

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 27 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13887

研究課題名(和文)非共溶性混合媒体の核沸騰による飛躍的冷却性能向上への挑戦

研究課題名(英文)Challenge to improve drastically cooling performance by nucleate boiling of immiscible mixtures

研究代表者

大田 治彦(OHTA, Haruhiko)

九州大学・工学研究院・教授

研究者番号：50150503

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：優れた冷却性能が期待できる非共溶性混合媒体による沸騰冷却について実験を行った。プール沸騰では、低沸点媒体の高い蒸気圧によって高サブクール度が自立的に付与される高沸点媒体が伝熱面に接触する場合、限界熱流束の増大が確認され、さらに低沸点媒体からの発生气泡の効果による伝熱面温度の低下を確認した。円管内強制流動沸騰では、管軸方向の流体温度分布を推算して局所熱伝達係数を評価し、流量比、熱流束の影響を調べた。矩形狭あい流路強制流動沸騰実験では、間隙幅2, 1, 0.5mmで実験を行った。低沸点媒体の沸騰が高沸点媒体の強制対流あるいは強制流動沸騰熱伝達に対して劣化もしくは劣化を促進する場合が見られた。

研究成果の概要(英文)：Superior cooling performance was expected in boiling of immiscible liquid mixtures. In pool boiling experiments, high subcooling was imposed to the less-volatile liquid by the high vapor pressure of more-volatile component. As a consequence, the critical heat flux was increased when the less-volatile liquid contact the heating surface. Furthermore, the surface temperature was reduced by the generation of bubbles from more-volatile liquid. In flow boiling experiments using a circular tube, the distribution of fluid temperature along the tube axis was proposed to evaluate the local heat transfer coefficients. The effects of flow rate ratio and heat flux on the heat transfer characteristics were clarified. In flow boiling experiments using rectangular narrow channels, experiments were conducted for gap sizes of 2, 1, and 0.5 mm. In some cases, boiling of more-volatile liquid accelerates the deterioration forced convection or flow boiling heat transfer to the less-volatile component.

研究分野：伝熱工学

キーワード：熱工学 沸騰 高性能冷却 非共溶性混合媒体 半導体冷却

1. 研究開始当初の背景

従来の非共沸混合媒体の沸騰では物質拡散抵抗に起因する伝熱劣化が欠点として現れ、マランゴニ効果による伝熱促進や限界熱流束の増大も平板伝熱面では期待できない。一方、非共溶性混合媒体に関しては断片的研究があるが、化学プロセスでの応用を目的とし、冷却系に有用な伝熱特性を持つことはほとんど知られていない。

2. 研究の目的

様々な冷却対象・冷却条件に対応できる冷却系に対し、非共溶性混合媒体の核沸騰に着目する。非共溶性混合媒体は、各成分の蒸気分圧により他方の成分の液体を圧縮できること(“自己圧縮性”)による液体サブクール度の自立的保持により、限界熱流束の飛躍的増大のみならず、非凝縮気体(空気)混入防止のための正圧(大気圧以上)作動下での冷却面温度の低減、負荷変動の大きな自動車用インバータの冷却系などで懸念される沸騰開始時の伝熱面温度のヒステリシスの回避、などを液体混合のみで実現できる。

そこで、これまでプール沸騰を主として基本的な沸騰特性の把握を行ってきたが、応用上重要な強制流動沸騰系への適用の可否についても見極める。

3. 研究の方法

非共溶性混合媒体のプール沸騰実験を行うために、**図1**に示すような試験装置を使用した。沸騰容器は、下方から試験媒体を加熱する水平伝熱面を含む加熱部、沸騰容器内の圧力・温度を制御するための凝縮部によって構成されている。容器内部には温度測定用にシース熱電対を挿入し、媒体の温度を計測している。伝熱ブロックは銅でできており、伝熱面は直径40mmの円形で、伝熱面周囲での発泡点の集中を防止する構造となっている。加熱銅ブロックには、カートリッジヒータが挿入されており、伝熱面熱流束は最大 4.5×10^6 W/m²まで増大できる。銅ブロック内部の温度計測のために、シース熱電対を挿入し、伝熱面温度と熱流束を評価する。非共溶性混合媒体は、高密度液体と低密度液体の液-液界面の水平伝熱面からの高さが重要なパラメータである。そこで加熱開始前的高密度液体の層厚さ H_A と低密度液体の層厚さ H_B の値の和を100mmで固定し、 $H_A = 0, 5, 10, 50$ mmについて実験を行った。

