高発熱素子のプール沸騰冷却に関する研究

日大生産工 〇三枝 正裕 日大生産工(院) 松島 均

1. 緒言

昨今の電子機器の性能向上には目覚ましい ものがある.しかしそれに伴い,CPU等の電 子部品類の小型化,高性能化により,消費電力 が増え,発熱が増大し,従来の冷却方法では発 熱に対して冷却不足になっている.近年,次世 代冷却方法として沸騰に代表される相変化を 用いた冷却方法が注目されている¹⁾.沸騰にお ける熱伝達を向上させる手段として,液体中に 少量の界面活性剤を添加することが有効と考 えられる界面活性剤は,界面に集まりやすく, 少量で界面張力を小さくする作用を持つ物質 であり,冷却媒体である水に界面活性剤を混入 させると,沸騰に対する熱伝達率を向上させる 効果があるとされている²⁾³.

本研究では、コンピューターの CPU などの 電子部品を模擬した 10mm 四方の発熱体に対 するプール沸騰冷却において、発熱体の表面形 状を変化させた際の伝熱性能の変化に着目し、 加えて界面活性剤を添加した際の冷却効果を 実験的に検討した.

2. 実験方法

図 1 に実験装置の全体図と発熱体部分の拡 大図を示す.実験装置は、底面にダミーCPU を模擬した 10mm×10mm の発熱体を有する テストセクションと恒温水槽からなる. 発熱体 の構造は,厚さ 2mm, 3mm, 5mm の銅ブロ ックの間に線径0.076mmのT型熱電対を挟み 半田付けしたものである. 銅ブロックとセラミ ックヒータの間は熱伝導性接着剤で固定した. 実験においては、2つの熱電対からの値を基に 伝熱面表面温度Twを算出した.なお、実験で はヒータ発熱量は後述式の(3)式で定義され る加熱度 ΔT_{sat} が1~20Kになるよう調整した. また,発熱体は表面を加工していない平滑面 型、ピラミッド型(底辺 0.5mm, 高さ 0.3mm), 格子型 0.3mm (溝の幅と深さはそれぞれ 0.3mm) 格子型 0.5mm (溝の幅と深さはそれ ぞれ 0.3mm, 0.5mm)を使用した. (図 2) ま た,冷却用流体には純水とミリスチン酸ナトリ ウムを攪拌させた水溶液を用いた.界面活性剤

水溶液は実験開始前に超音波水槽を用いて 1 ~2 時間程度攪拌させてから使用した. なお, 実験に用いた水溶液中の界面活性剤の濃度は 0.1wt%とした.冷却用媒体は恒温水槽により サブクール度 ΔT_{sub} が一定になるように調整 した.実験に用いたサブクール度 ΔT_{sub} は 20K, 40K とした.

本実験における結果は、熱流束 q、熱伝達率 h、および加熱度 ΔT_{sat} で評価する、熱流束を q は、ヒータへの入熱量を Q、伝熱面の面積を A として次式のように定義した.

$$q=Q/A$$
 (1

また, 過熱度 ΔT_{sat} は水の飽和温度 T_w として 次式のように定義した.

$$\Delta T_{sat} = T_w - T_{sat}$$
 (2)
サブクール度 ΔT_{sub} は,作動流体の温度 T_{wt} 次のように定義した.

$$\Delta T_{sub} = T_{sat} - T_{wt} \tag{3}$$



Fig.1 Experimental apparatus

Study on Pool Boiling Cooling of High Heat Generating Devices

Masahiro SAEGUSA and Hitoshi MATSUSHIMA



Fig.2 Heat transfer surface

Table.1 Experimental parameters

Working Fluid	Pure Water Sodium myristate
Concentration	$0.1 { m wt\%}$
$\Delta T_{sub}[K]$	40, 20
Q[W]	$0 \sim 70$

3. 実験結果及び考察

それぞれの実験条件において, 平滑面型及び 3 種類の表面形状(ピラミッド型,格子型 0.3mm、格子型0.5mm)と表面形状を変化さ せた伝熱性能を測定した.予備実験により,純 水に対する今回の実験結果と標準大気圧にお ける水の飽和沸騰曲線⁴とを比較した結果,両 者はほぼ同様な結果となり,今回の測定が妥当 であることを確認した.

