

Enhancement of Nucleate Pool Boiling Heat Transfer in Ammonia/Water Mixtures

Toshiaki INOUE^{*1} and Masanori MONDE^{*2}

Nucleate boiling heat transfer coefficients of ammonia/water mixtures have been measured when a surface-active agent was added into the mixtures. The effect of the concentration of the ammonia and the surface-active agent on the coefficients was experimentally clarified in the ammonia fraction of 30 and 70 % and in the surfactant concentration of 0 – 3500 ppm. The experiment has been carried out to enhance the boiling heat transfer coefficients of ammonia/water mixtures on a horizontal heated fine wire at pressure of 0.4 MPa by adding the surface-active agent into the mixtures. As a result, the coefficients were enhanced in lower ammonia fraction, $C = 0.3$ and in low heat flux, which is just after onset of boiling. It was also found that the enhancement effect by the surface-active agent disappeared in surfactant concentration over 1000 ppm.

Key Words : Heat Transfer, Binary mixture, Pool Boiling, Surface- Active Agent, Enhancement

1. まえがき

小温度差熱機関や冷凍機の熱媒体として、2成分混合媒体を用いることによって、サイクルの熱効率が改善されることがすでに報告⁽¹⁾されている。しかし、混合媒体の沸騰熱伝達率が単成分媒体のそれよりも低下することも従来の研究^{(2)・(4)}によって明らかにされている。そこで、自然媒体として近年注目されているアンモニア/水混合媒体に界面活性剤を添加することによって沸騰熱伝達率の向上を試みた。界面活性剤の濃度が 0- 3500 ppm の範囲において沸騰熱伝達率および沸騰開始点を測定した。そして、 $C = 0.3$ および 0.7 の各アンモニア濃度における沸騰熱伝達率に及ぼす界面活性剤の影響を実験的に明らかにした。

2. 実験装置および実験方法

図 1 は実験装置の概要を示す。試験容器 1 内に水平に張られた白金線 2 (直径 0.3 mm, 長さ 37 mm) に直流電流を通電することによって発生するジュール熱で加熱面 2 が加熱される。また、白金線は抵抗温度計としても利用され、その温度-電気抵抗特性を利用して過熱度が測定される。なお、白金線の温度-電気抵抗特性は予備実験で求められている。試験容器 1 は恒温槽 8 内に沈められており、容器内の試験媒体は恒温液循環装置 9 からの恒温液によって一定の飽和温度に保たれ、周囲の温度の影響を受けないようになっている。

発生した蒸気は凝縮器 6 で凝縮させられてバルク液の中に戻る。また、気液界面で発生する溶解熱と希釈熱は凝縮器 7 で冷却される。

実験の手順としては、白金線への熱流束を段階的に上昇させながら、各熱流束において定常状態をバルク液温度 (T_1, T_2)、蒸気温度 (T_3) および系圧力計 10 によって確認した後、過熱度と熱流束を測定した。なお、 T_1 は液面下約 7 mm の位置に取り付けられている。沸騰開始過熱度の近傍では熱流束の上昇率を 5 % 以内とした。したがって、沸騰開始過熱度の測定精度は 5 %

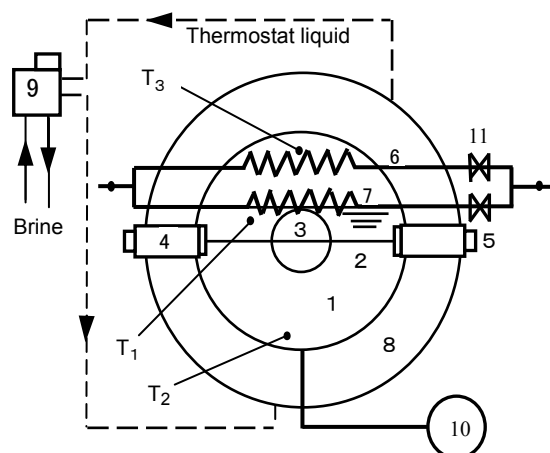


Fig. 1 Experimental apparatus

- | | | |
|-------------------------|---------------------------------|----------------|
| 1. Pressure vessel | 2. Heated wire | 3. View window |
| 4. Insulator | 5. Electrode | 6. Condenser |
| 7. Pressure gauge | 8. Thermostat bath | |
| 9. Thermostat with pump | 10. Pressure gauge | |
| 11. Valve | T_1, T_2, T_3 . Thermocouples | |

^{*1} 久留米工業大学 工学部 (〒830- 0052 久留米市上津町 2228)

^{*2} 佐賀大学 海洋エネルギー研究センター (〒840- 8502 佐賀市本庄町 1)

