

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 7 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420140

研究課題名(和文) ナノ流体沸騰伝熱の工業利用に向けた熱伝達率の動的変化とナノ粒子層剥離の現象解明

研究課題名(英文) Study on the heat transfer coefficient and nano-particle layer peeling for industrial use of the boiling heat transfer of nanofluid

研究代表者

大川 富雄 (Okawa, Tomio)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：20314362

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：ナノ流体は、沸騰熱伝達における特に限界熱流束(CHF)を向上させる方策として注目を集めている。ナノ流体によるCHF向上は、主に、ナノ粒子層の形成によって、濡れ性や粗さ等の伝熱面表面性状が変化することに起因する。しかしながら、ナノ粒子層の付着状況は必ずしも強固ではないため、沸騰中にナノ粒子層の剥離がしばしば生じる。このため、本研究では、ナノ粒子層の付着力を実験的に定量化した。この結果、付着力はナノ粒子の材質に大きく依存することを示した。また、ナノ粒子層の剥離量の増加とともにCHFは低下、沸騰熱伝達率は向上する傾向のあることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Nanofluid is paid particular attention as the promising method to enhance critical heat flux in boiling heat transfer. It is considered that the CHF enhancement is mainly caused by the modification of surface properties such as the wettability and roughness due to the formation of nanoparticle layer on the heated surface. However, since adhesion of the nanoparticle layer is not firm, peeling of the layer often occurs during boiling. In the present work, peeling test was conducted to measure quantitatively the adhesion strength of the nanoparticle layer formed on the heated surface. It was found that the total mass and the adhesion strength of the nanoparticle layer were dependent strongly on the particle material. The CHF enhancement ratio by nanoparticle layer tended to decrease with an increase in the peeling ratio. It may be interesting to note that the boiling heat transfer was improved whilst CHF was deteriorated with the increase of the loss of nanoparticles.

研究分野：伝熱流動

キーワード：ナノ流体 沸騰熱伝達 ナノ粒子層 熱伝達率 限界熱流束 剥離

1. 研究開始当初の背景

ナノメートルサイズの微粒子をコロイド状に分散させた液体であるナノ流体では、核沸騰による除熱限界（限界熱流束、CHF）が大幅に向上する。このため、高性能 CPU や電気・燃料電池車用のインバータなど、高出力密度の電子機器の冷却において、ナノ流体の沸騰熱伝達を利用することが考えられる。また、原子力分野では、過酷事故時においても溶融燃料が炉容器から漏洩することを防ぐための方策 (In-Vessel Retention, IVR) として、緊急時に、炉容器の外表面をナノ流体の沸騰熱伝達によって冷却する手法が有効と考えられる。

ナノ流体中における CHF の向上は、主として、ナノ粒子の堆積による伝熱面表面性状の変化に起因する。しかし、伝熱面上に形成されるナノ粒子層の付着状況は、必ずしも強固ではないことに注意する必要がある。例えば、Okawa 等は、水ベースのナノ流体を用いたプール沸騰実験を実施し、核沸騰中にナノ粒子層の部分的な剥離が生じ得ること、剥離後に測定した CHF は予想よりも低かったことを報告している[1]。この観察結果は、伝熱面上に形成されるナノ粒子層の付着強度およびナノ粒子層の剥離が生じた後の沸騰熱伝達について、十分な理解が必要であることを示している。さもないと、ナノ流体の沸騰熱伝達を工業的に利用する上で、ナノ粒子層の剥離により所定の冷却性能が得られない可能性を否定できない。

