Nishikawara, H. Nagano, and M. Prat, “Numerical Study on Heat Transfer Characteristics of Loop Heat Pipe Evaporator Using Three-Dimensional Pore Network Model,” *Applied Thermal Engineering*, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.02.050>
- ② M. Nishikawara, H. Nagano, “Optimization of wick shape in a loop heat pipe for high heat transfer,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 104, pp. 1083-1089, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.09.027>
- ③ 西川原理仁, 長野方星, “ポアネットワークモデルを用いたループヒートパイプ蒸発器の気液熱流動挙動の解析 (多孔体内気液分布と熱伝達特性)” *日本伝熱学会論文集*, Vol. 23, No. 4, pp.71-80, 2015. <http://doi.org/10.11368/tse.23.71>

[学会発表] (計 7 件)

- ① 上田 洋祐, 西川原理仁, 柳田 秀記, 大谷 浩輔, “ガラス管蒸発器を有するループヒートパイプの起動時における気液界面挙動の観察”, 第 22 回動力・エネルギー技術シンポジウム, 豊橋, 2017 年 6 月.
- ② 山田 裕也, 西川原理仁, 柳田 秀記,

大谷 浩輔, 上田 洋祐, “ループヒートパイプ蒸発器内の蒸発メニスカスの観察と熱流動解析”, 第 54 回日本伝熱シンポジウム, 大宮, 2017 年 5 月.

- ③ 井坂俊貴, 西川原理仁, 柳田秀記, “ループヒートパイプ蒸発器の多孔体ウィックにおける気液二相熱流動の非定常解析”, 日本設計工学会東海支部平成 28 年度研究発表講演会, 名古屋, 2017 年 3 月.
- ④ 大谷 浩輔, 上田 洋祐, 西川原理仁, 柳田秀記, “ガラス管蒸発器を有する可視化ループヒートパイプの構築”, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2016, 松山, 2016 年 10 月.
- ⑤ M. Nishikawara, K. Otani, Y. Ueda, and H. Yanada, “Fabrication and visualization of loop-heat-pipe evaporators using transparent tubes,” Asian Conference on Thermal Sciences 2017, No. P00186, Jeju, Mar., 2017.
- ⑥ M. Nishikawara, H. Nagano, and M. Prat, “A Numerical Study on Heat Transfer Characteristics of a Loop Heat Pipe Evaporator Using Three-Dimensional Pore Network Model,” Joint 18th International heat pipe conference and 12th International Heat Pipe Symposium, No. 140044, Jeju, Jun., 2016.
- ⑦ M. Nishikawara, and H. Nagano, “Effect of Thermodynamic Properties of Working Fluid on Loop-Heat-Pipe Performance,” 10th International Conference on Two-Phase Systems for Space and Ground Applications, No. 16IT-HP-2K, Kyoto, Sep., 2015.

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

研究室ホームページ

<http://ec.me.tut.ac.jp/>

豊橋技術科学大学教員紹介ページ

https://www.tut.ac.jp/university/faculty/me/post_6.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西川原 理仁 (NISHIKAWARA Masahito)
豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号: 50757367

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし
(4) 研究協力者
なし