

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630067

研究課題名(和文)新発想による冷却媒体の研究開発：非溶解性混合媒体の核沸騰熱伝達特性の解明

研究課題名(英文) Innovation of Coolants for the Development of High-performance Cooling Systems: Clarification of heat transfer characteristics due to nucleate boiling of immiscible liquid mixtures

研究代表者

大田 治彦(Ohta, Haruhiko)

九州大学・工学(系)研究科(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)：高発熱密度の電子機器の冷却問題に際し、沸騰による潜熱輸送を利用した二相流体ループは優れた熱伝達および熱輸送特性を実現できる。冷却システムとしては、限界熱流束の増大、伝熱面表面温度の低下、沸騰開始時の伝熱面温度オーバーシュートの低減、不凝縮ガスの混入防止等が要求される。

これらをすべて満たし得る冷媒として新たに非溶解性混合媒体に着目し、基本的な沸騰特性を明らかにするために、プール核沸騰の実験を行った。その結果、各成分蒸気分圧の和による過度な圧縮作用に伴う両成分液体のサブクーリング、低沸点成分の優先的蒸発などによって、期待された性質のほとんどすべてを確認することができた。

研究成果の概要(英文)：The liquid cooling systems utilizing the latent heat transportation during nucleate boiling are able to realize innovative performance for the cooling of semiconductors of electronic devices operated at high heat generation density. The increase of critical heat flux, the reduction of surface temperature, the reduction of surface temperature overshoot at the boiling incipience and the prevention of incondensable gas are fundamental requirements for the development of high-performance cooling systems by the application of boiling phenomena.

Immiscible liquid mixtures can meet the all requirements and the experiments on nucleate pool boiling were conducted to investigate their fundamental heat transfer characteristics. By the subcooling of liquids due to the excessive compression by the vapor of components and the preferential generation of vapor from the more-volatile liquid, most of the above requirements were satisfied.

研究分野：伝熱工学

キーワード：熱工学 沸騰 高性能冷却 新熱媒体 半導体冷却

### 1. 研究背景

従来、沸騰二相流の応用で使用される混合媒体はほぼすべては溶解性混合媒体であり、不凍液や、代替冷媒の開発に対して機器設計を変更することなく蒸気圧曲線(液相線)のレベルを調整できる以外に利点はないに等しく、物質拡散抵抗に起因する伝熱劣化が欠点として大きく目立つ。マランゴニ効果を狙った、伝熱促進や限界熱流束の増大も実際に用いられる平板伝熱面ではほとんど期待できない。一方、非溶解性混合媒体に関しては沸騰研究の黎明期を中心に若干の断片的研究が見られるが、これらは化学プロセスでの現象解明を主目的としたもので、冷却系に有用な伝熱特性を持つことはほとんど認識されていなかった。

### 2. 研究目的

様々な冷却対象・冷却条件に対応できる媒体として、非溶解性混合媒体の核沸騰に着目する。限界熱流束の飛躍的増大のみならず、負荷変動の大きな冷却系で嫌われる沸騰開始時の伝熱面温度のヒステリシスの回避、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などを、液体混合のみで簡単に実現できる。単成分媒体とは異なる沸騰伝熱特性を示すので、実験およびモデリングにより詳細に解明し、最適な媒体の組合せおよび混合比に対する指針を得る。本研究は非溶解性混合媒体を冷却系に適用するという新たな試みであり、従来の冷却システムの熱媒体に対する概念を大きく変え得る。

非溶解性混合媒体では、それぞれの蒸気圧で互いに成分液体を圧縮できるので、両成分液体はともにサブクール状態にあり、限界熱流束を飛躍的に増大できる可能性がある。しかし例えば水平上向き伝熱面を対象とした場合、伝熱面に接するのは密度の高い液体のみであり、成分液体の量比により異なる伝熱特性を示す。本研究では、複数種類の非溶解性混合媒体を考案・選択して、加熱前の両液体の層厚さを変えて、実験を主体として核沸騰熱伝達特性の詳細を明らかにする。

