

[2024105104]

## 中性子ラジオグラフィによる混相流機器内熱流動の 可視化・計測に基づく現象解明と性能評価

### Elucidation of the Phenomena and the Performance Evaluation of Thermo-Fluid Dynamics in Multiphase Flow Equipment based on Visualization and Measurement by Neutron Radiography

浅野等<sup>#A)</sup>, 村川英樹<sup>A)</sup>, 杉本勝美<sup>A)</sup>, 丸山拓人<sup>A)</sup>, 佐伯宗一郎<sup>A)</sup>, KIM Jaehoon<sup>A)</sup>  
原山勲<sup>B)</sup>, 栗田圭輔<sup>B)</sup>, 飯倉寛<sup>B)</sup>

Hitoshi Asano<sup>#A)</sup>, Hideki Murakawa<sup>A)</sup>, Katsumi Sugimoto<sup>A)</sup>, Takuto Maruyama<sup>A)</sup>,  
Soichiro Saeki<sup>A)</sup>, Jaehoon Kim<sup>A)</sup>, Isao Harayama<sup>B)</sup>, Keisuke Kurita<sup>B)</sup>, Hiroshi Iikura<sup>B)</sup>

A) Department of Mechanical Engineering, Kobe University

B) Japan Atomic Energy Agency

#### Abstract

Since performance of energy equipment is highly dependent on the flow characteristics of the working fluid, an understanding of flow behavior is necessary to design or improve such equipment. In energy systems, as working fluids are flowing as gas-liquid two-phase mixtures to increase energy transfer density using the latent heat of vaporization. However, since actual equipment are made from opaque metal, it is difficult to visualize flow behaviors. Neutron radiography is effective for flow visualization of gas-liquid two-phase mixtures in a metallic vessel under operating conditions because attenuation coefficient of neutron is low for most metals and is high for hydrogen, which is often included in working fluids. This report presents the experimental results on behaviors of liquid-vapor two-phase flows in a small diameter circular channel and an oscillating heat pipe. The effect of channel orientation is discussed

**Keyword:** neutron radiography, flow visualization, vapor-liquid two-phase flow, void fraction, oscillating heat pipe

#### 1. はじめに

エネルギー機器ではエネルギー輸送密度増大のため作動流体の蒸発潜熱が利用されるが、伝熱部では沸騰・蒸発もしくは凝縮の相変化を伴い、エネルギー輸送部では気液二相流として流動する。圧力損失、熱伝達率に代表される機器性能は気液二相流の気液界面構造に強く依存することから、内部流動を把握することは、機器設計や性能改善に有効である。一方、地球温暖化抑制や世界情勢による化石燃料高騰を背景に、ヒートポンプによる熱供給が進められている。冷媒に強燃性である炭化水素を用いた機器が開発されているが、高性能化や冷媒充填量削減の観点から冷媒流路細径化による伝熱面積密度の増大、熱交換器における冷媒容積の削減が求められている。この場合には、冷媒二相流での気液界面構造は気液界面に作用する表面張力が支配的になると考えられる。本研究では、2024 年度の研究対象として細管内冷媒二相流と電子機器冷却用熱拡散素子である自励振動型ヒートパイプを扱った。以下それぞれに対する研究成果を報告する。

#### 2. 細管内冷媒二相流の流動特性に及ぼす重力の影響

##### 2.1 研究背景と目的

前述の通り、ヒートポンプで使用される熱交換器では冷媒流路の細径化が進められている。冷媒流路が細くなれば流動抵抗が増大するため冷媒流路を多パスに分岐することが必須となる。多数の流路に分配するためヘッダーが用いられるが、ヘッダー部で

は同じ圧力で各パスに接続するため容積が大きく、気液二相流が流入する場合、ヘッダー内で相分離を起こす恐れがある。相分離は重力に起因するものであるから、熱交換器の設置姿勢の影響を受ける。そこで、熱交換器の性能予測、性能改善のため、熱交換部細径流路での冷媒二相流に及ぼす設置姿勢の影響を明らかにすることは有意義である。ここでは、積層型マイクロチャネル熱交換器を想定した内径 1 mm の細管に対し、鉛直上昇、鉛直下降、水平流で実験を行い、断面平均ボイド率に及ぼす重力の影響を評価した。

