

水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

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

^{*1}Kurume Institute of Technology, Dept. of Mechanical Engineering
Kamitsu-machi 2228, Kurume-shi, Fukuoka, 830-0052 Japan

^{*2}Institute of Ocean Energy, Saga University, Japan

Secular change of nucleate boiling heat transfer coefficients in water has been measured when a surface - active agent was added into water. The experiment has been carried out using a thermosyphon at pressure of 0.1 MPa. The effect of the surface - active agent on secular change was investigated experimentally for the surfactant concentration, $C_S = 0$ and 1000 ppm. The thermosyphon was been operating and the boiling heat transfer coefficient was been measuring for a month. The result shows that the nucleate boiling heat transfer coefficient never changed for a month for pure water. On the other hand, the boiling heat transfer coefficient increased suddenly 150 hour after in the midst of the experiment for water with the surfactant and lasted till 500 hour after, at which the experiment was finished.

Key Words : Boiling heat transfer, Secular change, Surfactant, Enhancement

1. 緒 言

Inoue ら⁽¹⁾はアンモニア/水混合媒体の界面活性剤による沸騰熱伝達率の促進について研究を行い、界面活性剤の添加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、本混合媒体と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、本研究では先ず界面活性剤が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. 実験装置および実験方法

2.1 実験装置 図1は従来用いた沸騰熱伝達を測定するための実験装置である。試験容器内①に水平に張られた白金線②(直径0.3mm 長さ37mm)に直流電流を通電することより発生するジュール熱で加熱面が加熱される。白金線②は図2に示されるブリッジ回路の中に組み込まれていて、抵抗温度計としても利用される。図2のブリッジ回路を構成する実験装置(図1)で長時間の連続運転を行うと、白金線が汚染されることが前回の実験で分かった。そこで本研究では伝熱面の加熱方法を変えた実験装置を製作した。図3にブリッジ回路を利用しない本実験装置の概要を示す。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で発生した蒸気は連結管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て、バルク液に戻るようになっている。図4に蒸発部加熱面の詳細を示す。したがって、連結管

* 原稿受付 2012 年 8 月 1 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 佐賀市本荘町 1)

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

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交流になっている。蒸発部には直径 25 mm の銅製の水平加熱面①が装着されている。蒸発部は円筒形であり、その内径と長さはそれぞれ $D_h = 25 \text{ mm}$ および $L_h = 50 \text{ mm}$ であり、容積は 39.3 cm^3 となる。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 4 に示すように銅ブロックには 3 本の熱電対が加熱面から 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(99-100 °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。

2.2 実験方法 実験は、図 3 の実験装置を用いて試験流体(超純水)を飽和温度に保った後、加熱面①への熱流束を段階的に増加させ、各熱流束で定常を確認した後、温度 T_1, T_2 および T_3 を測定することによって、加熱面後は 1000 kW/m^2 一定の熱流束を維持して約 1 ヶ月間連続運転を行った。運転中は 1 時間間隔で沸騰熱伝達率の

