

低圧下でのプール沸騰における熱伝達特性

－伝熱面寸法の影響－

○ 堀越 孝弘 日大生産工（院）

松島 均 日大生産工

1. 緒言

近年の電子機器の高性能化に伴い、機器における発熱量が増加している。そのため、冷却性能の向上が求められている。この対策としてヒートパイプなどの沸騰・凝縮の相変化に伴う潜熱を利用した熱輸送機器が注目されている。ヒートパイプは作動流体として自然環境にも優しい水が用いられることが多い。しかし大気圧下における水の沸点は100℃と高温のため、低圧にした低沸点下で使用される。したがって、低圧下での沸騰を促進することで、ヒートパイプにおける熱輸送性能を向上させることが可能である。松島と齋藤⁽¹⁾により、10mm×10mmの伝熱面においては圧力15kPaの低圧下では水位75mmの場合ピッチ2.5mmのピラミッド型伝熱面を用いると0.2MW/m²程度の比較的低い熱流束において、平滑面に対して約1.42倍の熱伝達の向上効果が得られることが示された。本研究では、ループ型ヒートパイプ用伝熱面を想定したより大型の25mm×25mmの伝熱面を用いて実験を行い、伝熱面の形状・寸法が低圧下での沸騰熱伝達に与える影響を明らかにすることを目的とする。

2. 実験装置および実験方法

本研究で使用した実験装置の概略図をFig.1に示す。実験装置は主に、密閉容器、発熱体である銅ブロックとセラミックヒータ、冷却管、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。装置下面中央に発熱体である銅ブロックとセラミックヒータを設置した。銅ブロックには10mm間隔に線径0.076mmのT型熱電対を3本挿入し、セラミックヒータには直流電源装置から電力を供給できるようにしている。本研究で使用した伝熱面の

写真をFig.2に示す。伝熱面として、平滑面、ピラミッド型伝熱面（頂点角90度でピッチは0.5mmから5.0mm）、そしてディンプル型伝熱面（径2.0mmから5.0mm、ピッチ4.0mmから6.0mm）の計11種類を使用した。また、伝熱面の寸法は25mm×25mmである。冷却管とサブヒータは、装置内の圧力を調整するために使用した。冷却管は冷却水が循環できるように恒温水槽から冷却水を供給して、流量は流量計によって制御した。また、作動液には純水を使用した。

純水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、低圧で沸騰を行い脱気した。封入量は作動液の液面が伝熱面に対し25mmの高さになるように調整した。実験は圧力15kPaを維持した状態で、セラミックヒータへの入熱量を段階的に増加させ、計測を行った。

本研究では、熱流束 q [W/m²]をヒータ熱量 Q [W]、伝熱面投影面積 A [m²]より式(1)として定義した。

$$q = \frac{Q}{A} \quad (1)$$

熱流束は温度差を ΔT [K]、伝熱面と熱電対までの距離を l [m]、熱伝導率を λ [W/m・K]とすると式(2)で計算できる。

$$q = \frac{\Delta T}{l} \lambda \quad (2)$$

これより伝熱面温度 T_{surf} [K]は、伝熱面に最も近い熱電対測定温度 T_1 [K]、熱流束 q [W/m²]、熱伝導率 λ [W/m・K]、伝熱面と熱電対までの距離 l [m]から式(3)で算出することができる。

$$T_{surf} = T_1 - \frac{q}{\lambda} l \quad (3)$$

過熱度 ΔT_{sat} は、伝熱面温度 T_{surf} と飽和温度 T_{sat} から、式(4)のように求めた。

$$\Delta T_{sat} = T_{surf} - T_{sat} \quad (4)$$

Heat Transfer Characteristics of Pool Boiling under Low Pressure Condition

－ Effect of Heat Transfer Surface Size －

Takahiro HORIKOSHI and Hitoshi MATSUSHIMA

熱伝達率 h [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$] は、伝熱面温度 T_{surf} [K] と過熱度 ΔT_{sat} から、式(5)のように求めた。