##### 2.2 実験装置と実験方法

実験装置は液冷媒をギアポンプで駆動、循環させるポンプルーブであり、ポンプ上流の枝管に熱式アキュムレータを接続することで系内圧力を安定させることができる。冷媒には JRR3 での実験実績がある HFC 系冷媒 R134 を用いた。実験装置構成は 2022、2023 年度の実験で使用したのと同じである<sup>[1]</sup>が、低流量に対応するためポンプおよび流量計を変更した。試験部は内径 1.0 mm、外径 2.0 mm のステンレス鋼製円管を加工して製作した。鉛直に設置した蒸気生成部から鉛直上昇流として気液二相流を試験部配管に供給し、配管を曲げることで水平流、鉛直下降流を形成した。蒸気生成部は冷媒流路にマイクロヒーターを挿入した構造である。

鉛直上昇流と水平流に対し、中性子ラジオグラフィで得られた可視化画像の一例を Fig.1 に示す。図中の赤枠がボイド率の計測範囲である。計測範囲中央が上流の直線部入口からそれぞれ(a) 130 mm, (b)

56 mm であり、流路の 50 倍の助走域を確保した。なお、鉛直下降流の場合は 92 mm であった。画素寸法は 38  $\mu\text{m}/\text{pixel}$  であり、露光時間 5 s で撮影した。

実験は質量流束 230, 300, 400  $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$  に対して、蒸気乾き度を 0.1 から 0.9 の範囲で変化させた。飽和温度は 20°C とし、表面張力に対する慣性力の比で定義されるボンド数は約 1.35 であった。

### 2.3 実験結果および考察

中性子ラジオグラフィで得られた可視化画像の各画素に対して、蒸気単相の画像との比較演算で中性子線照射方向の液厚さを計測した。液厚さに相当する値を管半径方向の位置に対して Fig.2 に示す。計測範囲内において管軸方向の平均値がプロットされている。質量流束 230  $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$  での実験結果である。水平流の場合、低い蒸気乾き度の条件で管底側の液膜厚さが厚くなる傾向が確認できる。

液単相流 ( $x = 0$ ) での液厚さの積分値を流路断面積として各条件での液厚さの積分値から断面平均ボイド率を計測した。質量流束 230  $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$  での計測結果を蒸気乾き度に対してプロットし、Fig.3 に示す。いずれの流動姿勢においても断面平均ボイド率は高乾き度になるにつれて高くなった。水平流の低蒸気乾き度の条件においても平均ボイド率に有意な差は見られなかった。平均ボイド率への流動方向の影響は小さかった。なお、この条件より高い質量流束 300, 400  $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$  でも、平均ボイド率への流路姿勢の影響は見られず、水平流においても液膜厚さ分布に重力の影響は見られなかった。

### 2.4 まとめ

内径 1.0 mm の細径管内の姿勢変化に伴う重力の影響は水平流において質量流束 230  $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$  で確認されたが、断面平均ボイド率への影響は小さかった。気液二相流の熱流動特性への流路姿勢の影響は小さいと期待される。