一方、非共溶性混合媒体の強制流動沸騰実験を行うために、**図2**に示す試験ループを構築し、**図3**の円管および**図4**の矩形狭あい流路テストセクションを製作した。図2に示す試験ループは、循環ポンプ、流量計、予熱器、テストセクション、圧力計、凝縮器、冷却水循環装置、気液分離器によって構成された閉

ループである。2種類の液体からなる非共溶性混合液体は、気液分離器において、密度差によって分離し、異なる流路から流入させるが、下流に設置されたバルブの開度により各液体の流量を調節する。各流量および総流量は流量計で計測している。ポンプから吐出された混合液体は、予熱器で所定のサブクール度まで加熱され、テストセクションへと流入する。テストセクションで加熱された流体は、凝縮器で凝縮・冷却され、気液分離器へと戻る。図3に示した円管のテストセクションは、加熱部とその下流に配置された非加熱観察部で構成され、水平姿勢で試験ループに接続される。加熱部は内径7mm厚1mmのSUS管で、

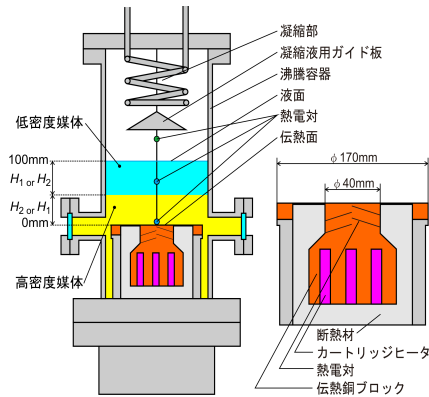


図1 プール沸騰実験装置概略図

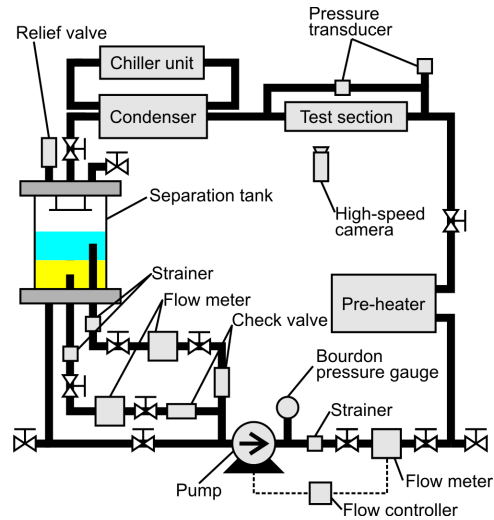


図2 強制流動沸騰試験ループ

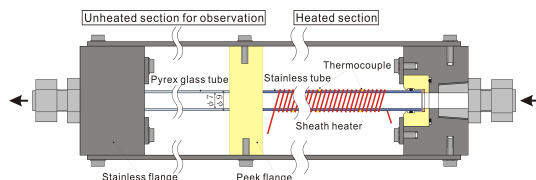


図3 円管テストセクション

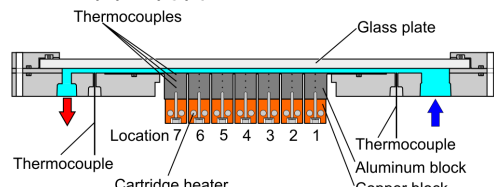


図4 矩形狭あい流路テストセクション

加熱長 310mm の区間に、333W のシースヒータを螺旋状に巻き、その上から銅線を幾重にも巻いて加熱区間でほぼ一様な熱流束を付与できるようにしている。局所熱伝達係数の評価を行うために、加熱開始の位置から 65mm、160mm、255mm の円管外表面の頂部と底部に、シース熱電対の先端をハンダ付けしている。観察部は加熱部の下流側に配置され、内径 7 の耐熱透明ガラス製となっており、加熱部直後の気液挙動を観察する。また図 4 に示す矩形狭あい流路テストセクションは、ステンレス製の筐体とアルミ製の伝熱ブロックで構成されており、伝熱面が水平上向きになるように配置される。伝熱面上の気液挙動が観察できるように、流路の上面は透明ガラス板を装着して非加熱となっている。流路の幅は 30mm で、間隙幅は、2, 1, 0.5mm に変化させた。伝熱面は幅 30mm、長さ 175mm で、伝熱ブロックの加熱側は 25mm ごとに切れ目を入れ、7 つのセクションに分割されている。加熱は、銅ブロックにカートリッジヒータを装着したものを各セクションの下部に密着させて、独立に加熱できるようにし、伝熱面全体の熱流束が一樣になるように各印可電圧を調節する。伝熱ブロックには熱電対が挿入されており、伝熱面表面の熱流束および温度を算出する。また下流でドライアウトによる伝熱面温度の上昇を生じて、下流セクションへの入力を切って、加熱長さを変更しながら、より高い熱流束での実験を継続させることが可能である。

