

[2023105104]

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^{#,A)}, 村川英樹^{A)}, 杉本勝美^{A)}, 清原圭太^{A)}, 赤坂奎菜^{A)}, 岸村碧大^{A)}
原山勲^{B)}, 栗田圭輔^{B)}, 飯倉寛^{B)}

Hitoshi Asano ^{#,A)}, Hideki Murakawa ^{A)}, Katsumi Sugimoto ^{A)}, Keita Kiyohara ^{A)},
Keima Akasaka^{A)}, Aoto Kishimura ^{A)}, Isao Harayama ^{B)}, Keisuke Kurita ^{B)}, Hiroshi Iikura ^{B)}

A) Department of Mechanical Engineering, Kobe University

B) Japan Atomic Energy Agency

Abstract

In order to design or improve energy equipment, it is required to understand flow behaviors because the performance strongly depends on the flow characteristics of the working fluid. 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 because attenuation coefficient 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 mini-channel heat exchanger and an oscillating heat pipe.

Keyword: Neutron radiography, Flow visualization, Vapor-liquid two-phase flow, Void fraction, Mini-channel, Oscillating heat pipe

1. はじめに

エネルギー機器では作動流体の蒸発潜熱を利用したエネルギー輸送密度増大のため、その流れは沸騰・蒸発もしくは凝縮の相変化を伴う。すなわち、作動流体は気液二相流として流動することから、圧力損失、熱伝達率に代表される機器性能は気液界面挙動に強く依存する。本研究では、熱交換器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. ミニチャネル蒸発器内沸騰二相流の可視化とボイド率計測

2.1 研究背景と目的

カーボンニュートラルに向けて、さらなる省エネルギーが必要であり、熱供給の電化や排熱利用が推進されている。その中で熱交換器開発における重要な課題は、熱抵抗低減による熱交換温度差の低減である。熱伝達率の増大によって熱抵抗を低減できるが、熱伝達率の大幅な向上は困難であり、作動流体流路の小径化による伝熱面積密度の増大によって熱抵抗の低減が進められている。

このような熱交換器は、LNG や液体水素の気化器、ヒートポンプの蒸発器として期待されている。この場合、作動流体は液体で加熱され、蒸発流を形成する。この熱交換器は流路が小さく、高い伝熱面積密度を有するが、作動流体蒸発流の圧力損失低減のために多数の並行流路で構成される。加熱媒体は熱交換によって温度が低下するが、作動流体は飽和温度で一定であるので、加熱媒体の温度変化により局所

熱流束が変化し、流路間での相変化量の差による偏流が発生する懸念がある。これまでの熱媒加熱実験 [1] から、入口サブクール液で流入する場合には、流路のリブパターンを操作し、沸騰核生成を促進することで偏流を抑制する可能性があることが示された。ここでは、沸騰核生成の影響を把握するため、ヒーターによる加熱、すなわち等熱流束条件での実験を行い、沸騰開始点が及ぼすボイド率分布への影響を評価した。

2.2 実験装置と試験部

28本の並列流路からなる試験部をセラミックヒーターで加熱し、蒸発流を中性子ラジオグラフィで可視化、ボイド率分布を計測、評価した。冷媒には HFC-134a を使用した。実験装置は熱媒加熱実験と同じである [1]。流路は SUS 板に化学エッチングで加工され、その断面形状は半径 0.85 mm の半円形である。流路パターン (Fig. 1) はストレート型、パーフォレート型、オフセット型の 3 通りとした。試験部は鉛直面に設置され、サブクール液の冷媒が下端から供給された。冷媒の飽和温度を 28 °C、質量流束 G を 50 から 500 kg/(m²s) の範囲で設定した。加熱量は熱媒加熱実験での熱交換量に合わせて 200 W, 600 W とした。流路が設けられた領域でのヒーター設置面に対する熱流束はそれぞれ $q = 45.3, 136$ kW/m² となる。中性子ラジオグラフィ実験は研究炉 JRR-3 の熱中性子ラジオグラフィシステムで行った。試験部を透過した中性子線がシンチレータで可視光に変換され、可視画像が冷却型 CCD カメラで撮影された。露光時間は 8 秒、画素寸法は 56 μ m/pixel であった。

