

[課題番号] 21028

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)}, 井上隼介^{A)}, 谷口智哉^{A)}, 清原圭太^{A)},
栗田圭輔^{B)}, 飯倉寛^{B)}

Hitoshi Asano^{#A)}, Hideki Murakawa^{A)}, Katsumi Sugimoto^{A)}, Shunsuke Inoue^{A)}, Tomoya Taniguchi^{A)},
Keita Kiyohara^{A)}, Keisuke Kurita^{B)}, Hiroshi Iikura^{B)}

^{A)} Department of Mechanical Engineering, Kobe University

^{B)} Japan Atomic Energy Agency

Abstract

In order to design / improve gas-liquid two-phase flow equipment or to construct numerical analysis model of gas-liquid two-phase flows, it is required to understand flow behaviors, since the performance strongly depends on the gas-liquid interface structure. However, it is difficult to visualize flow behaviors in metallic equipment. Neutron radiography is effective for visualization of gas-liquid two-phase flows 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によるエネルギー輸送密度増大のため、沸騰／凝縮による蒸発潜熱が利用される。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、その性能特性は、流動様式に強く依存する。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る。気液二相流の流動様式を推定するのは容易ではない。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。また、数値予測モデルを構築する過程においても、現象の把握が必要とされる。しかし、一般の混相流機器は金属部材で構成されており、目視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。2021 年度は、多数の並行流路を有する直交流型拡散接合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、それぞれの機器内の相変化を伴う作動流体気液二相流を可視化・計測した。得られた結果の一部を報告する。

2. ミニチャネル直交型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 LNG 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く、加熱媒体の温度低下によって熱交換温度差が変化し、熱流束が不均一となる。そのため作動流体流路間の相変化量の不均一から作動流体に偏流が起こる可能性がある。偏流が発生すると流量が低下した流路では流路壁面が乾くドライアウトが発生し、熱伝達率の急激な劣化を招く。これは、伝熱面が気化器として機能していないことを示すのであり、流量が大きくなる流路では気化が完了しない恐れも生じることになる。そこで、直交流型蒸発器について、多数並列流路内沸騰二相流を可視化し、ボイド率分布の計測結果から流量分配状況を評価した。ここでは、2021 年度の実験で得られた成果として、ボイド率分布に及ぼす流路形状の影響について報告する。

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。対象とする気化器の製品では、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

[課題番号] 21028

交互に積層され、拡散接合によって一体化される。各層では水力等価直径がおおよそ 1 mm のミニチャネルで多数の並行流路が形成されるが、ここではその並行流路への流量分配を評価するため、作動流体、加熱媒体単層の拡散接合で製作されたステンレス鋼製熱交換器を使用した。作動流体には HFC-134a を使用した。一方、加熱媒体は水素を含まず中性子線の減衰が低い FC3283 を使用した。作動流体および加熱媒体の流路は実機同様、化学エッチングで加工され、その流路断面は半円形流路 (Fig. 2) となる。水力等価直径は 1.04 mm であった。

実験装置は、作動流体および加熱媒体のループで構成される。冷媒はギアポンプ駆動で循環され、所定の温度のサブクール液で試験部に供給された、一方、FC3283 は恒温槽から、所定の温度、流量で試験部に供給された。作動流体流量はギアポンプの回転数を制御することで設定した。このギアポンプの駆動モーターは回転数を一定に保持する制御回路を有しており、実験中、流量が安定していることを確認した。冷媒流路は鉛直面に設置され、加熱媒体による加熱で沸騰し、鉛直上昇二相流を形成する。熱交換量は加熱媒体の流量によって変化させた。各流体の流路は Fig. 3 に示すように直交している。作動流体および加熱媒体の流路数はそれぞれ 28 本、20 本である。

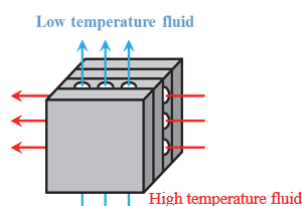


Figure 1. Schematic Configuration of Diffusion Bonded Printed Circuit Heat Exchanger.

