界面活性剤によるアンモニア/水混合媒体のプール沸騰熱伝達の促進

井上利明*1, 門出政則*2

Enhancement of Nucleate Pool Boiling Heat Transfer in Ammonia/Water Mixtures with Surface – Active Agent

Toshiaki INOUE^{*3} and Masanori MONDE

*³ Kurume Institute of Technology, Dept. of Mechanical Engineering Kamitsu - machi 2228, Kurume - shi, Fukuoka, 830 - 0052, Japan

Nucleate pool boiling heat transfer coefficients of ammonia/water mixtures have been measured on a horizontal heated fine wire at pressure of 0.4 MPa. The aspect of the nucleate pool boiling has been observed for a different concentration of the ammonia and the surface - active agent. The effect of the concentration of the ammonia and the surface - active agent on the coefficients was experimentally clarified over the ammonia fraction of $0.1 \leq C \leq 0.9$ in a region of surfactant concentration of $0 \leq C_s \leq 3500$ ppm. As a result, the coefficients were enhanced in lower ammonia fraction, $C \leq 0.5$, and in low heat flux ranges that are just after onset of boiling. It was also found that the enhancement effect due to the surface - active agent disappeared in the surfactant concentration over 1000 or 1500 ppm.

Key Words : Heat Transfer, Ammonia/Water mixture, Pool Boiling, Surface - Active Agent, Enhancement

1. 緒 言

著者ら⁽¹⁾は前報で系圧力 P=0.4 MPa において,界面活性剤によるアンモニア/水混合媒体の濃度 C=0.3 および 0.7 における沸騰熱伝達の促進を試みて,アンモニアの質量濃度 C = 0.3 において比較的低熱流束域で最大 1.87 倍促進されることを報告した.この結果により,本混合媒体の沸騰熱伝達が界面活性剤の添加によって向上する ことを確認した.この結果を踏まえて本研究では,さらにアンモニア濃度の範囲を拡大して C = 0.1, 0.3, 0.5 0.7 および 0.9 の濃度域において沸騰熱伝達データの蓄積を重ね,界面活性剤による沸騰熱伝達の促進効果を実験的 に明らかにした.また,沸騰の様子を観察・撮影して,沸騰状況に及ぼすアンモニア濃度と界面活性剤濃度の影響をも明らかにした.なお,界面活性剤の添加による沸騰熱伝達の促進に関する従来の研究については Inoue ら ⁽²⁾によって詳しく述べられているので,ここでは省略する.

2. 実験装置

アンモニア/水系は混合時に溶解熱と希釈熱を発生する.これらの発生熱は系内の飽和圧力と温度上昇の原因と なるが、本実験で用いた実験装置は前報⁽¹⁾で混合熱の冷却方法を改良することにより、系内の圧力と温度を安定 させて測定精度を改善した装置である.その実験装置を図1に示す.加熱面には白金線が用いられ、ブリッジ回 路に組み込まれて抵抗温度計としても利用される.試験容器1は恒温槽8内に沈められており、恒温液循環装置 9からの恒温液によって一定の温度に保たれ、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前報⁽¹⁾のの改良で 取り付けられた冷却器7で冷却される.

^{*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)

E - mail : inoue@cc.kurume-it.ac.jp



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(T₁,T₂),蒸気温度(T₃)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.試験容器内の圧力は凝縮器 6 および冷却器 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の精度については Inoue and Monde⁽³⁾によって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.

使用する界面活性剤は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であ る必要がある.そこで、本研究では非イオン系のフッ素系界面活性剤(Perfluoroalkyl 化合物)を使用した.このこ とについては既に井上ら⁽¹⁾によって詳しく述べられている.本活性剤はサーフロンS-145と呼ばれている市販製 品であり、主成分が30%のPerfluoroalkyl 化合物で、溶媒として30%のイソプロパノールおよび40%の水の混合 溶液が用いられている.その表面張力は25℃において17.5 mN/mである.その他の化学物理的な性質について は大歳⁽⁴⁾によって詳しく述べられている.表1に本研究における実験範囲を示しておく.

