

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

日大生産工(院) ○石田 勤 日大生産工 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が、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ナノ流体を媒体とした液冷方法が注目されている。ナノ流体とは水や油などの冷却用流体にナノ粒子を混入させたもので、強制対流や沸騰に対する熱伝達率向上の効果があるとされており^{1,2)}、今後冷却用機器への適用が期待されている。強制対流や沸騰熱伝達、そしてナノ流体を組み合わせた実験例は非常に少ない。

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発熱体にナノ流体を直接噴流した場合と沸騰条件を追加した強制対流沸騰の場合において冷却用流体や流量を変えた際の伝熱性能の変化を実験的に検討した。

2. 実験方法および整理式

Fig.1 に実験装置全体図と発熱体部分の拡大図、Table.1 に実験条件を示す。恒温水槽で温度 T_L に保たれた冷却用流体を高圧調整可能な内径 $d=4\text{mm}$ のノズルから発熱体に直接噴流した。実験装置内部は流体で満たされており、ノズルから出た流体は恒温水槽へ戻る仕組みになっている。

発熱体の構造は、10mm 四方の 3mm 厚と 2mm 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。なお沸騰実験ではヒータ熱量 \dot{Q} を調節して、後述の Eq.(3) で定義される過熱度が $\Delta T=1\sim 30\text{K}$ の条件で行った。また実験開始前に #300 のサンドペーパーを用いて伝熱面性状の均一化を図った。実験結果では銅ブロック間の熱電対で測定した温度を伝熱面温度に補正して評価を行った。

冷却用流体には純水、シリカ粒子 (SiO_2) を攪拌させたナノ流体 (濃度は 0.01wt%, 0.1wt%。以下、 $\text{SiO}_2\text{-}0.01\text{wt}\%$, $\text{SiO}_2\text{-}0.1\text{wt}\%$ と略記)、アルミナ粒子 (Al_2O_3) を攪拌させたナノ流体 (濃度は 0.01wt%, 0.1wt%。以下、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}0.01\text{wt}\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}0.1\text{wt}\%$ と略記) を用いた。なお、実験に用いたシリカ粒子とアルミナ粒子の平均粒子径はそれぞれ 10nm, 50nm である。ナノ流体は実験開始前に超音波水槽を用いて沈殿物が

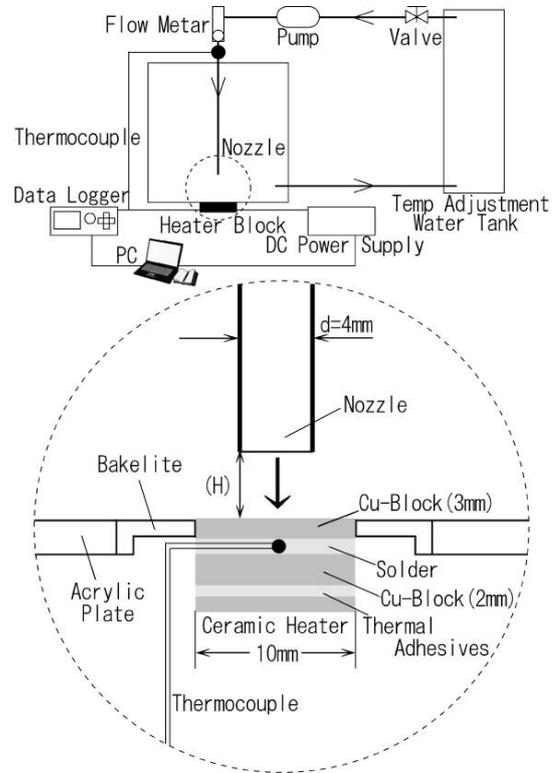


Fig. 1 Experimental apparatus

Table 1 Experimental Parameters

	Forced Convection	Forced Convective Boiling
Working Fluid	Pure Water $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}0.01\text{wt}\%$ $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}0.1\text{wt}\%$ $\text{SiO}_2\text{-}0.01\text{wt}\%$ $\text{SiO}_2\text{-}0.1\text{wt}\%$	Pure Water $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}0.1\text{wt}\%$
T_L [°C]	20	60 ($\Delta T_{sub}=40\text{K}$)
H[mm]	40,70,80,90	70
Re	100~8000	400~1500
\dot{Q} [W]	18	20~70

無くなるまで 1 時間程度攪拌させて使用した。沸騰実験ではこの後、冷却用流体を 2 時間程度脱気させた。

強制対流の熱伝達率 h_j はヒータ熱量 \dot{Q} 、伝熱面温度 T_w 、ノズル流出温度 T_j を用いて、Eq.(1) により求めた。

$$h_j = \frac{\dot{Q}}{T_w - T_j} \quad (1)$$

Effect of Mixing Nanoparticles on the Impingement Water Cooling under Forced Convection and Flow Boiling Conditions