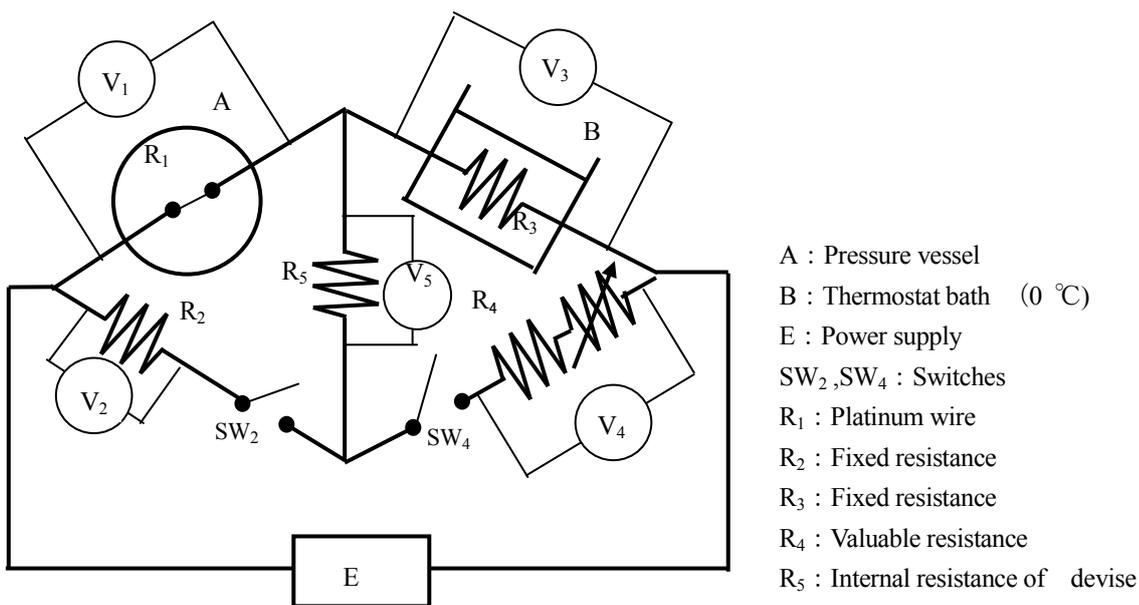
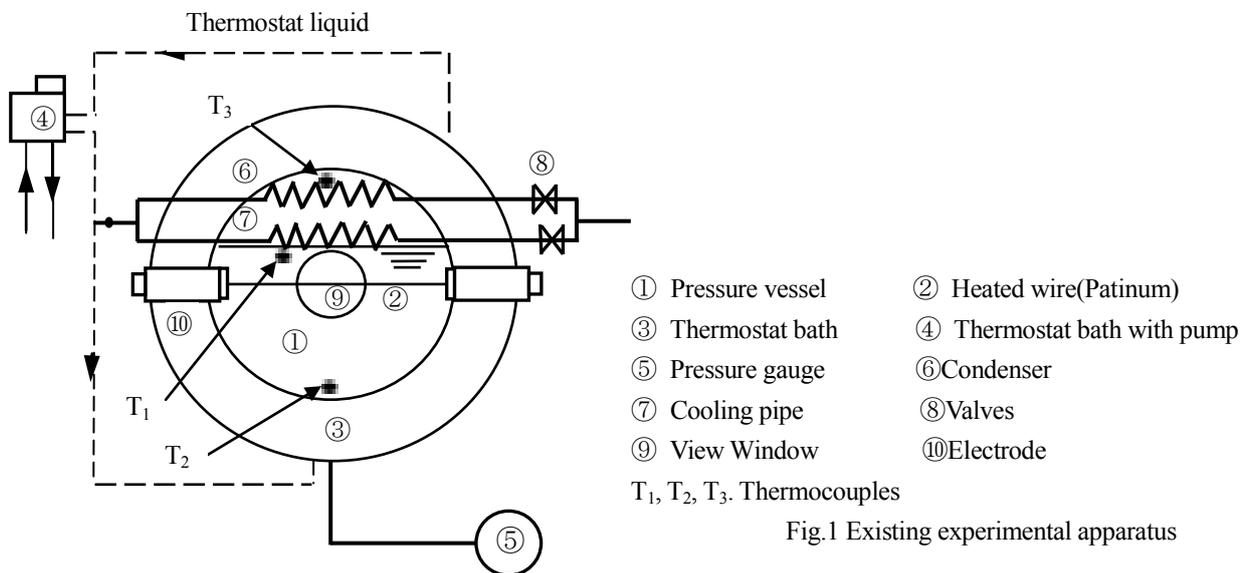


Fig.2 Bridge circuit (measurement circuit of wall superheat and heat flux)

測定を行った。使用した水は超純水である。また、非イオン系のフッ素系界面活性剤を使用した。その主成分は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%の水の混合溶液が用いられている。その他の化学物理的な性質については大歳⁽²⁾によって詳しく述べられている。

