

ループ式熱サイホンの沸騰部における伝熱特性に関する研究

日大生産工 ○齋藤 拓也 日大生産工 松島 均

1 緒言

近年の大規模集積回路やインバータ等の半導体素子の高性能・小型化に伴い、機器における発熱量及び発熱密度が増加している。このため冷却性能の向上が求められているが、素子近傍の空間が狭小化しているため、素子冷却を取り巻く環境は年々厳しくなっている。この対策の一環としてループ式ヒートパイプLHPの利用が増えつつある⁽¹⁾。LHPは沸騰・凝縮の相変化に伴う潜熱を利用し熱輸送を行う機器で、冷媒には環境負荷のない水を使用することができる。しかし大気圧下における水の沸点は100℃と素子冷却としては高温のため、LHP内部を低圧にし低沸点化した上で使用される。したがって低圧下での沸騰を促進することで、LHPの熱輸送性能を向上させることが可能である。松島ら⁽²⁾はピラミッド型の表面構造を有した伝熱面、及び純水に界面活性剤を添加した作動液を使用し大気圧下でのプール沸騰実験について報告している。一方、低圧下の沸騰では気泡が大型化し、気泡離脱が間欠的になるなど現象が大きく変化する^{(3),(4)}。このため、大気圧下に対して知られている沸騰促進の手段を低圧下に適用した際の効果を検討する必要がある。

本研究ではLHPを想定した低圧下における沸騰促進の効果について実験的に検討を行い、そこで得られた知見を基に実施したLHP実験モデルでの熱輸送性能の測定結果についても報告する。

2 低圧下の沸騰促進

2.1 実験方法

本研究で使用した沸騰実験装置の概略図をFig.1に示す。装置は主に、密閉容器、発熱体となる銅ブロック、セラミックヒータ、コイル状凝縮管、サブヒータ、恒温水槽から構成されている。密閉容器は全体に樹脂材を用い、側面は透明なポリカーボネート材を使用した。コイル状凝縮管内を循環する冷却水の流量と装置内に投入したサブヒータの入熱量を調整し、真空計での計測値が実験条件の圧力となるようにした。なお、測定圧力は大気圧から5kPaの範囲とした。銅ブロックには5mm間隔に線径0.076mmのT型熱電対を3本挿入し、測定値からフーリエの熱伝導式を用い入熱量、伝熱面温度を推算した。伝熱面として、平滑面と頂点角90度でピッチを0.5mmから5.0mmに変化させたピラミッド型伝熱面を使用した(Fig.2)。また伝熱面の寸法は10mm×10mmとした。作動液には、純水と界面活性剤水溶液としてオレイン酸カリウム水溶液100ppm及び300ppm、ミリスチン酸ナトリウム水溶液100ppmを使用した。また作動液は大気圧下で十分に沸騰させ、真空引きを行った装置に封入後、低圧沸騰を行い脱気した。封入量は作動液の液面が伝熱面より任意の高さになるように調整し、水位は25mmから100mm、基本の水位は75mmとした。実験は任意の圧力の飽和状態が維持した後に、セラミックヒータへの入熱量を段階的に増加させた。なお実験は膜沸騰に遷移し表面温度が上昇し続ける状態(限界熱流束)になるか、もしくは

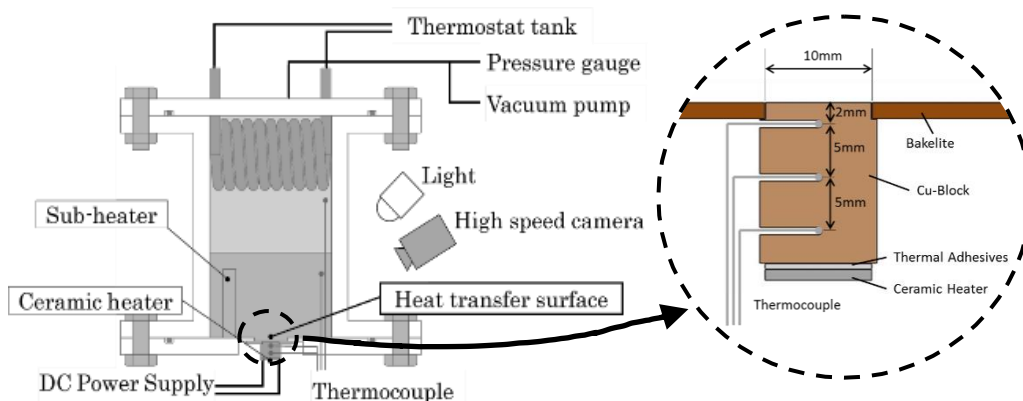


Fig.1 Apparatus for Boiling experiment.

