

令和 2 年 6 月 15 日現在

機関番号：24506

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06204

研究課題名（和文）狭隘閉鎖空間内の非共溶性混合媒体プール沸騰における沸騰冷媒遷移機構の解明

研究課題名（英文）Study on mechanism of boiling refrigerant transition by pool boiling of immiscible mixtures in a closed narrow space

研究代表者

河南 治（Kawanami, Osamu）

兵庫県立大学・工学研究科・准教授

研究者番号：20382260

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、高発熱密度機器の冷却に用いる革新的な冷却方法である、非共溶性混合媒体の沸騰機構について、狭隘空間でのプール沸騰実験などから、新たなモデルの提案および伝熱様相を詳細に観察し、これまでわからなかった沸騰冷媒が切り替わる機構を説明することに成功した。また、狭隘空間では水の表面張力の影響が顕在化し、通常サイズの空間とは異なる沸騰様相が観察された。

研究成果の学術的意義や社会的意義
非共溶性混合媒体を用いた沸騰冷却システムによって、ほとんどの冷却系の高性能化が可能となる。このような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沸騰熱伝達特性、特に、低～中熱流束域における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は必須である。

研究成果の概要（英文）：In this study, we proposed a new model and a heat transfer pattern for the boiling mechanism of immiscible mixtures in a narrow space, which is an innovative cooling method used for cooling high heat density equipment. By observing the boiling behaviour in detail, we succeeded in explaining the mechanism of boiling refrigerant transition, which was unknown until now. In addition, the effect of surface tension of water became apparent in the narrow space, and a boiling behaviour different from that of the normal size space was observed.

研究分野：熱工学

キーワード：非共溶性混合媒体 沸騰 沸騰冷媒遷移 狭隘空間

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^[1]。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^[2, 3]、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、特異な沸騰熱伝達特性を取ることが、大田らのグループによって報告されている^[4]。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、明確な発生条件も不明である。

2. 研究の目的

本研究では、沸騰現象を簡素化し、伝熱面近傍の沸騰挙動を詳細に観測するため、幅1 mmの平行平板間狭隘空間の底部を加熱伝熱面とし、狭隘閉鎖空間におけるプール沸騰実験を行う。挙動観測には、シャドウグラフ法によって伝熱面近傍を、伝熱面下側からの高速度カメラによって伝熱面上の沸騰気液挙動を観察する。さらに、加熱前の非共溶性混合媒体の両液体の層厚さ、冷媒の組み合わせを変えて、非共溶性混合媒体の沸騰熱伝達特性、特に、低～中熱流束域における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について明らかにする。

3. 研究の方法

沸騰冷媒の遷移は、伝熱面近傍の現象を詳細に観察する必要があるが、高密度低沸点媒体と低密度高沸点媒体を用いた非共溶性混合媒体の沸騰系では、2成分・2相の分散状態も考慮せねばならず、非常に複雑な現象となる。そこで、本提案では、底部加熱面に対し、幅1 mmの平行平板狭隘空間を有するプール沸騰装置を製作する。このような狭隘空間では生成気泡が奥行き方向に1～数個に抑制でき、平行平板正面からシャドウグラフ法による観察を行うことで、伝熱面近傍の冷媒や高密度低沸点媒体の分散状態を把握し、沸騰冷媒遷移機構を詳細に調査する。試験液体は冷却媒体として現実的な高密度低沸点媒体/低密度高沸点媒体の組み合わせで、FC-72/水、NOVEC7100/水などを用いて行う。すでにこれらの相平衡図は作成済みである。実験は大気圧近傍の圧力一定の下で熱伝達特性を比較する。

4. 研究成果

4-1 沸騰冷媒遷移発生モデルの提案

これまで、低密度高沸点媒体と高密度低沸点媒体を組み合わせた非共溶性混合媒体のプール沸騰において、伝熱面上の沸騰冷媒が切り替わる現象が生じる条件として、Ohtaらのグループによって、非共溶性混合媒体の液-液境界面を突破する空気泡の最小径(Greene et al., 1988)が、その閾値として適用されてきた。しかし、この条件では流体の密度および表面張力以外の熱物性値や伝熱面の大きさや熱流束に関係なく、一意的に決定される。そこで、我々は、沸騰冷媒が非共溶性混合媒体のプール沸騰において、伝熱面上の冷媒が切り替わる現象を沸騰冷媒遷移と呼称し、液液界面に対するKelvin-Helmholtz不安定性によって沸騰冷媒遷移が生じるとし、伝熱面積や高密度低沸点媒体の限界熱流束を組み入れた沸騰冷媒遷移の発生モデルを提案し、このモデルから沸騰冷媒遷移が生じる高密度低沸点媒体の液高さの閾値を示した。この新しい閾値は、本研究による実験結果、並びに既往論文の実験結果に対して、よく適合することを確認した。(発表論文1)

