

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 24 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630068

研究課題名(和文)撥水面上に存在する過冷却下の沸騰気泡における熱輸送メカニズム

研究課題名(英文)Heat Transfer Mechanism of a Boiling Bubble on Hydrophobic Surface under Subcooling

研究代表者

高田 保之(Takata, Yasuyuki)

九州大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70171444

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：撥水面上では、過冷却下でも容易に気泡が発生し、沸点以下の伝熱面温度でも気泡が周期的に発生し離脱する現象が観察されたが、本研究ではこの現象が生じるメカニズムを明らかにした。この現象には溶存空気が重要な役割を担っていると想定し、その影響を確認するために、溶存空気が液中に含まれている状態(Open)とほぼ完全に取り除いた状態(Close)で実験を行った。その結果、過冷却下で存在する蒸気膜は、蒸気と空気の混合物であることが結論付けられた。溶存空気は沸騰初期において伝熱促進効果を有することが明らかとなった。以上の結果は新たな知見であり、沸騰科学の進展に大いに貢献できたといえる。

研究成果の概要(英文)：The present research studies the mechanism of periodic bubble nucleation and departure from hydrophobic surface under subcooled condition. We focus on dissolved air into boiling liquid as the governing factor. We performed two types of experiments. One is with dissolved air (Open condition) and the other is without air (Closed condition). The results are summarized as follows; There was no bubble generation in closed condition, and it was found that the bubble consists of a mixture of water vapor and air. The dissolved air enhances boiling heat transfer right after onset of boiling.

研究分野：熱工学

キーワード：沸騰 濡れ性 撥水 気泡 溶存空気 沸騰開始

1. 研究開始当初の背景

気液相変化現象における濡れ性の効果に関する研究が近年活発に行われている。これは一つには超親水から超撥水に渡る広範な濡れ性の制御技術が高度化してきたことと密接に関連している。撥水面上では、通常面とは異なる様相やメカニズムの沸騰現象が見られることが、研究代表者らの一連の研究により明らかになってきたが、いまだに理解が進んでいない部分も多い。超撥水コーティングを銅面に格子状にパターン化した伝熱面上での飽和沸騰の特徴はサイズの揃った気泡が放出されることである。一方、TiO₂超親水面上に撥水剤(PTFE)を斑点状にコーティングした面におけるサブクール沸騰の場合、気泡は撥水斑点に安定に付着したまま微小振動し、通常面のサブクール沸騰のように小さな気泡が激しく発泡・消滅することはない。このような撥水斑点上のサブクール沸騰では、気泡がヒートパイプのような熱輸送機構を有していると想像されるが、その実態は明らかにされておらず未解明のままである。

2. 研究の目的

本研究では、研究代表者がこれまでに取り組んできた表面の濡れ性が相変化現象に及ぼす効果のうち、撥水性の特異な現象に的を絞って研究を実施する。超撥水面上における沸騰現象の基礎的な理解は進んでいない。その理由の最大のもは通常の範囲の接触角を有する面上の沸騰とあまりにも現象(メカニズム)が異なるからである。この撥水特有の現象の理解を深めることがこの研究の学術的な特色の一つである。

そこで、本研究ではサブクール下において蒸気泡が安定に存在しうる条件と撥水斑点の構造との関係および溶存空気量の影響を明らかにするとともに、気泡ヒートパイプ熱輸送メカニズムの解明することを目的とする。

3. 研究の方法

過冷却下で撥水斑点上に存在する気泡には液中に溶存していた空気が析出し、内部は水蒸気とかなりの分圧を有する空気との混合物であると推察されるので、その影響を明らかにするために、次の2つの方法を用いる。

- (1) 溶存空気を取り除くことが可能な沸騰伝熱試験装置による試験
- (2) 気泡内部の垂直方向の温度分布の測定

(1)については、図1に示すような沸騰伝熱試験装置を用いる。この装置には真空ポンプとベローズが付属しており、試験容器内を密閉した状態で上部空間を長時間真空排気することにより溶存空気をかかなりの程度まで取り除くことができる。さらに、ベローズ周

囲の空間に大気を取り入れることにより、沸騰試験容器内を密閉状態のまま大気圧に維持することができる。上部バルブを開放すれば当然従来通り(溶存空気有り)での沸騰試験も可能である。以下、図中での説明を省くために、密閉状態での試験、すなわち溶存空気無しでの実験を Closed, 大気開放状態での実験を Open と呼ぶことにする。

