

高発熱素子のプール沸騰冷却に関する研究

日大生産工 ○小佐野 佑介 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等の電子部品類の消費電力が増え、その発熱が大きな問題になっている。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), 2)}。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ことが有効と考えられるが、実験例は非常に少ない。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³⁾。

本研究では、コンピュータの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、界面活性剤を添加した際の冷却効果に着目し、混入させる界面活性剤の種類や濃度を変えた際の伝熱性能の変化を実験的に検討した。

2. 実験方法

Fig.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、2mm, 3mm, 5mm 厚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 T_w 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1~30Kになるよう調整した。

また、界面活性剤を添加させた冷却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。なお、実験に用いたサブクール度 ΔT_{sub} は10K, 20K, 40Kとした。

冷却用流体には純水、ミリスチン酸ナ

トリウム、オレイン酸カリウム、ステアリン酸カリウムをそれぞれ攪拌させた界面活性剤を用いた。界面活性剤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使用した。なお、実験に用いた界面活性剤の濃度0.0001wt%, 0.001wt%, 0.1wt%, 1.0wt%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 、ヒーターへの入熱量を Q 、伝熱面の面積を A 、表面温度を T_w 、として次式のように定義した。

$$q=Q/A \quad (1)$$

熱伝達率 h は過熱度 ΔT_{sat} を用いて次式で定義した。

$$h=q/\Delta T_{sat} \quad (2)$$

また、過熱度 ΔT_{sat} は水の飽和温度 T_{sat} として次式のように定義した。

$$\Delta T_{sat}=T_w-T_{sat} \quad (3)$$

サブクール度 ΔT_{sub} は次のように定義した。

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

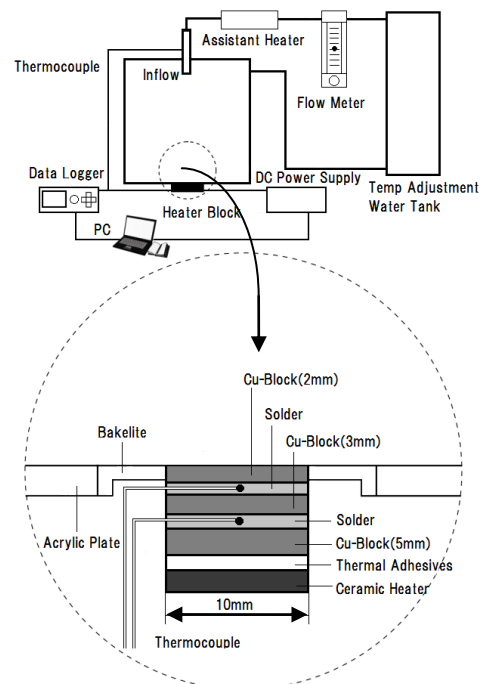


Fig.1 Experimental apparatus

Table.1 Experimental parameters

Working Fluid	Pure Water Sodium myristate Potassium stearate Potassium oleate
Concentration	0.0001wt% 0.001wt% 0.1wt% 1.0wt%
ΔT_{sub} [K]	40, 20, 10
Q[W]	30~90

3. 実験結果及び考察

それぞれの実験条件において、純水及び3種類の界面活性剤(ミリスチン酸ナトリウム、オレイン酸カリウム、ステアリン酸カリウム)の濃度を変化させた際の伝熱性能を測定した。

3.1 純水の場合

プール沸騰であることを考慮して、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沸騰曲線⁴⁾とを比較してみると Fig.2 に示すようになる。両者の傾向は、オーダー的にほぼ一致しており、今回の測定は妥当なものであると考えられる。なおサブクール温度 ΔT_{sub} が大きくなるとともに沸騰開始点付近の熱流束 q が増大することが知られている⁴⁾。

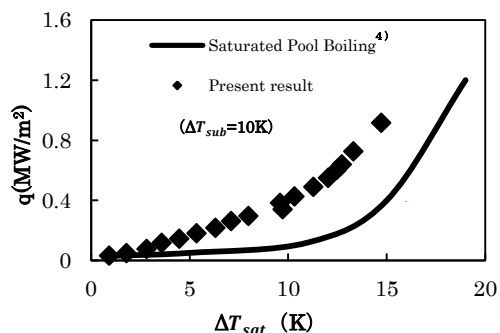


Fig. 2 Boiling curve of pure water

3.2 界面活性剤を添加した場合

界面活性剤を添加した際の熱流束 q と過熱度 ΔT_{sat} の関係を Fig.3 に示す。界面活性剤を使用した際に3種類すべてにおいて純水よりも熱流束 q が向上することがわかる。

