

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：24506

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04221

研究課題名(和文)非共溶性混合媒体による流動沸騰の冷媒遷移条件の解明

研究課題名(英文)Study of Boiling Refrigerant Transition by Flow Boiling of Immiscible Mixtures

研究代表者

本田 逸郎 (Honda, Itsuro)

兵庫県立大学・工学研究科・教授

研究者番号：00229254

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：従来の沸騰冷却システムから飛躍的な性能向上を目指し、流動沸騰系での非共溶性混合媒体の沸騰冷媒遷移機構や非共溶性混合媒体による限界熱流束の増大効果について検証した。試験流体は、高密度低沸点媒体にFC-72、低密度高沸点媒体に水を用い、流路幅30 mm、流路高さ2 mmの下側面加熱の矩形流路を加熱試験部とした。その結果、伝熱面における沸騰冷媒が切り替わる沸騰冷媒遷移は全体流量に対する高密度低沸点媒体の比率が高い場合を除き、基本的に生じることがわかった。また、沸騰冷媒遷移後の高熱流束領域では、水は飽和状態となり、限界熱流束は通常の水の飽和沸騰と同程度となることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高い冷却性能が期待できる非共溶性混合媒体を用いた沸騰冷却システムの実用展開のためには、冷媒の組み合わせと液量比を適切に設定することが必須であり、本研究成果による非共溶性混合媒体の流動沸騰熱伝達特性、特に、低熱流束域から中熱流束域において、高密度低沸点媒体から低密度高沸点媒体への沸騰冷媒遷移機構の知見が必須である。

研究成果の概要(英文)：Aiming to dramatically improve the performance from the conventional boiling cooling system, flow boiling experiments using immiscible mixture was conducted. For the test fluid, FC-72 was used as the high-density low-boiling liquid, and water was used as the low-density high-boiling liquid.

As a result, it was found that the boiling refrigerant transition in which the boiling refrigerant is switched on the heat transfer surface basically occurs except when the ratio of the high-density low boiling liquid to the total flow rate is high. It was also found that in the high heat flux region after the transition of the boiling refrigerant, the water became saturated and the critical heat flux was about the same as the saturated boiling of normal water system.

研究分野：熱工学、流体工学

キーワード：沸騰 熱伝達 非共溶性混合媒体 流動沸騰 伝熱促進

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

従来の沸騰冷却システムの研究・開発のほぼすべては、単成分媒体もしくは溶解性混合媒体を用いたものであり、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平板伝熱面ではほとんど期待できない。一方、非共沸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応用を目的としたもので、冷却系に有用な伝熱特性を持つことが明確にされておらず、単成分媒体との定性的差異も認識されていない。

一方、最近、FC72/水の組み合わせのような、高密度低沸点/低密度高沸点の非共溶性混合媒体を沸騰冷却に適用し、

1. 限界熱流束の飛躍的増大
2. 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
3. 非凝縮気体(空気)混入防止のための正圧(大気圧以下)作動下での冷却面温度の低減

などを液体混合のみで実現でき、特に低沸点媒体が少ない条件下では、高密度低沸点媒体と低密度高沸点媒体が入れ替わり、その際に一時的なバーンアウトが発生するよう、特異な沸騰熱伝達特性を取る条件があることが、大田らのグループによって報告されている。

このように、非共溶性混合媒体を用いた沸騰冷却は、最近、その冷却性能の高さや、実用面での適用可能範囲の広さが明らかになってきたが、2成分2相が複雑に作用するため、単成分媒体とは大きく異なる沸騰伝熱特性を示し、その基本的性質のごく一部しか明らかではない。特に、非共溶性混合媒体低沸点媒体から高沸点媒体への沸騰冷媒遷移は、両媒体の加熱前の液量比や混合分散状態などで変化するため、明確な発生条件もよく分かっていない。