4. 研究成果

(1) プール沸騰実験

高密度低沸点液体と低密度高沸点液体の組み合わせとして FC72/Methanol、低密度低沸点液体と高密度高沸点液体の組み合わせとして Methanol/FC770 を選定し、プール沸騰実験を行った。各単成分媒体の飽和温度と密度を表 1 に、平衡温度と成分液体のサブクール度を表 2 に示した。FC72/Methanol、Methanol/FC770 の試験媒体について、熱流束と伝熱面表面温度の関係を図 5 および図 6 に示す。加熱開始前の伝熱面上液体の層厚さを[低沸点液体 / 高沸点液体]の順で表示している。各グラフにおいて限界熱流束を破線で示し、また混合媒体の全圧と同一圧力下での単成分媒体の飽和沸騰の結果も同時に示している。図 5 では、伝熱面温度が、FC72 単成分のよりも低い条件が存在した。これは高密度低沸点液体の FC72 に 13.7K のサブクール度がかかり、熱流束の増大時に気泡底部でのドライパッチの拡大が抑制されて伝熱劣化が低減された結果と考えられる。一方、伝熱面に低密度高沸点液体が常に接触していると考えられる[0mm/100mm]の条件では限界熱流束が Methanol 単成分媒体

と比較して明らかに増大し、 $8.2 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ を得た。これは高沸点液体の Methanol に自立的に付与されるサブクール度 22.5K によるものと考えられる。図 6 において、[100mm/0mm]の条件では、 $q=1.9 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ において、バーンアウトを生じている。例えば高密度低沸点液体 (FC72) と低密度高沸点液体 (Water) の組合せで、FC72 の量比を小さくした場合に生じる“インターミディエイトバーンアウト”とは異なり、低密度低沸点液体 (Methanol) と高密度高沸点液体 (FC770) の組合せで FC770 の量比を小さくした場合、伝熱面温度の急激な減少が生じている。この場合、低熱流束時に

表 1 各試験媒体の物性値 ($P = 0.1 \text{ MPa}$)

試験媒体	飽和温度 $T_{sat} \text{ } ^\circ\text{C}$	液体密度 $\rho_l \text{ kg/m}^3$	蒸気密度 $\rho_g \text{ kg/m}^3$
Water	100	958	0.60
FC72	55.9	1605	13.3
Methanol	64.7	787	1.15
FC770	95.0	1607	13.4

表 2 平衡温度とサブクール度 ($P = 0.1 \text{ MPa}$)

