

宇宙用冷却システムの高性能化を目指した混合媒体の沸騰熱伝達特性に関する研究

九州大学 酒井崇、月成勇起、伊藤康德、新本康久、大田治彦
産業技術総合研究所 阿部宜之

Pool Boiling Heat Transfer of Binary Mixtures Applied to Thermal Management Systems in Space

Takashi Sakai, Yuki Tsukinari, Yasunori Ito, 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: sakai_t@aero.kyushu-u.ac.jp

Abstract: The boiling heat transfer characteristics of binary mixtures; 1-Propanol/Water, 2-Propanol/Water and Water/Ethylene glycol mixtures, were investigated in pool boiling experiments under atmospheric pressure on ground to develop high-performance space thermal management systems. At extremely low concentrations of alcohol, increase in the heat transfer coefficients of 1-Propanol/Water and 2-Propanol/Water are confirmed while the critical heat flux values are decreased. Coexistence of the heat transfer enhancement due to Marangoni effect and the heat transfer deterioration due to mass transfer resistance is emphasized. The concept seems to be independent of gravity level.

Key words: Boiling heat transfer, Binary mixture, Marangoni effect

1. 緒言

宇宙機器の大型化、大容量化にともない、宇宙機内で取り扱われるエネルギー量の増大は著しい。そのため、廃熱処理量と熱輸送距離の増大がその熱管理システムの重大な問題となっており、宇宙用冷却システムの高性能化が求められている。そして、高い熱伝達と熱輸送能力を持つ沸騰熱伝達は効率的な熱交換方法として有力な手段である考えられている。

混合媒体が沸騰する場合、気泡底部の三相界面に向かって優先蒸発成分の濃度が低下することにより、気泡の気液界面に濃度勾配および温度勾配が生じる。このため、混合媒体はその物質伝達抵抗を原因として伝熱面温度が上昇するため有効過熱度が低下し、同一熱物性を有すると仮定した仮想単成分媒体に比べて、熱伝達特性が劣化してしまう。しかし、同時に気泡の気液界面に生じた濃度勾配と温度勾配によって発生した表面張力勾配が気泡底部にマランゴニ効果を生じさせ、気泡発泡点に向かって自発的液体供給を行うことが期待できる。この作用により、ドライアウトの発達が阻害され、かつ伝熱促進効果が得られると考えられ、限界熱流束や熱伝達係数の向上が期待できる。逆に表面張力勾配が逆向きに生じる場合、マランゴニ効果の向きも逆転するため伝熱劣化の要因となると予測される。しかし、有効過熱度の低下による熱伝達特性の劣化に比べ、このマラ

ンゴニ効果が沸騰に及ぼす影響については十分な確認および説明がなされていないのが現状である。

混合媒体の熱伝達係数を予測する方法のひとつとして、両単成分媒体どうし、もしくは共沸組成と単成分媒体における過熱度の線形補間値である理想混合過熱度より求めた理想混合熱伝達係数を基準値として熱伝達の劣化や促進を考える方法がある。Stephan and Körner^[1]は実験的に熱伝達の劣化の評価を行った。また、Calusら^[2]は混合媒体の沸騰において存在する物質伝達抵抗を考慮することで熱伝達の劣化を評価した。これらの手法は、実験定数や混合媒体のさまざまな物性値を含むため、いろいろな混合媒体の熱伝達係数を計算するには不便な点がある。一方、Thome^[3]は熱伝達の劣化を相平衡図における露点と沸点の温度差に関連する量として評価し、計算の容易な熱伝達係数予測式を提案した。

混合媒体の限界熱流束に関しては、Hovestrijdt^[4]は限界熱流束の増大を報告しており、マランゴニ効果をその原因として挙げている。McGillis and Carey^[5]はよく知られた Zuber^[6]の式にマランゴニ効果を反映した修正式を提案し、計測された限界熱流束の増大を説明した。Abeら^[7,8]はマランゴニ効果による伝熱促進とその詳細な気泡挙動を報告している。また、混合媒体の限界熱流束は伝熱面形状によってその挙動が大きく異なることも報告されている^[9]。