### 3. 実験方法

非溶解性混合媒体の核沸騰熱伝達による冷却能力はきわめて高いと考えられるが、熱伝達の基本的性質はまだほんの一部しか明らかでない。水平上向き伝熱面の場合、高密度低沸点媒体と低密度高沸点媒体の組合せが最も優れた沸騰冷却特性を示すが、さらに加熱前の液位が大きく影響する。これは沸騰開始に伴う気泡発生や、高密度低沸点媒体による“中間熱流束バーンアウト”後の伝熱面近傍での両成分液体や両成分蒸気の分散状態などが加熱前の量比により大きく異なるためである。したがって冷却特性が最良となる条件を解明することが最大の課題となる。研究はまずプール沸騰を対象として実験を行う。

非溶解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、下方から試験液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。沸騰容器は内径203mm、容積0.023m<sup>3</sup>のステンレス製の密閉容器である。沸騰容器側面には沸騰様相を観察するための観察窓が設置されている。容器内部には温度測定用に4本のシース熱電対を挿入し、伝熱面中心上からの高さ2mm, 80mm, 160mmの各位置の媒体温度を計測している。凝縮器の下には、凝縮液が直接伝熱面表面に落下しないようにガイド板が設置されている。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ためにフィンに類した一体構造として、キノコ型の形状となっている。フィン厚さは0.5mmと薄くしており、円周方向のヒートロスを抑えている。加熱銅ブロックには、カートリッジヒータ(240V, 300W)が19本挿入されており、伝熱面熱流束は最大4.5×10<sup>6</sup> W/m<sup>2</sup>まで達成可能である。銅ブロック内部の温度計測のために、伝熱面の中心および半径17mmの位置に1mm, 7mm, 13mm および19mmの深さにシース熱電対を挿入している。

非溶解性混合媒体としては低密度高沸点媒体に Water を、高密度低沸点媒体は FC72, Novec7100, Novec7200 を使用した。非溶解性混合媒体は、高密度媒体と低密度媒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ーである。そこで加熱開始前の高密度低沸点媒体の層厚さ  $H_1$  と低密度高沸点媒体の層厚さ  $H_2$  の値  $[H_1/H_2]$  は、**図2**に示すように厚さの和を100mmで統一し、0/100mm, 5/95mm, 10/90mm, 50/50mm の各場合について実験を行った。

試験圧力が0.1MPaとなるように、凝縮部冷却管内の冷却水循環量を調整し、カートリッジヒータの印加電圧を段階的に上げてゆき、各熱電対の出力値が定常となったことを確認してデータの記録を行った。

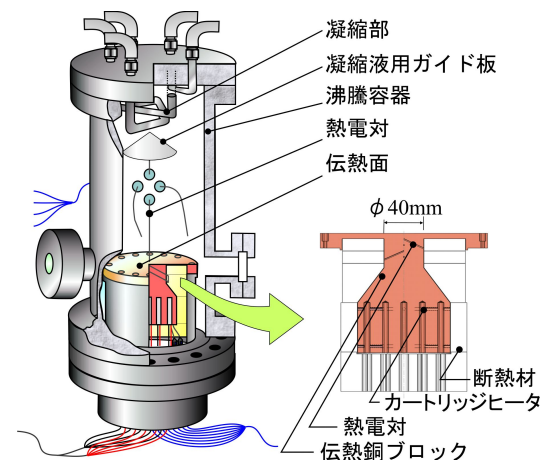


図1 実験装置概略図

#### 4. 実験結果

各非溶解性混合媒体 FC72/Water, Novec 7100/Water, Novec7200/Water の実験結果をそれぞれ図3, 図4, 図5に、(a)熱流束と伝熱面表面流体間温度差、(b)熱流束と熱伝達係数、(c)熱流束と伝熱面表面温度の各関係で示す。各図において限界熱流束値はデータキーと同色の破線で示している。また各組合せで単成分のデータも同時に示している。

