

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 20 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010 年度～2012 年度

課題番号：22560185

研究課題名（和文） 伝熱面の濡れ性の向上による限界熱流束促進機構の解明

研究課題名（英文） Mechanism of Critical Heat Flux Enhancement due to Improvement of Surface Wettability

研究代表者

坂下 弘人 (SAKASHITA HIROTO)

北海道大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：00142696

研究成果の概要（和文）：

二酸化チタン(TiO₂)ナノ粒子を析出させた伝熱面上の飽和プール沸騰で水の限界熱流束(CHF)を測定した。その結果、CHFは、清浄面の値に比べて約2倍の促進が達成された。このCHF促進機構を明らかにするために、導電プローブを用いて伝熱面近傍の気液挙動を測定し、伝熱面と蒸気塊の間に存在する液層領域(マクロ液膜)の厚さを特定した。その結果、ナノ粒子析出面上に形成される液層厚さ(マクロ液膜厚さ)は、清浄面の場合に比べて厚くなることが判明した。この厚い液相の形成がナノ粒子析出面でCHFが促進される要因と考えられる。

研究成果の概要（英文）：

This study investigated the saturated pool boiling of water on a 12mm diameter horizontal heating surface coated with TiO₂ nanoparticles under atmospheric pressure. The CHF for the TiO₂ coated surface increased up to about 2 times the CHF for the uncoated (plain) surface. Liquid-vapor behaviors close to the heating surface were measured using a conductance probe, and the thickness of the macrolayer formed beneath large vapor masses was determined by analyzing the probe signals. It was found that the macrolayers formed on the TiO₂ coated surface are thicker than those on the uncoated surface, and this is likely to be one of the causes of the CHF enhancement with the TiO₂ coated heating surface.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2012 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：沸騰，限界熱流束，濡れ性，ナノ流体，マクロ液膜

1. 研究開始当初の背景

沸騰の限界熱流束(Critical Heat Flux：以下 CHF と呼ぶ)は、伝熱面の濡れ性の向上によって顕著に促進される。しかし、これまでに提案された各種の CHF モデルは、濡

れ性の向上による CHF の促進を定量的に説明することは出来ない。この点が、各種モデルの物理的妥当性に疑義を抱かせる結果となり、CHF 機構の解明を阻む大きな要因となっている。このように、濡れ性と CHF の

関係は、CHF 機構の解明という学術的な観点から非常に重要であるが、工学的にも以下に述べるように興味深い問題を提起する。

水に粒径 10~100nm 程度のナノ粒子を分散させたナノ流体を沸騰媒体として用いると、CHF が大幅に促進される結果が 2003 年以降相次いで報告された。その後、伝熱面にナノ粒子が析出し強固な析出層を形成することで濡れ性が向上する事実が明らかとなり、これが CHF 促進の主要因と考えられている。ただし、促進割合の最大値は 1.5 倍~3.2 倍と研究者間で大きな差異がある。限界熱流束の促進機構を明らかにすることで、ナノ流体による CHF 促進の最適化ができれば、その促進率の高さから、高集積 LSI などの電子機器や半導体レーザーを始めとする次世代高発熱機器の受動的冷却法として非常に有望である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、導電プローブによる伝熱面近傍の気液挙動の詳細な測定、および高圧力域での伝熱面の発泡点密度の測定を通して、ナノ流体の析出による濡れ性の向上が限界熱流束の促進をもたらす要因を明らかにすることである。

3. 研究の方法

(1)CHF および気液挙動の測定

図 1 に使用した実験装置を示す。実験は大気圧下で飽和沸騰の条件で行った。伝熱面は銅製円柱の上端面であり、直径は 12mm である。伝熱面周囲には、厚さ 1mm のステンレス製フランジが銅面と面一になるように取り付けられている。銅円柱上端の伝熱面と周

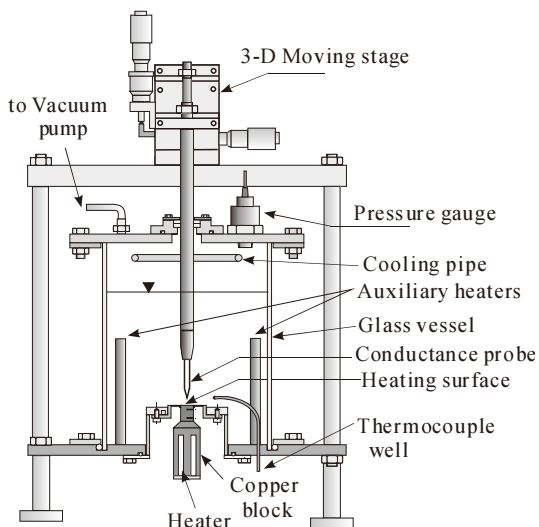


図 1 気液挙動測定用実験装置

囲フランジの境界からの発泡を抑制するため、伝熱面の腐食を避けるために、銅面とその周囲のステンレス製フランジ表面にはニッケルメッキを施している。表面熱流束と表面温度は、銅円柱の表面から 4mm、12mm の位置に挿入された 0.5mm 径のシース熱電対の指示値より求めた。沸騰容器は内径 150mm の耐熱ガラス製で、沸騰様相の観察の際にゆがみを抑えるために、ガラス容器周囲には水ジャケットを設けてある。

