

[課題番号] 22033

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)}, 谷口智哉^{A)}, 清原圭太^{A)}, 上野雄大^{A)}
栗田圭輔^{B)}, 飯倉寛^{B)}

Hitoshi Asano^{#A)}, Hideki Murakawa^{A)}, Katsumi Sugimoto^{A)}, Tomoya Taniguchi^{A)},
Keita Kiyohara^{A)}, Yuta Ueno^{A)}, 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 and the flows are often gas-liquid two-phase flows. 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 a component of working fluids. This report presents the experimental results on behaviors of liquid-vapor two-phase flows in printed circuit mini-channel heat exchangers and oscillating heat pipes.

Keyword: Neutron radiography, Flow visualization, Vapor-liquid two-phase flow, Void fraction, Mini-channel heat exchanger, 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。近年、機器の構造は、エネルギー利用効率向上やコンパクト化の観点から、より緻密に、複雑になる傾向にあり、実用機器での流動構造の解明が求められている。一方、流路が複雑になれば流動抵抗が増大するため、流路を並列にする必要がでてくるが、気液二相流の場合、液の偏流が発生する恐れがあり、大きな性能低下を引き起こすこともある。すなわち、混相流機器を設計、もしくは改良するには、機器内部の流動状態を実用もしくは実用に近い条件で把握しておく必要がある。しかし、一般の混相流機器は金属部材で構成されており、目で観察することは困難である。

中性子線は工業製品で利用される金属を良く透過し、作動流体に含まれることが多い水素で強く減衰するため、中性子ラジオグラフィは、混相流機器内の流動の診断に有効である。2022年度は、2021年度に引き続き多数の並行流路を有するステンレス鋼製拡散接合ミニチャネル熱交換器、アルミニウム製自励振動ヒートパイプを対象とし、それぞれの機器内の相変化を伴う気液二相流を可視化・計測した。得られた結果を報告する。

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

拡散接合で製作された積層型ミニチャネル熱交換器は、高耐圧と大きな伝熱面積密度の特長から液体水素や液化天然ガスのコンパクト気化器として注目されている。作動流体は加熱媒体による加熱で蒸発するが、作動流体と加熱媒体の流路の配置はFig. 1のように直交することが多い。作動流体温度は、圧力損失の影響を受けるものの飽和温度でほぼ一定であるが、加熱媒体の温度は熱交換によって低下するため熱交換温度差が変化し、熱流束が不均一となる恐れがある。そのため作動流体の各流路における相変化量が不均一となり、その結果作動流体に偏流が起これると考えられる。偏流は機器性能を大きく低下させるためその改善が求められる。2021年度は直交流型加熱媒体加熱実験において入口液単相流とした蒸発流を可視化、ボイド率分布を計測し、ボイド率分布には沸騰開始点が強く影響すると示唆される結果を得た。そこで、2022年度はヒーターによる等熱流束加熱実験を行い、熱流束分布の影響を評価した。

2.2 実験装置と試験部

中性子ラジオグラフィ実験は JAEA 研究炉 JRR-3 の熱中性子ラジオグラフィ設備 (TNRF) で行った。対象とする蒸発器の製品では、作動流体、加熱媒体それぞれの流路が加工されたステンレス鋼製薄板が交互に積層され、拡散接合によって一体化される。

[課題番号] 22033

各層には化学エッチングによって流路断面が半円形状の水力等価直径約 1 mm の並行流路が加工される。ここでは一つの層内での 28 本の並行流路 (長さ 75.6 mm) への流量分配を実験対象とした。熱媒加熱である場合、作動流体と加熱媒体の単層流路を流路が直交するように積層し、拡散接合で製作したステンレス鋼製試験部を使用した。一方、ヒーター加熱とする場合の試験部構造の概略を Fig. 4 に示す。冷媒流路が加工された SUS 薄板の背面側に熱拡散用のアルミ板 (厚さ 2 mm) をはさんでセラミックヒーターを設置した。ヒーターを設置した側の流路外壁温度は K 型熱電対で格子状に 9 カ所 (Fig. 4 中、●印) で計測した。