Test mixture	Surfactant	Mass fraction of ammonia	Mass concentration of surfactant	System pressure	Heat flux (kW/m ²)
			(ppm)	(MPa)	
Ammonia/Water	Perfluoroalkyl compound	0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9	0, 250, 500, 1000,	0.4	$q~\leq~1000$
	(Nonionic surfactant)		1500, 2500, 3500		

Table 1 Experimental condition

3. 実験結果

3・1 沸騰状況に及ぼす界面活性剤の影響

図2は系圧力 P=0.4 MPa におけるアンモニア濃度, 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.熱流束が大きいほど発泡点が多いのは当然であり,その様子が写真からもよくわかる.熱流束が同じであれば、同一の界面活性剤濃度において, C_s=0 ppm を除いてアンモニア濃度が高いほど加熱面上の発泡点が少なくなる. C_s=0 ppm ではアンモニア濃度 C=0.5 で発泡点が最も多く,気泡サイズが最も小さい.アンモニア濃度が同じであれば、C=0.5 を除いて活性剤濃度が高いほど発泡点は増加する.すなわち、活性剤の添加によって発泡し易くなる.また、C=0.3 および 0.5 では界面活性剤濃度が高いほど写真フレーム内の気泡密度が多いことから、発泡周期が短いことが分かる.この発泡周期の短縮が沸騰熱伝達促進の最大の原因である.C ≧0.7 の高アンモニア濃度域では気泡のサイズが Cs=0 ppm でも+分大きく,界面活性剤の添加によって気泡のサイズはほとんど変化しなかった.

3・2 h-q関係

図3はアンモニア濃度 C=0.3,0.5 および 0.9 における h-q 直線を示す. C=0.3 および 0.5 では界面活性剤の添加によって熱伝達率が向上し、直線の傾きが小さくなる。すなわち、沸騰開始直後の低熱流束域で熱伝達がより大きく向上する. これは活性剤の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多くなるからである. この事実は Wasekar and Manglik⁽⁵⁾および Wang and Hartnett⁽⁶⁾によっても報告されていおり、Inoue ら⁽²⁾によっても詳細な検討は行われている. 一方、C=0.9 における h-q 直線は界面活性剤の影響を受けない. この理由については 3.3 節で後述する. 以上述べた界面活性剤による沸騰熱伝達の低アンモニ濃度域での向上は、図2の沸騰の様子、すなわち低アンモニア濃度域で界面活性剤添加によって発泡点が増加し、発泡周期が短くなることからも良く分かる.

3・3 沸騰熱伝達率の促進

図4は沸騰熱伝達率に及ぼす界面活性剤の影響をアンモニア濃度ごとに示したものである。アンモニア濃度 0.1 $\leq C \leq 0.5$ の範囲では界面活性剤の添加によって沸騰熱伝達率が上昇していることが分かる.アンモニア濃度 C = 0.1 では界面活性剤濃度 C_s=1500 ppm まで,また C = 0.3 および 0.5 では C_s = 1000 ppm までは熱伝達が上昇する が、それ以上の界面活性剤を添加しても沸騰熱伝達はそれ以上上昇しない.アンモニア濃度 C = 0.7 では活性剤濃



uld 0 uld 027 uld





 $\bigcirc q = 200 \quad \triangle 400 \quad \Box 700 \quad \diamondsuit 1000 \text{ kW/m}^2$

度 C_s=250 ppm でわずかに上昇するが、250 ppm 以上ではそれ以上は上昇しない.また,アンモニア濃度 C=0.9 では界面活性剤を添加しても熱伝達率は全く上昇しない.図2の沸騰の様子もこのことを明確に裏付けしている. すなわち,高アンモニア濃度域では界面活性剤によって発泡点の数も気泡サイズもほとんど変化しないことから も良く分かる. C \geq 0.7 ではほとんど界面活性剤の効果がないのは,NH₃とH₂Oの水素結合の割合が C = 0.654 で飽和となるので,C > 0.654 では混合液中に水分子単体が存在しなくなるからである.なお,水分子にのみ活 性剤の効果が現れ,アンモニアに対して活性効果が表れないのは,アンモニアと界面活性剤の表面張力にほとん ど差がないからである.ちなみに,大歳⁽⁴⁾によれば本活性剤の表面張力は 25 °C で 17.5 mN/m であるのに対して,