3. 実験結果

図5は図3の実験装置で測定された実験データであり、 $P=0.1\text{ MPa}$ における超純水の沸騰熱伝達率の経年変化を示す。実験開始直後は熱流束を段階的に上させ、 1000 kW/m^2 になった後、 1000 kW/m^2 一定の熱流束で一ヶ月間連続運転したときの沸騰熱伝達率の時系列変化を示す。一ヶ月の間に沸騰熱伝達率は運転開始直後から約 $10\text{--}12\text{ kW/(m}^2\cdot\text{K)}$ の変動内でほとんど変化しなかった。ちなみに、井上⁽³⁾はブリッジ回路を用いた従来の実験装置(図1)によるプール沸騰熱伝達率は時間の経過とともに徐々に低下し、230時間後には約21%熱伝達率が低下することを報告した。このように、超純水にもかかわらず沸騰熱伝達率が低下した理由は、当初、溶解度が高くなるという超純水の特質のために、容器表面の酸化被膜が超純水に溶け込んで伝熱面を汚染していると考えた。しかし、図5に示す実験結果を参考にして再検討した結果、図2に示す従来の実験装置のブリッジ回路において、

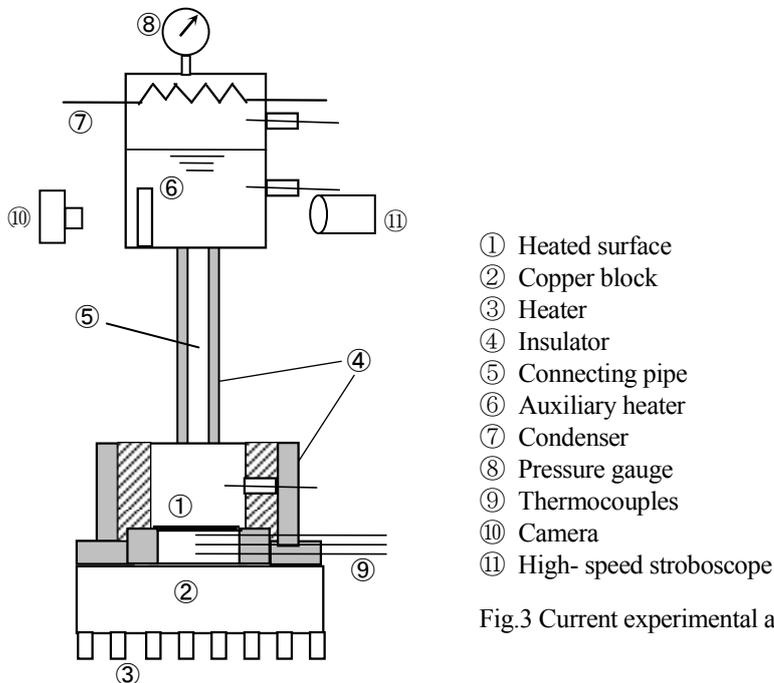


Fig.3 Current experimental apparatus

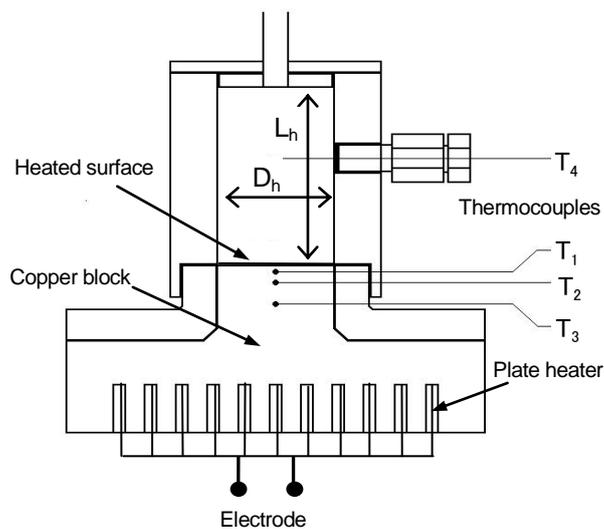


Fig.4 Cross- sectional view of the heated block

電流のほとんどが流れる白金線 (R₁) の両端のステンレス電極の腐食によって圧力容器内の水が濁って、白金線が汚染されたために沸騰熱伝達率が低下したものと判断した。

図6は超純水に界面活性剤を 1000 ppm 添加した場合の沸騰熱伝達率の時間変化である。界面活性剤を 1000 ppm 添加すると、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 kW/(m² · 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、約 150 時間後は連続運転終了の 500 時間後まで約 27-32 kW/(m² · K)の変動幅でほぼ一定の熱伝達率が持続した。図5および6より界面活性剤の添加によって沸騰熱伝達率が上昇したことが分かる。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井上ら⁽⁴⁾によって詳細に述べられている。約 150 時間後に沸騰熱伝達率が上昇したのは、界面活性剤が適度に伝熱面を汚染して表面の粗さが増して沸騰熱伝達率が促進されたものと考えられる。この現象に関しては1回の実験から得られたデータであるので、再現性を確かめるために、さらなる実験を必要とする。今後の検討課題としたい。

