

[2024105102]

## 中性子ラジオグラフィによる新型ヒートパイプの内部流動可視化

### Neutron Radiographic Visualization of Internal Flow in a Novel Heat Pipe

麓耕二<sup>#,A)</sup>, 大島章太朗<sup>A)</sup>, 千葉陸志<sup>A)</sup>, 畑本明彩未<sup>A)</sup>  
Koji Fumoto<sup>#,A)</sup>, Shotaro Oshima<sup>A)</sup>, Atsushi Chiba<sup>A)</sup>, Asami Hatamoto<sup>A)</sup>  
<sup>A)</sup> Aoyama Gakuin University

#### Abstract

The demand for efficient thermal management has increased with the continued miniaturization and performance improvement of electronic devices. A meander-shaped low-fill heat pipe (MLFHP) has attracted attention as a passive heat transfer device that operates without external power. Although the MLFHP demonstrates excellent thermal performance, its underlying heat transfer mechanisms remain unclear. To investigate its internal flow behavior, we employed neutron radiography. Experiments were conducted using two types of working fluids, water and ethanol, to evaluate the effect of fluid properties. The visualization results showed that ethanol initiated liquid slug motion at low heat input, while water exhibited more stable and widespread motion under higher heat input. These results suggest that the thermal performance of the MLFHP depends on the combined effects of working fluid properties and heat input conditions.

**Keyword:** Heat Pipe, Low Filling Ratio, Neutron Radiography

#### 1. はじめに

電子機器の小型化・高性能化に伴い、機器内部の発熱量は増加しており、より高効率な冷却技術の開発が求められている。近年、電力を使用しない受動的な放熱デバイスとして自励振動型ヒートパイプ (Pulsating heat pipe: PHP) が注目されている(1)。PHP は、減圧された 1 本の蛇行流路内に 50 vol.% 程度の作動流体を充填した構造を持ち、一般的に加熱部、断熱部、および冷却部から構成される。加熱部での蒸発と冷却部での凝縮により流路内に圧力変動が生じる。この圧力変動によって液スラグが駆動し、自励振動することで、潜熱および顕熱を利用した高効率な熱輸送が実現される。

本研究では、Fumoto ら(2)によって開発された蛇行型低充填ヒートパイプ (Meander-shaped low-fill heat pipe: MLFHP) を対象とした。MLFHP は一辺 1.26 mm の正方形断面を有する流路を 28 本備えたアルミニウム製扁平多穴管により構成される。流路構造は PHP と類似しているが、作動流体の充填率は、一般的な PHP でドライアウトが発生するとされる 10 vol.% と極めて低く設定されている。低充填率にも関わらず、MLFHP は従来型 PHP と比較して、最小熱抵抗値および有効熱伝導率において優れた値を示している。しかしながら、その作動原理や熱輸送機構の詳細は未だ明らかになっていない。

そこで本研究では、MLFHP 内部の熱輸送現象を解明することを目的に、中性子ラジオグラフィによる内部流動の可視化実験を実施した。この手法は X 線撮影に類似した非破壊可視化技術で、中性子線を用いて物質の透過画像を得る手法である(3)。中性子線はアルミニウムを透過し、作動流体中の水素で強く減衰されるため、流動を妨げることなく内部の流体を可視化できる。本研究では、水およびエタノールの 2 種類の作動流体を用いて、流体特性の違いが内

部流動に与える影響を評価した。

#### 2. 実験装置および実験方法

##### 2.1 実験装置

本実験は、日本原子力研究開発機構の熱中性子ラジオグラフィ設備(TNRF)にて実施した。図 1 に実験装置系統図を示す。実験では、2 本の MLFHP とヒーター等から構成される試験部に中性子線を照射し、透過した中性子線をシンチレータにより可視光へ変換した。変換された可視光はイメージインテンシファイアを介して、高速度カメラ（画素数：1024×1024 pixel, 撮影速度：125 fps）により撮影した。冷却方法は自然空冷とし、加熱部にはアルミブロックに挿入したカートリッジヒーターに電圧を印加して加熱を行った。また、MLFHP とアルミブロックとの接触熱抵抗を低減するため、両者の間にシルバークリスを塗布した。熱損失を抑制するため、冷却部を除く MLFHP 全体をセラミックウールで覆い、その上からアルミ箔を巻いて固定した。設置姿勢は、加熱部が下方にある垂直ボトムヒート姿勢とした。