2. 研究の目的

本研究では、様々な条件下でプール沸騰実験を実施し、ナノ粒子層の付着強度を定量化する。また、ナノ粒子層の部分的剥離が生じた後の沸騰熱伝達特性を調べる。

3. 研究の方法

(1) 実験装置

実験装置の写真と概略を図 1 に示す。試験容器はポリカーボネート製で、直径 144mm、高さ 170mm である。加熱装置は、試験容器の底に同心円状に取り付けた。銅ブロックの一端を直径 20mm の円筒形状に機械加工し、その端面を伝熱面として使用した。銅ブロックには、100W のカートリッジヒーター 9 本を埋め込んだ。銅円筒の中心軸に配置した熱電対で計測した温度データより、熱流束 q_w と壁面過熱度 ΔT_w を計算した。銅ブロックは厚さ 2mm の SUS304 製のジャケットに入れ、側壁からの熱損失を低減した。銅ブロックとジャケットは、電子ビーム溶接によって滑らかに接合し、接合部における気泡の発生を低減した。また、飽和温度を維持するため、試験容器内には投げ込みヒーターを配置した。試験容器からの蒸気放出を防ぐため、容器上部に還流型凝縮器を配置した。流体温度の測定は、伝熱面中心より 10mm 上方で、熱電対を用いて行った。

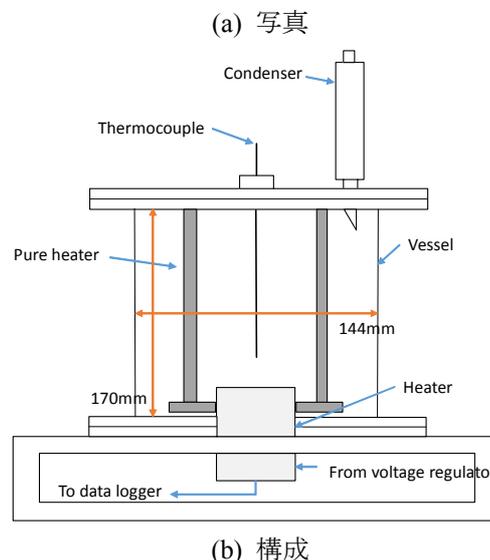


図 1 実験装置の概略

(2) 実験手順

粒子材料には二酸化チタン (AEROXIDE TiO₂ P 25)、アルミナ (AEROXIDE Alu C)、シリカ (AEROXIDE 90G) の 3 種類を使用した。まず、300mg のナノ粒子を 200ml の蒸留水と混合し、430kHz の超音波励起を 3 時間継続することで、安定で均一な粒子分散を得た。その後、金属研磨剤を用いて伝熱面を研磨し、アセトンを用いて洗浄した。伝熱面の初期状態が一定であることを確認するため、接触角が所定の範囲 (90±5°) にあることを確認した上で、伝熱面 (加熱装置) を試験容器に配置した。この後、1300ml の蒸留水を容器に供給するとともに、脱気のため、 $q_w=650\text{kW/m}^2$ で 20 分間核沸騰状態を維持した。核沸騰状態にある試験流体に、前もって製作しておいた 200ml のナノ流体を加えた。したがって、粒子濃度は 0.2kg/m^3 となる。 $q_w=650\text{kW/m}^2$ での核沸騰状態をさらに 1 時間維持して、伝熱面上にナノ粒子層を形成した。

第1の実験では、プラスチック製のへらでナノ粒子層を除去し、伝熱面上に堆積したナノ粒子の総量を測定した。第2の実験では、ナノ粒子層の形成方法は同じであるが、ナノ粒子層の除去は、接着力の異なる4種類の粘着テープ(JISに基づく粘着力は3.73, 11.5, 22, 40N/10mm)を用いて行った。各テープによる剥離力の計測は、フォースゲージを用いて行った。剥離したナノ粒子の質量は、剥離試験前後における粘着テープの質量差から算出した。第3の実験では、ナノ粒子層の形成及び剥離が沸騰熱伝達率及びCHFに及ぼす影響を明らかにするため、いくつかの剥離レベルの伝熱面を用いて、蒸留水中でプール沸騰実験を実施し、沸騰曲線を得た。