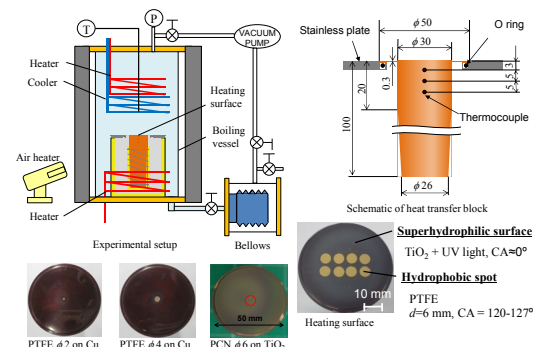


図1 真空ポンプおよびベローズ付密閉型沸騰伝熱試験装置および伝熱面

使用した撥水斑点付の伝熱面も併せて図1に示す。ベースに使用したのは銅あるいは銅の表面に TiO₂ をコーティングした伝熱面であり、撥水斑点には PTFE を用いた。今回の研究では主に沸騰開始近傍の低熱流束域を対象としているため、ベースの親水性は試験結果には影響を与えなかった。

一方、(2)については、図2のような直径0.15mmの熱電対とトラバース用のマイクロメータを組み合わせた装置を試験容器上部に設置することにより行う。サブクール状態における撥水斑点状の気泡は概ね静止しており、十分な時間をかけて垂直・水平方向温度分布を計測することが可能である。

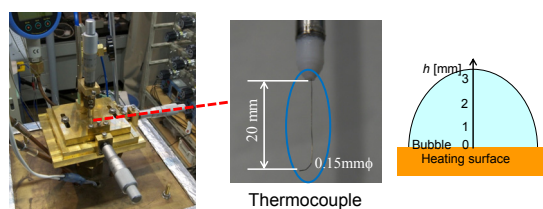


図2 気泡内部の温度分布計測

4. 研究成果

図3に本研究で得られたサブクール度では20Kにおける特徴的な沸騰伝熱特性を示す。図中には Open と Closed の両方の沸騰特性がプロットしてある。また、図中の矢印(↑)は、沸騰開始点を示している。この図から明らかになったことは、(1)Open の場合は負の過熱度で沸騰が開始するのに対し、Closed では沸騰は常に正の過熱度で開始すること、(2) Open と Closed では沸騰曲線が分かれ、高熱流束で再度一致になるということである。

Openの方が先に熱伝達が良好になり、Closedは沸騰開始後に過熱度 10K を超えて漸くOpenに追いつく。

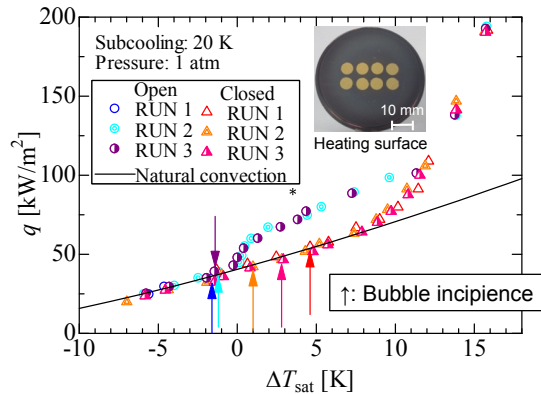


図3 沸騰開始近傍の伝熱特性 (Open と Closed の比較)

Open と Closed の違いは、沸騰気泡にも顕著に現れる。図4は低過熱度および高加熱度における撥水斑点状の気泡の様子を比較したものである。これから分かるように、気泡のサイズはOpenの方がClosedよりもかなり大きい。(a)ではかなり大きな気泡が現れているのに対して、(b)では小さな数個の気泡が観察できる程度である。(c)と(d)では伝熱特性に差はないものの、気泡のサイズは異なる。

Open(溶存空気有り)	Closed(溶存空気無し)
<p>(a) $\Delta T_{sat}=4.5K$, $q=74.5kW/m^2$</p>	<p>(b) $\Delta T_{sat}=4.8K$, $q=51.7kW/m^2$</p>
<p>(c) $\Delta T_{sat}=13.9K$, $q=137.6kW/m^2$</p>	<p>(d) $\Delta T_{sat}=13.8K$, $q=141.4kW/m^2$</p>