図 2 に、実験で使用した MLFHP の概略図および熱電対位置を示す。MLFHP は全長 100 mm, 幅 48 mm, 厚さ 2 mm の扁平多穴管で構成され、内部には一辺 1.26 mm の正方形断面を持つ流路が 28 本配置されている。本実験では、MLFHP 中央に位置する流路に K 型熱電対を 2 点取り付け、その点を代表温度として熱輸送性能を評価した。

##### 2.2 実験方法

以下に実験の手順および条件を示す。真空ポンプを用いて作動流体の脱気および MLFHP 内部の排気を行った。その後、所定量の作動流体を充填し、付属のバルブを閉じて真空状態を保持した。本実験における作動流体の充填率は式(1)により定義し、本実

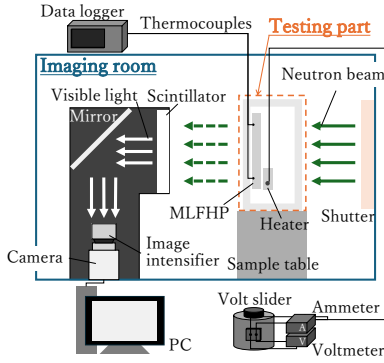


Fig. 1. Schematic diagram of experimental setup.

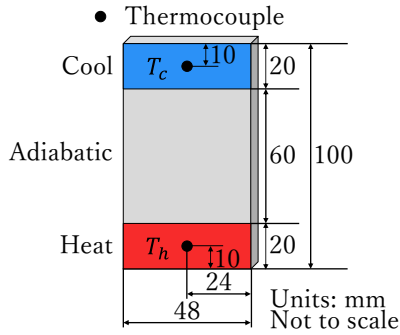


Fig. 2. Schematic of MLFHP and locations of thermocouples.

験では 10 vol.%に設定した.

$$FR = (V_{\text{fluid}}/V_{\text{HP}}) \times 100 \text{ [vol. \%]} \quad (1)$$

ここで,  $V_{\text{HP}}$  [mm<sup>3</sup>]は MLFHP の流路体積,  $V_{\text{fluid}}$  [mm<sup>3</sup>]は充填した作動流体の体積を表す.

作動流体充填後, MLFHP にヒーター, K 型熱電対, 断熱材を取り付け, 撮影室内の試料台に設置した. ヒーターには変圧器を介して電力を供給した. 測定温度が定常状態に達した後に中性子線を照射し, 撮影を行った. 本研究では, 温度変化が 5 分間で 1 K 以内に収まった状態を定常状態と定義する. 入力電力は 0 W から段階的に増加させ, 各入力条件で撮影を行った. なお, 安全上の観点から, 加熱部の温度が 130 °C 付近に到達した時点で実験を終了した. 実験条件の詳細を表 1 に示す. 熱輸送性能の評価には, 式(2)より算出した熱抵抗値を用いた.

$$R = (T_h - T_c)/Q \quad (2)$$

ここで,  $T_h$  [°C]は加熱部の温度,  $T_c$  [°C]は冷却部の温度,  $Q$  [W]は入力電力を表す.

| Table 1. Experimental parameters. |                           |
|-----------------------------------|---------------------------|
| Working Fluid                     | Water, Ethanol            |
| Fill rate [vol.%]                 | 10                        |
| Input power [W]                   | 0, 1.0, 1.5, 5.0, 7.5, 10 |