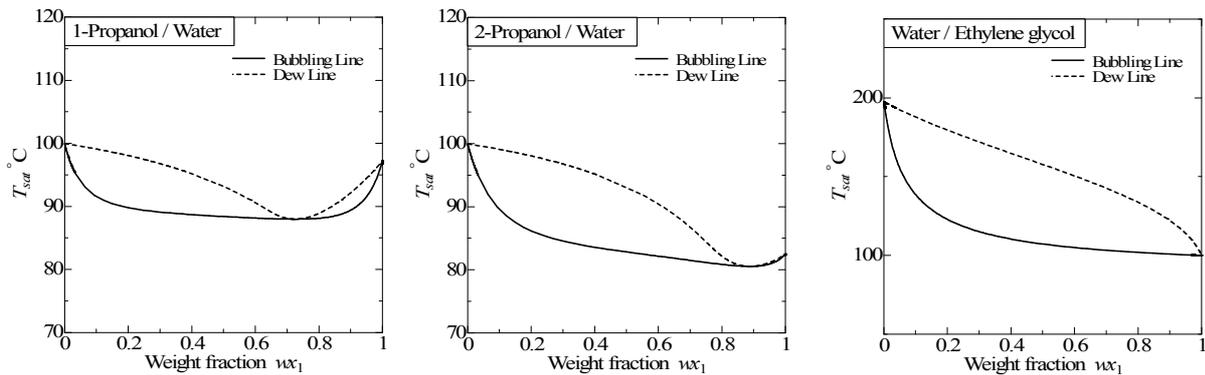


Fig.1 Phase equilibrium diagrams of 1-Propanol/Water, 2-Propanol/Water and Water/Ethylene glycol.

そこで、本研究は冷却システムの高性能化を図る方法として、作動流体に混合媒体を用いた沸騰熱伝達の応用を考え、最も基本的なプール沸騰実験を地上において行い、混合媒体の熱伝達特性の評価を行っている。

2. 実験装置および実験方法

実験に用いる沸騰容器は内径 200mm のステンレス製容器である。伝熱面は銅ブロックでできており、銅ブロック内部に差し込んだ 5 本のカートリッジヒータに電圧を印加することで加熱する。この銅ブロックは特殊な形状になっており、直径 40mm の伝熱面の周りにフィンがあることで伝熱面のエッジにおける発泡点の集中を回避し、その厚さを薄くすることで周方向へのヒートロスを軽減している。内部の圧力は 3 種類の長さの凝縮器に流す水もしくは空気の流量を調節することで一定に保たれる。観察窓からは沸騰の挙動を観察、撮影することができる。沸騰容器はマントルヒータおよび断熱材で覆うことでヒートロスを軽減している。銅ブロック内部と沸騰容器の気相および液相部分には熱電対を設置し、その温度分布を計測しており、これらの計測温度から伝熱面表面熱流束、伝熱面過熱度、熱伝達係数を算出する。実験は熱流束を $1.0 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ から限界熱流束まで段階的に付与していき、限界熱流束に達して伝熱面温度が急激に上昇した時点で実験を終了する。各熱流束レベルにおける計測は、各熱電対の指示値が定常とみなせるまで十分な時間をおいてから行った。限界熱流束は急激な温度上昇を生じる前の熱流束として定義した。

今回、実験は圧力条件を大気圧とし、地上で行った。試験媒体としては、1-Propanol/Water、2-Propanol/Water と Water/Ethylene glycol の 3 種類のアルコール水溶液を用いた。各媒体の相平衡図を Fig.

1 に示す。また、マランゴニ効果の指標として、液相濃度 x 、気相濃度 y 、表面張力 σ 、ラプラス定数 L 、粘性係数 μ 、物質拡散係数 D により以下の式で定義したマランゴニ数 Ma の計算結果を Fig. 2 に示す。

$$Ma = \frac{(d\sigma/dx)(y-x)L}{\mu D} \quad (1)$$

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。したがって、1-Propanol/Water および 2-Propanol/Water の低アルコール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。一方、Water/Ethylene glycol では伝熱劣化の効果となるが、その影響は 1-Propanol/Water や 2-Propanol/Water よりも相対的に小さな効果となることが分かる。

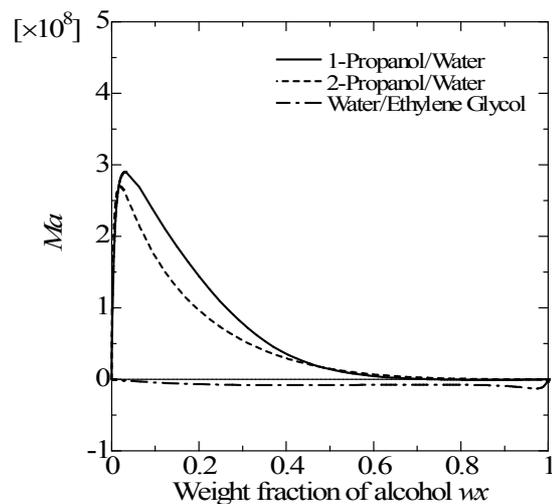


Fig.2 Marangoni number.