(3) 実験条件

ナノ流体のベース液は蒸留水、伝熱面材質は銅、粒子濃度は 0.2kg/m^3 、核沸騰によりナノ粒子層を形成する際の熱流束と沸騰継続時間は、各々 650kW/m^2 、1時間とした。ナノ粒子の材料としては、二酸化チタン(TiO_2)、アルミナ(Al_2O_3)、シリカ(SiO_2)の3種類を用いた。

4. 研究成果

(1) 堆積ナノ粒子の総質量

図2に示すように、伝熱面上におけるナノ粒子の総堆積量 M_0 は、 TiO_2 で 0.93mg 、 Al_2O_3 で 0.4mg 、 SiO_2 で 0.20mg であった。したがって、核沸騰中に形成されるナノ粒子層の総質量は、粒子材料に大きく依存することがわかった。なお、本実験で使用した粒子材料の密度は、 TiO_2 は 4230kg/m^3 、 Al_2O_3 は 3950kg/m^3 、 SiO_2 は 2200kg/m^3 であり、 M_0 は、粒子密度の低下とともに減少する傾向となった。

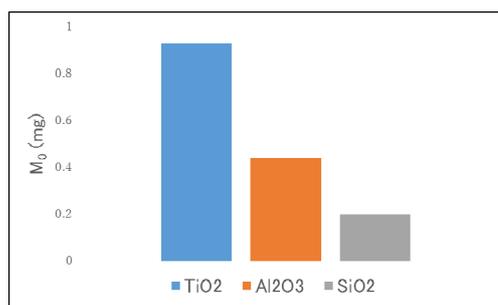
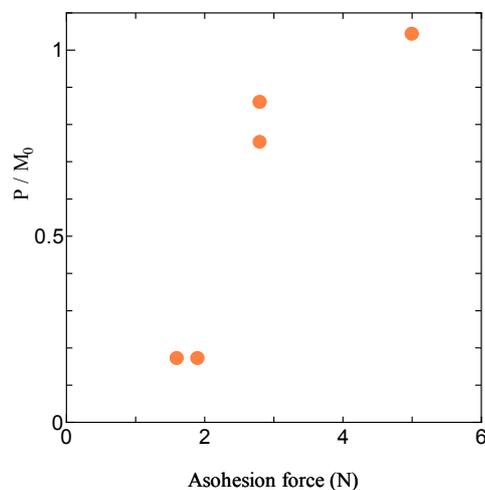


図2 ナノ粒子の総堆積量

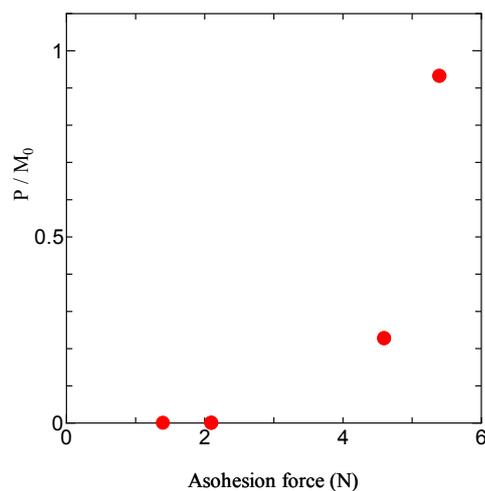
(2) ナノ粒子層の付着強度

図3に、剥離力 F_p の増加に伴うナノ粒子の剥離割合 P/M_0 の変化を示す。ここで、 P は各剥離力で剥離したナノ粒子の質量、 M_0 は伝熱面上に堆積したナノ粒子の総質量である。全てのナノ粒子材料について、 F_p の増加とともに P/M_0 が増加しており、合理的な結果となっている。 TiO_2 の場合、ナノ粒子層の剥離は $F_p=1\text{N}$ 程度で開始し、 $F_p=5\text{N}$ で大部分のナノ粒子が剥離した。 Al_2O_3 の場合、剥離開始は $F_p=4\text{N}$ 程度で、 $F_p=5-6\text{N}$ 程度で剥離がほぼ完