冷媒入口圧力は 0.608 MPa (飽和温度 22 °C), 入口サブクール度 2 K, FC3283 は 70 °C で供給した。作動流体の質量流速は 100~500 kg/(m²·s) の範囲で、ヒーターの加熱量は流体加熱の熱交換量と同様になるよう 200 もしくは 600 W とした。

蛍光コンバータ上の可視画像をヒーター加熱実験では冷却型 CCD カメラ (画素数 2048×2048 pixel, 画素寸法 56 μm, 露光時間 8 s) で撮影した。なお、流体加熱実験では、高速度カメラ (画素数 1024×1024 pixel, 125 fps, 露光時間 1/125 s) で 1 条件につき 5000 枚撮影した。撮像システム固有の輝度変化を補正し、満液および蒸気のみ画像を用いて熱交換時の沸騰二相流の画像からボイド率分布を計測した。撮影画像の画素寸法は冷却型 CCD カメラで 56 μm、高速度カメラで 157 μm であった。

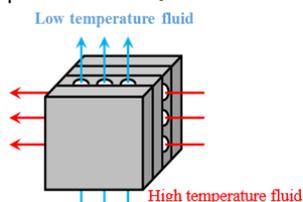


Figure 1. Schematic Configuration of Diffusion Bonded Printed Circuit Heat Exchanger.

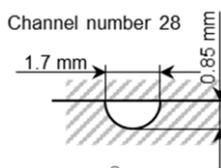


Figure 2. Cross-section of HFC-134a Channel.

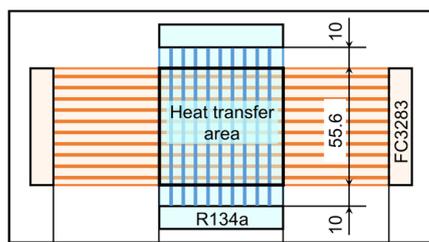


Figure 3. Channel Arrangement for Heating Experiments with heating medium.

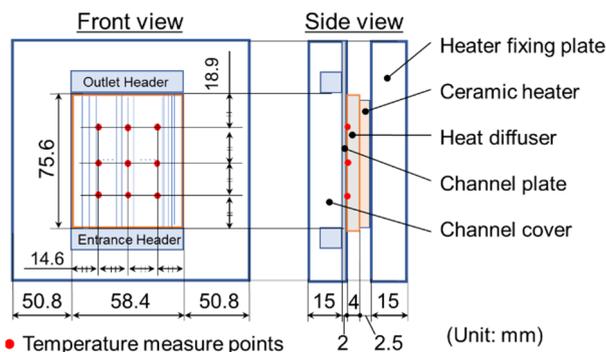


Figure 4. Test Section Configuration for Heating Experiments using Ceramic Heaters.

2.4 実験結果と考察

流体加熱とヒーター加熱でボイド率分布を比較する。作動流体質量流速 500 kg/(m²·s)、加熱媒体質量流速 921 kg/(m²·s) (Fig. 5(a))、ヒーター加熱量 200 W (Fig. 5(b)) でのボイド率分布を Fig. 5 に示す。全体の熱交換量はほぼ同じである。左図 (Fig. (a)) は、時間平均画像 (100 枚) に対する結果である。冷媒は図中下から上に流れ (鉛直上昇流)、流体加熱の場合、加熱媒体は図中、右側から供給される。流体加熱では加熱媒体入口側である右側でボイド率が高い傾向を示している。一方、ヒーター加熱ではボイド率分布の偏りが抑制されている。流体加熱では、右側で加熱媒体との温度差が大きくなるため、左側で沸騰開始点が遅れて偏流が発生したと考えられる。ヒーター加熱では、左右で熱流束に差がなく、沸騰開始点がそろったため偏流が発生しなかったと考えられる。また、ヒーター加熱において左右両端のボイド率が低くなる傾向が確認されるが、試験部の構造の違いによる。流体加熱の場合、伝熱面の範囲外からの構造体を通しての加熱によって熱流束が高くなったと考えられる。