以内である．試験容器内の圧力は凝縮器 6 および 7 の冷却液の流量を精密流量調整バルブ 11 で調節することによって一定に保たれる．実験装置と実験方法の詳細および測定精度については、文献⁽⁵⁾に述べられているので、ここでは省略する．なお、界面活性剤濃度は水の質量に対する濃度である．

3. 界面活性剤

Inoue et al.⁽⁶⁾は先に図 2 の(a)に示す分子構造を持つカチオン系の界面活性剤を用いてエタノール／水混合媒体のプール沸騰熱伝達の促進を試み、沸騰開始直後に最大 2.64 倍の促進を確認した．エタノールは水溶液中でイオンに解離しないので、いかなる種類の界面活性剤でも水溶液中で界面活性効果を発揮する．しかし、アンモニア水の場合は水溶液中にわずかながらアンモニウムイオンと水酸化物イオンが存在するため、イオン系の活性剤を使用することに問題がある．そこで、予備実験としてカチオン系の界面活性剤を 1000 ppm 溶かした水溶液 100 ml に 6 mol/l のアンモニア水 0.5 ml を加えたら白濁を生じた．これは活性剤の解離定数がアンモニア水の値よりも小さいために、活性剤が分子の状態で析出したためである．このことは活性効果が生じないことを示す結果となっている．したがって、アンモニア水溶液よりも解離定数の大きい活性剤またはイオンに解離しない活性剤を使用する必要がある．以上のような理由で図 2(b)に示す分子構造をもつ非イオン系のフッ素系界面活性剤(Perfluoroalkyl 化合物)を使用した．図 2(b)中の m の値が 8,10 および 12 の混合物であり、平均鎖長は $m = 9$ である．なお、本界面活性剤の化学物理的な性質については大歳⁽⁷⁾によって詳しく述べられている．

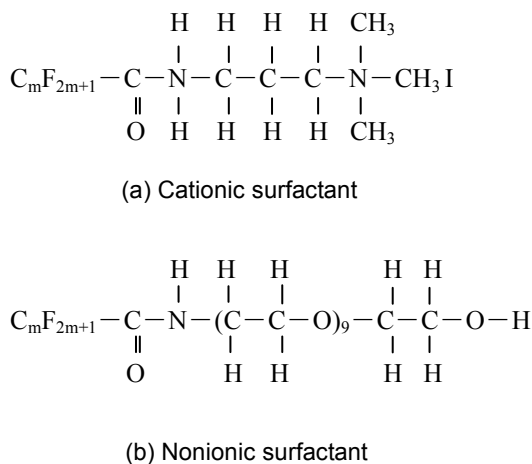


Fig. 2 Structure of surfactant adopted

4. 実験結果

4.1 沸騰の様子 図 3 はアンモニア濃度、界面活性剤濃度および熱流束の変化に伴う沸騰状況の変化を示す． $C = 0.3$ では界面活性剤の添加によって発泡点が著しく増加している．また、 $C = 0.7$ でも発泡点がわずかに増加していることが分かる．また、 $C = 0.3$ においては界面活性剤の添加によって気泡が合体し難くなるようである．

4.2 h - q 関係 図 4 は核沸騰領域のアンモニア濃度 $C = 0.3$ における h - q 直線を示す．界面活性剤の添加によって熱伝達率が向上し、活性剤の効果が濃度 $C_s = 1000$ ppm で最大となり飽和する．また、 $h \propto q^n$ の関係における対数グラフ上での h - q 直線の傾き n は活性剤の添加によって小さくなる．このことは低熱流束域で、より大きく熱伝達が向上することを意味している．これは活性剤添加によって発泡しやすくなり、低熱流束で発泡点の数が増加するからである．Wang and Hartnett⁽⁸⁾も界面活性剤の添加によって沸騰開始直後

