

トンネル構造を有する伝熱面のプール沸騰冷却

日大生産工(院) ○栗原 達也 日大生産工 松島 均
(株)日立製作所 藤本 貴行

1. まえがき

近年の電子機器の小型化、高性能化による発熱密度の上昇に伴い、従来の方法では冷却不足なりつつある。そこで次世代の冷却方法の一つとして相変化を用いた沸騰冷却が期待されている。この相変化を用いた熱輸送機器の代表例がサーモサイフォンである。一般的にサーモサイフォンには熱伝導率が高い銅が使用されているが、材料費が高いことや装置自体が重くなるため、さらなる軽量化、低コスト化のために銅に代わる材料が望まれている。そこで本研究では、軽量かつ熱伝導率が銅に近く比較的安価なアルミニウムに着目し⁽¹⁾、複数のトンネル型伝熱面での圧力を変化させた際の伝熱性能を調べた。また上記に加え、アルミニウム製伝熱面と一般的に用いられている銅製の伝熱面との伝熱性能の比較検討を実施した。

2. 実験装置及び実験方法

Fig.1に実験装置の概略図及びヒーターブロックの拡大図を示す。実験装置は主に密閉容器、発熱体として仮定した伝熱面及びヒーターブロック、コンデンサー、カートリッジヒーター、恒温水槽から構成されている。容器には透明のポリカーボネートを使用し、沸騰様相の観察を可能にした。側面には布ベークライトを用いた。容器内の圧力は、液相に浸かっている2本のカートリッジヒーターと上部に設置されているコンデンサーにより管理した。また、温度測定用のT型熱電対を液相に2本、気相に3本ずつ設置した。伝熱面はヒーターブロック上部の70mm角、板厚1.5mmの金属板の中心30mm角の部分で伝熱面とした。周囲への熱漏洩を防ぐために伝熱面の周りを布ベークライト板で覆い被せた。伝熱面が形成された金属板の下に伝熱面と同じ材質の30mm角の金属製ブロックと25mm角のセラミックヒーターを耐熱性に優れた熱伝導接着剤で接着し、3本のT型熱電対を5mm、10mm、5mmの間隔で金属製ブロックに挿入した。

Fig.2に今回使用した伝熱面の構造を示す。伝熱面の材質はアルミニウム(8種類)及び銅(2種類)である。トンネル型伝熱面は超精密切削加工により立ち上げた微細なフィンを上から押しつぶす事によりトンネル型の構造となっている。

Table 1に実験で使用した伝熱面の仕様を示す。今回製作したトンネル型伝熱面には、4つのパラメータで構成されており、溝幅(Wg)、フィン幅(Wf)、フィンピッチ(P)、フィン高さ(H)である。全て単位は μm である。Table 1の値は平均値であり、製作誤差は $\pm 20\mu\text{m} \sim 25\mu\text{m}$ 以内に収まっている。今回検討したアルミニウム製伝熱面はNo.1~7である。また銅製伝熱面はNo.8~9であり、No.1,5と同じ仕様である。No.2~3はNo.1を基準面とし、フィンピッチ、フィン高さをそれぞれ100 μm 増大したものである。また、最もフィン数が多いNo.1を更に細かくしたものがNo.4である。No.6~7はNo.1を基準面とし、フィン高さのみを100 μm 増減させたものである。3章では、これらの伝熱面を3つのグループに分けて検討を行った。

作動流体には、アルミニウム伝熱面との相性を考慮してフッ素系冷媒HFE7000を用いた。銅伝熱面での実験にも同様にフッ素系冷媒HFE7000を仕様した。プール沸騰実験における液面高さは伝熱面から20mmとし、圧力範囲はアルミニウム伝熱面に対しては絶対圧で0.10MPa(飽和温度約34.7℃)、0.14MPa(44.7℃)、0.18MPa(52.1℃)の3種類とした。銅伝熱面の実験に関しては、圧力0.10MPaのみ行った。

実験開始する上で、作動流体の封入前後に脱気を1分程度行い、その後セラミックヒーターで10Wずつ入熱し、入熱量70Wまで測定した。その際、前述した様に内部圧力をカートリッジヒーターとコンデンサーを用いて調整した。

