

マイクロ多孔体内蒸発熱流動の解明と ループヒートパイプ最適形状設計への応用

所属： 豊橋技術科学大学 大学院工学研究科 機械工学系

助成対象者：西川原 理仁

共同研究者：なし

概要

本研究では、ループヒートパイプ（LHP）の最重要設計要素である蒸発器設計理論を構築することを目的とし、蒸発器ケース-グループ-ウィックで構成される三相界線長さのみを用いた3次元マイクログループ形状の最適化理論を構築し、ある三相界線長さに対して蒸発器熱伝達率が極大となることを示した。またLHP蒸発器の可視化装置を構築し三相界線に形成されるメニスカスの挙動を観察し、LHP動作中において三相界線におけるメニスカスの存在が確認された。さらにメニスカスを考慮した解析モデルを構築しその蒸発器熱伝達率への影響を調べ、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上昇することが明らかになった。

Abstract

The purpose of this study is to develop design method of the capillary evaporator in a loop heat pipe (LHP). The optimization method of wick shape was developed using only three phase contact line (TPCL) among the evaporator casing, grooves, and wick. Visualization evaporator using a transparent tube was developed and behavior of meniscus formed at the three phase contact line was observed during the LHP operation. The effect of the meniscus on the evaporator heat-transfer coefficient was investigated by numerical simulation with developed mathematical model.

研究内容

「背景と目的」

近年航空宇宙工学分野，自動車などの輸送用機器では，小型化，機器の高性能化などに伴う発熱密度の急増が問題となっており，高性能な熱制御機器の開発が急務となっている．本研究では，電力なしで動作でき，配置の自由度が高い熱輸送デバイス，ループヒートパイプ(LHP)に注目し研究を行ってきた．LHPは多孔体内で働く毛細管力を駆動源とした気液二相流体ループであり，NASAなど世界各国の宇宙機関で研究開発が進められているが，日本ではまだ実績はない．またLHPの有用さから電子機器，電車など暮らしに身近な省エネ技術として応用が期待されているがまだ実用例はない．LHPには蒸発器内の多孔体内気液熱流動が理解されていないため，蒸発器の設計方法が確立されていないという課題が存在する．そこで本研究では，これまで行われてきた数多くのパラメータによる形状最適化に対し，蒸発器ケース-ウィック-グループで構成される三相界線長さのみで蒸発器のウィック形状を最適化する方法を提案・構築することを目的とする．まず，3次元グループ形状の設計理論を構築する．さらに設計の高精度化のため，三相界線における濡れ挙動を観察するため可視化蒸発器を製作し，三相界線におけるメニスカス挙動を観察する．さらに，メニスカスを考慮した解析モデルによって，蒸発器熱伝達率への影響を明らかにする．

「三相界線長さによるウィック形状最適化」

LHP蒸発器においては三相界線において熱流束が集中するため，三相界線長さが増加すると蒸発器熱伝達率が増加する．しかし，三相界線の長いウィック形状ではグループ幅が小さくなるためその圧力損失が大きくなり，蒸発器熱伝達率は減少する．そのため蒸発器熱伝達率は三相界線長さに対してあるところで極大をとるような特性になるということが考えられる．上記のことを考慮した数学モデルによって蒸発器熱伝達率 h_{evap} を定式化した．

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

ここで h_{tri} は三相界線における熱コンダクタンス， L_{tri} は三相界線長さ， T_e は蒸発器ケース温度， T_{sat} はグループにおける飽和温度， dT/dP_{sat} は蒸気圧曲線の傾き，最後はグループでの圧力損失である．圧力損失は，軸方向，周方向，蒸発器による損失を考慮した．

ウィックと蒸発器ケースの接触比を 0.5 に固定して三相界線長さを変化させて計算を行った．結果を図 1 に示す．ウィック材料は PTFE であり，作動流体はエタノール，熱流束

は $2\text{W}/\text{cm}^2$ である．三相界線長さ $3000/\text{m}$ 付近で熱伝達率は極大となった．実験結果においても $2600/\text{m}$ で極大となり，構築した熱伝達式の有効性が示された．しかし，三相界線における熱コンダクタンス h_{tri} の値は Fitting と Simulation で差異があり，熱伝達率を高精度に予測するには，三相界線における熱輸送機構をより詳細にすることが必要である．そのため以上において三相界線における熱流動の観察とモデル化を行う．

