

水およびアンモニア/水混合媒体の沸騰熱伝達の経年変化に及ぼす 界面活性剤の影響*

井上 利明^{*1}, 門出 政則^{*2}

Effect of a Surface – active Agent on Secular Change of Nucleate Boiling Heat Transfer in water and Ammonia/Water Mixture

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

^{*1} Department of Mechanical Systems Engineering, Kurume Institute of Technology
2228 Kamitsu, Kurume, Fukuoka, 830-0052

Along - term change of nucleate boiling heat transfer coefficients in water and ammonia/water mixture has been measured when a surface - active agent was added into water and the mixtures. The experiment has been carried out using a thermosyphon with a plain heated surface and a pool boiling vessel with a heated fine wire. The effect of the surface - active agent on a long - term change was investigated experimentally for the surfactant concentration, $C_S = 0$ and 1000 ppm and ammonia fraction, $C = 0$ and 0.2 and time variation of the boiling heat transfer coefficient was measured for about a month. The result shows that the nucleate boiling heat transfer coefficient has never changed for a month for pure water. On the other hand, the boiling heat transfer coefficient increases suddenly in the midst of operation and then lasted a constant value till the end of operation for both water and the mixture with the surfactant.

Key Words : Nucleate Boiling, Binary Mixture, Heat Transfer, Surface-Active agent, Secular Change

1. まえがき

Inoue ら⁽¹⁾はアンモニア/水混合媒体に界面活性剤を添加することによってアンモニアの低濃度域および低熱流束域において、促進効果があることを報告した。一方、アンモニアおよび界面活性剤を混合することによって、伝熱面の性状が時間の経過とともに変化して沸騰熱伝達率が変化することが考えられる。しかし、本混合媒体の界面活性剤添加による沸騰熱伝達率の経年変化については、報告されていないようである。そこで、本研究では界面活性剤が水とアンモニア/水混合媒体の沸騰熱伝達率の経年変化に及ぼす影響を実験的に明らかにする。

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置 本研究では2台の実験装置を用いて沸騰熱伝達データを採取した。図1に熱サイフォンを利用した上向き平板加熱面を持つ実験装置を示す。本実験装置は凝縮部、断熱された連結管（断熱部）および蒸発部で構成された下端加熱型熱サイフォンである。加熱面①で発生した蒸気が連結管⑤の中を上昇して凝縮部へ達し、凝縮器⑦によって凝縮させられることによって試験容器内は飽和状態に保たれる。したがって、連結管の中は管の中央を蒸気が上昇し、周囲を液が下降する気液対向流になる。図2に蒸発部加熱面の詳細を示す。蒸発部には直径 $D_h = 25$ mm の銅製の平板加熱面①が装着されている。加熱面へは銅ブロック②の最下部に取り付けられたプレートヒータ③から熱が供給される。周囲への熱損失を防止するために銅ブロック②の周囲にベークライトを取り付け、さらにその周りを断熱材で覆っている。また、図2に示すように銅ブロックには3本の熱電対温度計(T_1, T_2 および T_3)が加熱面から 1.3, 5.7 および 11.4 mm の位置に埋め込まれている。これら3箇所の温度から加熱面温

* 原稿受付 2013年7月25日

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

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

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

度と熱流束を求める。連結管は蒸気の上昇中に凝縮しないように断熱されており、その内径は 4 mm 長さは 250 mm である。凝縮部の水は補助ヒータ⑥で系の圧力 0.1 MPa に対する飽和温度 (98-100 °C) に保たれている。また、凝縮部の気液界面は連結管上端より約 250 mm 上方に設定した。

図 3 は水平細線加熱面上のプール沸騰熱伝達を測定するための実験装置である。加熱面には直径 0.3 mm の白金線②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③内に沈められており、恒温液循環装置④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り、気液界面で発生する溶解熱と希釈熱は冷却器⑦で冷却されて試験容器内は飽和状態に保たれる。

2.2 実験方法 試験流体を飽和温度に保った後、加熱面への熱流束を段階的に上昇させ、サイフォン型では熱流束が 100 kW/m^2 、プール沸騰型では 1000 kW/m^2 に達したことを確認して約 1 か月間連続運転を行った。運転中は 1 時間間隔で過熱度と熱流束を測定した。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細線加熱面上のプール沸騰については Inoue and Monde⁽⁴⁾ および熱サイフォンを用いた平板加熱面上の沸騰については Inoue and Monde⁽⁵⁾ によって述べられているので、ここでは省略する。使用した水は超純水である