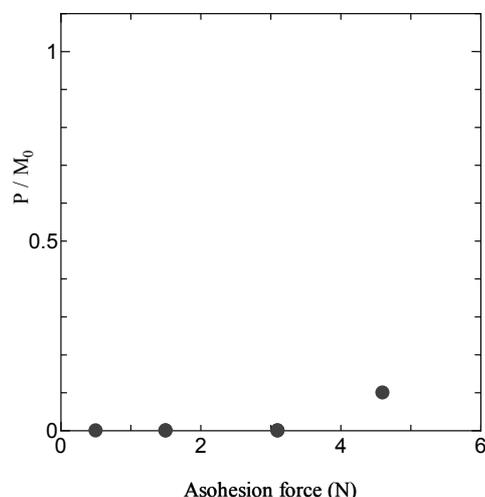
了している。 SiO_2 では、 $F_p=4.6\text{N}$ でもナノ粒子の90%程度が残存していることがわかる。以上の結果より、ナノ粒子層の付着力は粒子材料に大きく依存し、本研究で調べた範囲内では、 SiO_2 で最も強く、 TiO_2 に対して最も弱いと言える。



(a) 二酸化チタン (TiO_2)



(b) アルミナ (Al_2O_3)



(c) シリカ (SiO_2)

図3 ナノ粒子層の付着強度

(3) 剥離前の沸騰熱伝達率および CHF

剥離試験を実施する前の伝熱面を用いて測定された沸騰曲線を図4に示す。CHFは純水で 1.1MW/m^2 であったが、ナノ粒子が堆積した伝熱面では $1.8\text{--}1.9\text{MW/m}^2$ に向上している。したがって、ナノ粒子層形成面の CHF は、裸面よりも60%程度高く、また、ナノ粒子の材料は、CHF値に顕著な影響を及ぼしていない。また、すべての粒子材料について、沸騰熱伝達率が裸面の場合よりも悪化している。ここで、壁過熱度は、 TiO_2 で最も高い値を示している。図2に示すように、 M_0 は TiO_2 で最大であった。これより、ナノ粒子層が形成された伝熱面において、熱伝達率が劣化する要因の1つは、ナノ粒子層が断熱材として作用するためと考えられる。