伝熱面近傍の気液挙動は、導電プローブ法によって測定した。導電プローブの先端径は約 5 μ m であり、伝熱面と垂直方向に 0.5 μ m の精度で移動できる。なお、測定に当たっては、溶液に微量の塩化カリウム (KCl) を添加して導電性を持たせている。KCl の濃度は極めて微量であり、KCl 添加による表面張力を含む熱物性値の変化は無視できる。

(2)ナノ粒子析出面の作成

ナノ粒子には、Sigma-Aldrich 社製の粒径 25nm の二酸化チタン (TiO₂) を用いた。TiO₂ 析出面は核沸騰によるナノ粒子の析出を利用して作成した。ナノ粒子 (18mg) を脱イオン水 100cc に混合し、超音波浴中に 30 分間設置しナノ粒子を分散させた。一方、沸騰容器中に、1600cc の脱イオン水と、伝熱面に十分な発泡点を付与するために表面活性剤である SDS を 0.17g 添加して沸騰させ、1 MW/m² の熱流束で定常状態を維持した。この状態で、ナノ粒子を分散させた水 100cc を容器中に投入し、8 分間沸騰を続けた後、伝熱面の加熱を終了させた。沸騰容器中のナノ粒子初期濃度は 1.06 $\times 10^{-3}$ wt%、SDS の濃度は 0.019wt% である。

(3)ナノ粒子析出層厚さと濡れ性の測定

析出層の厚さは以下の方法で見積もった。直径 12mm の伝熱面の外側の析出が認められない部分で、触針を面に接触させて伝熱面位置を特定する。次いで、触針先端部分をマイクロスコープで観察しながら、触針をわずかに伝熱面から離して横方向に移動させ、触針が析出層に触れた際に生じる触針の歪みや析出層表面を触針がこすった際に生じる痕跡の有無を確認した。この測定により、本実験の手順で得られた析出層厚さは 1 μ m 以下であることが確認された。

伝熱面の濡れ性は液滴の静的接触角で評価した。静的接触角は、清浄面の 75deg. から TiO₂ 面で 5deg. と大幅に減少し、従来の結果と同様に TiO₂ 析出面では濡れ性が大幅に向上することが確認された。

(4) 高圧における発泡点密度の測定

濡れ性の向上が沸騰挙動に与える影響を検討するため、発泡点密度の測定を実施した。ただし、水の沸騰では、大気圧の CHF 近傍の発泡点密度は 10⁶[1/m²] のオーダーであり、一次気泡は直ちに接合して大きな蒸気塊を形成するため、発泡点密度の測定は困難である。そこで、一次気泡径が小さくなり低熱流束でも十分に大きな発泡点密度が得られる、5~40 気圧の範囲の高圧域で測定を実施した。実験に用いた高圧沸騰容器は内径 50 mm、高さ 150 mm の円筒形であり、電極とサファイア製の観察窓が取り付けられている。伝熱面には、長さ 21.5mm、幅 4mm、厚さ 8μm のニッケル箔を用い、高圧容器の電極を介して直流通電で加熱した。伝熱面上の沸騰様相を観察窓から高速ビデオ(最高 8000fps)とマイクロSCOPE(最大倍率 320 倍)により観察し、発泡点密度を求めた。

4. 研究成果

(1) 限界熱流束の促進

TiO₂ ナノ粒子析出面上の水の限界熱流束は、清浄面の値に比べて約 2 倍に促進されることが明らかとなった。また、粒径 100nm の SiO₂ を析出させた伝熱面でも測定を実施し、TiO₂ を用いた場合とほぼ同様の促進が得られることが判明した。このことから、ナノ流体を用いた限界熱流束促進法の工学的有