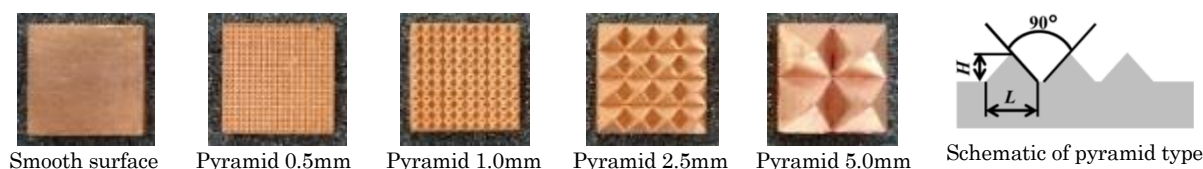


Fig.2 Heat transfer surfaces (10mm×10mm)

Study on heat transfer characteristics of loop-thermosyphon at boiling part

Takuya SAITOU and Hitoshi MATSUSHIMA

装置の安全性からセラミックヒータの温度が上限に達するまで行った。

2.2 結果と考察

2.2.1 伝熱面形状の影響 Fig.3 に純水、15kPa における各伝熱面に対する沸騰曲線を示す。Fig.4 より、ピラミッド型 2.5mm の沸騰熱伝達が最も高いことがわかる。これを熱伝達率に換算すると $q=0.2\text{MW/m}^2$ において、平滑面では $h=14.3\text{kW/m}^2\text{K}$ 、ピラミッド型 2.5mm では $h=20.3\text{kW/m}^2\text{K}$ と熱伝達が 1.42 倍増大した。Fritz の式⁵⁾より求まる純水中での 15kPa における離脱気泡直径が 2.46mm と伝熱面表面の形状寸法に近いことから、気泡径と伝熱面表面の形状寸法が同じレベルであったことで沸騰促進された可能性が考えられる。他の圧力下においても純水の場合はピラミッド型 2.5mm の沸騰熱伝達が良好であり、これも Fritz の式より 100kPa では 2.34mm、5kPa では 2.53mm と気泡径と伝熱面の寸法が適当であったためと考えられる。

なお、 $q=0.3\text{MW/m}^2$ 以上の熱流束域では、平滑面は過熱度が増大し膜沸騰への遷移が見てとれ、沸騰熱伝達は大きく低下した。これに対してピラミッド型伝熱面では $q=0.6\text{MW/m}^2$ 付近においても安定した沸騰が維持されており、高熱流束域での沸騰促進が確認された。これはピラミッド型の構造により気泡同士の合体が抑制され、加えて気液の交換が効率化したことで膜沸騰に遷移しづらくなったためと考えられる。

Fig.4 に 15kPa と 5kPa における平滑面とピラミッド型 2.5mm の沸騰曲線を示す。熱伝達率に換算すると 5kPa、 $q=0.2\text{MW/m}^2$ で平滑面では $h=11.2\text{kW/m}^2\text{K}$ 、ピラミッド型 2.5mm では $h=13.5\text{kW/m}^2\text{K}$ と熱伝達が 1.20 倍増大となり、15kPa で 1.42 倍の性能向上と比べ、最も低い低圧下では伝熱面での差異が小さくなった。ただし熱流束が増大するにつれ、ピラミッド型 2.5mm と平滑面の差異は大きくなり、低圧下においても沸騰促進が確認された。

2.2.2 界面活性剤水溶液の影響 Fig.5 に、5kPa における各作動液での平滑面の沸騰曲線を示す。熱伝達率に換算すると $q=0.2\text{MW/m}^2$ において、純水では $h=11.2\text{kW/m}^2\text{K}$ に対して、オレイン酸 100ppm では $h=12.2\text{kW/m}^2\text{K}$ と熱伝達が 1.08 倍増大、オレイン酸 300ppm では $h=12.0\text{kW/m}^2\text{K}$ と熱伝達が 1.07 倍増大と、純水とオレイン酸水溶液での差異は小さかった。しかし、ミリスチン酸 100ppm では $h=14.9\text{kW/m}^2\text{K}$ と純水に対して熱伝達が 1.33 倍増大し、沸騰促進の効果が確認された。ただし、ミリスチン酸水溶液を使用した後の伝熱面では表面が変色した(Fig.6)。これはミリスチン酸ナトリウムがイオン系の界面活性剤なので、銅と反応し酸化物が表面に析出した可能性があり、表面性状が変化したことによる沸騰促進の影響があると