## 3. 自励振動ヒートパイプ内作動流体の液柱挙動の可視化・計測

### 3.1 はじめに

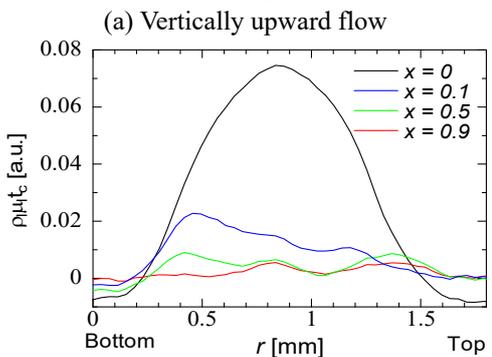
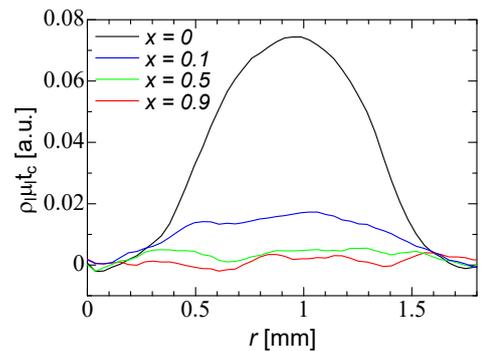
小型化・高密度化が進む電子機器冷却において高熱流束除熱に対応するため、受動的に動作する熱拡散素子として自励振動ヒートパイプ (Oscillating Heat Pipe, 以下 OHP とする) が注目されている。本研究では、自励振動ヒートパイプの熱輸送特性を解明し、その性能を改善することを目的としている。OHP の設置姿勢の影響に関するこれまでの研究により、可視化結果からトップヒート条件での性能劣化要因は、加熱部でのドライアウトではなく、凝縮部での液量増大による熱伝達低下であることが明らかとされた<sup>[2]</sup>。すなわち凝縮部で液相割合が高くなることで液柱振動が抑制されたのであり、凝縮速度に依存すると考えられる。そこで、2024 年度の実験では、凝縮部の冷却面温度および冷却面積を変化させた実験を行い、熱輸送特性への影響を評価した。

### 3.2 実験装置および実験方法

実験装置概要を Fig. 4 に示す。OHP は、幅 50 mm、長さ 200 mm、厚さ 2 mm のアルミニウム製扁平多孔管 (41 本の 0.8mm  $\times$  0.8mm の正方形流路) を使用し、隣接する流路を末端で交互に接続することで 1 本の蛇行流路が形成されている。作動流体はイソブタンであり液相体積割合 62% で封入されている。加熱部は銅ブロックを介してセラミックヒーターで加熱され、冷却部には冷却材流路が加工されたアルミブロックが設置された。冷却材には中性子線の減衰が小さいフッ素化炭素 FC3283 を使用した。加熱部、断熱部、冷却部の長手方向中央にそれぞれ 3 ヶ所、外壁面に熱電対を設置した。実験では、冷却液温度 (10°C, 20°C, 30°C, 40°C)、冷却部長さ (40 mm, 80 mm)、加熱量 (20W  $\sim$  180W, 20W 刻み)、設置姿勢 (ボトムヒート、トップヒート、水平) を変化させた。なお、中性子ラジオグラフィの実験では、水平配置はヒートパイプを鉛直面に設置し、加熱部と冷却部を同じ高さとした配置である。



(a) Vertically upward flow (b) Horizontal flow  
Figure 1 Neutron radiograph



(a) Vertically upward flow (b) Horizontal flow  
Figure 2 Radial distribution of liquid thickness along the neutron beam.

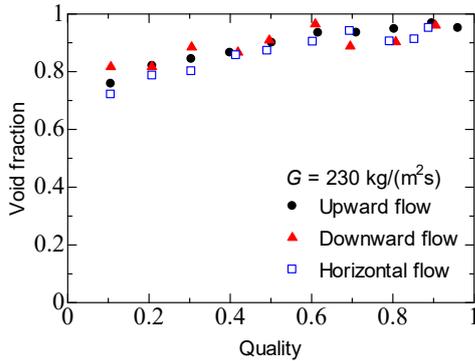


Figure 3 Cross-sectional average void fraction.

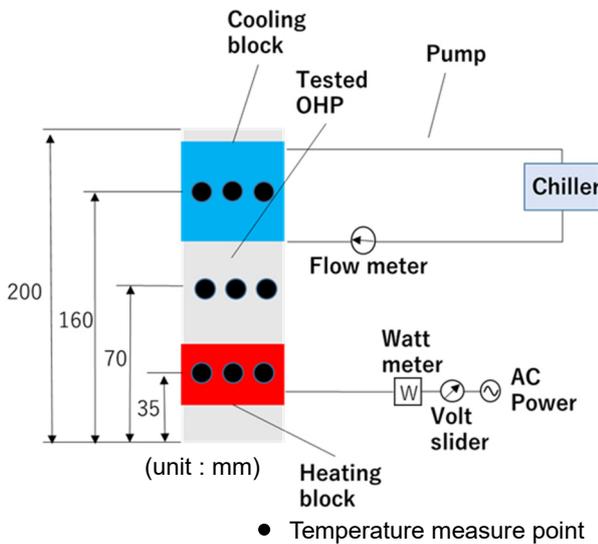


Figure 4 Experimental setup for OHP visualization.