図4 沸騰気泡の様相

図2の装置により計測された気泡内部の温度分布を図5に示す。この例では、サブクール度 20K で、Open および Closed に対してほぼ同じ伝熱面温度での測定結果が示されている。まず、Open で $T_w=104.3^\circ C$ (▽) と Closed で $T_w=103.8^\circ C$ (▼) を比較すると Closed の方が気泡内部の温度が全般的に高い。また、両方ともに内部の温度は飽和温度以下である。これは Closed の場合であっても溶存空気は完全には取り除くことはできておらず、内部には空気が含まれていることを示唆する結果である。一方、気泡のサイズに関して見てみると、Open の場合は気泡頂部の高さは 4.5mm

であるのに対し、Closed の方(▼)は約 2.6mm である。すなわち、Open の方がより多くの空気を含んでいると理解することができる。

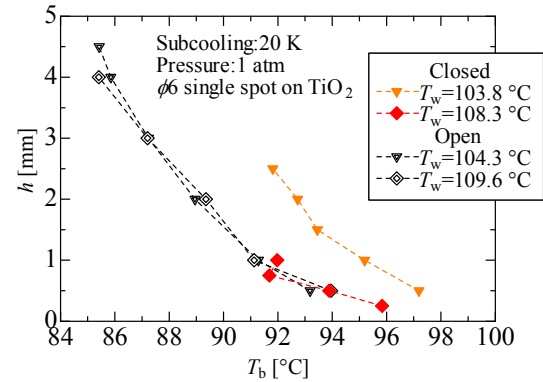


図5 気泡内部の垂直方向温度分布

Closed(▼)の場合の気泡頂部の温度は、 $91.8^\circ C$ であり、Open(▽)のそれは $85.5^\circ C$ である。気泡内部は水蒸気と空気の混合物であり、気泡頂部の温度が水蒸気分圧に対する飽和温度であると解釈すれば、両者の水蒸気分圧はそれぞれ、

Open(▽): $p_{v,sat}(85.5^\circ C)=58.8kPa$

Closed(▼): $p_{v,sat}(91.8^\circ C)=75.1kPa$

となる。

Closed では真空ポンプで脱気を十分にしているにも関わらず、このように約 1/4 が空気による分圧になる理由は次のように考えることができる。

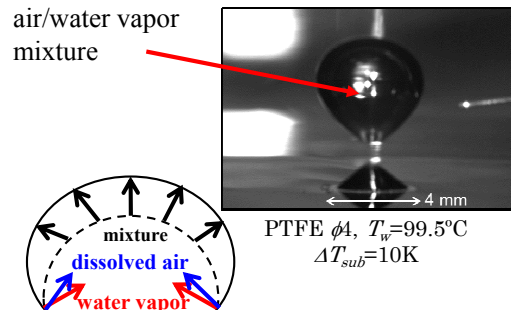


図6 溶存空気による周期的な気泡の成長および離脱のメカニズム

図6はこのメカニズムを説明するものである。撥水斑点の境界には三相界線が存在し、そこで蒸発が生じる。その際に液中に溶存している空気も一緒に気泡内部に放出されるが、その空気はすぐには液中には溶けずに内部への蓄積が生じる。そのため気泡内部は液中に比べて空気チックな水蒸気・空気混合気体となっている。空気は凝縮しないため、周囲の液体が飽和温度以下であっても成長を持続することができる。また、気泡が成長し浮力が大きくなると伝熱面から離脱するが図6右上の写真に示すように、撥水斑点上に

は常にこの混合気体は存在しており，離脱後にすぐに次の気泡の成長が開始される。

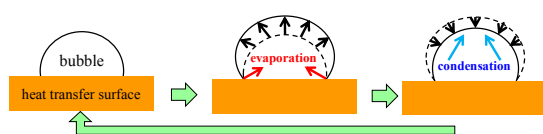


図7 気泡ヒートパイプ

さて，低過熱度においては気泡の離脱は頻繁ではなく，気泡攪乱効果による伝熱促進は期待できない．しかしながら，図3に示すように Open な条件では自然対流熱伝達よりも大きな熱伝達率を有している．そのメカニズムは概ね図7のようになっているものと推測される．気泡底部で蒸発した水蒸気が頂部で凝縮をする．気泡は静止しているが，熱は潜熱で輸送される．すなわち静止した気泡があたかもヒートパイプのような熱輸送機構を提供すると考えられる．