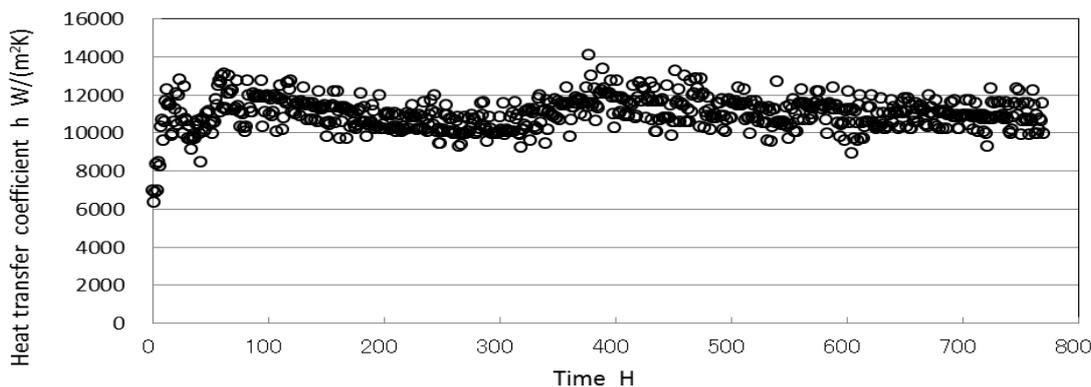


Fig.5 Secular change of nucleate boiling heat transfer in water
P=0.1 MPa, q=1000 kW/m², C_s = 0 ppm

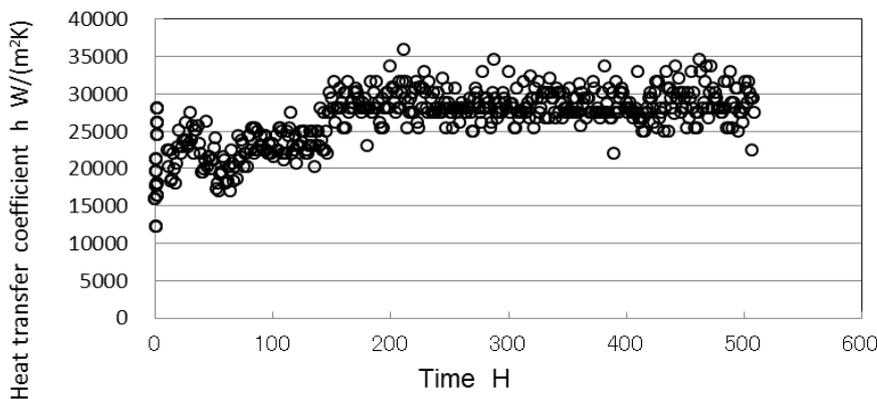


Fig.6 Secular change of nucleate boiling heat transfer in water
P=0.1 MPa, q=1000 kW/m², C_s = 1000 ppm

4. まとめ

今回の実験範囲である一ヶ月間の連続運転では、界面活性剤を添加しない場合は、沸騰熱伝達率は運転開始直後から約 10 - 12 kW/(m² · K)の変動内でほとんど変化しなかったが、界面活性剤 1000 ppm を添加すると、連続運転の途中で運転開始後約 150 時間後に沸騰熱伝達率が急に上昇し、その後は約 500 時間後の連続運転終了まで約 27 - 32 kW/(m² · K)の変動幅でほぼ一定の熱伝達率が持続した。

文 献

- (1) T. Inoue and M. Monde, Prediction of Pool Boiling Heat Transfer Coefficient in Ammonia/Water Mixtures, *Heat*

Transfer - Asian Research 38(2), (2009), 65-71.

- (2) 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.
- (3) 井上利明・門出政則, アンモニア/水混合媒体のプール沸騰熱伝達の経年変化, *佐賀大学海洋エネルギー研究センター平成23年度共同利用・共同研究成果発表会講演論文集*, (2011), 33 - 35.
- (4) 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), 5555 - 5563.