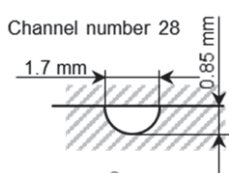


Figure 2. Cross-section of HFC-134a Channel.

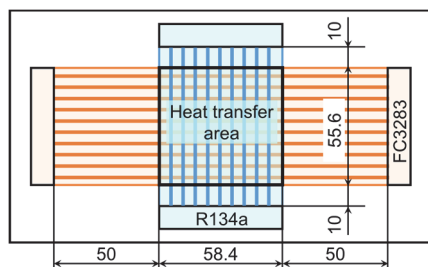


Figure 3. Channel Arrangement.

作動流体の流路はリブで分けられているが、流路間の流体移動を可能にするためリブを分断した 3 種類を製作した (Fig. 3)。等間隔で 6 ヶ所分断した Perforate A (Fig. (b))、分断部を入口に近い 1 ヶ所のみ

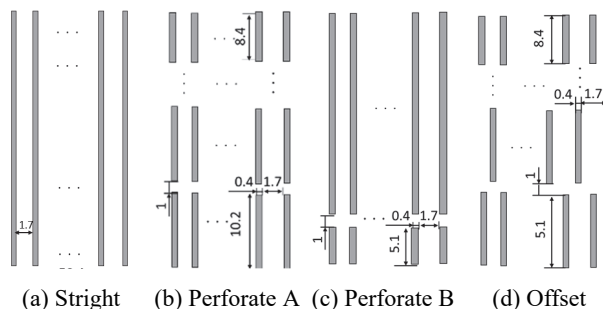
とした Perforate B (Fig. (c))、Perforate A のリブを半ピッチ交互にずらした Offset (Fig. (d))である。

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 を 70 °C で供給した。質量流束は、作動流体を 100~500 kg/(m²·s) の範囲で設定、加熱媒体を 921 もしくは 2947 kg/(m²·s) とした。

中性子ラジオグラフィ実験では、蛍光コンバータ上の画像を高速度カメラ (125 fps, 露光時間 1/125 s) で 1 条件につき 5000 枚撮影した。カメラ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^[1]。撮影画像の画素寸法は 157 μm であった。

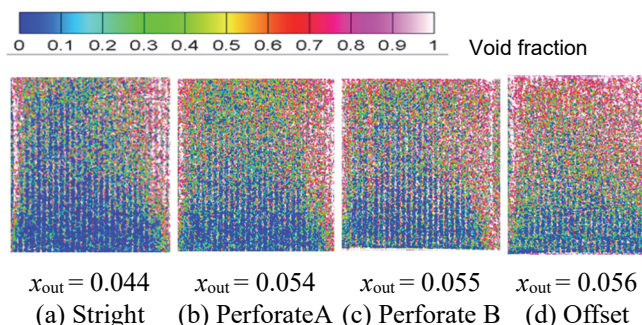
2.4 実験結果と考察

作動流体質量流束 500 kg/(m²·s)、加熱媒体質量流束 921 kg/(m²·s)でのボイド率分布を Fig. 5 に示す。時間平均画像 (100 枚) に対する結果である。図中、 x_{out} は加熱媒体から計算した熱交換量に基づく作動流体の出口乾き度である。加熱媒体は図中、右側から供給される。いずれの流路においても右側でボイド率が高い傾向を示していることがわかる。ストレート型でその傾向が顕著であり、左半分ではボイド率が低いことがわかる。一方、リブを分断した試験部では、ストレート型流路と比べてボイド率分布の偏りが抑制されていることがわかる。リブを入口に近い 1 ヶ所だけとした Perforate B でも偏りは抑制されているが、これは入口サブクール液の作動流体がこの分断部で沸騰核形成が促進され沸騰二相流の起点が揃ったためと考えられる。



(a) Straight (b) Perforate A (c) Perforate B (d) Offset

Figure 4. Rib Configuration of HFC-134a Channel.