本研究では、熱流束 $q[\text{kW/m}^2]$ をフーリエの法則を用いて次式により求めた。ここで、 $\Delta T[\text{K}]$ は金属製ブロックに挿入した2本の熱電対の温度差、 $\Delta x[\text{mm}]$ は熱電対の距離、 $k[\text{W/m}\cdot\text{K}]$ は熱伝導率である。

$$q = k \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (1)$$

過熱度 $\Delta T_{\text{sat}}[\text{K}]$ は伝熱面温度 $T_w[\text{K}]$ と作動流体の飽和温度 $T_s[\text{K}]$ から次式により算出した。なお、伝熱面温度は伝熱面下部に挿入した熱電対での温度をもとに(1)式から補正して求めた。

$$\Delta T_{\text{sat}} = T_w - T_s \quad (2)$$

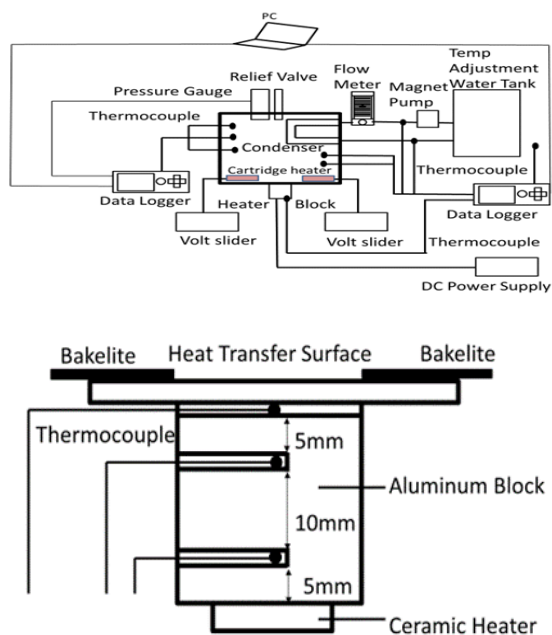


Fig.1 実験装置とヒーターブロック拡大図

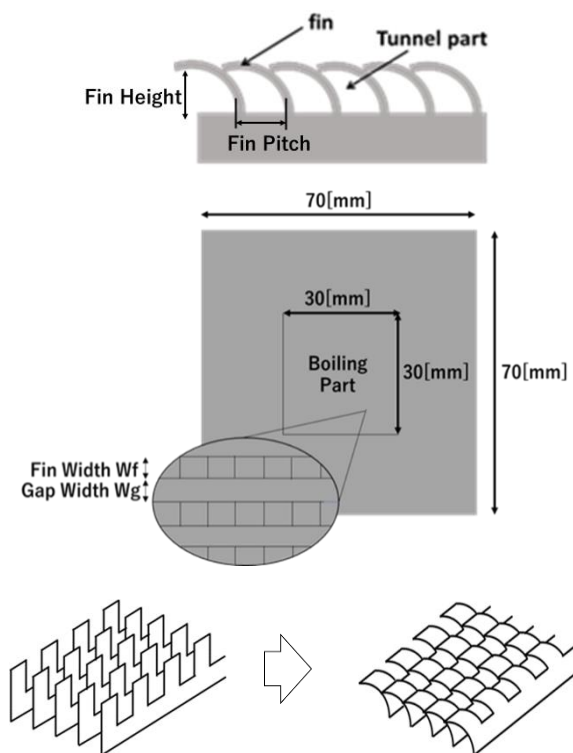


Fig.2 トンネル型伝熱面

Table 1 伝熱面仕様

Material	NO.	Gw	Wf	P	H
Al	1	200	200	200	350
	2	200	200	300	400
	3	200	200	500	600
	4	50	200	150	150
	5	200	200	400	500
	6	200	200	300	300
	7	200	200	300	500
Cu	8(=1)	200	200	200	350
	9(=5)	200	200	400	500