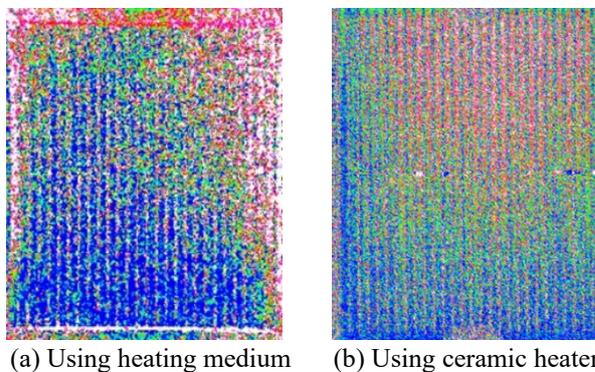


Figure 6. Void fraction distribution at refrigerants mass flux of 500 kg/(m²·s) (heating conditions: heat medium mass flux of 921 kg/(m²·s) in Fig. (a) and heater power of 200 W in Fig. (b)). Heating rate was almost the same.

[課題番号] 22033

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

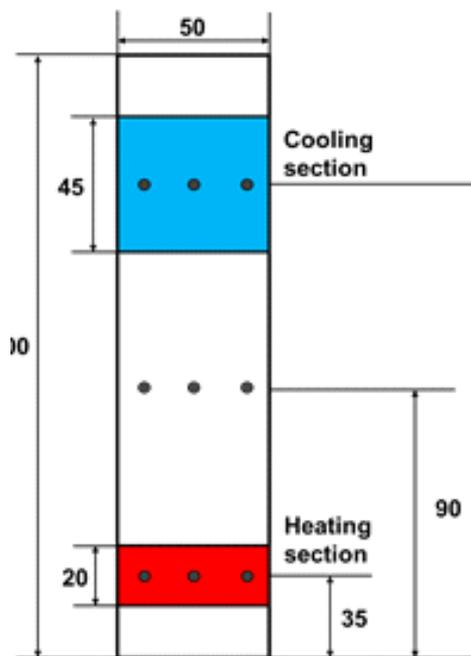
自励振動ヒートパイプ (Self-Oscillating Heat Pipe : 以下、OHP とする) は 1 本の細い流路を加熱部と冷却部の間で蛇行させた形状のヒートパイプである。作動流体は細管内で液プラグを形成し、加熱部および冷却部での蒸発と凝縮に起因する圧力差で液プラグが運動、自励振動が発生し、その液プラグの振動によって効果的な熱輸送が行われる。熱輸送がこの液プラグの振動によるため設置姿勢に対する重力の影響は従来のヒートパイプに対して比較的小さく、様々な設置姿勢で利用できると期待されている。従来、熱輸送特性に及ぼす設置姿勢、冷媒封入率などの影響について研究が行われているが、内部流動との相関、すなわち熱輸送メカニズムについて不明瞭な点が多く、液柱振動の周期、振幅などの定量計測と熱輸送性能の相関の解明が求められている。ここでは、アルミニウム製自励振動ヒートパイプの計測結果を示す。

3.2 実験装置及び実験方法

可視化対象である OHP の形状を Fig. 6 に示す。アルミニウム製扁平多穴管の端末処理で両端が閉じられた蛇行流路が形成されている。冷媒としてイソブタンが封入されている。OHP の外寸は、長さ 200 mm×幅 50 mm×厚さ 2 mm、蛇行させた流路数は 41 本である。流路断面形状を Fig. 7 に示す。流路は $\square 0.8$ mm の正方形流路である。

OHP はアルミニウム板にシリコンシートをはさんで固定され、L 字型のスタンドによって鉛直面に固定された。加熱ブロックと冷却ブロックはアルミニウム製であり、接触面にシルバークリースが塗布され、締付板によって OHP に固定された。加熱ブロックは、幅が OHP と同じ 50 mm、長手方向 20 mm であり、2 本のカートリッジヒーター (200 V, 170 W) が設置された。一方、冷却ブロックは、長手方向 45 mm であり、ブロック内部には冷却材流路が加工されている。冷却材には中性子線に対して透明な FC3283 を用い、恒温槽によって 15°C 一定で循環させた。試験部は固定板を含めて断熱材で覆われた。