考えられる。

なお、 $q=0.3\text{MW/m}^2$ 以上の熱流束域では、オレイン酸 100ppm と 300ppm、ミリスチン酸 100ppm において

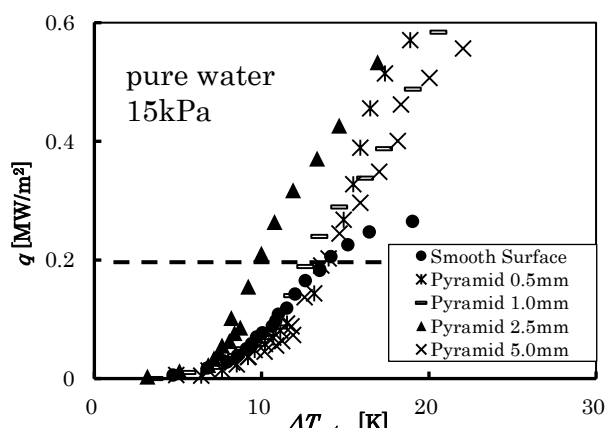


Fig.3 Boiling curve of different surface structure.

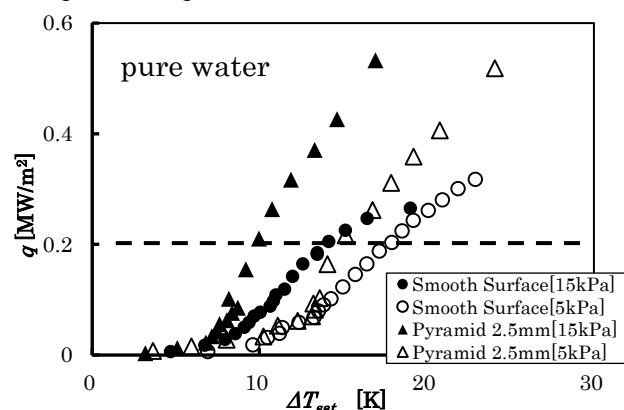


Fig.4 Boiling curve of Smooth Surface and Pyramid 2.5mm.

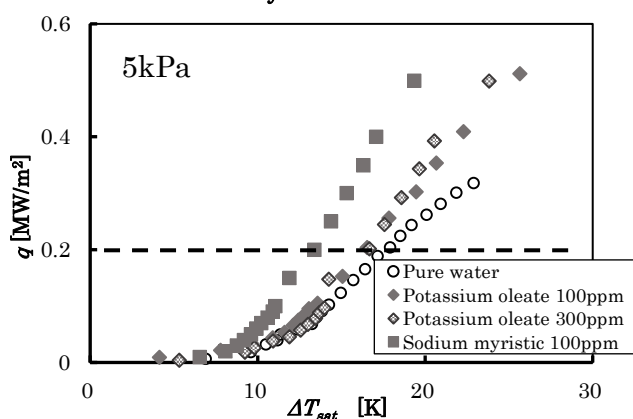


Fig.5 Boiling curve of Smooth Surface with each working fluid.

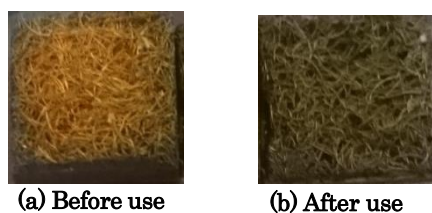


Fig.6 Heating surface before(a) and after(b) using Sodium myristic.

