H113

非線形ブタノール水溶液のミニチャンネル内衝突流沸騰への適用

Application of nonlinear butanol aqueous solution to boiling with impinging flow in mini channel

○ 遠原 晃一 (芝浦工大)

上野 智弘 (芝浦工大)

野村 泰裕 (芝浦工大)

正 小野 直樹 (芝浦工大)

Koichi Obara, Tomohiro Ueno, Yasuhiro Nomura, and Naoki Ono,

Shibaura Institute of Technology, 3-7-5 Toyosu, Koto-ku, Tokyo 135-8548, Japan

The authors applied butanol aqueous solution to boiling with impinging flow in mini channel and compared heat transfer characteristics for T-junction and straight channel and for pure water and butanol aqueous solution. The geometry of the channel cross section was rectangular of 3mm x 3mm, and the whole body of the channel was made of insulating polymer material. Only heated surface was made of copper, whose size was 3mm x 10mm. The experimental conditions were set in small flow rate. It was found that the butanol aqueous solution with impinging flow realized the highest heat transfer.

Key Words: mini channel, boiling, impinging flow, butanol aqueous solution

1. 緒言

近年電子制御に用いられる, CPU などの電子デバイスの高速化, 小型化により電子機器の発展には目覚ましいものがある. しかし, それに伴い電子デバイスの発熱量が増加している. そして, この熱が電子デバイスそのものだけでなく周りの温度も上昇させてしまい機器の安定性, 処理能力の維持に悪影響を与える. 今後さらに, 発熱量の増加が続くと既存の冷却方法では対処しきれなくなることが予想される. そのためこの熱を効率よくどのように除去していくかが重要な課題となっており, 新たな冷却方法の開発が期待されている. そこで, 本研究では熱源の直下に流体を当てる衝突流冷却と沸騰伝熱を用いた冷却に着目した.

作動流体に関して, ブタノールなどのある種の高級アルコールの水溶液では, 純水などの通常溶液と異なり, 表面張力の値は温度上昇に伴い減少から増加に転ずるといった特異な性質を持つことが Vochten ら⁽¹⁾により報告されている. これらの溶液をここでは非線形溶液と呼ぶこととする. これらの非線形溶液の加熱面上液膜におけるサーモキャピラリ力の方向は, 濃度勾配起因のマランゴニ力と同方向となる. その結果, 特に微小サイズや微小重力の系において, 伝熱特性や流れの挙動が顕著に変化することが期待されている⁽²⁾. 著者らは以前から非線形溶液を微細管内で流動沸騰させる実験を行っており^(3,4), 微細管の加熱部分を短くして局所的に加熱したところ, ブタノール水溶液等の非線形溶液では, 純水に比べ伝熱が促進されるという知見を得た⁽⁵⁾. 本研究では, 局所的な加熱部に試験流体が衝突する様式にて流動沸騰させ, 発熱面における沸騰気泡の挙動の観察及び伝熱特性を一般的な水冷方法である直線流と比較して検討を行った.

2. 実験装置及び測定方法

Fig.1 に実験装置概要図を示す⁽⁶⁾. タンクに満たされた作動流体をチューブポンプにより送液し, 熱交換器により予備加熱を行い, テストセクションの直前に設置したリボンヒーターを巻きつけた真鍮管により所定の温度まで加熱を行った. 作動流体はタンク内へと戻して循環させる. テストセクションには断熱性の高いポリエーテルエーテルケトン (PEEK) を用い, 直方体のブロックに T 字流路と直線流路の溝を掘り, 同素材の板を接着した矩形流路である. 矩形流路の断面は削り出された板と蓋の板で構成されている. その流路形状は 3mm×3mm の正方形であり, 流路長さは 100mm で, Fig.2 のように T 字型流路ではその

ちょうど中央に 50mm の長さの流路が付いている.

Fig.1 Experimental apparatus for flow loop

Fig.2 Geometry of test section (T-junction type)

Fig.2 の T 字型流路の下方流路からの流れが衝突する部分の流路内面 (上面) に銅製の加熱部が組み込まれており, その伝熱面寸法は 3mm×10mm である. その加熱面は銅ブロックの端面であり, 内部に埋め込んだヒータを直流電源で加熱し, 加熱面から深さを変えて挿入した 3 つの熱電対からその位置の温度を計測し, それらを一次式で近似して伝熱面温度 T_w と熱流束を算出する. 流路内部の様子は流路にあけた穴に耐熱ガラスを埋め込んだ観察窓から video camera で撮影し PC に記録する. 加えて Test section の直前直後の流路部にも熱電対を設置して流体の流入温度 T_i と出口温度を測定した. Table1 に試験溶液 (7.15wt% のブタノ

ール水溶液と純水)と実験条件を示す.

