

令和 2 年 7 月 1 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K06103

研究課題名(和文) 二成分流体の沸騰における特異な気液構造発現およびCHF促進の機構解明

研究課題名(英文) Studies on unique characteristics of liquid-vapor behaviors and mechanism of CHF enhancement during boiling of aqueous binary mixtures

研究代表者

坂下 弘人 (SAKASHITA, Hiroto)

北海道大学・工学研究院・准教授

研究者番号：00142696

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)：水に微量のアルコールを添加した二成分水溶液を沸騰媒体として用いるとCHFは飛躍的に促進される。この促進機構を解明するために、水、各種アルコール(2-プロパノール、ブタノール、ペンタノール)および表面活性剤(triton-X)水溶液の沸騰様相を、透明伝熱面を用いて可視化測定を行った。その結果、アルコール水溶液では、伝熱面上のドライアウトの拡大が大幅に抑制され、Triton-X水溶液では水の沸騰とほとんど差の無いことが判明した。このことから、二成分水溶液によるCHF促進は、伝熱面近傍に形成される不均一なアルコール濃度場に起因する伝熱面ドライアウトの抑制によることが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

沸騰の除熱限界である限界熱流束(CHF)は、微量のアルコールを添加することで大きく促進されるため、高熱流束機器の沸騰除熱媒体として利用できる可能性がある。しかし、CHF促進機構は明らかになっていなかった。本研究では、透明伝熱面を用いた可視化測定により、伝熱面上の乾燥領域の拡大がアルコールの添加により大幅に抑制されることがCHF促進をもたらしていることを明らかにした。また、炭素数4以上のアルコール水溶液は極めて低濃度でCHFの大幅な促進をもたらす、効率的なCHF促進媒体であることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The CHF of the mixtures considerably increases when small amount of alcohols are added to water. To examine the mechanism of CHF enhancement, this research visualized the boiling behaviors of water, binary aqueous mixtures of alcohols (2-propanol, butanol, pentanol), and surfactant (Triton-X) using a transparent heating surface. It was found that the dryout expansion on the heating surface was significantly suppressed in the alcohol aqueous solution compared to water, and there was almost no difference between the Triton-X aqueous solution and water. These results clarified that the CHF enhancement in the binary aqueous mixtures is due to the suppression of surface dryout caused by non-uniform distribution of alcohol concentration formed near the heating surface.

研究分野：伝熱工学

キーワード：二成分水溶液 限界熱流束 可視化測定 沸騰 ドライアウト

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

水に、微量のアルコールを添加した2成分水溶液を作動流体として用いると、プール沸騰の限界熱流束(以下、CHF)が顕著に促進される場合のあることが知られており、高熱流束機器の沸騰除熱媒体として利用できる可能性がある。2成分水溶液のCHF促進に関しては過去に種々の実験的、理論的検討が行われてきたが、CHF促進機構は現在まで明らかになっていない。本研究の研究代表者は、過去に2成分水溶液のCHF促進機構を検討するために、2-プロパノール水溶液を用いて、直径12mmの上向き面上の大気圧での飽和プール沸騰の限界熱流束を測定するとともに、触針法を用いて伝熱面近傍の気液挙動を測定した(参考文献)。その結果、2-プロパノール水溶液のCHFは、濃度3.0mol%近傍で水のCHFに対して約1.7倍促進されること、蒸気塊下に形成される液層(マクロ液膜)は水に比べて顕著に厚くなることを明らかにした。以上の結果から、2-プロパノール水溶液によるCHFの促進機構には、厚い液層の形成による伝熱面ドライアウトの抑制が強く関与している可能性が高いことを示唆した。この機構は、過去に提案された二成分水溶液のCHF促進機構とは異なるものであり、その妥当性を検証するためには、伝熱面上の沸騰様相の直接観察により、水と各種アルコール水溶液におけるドライアウト挙動の違いを明らかにする必要がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は以下の通りである。

- (1)沸騰様相の直接観察を可能にする可視化実験法の構築
- (2)伝熱面のドライアウト挙動に与えるアルコール濃度の影響の検討
- (3)アルコールの種類の違いが、CHF促進および伝熱面ドライアウト挙動に与える影響の検討
- (4)表面張力がほぼ等しいアルコール水溶液と表面活性剤水溶液の沸騰におけるCHF促進割合およびドライアウト挙動の比較