[2023105104]

2.3 実験結果と考察

冷媒質量流束 $G = 500 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 入口サブクール度 $\Delta T_{\text{subin}} = 5 \text{ K}$ において、加熱量 200 W (熱流束 $q = 45.3 \text{ kW}/\text{m}^2$) のときのボイド率分布をカラースケールで Fig. 2 に示す。各画素に対して計測された中性子線照射方向の平均ボイド率がプロットされている。流路下部の青い部分が入口ヘッダーであり、水平方向中央が流入口である。図中、黒色破線は冷媒均一分配を仮定した場合の熱力学的平衡乾き度が 0 となる地点である。また、図中赤点は各流路における断面平均ボイド率の流動方向分布から計測した沸騰開始点である。ストレート型 (Fig. (a)) では左右に大きな偏りが見られる。沸騰開始点のわずかな変化が各流路の圧力損失を変化させ、その結果、各流路で流量が異なる偏流が生じたと考えられる。等熱流束加熱であっても偏流が発生しうることが明らかとされた。一方、パーフォレート型 (Fig. (b)) とオフセット型 (Fig. (c)) では、ボイド率分布が均一化される傾向が確認できる。パーフォレート型では流路中央でボイド率が高くなっているが、オフセット型では解消されていた。隣接している流路であっても、ボイド率が大きく異なる箇所が見られることから、水平方向の液冷媒の移動によってボイド率分布が均一化されたわけではなく、リブ分断部での沸騰核生成促進が有効であったためと考えられる。

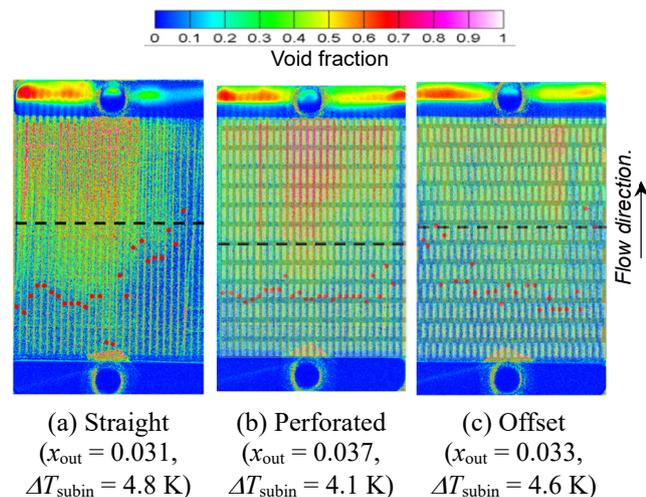
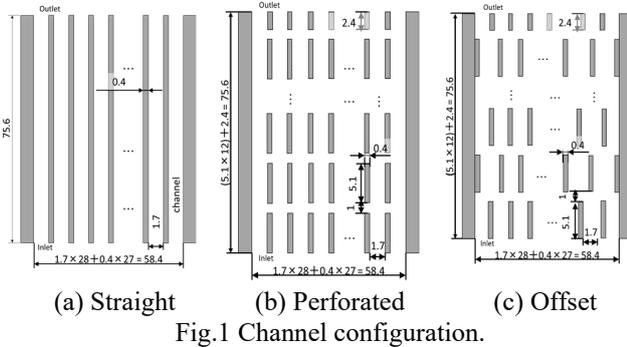


Fig. 2 Void fraction distribution.
($G = 500 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, $q = 45.3 \text{ kW}/\text{m}^2$)