Table 1 Experimental conditions

Test fluids:		
Aqueous solution of 1-butanol (7.15 wt % solution),		
Pure water		
Mass flow rate:	6.7 x 10 ⁻⁵	(kg/s)
Mass flux:	7.4	(kg/m ² s)
Reynolds number:	78	
Subcooling:	20	(K)
Imposed heat flux	1 x 10 ⁵ ~ 1 x 10 ⁷	(W/m ²)

3. 実験結果と考察

3.1 気泡の離脱挙動の観察 流路形状が T 字流路の場合で、質量流量が 6.7 x 10⁻⁵(kg/s) (4ml/min) , サブクール度が 20(K)の時のブタノール水溶液(7.15wt%)と純水の沸騰気泡の挙動を Fig.3(a)(b)に示す. Fig.3(b)は純水を用いた時の挙動であり、気泡形状の傾向としては、流路上部に対して扁平な形状になり、伝熱面を気泡が覆ってしまう状態が続くことが見られた。一方、Fig.3(a)のブタノール水溶液では純水の時とは異なり、加熱面全体に小さな球状の気泡が発生し、流路上面をすべるように気泡が加熱面から離脱していく様子が見られた。また純水を用いた時と比べて気泡の大きさは全体的に小さく見られた。これは伝熱面の銅に対する接触角が純水の約 1/2 倍だったため気泡が離脱しやすくなったことにより、気泡の形状が大きくなる前に小型のままで離脱したのではないかと考えられる。

3.2 伝熱特性 Fig. 4 に横軸を過熱度、縦軸を得られた熱流束とした時のプロットを示す。実験は装置の都合上ドライアウトまでは至らず、従って Fig. 4 のデータ列の右端はドライアウトではなくそこで実験を中止した状態であることに注意されたい。T 字型流路の場合、純水を用いた時と比較してブタノール水溶液を用いた時の方が、約 1.2 倍ほど熱流束が向上している。これは前節の気泡挙動の違いと深く関係していると考えられる。直行流路の場合も同様にブタノール水溶液を用いた時の方が高熱流束の傾向を示した。全体的に熱流束値は、T 字型流路の方が直行流路よりも高い結果が得られた。また、核沸騰熱伝達の代表的な整理式である Rohsenow の式も併記した⁽⁷⁾。Rohsenow の式を以下に示す。

$$\frac{h l_a}{k_l} = \frac{Pr_l^{-0.7}}{C_{sf}} \left(\frac{q l_a}{\rho_v \nu_l L_{lv}} \right)^{0.67} \left(\frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{0.67} \quad (1)$$

ただしここで、 k_l [W/(m・K)]は液体の熱伝導率、 Pr_l は液体のプラントル数、 L_{lv} [J/kg]は液体の蒸発潜熱、 ρ_l [kg/m³]は液体の密度、 ρ_v [kg/m³]は蒸気の密度、 ν_l [m²/s]は液体の動粘度、 l_a [m]はラプラス係数、 C_{sf} は液体と伝熱面の組み合わせによって決まる係数であり、本実験の水と銅の組み合わせの場合の C_{sf} の値は 0.013 である。ここでラプラス係数 l_a は以下のように求められる。

$$l_a = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)}} \quad (2)$$

ただしここで、 σ [N/m]は表面張力、 g [m/s²]は重力加速度である。Rohsenow の式から、今回の実験範囲は対流伝熱支配から核沸騰支配がはじまる初期までの領域と考えられる。

4. 結言

本研究から、作動流体のサブクール度 20(K)の場合において、非線形溶液のブタノール水溶液を用いると純水の場合に比べ沸騰気泡は小さくなり、加熱面を移動し離脱しやすくなることが観察された。これはブタノール水溶液の特異な表面張力特性と伝熱面の銅に対する接触角と関係があると考えられる。また、その結果から得られた熱流束値はいずれの流路においてもブタノール水溶液の方が、純水の場合より高く、T 字型流路の場合は約 1.2 倍に増加し、直行流路の場合は約 2.9 倍に増加し、伝熱促進効果が見られた。

(a)Butanol aq.sol.(7.15wt%) (b)Pure water
Fig.3 Behavior of boiling bubbles

Fig.4 ΔT_{sat} vs. Heat flux
(Butanol aq.sol.7.15wt%, Subcooling20°C)

謝辞

本研究の実施において、庄司正弘教授、西口昇太郎氏(神奈川大学)と貴重な議論をさせて頂いた。ここに謝意を表す。また本研究経費の一部は文部科学省科学研究費補助金(基盤研究(C) No.21560225)によるものである。ここに併せて謝意を表す。

参考文献

- (1) R.Vochten and G.Petre, J.Colloidal Science, 42-2(1973), pp.320-327.
- (2) Y.Abe, J.Jpn.Soc. Microgravity Appl. , Vol.23(2006), No.2, pp.80-87.
- (3) N.Ono,T.Kaneko, S.Nishiguchi and M.Shoji, Journal of Thermal Science and Technology (JSME), Vol.4(2009), No.2, p284-293.
- (4) 小野直樹, 吉田貴洋, 金子高広(芝浦工大), 西口昇太郎, 庄司正弘(神奈川大), Thermal Science & Engineering (日本伝熱学会論文集), Vol.16, No.3(2008), p.79-85.
- (5) 金子高広, 小野直樹, 西口昇太郎, 庄司正弘, 第 46 回日本伝熱シンポジウム(2009)講演論文集, p.367-368.
- (6) 小野直樹, 大坪雄太, 大曲啓明, 遠原晃一, 第 47 回日本伝熱シンポジウム(2010)講演論文集, p.663-664.
- (7) V. P. Carey, Liquid-Vapor Phase-Change Phenomena, (1992), Taylor and Francis.