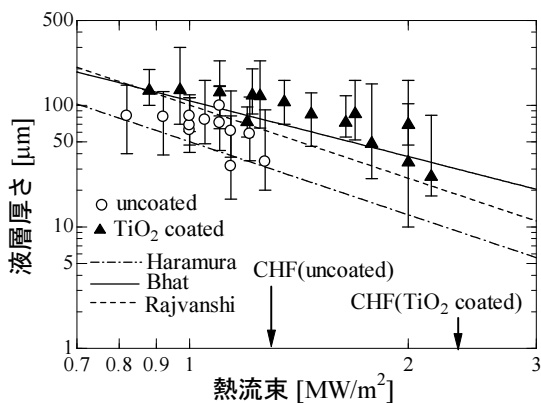


図 2 清浄面と析出面の液層厚さ

用性が確認された。

(2) 伝熱面上の液層厚さ

ナノ粒子析出層を形成させ濡れ性を向上させた伝熱面上の沸騰において、触針プローブにより伝熱面近傍の気液挙動を詳細に測定した。その結果、伝熱面垂直方向のボイド率分布や合体泡の離脱頻度は、ナノ粒子析出面と清浄面で同様の傾向を示したが、伝熱面と合体泡の間に存在する液層領域の厚さが、ナノ粒子析出面では清浄面に比べて増大することが明らかになった(図 2)。

(3) CHF 発生機構

CHF の発生機構を検討するため、CHF 点前後での伝熱面近傍のボイド率変化を測定した。導電プローブを伝熱面から 15μm の位置に設置し、核沸騰高熱流束域の定常状態から銅ブロックへの入力を増加させ CHF を経て遷移沸騰に移行する過程で、銅ブロック内の 2 本の熱電対温度とプローブ信号を同期させて測定した。その結果、清浄面、ナノ粒子析出面の場合ともに、CHF の発生と同時に伝熱面近傍のボイド率が急増することが分かった(図 3)。この事実は、CHF の発生が伝熱面の濡れ性の違いに係わらず、伝熱面上の液層の消耗によって引き起こされることを示している。したがって、ナノ粒子析出面で濡れ性の向上による CHF の促進は、上記(2)の成果で明らかとなった液層厚さの増大によってもたらされていると結論できる。

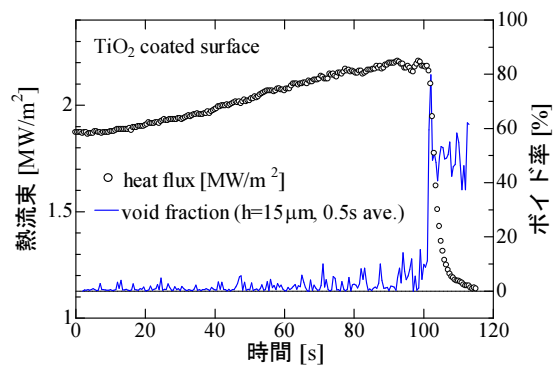


図 3 熱流束とボイド率の同時測定結果

(4) 発泡点密度

濡れ性の向上によって厚い液層が形成される機構を検討するため、5~40 気圧の範囲

で発泡点密度の測定を行った。測定の結果、ナノ粒子析出面の発泡点密度は清浄面に比較して減少することが判明した。合体泡は伝熱面上での気泡の接合によって形成されるため、その下の液層領域の厚さは、一次気泡径に強く依存する。発泡点密度の低下は接合時一次気泡径を増大させるため、厚い液層の形成を可能にする。以上より、発泡点密度の減少が、ナノ粒子析出面で厚い液層が形成される要因と考えられる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① Hiroto Sakashita, CHF and near-wall boiling behaviors in pool boiling of water on a heating surface coated with nanoparticles International Journal of Heat and Mass Transfer, 査読あり, Vol.55, 2012. 7312-7320 (DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.07.061)

[学会発表] (計 6 件)

- ① Hiroto Sakashita, CHF enhancement in pool boiling of nanofluids, 3rd International Forum in Heat Transfer, 2012年11月1日, Nagasaki Brick hall
- ② 坂下弘人, ナノ流体によるプール沸騰 CHF 促進機構・ナノ粒子析出面の発泡点密度-, 第 49 回日本伝熱シンポジウム, 2012年5月31日, 富山国際会議場
- ③ Hiroto Sakashita, Mechanism of CHF enhancement in pool boiling of nanofluids, The 8th KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference, 2012年3月20日, Incheon, Korea, Incheon Convention Center
- ④ Hiroto Sakashita, Mechanism of CHF enhancement in pool boiling of nanofluids : Measurements of liquid-vapor structure near heating surface coated with nanoparticles, 2012年5月(東日本震災により開催中止, ただし論文集は発行), The 19th International Conference on Nuclear Engineering, Chiba, Makuhari Messe
- ⑤ 坂下弘人, ナノ流体によるプール沸騰 CHF 促進機構の検討, 2011年9月20日,

日本原子力学会 2011 年秋の大会, 北九州国際会議場

- ⑥ 坂下弘人, ナノ粒子によるプール沸騰 CHF 促進機構・ナノ粒子析出面近傍の気液挙動の測定-, 2011年6月2日, 第 48 回日本伝熱シンポジウム, 岡山コンベンションセンター

6. 研究組織

(1) 研究代表者

坂下 弘人 (SAKASHITA HIROTO)

北海道大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号 : 00142696