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 研究背景と目的

近年、電子機器の高性能化・高密度化に伴い、電子部品の発熱密度が増大している。従来の冷却システムがもつ冷却能力不足、冷却機構の設置姿勢の制約などの問題に対して、作動流体の液柱振動によって効率的な熱輸送ができ、設置姿勢の影響が小さい自励振動ヒートパイプ (Oscillating Heat Pipe: 以下 OHP) が注目されている。このヒートパイプは蛇行細管で構成されており、封入された作動流体は液プラグを形成することから姿勢の影響はないとされていたが、これまでの我々の研究で高熱負荷時において熱輸送性能への設置姿勢の影響が確認された。垂直面に設置した場合、加熱部を下部にしたボトムヒートの方が加熱部を上部にしたトップヒートより熱輸送性能が高くなる結果を得た。この傾向は、一般的なヒートパイプでも見られる傾向であるが、その要因を明らかにするため、中性子ラジオグラフィによる可視化結果に基づき液柱振動の有無、存在する場合はその周期、振幅、などを評価した。一般的なヒートパイプやサーモサイフォンでは、加熱部への液の還流が重要とされ、性能低下は加熱部で液が欠乏し、伝熱面が乾くドライアウトが性能低下の要因とされていたが、2022 年度の実験では、その要因は加熱部でのドライアウトではなく、冷却部で液で満たされるフラッディングであることが示された。そこで、2023 年度の実験では冷却面を広くした実験を実施し、冷却面の面積の影響を評価した。

3.2 実験装置と試験部

実験装置の概略を Fig. 3 に示す。OHP の大きさは幅 50 mm 、長さ 200 mm 、厚さ 2 mm のアルミニウム製扁平多穴管で製作されており、内部には 41 本の矩形蛇行流路が形成されている。流路の断面は $0.8 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$ の矩形である。流路の両端は閉じられており開ループ型の OHP である。作動流体としてイソブタンが封入されている。事前実験において、OHP が周囲環境と熱平衡状態にある状態で、内部の冷媒の状態を中性子ラジオグラフィで可視化した。可視化画像では、作動流体が液プラグを形成していること、液プラグの両端が明確に判定できることを確認した。液プラグの長さから液体積を測定した結果、液体積割合は 62% であった。動作条件によって内部圧力は変化するが、液相は非圧縮であり体積変化を無視できるので冷媒充填率は体積割合で 62% と言える。加熱部はアルミニウム製ブロックで、カートリッジヒータを 2 本挿入し、印可電圧の制御で加熱量を設定した。冷却部はアルミニウム製多孔板で製作し、恒温槽で温度制御された冷却材を流すことで冷却した。冷却材には、中性子の減衰が大きい水素を含まない流体としてフロリナート FC3283 を使用し、 15°C で供給した。ヒートパイプは鉛直面に設置され、設置面に対して垂直方向、すなわち水平方向に中性子線を照射し、試験部を透過した中性子線をシンチレータ可視光に変換し、可視画像がイメージインテンシ

[2023105104]

ファイアを通して高速度カメラで撮影された。撮影条件は、フレームレート 500 fps、露光時間 1/500 sec とした。設置姿勢は、ボトムヒート、トップヒートに加えて、加熱部と冷却部を同じ高さとした水平姿勢とした。

加熱部、冷却部、そしてその間の断熱部の、長手方向中心において、幅方向 3ヶ所に素線径 0.1 mm の K 型熱電対を設置し、壁温を計測した。熱輸送性能は、有効熱伝導率として、加熱部と冷却部壁面温度差、計測点間距離、ヒートパイプの断面積で定義し、評価した。実験では、加熱量を 20 W から 140 W まで 20 W 刻みで上昇させ、各加熱量での定常状態における熱輸送性能を計測した。加熱部壁温の時間変化が 30 秒間で 1 K 以内を定常状態とし、熱輸送性能の評価では定常状態での 30 秒間の平均値を使用した。

