

水およびアンモニアの沸騰熱伝達とその経年変化に及ぼす界面活性剤と PEEK 樹脂コーティングの影響

Effect of a Surface – Active Agent and PEEK Resin Coating on Nucleate Boiling Heat Transfer and its Secular Change in Water and Ammonia

井上 利明¹ (久留米工大), 有馬博史² (佐大海エネ研)
小山幸平² (佐大海エネ研), 門出 政則³ (九大水素科研)

Toshiaki INOUE¹, Hiroshi Arima², Kohei Koyama² and Masanori MONDE³

¹Dept. of Mech. Eng., Kurume Inst. of Tech., 2228 Kamitsu Kurume Fukuoka

²Dept. of Mech. Eng., Saga Univ., 1 Honjou Saga

³HYDROGENIUS, Kyushu Univ. 744 Motoooka Nishi-ku Fukuoka

A long - term change of nucleate boiling heat transfer coefficients in water and ammonia have been measured when a surface - active agent was added into water and those have been measured on a heated wire that PEEK (Poly Ether · Ether · Keton) resin was coated in ammonia. 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 and PEEK coating on the nucleate boiling heat transfer coefficient and time variation of the nucleate boiling heat transfer coefficient were investigated experimentally for the surfactant concentration, $C_s = 0$ and 1000 ppm. The result shows that the nucleate boiling heat transfer coefficient never changes for a month in pure water and in ammonia with the heated wire coated by PEEK resin. On the other hand, the boiling heat transfer coefficient decreases gradually till the end of operation in water with the surfactant. The surfactant increased the nucleate boiling heat transfer and PEEK resin decreased one.

Key Words : Nucleate Boiling, Heat Transfer, Surface-Active agent, Secular Change, PEEK Coating

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、沸騰熱伝達が促進されることを報告した。一方、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。また、アルミニウムは熱伝導率が良いので、熱交換器の材料として広く用いられている。しかし、アンモニアがアルミニウムを腐食させることはよく知られている。

そこで、本研究ではアンモニアに対して腐食を避けるために加熱面の表面に PEEK (Poly Ether · Ether · Keton) 樹脂をコーティングして、また、沸騰熱伝達率を促進させるために水に界面活性剤を添加して沸騰熱伝達率を約一ヵ月間連続して測定した。そして、界面活性剤と PEEK 樹脂コーティングが水とアンモニアの沸騰熱伝達率とその経年変化に及ぼす影響を実験的に明らかにした。

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 に熱サイフオ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オンである。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 $D_h = 25 \text{ mm}$ 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の周囲にバ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の沸騰熱伝達を測定するための実験装置である。高熱流束および高温に耐えるために加熱面にはアルミニウムの替りに融点の高い直径 0.3 mm の白金線②を用い、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。PEEK 樹脂コーティングの厚さは 100 μm である。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、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 840 kW/m^2 に達したことを確認して約1か月間以上連続運転を行った。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。本研究ではアンモニア水溶液は使用しないけれども、今後の研究においてアンモニア/

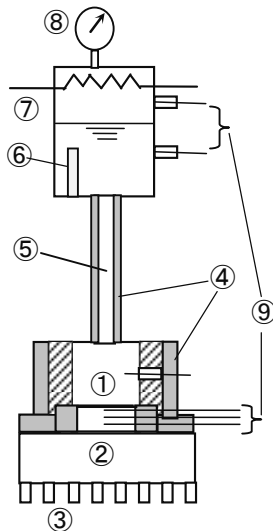


Fig.1 Experimental apparatus (Thermo syphon Type)

- ①Heated plate ②Copper block ③Heater
- ④Insulator ⑤Connecting pipe ⑥Auxiliary heater
- ⑦Conden

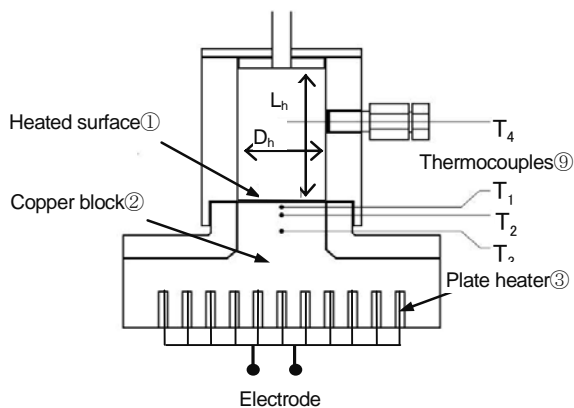


Fig.2 Cross-sectional view of the evaporator section

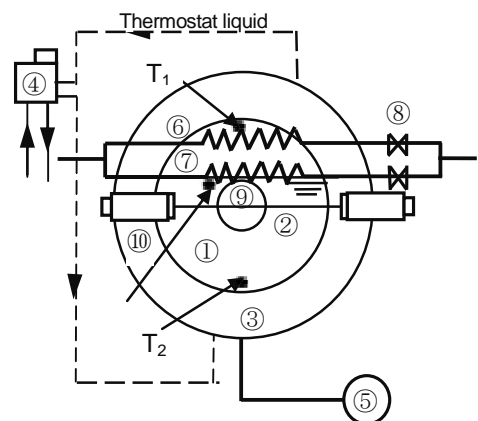


Fig.3 experimental apparatus (Pool boiling type)