##### (1) 沸騰特性

図3(a)において、非溶解性混合媒体では伝熱面温度と液体温度(ほぼ平衡温度に等しい)との差 $\Delta T_b$ を用い、単成分は伝熱面温度と飽和温度との差である伝熱面過熱度 $\Delta T_{sat}$ を用いた。FC72/Water[50/50mm]の結果はFC72単成分の結果とよく一致している。これはFC72の分圧に比べ水の分圧が低いいためサブクール度が小さいFC72の液位が高く、水が伝熱面に接触することがなかったためFC72の飽和沸騰特性にほぼ一致した結果である。

一方、FC72の液位が低いFC72/Water[10/90mm]の場合、低熱流束ではFC72単成分の沸騰曲線と同じ傾向を示すが、その後熱流束を上げていくと $q=2.0 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ 付近で伝熱面温度が急激に上昇している。これは一般的なバーンアウトと異なり、伝熱面温度の上昇が一定に抑えられる。これは非溶解性混合媒体特有の現象であり、本研究では中間熱流束バーンアウト(Intermediate Burnout、以降Int.B.と略記する)と名付けている。温度差 $\Delta T_b$ の増大に伴って、低熱流束ではほぼFC72の気液のみが伝熱面表面に存在し、FC72への熱伝達が支配的であったのに対し、高熱流束では上方に存在していた水への熱伝達に自動的に切り替わる。Int.B.はこのように水平伝熱面において低沸点媒体の液相厚さが小さい、換言すれば低沸点媒体の量が少なくなるときに発生する。この実験ではFC72/Water[5/95mm]ではInt.B.は確認されなかった。この理由として、Int.B.が生じるためには低熱流束時に高密度低沸点媒体が伝熱面上に十分に存在する必要があるが、FC72/Water[5/95mm]においては実験装置上部でのFC72の凝縮液が伝熱面上に十分に還流できなかったものと考えられる。しかしながら、Novec7200/Water[5/95mm]ではInt.B.が確認されている。Int.B.の発生条件の特定には装置全体の高密度低沸点液体の分散状況を詳細に解明する必要がある。

FC72/Water[0/100mm]、[5/95mm]はFC72単

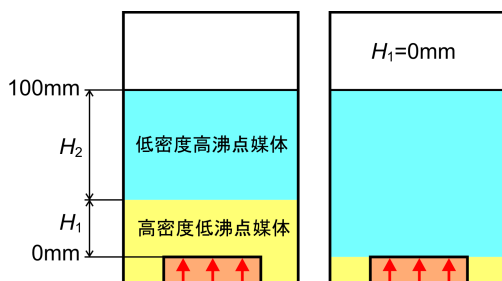
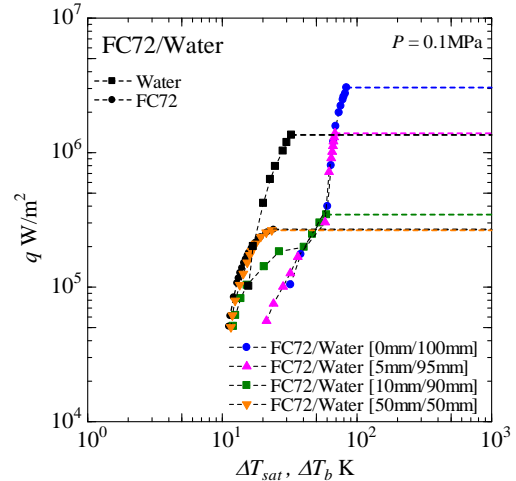


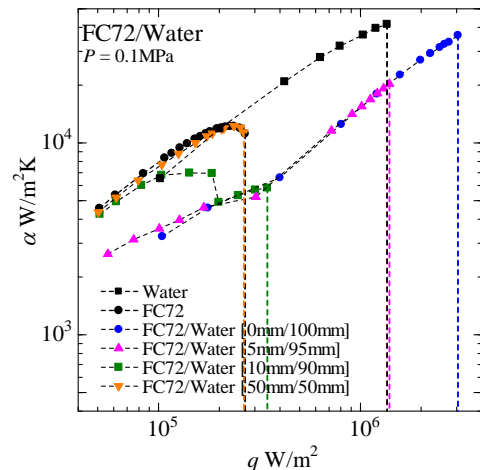
図2 低密度高沸点媒体と高密度低沸点媒体の液液界面

成分、水単成分のデータよりも右にシフトしているが横軸の伝熱面表面温度と液体温度との差の定義がまったく異なるので、単純な比較は無意味である。これらの混合液に対する傾きは、自由対流支配域から沸騰域にかけの $q=4.0 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ 付近まではやや小さいが、高熱流束では大きくなっている。