3.1 純水の場合

純水における各表面形状に対する熱流束 q の測定結果を図 3(a),(b)に示す.ピラミッド 型と格子型 0.3mm では,平滑面型と比べて熱 流束が向上する.特にピラミッド型は低過熱度 領域から性能向上効果が得られることが分か る.これは目視による沸騰時の様子より,ピラ ミッド型,格子型 0.3mm 共に伝熱面表面形状 による窪みが多く,沸騰核が増え、伝熱面表面 における気泡の発生が促進されたためと考え







Fig. 3 Boiling curve of pure water

られる.特にピラミッド型では、 $\Delta T_{sat} = 1$ Kから細かい気泡が発生しており、その為、熱流束が低過熱度領域から向上したのだと思われる. また、平滑面型と格子型 0.5mm を比較すると両者の間でほとんど差異はない.

図 4(a), (b)はΔ*T_{sub}*=20K, 40K の純水におけ るそれぞれの条件下での熱流束 qs と純水を冷 却媒体とした平滑面型の熱流束 qw との増加 率を示す.

図 4(a), (b)より, 平滑面型と比較した際ど ちらのサブクール度においても, ピラミッド型 は低過熱度から熱流束が向上しており, ΔT_{sat} = 4K 以上となる時,熱流束が2倍以上 増大することがわかる. 格子型 0.3mm では, 低過熱度領域では純水とほぼ同様であるが, $\Delta T_{sat} = 5 K を 境 と し て 平滑 面 型 よ り も 熱流 束$ の性能が向上することが確認できる.目視によ る沸騰時の様子より,格子型 0.3mm では $\Delta T_{sat} = 5 K$ 付近で気泡の発生量が増えていた 為であると思われる.一方,格子型 0.5mm に おいては, 平滑面とほぼ同様で熱流束の向上効 果が見られなかった.これは目視の結果より, ピラミッド型や格子型 0.3mm と比べて,沸騰 時, 伝熱面表面上の気泡同士が合体し, 気泡径 が大きくなっていたためであると思われる.ま た、どちらの格子型とも低過熱度領域では気泡 離脱があまり行われておらずそのため,低過熱 度域では熱流束の向上が見られなかったのだ と思われる.







3.2 ミリスチン酸ナトリウムを添加した場合 冷却媒体をミリスチン酸ナトリウム水溶液 とした際の各伝熱面の表面形状における熱流 束 q と過熱度 Δ*T_{sat}*の関係を図 5(a), (b)に示す.

図 5(a)より、 $\Delta T_{sub} = 40$ Kにおいてピラミッ ド型は、冷却媒体を純水とした時と同様に、低 過熱度領域から平滑面型より、熱流束の向上効 果が確認できる.

一方、図 5(b)より、 $\Delta T_{sub} = 20$ Kにおいて、界 面活性剤を使用した際に過熱度 $\Delta T_{sat} = 1 \sim 4$ K の範囲では平滑面型と比較して差異が見られ ない、もしくは低い熱流束となっているが、ピ ラミッド型、格子型 0.3mm では過熱度 $\Delta T_{sat} = 5$ Kを境に熱流束の向上効果が認められ た.特に格子型 0.3mm での熱流束が著しく増 大した.

図 5(a), (b)において,格子型 0.3mm では $\Delta T_{sat} = 5$ K以上から平滑面型よりも熱流束が 向上する.これは目視による沸騰時の様子より, こちらも冷却媒体が純水の時と同様に $\Delta T_{sat} = 5$ K付近で気泡の発生量が増えており, 伝熱面のほぼ全域において高頻度で細かい気 泡が発生しており、離脱後の気泡径も非常に小 さくなっていた.また,格子型 0.5mm では, どちらのサブクール度とも純水とほぼ同様と なる熱流束となった.



$$(a)\Delta T_{sub} = 40K$$





Fig. 5 Comparison of the heat flux of each heating surface

図 6(a), (b) は ΔT_{sub} =20K, 40K のミリスチン酸ナトリウム水溶液における,それぞれの条件下での熱流束 qs と純水を冷却媒体とした平滑面型の熱流束 qw との増加率を示す.