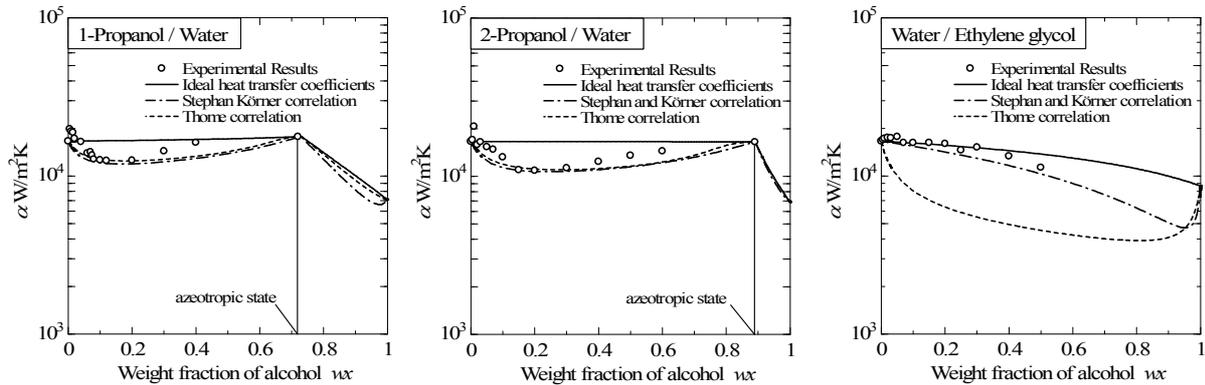


Fig.3 Effect of alcohol concentration on heat transfer coefficients ($q=4.0\times 10^5$ W/m²).

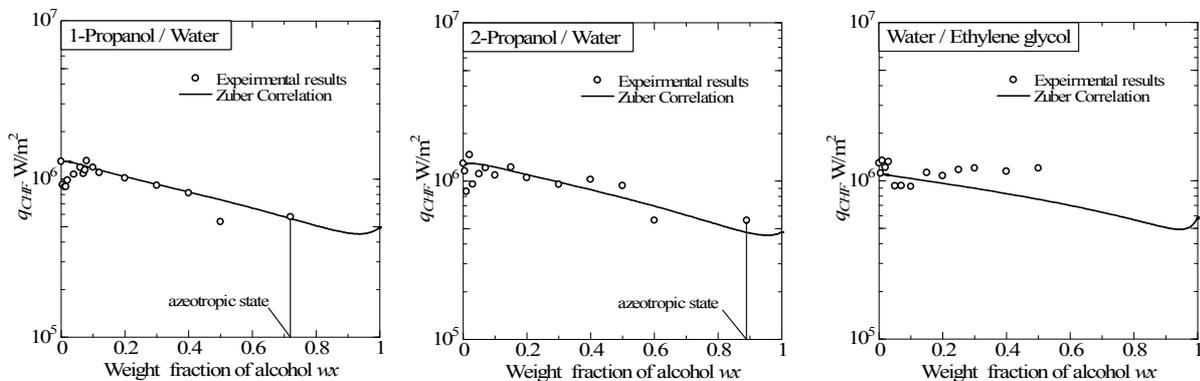


Fig.4 Effect of alcohol concentration on critical heat flux values.