2.3 実験結果と考察

OHP の設置姿勢ごとの有効熱伝導率の結果を Fig. 4 に示す。冷却部面積を増加させたことにより、設置姿勢による性能差が小さくなるとともに、すべての設置姿勢で有効熱伝導率が向上した。ボトムヒートでの有効熱伝導率の最大値は $\lambda=4937 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ であった。内部流動観察より得られた冷却部気相割合を Fig. 5 に示す。冷却部面積を増加させたことにより、水平姿勢、トップヒートでの気相割合が大幅に向上し、設置姿勢による差が小さくなった。

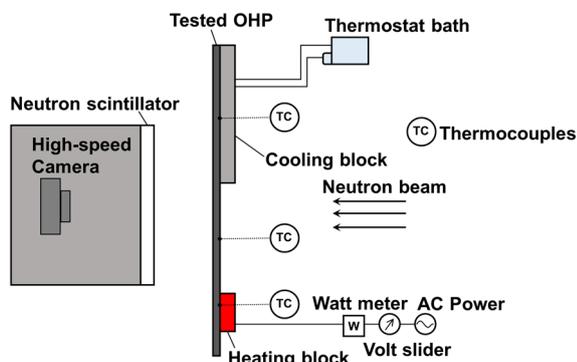


Fig. 3 Schematic diagram of experiment setup.

4. まとめ

2023 年度は、作動流体が相変化を伴うエネルギー機器としてミニチャネル熱交換器、自励振動ヒートパイプを対象とし、機器内の気液二相流を可視化・計測し、機器性能への影響を評価した。得られた結果を以下にまとめ記す。

ミニチャネル熱交換器

多数の並列流路有する熱交換器においてヒーター加熱とした場合のボイド率分布を計測し、等熱流束であっても偏流が存在することを明らかにした。入口条件をサブクール液とする場合、沸騰開始点の違いが流路間の圧力損失の差を生じさせ、それをきっかけとして偏流を引き起こしたと考えられる。オフセットもしくはパーフォレートの分断リブの適用は

分断部を通しての水平方向の冷媒移動ではなく、沸騰開始点を揃えることに効果的であった。

自励振動ヒートパイプ

トップヒートでの熱輸送性能低下の要因が、加熱部へ液供給量不足によるドライアウトではなく、冷却部での気相体積割合低下による液柱振動の抑制にあることが可視化結果より明らかにされた。また、冷却部の面積を大きくすることで、熱輸送性能が改善されることがわかった。

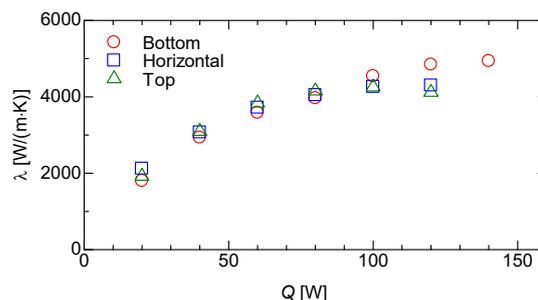


Fig. 4 Effective thermal conductivity.

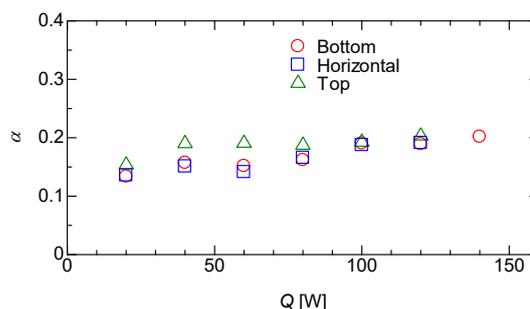


Fig. 5 Gas phase ratio in cooling section

参考文献

- [1] K. Kiyohara, H. Murakawa, K. Sugimoto, Y. Kubo, K. Kurita, H. Iikura, H. Asano, "Flow Behaviors and Void Fraction Distribution in Mini-Channel Cross-Flow Vaporizer", Proc. of 11th International Conference on Multiphase Flow, #751 (2023).
- [2] 杉本勝美, 谷口智哉, 村川英樹, 浅野等, 栗田圭輔, 飯倉寛, "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", 日本伝熱シンポジウム, G214 (2023).