

宇宙用高性能冷却システムの開発を目的とした混合媒体の核沸騰における伝熱促進効果に関する研究

九州大学 月成勇起、酒井崇、芳井晋作、梶本和利、新本康久、大田治彦

産業技術総合研究所 阿部宜之

Heat Transfer Enhancement in Binary Mixtures Applied to Development of High-performance Thermal Management Systems in Space

Yuki Tsukinari, Takashi Sakai, Shinsaku Yoshii, Kazutoshi Kajimoto,
Yasuhisa Shinmoto and Haruhiko Ohta

Kyushu University, Motooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395

Yoshiyuki Abe

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST),

Tsukuba, Ibaraki 305-8568

E-Mail: tekkou@aero.kyushu-u.ac.jp

Abstract: To develop high-performance space thermal management systems with boiling phenomena, the heat transfer characteristics in nucleate pool boiling of binary mixtures on a horizontal surface were investigated using three different mixtures 1-Propanol/Water, 2-Propanol/Water and Water/Ethylene glycol at the saturated state under atmospheric pressure. For 1-Propanol/Water and 2-Propanol/Water, increase in the heat transfer coefficients was confirmed while the critical heat flux values are decreased at very low concentration of alcohol. The existence of Marangoni effect on the observed heat transfer enhancement was emphasized. A definition of Marangoni number was proposed to take account of the Marangoni effect by using the concentration difference between vapor-liquid interface underneath bubble and bulk liquid.

Key words; Boiling heat transfer, Binary mixtures, Marangoni effect

1. 緒言

近年、宇宙機の大型化・大容量化による排熱量の増大と熱輸送距離の増大が深刻化しており、宇宙用排熱システムの高性能化が要求されている。そのような状況下で、相変化による高い熱伝達および熱輸送能力を有する沸騰熱伝達・二相流体ループの応用が注目されている。沸騰熱伝達の基本は強制流動系であっても核沸騰熱伝達にあり、とくに近年では混合媒体の利用に関心が持たれる傾向がある。混合媒体は組成に応じて飽和温度などの熱物性値が変化するため、システムに対する最適な温度と圧力レベルによる運用が可能となり、さらに混合媒体に見られるマランゴニ効果などの特異な性質よって熱伝達特性が改善される可能性を秘めている。

混合媒体の特性は、一般的に同一熱物性値をもつ仮想の単成分媒体と比較すると熱伝達係数は低下することが知られている。その原因として低沸点成分の優先的蒸発により、気泡底部の三相界面に向かって低沸点成分濃度が低下し、物質拡散抵抗の存在下では濃度差が生じた状態で蒸発が進行する。このために相平衡図の沸点曲線に沿って界面温度上昇すなわち有効過熱度の低下が生じるので、伝熱量が低下して伝熱劣化が生じるものと考えられている。しかし、気泡底部の気液界面近傍での局所濃度変化により発生する表面張力勾配がマランゴニ効果を生じ、

その作用による伝熱面への自発的な液体供給がドライアウトを抑制することで熱伝達効率の向上が期待できる^[1]

混合媒体の熱伝達係数の予測式は、従来数多く提案されている。Stephan and Körner^[2]は混合媒体の熱伝達劣化に関して相平衡図上における気液濃度差である $(y-x)$ を重要因子として挙げた。また、Calus and Rice^[3]は従来の気泡成長理論の実験的モデルに基づき、伝熱劣化因子として物質拡散抵抗を考慮した $(y-x)(\kappa/D)^{1/2}(c_{pl}/h_{fg})(dT/dx)$ の導入を行った。混合媒体の限界熱流束に関しては、マランゴニ効果が限界熱流束の増大の一要因として挙げられ、McGillis and Carey^[4]は気液間の流体力学的不安定性より導出されたZuber^[5]の式にマランゴニ効果による影響を反映した修正式を提案し、限界熱流束の増大を説明した。さらに近年では、Kern^[6]が混合媒体における気泡底部のマイクロ液膜領域において物質拡散およびマランゴニ対流に関連した理論モデルを提案しており、マイクロ領域での気液界面組成変化の影響が重要であることを報告している。

