気泡周りにおけるアルコール水溶液のマランゴニ対流の観察 Observation of Marangoni flow near a bubble in alcohol aqueous solutions

○学 河合 健太朗 (芝浦工業大学大学院) 江田 祐樹 (芝浦工業大学大学院)
新井 里枝 (芝浦工業大学) 正 小野 直樹 (芝浦工業大学)

Kawai Kentaro, Eda Yuki, Arai Rie and Ono Naoki

Shibaura Institute of Technology, 3-7-5 Toyosu, Koto-ku, Tokyo 03-5859-8000

In the present study we observed Marangoni convection at the gas-liquid interface of alcohol aqueous solution. It was driven by the surface tension variation caused by temperature gradient along the bubble surface. Numerical simulation was performed about pure water and butanol aqueous solution to compare with the result of experiment. It was found from this study that the direction of Marangoni convection in using butanol aqueous solution (7.15wt%) was toward heated surface. Moreover, the tendency of the experiment and the numerical simulation was the same in terms of flow pattern and its temperature dependence.

Key Words: Marangoni convection, butanol aqueous solution, temperature gradient, numerical simulation

1. 緒言

高性能化や小型化が進む電子機器において、伝熱機器に利用される作動流体の性質を研究し、高性能化を図る必要性が高まっている。作動流体について、Vochten[1]らの研究により、炭素数4以上の高級アルコール水溶液は一般的な溶液と異なり、温度上昇に伴い表面張力が上昇するという特異性を持つことがわかっている。これらの溶液をここでは非線形溶液と呼ぶことにする。Fig.1に非線形溶液の温度と表面張力の関係を示す。微小スケールでは表面張力の影響が大きいので、有効な現象であると考えられ、非線形溶液を用いて特異なマランゴニ対流を起こすことで、伝熱特性の向上が期待できる。マランゴニ対流とは気液界面で生じる表面張力の勾配によって生じる対流である。表面張力の勾配を引き起こす要因は温度と濃度の二つがある。一般に、温度が高いほど表面張力は減少する。加熱面に沸騰気泡が生じ、気液界面で生じる温度、濃度勾配によるマランゴニ対流が起きた場合、一般的な溶液では二つの要因によって起こるマランゴニ対流の向きが逆方向となるが、非線形溶液を用いることで二つの対流の向きが共に加熱面に向かう方向となり、加熱面でのドライアウトを抑制し、伝熱特性を向上させる効果が期待できる。

本研究では沸騰伝熱時のマランゴニ対流を可視化するために、人工的に配置した空気泡に温度勾配を与えることで沸騰時の気泡を疑似的に再現し、そこで生じる対流を観察する。ここでは特に温度起因のマランゴニ対流に焦点を当て、考察を行う。また、数値シミュレーションと実験の比較を行う。

Fig. 1 Surface tension behavior of nonlinear solutions[1]

2. 実験装置

Fig.2に実験装置概略図を示す。実験系を形式的に上部に加熱面を配置した場合での沸騰気泡に近似するため、トレーサー[2]を混入させた溶液中に空気気泡をシリンジで注入し、銅板に張り付けたセラミックヒーターを用いて上部から加熱する。気液界面に生じるマランゴニ対流をカメラで撮影し、観察を行う。観察を行うに当たり、三次元形状の気泡では気液界面を正確に捉えることが困難なため、二枚のガラス板で気泡を挟み、二次元に近似することで観察および数値シミュレーションの簡略化を行っている。このときのスリット幅は2mmである。温度測定にはK型シーース熱電対(φ0.25mm)を用いて、気液界面近傍の温度を直接測定する。

本研究では純水およびブタノール水溶液(7.15wt%)を用いてマランゴニ対流の観察を行う。観察領域内にK型シーース熱電対を用いて気泡近傍の温度を測定する。気泡の大きさは幅4mm、高さ3mm程度でトレーサー粒子は粒径15μm、比重1.02のスチレンビニルベンゼン共重合物を用いる。

Fig. 2 Schematic of experimental apparatus

3. 結果及び考察

純水及びブタノール水溶液を用いた場合の観察結果に流線を書き加えたものをFig.3,4,5に示す。純水ではFig.3のように、対流方向が加熱面から離れる方向であることが確認でき、加熱を続けても対流方向は一定のままであった。これは、温度対流とは反対方向であるためマランゴニ対流であると考えられ、過去の知見や表面張力値から予想される対流方向に一致することから、妥当な傾向と考えられる。また、ブタノール水溶液ではFig.4(a)のように、常温の状態から加熱を開始した直後では純水と同じように加熱面から離

れる方向の対流が生じた.しかし加熱が進むと Fig.5 のようにある箇所を境に対流が上下に分岐した.この分岐している点の温度は 50℃であった.その後さらに加熱を続けると Fig.4(b)のように,分岐はなくなり加熱面へと向かう対流へと変化した.これは非線形溶液の特異な表面張力特性が寄与していると考えられる.