1: 低沸点媒体	2: 高沸点媒体	平衡温度 $T_b \text{ } ^\circ\text{C}$	低沸点液体のサブクール度 $\Delta T_{sub,1} \text{ K}$	高沸点液体のサブクール度 $\Delta T_{sub,2} \text{ K}$
FC72	Methanol	42.2	13.7	22.5
Methanol	FC770	56.8	7.9	38.2

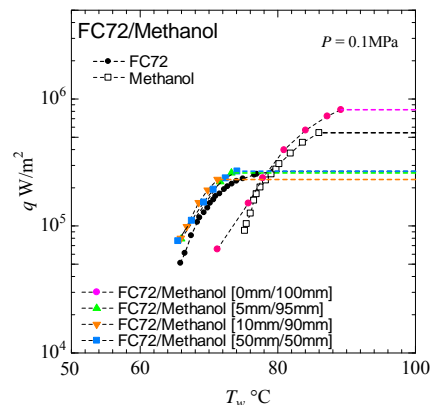


図 5 FC72/Methanol に対する熱流束と伝熱面表面温度の関係

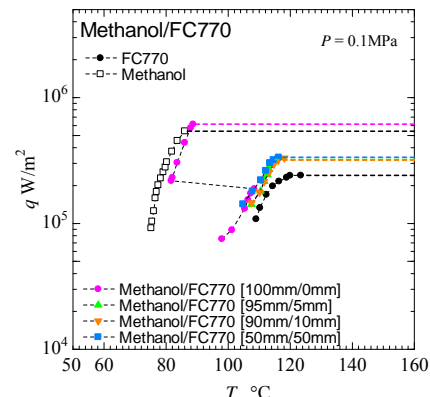


図 6 Methanol/FC770 に対する熱流束と伝熱面表面温度の関係

は高密度高沸点液体である FC770 が伝熱面上に薄く存在しており、熱流束の増大によってバーンアウトを生じ、低密度低沸点液体の Methanol が伝熱面表面に流入し、Methanol の沸騰へと移行したものと考えられる。また、高密度高沸点液体 (FC770) に対して高サブクール度 38.2K がかかるため、限界熱流束は FC770 単成分液体よりも増大し、 $6.1 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ を得た。

(2) 強制流動沸騰実験 (円管)

加熱円管を用いた強制流動沸騰実験では、高密度低沸点液体 FC72 と低密度高沸点液体 Water を用いた。非加熱状態において、各成分の流量組合せに対する流動様式線図を **図 7** に示す。FC72 が下層に、Water が上層に分離する「層状流」、FC72 が分断され、Water の連続相中に FC72 の液塊が流れる「FC72 スラッグ流」、FC72 液塊が更に細かく分断され、Water の連続相中で微粒化し、白濁して見える「乳濁流」が観察された。FC72 の流量が小さい場合に、Water の流量が大きくなるにつれて、層状流、FC72 スラッグ流、乳濁流へと遷移する。Water に対して FC72 の流量が相対的に増加すると、FC72 の液滴が多く表れるようになる。

総伝熱量に対する FC72 への伝熱割合を表すパラメータを導入することで、全ての実験条件において、熱バランスから出口流体温度の実験値を再現し、管軸方向の流体温度分布を求めて、各熱電対位置での局所熱伝達係を評価した。

図 8 は、各流量比における出口流体温度と熱流束の関係を示している。Water 単成分の出口流体温度は計算値とほぼ一致し、熱流束の増加に伴い非沸騰状態で直線的に増加している。FC72 単成分の出口流体温度は、熱流束の増加に伴い飽和温度に漸近しているが、沸騰開始時の熱流束 $q=2 \times 10^4 \text{ W/m}^2$ 付近において実験値と計算値に差異が確認される。これは、液体温度が飽和温度よりも低い段階でサブクール沸騰が開始したことによるものである。すなわち、伝熱量の一部が蒸発潜熱として使用され、顕熱が減少するため、出口流体温度の実測値が計算値よりも低い値となる。混合媒体については、実線で示す計算値は流量比ごとに一定値の ξ を用いて出口流体温度を推算している。ほとんどの加熱条件において、実験値と計算値との差は $\pm 1\text{K}$ 程度におさまっている。