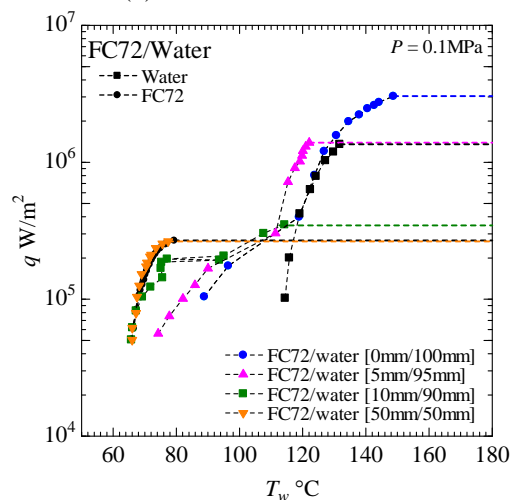
一方、Novec7100/Water[5/95mm]では熱流束の増加とともに、Int.B.に類似した伝熱面温度



(a) 熱流束 ~ 伝熱面表面温度と液体温度の差



(b) 熱流束 ~ 熱伝達係数



(c) 熱流束 ~ 伝熱面表面温度

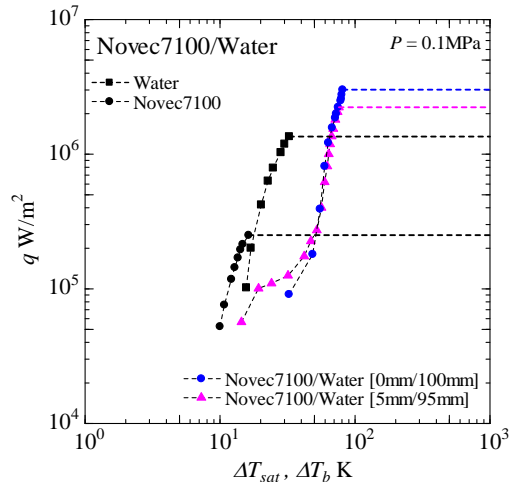
図3 FC72/Water の各混合比における熱伝達特性

の上昇が確認される。高熱流束域では [5/95mm] と [0/100mm] はほぼ同一の特性を示している。

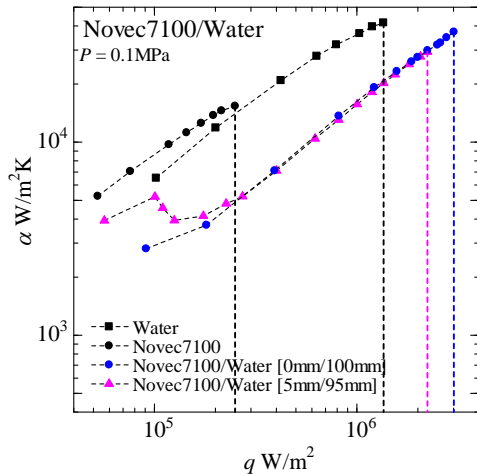
Novtec7200/Water では [5/95mm] と [10/90mm] の二つの条件で Int.B. が確認された。これらに関しても他の媒体同様に Int.B. 後は高熱流束域で [0/100mm] と同じ値となっている。