そこで、本研究では気泡底部におけるマイクロ領域におけるマランゴニ効果に注目し、沸騰熱伝達特性と伝熱促進効果に及ぼす影響について記述する。

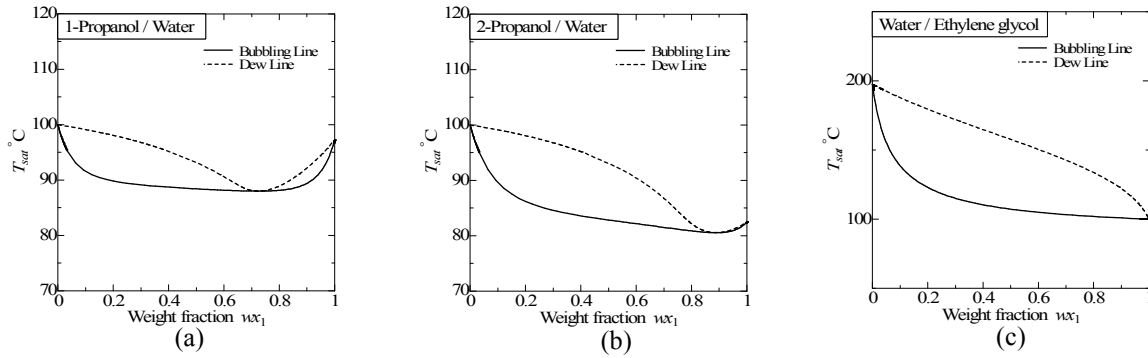


Fig.1 Phase equilibrium diagrams at atmospheric pressure
(a) 1-Propanol/Water, (b) 2-Propanol/Water, (c) Water/Ethylene-glycol

2. 実験装置および実験方法

沸騰容器は内径 200mm のステンレス製で、伝熱面は円筒状銅ブロックの端面を使用しており直径 40mm の水平上向き円板である。伝熱面外周を薄いフィンと一体で切削することにより、外周部分からの発泡点の集中を抑制し、またフィンからの熱損失を極力低減するためにフィンは可能なかぎり薄くしている。伝熱面ブロック内には中心軸上および中心から半径方向に 17mm 離れた軸上に表面から 1, 7, 13, 19mm の位置に温度計測のために熱電対を挿入している。沸騰容器上部には、系圧力および飽和温度を所定の値に保つために、3 種類の長さの冷却管からなる凝縮器を配している。実験は熱流束を $1.0 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ 付近から段階的に上げていき、各熱流束で十分な時間をおいて伝熱面表面に最も近い位置の熱電対の指示値がほぼ定常状態になることを確認する。伝熱面表面温度が急上昇した熱流束の一つ前の熱流束を限界熱流束と見なした。限界熱流束近傍における熱流束の増分は約 $1.0 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ であり、これがそのまま限界熱流束の測定精度になる。なお熱流束は銅ブロック内の熱伝導計算により求められる。

試験圧力は 0.1MPa とし、試験媒体および媒体濃度域は Table 1 に示す通りである。また、使用した各媒体の相平衡図を Fig. 2 に示す。

Table 1 Tested bulk concentration of alcohol mixture

Test fluid	Alcohol concentration
1-Propanol/Water	0wt%-90wt%
2-Propanol/Water	0wt%-89wt%
Water/Ethylene-glycol	0wt%-90wt%

3. マランゴニ効果の評価

マランゴニ効果の指標として、ここでは以下の式(1)で定義される濃度差マランゴニ数 Ma_c を導入する。このマランゴニ数が正に大きいほどマランゴニ効果による伝熱促進効果が期待できることを示し、負に大きいほど大きな伝熱劣化効果となることを示す。1-Propanol/Water および 2-Propanol/Water の超低濃度域においてマランゴニ効果による大きな伝熱促進が