3. 実験結果及び考察

3.1 伝熱性能の比較

この章では、No.1~4と平滑面の伝熱性能を比較検討する。Table 2に比較した伝熱面の仕様を示す。

Fig.3(a)に圧力0.10MPaでの沸騰曲線を示す。この5種類の中でNo.2が最も伝熱性能が優れていた。 $q=80 \text{ kW/m}^2$ 付近でのNo.1の伝熱性能は平滑面の約9倍、No.1の約2倍となっている。No.2はNo.1よりも孔数が少ないが、フィンピッチを拡大する事で、気泡の離脱が容易となり、それに伴いトンネル内への液体の引き込みも促進したと思われる。また最も孔数が多いNo.4は、平滑面との伝熱性能の差が小さかった。これは、孔数を増やすことにより沸騰核が増加するが、他の伝熱面よりフィンピッチ、フィン高さが大幅に小さい。フィンピッチが狭まる事で気泡の離脱が阻害され、フィン高さが低くなる事でトンネル内の面積が小さくなり液体の引き込み量も少なくなる。これらの要因から伝熱性能が大幅に劣化した可能性がある。そのため、孔数には適正な範囲があると考えられる。

Fig.3(b)に圧力 0.14MPa での沸騰曲線を示す。圧力 0.10MPa 時と変わらず、No.2 が最も伝熱性能が優れていた。特に $q=80 \text{ kW/m}^2$ 付近での No.2 の伝熱性能は平滑面の約 11 倍、No.1 の約 2 倍となっている。また No.1 と No.3 の伝熱性能は $q=45 \text{ kW/m}^2$ 付近を境に逆転している。低熱流束領域においては孔数が多い No.1 の方が、活性キャビティが多く伝熱性能が促進されるが、高熱流束領域ではフィンピッチが大きい No.3 での気泡離脱の影響の方が上回るためと考えられる。

Fig3(c)に圧力 0.18MPa 時の沸騰曲線を示す。熱流束 $q=80 \text{ kW/m}^2$ 付近における No.2 の伝熱性能は平滑面の約 7 倍、No.1 の約 2 倍となった。また No.2 は、圧力 0.14MPa において、0.18MPa の場合よりも伝熱性能が約 1.5 倍高く、No.1 は

約 1.2 倍高かった。なお、No.1 の圧力 0.18MPa 時では、伝熱性能が不安定な場合が多々見られたのに対し、No.2 では、その様な傾向は見られなかった。以上から No.2 は、トンネル型沸騰伝熱面として最適な形状の 1 つと考えられる。

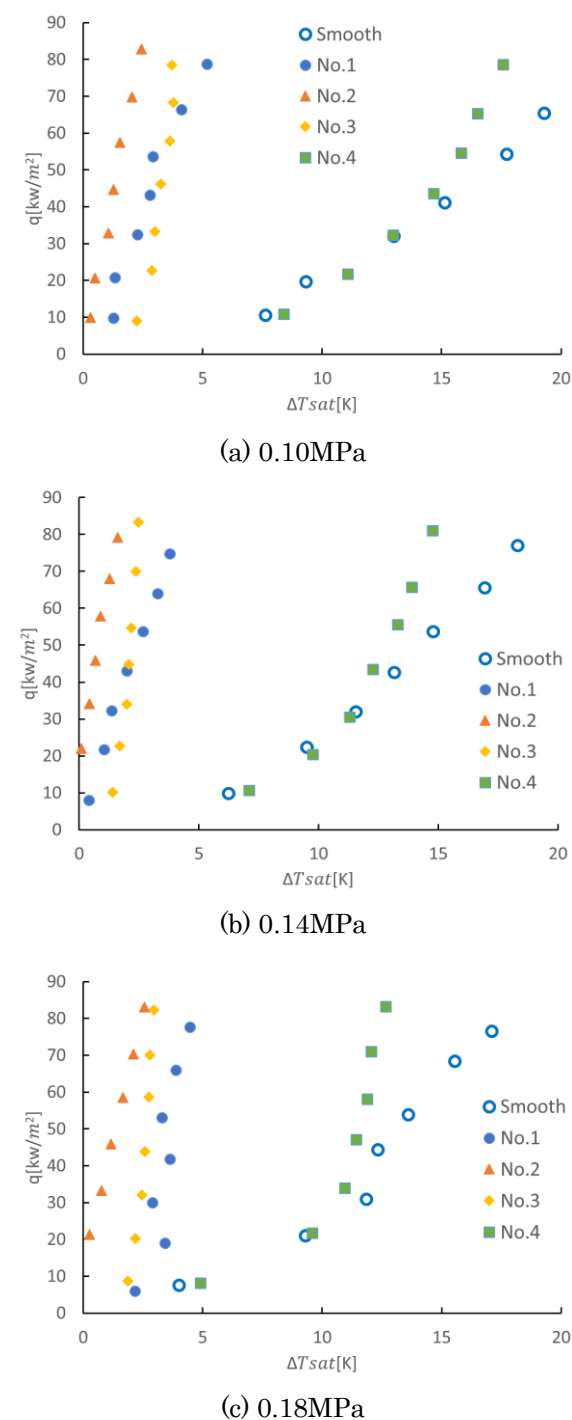


Fig.3 沸騰曲線(3.1)