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 熱輸送性能の評価

図 3 に作動流体として(a)水, (b)エタノールを用いた場合の, MLFHP 作動中における加熱部および冷却部の時系列温度変化を示す. 図 3(a)より, 水では入力電力の増加に伴い温度差が縮小し, 10 W 時には 0.3 K まで低下した. 一方, 図 3(b)より, エタノールでは 5.0 W で温度差が最小の 0.8 K となったが, それ以降は再び拡大し, 最終的には 2.0 K に達した. 図 4 に, 各作動流体における熱抵抗値の変化を示す. 1.0 W では両作動流体に大きな差は見られなかったが, 1.5 W ではエタノールの方が低い熱抵抗値を示した. 一方, 5.0 W 以上では水の方が低い熱抵抗値を示した. 以上より, エタノールは低入熱域では水と同等かそれ以上の熱輸送性能を有するが, 高入熱域では水がより優れていることが確認された.

#### 3.2 中性子ラジオグラフィによる作動流体の可視化

中性子ラジオグラフィにより MLFHP 内部の作動流体を可視化し, 作動流体の種類および熱入力条件

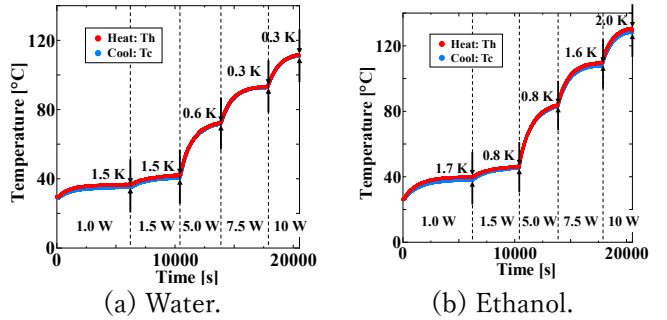


Fig. 3. Temperature-time history of the MLFHP.

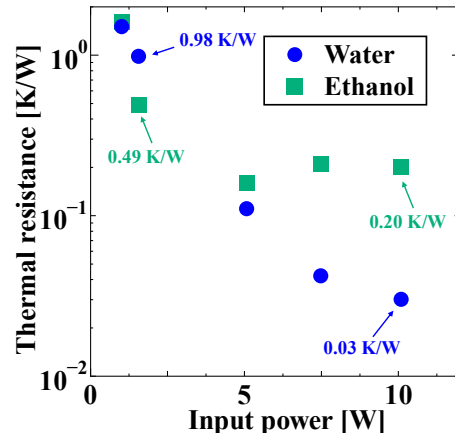


Fig. 4. Variation of thermal resistance with input power.

による違いを評価した。なお、取得した可視化画像は、視認性を高めるためコントラスト補正を施している。

### 3.2.1 低入熱域(1.0-1.5 W)

図5に、入力電力1.5 W時の作動流体分布を示す。図5(a)は水、図5(b)はエタノールを作動流体に用いた結果である。中性子線の減衰により、液相が黒く可視化されている。いずれの場合も、液体は重力により下部に滞留していた。液体の挙動に注目すると、水では液体が静止しており、液スラグの移動は観察されなかった。一方、エタノールでは一部の流路において、液スラグが上昇する様子が観察された。

図6に、エタノールを用いた際の液スラグの挙動を示す。これは、図5(b)に示した破線領域を抽出し、5秒間の連続画像として整理したものである。時間経過に伴い、加熱部付近の液スラグが上昇し、上部に滞留する液スラグと合体する様子が見られた。これは、加熱部における蒸発により局所的な圧力勾配が生じ、液スラグが駆動されたと推察される。エタノールの蒸発潜熱(855 kJ/kg)は水(2257 kJ/kg)に比べて小さく、同じ熱入力でもより蒸発しやすいため、低入熱域でも作動したと考えられる。この挙動は図4に示す1.5 W時の熱抵抗値の低下とも一致している。

### 3.2. 中性子ラジオグラフィによる作動流体の可視化

中性子ラジオグラフィにより MLFHP 内部の作動流体を可視化し、作動流体の種類および熱入力条件による違いを評価した。なお、取得した可視化画像は、視認性を高めるためコントラスト補正を施している。