(a) Straight (b) Perforate A (c) Perforate B (d) Offset

Figure 5. Void fraction distribution for heating medium mass flux of 921 kg/(m²·s) and working fluid mass flux of 500 kg/(m²·s).

[課題番号] 21028

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、自励振動を発生し、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^[2]。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は行われているが、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、液中振動の周期、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末端処理で両端が閉じられた蛇行流路が形成されている。並列の流路数は 41 本である。OHP の外寸は、長さ 200 mm×幅 50 mm×厚さ 2 mm である。流路断面形状を Fig. 7 に示す。流路は□ 0.8 mm の正方形流路である。

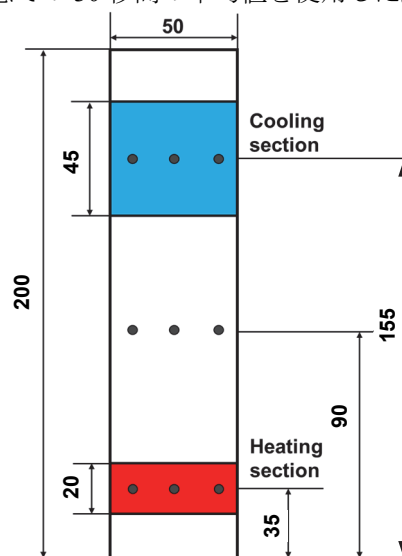
OHP はアルミニウム板にシリコンシートをはさんで固定され、L 字型のスタンドによって鉛直面に固定された。加熱ブロックと冷却ブロックはアルミ製であり、接触面にシルバークリースが塗布され、締付板によって OHP に固定された。加熱ブロックは、幅が OHP と同じ 50 mm、長手方向 20 mm であり、2 本のカートリッジヒーター (200 V, 170 W) が設置された。一方、冷却ブロックは、長手方向 45 mm であり、ブロック内部には冷却材流路が加工されている。冷却材には中性子線に対して透明な FC3283 を用い、恒温槽によって 15°C 一定で循環させた。試験部は固定板を含めて断熱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

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の 2 通りとした。

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。



● Temperature measure points
Figure 6. Configuration of oscillating Heat Pipe.

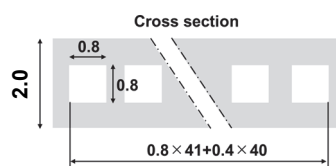


Figure 7. Channel Cross-section

3.3 実験結果と考察

封入率 62 % の OHP での加熱実験における可視化画像の一例を Fig. 8 に示す。左がオリジナルの可視化画像、右は、可視化画像において黄色の線で示す流路部分の輝度分布を抽出し、時系列で 2.5 秒分並べた Time Strip 画像である。なお、可視化画像では冷却ブロック、加熱ブロックの部分が暗くなっているが、左図において液プラグが存在する箇所が暗く可視化されていることが分かる。また、Time Strip 画像から液プラグの位置の時間変化を計測することができる。例えば、Fig. 8 では液プラグ下端位置の時間変化が可視化されており、この変化から振動数 f [Hz]、振幅 L [mm] を評価した。振動数は 10 秒間の撮影画像で検出された振動数から算出した。隣接する流路との同期を確認するため、OHP 全流路の輝度値分布を一本の流路として引き延ばし、Time strip 画像を作成、液中の時間変化を確認した (図省略)。その結果、低加熱量 (40 W) の場合には、凝縮側が強く、液が冷却部に集まる傾向であり、冷却部を中心に液柱が振動していた。一方、加熱量が大きくなると (100 W)、液柱の振幅が大きくなり、液柱が加熱部に達する頻度が増加した。この場合には、ボトムヒートのほうが、振幅が大きくなることを確認している。

Time strip 画像から計測された液柱振動の周波数を Fig. 9 に振幅を Fig. 10 に示す。ボトムヒートでは加熱量の増大に伴い周波数も増加し、100 W で 2.8 Hz に達した。一方、トップヒートでは振幅は小さい