Tsutomu ISHIDA and Hitoshi MATSUSHIMA

レイノルズ数 Re はノズルの出口流速を U 、動粘性係数を ν として Eq.(2)のように定義した。

$$Re = \frac{Ud}{\nu} \quad (2)$$

強制対流沸騰において、過熱度 ΔT は伝熱面温度 T_w と純水の飽和温度 T_{sat} の差から Eq.(3)により求めた。

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

熱伝達率 h_b はヒータ熱量 \dot{Q} 、伝熱面積 A 、過熱度 ΔT より Eq.(4)のように定義した。

$$h_b = \frac{\dot{Q}}{A\Delta T} \quad (4)$$

3. 実験結果および考察

3.1 強制対流のみの場合

一例としてノズル-発熱体距離 $H=70\text{mm}$ の測定結果を Fig.2 に示す。Fig.2 より Re 数が大きくなるにつれて熱伝達率も大きくなっており、各ナノ流体の熱伝達率は純水とほぼ等しくなることがわかる。またナノ流体の濃度を比較しても、伝熱性能の差は見られない。

今回の測定条件では、 $Re=1000$ 付近で全ての流体において $Re=1500$ 付近よりも熱伝達率が向上していることがわかる。これは Re 数が低くかつ H が大きい場合には噴流による強制対流とヒータ加熱に伴う自然対流との共存対流が生じたためと考えられる。

以上より、単相の強制対流場ではナノ流体を用いても直接噴流における熱伝達率は純水の場合とほとんど差異が見られなかった。

3.2 強制対流沸騰の場合

一例としてサブクール度（純水の飽和温度と液温の差） $\Delta T_{sub}=40\text{K}$ 、 $Re=447$ 、 $H=70\text{mm}$ の熱伝達率の測定結果を Fig.3 に示す。Fig.3 より過熱度 15K 以下においてナノ流体を用いた場合の熱伝達率が純水に比べて増大していることが確認できた。これは詳細な理由は不明であるが、ナノ粒子の混入により沸騰の初期状態において気泡の発生開始現象が促進されたことを示すものと考えられる。

なお、ここでは省略するが Re 数が増加すると純水とナノ流体の熱伝達率の差は消滅し、条件によってはナノ流体の熱伝達率の方が低下する傾向が見られた。

また Fig.3 より過熱度 15K 付近を境にして、純水と $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}0.1\text{wt}\%$ の熱伝達率の傾向が逆転していることがわかる。Sarit K ら³⁾はプール沸騰での実験において核沸騰が盛んな領域においてはナノ粒子混入により伝熱性能が低下するという報告を行っているが、本研究での結果はこの傾向と一致するものである。

以上のように、ナノ流体の沸騰実験ではさらなる実験と考察が必要と考える。

4. 結言

コンピューターなどの CPU を模擬した発熱体に、ナノ流体を直接噴流単独の場合と沸騰条件を追加した強制対流沸騰の場合の伝熱性能を実験的に検討した。

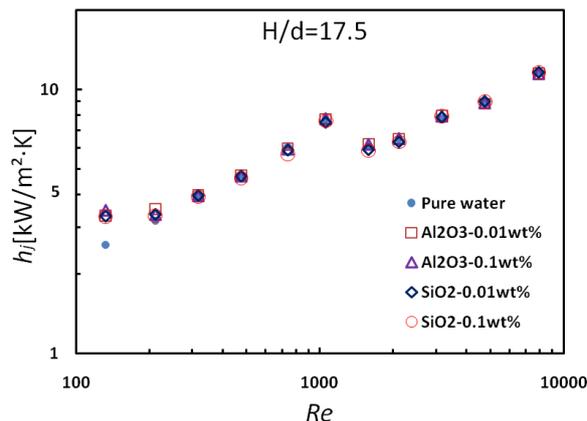


Fig. 2 Comparison of cooling performance of pure water and nanofluids at $H=70\text{mm}$

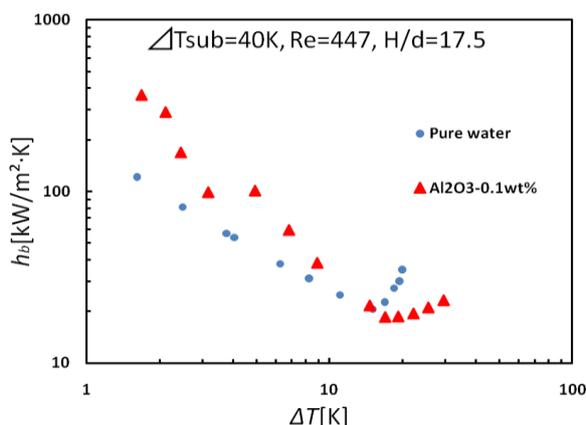


Fig. 3 Comparison of cooling performance of pure water and nanofluids at $\Delta T_{sub}=40\text{K}$, $Re=447$ and $H=70\text{mm}$

- (1) 直接噴流単独において、 $Re \approx 1000$ では $Re \approx 1500$ よりも熱伝達率が向上した。またナノ流体の伝熱性能は純水と同程度であり、冷却効果の向上は見られなかった。
- (2) 強制対流沸騰において、低 Re 数、低過熱度の条件ではナノ粒子混入による熱伝達率の向上が確認された。一方、過熱度 15K 付近を境にして純水とナノ流体の伝熱性能の逆転が見られた。

「参考文献」

- 1) 永井四郎ら、水噴流による冷却について、機論、21(104)、1955、pp.310-315
- 2) 菅谷宏樹ら、ナノ流体のプール沸騰伝熱に関する研究、2008年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集、2008、A324
- 3) Sarit K.Das, et al, Pool Boiling Characteristics of Nano-Fluids, International Journal of Heat and Mass Transfer, 46, 2003, pp.851-862