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① Bambang Joko Suroto, Masahiro Tashiro, Sana Hirabayashi, Sumitomo Hidaka, Masamichi Kohno, Yasuyuki Takata, Effects of Hydrophobic-Spot Periphery and Subcooling on Nucleate Pool Boiling from a Mixed-Wettability Surface, Journal of Thermal Science and Technology, Vol. 8, No. 1, pp.294-308, 2013 July
- ② Biao Shen, Bambang Joko Suroto, Sana Hirabayashi, Masayuki Yamada, Sumitomo Hidaka, Masamichi Kohno, Koji Takahashi, Yasuyuki Takata, Bubble activation from a hydrophobic spot at “negative” surface superheats in subcooled boiling, Applied Thermal Engineering, in press, 2014(available online)
- ③ Takashi Nishiyama, Yutaka Yamada, Tatsuya Ikuta, Koji Takahashi, Yasuyuki Takata, Metastable Nanobubbles at the Solid-Liquid Interface due to Contact Angle Hysteresis, Langmuir, Vol. 600, pp.1-6, 2015 January

[学会発表] (計 9 件)

- ① Y. Takata, B.J. Suroto, M. Tashiro, S. Hidaka, M. Kohno & K. Takahashi, Subcooled local film boiling on a hydrophobic spot, 9th UK-Japan Seminar on Multi-Phase Flows 2013 (招待講演), 2013年09月16日～2013年09月18日, Brunel University, London, UK
- ② Y. Takata, B.J.Suroto, M. Tashiro, S. Hidaka, M.Kohno, Wettability Effects in Boiling Heat Transfer, The 8th International Conference on Multiphase Flow (ICMF2013) (招待講演),

2013年05月26日～2013年05月31日, Jeju, Korea

- ③ B. J. Suroto, M. Tashiro, S. Hirabayashi, S. Hidaka, M. Kohno, K. Takahashi, Y. Takata, A Photographic Study on the Effects of Hydrophobic-Spot Size and Subcooling on Local Film Boiling, The ASME 2013 11th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels, 2013年06月16日～2013年06月19日, 札幌
- ④ Biao Shen, Bambang Joko Suroto, Sana Hirabayashi, Masayuki Yamada, Sumitomo Hidaka, Masamichi Kohno, Koji Takahashi, Yasuyuki Takata, Observation of periodic bubble nucleation on a hydrophobic spot at negative surface superheats under subcooled conditions, 10th Heat Transfer Symposium 2014, 2014年05月06日～2014年05月09日, Beijing, China
- ⑤ Masayuki Yamada, Bambang Joko Suroto, Biao Shen, Sumitomo Hidaka, Masamichi Kohno, Koji Takahashi, Jungho Kim and Yasuyuki Takata, Effect of Dissolved Air on Subcooled Pool Boiling from a Mixed Wettability Surface, Eurotherm Seminar 101: Transport Phenomena in Multiphase Systems, 2014年06月30日～2014年07月03日, Krakow, Poland
- ⑥ Y. Takata, Effect of Dissolved Air and Subcooling on Bubble Nucleation from a Hydrophobic Spot, Gordon Research Conference: Micro & Nanoscale Phase Change Heat Transfer (招待講演) 2015年01月11日～2015年01月16日, Galveston, USA
- ⑦ 山田将之, Suroto Bambang, 平林佐那, Shen Biao, 日高澄具, 河野正道, 高橋厚史, 高田保之, 親水・撥水複合伝熱面におけるサブクール沸騰-溶存空気の影響, 第51回日本伝熱シンポジウム, 2014年05月22日～2014年05月24日, 浜松
- ⑧ 山田将之, 古里健登, Biao Shen, 日高澄具, 河野正道, 高橋厚史, 高田保之, ブクール沸騰気泡の成長におよぼす溶存空気の影響, 日本機械学会 熱工学コンファレンス 2014, 2014年11月08日～2014年11月09日, 東京
- ⑨ 山田将之, 古里健人, Biao Shen, 日高澄具, 河野正道, 高橋厚史, 高田保之, サブクール状態における撥水斑点上の単一気泡の周期的成長・離脱におよぼす溶存空気の影響, 日本機械学会九州支部総会・講演会, 2015年03月13日, 福岡

6. 研究組織

(1)研究代表者

高田保之 (TAKATA YASUYUKI)

九州大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：70171444