[課題番号] 21028

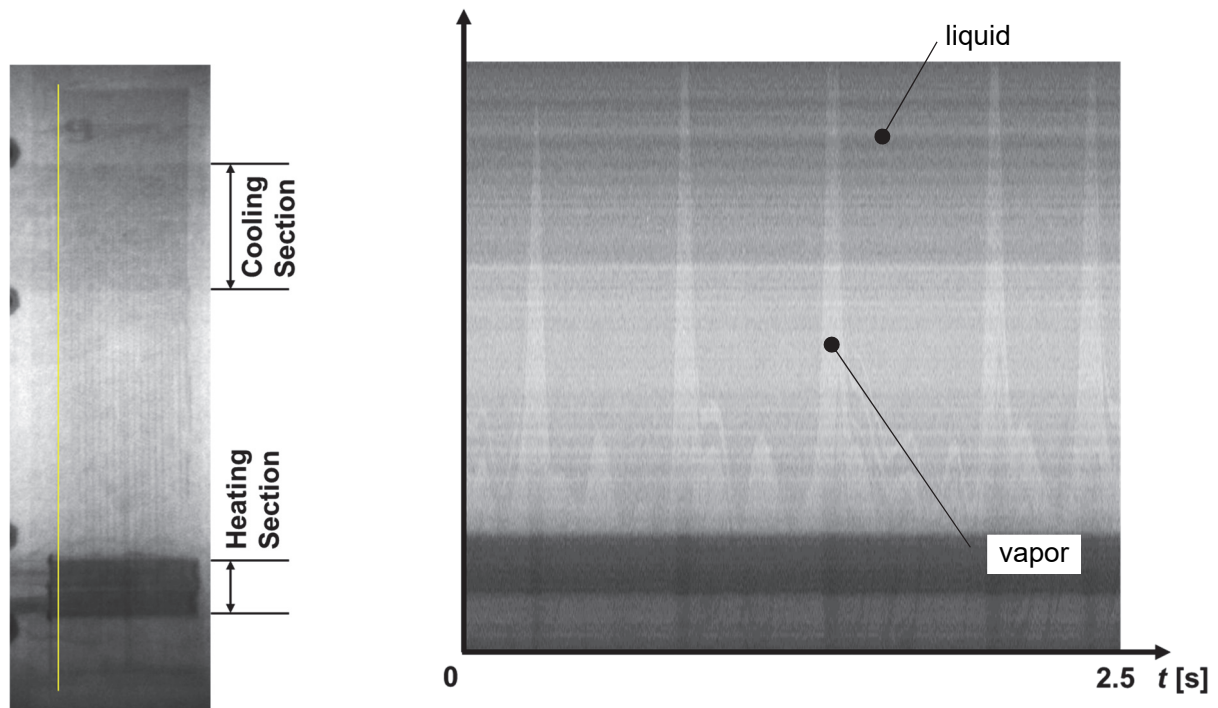


Figure 8 Visualized image and time strip image of brightness distribution along a channel indicated by the yellow line in the left figure.

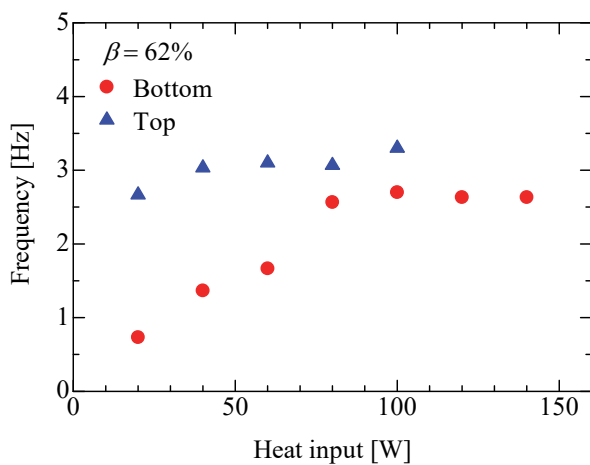


Figure 9. Frequency of liquid plug oscillation.