- ①Pressure vessel ②Heated wire(Platinum)
- ③Thermostat bath ④Thermostat bath with pump
- ⑤Pressure gauge ⑥Condenser ⑦Cooling pipe
- ⑧Valves ⑨View Window ⑩Electrode
- T_1, T_2, T_3 . Thermocouples

水混合媒体への展開のために、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 において 100 kW/m^2 一定の熱流束で約一ヶ月間連続運転したときの水の沸騰熱伝達率の時系列変化を示す。界面活性剤濃度 $C_s = 0 \text{ ppm}$ 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 $10 - 13 \text{ kW/(m}^2 \cdot \text{K)}$ の変動内ではほぼ一定であった。一方、 $C_s = 1000 \text{ ppm}$ では運転開始直後から沸騰熱伝達率が低下し始め、実験終了まで次第に低下し続け、実験終了時の約 450 時間後には約 13% 低下した。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、沸騰熱伝達率のバラツキの範囲が広くなることも分かった。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熱伝達率の測定データであり、アンモニアの沸騰熱伝達率の時間変化と PEEK コーティングの影響を示す。コーティングを施さない場合は実験開始後約 200 時間後に熱伝達率が上昇し、その後約 300 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後、300 時間後からは熱伝達率が次第に低下し始め、約 700 時間後に実験開始直後から約 12.5 % 低下した後、運転終了の 800 時間後まで 12.5 % 以上低下することなく一定の熱伝達率が持続した。これは加熱面が 200 時間後にアンモニアで適度に汚されて発泡し易

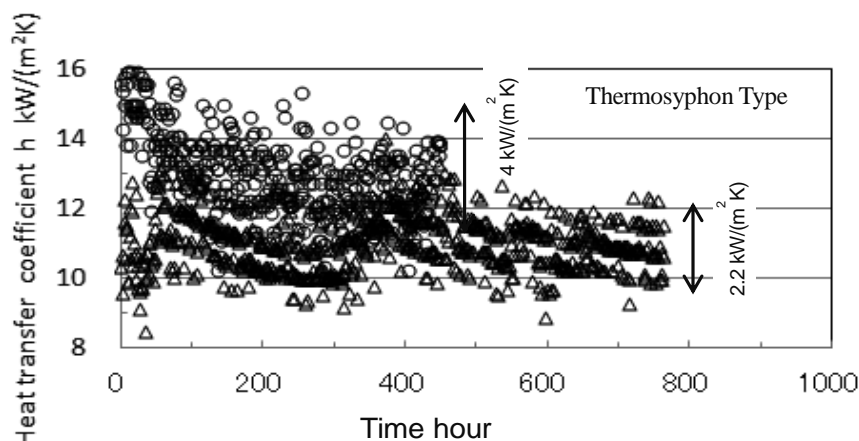


Fig.4 Effect of the surfactant on nucleate pool boiling heat transfer in water for a long period ($q = 100 \text{ kW/m}^2$, $P = 0.1 \text{ MPa}$)
○ $C_s = 1000 \text{ ppm}$, △ $C_s = 0 \text{ ppm}$

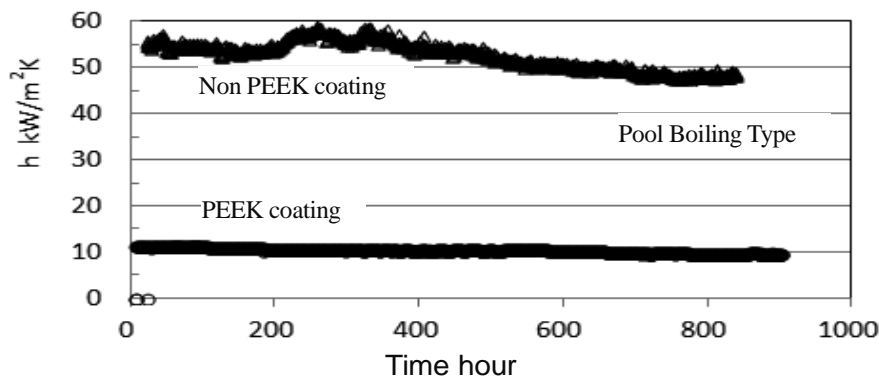


Fig. 5 Effect of PEEK coating on nucleate boiling heat transfer in ammonia for a long period ($q = 840 \text{ kW/m}^2$, $P = 0.4 \text{ MPa}$)

くなったために熱伝達が上昇し, 300 時間後には徐々に汚れが進行して熱伝達が低下したと思われる. 一方, コーティングを施した場合は, 実験開始直後からほぼ一定の熱伝達率が続き, 実験終了時の約 36 日後まで熱伝達率はほとんど変化しなかった. また, 加熱面に 100 μm の PEEK 樹脂を被膜することによって, 熱伝達率が約 120 % 低下することが分かった. さらに, 実験終了後, 加熱面の PEEK 樹脂被膜の剥がれが観察された.

以上の結果は 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

約一ヵ月間以上の連続核沸騰運転を行って次の結果を得た. **本文と重なって**

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. 水に界面活性剤を添加すると沸騰熱伝達率が向上するが, 時間の経過とともに次第に熱伝達が低下する.
3. アンモニアの沸騰熱伝達率は運転中 200 時間後にわずかに上昇し, その後は徐々に低下し 700 時間後から運転終了の約 800 時間後まで一定の熱伝達率が持続する.
4. 加熱面に 100 μm 厚さの PEEK 樹脂を被膜することによって, 沸騰熱伝達率の経年変化は殆どないが, 熱伝達率が大きく (120 %) 低下する.

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 and 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.