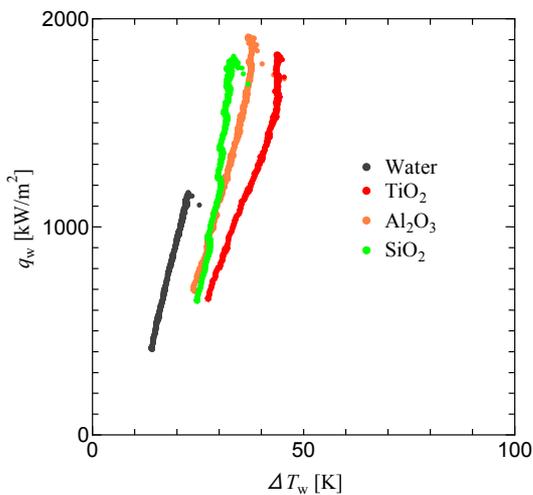


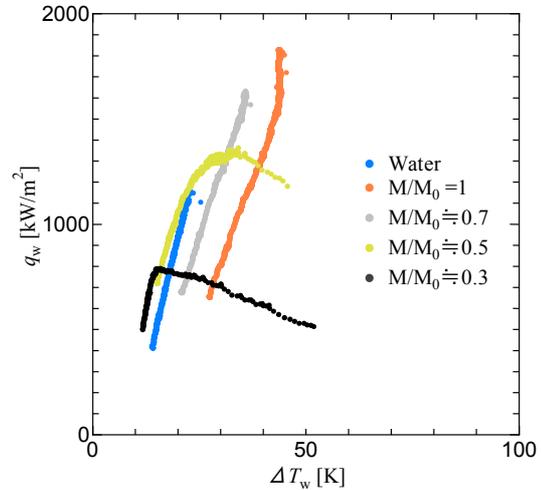
図4 剥離試験前の伝熱面に対する沸騰曲線

(4) 剥離後の沸騰熱伝達率及び CHF

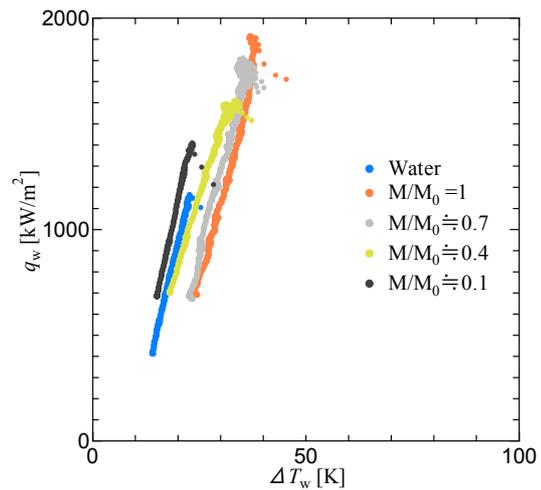
いくつかの剥離レベルの伝熱面を用いて測定した沸騰曲線を図5(a)~(c)に示す。シリカについては、本実験で顕著なナノ粒子層の剥離が生じなかったため、沸騰熱伝達に対する剥離レベルの影響は明らかではない。しかしながら、二酸化チタンおよびアルミナについては、はく離レベルの影響を明確に見ることができる。すなわち、いずれの粒子材料においても、ナノ粒子層の残存率 M/M_0 の低下とともに、壁過熱度 ΔT_w と CHF はともに減少する傾向となっている (M は剥離試験後に伝熱面上に残存するナノ粒子の質量)。したがって、ナノ粒子層の剥離は、ナノ流体の沸騰熱伝達特性に有意な影響を及ぼし、剥離とともに熱伝達率は向上するが CHF は低下する傾向といえる。特に、 M/M_0 が十分に低いとき、 ΔT_w と CHF の値が裸の伝熱面に対する値よりも低い場合があることには注意が必要である (二酸化チタン、 $M/M_0=0.3$)。すなわち、核沸騰中で大規模なナノ粒子層の剥離が生じた場合、CHF がむしろ悪化する可能性があることを示している。

CHFの計測値 q_c を、ナノ粒子残存率 M/M_0 に対してプロットした結果を図6に示す。本実験では、 M/M_0 の低下とともに q_c がほぼ線

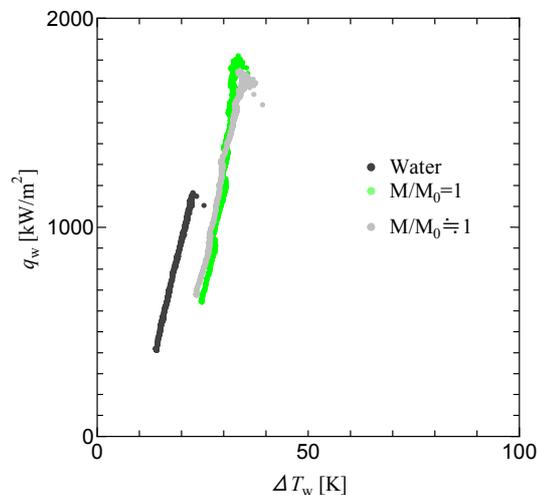
形に減少する傾向が認められる。本図によれば、仮にナノ粒子層の大規模な剥離が生じた場合に、二酸化チタンでは、CHFが裸面よりも低くなる可能性があるが、アルミナでは裸面よりも高い CHF 値が維持されやすいと考えられる。



(a) 二酸化チタン (TiO_2)