期待できると予測される。

$$Ma_c = \frac{-(\partial\sigma/\partial x)\Delta x l}{\mu D_{12}} = \frac{-(\partial\sigma/\partial x)(y_{1,s} - x_{1,s})La}{\mu D_{12}} \quad (1)$$

ここに、式中の濃度差である Δx は気泡底部の気液界面濃度差 $(y_{1,s} - x_{1,s})$ として定義した。用いた物性値は粘性係数 μ 、表面張力 σ 、拡散係数 D_{12} で、代表長 l はラプラス定数 $La = [\sigma/g(\rho_l - \rho_v)]^{1/2}$ を使用した。

4. 気泡底部における気液界面組成

混合媒体の沸騰では気泡が成長するにつれて気液界面において低沸点成分が優先的に蒸発する。それによりバルク液体濃度 x_1 から界面濃度 $x_{1,s}$ へ濃度変化が生じる。ここで、Kandlikar^[7]は界面付近における濃度境界層厚さ $\delta_m (= (\pi D_{12} t)^{1/2})$ 内の平均濃度を $x_{1,ave}$ とし、濃度境界層内の低沸点成分と気泡内でのマスバランスを解くことで以下の式(2)を導出した。

$$x_{1,ave} = x_1 - \frac{1}{3} \frac{R}{\delta_m} \frac{\rho_v}{\rho_l} (y_{1,s} - x_1) \quad (2)$$

また、蒸発界面に接する半無限体の液体への物質拡散を仮定すれば、界面における濃度分布は界面からの距離 z と気泡発生開始からの時間 t によって、次のように表される。

$$\frac{x_{1,z} - x_{1,s}}{x_1 - x_{1,s}} = \text{erf} \left(\frac{z}{2\sqrt{D_{12}t}} \right) \quad (3)$$

さらに、Van Stralen^[8]の気泡成長半径 R に関する解析によって得られた以下の式(4)-(6)を式(2)に適用することで式(7)が得られる。^[6,7]

$$R = \frac{2}{\sqrt{\pi}} Ja_0 \sqrt{kt} \quad (4)$$

$$Ja_0 = \frac{\rho_l c_{pl} (T_w - T_{sat}) / \rho_v h_{fg}}{1 + (y_{1,s} - x_{1,s}) \left(\frac{c_{pl}}{h_{fg}} \right) \left(\frac{\kappa}{D_{12}} \right)^{1/2} \left(\frac{T_{sat,s} - T_{sat}}{x_1 - x_{1,s}} \right)} \quad (5)$$

$$T_{s,sat} = T_{sat} \left(1 + \frac{y_{1,s} v_{1,l} + y_{2,s} v_{2,l}}{h_{fg}} p_{cap} \right), \quad p_{cap} = \frac{\sigma}{r} + \frac{A}{\delta^3} \quad (6)$$

$$x_{1,s} = x_1 - \frac{2.13}{\pi} Ja_0 \left(\frac{\kappa}{D_{12}} \right)^{1/2} \frac{\rho_v}{\rho_l} (y_{1,s} - x_1) \quad (7)$$

ここに界面飽和温度 $T_{s,sat}$ は気泡底部のキャピラリー圧力 p_{cap} の影響を考慮して求められる。この値は表面張力 σ 、気泡底部曲率半径 $1/r$ および分離圧(disjoining pressure) A/δ^3 で定義される^[6]。計算手順は、まずバルク組成 x_1 を設定して相平衡図より飽和温度 T_{sat} を定め、界面濃度 $x_{1,s}$ を仮定する。次に、この界面濃度に対応した各物性値を求め、 $x_{1,s}$ が式(7)に一致するまで反復計算を行う。Fig.2 は 1-Propanol/Water についてバルク気液濃度差および界面気液濃度差をバルク液濃度に対して示したものである。熱流束の増加により、バルク液濃度 20wt%以下では熱流束が高いほど界面気液濃度差が小さくなるのに対して、20wt%以上では逆に界面気液濃度差は大きくなる。伝熱面過熱度は熱流束が高いほど大きくなることから熱流束レベルによる界面気液濃度差の大小に対応する界面濃度の上昇の大小が有効過熱度の減少割合の大小と直接結び付かない。これに関しては改めて検討する必要がある。Fig.3 は式(1)で計算した濃度差マランゴニ数