Fig. 3 Observation result of pure water

(a) In low temperature (b) In high temperature
Fig. 4 Observation result of butanol aqueous solution

Fig. 5 Result of observation and numerical simulation in using butanol aqueous solution

4. 数値シミュレーション

数値シミュレーションには,汎用 CFD ソフト PHOENICS を用いた. PHOENICS の計算アルゴリズムにはマランゴニ効果がプログラムされていないため,表面張力の差を気液界面液膜上に働くせん断力として認識させ,計算を行うようにプログラムを書き加えている.追加プログラムでの表現式を式 (1) に記す.

$$\tau_x = \frac{\partial \sigma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial \sigma}{\partial c} \frac{\partial c}{\partial x} \quad (1)$$

式 (1) からわかるように,マランゴニ対流は温度と濃度に起因して生じる.しかし本研究では温度起因のマランゴニ対流に着目するため,式 (1) の右辺第二項を無視し,温度起因のマランゴニ対流のみをプログラムしている.

気泡寸法や温度などの境界条件は,実験により測定した値を用いている.実際に用いた条件を Table 1 に示す.

Table 1 Conditions in numerical simulation

Solutions	Pure water	Butanol aqueous solution(7.15wt%)
Geometry size[mm]	31×2×18	
Heating temperature[℃]	373	
Cooling temperature[℃]	298	
Size of artificial air bubble[mm]	2.8×2.0×2.6	5.0×2.0×2.7

上記の条件での数値シミュレーションの結果を Fig.7 に示す. Fig.7 は上面が加熱面となっている.矢印からわかるように純水の場合は加熱面である上面から離れる方向に対流が生じている.一方ブタノール水溶液の場合は加熱面へ向かう方向に対流が生じている.これは実験によって得られたマランゴニ対流の方向とも一致しており,シミュレーションの結果からもブタノール水溶液の特異性を確認することができた.ブタノール水溶液では 60℃付近までは温度上昇とともに表面張力値が減少し,それ以上の温度では増加する.そのため 60℃までは対流方向は純水と同様に加熱面から離れる方向だが,それ以上の温度では加熱面に向かう方向となる.

実験での観察結果では 50℃で対流方向が変化しており,数値シミュレーションの結果とはずれが生じている.これは濃度起因のマランゴニ対流が原因であると考えられる.濃度起因のマランゴニ対流は常に加熱面に向かう方向に生じていると考えられるので,温度起因のマランゴニ対流が弱まる分岐時に濃度起因のマランゴニ対流が顕著に表れた結果,分岐点温度にずれが生じたと考えられる.現在,より詳細な温度分布を測定するために実験装置を改良している.また,より高解像度,高速度なカメラを用いて測定した実験の観測結果を PIV で解析し,対流速度を数値シミュレーションと比較することも検討している.

(a) Pure water (b) Butanol aq.sol.(7.15wt%)
Fig. 7 Results of numerical simulation

5. 結言

沸騰気泡を模擬した気泡の気液界面で生じるマランゴニ対流の可視化実験による観察及び数値シミュレーションを行った.純水の対流は従来の知見と合致していることが分かった.ブタノール水溶液に関しては,非線形溶液の特異な表面張力特性によって対流方向が変化したものと考えられる現象が確認された.純水,ブタノール水溶液ともに数値シミュレーションによって得られた対流挙動の傾向とも一致した.

今後はより正確に気液界面での温度分布を測定し,マランゴニ対流の温度依存性の関与について詳細な検証を行い,濃度起因のマランゴニ対流についても併せて検討していく.また,実験の観測結果において PIV を用いて対流速度の比較も行っていく.

6. 参考文献

- [1] R.Vochten and G.Petre, J.Colloidal Science,42-2(1973),320.
- [2] 降旗健司,二成分系水溶液の沸騰に伴う三相界線近傍に発現するマランゴニ対流の解明(2008),芝浦工業大学大学院修士論文
- [3] 朝倉邦造,流れの可視化ハンドブック(1986),朝倉書店