は膜沸騰に遷移せず細かい気泡での沸騰が維持され、界面活性剤の添加による高熱流束域での沸騰促進が確認された。これは界面活性剤の添加により液の表面張力が低下したことで、気泡離脱時の直径が小さくなり気泡の合体が抑制されたことによる影響と考えられる。

2.2.3 作動液水位の影響 Fig.7 に純水、5kPaにおいて作動液の水位を25mmから100mmに変化させた際の平滑面の沸騰曲線を示す。熱伝達率に換算すると $q=0.2\text{MW/m}^2$ において、基本とした水位75mmでの $h=11.7\text{kW/m}^2\text{K}$ と比べ、水位100mmと高くすると $h=10.8\text{kW/m}^2\text{K}$ となり、0.92倍と低下した。これに対して、水位25mmと低くすると $h=13.6\text{kW/m}^2\text{K}$ と1.16倍増大した。これは水位を低くした場合、伝熱面近傍での静水圧の減少により、気泡離脱が容易になったことで沸騰促進効果が得られた可能性が考えられる。

なお、熱流束が増えるにつれ水位ごとの沸騰熱伝達性能の差異は小さくなったが、 $q=0.3\text{MW/m}^2$ 以上の熱流束域において、伝熱面近傍での盛衰差圧の小さい水位25mmの条件が最も早く膜沸騰に遷移した。

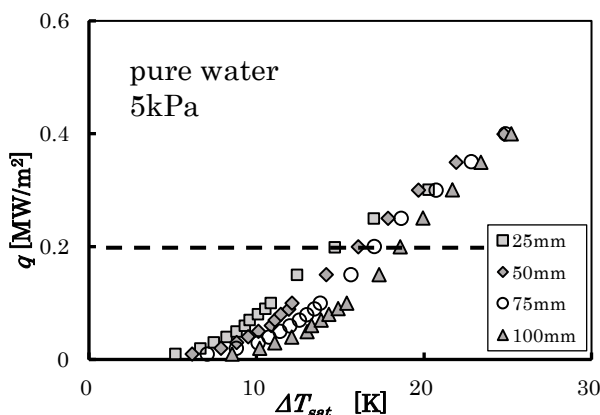


Fig.7 Boiling curve of Smooth Surface at each water level.

3. LHP 実験

3.1 実験方法

LHP 実験で使用した装置の概略図を Fig.8 に示す。装置は沸騰部と凝縮部にアクリルの容器を、断熱部に透明なポリウレタンチューブを使用し内部様相を観察可能にした。沸騰部には25mm角の伝熱面を有した発熱体の銅ブロックがある。伝熱面は平滑面であり、発熱体は2mm, 3mm, 5mm厚の銅ブロックを半田付けし、沸騰実験装置同様に銅ブロック間に熱電対を挿入し、伝熱面温度 T_{surf} を推算している。ただし、入熱量 Q_{in} は電源装置からセラミックヒータに供給した電力の値を使用した。入熱量 Q_{in} は50, 100, 150Wである(それぞれ熱流束は 80kW/m^2 , 160kW/m^2 , 240kW/m^2 に相当)。凝縮部には冷却器となるコイル状の銅管があり、内部を恒温槽から供給される25℃の冷却水を循環させることで装置の冷却を行っている。また冷却水の

温度変化から LHP のシステムで輸送された熱量 Q_{sys} を算出している。LHP の性能評価として熱抵抗 R を採用し、伝熱面温度 T_{surf} と冷却水の温度から求めた冷却器温度 T_{cool} の差をシステム熱輸送量 Q_{sys} で除した値とした。なお、作動液は脱気した純水とオレイン酸カリウム水溶液300ppmを使用し、装置内を十分に減圧後に封入を行った。封入率 α は10%, 30%, 50%とした。

3.2 結果と考察

Fig.9 に、作動液に純水を使用した際のそれぞれ任意の入熱量、封入量における熱抵抗の変化を示す。封入率 $\alpha=50\%$ 、入熱量 $Q_{in}=50\text{W}$ においては $R=0.62[\text{K/W}]$ であったが、封入率 $\alpha=10\%$ 、入熱量 $Q_{in}=50\text{W}$ においては $R=0.39[\text{K/W}]$ と36%低下した。これに対し、封入率 $\alpha=50\%$ 、入熱量 $Q_{in}=150\text{W}$ においては $R=0.27[\text{K/W}]$ であるのに対し、封入率 $\alpha=10\%$ 、入熱量 $Q_{in}=150\text{W}$ においては $R=0.21[\text{K/W}]$ と23%の低下となった。これは2.2.3節で述べた作動液水位での結果と関連していると考えられる。すなわち、封入量が少ないことで水位が低くなり、低圧・低熱流束域での沸騰促進が図られたことにより熱輸送性能が向上したものとみられる。これに対し比較的高い熱流束域では封入率の違いによって性能の差異が小さくなったが、同じく2.2.3節で述べた水位の違いによる沸騰熱伝達の差異が小さくなったことによる影響とみられる。