Ma_C とバルク液濃度の関係を各熱流束ごとに示している。ここでは $\delta=10^{-7}$ m と仮定し、液膜厚さが十分大きく Ma_C が最大値にほぼ飽和しているときの値を示している。

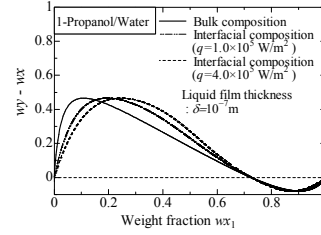


Fig.2 Comparison of interfacial concentration difference at different heat fluxes for 1-Propanol/Water.

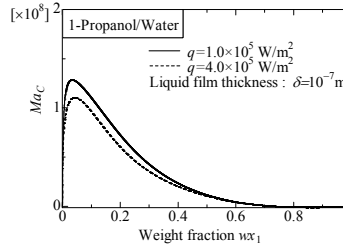


Fig.3 Comparison of solutal Marangoni number at each heat fluxes for 1-Propanol/Water.

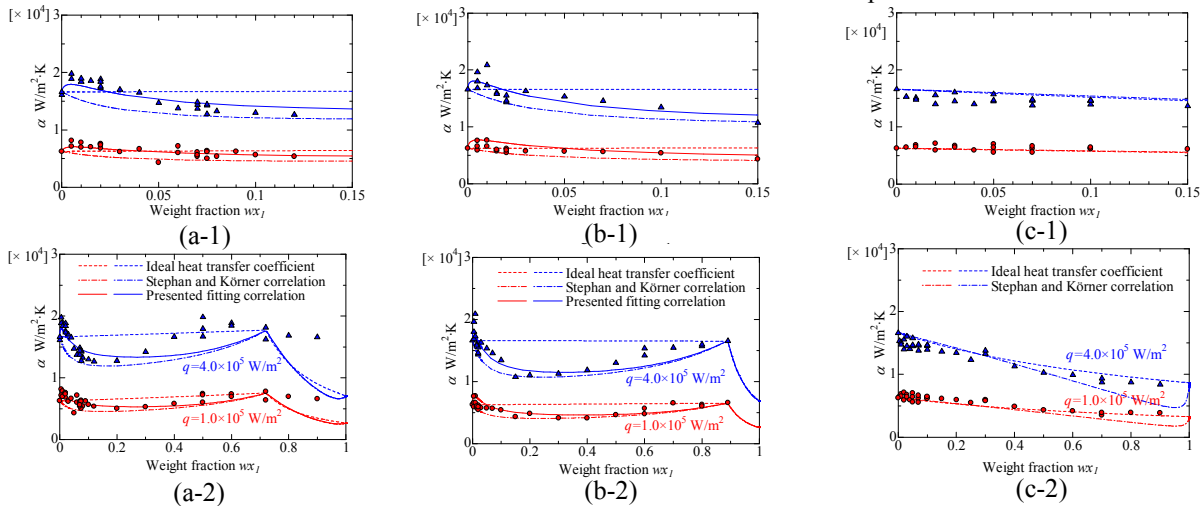


Fig.4 Effect of alcohol concentration on heat transfer coefficients (1-Propanol/Water mixture: (a-1) 0wt%-15wt%, (a-2) 0wt%-100wt%, 2-Propanol/Water mixture: (b-1) 0wt%-15wt%, (b-2) 0wt%-100wt%, Water/Ethylene glycol mixture: (c-1) 0wt%-15wt%, (c-2) 0wt%-100wt%)