申請者らは最近、プール沸騰における非共溶性混合媒体の沸騰冷媒遷移機構について、ケルビン-ヘルムホルツ不安定性を用いて説明し、過去の文献によるデータを含めた実験結果との良い一致を見せている。しかし、流動沸騰系については、沸騰冷媒遷移に関して全く報告がなく、さらに言えば、流動沸騰系において、非共溶性混合媒体を用いることが有用なのかすらわかっていないのが現状である。

2. 研究の目的

上述のように、非共溶性混合媒体を用いた流動沸騰についてほとんどわかっていない状況を打破するため、本研究では、これまでに研究例のない流動沸騰系での非共溶性混合媒体の沸騰冷媒遷移機構について実験によって明らかにする。さらに、非共溶性混合媒体による限界熱流束の増大効果について検証する。

3. 研究の方法

本研究では非共溶性混合媒体流動沸騰実験装置を設計・製作し、実験を実施する。実験ループは、タンク、ポンプ、流量計、予熱器、加熱試験部、凝縮器にて構成され、閉ループにて実施する。試験流体は、高密度低沸点媒体にFC-72(大気圧下での沸点56℃)、低密度高沸点媒体に水(大気圧下での沸点100℃)を用いる。混合媒体のタンク内は、重力によって、高密度低沸点媒体と低密度高沸点媒体に自然に分離される。

加熱試験部は下側伝熱面の矩形流路とし、流路幅30 mm、流路高さ2 mmとした。底面はアルミ

の伝熱ブロックとなっているおり、伝熱ブロックは流れ方向に7セクションに分かれ、それぞれ流れ方向に25 mmで、総加熱長さは175 mmである。それぞれの伝熱ブロックには鉛直方向に3つの熱電対が挿入されており、各ブロックの伝熱面表面温度、熱流束および熱伝達率が導出できる。これによって、流れ方向における伝熱特性分布を計測することができる。また上部は透明なポリカ板で、加熱部の気液挙動を観測することができる。本研究では、気液挙動観測を、高速度カメラにて撮影し、伝熱データとの関連性および非共溶性混合媒体の分散状況などを詳細に観測する。

試験流体には水とFC-72の組み合わせである非共溶性混合媒体を用いた。試験媒体は予熱器によって所定の温度まで加熱し、加熱試験部に送られる。本実験では平衡温度から10 K低温に設定した。さらに、それぞれの流体の単一成分での実験も行い、それらの熱伝達の比較を行った。また、加熱試験部全体はCCDカメラで観察し、さらに下流部の3セクション(セクション5、6、7)は高速度カメラにて観察した。加熱試験部出入口における圧力と流体温度、加熱試験部の加熱ブロック内温度を10Hzにて計測した。

実験条件は下の3項目である。

1. 混合媒体の混合流量比率：混合媒体タンク下の分岐セクションにて調整
2. 伝熱面熱流束：加熱ヒーターにて調整

これらをパラメトリックに変化させた。

4. 研究成果

実験では、FC-72と水の流量比はFC-72:水を0:5, 1:4, 2:3, 3:2, 4:1, 5:0とし、総流量を5 L/minで一定とした。さらに、それぞれの流体の単一成分での実験も行った。加熱熱流束は、全伝熱ブロックで同一に設定し、低熱流束から高熱流束まで段階的に変化させた。

まず、低熱流束域での優れた熱伝達や沸騰冷媒遷移特有の熱伝達特性が確認された。特に、FC-72が0.1 L/min、水0.4 L/minの流量条件において、他の実験条件と比較して広い熱流束範囲における優れた熱伝達特性が確認された。一方でFC-72の流量比が多くなってゆくにつれて、特に沸騰冷媒遷移後の熱伝達率が低下していった。