Table 2 伝熱面仕様(3.1)

Material	NO.	Gw	Wf	P	H
Al	1	200	200	200	350
	2	200	200	300	400
	3	200	200	500	600
	4	50	200	150	150

3.2 フィン高さのみの影響

この章では、フィン高さのみを変化させた場合の影響について検討を行った。Table 3に比較した伝熱面の仕様を示す。この実験では、No.2(H:400 μ m)を基準面とし、No.6は基準よりも100 μ m低くした場合、No.7は基準よりも100 μ m高くした寸法となっている。

Fig.4に圧力0.14MPa、 $q=10$ kW/m²での沸騰様相を示す。No.2とNo.6では共に安定的な発泡が見られるが、No.7では発生する気泡数が少ないことが目視で確認できた。

Fig.5に圧力0.14MPaの沸騰曲線を示す。3種の伝熱性能を比較してみると、No.7の伝熱性能が非常に低下している事が分かった。この傾向は圧力0.10MPa、0.18MPa時でも同様だった。熱流束 $q=80$ kW/m²付近では、No.2とNo.7を比較してみると、伝熱性能は約5倍となった。フィン高さを高くすることは、気泡の離脱を容易にする反面、フィン全体にまで熱が効率的に伝わりづらく、気泡の成長が遅くなると考えられる。一方、フィン高さが低い場合には、フィン全体に多く熱が伝わり、トンネル内面での液膜蒸発⁽²⁾が促進されたものと考えられる。

以上より、フィン高さには適切な寸法があり、高くしすぎることは伝熱性能の低下につながる可能性がある。

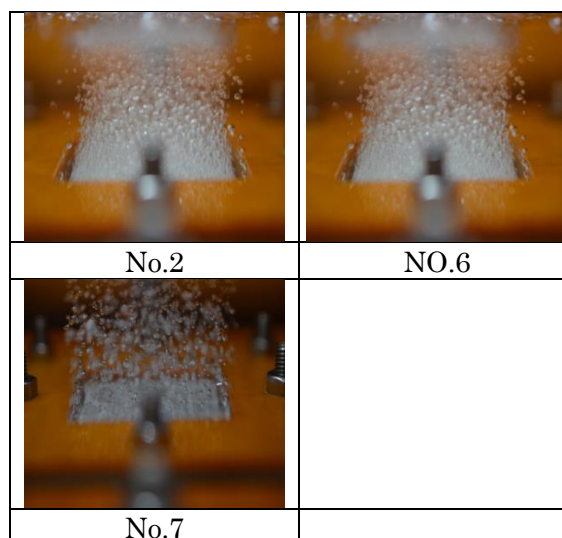


Fig.4 沸騰様相(0.14MPa 10kW/m²)

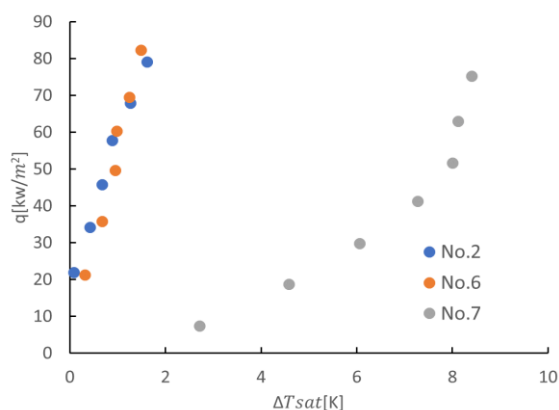


Fig.5 沸騰曲線(3.2)

Table 3 伝熱面仕様(3.2)

Material	NO.	Gw	Wf	P	H
Al	2	200	200	300	400
	6	200	200	300	600
	7	200	200	300	500