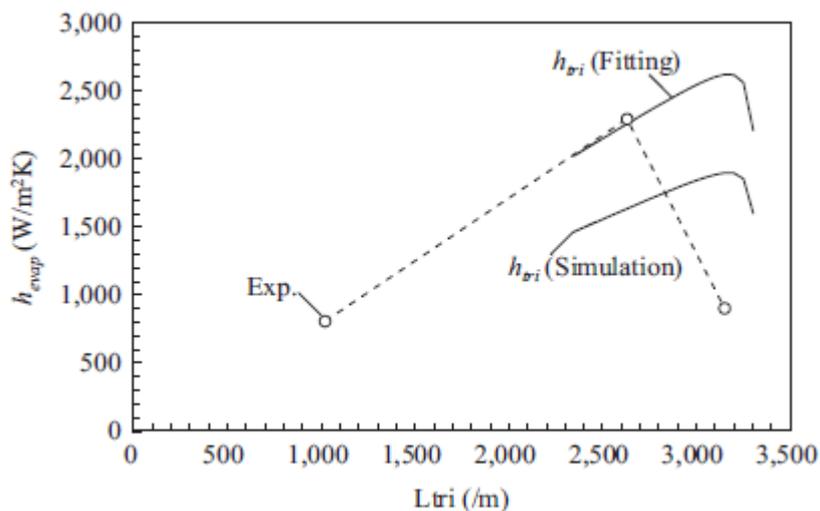


図 1 三相界線長さに対する蒸発器熱伝達率

「蒸発器内可視化とメニスカスを考慮した蒸発器解析」

実験装置

本研究の LHP 可視化実験装置は蒸発器内部の観察を行うにあたり，蒸発器ケース材料に透明な石英ガラス管を用いた（図 2）．加熱は非接触で遠赤外線ヒータにより行う．ウィックの材料は石英ガラス多孔体（平均細孔半径 $3.5\ \mu\text{m}$ ）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た．実験では各点の温度変化を計測し蒸発器では一眼レフカメラにより内部

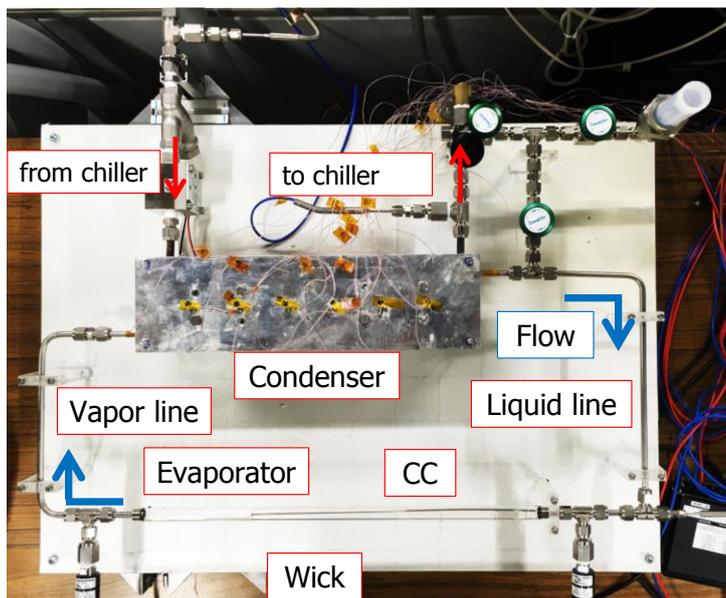


図 2 LHP 蒸発器可視化実験装置

の流動を観察した．凝縮器では冷媒（エチレングリコール）により冷却された Cu および Al プレートで管を挟み込み冷却することにより排熱を行い，排熱量を算出した．

解析モデル

本研本研究で扱う計算領域を Fig.2 に示す．大きさが $4.0 \times 3.5 (L_x \times L_y)$ の蒸発器ケース，ウ

ウィック，グループから成る蒸発器周期構造の一周期分である．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，三相界面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，三相界面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連続の式，ダルシー則，ウィックおよび蒸発器ケースを熱伝導方程式で表現し，温度および圧力を計算した．三相界面におけるメニスカスは界面での圧力差よりラプラスの式より曲率半径を計算しメニスカス形状を計算し図3に示すモデルより熱伝達率を算出した．