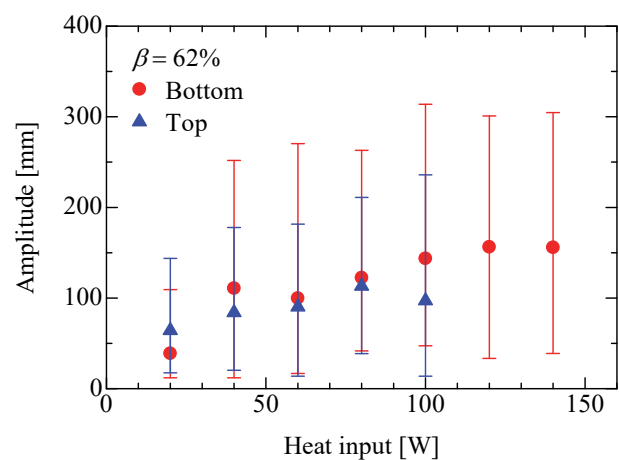


Figure 10. Amplitude of liquid plug oscillation.

が低加熱量でも振動が多数確認されており、周波数に対する加熱量の影響はボトムヒートと比べて小さかった。次に振幅を見ると、加熱量が増大するほど振幅の平均値が増大する傾向が確認された。これは、加熱量の増大に伴い隣接流路にまで達する振動が増加したためである。加熱量の増大によって加熱部での蒸発量が増大し、蒸気体積の増大により液プラグを押し上げる力が増大したためと考えられる。設置姿勢で比較すると、ボトムヒートの方がトップヒートよりも振幅の最大値が大きく、大きな振動が観察された。これは、トップヒートでは加熱部への液の移動を妨げる方向に重力が作用したためと考えられる。

熱輸送は液プラグの振動で促進されると考えて周波数と平均振幅から計測時間（10 秒間）の液プラグ移動距離 y を算出した。加熱量に対する有効熱伝導率と液プラグ移動距離の変化を Fig. 11 に示す。有効熱伝導率と液プラグ移動距離に強い相関があることが分かる。ボトムヒートの場合、低加熱量では液プラグに振動が見られない流路が存在したため、液プラグ移動距離が小さくなったが、有効熱伝導率には大きな低下は見られなかった。他の流路での液プラグの振動によって熱輸送がカバーされていたためである。

[課題番号] 21028

4. まとめ

2021 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・計測した。その結果、機器性能に強く影響する流動現象について有効なデータを取得することができた。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ボイド率分布を計測し、流路を形成するリブ形状の影響を評価した。入口サブクール液の場合、熱交換器入口近傍にリブ分断部を設けることで沸騰核形成が促進され、沸騰域の起点を揃えることができるためボイド率の不均一分布が改善された。

自励振動ヒートパイプ

液柱の振動周波数と振幅の積で得られる液柱の移動距離は有効熱伝導率と強い相関があり、移動距離が長くなるほど有効熱伝導率が向上した。

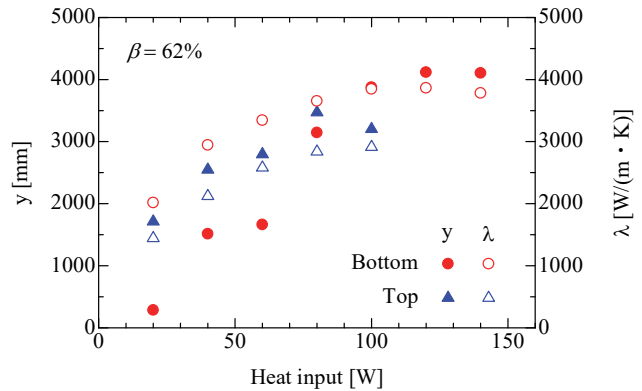


Fig. 11 Correlation of total moving distance of liquid plugs for 10 seconds, y , with the effective thermal conductivity, λ .

参考文献

- [1] N. Takenaka, H. Asano, T. Fujii, M. Matsubayashi, "A Method for Quantitative Measurement by Thermal Neutron Radiography", Nondestructive Testing and Evaluation, 16, pp. 345–354 (2001).
- [2] 宮崎芳郎, “自励振動ヒートパイプ”, 日本機械学会誌, 106 (1011), pp. 107–110, (2003).