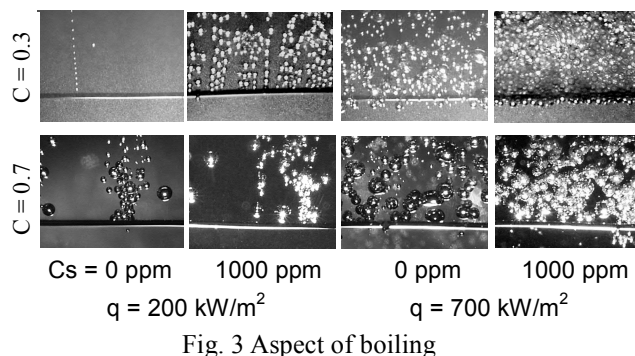


Fig. 3 Aspect of boiling

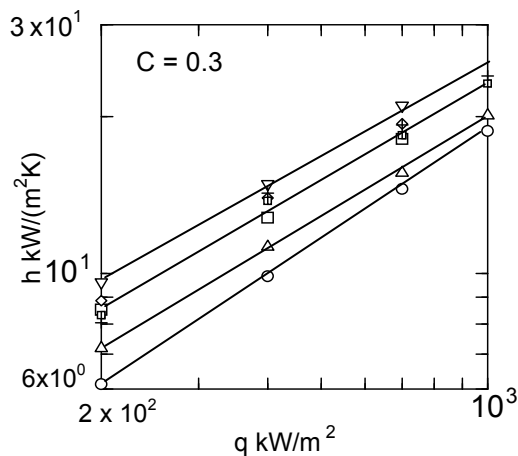


Fig. 4 h - q relation in nucleate boiling heat transfer

○ $C_s = 0$, △ $C_s = 250$, □ $C_s = 500$, ▽ $C_s = 1000$
◇ $C_s = 1500$, + $C_s = 2500$, ▣ $C_s = 3500$ ppm

の低熱流束域で沸騰熱伝達率が向上するという結果を報告している。しかし、本実験結果および Inoue et al.⁽⁶⁾によれば、高熱流束ほどおよび低沸点成分の濃度が高いほど沸騰熱伝達に及ぼす界面活性剤の影響は小さい。この事実とメカニズムについては Inoue et al.⁽⁶⁾によって詳しく考察されている。

図5は $h \propto q^n$ における n に及ぼす活性剤濃度の影響を示す。活性剤濃度の増加とともに傾きは $C_s = 500$ ppm までは小さくなるが、500 ppm 以上の濃度ではそれ以上小さくならない。

4.3 沸騰開始 図6は沸騰開始点の熱流束 q_{ob} に及ぼす活性剤濃度 C_s の影響を示す。活性剤の添加によって $C_s = 250$ ppm で劇的に沸騰が早く始まることがわかる。しかし、250 ppm 以上ではほとんど変化しない。Wasekar and Manglik⁽⁹⁾も界面活性剤の添加によって沸騰が早く開始することを報告している。なお、2500 ppm での q_{ob} の増加は実験の誤差と考えられる。

4.4 沸騰熱伝達率の促進 図7は沸騰熱伝達率に及ぼす界面活性剤の影響を示す。活性剤を添加することによって $C = 0.3$ では $C_s = 1000$ ppm まで沸騰熱伝達率が向上するが、それ以上の濃度ではそれ以上の向上は得られなかった。 $C = 0.7$ では熱伝達率はほとんど向上しない。これは NH_3 と H_2O の水素結合の割合が最大 $C = 0.654$ であるので、 $C > 0.654$ では混合液中に水分子

はほとんど存在しないからである。

沸騰熱伝達率の向上率(h/h_0)を図8に示す。400 kW/m^2 の比較的低熱流束において、 $C_s = 1500$ ppm で熱伝達率の向上率は最も大きく、そのときの向上率は1.87倍である。また、 $C = 0.7$ ではあまり向上せず、 $C = 0.3$ で大きく向上することが分かる。また、自然対流に近い 200 kW/m^2 と比較的高熱流束域である $q \geq 700$ kW/m^2 では活性剤の効果は小さい。