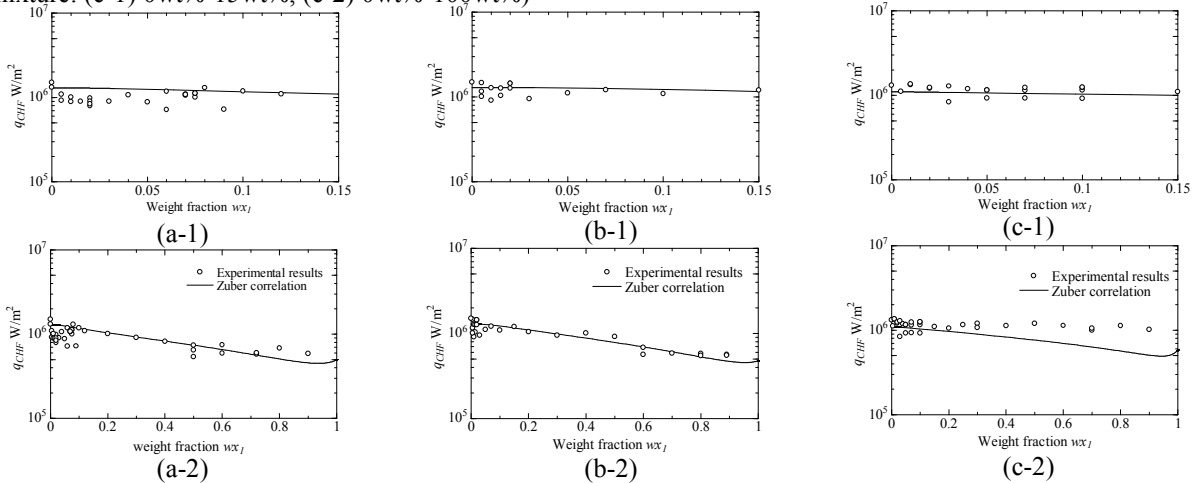


Fig.5 Effect of alcohol concentration on critical heat fluxes (1-Propanol/Water mixture: (a-1) 0wt%-15wt%, (a-2) 0wt%-100wt%, 2-Propanol/Water mixture: (b-1) 0wt%-15wt%, (b-2) 0wt%-100wt%, Water/Ethylene glycol mixture: (c-1) 0wt%-15wt%, (c-2) 0wt%-100wt%)

5. 実験結果および考察

5.1 熱伝達係数

Fig.4 に各熱流束における熱伝達係数の濃度依存性を示したグラフを示す。実験データとの比較のために理想熱伝達係数および Stephan and Körner の熱伝達予測式による予測値をそれぞれ実線および破線で示す。1-Propanol/Water および 2-Propanol/Water では、熱伝達係数は超低濃度領域で急激な上昇を示し、濃度増加に伴って 20wt%から 40wt%までの中濃度域で極小値をとり、さらにその後は共沸組成に漸近する特異な挙動が確認できた。一方、Water/Ethylene glycol ではバルク濃度変化による熱伝達係数の大きな変化は確認されず超低濃度域でわずかな熱伝達係数の変化が確認されている点を除外すれば、おおむね濃度増加に対して緩やかな減少傾向を示した。

図に示されるように、従来提案されている予測式は実験データとはかなり異なる挙動を示している。1-Propanol/Water と 2-Propanol/Water について、バルク気液濃度差($y-x$)と熱伝達劣化とを経験的に関連付けた Stephan and Körner の相関式とは 20wt%から 40wt%の中濃度域において定性的に一致している。また図中には、Stephan and Körner の相関式にマランゴニ数による補正を行った結果も同時に示した。

$$\alpha = \frac{\alpha_{id}}{1 + A_0 |y_1 - x_1|} (1 + CMa^n) \quad (8)$$

実験データになるべく一致するように上式に含まれる定数を定め、 $C=6.45 \times 10^{-6}$ 、 $n=0.534$ とした。低濃度域から 30wt%付近までの中濃度域に対しては良好な一致を示したが、実験で得られた共沸組成の熱伝達係数の漸近傾向を定性的には再現は出来ておらず、さらなる検討が必要である。