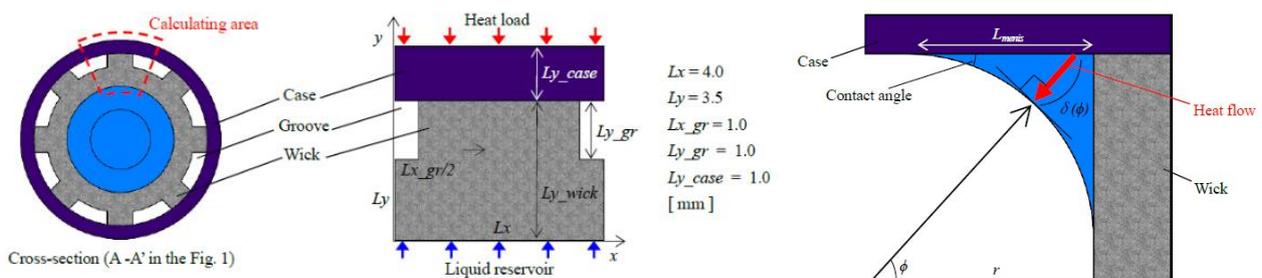


図3 LHP 蒸発器解析の計算領域

遠赤外線セラミックヒータの出力が 180 W のときの，三相界面の観察結果を図4に示す．(a)作動流体を封入する前は，明らかながらメニスカスは存在し得ない．(b)作動流体を封入した直後では，ウィックが液相で満たされ，三相界面にはメニスカスが形成されていることが確認できる．このときのメニスカス長さは，190 μm であった．熱負荷を与えてから(c)8分経過時は，メニスカス長さが 70 μm に縮小している．その後，(d)12分経過時とそれ以降のメニスカス長さは，数 μm から 400 μm の間で周期的に変化した．撮影した画像の空間分解能が 10 μm 程度であり，それ以下の測定は不可能であった．また，(b)作動流体を封入した直後では確認されなかった CC 内の気液界面が，(c)8分経過時に確認され，(d)12分経過時には気相領域が拡大している様子が確認できる．

構築した計算モデルと実験で得られたメニスカス長さを用いて，蒸発メニスカスが蒸発器性能に与える影響を調査した．計算条件は，熱輸送量とグループ及び CC の圧力をフィッティングさせた．メニスカス長さは，観察された最小値 10 μm 及び最大値 400 μm を用いる．