有効熱伝導率の計測のため OHP 外壁面には、Fig. 6 に示す 9 カ所に素線径 0.1 mm の K 型熱電対を設置し、壁温を計測した。試験部の設置姿勢は、加熱ブロックが下側になるボトムヒートと 180°反転させたトップヒート、そしてヒートパイプは鉛直面内にあるが、加熱部と冷却部が水平になるように配置された水平配置の 3 通りとした。



● Temperature measure points (unit: mm)

Figure 6. Configuration of Tested OHP.

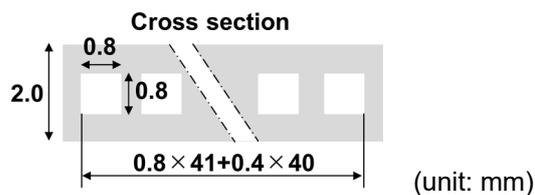


Figure 7. Channel Cross-section

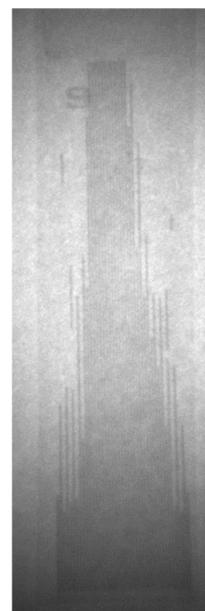


Figure 8. Original Neutron Radiograph.

中性子ラジオグラフィ実験では、中性子線がヒートパイプ面に対して垂直方向に照射され、試験部を透過した中性子線を蛍光コンバータで可視光に変換し、高速度カメラ (500 fps, 露光時間 1/500 秒) で動的挙動が撮影された。

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。

まず、冷却部、加熱部を設置しない状態で、室温と熱平衡において可視化し、封入率を計測した。可視化画像を Fig. 8 に示す。細管内で液プラグが形成されており、液プラグの存在箇所は明確に識別できることが分かる。液プラグがない領域の液膜を無視し、液プラグの長さから充填率を計測したところ体積比で 62%であった。

3.3 実験結果と考察

加熱部と冷却部壁面温度差とヒートパイプの断面積から定義された有効熱伝導率 λ の計測結果を加熱量に対してプロットし、Fig. 9 に示す。加熱量が 80 W 以下の範囲では、トップヒートがわずかに低いも

[課題番号] 22033

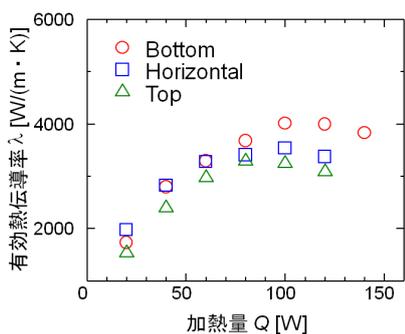
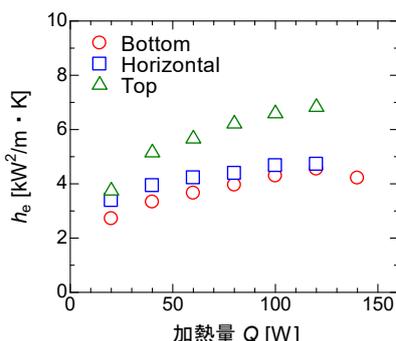
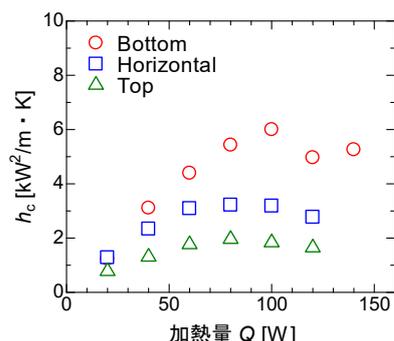