以上の検討により、二成分水溶液によるCHF促進機構の解明を目指す。

3. 研究の方法

(1)沸騰挙動可視化実験

図1に、可視化測定に用いた実験装置と光学系の概略を示す。伝熱面には高熱伝導率のサファイア基板(厚さ1mm)を用い、裏面に蒸着した透明導電膜(ITO膜)への直流通電によって加熱する。加熱領域は、長さ20mm、幅10mmの矩形である。伝熱面底部にプリズムを密着させ、伝熱面上面が乾いている場合に全反射条件を満たすように観察光を入射し、沸騰様相を高速度ビデオにより撮影した。これにより、伝熱面が乾いている部分は明るく、液で覆われている部分は暗く観察されるため、伝熱面のドライアウト挙動の可視化が可能となる。

(2)CHF測定実験

本実験では、アルコールの種類によるCHF促進率の違いを調べるため、ブタノールおよびペンタノールの水溶液を用いた実験を行った。また、表面張力の低下とCHF促進の関連を検討するため、表面活性剤であるTriton-X水溶液を用いてCHF測定を行った。伝熱面は直径12mmの銅製上向き面であり、表面温度と表面熱流束は銅ブロック中心軸上に表面から4mm、12mmの位置に設置した2本の熱電対を用いて測定した。

4. 研究成果

(1)伝熱面ドライアウト挙動の可視化結果

図2に、伝熱面下面から撮影された高速ビデオ画像のスナップショットの一例を、水の沸騰の場合について示す。熱流束は $q=1.0\text{MW/m}^2$ (水のCHFの約86%)である。画像の白い部分が、伝熱面が蒸気に覆われ入射光が全反射を生じた領域であり、暗い部分は液に覆われている領域である。この結果より、本研究で作成した可視化実験装置を用いて、伝熱面のドライアウト挙動の可視化測定が可能であることが確認できる。

(2)伝熱面上のボイド率分布の2-プロパノール濃度による変化

図3に、2000fpsで1秒間撮影した高速ビデオ画像を平均して得られた伝熱面上のボイド率分布の、2-プロパノール濃度による変化を示す。熱流束はいずれも $q=1\text{MW/m}^2$ である。濃度の増加に伴って伝熱面のドライアウト領域は抑制され、CHFの最大促進効果が得ら

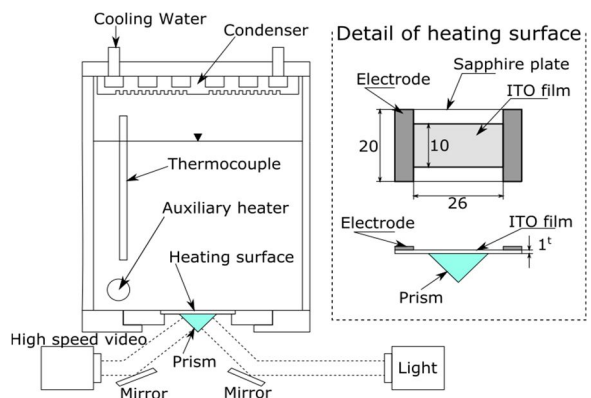


図1 可視化測定用実験装置

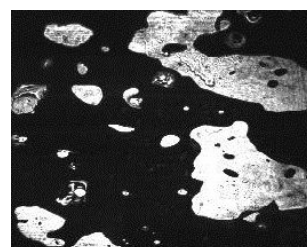


図2 伝熱面の高速ビデオ画像
(水, $8\text{mm} \times 6.4\text{mm}$, $q=1.0\text{MW/m}^2$)

れる濃度 3mol%では、伝熱面の大半が液に覆われていることが分かる。図4は、図3に例示したボイド率分布を面平均して得られた平均ボイド率の熱流束による変化である。