図 6(a)より、 ピラミッド型は冷却媒体を純水 とした時と同様に低過熱度領域から熱流束が 向上しており、純水を冷却媒体とした平滑面型 と比較し、最大2.5倍向上することが確認でき る. 格子型 0.3mm では低過熱度域では純水と の差異はあまり見られず過熱度 $\Delta T_{sat} = 5 K$ 以 上から伝熱性能が向上していく.格子型 0.5mm では低過熱度域では純水+平滑面型と差異は無 く, 過熱度 ΔT_{sat} = 3~4Kを境にミリスチン酸 を加えた平滑面型とほぼ同様の熱流束をとる. 図 6(b)より, ピラミッド型はΔT_{sub}=40K の際 と同様に低過熱度領域から熱流束が向上して おり、純水平滑面型に比べ最大2.5倍向上する. 格子型 0.3mm では、低過熱度領域では、熱流 束は純水を冷却媒体とした平滑面型とほぼ同 様であるが、 $\Delta T_{sat} = 5 \sim 6 K \epsilon$ 境に熱流束の性能向上が著しくなることがわかる. $\Delta T_{sat} = 6 K$ 以 上で, ピラミッド型と同様に最大約 2.5 倍もの 熱流束の性能向上が見られる.

図 6(a), (b)より格子型 0.5mm はミリスチン 酸を冷却媒体とした平滑面型とほぼ同様の熱 流速をとっており, 伝熱面表面形状の変化によ る効果は確認できなかった.

ミリスチン酸ナトリウム濃度 0.1wt%を加え





Fig.6 Relationship of each surface figure to smooth surface in sodium myristate solution

た場合, どの伝熱面表面形状においても 1.5~2.5 倍 の伝熱性能の向上が見られた. こ れはミリスチン酸ナトリウムの働きにより,早 期に核沸騰へ遷移させることができたと考え られ, 伝熱面表面形状の変化と組み合わせるこ とで熱流束を向上させる相乗効果が得られる ことが分かる. また, ピラミッド型においては 沸騰の初期時点から伝熱性能の向上が得られ ている.

4. 結言

コンピューターの CPU 等の微小な伝熱面を有 する高発熱素子を想定した発熱体を,サブクー ル条件下において,伝熱面の表面形状を変化さ せ,界面活性剤水溶液中でプール沸騰冷却させ た場合の伝熱性能に対する各種因子の影響を 実験的に検討した.

(1) 3種類の表面形状のうち、ピラミッド型ではどちらのサブクール度,冷却媒体においても、熱流束の性能向上が確認できた. 一方格子型については格子の大きさにより伝熱の性能が分かれた.低過熱度領域において、0.3mmは熱流束の性能向上効果は見られなかったが、高加熱度領域では向上効果が見られた.格子型 0.5mmでは、低過熱度領域では平滑面型以下の熱流束となり、高加熱度領域では平滑面型と同等 の熱流束となった.

- (2) 冷却媒体を純水とし、伝熱面をピラミッド型、格子型 0.3mm、格子型 0.5mm と変化させた場合、ピラミッド型、格子型 0.3mm では熱流束が向上した.特にピラミッド型は低過熱度領域から熱流束の性能向上効果が見られ、平滑面と比べて最大約2倍の性能向上となった.一方、格子型 0.5mm においては平滑面型との差異はほぼなく、伝熱面の表面形状変化に対する影響は確認できなかった.
- 冷却媒体にミリスチン酸ナトリウム水溶 (3) 液を用いた場合, ピラミッド型と格子型で は伝熱面表面変化に加え,界面活性剤によ る発砲促進効果により,熱流束が純水の時 と比較しさらに向上した.純水を用いた場 合と同様にピラミッド型は低過熱度領域 から熱流束が向上し,純水を冷却媒体とし た平滑面型と比べ、熱流束が最大約2.5倍 増大した.格子型 0.3mm では低過熱度域 では純水を冷却媒体とした平滑面型とほ ぼ同等か,それ以下の熱流束をとっている. 一方, ΔT_{sat} = 3~4K以上では平滑面型より も熱流束が大きく向上する.特に ΔT_{sub} = 20Kでは,著しい熱流束の向上が 見られ, ピラミッド型と同様に熱流束が最 大約 2.5 倍増大した. 格子型 0.5mm では 低熱流東域では平滑面型以下であるが,高 加熱度領域ではほぼ平滑面型と同様の熱 流束をとる.
- 5. 参考文献
- 中山恒, 伝熱機器 50 年の進展, 伝熱, 51 巻 214 号 (2012.1), 30.
- 小佐野佑介,高発熱素子の浸水沸騰冷却に 関する基礎研究,第 49 回伝熱シンポジウム,(2012.6),487.
- 3) 井上利明ら,アンモニア/水混合媒体のプー ル沸騰熱伝達の促進,日本機械学会論文集 76 巻 762 号, B 編 (2010.2)
- Incropera, F. P., et al, Introduction to Heat Transfer(5thEd), John Wiley&Sons, (2007), 581.