#### 3.2.1. 低入熱域(1.0-1.5 W)

図5に、入力電力1.5 W時の作動流体分布を示す。図5(a)は水、図5(b)はエタノールを作動流体に用いた結果である。中性子線の減衰により、液相が黒く可視化されている。いずれの場合も、液体は重力により下部に滞留していた。液体の挙動に注目すると、水では液体が静止しており、液スラグの移動は観察されなかった。一方、エタノールでは一部の流路において、液スラグが上昇する様子が観察された。

図6に、エタノールを用いた際の液スラグの挙動を示す。これは、図5(b)に示した破線領域を抽出し、5秒間の連続画像として整理したものである。時間経過に伴い、加熱部付近の液スラグが上昇し、上部に滞留する液スラグと合体する様子が見られた。これは、加熱部における蒸発により局所的な圧力勾配が生じ、液スラグが駆動されたと推察される。エタノールの蒸発潜熱(855 kJ/kg)は、水(2257 kJ/kg)に比べて小さく、同じ熱入力でもより蒸発しやすいため、低入熱域でも作動したと考えられる。この挙動は図4に示す1.5 W時の熱抵抗値の低下とも一致している。

#### 3.2.2. 高入熱域(7.5-10 W)

図7に、入力電力10 W時の作動流体分布を示す。図7(a)は水、図7(b)はエタノールを用いた結果であ

る。また、図8には、図7(a),(b)に示した破線領域を抽出し、それぞれ5秒間の連続画像として整理して示した。

図からわかるように、エタノールでは、流路の大部分が気相で占められていた。これは、熱入力の増加に伴って蒸発が過剰となり、冷却部からの液体の還流が追いつかず、乾燥領域が拡大したためと考えられる。液相は左から6本の流路にのみ分布していた。そのうち5本の流路で液スラグの移動が観察された。一方、水では液相が複数の流路に広く分散しており、そのうち8本の流路で液スラグの移動が確認された。このことから、水ではエタノールよりも多くの流路を介して潜熱輸送が行われていたと考えられる。水は蒸発潜熱が高いため急激な気化が抑制され、加熱部に液相が保持されやすく、結果として蒸発と凝縮のサイクルが安定して継続されたと推察される。

これらの可視化結果は、図4に示された熱抵抗値の傾向とも一致する。すなわち、高入熱域では水の方が低い熱抵抗値を示し、より安定した熱輸送を実現していることが確認された。

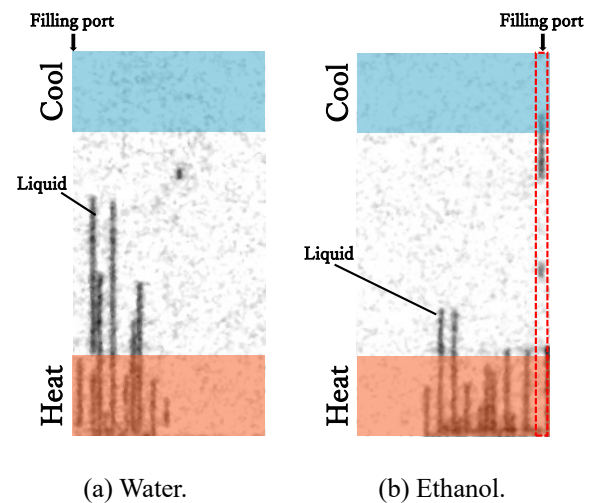


Fig. 5. Neutron radiographs of the MLFHP at 1.5 W.