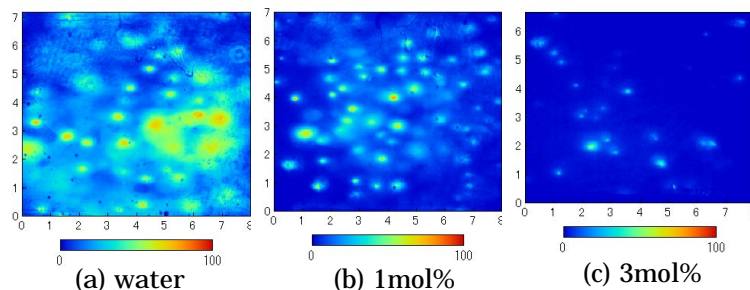


図3 ボイド率分布の濃度による変化 ($q=1.0\text{MW/m}^2$)

水では、平均ボイド率は熱流束の増大とともに増大し、 $q=1.0\text{MW/m}^2$ では約25%に達しているのに対し、2-プロパノール水溶液では濃度の増加とともに減少し、濃度3mol%では $q=1.0\text{MW/m}^2$ で約2%以下に留まっている。

(3) ブタノール、ペンタノールの結果
2-プロパノール(炭素数3)とは異なり、炭素数4以上のアルコールは水への溶解度に上限が存在する。したがって、濃度の変化幅はこの上限値によって限定されるため、十分なCHF促進が得られない可能性がある。そこで、ブタノール(溶解度2mol%)およびペンタノール(溶解度0.46mol%)水溶液を用いて実験を実施した。図5にこれらの水溶液のCHFを、2-プロパノール水溶液の結果と比較して示す。両水溶液とも、2-プロ

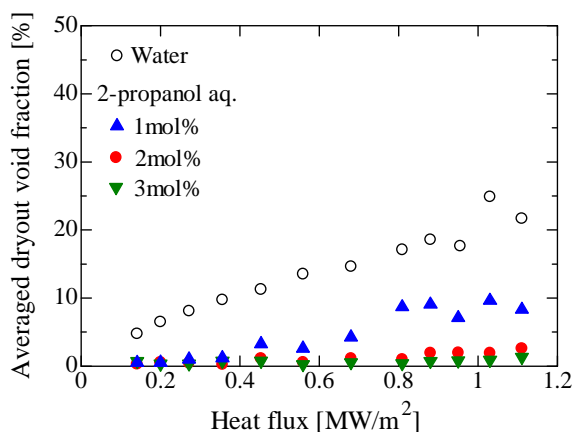


図4 平均ボイド率の熱流束による変化の2-プロパノール濃度依存性

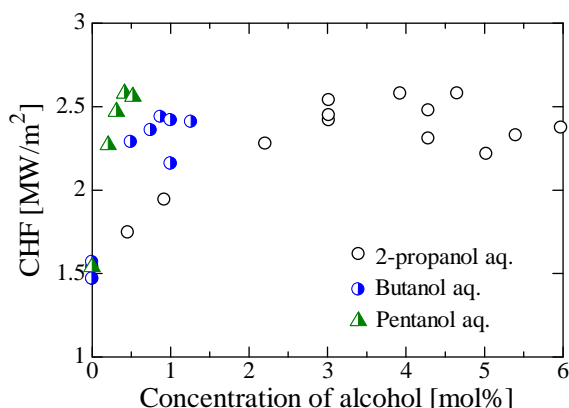


図5 各種アルコール水溶液におけるCHFの濃度依存性

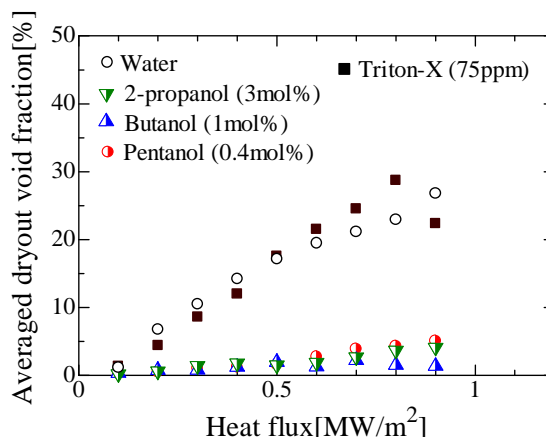


図6 各種アルコールおよび表面活性剤水溶液における平均ボイド率の熱流束による変化

パノール水溶液の最大促進効果が得られる約3mol%に比べてはるかに低い濃度で同等のCHF促進が達成されている。このように、ブタノール、ペンタノールは、2-プロパノールと同様に、効率的なCHF促進媒体として利用できることが判明した。