次に Fig.10 に、作動液にオレイン酸カリウム水溶液100ppmを使用した際のそれぞれ任意の入熱量、封入量における熱抵抗の変化を示す。封入率 $\alpha=10\%$ 、入熱量 $Q_{in}=50\text{W}$ においては $R=0.51[\text{K/W}]$ と作動液に純水を使用したときに比べ、熱抵抗が29%増加した。これは2.2.2節で述べたように比較的低い熱流束域では純水とオレイン酸での沸騰熱伝達に差異が小さかったことに加えて、液の表面張力が低下したことにより凝縮で生じた液が膜状になり、凝縮部での冷却性能が低下したことによる影響が出たものと考えられる。これに

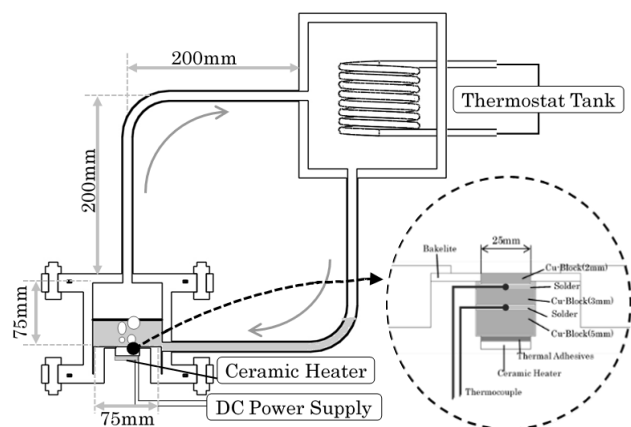


Fig.8 Apparatus for LHP experiment.

対して封入率 $\alpha=10\%$ 、入熱量 $Q_{in}=150W$ においては $R=0.19[K/W]$ と作動液に純水を使用したときに比べ、熱抵抗が 7%低下した。2.2.2 節で述べたように比較的高い熱流束域ではオレイン酸では沸騰促進の効果が見込めるものの、この場合でも凝縮部における冷却性能の低下の為、作動液によるシステムでの熱輸送性能の差異が小さかったものと考えられる。

Fig.11 に入熱量 $Q_{in}=50W$ 時、Fig.12 に入熱量 $Q_{in}=150W$ 時における、各条件での伝熱面温度の結果を示す。入熱量 $Q_{in}=50W$ においては、作動液に純水を使用した際の封入率 $\alpha=50\%$ における伝熱面温度 $T_{surf}=55.3^{\circ}C$ に対し、封入率 $\alpha=10\%$ では $T_{surf}=44.8^{\circ}C$ と、伝熱面温度が $10.5^{\circ}C$ 低下し、比較的低い熱流束域では封入率、つまり作動液水位の変化に伴う沸騰促進が、伝熱面温度の低下に寄与したとみられる。これに対し、入熱量 $Q_{in}=150W$ においては、作動液に純水を使用した際の封入率 $\alpha=10\%$ における伝熱面温度 $T_{surf}=56.4^{\circ}C$ に対し、作動液にオレイン酸水溶液 300ppm を使用した際の封入率 $\alpha=10\%$ における伝熱面温度 $T_{surf}=53.9^{\circ}C$ と、伝熱面温度が $2.5^{\circ}C$ 低下し、比較的高い熱流束域では界面活性剤の添加による沸騰促進が伝熱面温度の低下に寄与することが確認された。

4. 結論

本研究では LHP の性能向上を目的とし、低圧下での沸騰促進と LHP モデルでの伝熱性能に着目した実験的検討を行った。

低圧下での沸騰促進

1. ピラミッド型 2.5mm の伝熱面形状において最も高い沸騰熱伝達となり、比較的高い熱流束域では促進効果が顕著であった。
2. オレイン酸カリウム水溶液 100ppm と 300ppm では比較的高い熱流束域で促進効果が見られた。ミスチン酸ナトリウム水溶液 100ppm では測定した熱流束の全域で沸騰促進の効果が見られた。
3. 測定条件内で最も低い作動液水位 25mm では比較的低い熱流束域で沸騰促進の効果が見られた。