Figure 9. Effective Thermal Conductivity

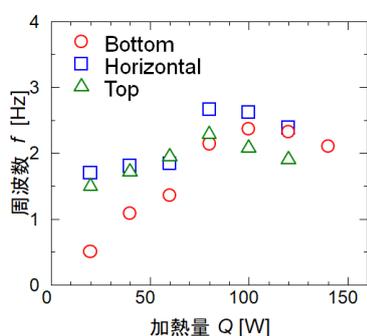


(a) Heating Section (Evaporation)

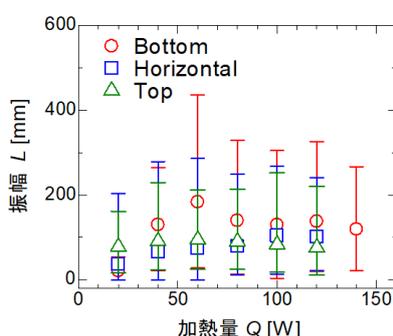


(b) Cooling Section (Condensation)

Figure 10. Heat Transfer Coefficient.



(a) Frequency



(b) Amplitude

Figure 11. Oscillating Characteristics of Liquid Plugs.

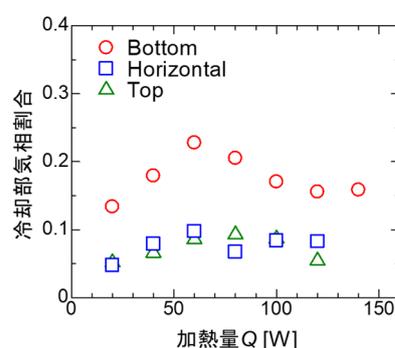


Figure 12. Average Vapor Volumetric Fraction in the Cooling Section.

のいずれの配置においても加熱量の増大とともに有効熱伝導率は増大し、最大値は銅 (400 W/(m·K)) の約 10 倍に達した。しかし、それ以上の加熱量では、トップヒート、水平、ボトムヒートの順でピークを取るようになり、その後は加熱量の増大とともに低下した。従来、有効熱伝導率の低下は、加熱部でのドライアウトと考えられており、トップヒートでは冷却部から加熱部への液供給量が低下し、ドライアウトにつながるとされていた。そこで、加熱部から冷却部への全熱抵抗を、加熱部、冷却部に分けて整理した。加熱部、冷却部での冷媒側熱伝達率を Fig. 10(a), (b) に、それぞれ示す。これより、加熱部ではトップヒートが最も高くなっていることがわかる。性能劣化は加熱部でのドライアウトではなく、冷却部にあることがわかった。

このような性能は、液冷媒の配置にあると考え、可視化結果から液プラグの振動を分析するとともに、冷却部での平均気相体積割合を計測した。液プラグ振動の周波数、振幅の計測結果を Fig. 11(a), (b) に、冷却部での平均気相体積割合を Fig. 12 に示す。気相体積割合は、可視化された連続画像において各フレームでの体積割合を計測し、時間平均した値である。冷媒充填量の計測と同様に蒸気が存在する領域での液膜は無視した。

液柱振動の周波数と熱輸送量の相関が強く、熱輸送は加熱部および冷却部での液膜の更新によるものと推察される。すなわち、加熱部では液柱の通過によって薄液膜が形成され、ドライパッチの形成を抑制し、一方、冷却部では、液柱間の蒸気の供給で液

膜が厚くなることで液温低下を抑制していると考えられる。冷却部での気相体積割合を見ると、ボトムヒートに対して水平およびトップヒートでの値が著しく低い値であった。トップヒートでは、重力の影響で冷却部に液が集まるようになり、液柱振動を抑制し、この挙動が性能低下の要因になったことが明らかとされた。

4. まとめ

2022 年度は、混相流機器としてコンパクト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、機器内の相変化を伴う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。

コンパクト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、流体加熱とした場合に対して冷媒偏流が改善される結果を得た。冷媒流量の均質化には熱流束分布が重要であり、流体加熱とする場合、加熱媒体温度が変化することから、冷媒側での沸騰核形成とそれによる熱伝達率増大が熱流束分布均質化に必要であると考えられる。

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。