4-2 沸騰冷媒遷移時の伝熱様相

高密度低沸点媒体と低密度高沸点媒体による非共溶性混合媒体を用いたプール沸騰について、低熱流束域から沸騰冷媒遷移が生じる熱流束域の範囲にて実験を実施し、以下の知見を得た。容器底部の伝熱面からの加熱によって発生する高密度低沸点媒体の気泡は、高密度低沸点媒体の液相を巻き込みながら液-液界面を突破し、低密度高沸点媒体の液相中を上昇する。また、両媒体の液体積比率および高密度低沸点媒体の液高さをパラメータとした実験結果より、上層に位置する低密度高沸点媒体の体積力は、伝熱面上で沸騰冷媒が入れ替わるための駆動力ではなく、高密度低沸点媒体の液高さによって、伝熱の様相が決定されることがわかった。その伝熱の様相は主に4つのパターンに分けられ、高密度低沸点媒体の液高さのわずかな差で、伝熱様相に大きな違いが生じることが確認された。さらに、観察画像から、液高さが低い2つの条件での伝熱面における沸騰挙動を確認し、沸騰曲線に見られた伝熱様相を説明した。(発表論文2)

4-3 狭隘空間での現象

上記の成果を受け、狭隘空間での実験を実施した。縦40 mm, 横40 mm, 奥行き3 mm の狭隘実験空間をPEEK 材とBK7 (ガラス板)により製作した。この狭隘空間によって、奥行き方向への流体の動きを制限し、沸騰現象の観測を容易にする。狭隘空間底部には伝熱面として長さ38 mm, 幅2 mm, 厚み0.02 mm の白金箔を使用し、通電加熱により加熱した。現象の観察は伝熱面に印加した電圧値および電流値が安定した状態で行い、通電加熱の消費電力から熱流束を、熱電対により液体温度を測定し、熱伝達率を算出する。伝熱面に白金を用いているため、抵抗率と温度の関係からも伝熱面温度を計算した。試験流体には、高密度低沸点媒体にNovec7100, 低密度高沸点媒体に水を用いた。結果より、伝熱面近傍および液液界面での流体挙動を捉えることができた。また、狭隘空間内では表面張力の影響が顕在化し、液液界面の形状が歪になる特異な現象が見られた。すなわち、表面張力が大きい水がテストセクションの側面に引き寄せられ、沸騰伝熱面に進入できない状況が観察された。一方、熱伝達特性は、体沸点媒体の核沸騰域において通常サイズのプール沸騰熱伝達と同じ特性を有することが確認された。現在、論文発表を目標に、これらの成果をまとめている。

【発表論文】

1. 河南治, 原靖彦, 高垣直尚, 本田逸郎; 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), 日本機械学会論文集 Vol.85 (2019) 19-00216. DOI: 10.1299/transjsme.19-00216.
2. Osamu Kawanami, Kazuki Matsuhiro, Yasuhiko Hara, Itsuro Honda, Naohisa Takagaki; Liquid-liquid interfacial instability model for boiling refrigerant transition by pool boiling of immiscible mixtures, International Journal of Heat and Mass Transfer Vol.146 (2020) 118826. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118826.

【引用文献】

- [1] T. Sakai et al., IHTC-14, IHTC14-22737, 2010.
- [2] C.F. Bonilla and A.A. Eisenberg, Industrial and Engineering Chemistry, Vol.40, No.6, pp.1113-1121, 1948.
- [3] G.D. Sump and J.W. Westwater, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.14, pp.767-779, 1971.
- [4] S. Onishi, H. Ohta, N. Ohtani, Y. Fukuyama, H. Kobayashi, Interfacial Phenomena and Heat Transfer, Vol.1, pp.63-80, 2013.

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, Matsuhira 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 -

1. 著者名 1.河南治, 原靖彦, 高垣直尚, 本田逸郎	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 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 河南 治、松廣 和樹、原 靖彦、本田 逸郎
2. 発表標題 非共溶性混合媒体プール沸騰における冷媒遷移の条件について
3. 学会等名 日本混相流学会 混相流シンポジウム2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松廣 和樹、原 靖彦、河南 治、本田 逸郎
2. 発表標題 非共溶性混合媒体のプール沸騰における沸騰冷媒遷移について
3. 学会等名 熱工学コンファレンス2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松廣 和樹, 河南 治, 本田 逸郎
2. 発表標題 非共溶性混合媒体のブール沸騰における冷媒遷移条件の実験的探索
3. 学会等名 日本混相流学会 混相流シンポジウム2017
4. 発表年 2017年

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