$$h = \frac{q}{\Delta T_{\text{sat}}} \quad (5)$$

熱伝達率の増加率 h_e は、平滑面の熱伝達率 h_s と、ピラミッド型やディンプル型伝熱面における熱伝達率 h_m から式(6)のように求めた。

$$h_e = \frac{h_m}{h_s} \quad (6)$$

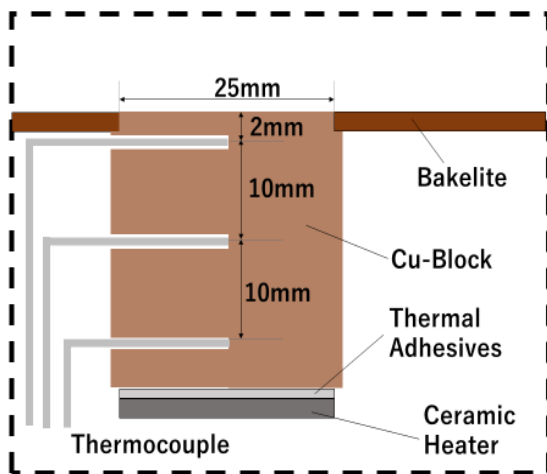
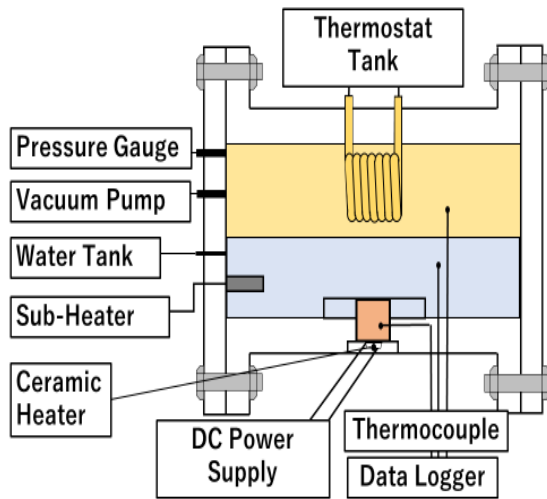


Fig.1 Experimental apparatus



(a)Pyramd
Pitch0.5



(b)Pyramid
Pitch1.0



(c)Pyramid
Pitch2.5



(d)Pyramid
Pitch5.0



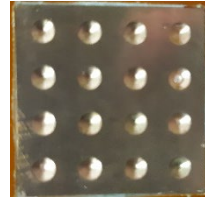
(e)Dimple $\Phi 2.0$
Pitch 6.0



(f)Dimple $\Phi 4.0$
Pitch6.0



(g)Dimple $\Phi 5.0$
Pitch6.0



(h)Dimple $\Phi 3.0$
Pitch6.0



(i)Dimple $\Phi 3.0$
Pitch5.0



(j)Dimple $\Phi 3.0$
Pitch4.0

Fig.2 Heat transfer surfaces

3. 結果および考察

3.1 ピラミッド型伝熱面における伝熱性能の比較

ピラミッド型伝熱面の沸騰曲線をFig. 3に示す。測定結果より、過熱度 $\Delta T_{\text{sat}}=3[\text{K}]$ 付近における熱流束は平滑面、ピラミッド型0.5mm、ピラミッド型5.0mm、ピラミッド型1.0mm、ピラミッド型2.5mmの順での大きくなっている。従来の10mm×10mmの伝熱面における実験ではピラミッド型2.5mmの熱伝達性能が最も良好であった。そして、今回の研究においてもピラミッド型2.5mmの熱伝達性能が最も良好であった。このことから、コンピュータのCPU等の冷却を想定した10mm～25mm角程度の伝熱面においては、伝熱面の寸法が最適な伝熱面形状に与える影響は少ないものと考えられる。