非溶解性混合媒体の沸騰特性を議論する場合、液体のバルク温度は平衡温度近傍の値を

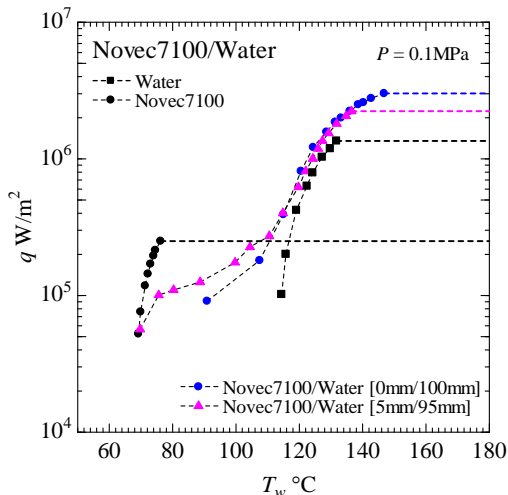
とり、各成分媒体の飽和温度よりも低く、各成分液体は自立的にサブクール状態となるため、サブクール度の分だけ伝熱面温度と液体温度との差は大きくなる。すなわち単一成分媒体のサブクール沸騰特性に対してバルク温度を基準とした温度差で評価する結果と同様となるので、非溶解性混合媒体の熱伝達特性の評価には伝熱面表面温度そのものを用いたほうが適切である。