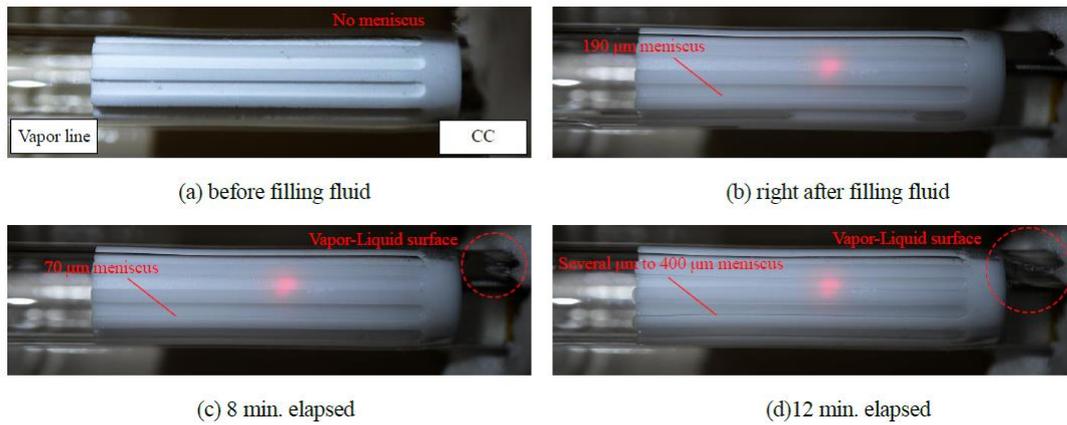


図 4 三相界線におけるメニスカス挙動の観察画像

接触角は 45° と仮定した。メニスカスなし，最小及び最大のメニスカスがあるときの蒸発器内の温度分布を図 5 に示す。すべて，蒸発器ケース最上部で最高温度となり，ウィック・グループ界面で最低温度となった。蒸発メニスカスの影響によって，最高温度は (a) 54.4°C から (b) 51.0°C ，(c) 50.6°C に低下した。(b) と (c) の差は 0.4°C と小さい。蒸発器の熱伝達率は，全体の蒸発器全体の熱抵抗から蒸発器ケースの熱伝導による熱抵抗を引いたものを考えた。蒸発器の熱伝達率は，(a) $717\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ，(b) $1,032\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ，(c) $1,075\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ であった。いずれも，実験での $560\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ より高かった。蒸発メニスカスによって高温な蒸発器ケースから直接グループに熱伝達が行われ，蒸発器の熱伝達率が 44-50% 程度増加した。また，このときの蒸発メニスカスにおける熱コンダクタンスは，(b) $1.58\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ ，(c) $2.02\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ であった。メニスカス長さは，(b) 最小値 $10\ \mu\text{m}$ と (c) 最大値 $400\ \mu\text{m}$ では 40 倍の差があるが，熱コンダクタンスではそれほど差はない。

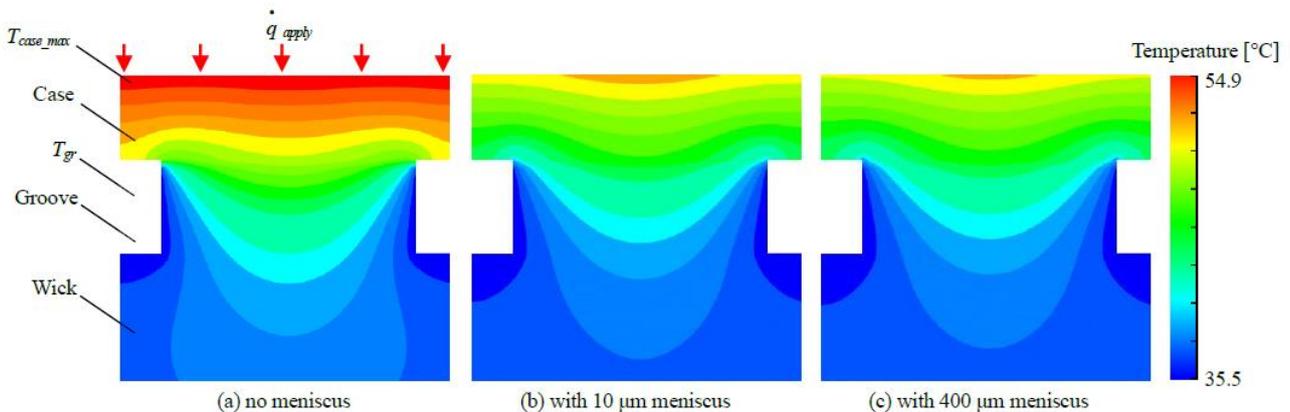


図 5 温度分布の解析結果

「結論と今後の予定」

本研究では、LHP 蒸発器の形状最適化理論を構築するため、三相界線長さのみをパラメータとして蒸発器熱伝達率を定式化した。結果、熱伝達率はある三相界線長さで極大となることが理論と実験によって明らかになった。さらに三相界線における熱輸送機構を詳細にするため、蒸発メニスカスの影響を考慮した LHP 蒸発器の 2 次元数学モデルを作成し、さらに透明ガラス管蒸発器を有する LHP を構築し、蒸発メニスカスを観察した。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、メニスカス厚さは冷却条件によって 1 秒未満の周期で振動するが観察され、メニスカスは 10 - 400 μm の範囲で振動していた。蒸発メニスカスを考慮することで蒸発器の熱伝達率は増加した。蒸発器の性能予測で、蒸発メニスカスを考慮する重要性が示された。

本助成に関わる成果物

[論文発表]

[1]. 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.

(査読有)

[口頭発表]

[2]. 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. (口頭, 査読)

[3]. 大谷 浩輔, 上田 洋佑, 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 22 日. (口頭・査読なし)

[ポスター発表]

なし

[その他]

なし