図6は、各種アルコール水溶液で最大のCHF促進が得られる濃度における、伝熱面平均ボイド率の熱流束による変化である。ブタノールおよびペンタノールの水溶液は、2-プロパノール水溶液と同様に、水に比べて非常に小さなボイド率に留まっている。なお、図6には表面活性剤であるTriton-Xの結果も併記してあるが、これについては次節で説明する。

(4) 表面活性剤(Triton-X)水溶液のCHF

CHFの発生に関わる各種物性値の中で、表面張力のみが微量のアルコール添加によって大きく変化し、他の物性値はほとんど変化しない。図7(a)~(c)に、本実験で用いた各種アルコール水溶液の常温における表面張力の濃度による変化を示す。図7(a)~(c)の破線は、CHFが最大値を取る濃度とその時の表面張力値である(ペンタノールは入手できるデータが低濃度に限られていたため外挿値である)。図より、表面張力はアルコールの添加によって水の値から大幅に低下し、26~40mN/mでCHFが最大値を取ることが分かる。そこで、この表面張力の低下がCHF促進に与える影響を検討するため、同程度の表面張力となる濃度75ppmのTriton-X水溶液でCHFを測定し、表面張力の低下とCHF促進の関係を検討した。なお、Triton-Xの表面張力の濃

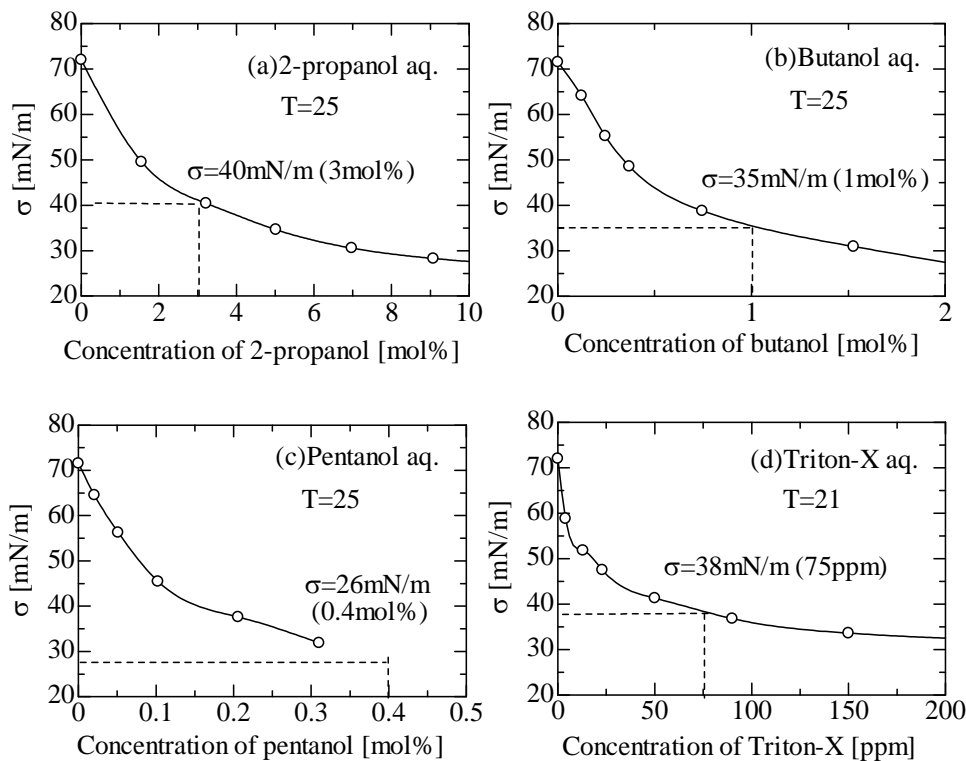


図7 各種水溶液の表面張力の濃度による変化

度依存性は図7(d)に示してある。

図8に、Triton-X水溶液(75ppm)の沸騰曲線を、水、ブタノール水溶液(1mol%)、ペンタノール水溶液(0.4mol%)の結果とともに示す。水の結果と比較すると、Triton-Xの添加によって核沸騰域で熱伝達の促進が見られるが、CHFは促進されないことが分かる。