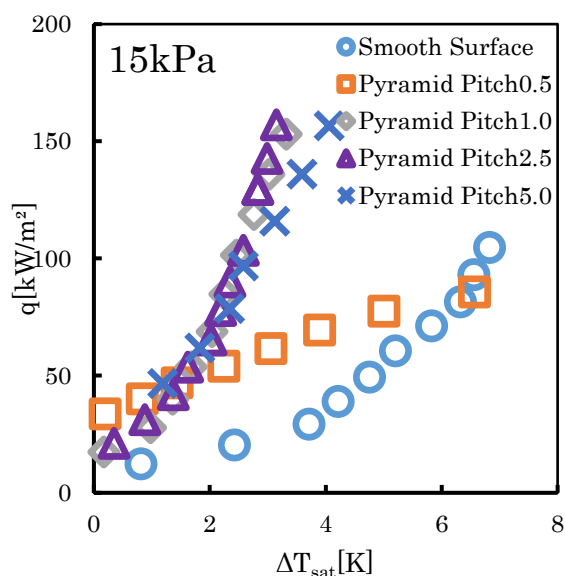


Fig.3 Boiling curve of Pyramid Types

3.2 デンプル型伝熱面における伝熱性能の比較

デンプル型伝熱面のデンプル径を変更した場合の沸騰曲線をFig. 4に、デンプル径3.0mmで統一し、ピッチを変更した場合の沸騰曲線をFig. 5に示す。

Fig. 4のデンプル径を変更した場合は、デンプル径2.0mmとデンプル径3.0mmの熱伝達性能が良好であった。このことは、前項においてピラミッド型2.5mmの熱伝達性能が最も良かったことに対応していると考えられる。 $q=100[\text{kW/m}^2]$ 付近における熱伝達率の増加率 h_e は、径2.0mmで1.19倍、径3.0mmで1.14倍であった。

Fig. 5のピッチを変更した場合、最もピッチの狭いデンプル型3.0mmピッチ4.0mmの熱伝達性能が良好であった。 $q=100[\text{kW/m}^2]$ 付近における熱伝達率の増加率 h_e は、ピッチ6.0mmでは1.14倍、ピッチ5.0mmでは1.44倍、ピッチ4.0mmでは1.47倍とピッチが狭くなるごとに沸騰促進されていることがわかる。

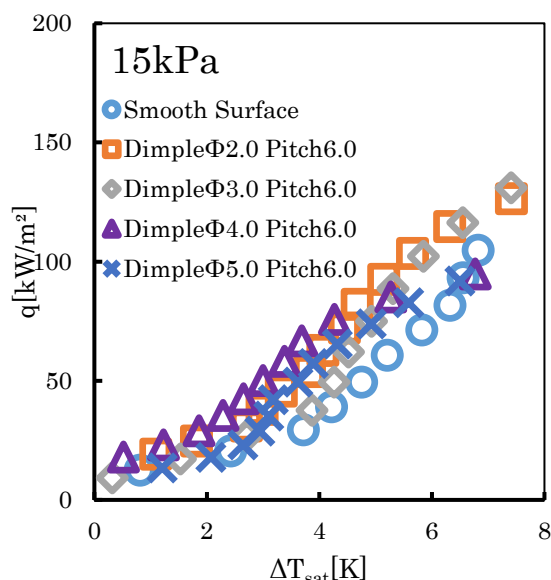


Fig.4 Boiling curve of Dimple Types
(Difference in dimple diameter)

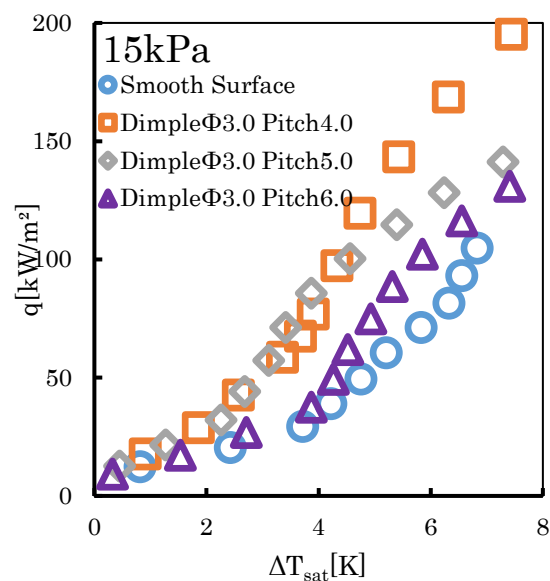


Fig.5 Boiling curve of Dimple Types
(Difference in dimple pitch)

3.3 ピラミッド型とディンプル型の伝熱面比較

それぞれで最も伝熱性能が高かった、ピラミッド型 2.5mm とディンプル型ピッチ 4.0mm に対する沸騰曲線を Fig. 6 に、熱伝達率の増加率のグラフを Fig. 7 に示す。Fig. 6 より、低圧下では本研究で計測したすべての過熱度範囲でピラミッド型伝熱面が優れていることがわかる。これは、ディンプル型はディンプル同士に間隔を開けて設置しているが、ピラミッド型 2.5mm は伝熱面全体にピラミッド加工を施しているため沸騰核の数が多く、沸騰促進されたものと考えられる。また、Fig. 7 のピラミッド型とディンプル型で熱伝達率の増加率 h_e を比較した場合、 $q=100[\text{kW/m}^2]$ 付近でピラミッド型 2.5mm はディンプル型ピッチ 4.0mm に対して 1.78 倍の性能となった。なお、ディンプル型伝熱面ではピッチを詰めることで改善が見込める可能性があると考えられる。