2.3 界面活性剤 アンモニア水溶液の場合、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。この理由については Inoue et al.⁽²⁾ によって詳しく述べられている。本研究では非イオン系のフッ素系界面活性剤を使用した。その成分は 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 % の水の混合溶液である。その他の化学物理的な性質については大歳⁽³⁾ によって詳しく述べられている。

3. 実験結果

図 4 はサイフォン型の実験装置で測定された実験データであり、圧力 0.1 MPa における 100 kW/m^2 一定の熱流束で約一か月間連続運転したときの水の沸騰熱伝

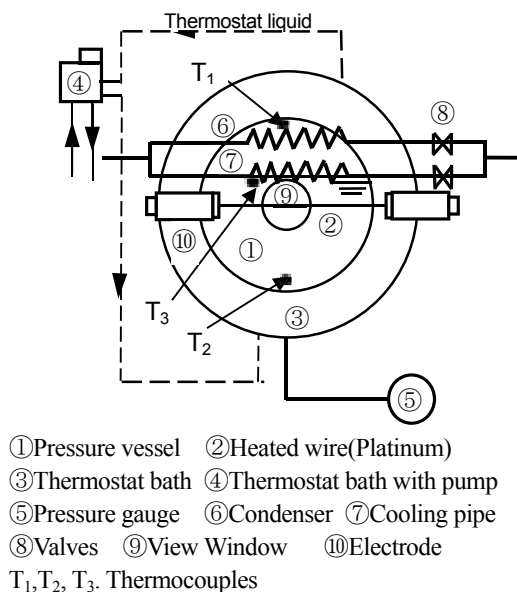


Fig.3 experimental apparatus

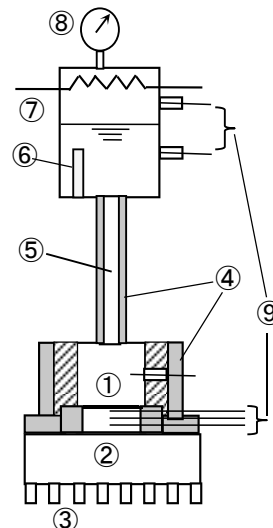


Fig.1 Experimental apparatus (Thermosyphon Type)

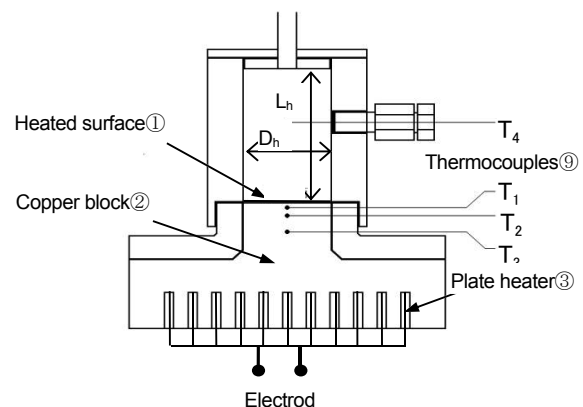


Fig.2 Cross-sectional view of the evaporator section

達率の時系列変化を示す。界面活性剤濃度 $C_s = 0$ ppm の場合は一ヶ月の間に沸騰熱伝達率は運転開始直後から約 $10 - 13 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ の変動内でほとんど変化しなかった。一方、 $C_s = 1000$ ppm では連続運転開始後約 150 時間後までは沸騰熱伝達率が約 $20 - 25 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ の変動幅で推移し、約 150 時間後に熱伝達率が急に上昇し、その後は連続運転終了の 550 時間後まで約 $27 - 32 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ の変動幅でほぼ一定の熱伝達率が持続した。150 時間後の熱伝達率上昇の理由は、加熱面が界面活性剤によって適度に汚染されて表面の粗さが増加したために発泡しやすくなったからであると思われる。また、図 4 より界面活性剤の添加によって沸騰熱伝達率が上昇することが分かる。この界面活性剤添加による沸騰熱伝達率上昇のメカニズムについては Inoue et al.⁽⁶⁾ によって詳細に述べられている。また、界面活性剤を添加すれば、沸騰熱伝達率のパラツキの範囲が広がることも分かった。これは界面活性剤の濃度分布を持つ水の対流によって加熱面の温度分布が生じ易くなるからであると思われる。