以上のことから沸騰熱伝達を向上させるためには1000 - 1500 ppmの界面活性剤の添加量が最適であることが分かった。

5. まとめ

アンモニア/水混合媒体の沸騰熱伝達率に及ぼす界

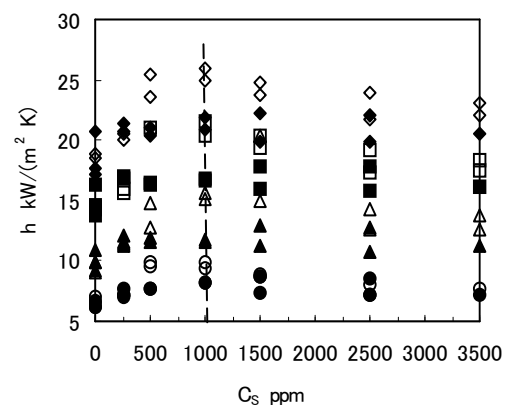


Fig.7 Effect of surfactant concentration on heat transfer coefficient

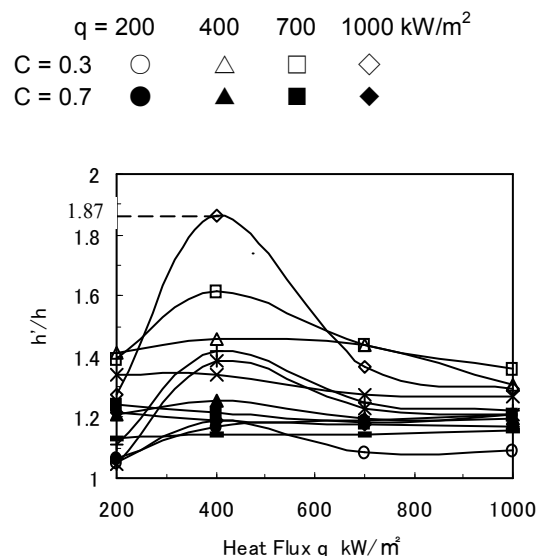


Fig.8 Enhancement rate of heat transfer coefficient by surfactant

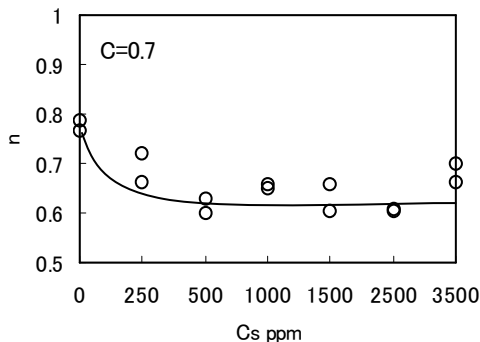


Fig.5 Effect of C_s on n

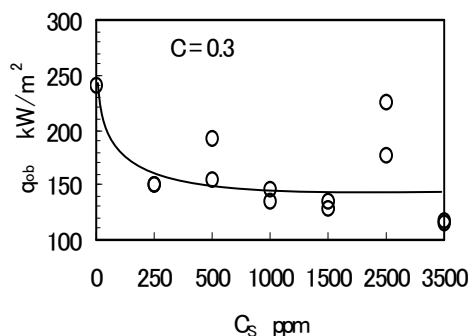


Fig.6 Effect of C_s on q_{ob}

面活性剤の影響を明らかにした。また、界面活性剤を添加することによって沸騰熱伝達率の向上を試みて次の結果を得た。

界面活性剤の添加によって

- (1) 沸騰熱伝達率はアンモニアの低濃度域である $C = 0.3$ において大きく促進され、 $C = 0.7$ では促進効果は非常に弱くなる。
- (2) 沸騰熱伝達率は界面活性剤濃度 $C_s = 1000$ ppm まで漸次向上する。
- (3) 沸騰開始直後の低熱流束域で沸騰熱伝達率が大きく向上し、高熱流束域ほど向上率が小さくなる。

本研究は佐賀大学海洋エネルギー研究センター共同利用研究に基づくものである。

文 献

- (1) Uehara, H., Ikegami, Y., Parametric Performance Analysis of OTEC Using Calina Cycle, Jont Solar Engng. Conf. ASME, (1993), 203- 207.
 - (2) H. Jungnickel, P. Wassilew and W. E. Kraus, Investigations on the Heat Transfer of Binary Refrigerant mixtures, Int. J. Refrig., Vol. 3, (1980), 129- 133.
 - (3) Schlünder, E. U., Heat Transfer in Nucleate Boiling of Mixtures, Int. Chem. Eng., Vol. 23, (1983), 589- 599.
 - (4) Inoue, T., Kawae, N. and Monde, M., Characteristics of Heat Transfer Coefficient during Nucleate Pool Boiling of Binary Mixtures, Heat and Mass Transfer 33, (1998), 337- 344.
 - (5) T. Inoue and M. Monde, Nucleate Pool Boiling Heat Transfer in Binary Mixtures, Wärme- und Stoffübertragung 29, (1994), 171- 180.
 - (6) Inoue T, Teruya Y and Monde M., Enhancement of Pool Boiling Heat Transfer in Water and Ethanol/Water Mixtures with Surface- Active Agent, Int. J. Heat Mass Transfer 47 (2004), 5555- 5563.
 - (7) 大歳幸男, フッソ界面活性剤の合成と特性, 石油学会誌, 32-6 (1989), 277- 285.
 - (8) Wang T. A. A. and Hartnett, J. P., Pool Boiling Heat Transfer from a Horizontal Wire to Aqueous Surfactant Solutions, Heat Transfer 1994, 5 (1994), 177- 182.
 - (9) Wasekar V. M. and Manglik, R. M., Pool Boiling Heat Transfer in Aqueous Solutions of an Anionic Surfactant, J. Heat Transfer, 122 (2000), 708- 715.
-