3. 実験結果

試験媒体の濃度変化に対する熱伝達係数の挙動を Fig. 3 に示す。また、実験値との比較として理想混合熱伝達係数と Stephan and Körner および Thome の熱伝達係数予測式により求めた熱伝達係数の予測値もあわせて示している。ただし今回、純アルコールの実験を行っていないため、その値は Kutateladze^[10]の式によって求めた値を使用している。実験結果より熱伝達係数について、顕著な濃度依存性が確認された。さらに、1-Propanol/Water および 2-Propanol/Water について、マランゴニ効果による伝熱促進が期待される低アルコール濃度域において、熱伝達係数の上昇が確認できた。また、さらに濃度が増加すると、物質伝達抵抗が原因と考えられる伝熱劣化の傾向が顕著に現れた。Water/Ethylene glycol については、Thome の熱伝達係数予測式で与えられるほどの大きな伝熱劣化が起きておらず、Stephan and Körner の予測式による値に傾向が近い。また、Water/Ethylene glycol はマランゴニ効果が伝熱劣化の効果として働くと予想されるが、その影響を実験結果からは確認できなかった。既存の予測式における物質伝達抵抗

に起因した伝熱劣化の予測傾向の違いも今後の検討課題ではあるが、その伝熱劣化の効果だけでは濃度変化に対する熱伝達係数の挙動は予測不可能であり、マランゴニ効果による伝熱促進および伝熱劣化の効果を考慮する必要があると考えられる。

試験媒体の濃度変化に対する限界熱流束の挙動を Fig. 4 に示す。また、実験値との比較として混合媒体の物性を用いて Zuber の式で計算した結果もあわせて示している。限界熱流束についても顕著な濃度依存性が確認された。とくに低濃度域において 1-Propanol/Water および 2-Propanol/Water は限界熱流束の値が減少後、増大し、逆に Water/Ethylene glycol は増大後、減少するという特異な挙動を示した。この傾向は、それぞれの媒体に期待されるマランゴニ効果による伝熱促進および伝熱劣化の効果とは逆の傾向を示している。そのため、マランゴニ効果のみでその挙動を説明することは困難である。伝熱面形状により限界熱流束の挙動が大きく異なることも報告されており、今後は、伝熱面形状がマランゴニ効果に及ぼす影響の検討、さらには、限界熱流束の発生機構自体の詳細な検討が必要であると考えられる。

限界熱流束が特異な挙動を示しているものの、混合媒体の沸騰熱伝達において、マランゴニ効果が伝熱促進もしくは伝熱劣化の効果を及ぼすことは明白である。自然対流が抑制される微小重力下では地上よりも相対的にマランゴニ効果が顕在化する。したがって、重力レベルによらず沸騰熱伝達に対してマランゴニ効果の影響を考慮する必要がある。

4. 結論

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地上において行い、以下の結論を得た。

- ・ マランゴニ効果による伝熱促進の期待できる 1-Propanol/Water および 2-Propanol/Water の低アルコール濃度域において、熱伝達係数の上昇を確認した。
- ・ 濃度変化に対する熱伝達係数の挙動は物質伝達抵抗による伝熱劣化のみでは説明不可能であり、その挙動にはマランゴニ効果が影響していると考えられる。
- ・ 濃度変化に対する限界熱流束の挙動はマランゴニ効果だけでは説明が困難であり、さらなる検討が必要である。
- ・ 混合媒体の沸騰には、物質伝達抵抗が原因である伝熱劣化効果だけでなくマランゴニ効果による伝熱促進もしくは伝熱劣化効果も重力レベルによらず存在する。

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] Stephan, K., Körner, M., Calculation of Heat Transfer in Evaporating Binary Liquid Mixtures, *Chem. Ing. Tech.*, 41, 409-417, 1969.
- [2] Calus, W.F., Leonidopoulos, D.J., Pool Boiling – Binary Liquid Mixtures, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 17, 249-256, 1974.
- [3] Thome, J.R., Prediction of Binary Mixture Boiling Heat Transfer Coefficients Using Only Phase Equilibrium Data, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 26, 965-974, 1982.
- [4] Hovestreyjdt, J., The Influence of the Surface Tension Difference on the Boiling of Mixtures, *Chem. Eng. Sci.*, 18, 631-639, 1963.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Abe, Y., Oka, T., Mori, Y.H., Nagashima, A., Pool Boiling of a Non-azeotropic Binary Mixtures under Microgravity, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 37, 2405-2413, 1994.
- [8] Abe, Y., Thermal Management with Phase Change of Self-wetting Fluids, Proc. IMECE2005, 2005.
- [9] Hartnett, J.P., Irvine, T.F.Jr., *Advanced in Heat Treansfer*, 16, 127-133, 1984, Academic Press
- [10] Kutateladze, S.S., Boiling and Bubbling Heat Transfer under Free Convection of Boiling, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 22, 281-299, 1979.