図 9 に $V_{FC72}=0.1 \text{ L/min}$, $V_{Water}=0.4 \text{ L/min}$ の条件で、各熱流束における流路方向の ξ の変化を示す。管軸方向の流体温度の推算では、管断面では一様温度と仮定した。熱流束が増大すると、それに従って両成分ともにサブクール状態 (状態 I) から FC72 の蒸気と液体および Water の液体がともに管内に存在している

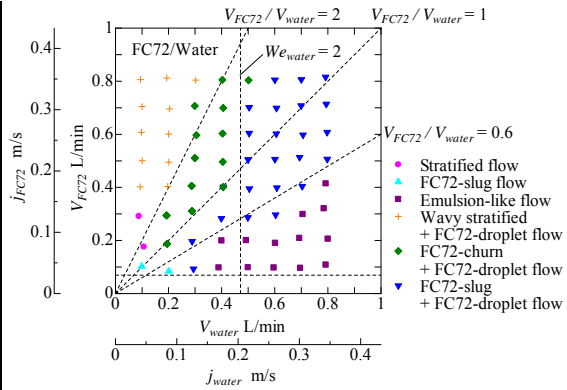


図 7 FC72/Water の流動様式

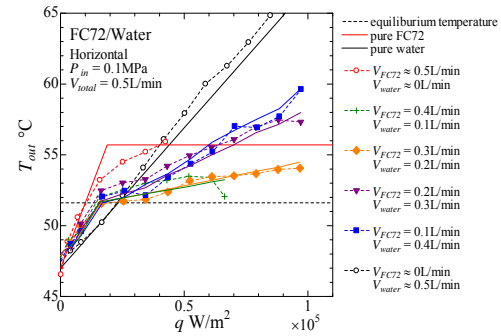


図 8 出口流体温度と熱流束の関係

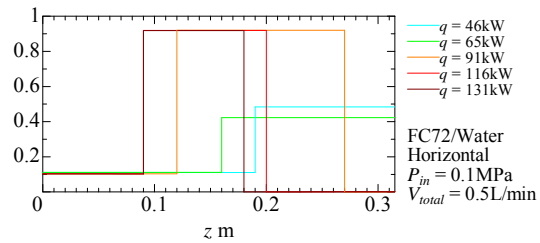


図 9 管軸に沿って FC72 に伝達される熱の割合 ($V_{FC72}=0.1 \text{ L/min}$, $V_{Water}=0.4 \text{ L/min}$)

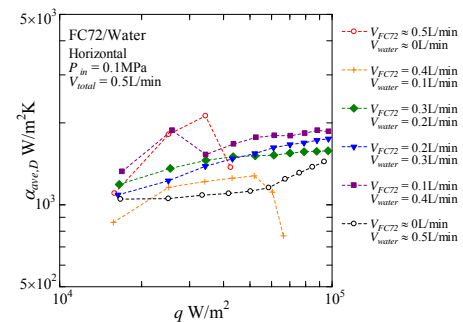


図 10 各流量比における平均熱伝達率と熱流束の関係 (下流)

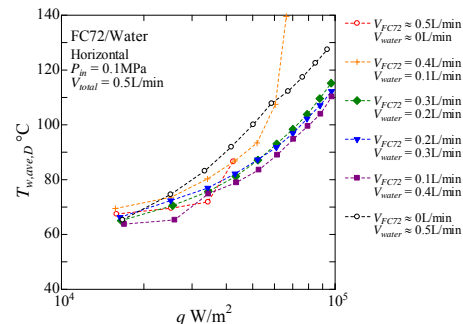


図 11 各流量比における壁面平均温度と熱流束の関係 (下流)

状態(状態 II、この場合 FC72 は過熱液と過熱蒸気、Water サブクール液)への遷移位置がテストセクション入口側へと移動している。また、図には示していないが、FC72 の流量割合が小さくなるにつれて、同じ熱流束でも状態 II へ遷移しやすい傾向が見られた。