5.2 限界熱流束

実験より得られた限界熱流束の濃度依存性を Fig.5 に示す。1-Propanol/Water, 2-Propanol/Water については超低濃度域において限界熱流束値が急激に減少後、一旦 10wt%付近まで上昇し、さらなる濃度増加に伴って共沸濃度における値まで減少する特異な傾向が確認できた。一方 Water/Ethylene glycol については、前者 2 つのアルコール水溶液とは異なって、限界熱流束値の大幅な変動は確認されず、全濃度域において純水とほぼ同程度の限界熱流束値を示す結果となった。これは純水の物性と各濃度における Water/Ethylene glycol の物性間との差異が小さいことによるものと考えられる。

次に限界熱流束の予測式として広く使用されている Zuber 式との比較を行った結果、特異な傾向を示す超低濃度域を除くと、1-Propanol/Water および 2-Propanol/Water については中濃度域以上で定量的な一致を示した。

6. 結言

試験媒体として 1-Propanol/Water, 2-Propanol/Water および Water/Ethylene glycol を用いた、大気圧条件のプール核沸騰実験を行い、以下の結論を得た。

- (1) 1-Propanol/Water および 2-Propanol/Water の超低濃度域において熱伝達係数の急激な上昇を確認した。
- (2) マランゴニ効果の評価のため、界面気液濃度差を用いた濃度差マランゴニ数の導入を試みた。
- (3) マランゴニ数による熱伝達係数予測式の簡易補正を行った結果、超低濃度域における熱伝達上昇傾向が再現でき、予測精度の向上が確認できた。一方、共沸組成までの中濃度域における熱伝達係数の漸近傾向は予測できなかった。
- (4) 超低濃度域における限界熱流束の挙動はマランゴニ効果のみでは説明不可能であり、さらなる検討が必要である。

謝辞

本研究は科学研究費補助金(B) NO.18360103 の援助を受けた。ここに記して、謝意を表す。

参考文献

- [1] Abe, Y., Thermal Management with Phase Change of Self-wetting Fluids, Proc. IMECE2005, 2005.
- [2] Stephan, K., Körner, M., Calculation of Heat Transfer in Evaporating Binary Liquid Mixtures, *Chem. Ing. Tech.*, 41, 409-417, 1969.
- [3] Calus, W.F., Leonidopoulos, D.J., Pool Boiling – Binary Liquid Mixtures, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 17, 249-256, 1974.
- [4] McGillis, W.R., Carey, V.P., On the Role of Marangoni Effects on the Critical Heat Flux for Pool Boiling of Binary Mixtures, *J. Heat Transfer Trans. ASME*, 118, 103-109, 1996.
- [5] Zuber, N., Tribus, M., Westwater, J.W., The Hydrodynamic Crisis in Pool Boiling of Saturated and Subcooled Liquids, *Int. Dev. Heat Transfer*, 27, 230-236, 1961.
- [6] Kern, J., and Stephan, P., Theoretical Model for Nucleate Boiling Heat and Mass Transfer of Binary Mixtures, *J. Heat Transfer Trans. ASME*, 125, 1106-1115, 2003.
- [7] Kandlikar, S.G., Boiling Heat Transfer With Binary Mixtures: Part I- A Theoretical Model for Pool Boiling, *J. Heat Transfer Trans. ASME*, 120, 380-387, 1998.
- [8] Van Stralen, S.J.D., Bubble Growth Rates in Boiling Binary Mixtures, *Br. Chem. Eng.*, Vol. 12, No. 3, 390-394, 1967.