(a) 熱流束 ~ 伝熱面表面温度と流体温度の差

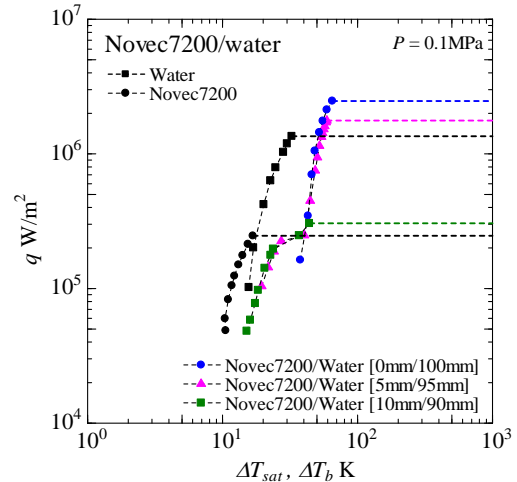


(b) 熱伝達係数 ~ 熱流束

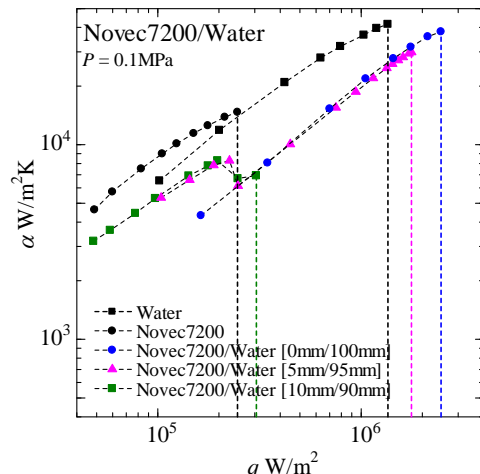


(c) 熱流束 ~ 伝熱面表面温度

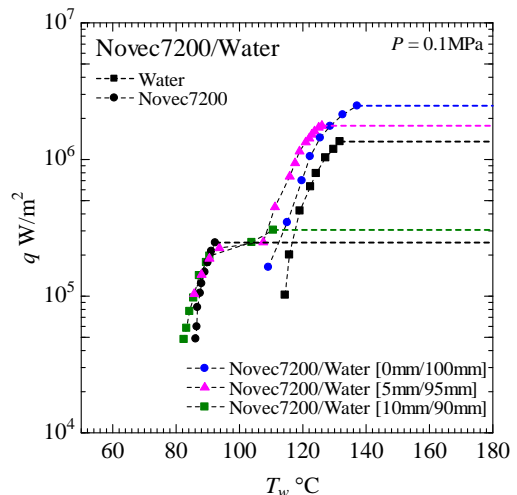
図4 Novtec7100/Water の各混合比における熱伝達特性



(a) 熱流束 ~ 伝熱面表面温度と流体温度の差



(b) 熱伝達係数 ~ 熱流束



(c) 熱流束 ~ 伝熱面表面温度

図5 Novtec7200/Water の各混合比における熱伝達特性



## (2)熱伝達係数

図 3(b)に示すように、FC72/Water の高熱流束域における熱伝達係数は低沸点媒体の液相厚さが薄い [0/100mm]、[5/95mm]の条件下で単成分と比して大きく低下している。また FC72/Water[10/90mm]では Int.B.後の高熱流束域において FC72/Water [0mm/100mm]などと同様の熱伝達の低下が見られる。この熱伝達の低下は共溶性非共沸混合媒体でみられる物質拡散抵抗に基づく伝熱劣化とはまったく異なり、先に述べたように熱伝達係数が定義される温度差がサブクール度の分だけ大きくなったことによる。Int.B.より低熱流束域で全圧 0.1MPa に対する FC72 単成分の飽和温度 55.9°C よりも  $\Delta T_{sub,1}=4.3K$  だけサブクールされた平衡温度 51.6°C を使用するため見かけ上わずかな伝熱劣化を生じている。これに対して、Int.B.後の高熱流束域では全圧 0.1MPa に対する水単成分の飽和温度 100°C よりも平衡温度 51.6°C がいちじるしく低く、サブクール度  $\Delta T_{sub,1}=48.4K$  が付与されるために、見かけ上の大きな伝熱劣化を生じた。

このように非溶解性混合媒体の平衡温度は低沸点媒体の飽和温度よりも低くなるが、これは高沸点媒体の飽和温度よりも著しく低くなることを意味しており、見かけ上の大きな伝熱劣化に注意する必要がある。次項で述べるが、図 4(c)や図 5(c)で示されるように高熱流束域において非溶解性混合媒体の伝熱面表面温度  $T_w$  は単成分のそれよりも低下しており、実質的にはむしろ伝熱促進となる点に注意する必要がある。当然ながら、これらの内容は Novec7100/Water や Novec7200/Water についてもあてはまる。

## (3)伝熱面表面温度

上述の理由により非溶解性混合媒体の沸騰熱伝達特性は、伝熱面表面温度  $T_w$  を用いて正當に評価される。FC72/Water[50/50mm]では、FC72 単成分の場合とほぼ同じ伝熱面表面温度であるが、FC72/Water[10/90mm]および [5/95mm]の場合の伝熱面表面温度は、熱流束の増大に伴って、FC72 単成分の伝熱面表面温度と Water 単成分の伝熱面表面温度の間で推移しており、FC72/Water[5/95mm]の高熱流束域では、Water 単成分の場合の伝熱面表面温度よりも明らかに低い温度に保たれている。FC72/Water[0/100mm]の高熱流束域では、Water 単成分の伝熱面温度とほぼ一致しており、高サブクール度による伝熱面表面温度の違いは認められない。しかし Water 単成分の限界熱流束値以上でもパーアウトはせず、伝熱面表面温度も上昇し続けている。

Novec7200/Water の場合、Int.B.(約  $q=2.3 \times 10^5$  W/m<sup>2</sup>) 前の低熱流束域において [5/95mm]では Novec7200 単成分とほぼ同じ伝熱面表面温度を示すが、Int.B.後の高熱流束域、つまり高沸点媒体である水への熱伝達支配領域に移行した後は伝熱面表面温度が水単成分の伝熱面表面温度より低下していることがわかる。高熱流束域での [0/100mm] や高熱流束域での

Novec7100/Water[5/95mm]、[0/100mm]についても同様な傾向がある。

一般にサブクール沸騰では核沸騰現象が伝熱面のごく近傍の気液挙動に支配されるため、熱流束が低く自由対流の寄与が大きい場合を除いて伝熱面表面温度は液体サブクール度に鈍感である。しかしながら同一熱流束において、FC72/Water[5/95mm]、Novec7100/Water や Novec7200/Water の各 [5/95mm]、[0/100mm]の条件下では単成分の水の伝熱面表面温度よりも明らかに低下している。これは低沸点媒体の蒸発により高沸点媒体の核沸騰が促進された結果と考えられる。さらに高沸点媒体の水のサブクール沸騰に対し、FC72/Water では  $\Delta T_{sub,2}=48.4K$ 、Novec7100/Water は  $\Delta T_{sub,2}=45.3K$ 、Novec7200/Water は  $\Delta T_{sub,2}=33.6K$  というような高サブクール度により高熱流束域に至るまで自然対流の寄与が増大し、伝熱面表面温度が媒体温度すなわち平衡温度側に低下する可能性も考えられる。