図 10, 図 11 に全流量 0.5 L/min の条件で、下流における各流量比での伝熱管の上部・下部の平均熱伝達係数および伝熱面平均温度を示す。FC72 単成分では高熱流束で熱伝達劣化を生じている。一方、Water 単成分では、単相強制対流により熱流束の増大に伴って熱伝達係数はほぼ一定値をとるが、高熱流束では下流側からサブクール沸騰が開始することにより、増大する傾向が現れる。この場合、高サブクール度下での沸騰により気泡は即座に凝縮するので、下流の観察部では気泡の混合は確認されていない。非共溶性混合媒体では、単成分と比較して熱伝達係数が高い傾向があり、伝熱面温度は低下する。また、FC72 の流量割合が小さいほど、良好な熱伝達特性を示している。これは熱伝達の主体は Water 成分の強制対流によるものであり、FC72 成分の沸騰によってその対流が促進されるためである。FC72 の流量割合が小さい条件において、高熱流束域では FC72 が飽和液で、Water がサブクール液の状態の区間が短く、FC72 の液体がすべて蒸発して、FC72 が加熱蒸気、Water がサブクール液の状態へと遷移する。また、FC72 の流量割合が小さいほうが、やや熱伝達係数が高い傾向となる。

(3) 強制流動沸騰実験(矩形狭あい流路)

加熱狭あい流路による強制流動沸騰実験では、試験媒体として高密度低沸点液体 FC72 と低密度高沸点液体 Water を用いた。FC72/Water の全流量は、間隙幅 2mm, 1mm, 0.5mm のそれぞれに対して、同一の入口液体流速を設定して、それぞれ 5L/min, 0.25 L/min, 0.13 L/min の各条件下で行った。入口液体温度は 43 ~ 44°C とした。両成分液体が単相状態で流れる場合には、流路下面が伝熱面となっているため、高密度の FC72 が伝熱面に接触することになる。管軸方向の流体温度の推算に際して、加熱円管の場合と同様に、各流路断面で流体温度は一樣であると仮定する。FC72 の蒸発開始後において必要となる、総伝熱量に対する FC72 への伝熱割合 ξ は、熱バランスを適用してテストセクション出口流体温度の実測値に計算値を合致させるように求められる。ここでは伝熱面温度が平衡温度を超えると、伝熱面に接触している FC72 成分がサブクール沸騰を始めるものと仮定している。FC72 の沸騰が進展すると伝熱面に Water が接触するようになる。推算したテストセクション出口の流体温度と実験値の比較を図 12 に

示す。

図 13 は、伝熱面上の流体の温度分布を推算した結果である。混合媒体の平衡温度がそれぞれ異なるのは、テストセクション出口の圧力のわずかな違いによるものである。FC72 単成分では飽和温度よりも低い状態で遷移しており、非沸騰状態となっているが、混合媒体では平衡温度で FC72 が沸騰開始となることを仮定している。

図 14 は、同じ入口流速の条件下で、中流部の熱流束と伝熱面温度の関係について、FC72 の 20vol% の混合媒体について、各単成分のデータとともに、間隙幅の影響を示したもので