LHP 実験

1. 測定条件内で最も低い封入率 $\alpha=10\%$ にて R 及び T_{surf} がそれぞれ低下した。これは比較的低い入熱量で顕著にみられた。
2. 作動液にオレイン酸カリウム水溶液 300ppm を使用すると、比較的高い入熱量で純水の場合より R 及び T_{surf} がそれぞれ低下した。

5. 参考文献

- (1) 豊田他, 機論 B, 78-795(2012), pp.145-160
- (2) 松島他, 伝熱学会論文集, 2015, 23-1, 15-22
- (3) 小田他, 第 50 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, 2013-5, SP39, 214-215

- (4) 山田他, 第 53 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, 2016-5, SP115
- (5) Fritz, W., Phys. Z., 1935, 36, 379-388

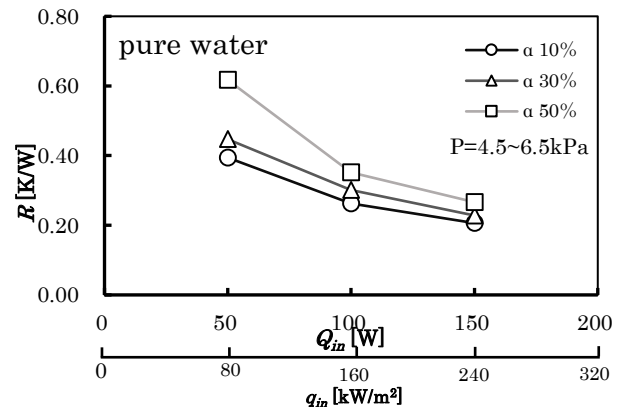


Fig.9 Change of thermal resistance.

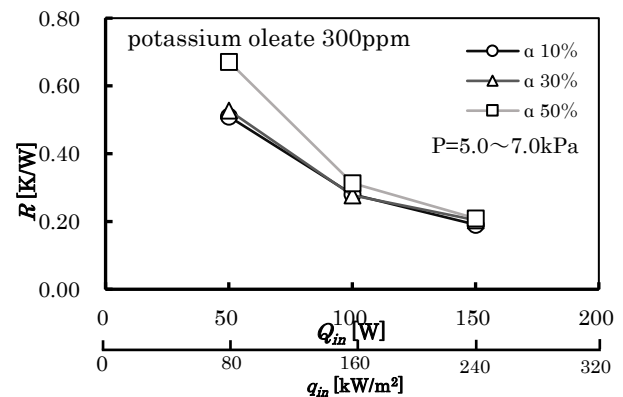


Fig.10 Change of thermal resistance.

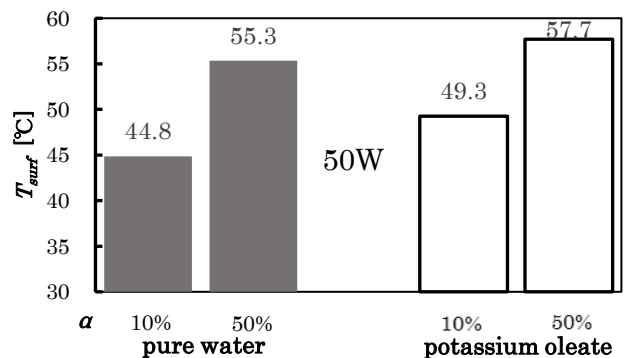


Fig.11 Change of heating surface temperature.

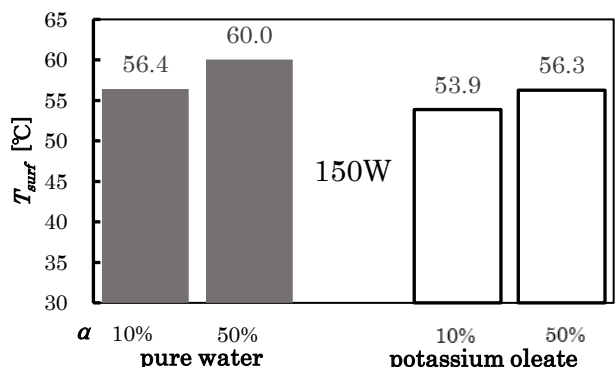


Fig.12 Change of heating surface temperature.