過熱度 ΔT_{sat} が 6K 付近で純水 ($2.21 \times 10^5 \text{ W/m}^2$) と比較すると、ミリスチン酸ナトリウムの熱流束 q は $6.93 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ 、オレイン酸カリウムの

熱流束 q は $4.67 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ 、ステアリン酸カリウムの熱流束 q は $4.96 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ となり、特にミリスチン酸ナトリウムの熱流束 q の増大が著しく、純水の約4倍である。

これは目視による沸騰時の様子より、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られる。沸騰時の様子を Fig.4 に示す。これはミリスチン酸ナトリウムの 0.1wt% の場合であり気泡形状が微細化していることが確認できる。これにより、発泡性が促されて熱輸送性が向上したことが想像される。

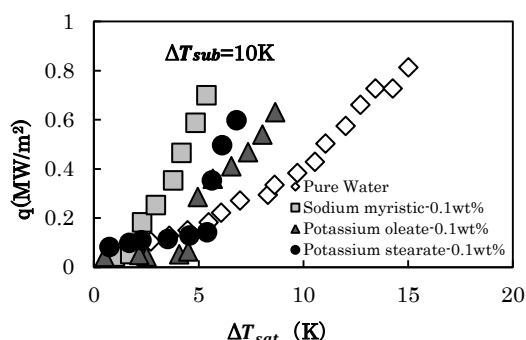


Fig. 3 Comparison of the heat flux between pure water and surfactant solutions

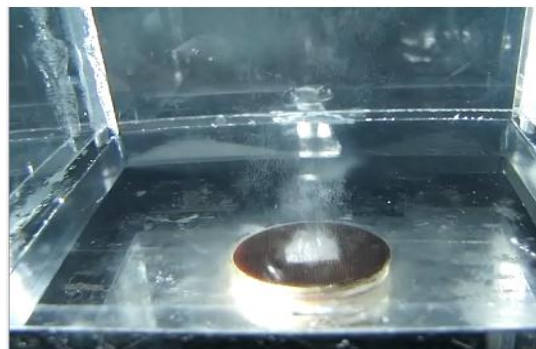


Fig.4 Heat transfer surface in the case of using sodium myristate

Fig.5 はサブクール温度 ΔT_{sub} が 10K 時のミリスチン酸ナトリウムでの熱流束 q_s と純水の熱流束 q_w との比率である。Fig.5 より総じて純水に比べて2倍以上の伝熱性能が得られていることがわかる。また、特に 0.01~0.1wt%位の範囲における性能向上が著しい。すなわち、濃度 0.1wt%時では、界面活性剤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る。また 0.01wt%時には沸騰の初期時点から伝熱性能の向上が得られている。

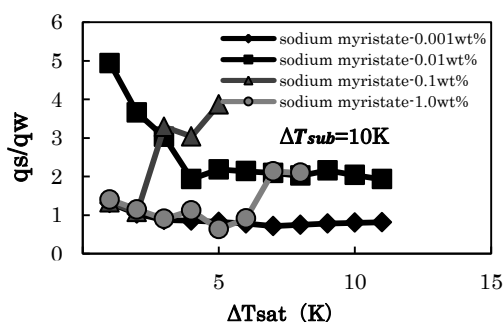


Fig.5 Relationship of pure water and surfactant

Fig.6 は Fig.3 で最も効果的だったミリスチン酸ナトリウムに着目し、過熱度による熱流束 q の変化を見たものである。Fig.6 より濃度が、0.01wt%, 0.1wt%, 1.0wt% の時に純水より伝熱性能が向上することが確認できた。なお詳細に見ると濃度が 0.01wt% ~ 0.1wt% で最も良好であり、1.0wt% まで濃度をあげると熱流束 q が減少し始める。