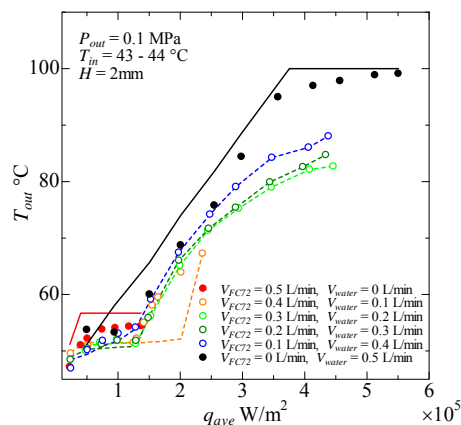


図 12 各流量比に対するテストセクション出口温度の測定値と計算値の比較

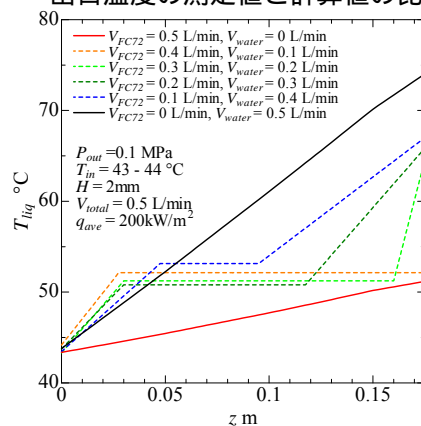


図 13 各流量比に対する管軸方向流体温度分布の推算値

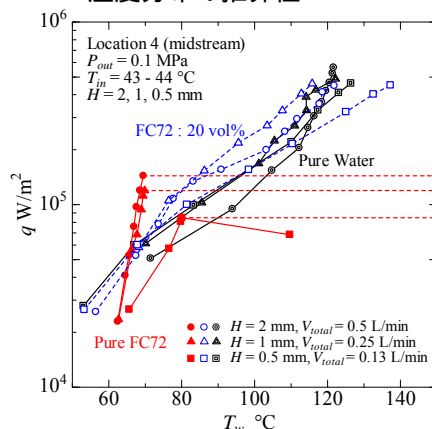


図 14 矩形流路内強制流動沸騰における非共溶性混合媒体の熱伝達特性に及ぼす間隙幅の影響

ある。FC72 単成分の場合、間隙幅 0.5mm では約 $8 \times 10^4 \text{ W/m}^2$ でドライアウトによる伝熱劣化が生じている。Water 単成分の場合、間隙 1mm および 0.5mm の伝熱面温度は 2mm に比べて低下しているが、最大の熱流束では、増加する傾向が見られる。混合媒体の場合、中熱流束域において、間隙幅 2mm および 1mm の場合、Water 単成分と比較して表面温度は低い。FC72 の扁平気泡の発生が、気泡底部の薄液膜の蒸発、さらに平均流速の増大を介して熱伝達に正の影響を及ぼしたものと考えられる。一方、間隙幅 0.5mm の場合、高熱流束において混合媒体に対する伝熱面温度は Water 単成分のそれよりも明らかに増大しており、FC72 の扁平気泡の底部におけるドライパッチの発生が顕著となる結果、負の影響を及ぼしていると考えられる。

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

Yasuhisa SHINMOTO, Daijiro YAMAMOTO, Daisuke FUJII and Haruhiko OHTA, "Cooling Characteristics by Boiling of Immiscible Liquids Flowing in Thin Rectangular Heated Channels", J. Applied Mechanical Engineering, Thermal and Mass Transport, Frontiers. (to be published in 2017) (査読有)

Satoshi OKAYAMA, Keisuke IWATA, Yasuhisa SHINMOTO and Haruhiko OHTA, "Improvement of Cooling Performance for Electronic Devices by Nucleate Boiling of Immiscible Mixtures", J.Physics: 7th European Thermal-Sciences Conference, Vol. 745, 8 pages (online), 2016. (査読有) DOI: 10.1088/1742-6596/745/3/032073

Yusuke YAMASAKI, Shota KITA, Keisuke IWATA, Yasuhisa SHINMOTO and Haruhiko OHTA, "Heat Transfer in Boiling of Immiscible Mixture", Int. J.Interfacial Phenomena and Heat Transfer from Macro- to Nano- Scale Systems, Vol. 3, No. 1, pp. 19-30, 2015. (査読有) DOI: 10.1615/InterfacPhenomHeatTransfer.2015012699

[学会発表] (計 14 件)

Daijiro YAMAMOTO, Daisuke YAMAMOTO, Yasuhisa SHINMOTO and Haruhiko OHTA, "Flow Boiling Heat Transfer to Immiscible Mixture in a Narrow Rectangular Channel", 8th KAIST-Kyushu University Symposium on Aerospace Engineering, Korea, 14 Oct., 2016.