図9は、熱流束 $q=0.9\text{MW/m}^2$ における、水とTriton-X水溶液(75ppm)の平均ボイド率分布の比較である。Triton-X水溶液の結果は水と大きな差はなく、乾燥領域は伝熱面全体に拡大している様子が分かる。また、ほぼ同一の熱流束で得られた2-プロパノール水溶液 3mol%の結果(図3(c))との比較より、表面活性剤の添加による表面張力低下はドライアウト抑制には関与しないことが確認できる。

以上、本研究で得られた結果より、水に微量のアルコールを添加した二成分水溶液を沸騰媒体として用いると、伝熱面のドライアウトが大幅に抑制され、これがCHF促進をもたらすことが明らかとなった。また、アルコール水溶液と表面活性剤水溶液を沸騰媒体として用いた場合の最も大きな違いは、前者では伝熱面近傍で生じるアルコールの選択的除発によって濃度分布を生じる点にある。バルク液の表面張力がほぼ同一にも関わらず、アルコールのみでCHF促進が得られることから、CHF促進には伝熱面近傍で形成される濃度分布が強く関与していると考えられる。

<参考文献>

H.Sakashita and A.Ono, Measurements of critical heat flux and liquid-vapor structure near the heating surface in pool boiling of 2-propanol/water mixtures, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.53, 2010, pp.1554-1562.

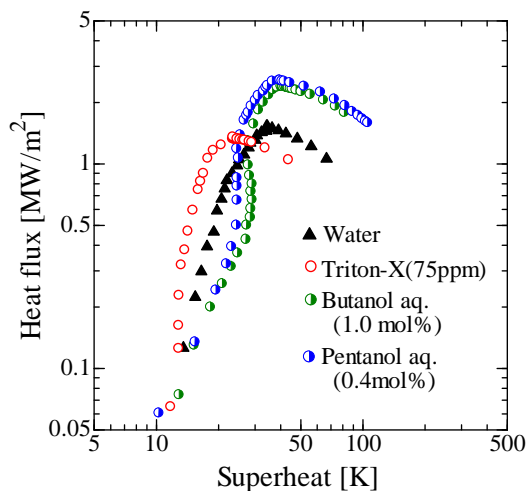


図8 Triton-X水溶液とアルコール水溶液の沸騰曲線の比較

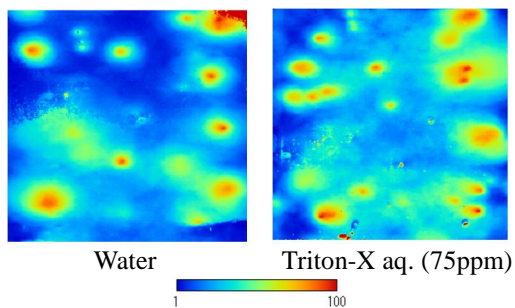


図9 水とTriton-X水溶液の平均ボイド率分布 ($q=0.9\text{MW/m}^2$)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 中村宏人, 坂下弘人
2. 発表標題 二成分混合液のプール沸騰における沸騰様相の可視化測定
3. 学会等名 第56回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Sakashita
2. 発表標題 Estimation of local concentrations and visualization of boiling behaviors at high heat fluxes in saturated pool boiling of 2-propanol/water mixtures
3. 学会等名 The 16th International Heat Transfer Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 坂下弘人
2. 発表標題 2-プロパノール水溶液の飽和プール沸騰における沸騰様相の可視化測定
3. 学会等名 第54回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 今井智之, 坂下弘人
2. 発表標題 水および2-プロパノール水溶液のプール沸騰高熱流束域における沸騰様相の可視化に関する研究
3. 学会等名 日本原子力学会北海道支部第34回研究発表会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 坂下 弘人
2. 発表標題 2-プロパノール水溶液の飽和プール沸騰における沸騰様相の可視化測定
3. 学会等名 第54回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2017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