しかしながら、FC72/Water[0/100mm]の条件下では高熱流束域ではほぼ水単成分の伝熱面表面温度と一致している。これは FC72 液量が最初から微量であり、FC72 の還流液が伝熱面表面にほとんど到達しない結果、水の伝熱促進に寄与しなかったものと推測できる。すなわち高沸点媒体の限界熱流束の著しい増大効果、および高熱流束での高沸点媒体への熱伝達の促進効果を同時に実現するためには少量とすべき低沸点媒体の封入量に対しても最適値が存在することを意味する。

## (4)限界熱流束

限界熱流束は図 3～図 5 において水平または垂直破線で表している。低沸点媒体液相の厚さが厚い FC72/Water[50/50mm]の場合には FC72 単成分とほぼ同じ限界熱流束となった。これは FC72 液相が厚いため中熱流束でのパーアウト時に Water が伝熱面上に流入することができず、そのまま伝熱面温度の上昇に至った結果である。FC72/Water[10/90mm]では Int.B.が生じているが、伝熱の対象となる主媒体が Water に切り替わってもなお FC72 液相が伝熱面表面付近に多く分散する。このため FC72 液体の激しい沸騰・蒸発により FC72 の蒸気相で伝熱面表面が覆われる結果、高沸点媒体である Water の伝熱面表面への接触を妨げ、Int.B.後の熱流束増加によりすぐに限界熱流束に達したものと考えられる。FC72/Water [5/95mm]では Int.B.直後に伝熱面表面への FC72 の還流流量が少ないため FC72 の蒸気発生量も少なく、高サブクール度の水が容易に伝熱面表面に流入する結果、冷却媒体が FC72 液から水に自動的に切り替わることが可能となり、高熱流束域での熱伝達が継続する。Int.B.時以降、熱流束を増加させてゆくと、FC72 気泡により促進された水の自由対流からやはり FC72 気泡により促進された Water の核沸騰に移行する。この結果、[50/50mm]や [10/90mm]と比較して限界熱流束が高い。FC72/Water [0/100mm]の場合はより極端な場合であり、伝

熱面上への FC72 液体の供給はほとんど抑えられ、高サブクール度になるまで圧縮された Water のみが高熱流束では伝熱面上に還流される結果、限界熱流束が著しく増大した。

#### (5)まとめ

非溶解性混合媒体の卓越した沸騰熱伝達特性を複数の混合媒体に対して確認するために、FC72/Water, Novec7100/Water, Novec7200/Water のプール沸騰実験を行なった。いずれも高沸点媒体に高サブクール度が自立的に付与されることにより、限界熱流束が高沸点媒体単成分よりも大きく増大することを確認した。また高熱流束域において FC72/Water、Novec7100/Water、Novec7200/Water のいずれにおいても多くの条件下で Water 単成分と比較して伝熱面温度が低下することが確認された。

非溶解性混合媒体では水平伝熱面に対して非加熱時の液層厚さを最適化することにより、高密度低沸点媒体の沸騰熱伝達から低密度高沸点媒体の熱伝達へ移行する現象（中間熱流束バーンアウト）が確認された。この現象には高密度低沸点媒体の気泡が液 - 液界面を介して上昇可能かどうかの条件により、熱流束のわずかな増加によって伝熱面温度が急上昇する場合と、伝熱面温度が途中で定常状態を保ちながら上昇してゆく場合の 2 通りのパターンがあることも判明している。高密度低沸点媒体への熱伝達から低密度高沸点媒体への熱伝達への切り替わりは、高密度低沸点媒体の気泡とその上部に位置する低密度高沸点媒体の液体との間の気液界面におけるテイラー不安定現象と密接な関係があるものと考えられる。