Daisuke FUJII, Daijiro YAMAMOTO, Yusuke YAMASAKI, Yasuhisa SHINMOTO and Haruhiko OHTA, "Flow Boiling Heat Transfer Characteristics of Immiscible Mixture in a Circular Tube", 8th Kaist-Kyushu University Symposium on Aerospace Engineering, Korea, 14 Oct., 2016.

Haruhiko OHTA, Satoshi OKAYAMA, Daisuke YAMAMOTO, Daisuke FUJII and Yasuhisa SHINMOTO, "Recent Progress in the Acquisition of Experimental Data for Boiling Systems Using Immiscible Mixtures", 11th Int. Conf. on Two-Phase System for

Space and Grand Application (ITTW2016), France, 27 Sept., 2016.

山本 大士郎, 山本 大輔, 新本 康久, 大田 治彦, 「狭隘流路における非共溶性混合媒体を用いた強制流動沸騰熱伝達」, 混相流シンポジウム 2016, 京都市, 8/10/2016.

岡山 悟, 岩田 圭介, 新本 康久, 大田 治彦, 「非共溶性混合媒体によるプール沸騰熱伝達特性の改善」, 混相流シンポジウム 2016, 京都市, 8/10/2016.

Satoshi OKAYAMA, Keisuke IWATA, Yasuhisa SHINMOTO, Haruhiko OHTA, "Improvement of Cooling Performance for Electronic Devices by Nucleate Boiling of Immiscible Mixtures", 7th European Thermal-Sciences Conference (Eurotherm 2016), Poland, 22 June, 2016.

Daijiro YAMAMOTO, Daisuke YAMAMOTO, Yasuhisa SHINMOTO and Haruhiko OHTA, "Immiscible Mixture Applied to Flow Boiling in a Narrow Channel", Int. Workshop on New Understanding in Nanoscale/Microscale Phase Change Phenomena, Norway, 13 June, 2016.

山本 大輔, 山崎 優佑, 新本 康久, 大田 治彦, 「非共溶性混合媒体の強制流動沸騰熱伝達」, 第 52 回日本伝熱シンポジウム, 福岡, 6/3/2015.

岩田 圭介, 喜多 翔太, 新本 康久, 大田 治彦, 「非共溶性混合媒体のプール沸騰熱伝達」, 第 52 回日本伝熱シンポジウム, 福岡, 6/3/2015.

Daisuke YAMAMOTO, Yusuke YAMASAKI, Yasuhisa SHINMOTO and Haruhiko OHTA, "Heat Transfer Characteristic in Flow Boiling of Immiscible Liquid", 10th Int. Conf. on Two-Phase System for Space and Grand Application (ITTW2015), Kyoto, 16 Sept., 2015.

Keisuke IWATA, Shota KITA, Yasuhisa SHINMOTO and Haruhiko OHTA, "Pool Boiling Heat Transfer Characteristic to Immiscible Mixtures", 10th Int. Conf. on Two-Phase System for Space and Grand Application (ITTW2015), Kyoto, 16 Sept., 2015.

Haruhiko OHTA, Keisuke IWATA, Daisuke YAMAMOTO and Yasuhisa SHINMOTO, "Superior Heat Transfer Characteristics in Boiling of Immiscible Mixtures", 26th Int. Symp. on Transport Phenomena (ISTP-26), Austria, 30 Sept., 2015.

大田 治彦, 新本 康久, 岩田 圭介, 山本 大輔, 「非共溶性混合媒体による沸騰冷却特性について」, 熱工学コンファレンス 2015, 大阪, 10/24/2015.

Satoshi OKAYAMA, Keisuke IWATA, Shota KITA, Yasuhisa SHINMOTO and Haruhiko OHTA, "Heat Transfer by Nucleate Boiling Immiscible Liquid Mixtures", 7th KAIST-Kyushu University Symposium on Aerospace Engineering, Fukuoka, 11 Dec., 2015.

6 . 研究組織

研究代表者

大田 治彦 (OHTA, Haruhiko)

九州大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号 : 50150503