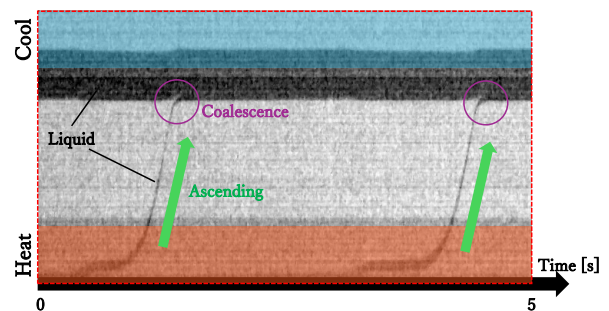


Fig. 6. Sequential images of liquid slug motion at 1.5 W.

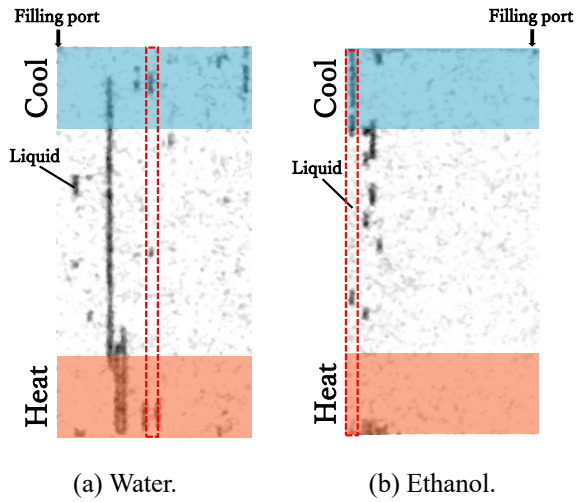


Fig. 7. Neutron radiographs of the MLFHP at 10 W.

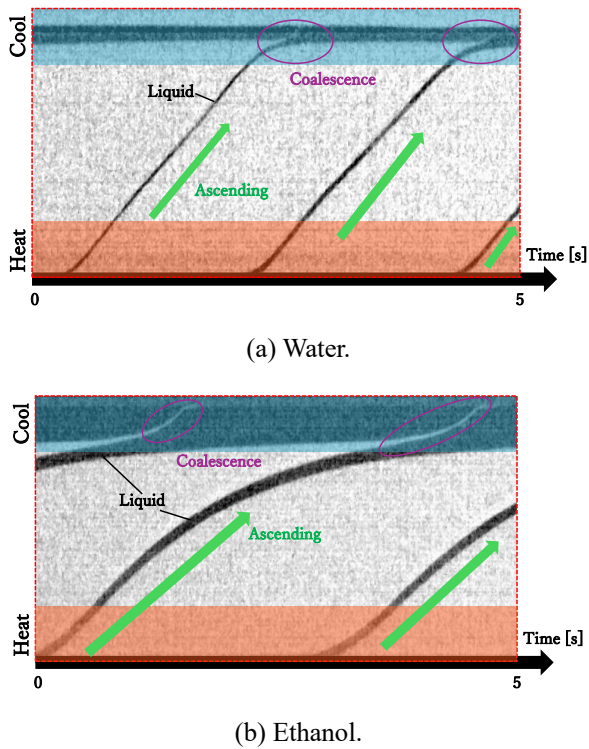


Fig. 8. Sequential images of liquid slug motion at 10 W.

#### 4. 結論

中性子ラジオグラフィを用いて MLFHP 内部の流動を可視化し、作動流体の種類が熱輸送性能および流動特性に与える影響を評価した。得られた知見は以下の通りである。

- (1) エタノールを作動流体に用いた場合、水よりも低い入力熱量で作動を開始した。
- (2) 水を作動流体に用いた場合、高い入力熱量でも安

定した作動が維持された。

- (3) MLFHP の熱輸送性能および流動特性は、作動流体の物性と熱入力条件に依存する。

#### 参考文献

- (1) Akachi, H., Structure of a heat pipe, U.S. patent#4, 041, 921, 1990.
- (2) Fumoto, K., and Ishii, K., Flat plate pulsating heat pipe operating at ultra-low filling ratio, Appl. Therm. Eng., Vol. 228, 120468, 2023.
- (3) 小林 久夫, 中性子イメージング概論, Radioisotopes, Vol. 56, No. 4, pp. 207-210.