非溶解性混合媒体において、水平伝熱面に対して非加熱時の高密度低沸点媒体の液層厚さを最小限に設定することにより、FC72/Water の例では Water に FC72 を少量加えるだけでもかわらず、0.1MPa での限界熱流束は  $3 \times 10^6 \text{ W/m}^2$  に達した。伝熱面上に微細構造などを形成することなく、低沸点媒体の高い蒸気圧を利用して限界熱流束の本来高い高沸点媒体を圧縮し、高サブクール度を自立的に付与することにより限界熱流束をさらに飛躍的に高める方法は、非常に単純でもあり、多くの応用を持つものと考えられる。

非溶解性混合媒体の強制流動沸騰に関して、慣性力の存在下で両成分の液体をともに伝熱面に接触させるために平行平板間狭隙流路が最適と判断し、片面加熱のテストセクションを試作した。

#### (6)展望

さらなる熱伝達特性として、高沸点媒体の蒸気圧が低いために、低沸点液体のサブクール度はきわめて小さく、沸騰開始直前の伝熱面温度の超過も最小限に保てるので、とくに起動時などに負荷変動の大きい電気自動車やハイブリッド自動車のインバータ冷却などにも利用できる。

また、蒸気分圧の和が全圧となることから、

平衡温度はいずれの媒体の飽和温度よりも低くなるので、系圧力を正圧（大気圧以上）に保ちながら、例えば Si 半導体の耐熱温度以下での高沸点媒体ベースによる超高熱流束冷却も可能となる。将来的に各応用分野で必要となる高発熱密度系の冷却システムへの応用が可能である。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

Shunsuke ONISHI, Haruhiko OHTA, Nobuo OHTANI, Yuta FUKUYAMA and Hiroyuki KOBAYASHI, "Boiling heat transfer by nucleate boiling of immiscible liquids", Journal of Interfacial Phenomena and Heat Transfer, Begell House Inc., Vol.1, pp.63-80, 2013. (査読有)(DOI: 10.1615/InterfacPhenomHeatTransfer. 2013007205)

〔学会発表〕(計 4 件)

喜多 祥太, 岩田 圭介, 大田 治彦, 新本 康久, 「非共溶性混合媒体の核沸騰熱伝達特に関する研究」, 日本マイクログラフィティ応用学会第 28 回学術講演会(JASMAC-28), イーグレ姫路(姫路市), 2014.11.27.

Shota KITA, Shunsuke ONISHI, Yuta FUKUYAMA and Haruhiko OHTA, "Improvement of Nucleate Boiling Heat Transfer Characteristics by Using Immiscible Mixtures", The 15th International Heat Transfer Conference (IHTC-15), Kyoto International Conference Center, Japan, Aug. 15, 2014.

大西 俊輔, 大谷 伸生, 金澤 昇平, 福山 雄太, 大田 治彦, 「宇宙用排熱処理への適用を目指した非共溶性混合媒体の核沸騰熱伝達特性の分類」, 日本混相流学会混相流シンポジウム 2013, 信州大学(長野市), 2013.8.9.

Shunsuke ONISHI, Nobuo OHTANI, Shohei KANAZAWA and Haruhiko OHTA, "Improvement of Nucleate Boiling Heat Transfer Characteristics by using Immiscible Mixtures", 8th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics (ExHFT-8), Congress Centre of Instituto Superior Técnico (IST), Lisbon Portugal, Jun. 17, 2013.

〔産業財産権〕

出願状況(計 1 件)

名称: 沸騰冷却装置 (Boiling Cooling System Using Optimized Immiscible Mixtures)

発明者: 大田 治彦, 小林 寛幸, 大谷 伸生

権利者: 同上

種類: 特許

出願: PCT/JP2013/068446 (2013.7.4)

公開: WO2014007354 A1 (2015.1.9)

国内外の別: 国外

#### 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