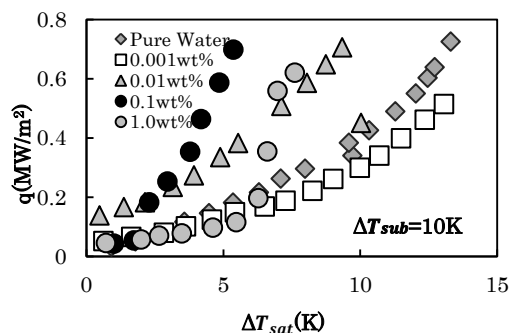


Fig.6 Variation of the heat flux with concentration of sodium myristate

次に上述の結果を式 (2) で定義される熱伝達率 h に変換したものを Fig.7 に示す。0.01wt% と 0.1wt% の時過熱度 ΔT_{sat} が 5K あたりで比較すると界面活性剤は純水よりも熱伝達率が大幅に高く、大きな伝熱促進効果が得られたと言える。一方濃度が高すぎたり低すぎたりした場合には純水との差が見られなかった。以上のことから熱伝達率 h を向上させるためには 0.01wt% から 0.1wt% の界面活性剤の添加量が最適であることがわかる。

Fig.8 は 3 種類の界面活性剤の濃度別の伝熱性能に着目したものである。Fig.8 はサブクール温度 ΔT_{sub} が 10K の

場合を示したものであり、熱流束 q が最大となる濃度が界面活性剤の種類により大きく異なることがわかる。なお、このピーク位置の濃度は臨界ミセル濃度付近に近いことが知られている⁵⁾。Fig.9 は 3 種類の界面活性剤の中で最も性能が良いミリスチン酸ナトリウムの濃度に対する伝熱性能の変化を示したものである。ミリスチン酸ナトリウムはいずれのサブクール温度 ΔT_{sub} においても最高性能を示す濃度は 0.1wt% であり、サブクール濃度によらず一定の傾向を示している。

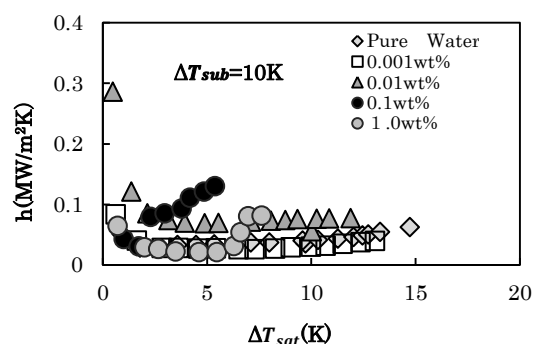


Fig.7 Variation of the heat flux with concentration of sodium myristate

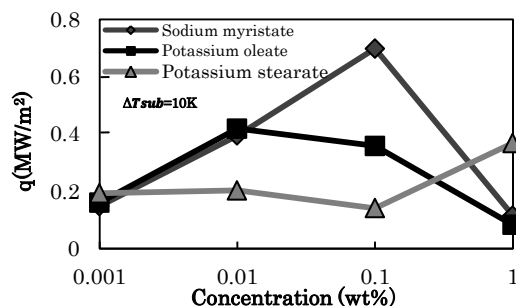


Fig.8 Performance curve of the surfactant

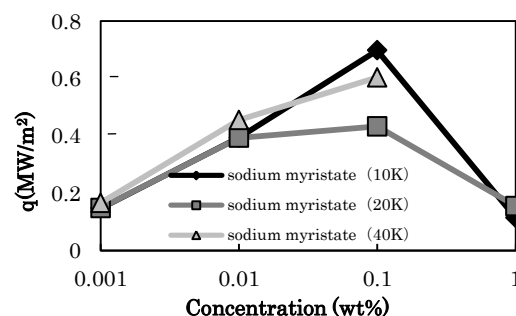


Fig.9 Relationship of temperature and concentration of sodium myristate

一方, Fig.10 のオレイン酸カリウムでは最高性能を示す濃度がサブクール温度 ΔT_{sub} によって異なる傾向を示した. すなわちサブクール温度 ΔT_{sub} が上昇するに従って, 熱流束 q が最大となる濃度が増大する傾向が見られた. これは界面活性剤の溶解温度と臨界ミセル濃度が関係あると考えられ, 水温の変化に伴いピーク濃度が変化したことが伝熱性能に影響を与えたと考えられる.