アンモニアの表面張力は文献⁽⁷⁾によれば C = 0.7 の 0.4 MPa に対する飽和温度 10.2 ℃で 23.7 mN/m である.ちなみに,水の表面張力は 0 ℃で 77 mN/m である.

3・4 沸騰熱伝達率に及ぼすアンモニア濃度と界面活性剤濃度の影響

図5は系圧力P=0.4 MPaにおける沸騰熱伝達率に及ぼすアンモニア濃度の影響を界面活性剤濃度をパラメータ として示している. 図中のアンモニアと水の熱伝達率は Nishikawa and Fujita⁽⁸⁾の予測値である. C=0.9 を除いた アンモニア濃度域で界面活性剤の添加によって沸騰熱伝達率は向上するが,アンモニア濃度の増加に伴って界面 活性剤による熱伝達率の向上率は小さくなっている. また,2成分混合液の沸騰熱伝達の低下率が界面活性剤に よる向上率よりも極めて大きいために,界面活性剤の添加によっても単成分媒体の値までは回復しない.

4. 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. アンモニアの濃度がC ≦ 0.5 の範囲で沸騰熱伝達率が向上し、しかもアンモニアの低濃度域で大きく促進され、 高濃度域ほど促進効果は弱くなる.

2. 沸騰開始直後の低熱流束域で沸騰熱伝達率が最も大きく向上し,高熱流束域になるほど向上率が小さくなる.

3. 界面活性剤濃度 C_s =1000 または 1500 ppm までは沸騰熱伝達率が向上するが,それ以上添加してもそれ以上 熱伝達は向上しない.

4. 低アンモニア濃度域では発泡点の数が増加して、気泡のサイズが小さくなる.また、発泡周期が短くなる.

5. 2成分混合媒体の沸騰熱伝達率は界面活性剤の添加によって単成分媒体のそれまでは回復しない.

文 献

- (1) 井上利明, 門出政則, 桑原照紀, 照屋義雄, "アンモニア/水混合媒体のプール沸騰熱伝達の促進(界面 活性剤の効果)", 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 76, No.762 (2010), pp. 306 -311.
- (2) T. Inoue, Y. Teruya and M. Monde, "Enhancement of Pool Boiling Heat Transfer in Water and Ethanol/Water Mixtures with Surface Active Agent", *International Journal of Heat and Mass Transfer 47* (2004), pp. 5555 5563.
- (3) T. Inoue and M. Monde, "Nucleate Pool Boiling Heat Transfer in Binary Mixtures", Wärme und Stoffüber- tragung 29, (1994), pp. 171-180.
- (4) 大歳幸男, "フッ素界面活性剤の合成と特性", 石油学会誌, 32-6 (1989), 277-285.

- (5) V. M. Wasekar and R. M. Manglik, "Pool Boiling Heat Transfer in Aqueous Solution of an Anionic Surfactant", *Transaction of the ASME, Journal of Heat Transfer*, 122 (2000), 708 715.
- (6) T. A. A. Wang and J. P. Hartnett, "Pool Boiling Heat Transfer from a Horizontal Wire to Aqueous Surfactant Solution", *Heat Transfer 1994*, 5 (1994), 177 - 182.
- (7) AMMONIA DATA BOOK, International Institute of Ammonia Refrigeration, 1992.
- (8) K. Nishikawa and Y. Fujita, "Nondemensional Correlating Equation of Nucleate Boiling Heat Transfer", Advances in Heat Transfer, Vol. 20 (1990), pp. 2 - 18.