次に、高熱流束域での流体挙動および熱伝達特性は、激しく沸騰する水単体とは全く異なり、非共溶性混合媒体では水の薄液膜蒸発によって高い熱伝達が得られることが確認された。この様相はFC-72と水の流量比によって変化し、非共溶性混合媒体の流動沸騰熱伝達において、最適な流量比が存在することを確認した。また、FC-72の流量比が高い条件では、水単体に比較して熱伝達率が低下することがわかった。取得した実験データ、および撮影動画から、FC-72の流量比増大に伴い沸騰冷媒遷移後の伝熱面への水の供給が適切に行われなくなることが熱伝達率低下の原因と考えられる。なお、沸騰冷媒遷移は全ての非共溶性混合媒体の流量条件で確認された。さらに、加熱試験部出口温度の導出モデルを構築し、実験結果と良好な一致を得た。

以上より、高密度低沸点媒体(FC-72)と低密度高沸点媒体(水)を組み合わせた非共溶性媒体による強制対流沸騰において、伝熱面における沸騰冷媒が切り替わる「沸騰冷媒遷移」は全体流量に対する高密度低沸点媒体の比率が高い場合(2/3以上)を除き、基本的に生じることがわかった。つまり、高密度低沸点媒体の液量ではなく、液量割合が重要なファクターであることを明らかにした。

沸騰冷媒遷移後に水の核沸騰に移行した後の高熱流束領域では、FC-72の液相は下流部流路上には存在せず、水の気相・液相とFC-72の気相のみとなるため、試験流体温度は二成分の平衡温度にはならずには水は飽和状態となり、サブクール度は付与されない。このため、限界熱流束は通

常の水の飽和沸騰と同程度となることがわかった。つまり、限界熱流束の増大に対して、非共溶性混合媒体の利点はない。しかし、裏を返せば、加熱部下流部を含む全域に、高密度低沸点媒体が液相で存在する条件を作り出せば、低密度高沸点媒体に高いサブクール度が付与され、限界熱流束が増大すると考えられる。そこで、FC-72が伝熱面上にはないがシステム内に存在する場合の伝熱特性を実験的に検証するため、流速0の静止流体中で実験を行った。伝熱面周囲に液体が貯められる溝を作り、伝熱面の高さを基準として、溝の中のFC-72の液高さを-3, 0, 1, 3, 5, 8, 10 mm（溝なしの場合に相当）に変化させた。その結果、伝熱面の高さよりも低い場合（-3 mm）でも、伝熱面の周囲にFC-72の液相が存在していれば、試験流体温度は平衡温度付近を維持し、限界熱流束は水の飽和沸騰よりも2倍程度大きくなることがわかった。この数値は-3, 0, 1 mmでほとんど変化はなかった。

以上から、これまでおよび今年度の結果を総合すると、「強制対流沸騰系で沸騰冷媒遷移を生じさせながら、限界熱流束を増大させるためには、伝熱面周りにFC-72の液相が存在する状況下で、FC-72の流量比率が2/3以下である条件」が、非共溶性混合媒体を用いた強制対流沸騰のパフォーマンスを最大限に引き出す要因の一つであると結論づけられた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 KAWANAMI Osamu, HARA Yasuhiko, TAKAGAKI Naohisa, HONDA Itsuro	4. 巻 85
2. 論文標題 非共溶性混合媒体を用いたプール沸騰における沸騰冷媒遷移時の伝熱特性（高密度低沸点媒体の液高さの影響）	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 19-00216
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/transjsme.19-00216	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Kawanami Osamu, Matsuhiro Kazuki, Hara Yasuhiko, Honda Itsuro, Takagaki Naohisa	4. 巻 146
2. 論文標題 Liquid-liquid interfacial instability model for boiling refrigerant transition by pool boiling of immiscible mixtures	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 118826
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118826	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 原 靖彦, 河南 治, 本田 逸郎, 高垣 直尚
2. 発表標題 矩形流路を用いた非共溶性混合媒体の沸騰熱伝達実験
3. 学会等名 日本混相流学会 混相流シンポジウム2019
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	河南 治 (Kawanami Osamu) (20382260)	兵庫県立大学・工学研究科・教授 (24506)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------