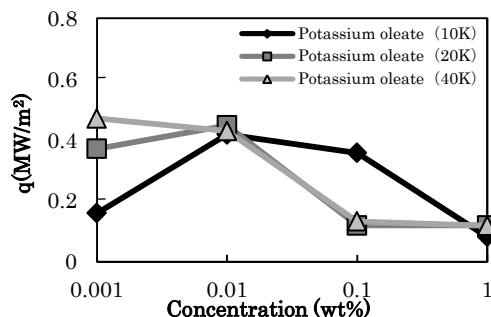


Fig.10 Relationship of temperature and concentration of potassium oleate

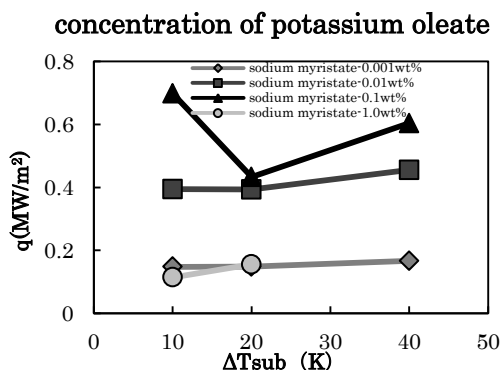


Fig.11 Relationship of subcooled temperature and concentration of sodium myristate

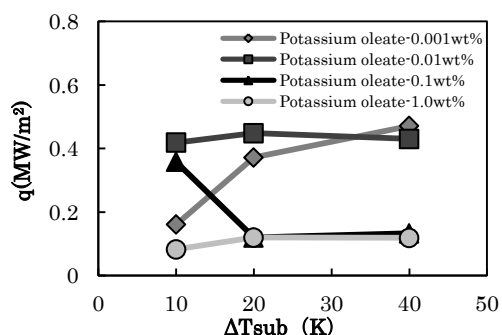


Fig.12 Relationship of subcooled temperature and concentration of potassium oleate

Fig.11 は Fig.9 の結果をサブクール温度 ΔT_{sub} に対して表示し直したものである. Fig.11 よりミリスチン酸ナトリウムは温度にあまり依存することなく比較的安定的に効果を発揮できることがわかる. 同様に Fig.12 も Fig.10 の結果をサブクール温度 ΔT_{sub} に対して表示し直したものであるがオレイン酸ナトリウムではサブクール温度 ΔT_{sub} に対する伝熱性能の変化が濃度により大きく異なることがわかる.

4. 結言

CPU を想定した発熱体に対する沸騰冷却において, 界面活性剤を添加した際の冷却性能に対する影響を実験的に検討した.

(1) 界面活性剤を冷却媒体として用いた場合, ミリスチン酸ナトリウムでの熱伝達の向上が著しく, 濃度 0.1wt%において純水の場合の約 4 倍となった. 一方で濃度 0.01wt%では最大で純水の場合の約 5 倍となった.

(2) 界面活性剤を用いた場合サブクール温度 ΔT_{sub} によって伝熱性能が変化した. ミリスチン酸ナトリウムはサブクール温度 ΔT_{sub} にあまり依存せずほぼ安定的に効果を発揮できる傾向にある. 一方でオレイン酸カリウムはサブクール温度 T_{sub} に依存し不安定な状況を起こした. またオレイン酸カリウムではサブクール温度 ΔT_{sub} に対する伝熱性能の変化の傾向が濃度によって大きく異なった.

5. 参考文献

- 1) 中山恒, 伝熱機器 50 年の進展, 伝熱, 51 巻 214 号 (2012.1), 30.
- 2) 石田勤, 強制対流・沸騰場での水噴流冷却におけるナノ粒子混入の影響, 第 43 回日本大学生産工学部学術講演会機械部会概要集, (2010.12), 63.
- 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)
- 4) Incropera, F. P., et al, Introduction to Heat Transfer(5thEd), John Wiley&Sons, (2007), 581.
- 5) Bejan, A. and Kraus, A.D. (Ed), Heat Transfer Hand Book, John Wiley&Sons, (2003), 1092.