図 5 は水平細線上のプール沸騰の測定データであり、アンモニアと混合液の沸騰熱伝達率の時間変化を示す。アンモニアでは実験開始後約 250 時間後に熱伝達率が上昇し、その後約 350 時間後までは多少変動しながら熱伝達率はほぼ一定で経過したが、350 時間後からは熱伝達率が次第に低下し始め、約 750 時間後には実験開始直後から約 12.5% 低下した後は運転終了まで一定の熱伝達率が持続する。これは加熱面が 200 時間後にアンモニアで適度に汚染されて発泡しやすくなったために熱伝達率が上昇し、350 時間後には徐々に汚れが進行して熱伝達率が低下したものである。一方、アンモニア濃度 $C = 0.2$ の混合液に界面活性剤を 1000 ppm 添加した場合は、実験開始直後ほぼ一定の熱伝達率が続いたが、約 150 時間後に熱伝達率が急に上昇し、その後は運転終了の約 240 時間後まで約 $30 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ でほぼ一定の熱伝達率が持続した。界面活性剤が適度に伝熱面を汚染して表面の粗さが増加したために沸騰熱伝達率が促進されたものである。

以上の現象に関する考察は 1 回のみの実験から得られたデータに基づいているので、再現性を確かめるために、さらなる実験を必要とする。また本研究によって、さらに長時間の連続運転による熱伝達率の低下が懸念されることが分かった。今後の検討課題としたい。

4. まとめ

約一ヶ月間以内の連続核沸騰運転を行って次の結果を得た。

1. 水の沸騰熱伝達率は連続運転中にほとんど変化しない。
2. アンモニアの沸騰熱伝達率は運転中 250 時間後にわずかに上昇し、その後は徐々に低下し 750 時間後から運転終了まで一定の熱伝達率が持続する。
3. 水と混合媒体の双方に対して、界面活性剤 1000 ppm の添加によって、運転中約 150 時間後に沸騰熱伝達率が急に上昇し、その後は運転終了までほぼ一定の沸騰熱伝達率が持続する。

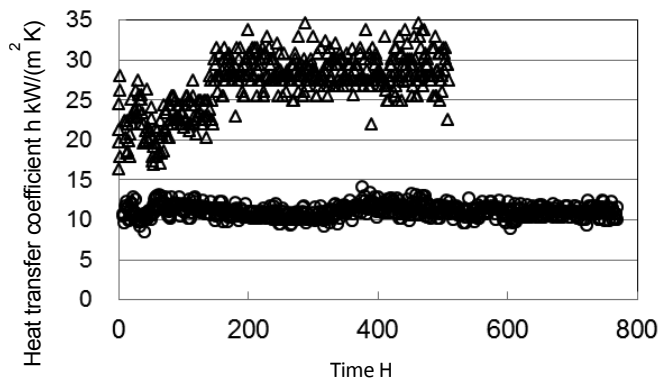


Fig.4 Effect of the surfactant on nucleate boiling heat transfer in water for a long period ($C = 0$, $q = 100 \text{ kW}/\text{m}^2$, $P = 0.1 \text{ MPa}$)

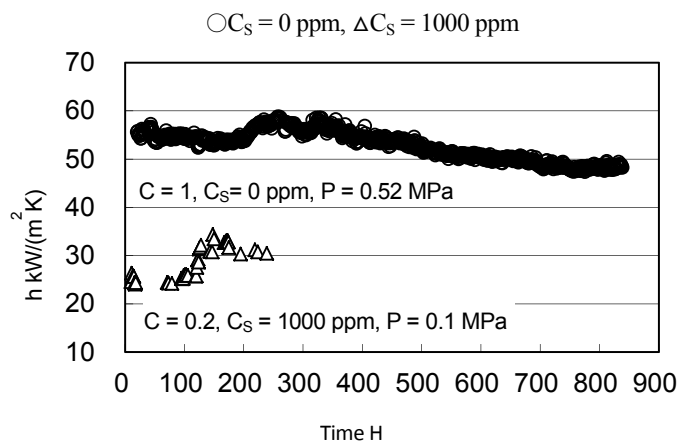


Fig. 5 Variation of nucleate boiling heat transfer in ammonia and the mixture with time ($q = 1000 \text{ kW}/\text{m}^2$)

参考文献

- (1) T. Inoue and M. Monde, *Int. J. of Heat and Mass Transfer* 55 (2012), 3395.
- (2) T. Inoue, M. Monde, T. Kuwahara, Y. Teruya, *Heat Transfer – Asian Res.* 40(1) (2011), 89.
- (3) 大歳幸男, *石油学会誌*, 32 – 6 (1989), 277.
- (4) T. Inoue and M. Monde, *Wärme-und Stoffübertragung* 29 (1994), 171.
- (5) T. Inoue and M. Monde, *Int. J. of Heat and Mass Transfer* 52 (2009), 4519.
- (6) T. Inoue, Y. Teruya and M. Monde, *Int. J. of Heat and Mass Transfer* 47 (2004), 5555.