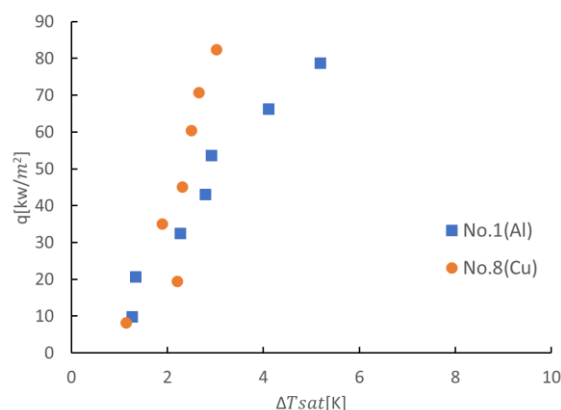
3.3 材質による影響

ここでは、アルミ製の伝熱面(No.1,5)、それと同一の仕様を有する銅製の伝熱面(No.8~9)を用いた実験を行った。Table 4に比較した伝熱面の仕様を示す。

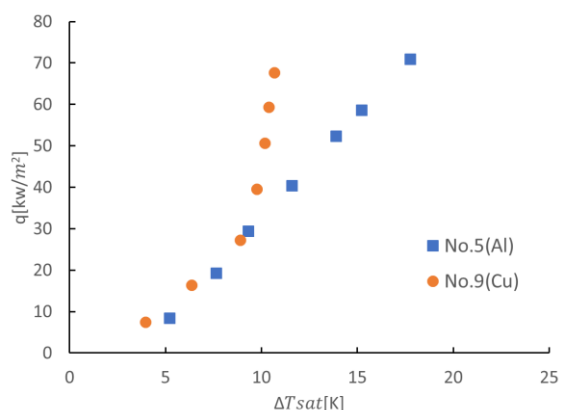
Fig.6(a),(b)に圧力0.10MPa時の沸騰曲線を示す。2種とも銅製とアルミ製で比較した場合、伝熱性能は銅製の伝熱面の方が優れている事が確認できた。低熱流束域では両面の間で大きな差はみられないが、高熱流束域では顕著な差が見られた。特に $q=80 \text{ kW/m}^2$ 付近では、No.1,8では約1.7倍、No.5,9では約1.6倍であった。これは熱伝導率が銅の方が高いため、伝熱面状のフィン全体に熱が多く伝わることによるものと考えられる。その結果、銅製の伝熱面でフィン全体に熱が伝わり易くなる事は、フィン内にある気泡への伝熱量を増やすと考えられる。この様なフィン効率の差により、銅製の伝熱面ではアルミ製の伝熱面よりも多量の熱が気泡に伝達されて、気泡の発生と成長を促進しているものと考えられる。但し、他の伝熱面形状の場合との性能を比べると材質の影響は小さいと考えられる。

Table 4 伝熱面仕様(3.3)

Material	NO.	Gw	Wf	P	H
Al	1	200	200	200	350
	5	200	200	400	500
Cu	8(=1)	200	200	300	500
	9(=5)	200	200	400	500



(a) 沸騰曲線(No.1 and No.8)



(b) 沸騰曲線(No.5 and No.9)

Fig.6 沸騰曲線(3.3)

4 結言

本研究では、平滑面及び7種類のトンネル型伝熱面(アルミ製)、2種類のトンネル型伝熱面(銅製)を用いた際のプール沸騰伝熱特性について実験的に検討を行い、以下の結果が得られた。

- 1) No.2が最も伝熱性能が優れていた。特に圧力0.14MPa時での、 $q=80 \text{ kW/m}^2$ 付近におけるNo.2の伝熱性能は平滑面の約11倍、基準面であるNo.4の約2倍だった。
- 2) フィン高さを高くしすぎた場合、伝熱性能は大幅に低下した。
- 3) 銅製とアルミ製の伝熱性能は、銅製の方が優れていた。しかし、伝熱性能への影響は小さい。

5 参考文献

- 1) 飯島, 他3名, “アルミニウム伝熱面を用いた高発熱素子のプール沸騰冷却”, 熱工学コンファレンス2019講演論文集, (2019), G111
- 2) 藤田恭伸, “沸騰熱伝達の促進と機構”, 伝熱研究, Vol.36, No.141, (1997), pp.27-39