ピラミッド型 2.5mm は従来の 10mm 角の実験では熱伝達率の増加率 h_e は、同一条件の水位 25mm では $q=100[\text{kW/m}^2]$ において約 1.7 倍程度であると予想される。そして、今回の 25mm 角の実験では約 2.6 倍となった。このことから、伝熱面寸法の大型化によって、熱伝達性能は上昇する可能性がある。なお、現在、同一実験装置を用いた $10 \times 10\text{mm}$ の伝熱面の実験を計画中であり、今後比較検討を行う予定である。

4. 結言

コンピュータの CPU 等の高発熱素子を相変化により冷却することを想定した低圧プール沸騰冷却に関して実験的に検討した。特に、ピラミッド型とディンプル型の伝熱面における形状寸法効果に着目し実験を行い、以下の結果を得た。

(1) 伝熱面寸法を 10mm 角から 25mm 角へ大型化した場合も、最適形状はピラミッド型 2.5mm で変わらず、最適形状に対する寸法効果は見られなかった。ただし、伝熱性能自体は伝熱面を大型化することで増大する可能性がある。

(2) ディンプル型伝熱面において、最適なディンプルは径 2.0mm～3.0mm であった。

(3) ディンプル型伝熱面のピッチを変更した場合、ピッチを狭くすることでより大きい沸騰促進があった。

(4) ピラミッド型 2.5mm の熱伝達性能は $q=100[\text{kW/m}^2]$ 付近でディンプル型ピッチ 4.0mm の 1.78 倍であった。

5. 参考文献

(1) 松島, 斎藤, 低圧下でのプール沸騰における熱伝達特性, 日本伝熱学会論文集, 26-1, 2018, pp.39-50.

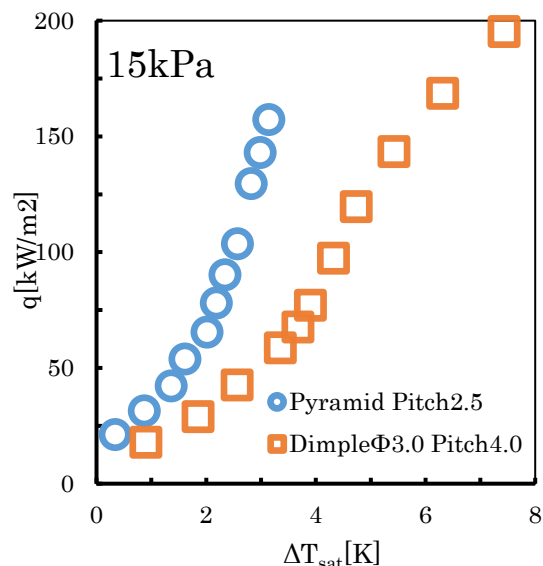


Fig.6 Comparison of heat transfer surfaces (Pyramid and Dimple Type)

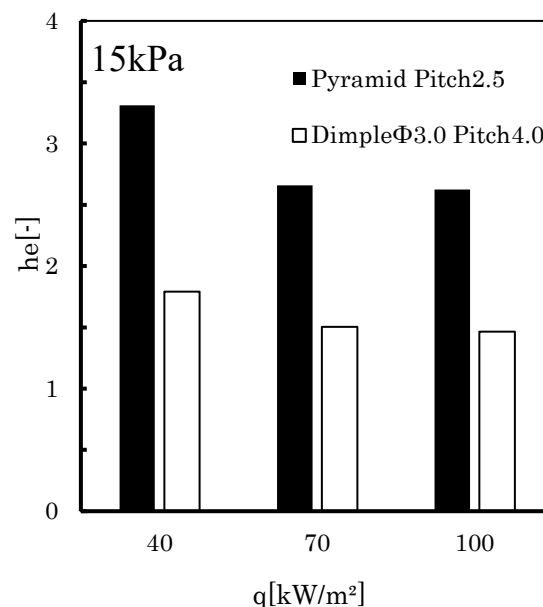


Fig.7 Enhancement of heat transfer coefficient from smooth surface