(b) アルミナ (Al_2O_3)



(c) シリカ (SiO_2)

図5 ナノ粒子層の剥離後の沸騰曲線

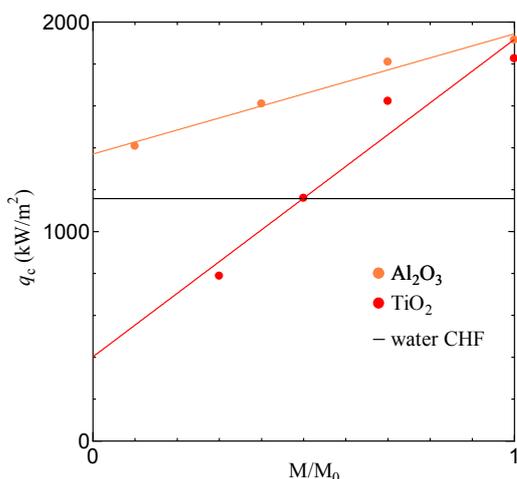


図6 ナノ粒子の剥離割合と CHF の関係

<引用文献>

- ① T. Okawa, M. Takamura, T. Kamiya, Boiling time effect on CHF enhancement in pool boiling of nanofluids, International Journal of Heat and Mass Transfer 55 (2012) 2719-2725.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計1件)

- ① Muhamad Zuhairi Sulaiman, Daisuke Matsuo, Koji Enoki, Tomio Okawa, Systematic measurements of heat transfer characteristics in saturated pool boiling of water-based nanofluids, International Journal of Heat and Mass Transfer, 査読有、Vol. 102, pp. 264-276, 2016.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.06.017>

[学会発表] (計5件)

- ① 渡辺陽介、大川富雄、榎木光治、ナノ流体沸騰熱伝達に及ぼすナノ粒子層の剥離の影響、日本原子力学会 2017 春の年会、3K06, 東海大学湘南キャンパス (神奈川県平塚市)、2017 年 3 月 29 日。
- ② 渡辺陽介、大川富雄、榎木光治、ナノ流体沸騰熱伝達におけるナノ粒子層の剥離、日本機械学会関東学生会第 56 回学生員研究発表講演会、No. 405, 東京理科大学葛飾キャンパス (東京都葛飾区)、2017 年 3 月 16 日。
- ③ 小林大河、大川富雄、ナノ流体沸騰伝熱特性におけるナノ粒子の付着力が及ぼす影響、日本機械学会関東学生会第 55 回学生員卒業研究発表講演会、No. 1411, 東京工業大学大岡山キャンパス (東京都目黒区)、2016 年 3 月 10 日。
- ④ Tomio Okawa, Muhamad Zuhairi Bin Sulaiman, Daisuke Matsuo, Experimental study on the critical heat flux and heat transfer coefficient in nanofluid pool boiling,

10th International Topical Meeting on Nuclear Thermal Hydraulics, Operation and Safety (NUTHOS-10), NUTHOS10-1346, 沖縄コンベンションセンター (沖縄県宜野湾市)、2014 年 12 月 15 日。

- ⑤ 松尾大輔、ムハンマド・ズハイリ・ビン・スライマン、大川富雄、ナノ流体沸騰熱伝達における粒子分散状況の影響、第 63 回理論応用力学講演会(NCTAM2014)、OS13-01-01, 東京工業大学大岡山キャンパス (東京都目黒区)、2014 年 9 月 26 日。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大川 富雄 (OKAWA, Tomio)

電気通信大学・情報理工学研究科・教授

研究者番号：20314362

(2) 研究協力者

榎木 光治 (ENOKI, Koji)

ムハンマド・ズハイリ・ビン・スライマン

(Muhamad Zuhairi Bin Sulaiman)

松尾 大輔 (MATSUO, Daisuke)

小林 大河 (KOBAYASHI, Taiga)

渡辺 陽介 (WATANABE, Yosuke)