### 3.3 実験結果および考察

各加熱量での有効熱伝導率を、冷却温度をパラメータとして Fig. 5 に示す。冷却温度が高いほど有効熱伝導率は増大した。凝縮速度が低下し、冷却部での液量が低下したため凝縮熱伝達が確保されるとともに、液柱振動の運動を阻害しなかったためと考えられる。

有効熱伝達率は加熱部と冷却部の壁温差で定義されるが、管内は飽和温度一定であり断熱部の壁温に等しいとして、熱輸送の経路を加熱部、冷却部に分けて熱抵抗を評価した。計測結果を Fig. 6 に示す。冷却部の熱抵抗は加熱部の熱抵抗よりも大きく、冷却温度の上昇によって低下することが確認された。冷却速度が低下したためである。一方、加熱部の熱抵抗は冷却温度影響をほとんど受けず、加熱量に対する変化も小さかった。

### 3.4 まとめ

OHP の熱輸送性能に強く影響するのは冷却部での液量であり、OHP の性能向上には冷却部の熱抵抗低減が重要であることが明らかとされた。流動可視化で得られた知見は OHP の設計及び運用において有効である。

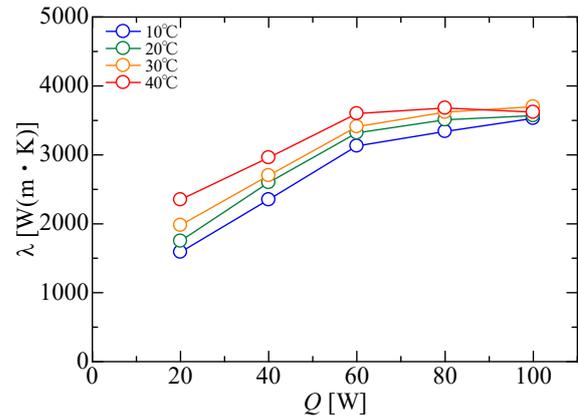


Figure 5 Effective thermal conductivity. (The length of cooling section: 40 mm, bottom heat)

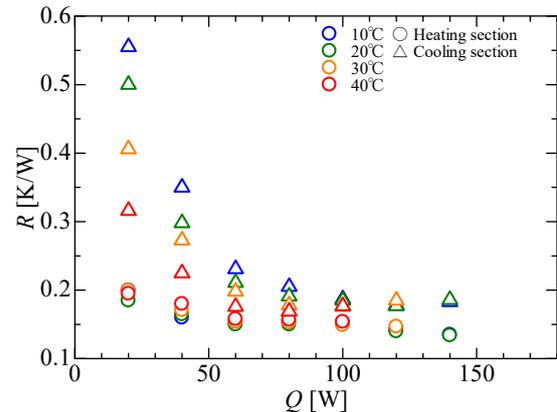


Figure 6 Effect of cooling temperature on heat resistance in heating and cooling sections.

(The length of cooling section: 40 mm, bottom heat)

### 参考文献

- [1] K. Kiyohara, H. Murakawa, K. Sugimoto, Y. Kubo, K. Kurita, H. Iikura, H. Asano, "Flow Behaviours and Void Fraction Distribution in Mini-Channel Cross-Flow Vaporizer", Proc. of 11th Int. Conf. on Multiphase Flow, #751 (2023).
- [2] 杉本, 谷口, 村川, 浅野, 栗田, 飯倉, "中性子ラジオグラフィによる流れの可視化に基づく自励振動ヒートパイプの熱輸送特性の評価", 第 60 回日本伝熱シンポジウム, G214 (2023).