

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年5月31日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23656152

研究課題名（和文） 高過冷却下で存在する蒸気膜の安定性に関する研究

研究課題名（英文） Stability of Vapor Film under High Subcooled Condition

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

研究成果の概要（和文）：

超撥水面上で、過冷却下において安定的に存在する蒸気膜の性質を解明することを目的として、超撥水コーティングやテフロン(PTFE)コーティングを斑点状に施した出伝熱面を作成し、プール沸騰実験を行った。その結果、PTFEを斑点状にコーティングした伝熱面は、通常の銅面に比べて、低過熱度で沸騰を開始し、核沸騰熱伝達特性もすぐれていることが分かった。また、沸点以下で発泡を開始する現象を発見し、溶存空気が現象に深く関係していることを確認した。

研究成果の概要（英文）：

In order to disclose the characteristics of vapor film that can exist under high subcooled condition, experiments of pool boiling have been performed using superhydrophobic and PTFE spotted coatings. The results show that the surfaces with PTFE circle dots have higher heat transfer performance in nucleate boiling region and the boiling starts in lower surface superheating. It was also found that by the effect of dissolved periodic gas bubble generation can occur below boiling point.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：機械工学

科研費の分科・細目：熱工学

キーワード：伝熱機器，沸騰，超撥水

## 1. 研究開始当初の背景

近年、表面コーティング技術が著しく向上し、超親水から超撥水に渡って広範囲な濡れ性の表面が得られるようになった。研究代表者らは電解メッキで金属面上に作成した超撥水表面において、沸点以下の温度でも蒸気膜が安定して存在しうることが発見した。また、撥水と親水の両性質を組み合わせるこ

とにより、低過熱度で沸騰を開始し、優れた核沸騰伝熱特性と高限界熱流束を兼ね備えた理想的な沸騰伝熱面の実現が視野に入ってきた。このような親水撥水複合伝熱面の実用化のためには、過冷却下で蒸気膜がなぜ安定的に存在しうるのかに対する理解および沸騰開始時における発泡現象の根本的な理解が必要である。

## 2. 研究の目的

本研究目的を次の3つに大別して研究を実施した。

- (1) PTFE/TiO<sub>2</sub> 複合伝熱面の開発と沸騰特性の調査
- (2) サブクール状態における PTFE 撥水斑点状の付着蒸気泡の熱輸送メカニズム
- (3) 沸点以下の加熱面温度における周期的発泡挙動の特性および溶存空気の影響

## 3. 研究の方法

準備した伝熱面は図1に示すような直径30mmの銅ブロックである。銅ブロック中心には、表面から10, 15, 20mmの位置に伝熱面設置用の穴が空けてあり、これらの熱電対から壁面温度および熱流束を計測する。このブロックには電気ヒータが巻きつけてあり、入力電力を調節することで加熱面の温度を制御した。

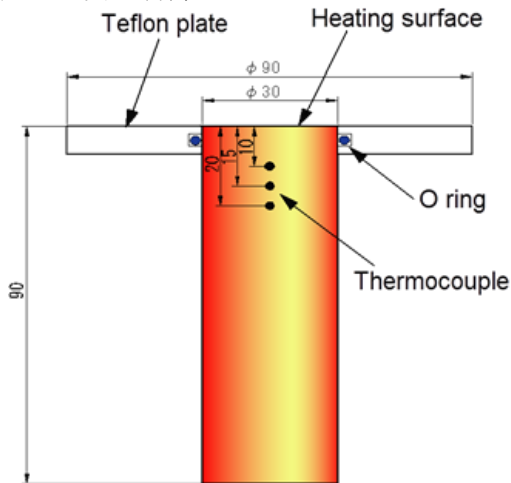


図1 伝熱面銅ブロックと熱電対位置

図2に本研究で用いた撥水・浸水コーティングのパターンの例を示す。(a)は全面TiO<sub>2</sub>超親水面,(b)は全面PTFE撥水面であり,(c)~(f)はTiO<sub>2</sub>コーティング面の上に斑点状のPTFEをコーティングしたものである。加工パターンは、PTFEの斑点径を3~6mmφ、斑点ピッチ4~7mmである。当初は、超撥水と超親水の組み合わせを検討したが、技術的な困難が生じたため、超撥水コーティングの代わりにPTFEを採用することにした。しかしながら、気泡発生にとってはPTFEで十分機能することが分かった。

これ以外にもサブクール下での気泡の挙動を観察するために、中心に単一のPTFE斑

点をコーティングした伝熱面を作成した。

実験で採用したサブクール度は0, 5, 10, 15, 20Kであった。各点で定常状態において測定した。また、標準伝熱面として、銅の鏡面仕上げ面を用いた。この標準面との比較によって伝熱特性の優劣を決定することができる。

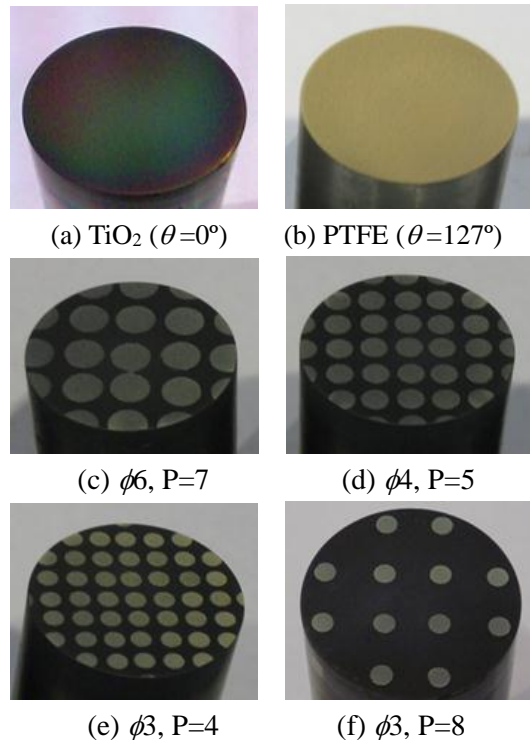


図2 伝熱面の加工パターン

## 4. 研究成果

図3に全面を鏡面仕上げした面、全面に酸化チタン膜、テフロン膜を付けた面の沸騰曲線を示す。青の矢印で示している点が発泡開始点である。(b)の面の発泡開始過熱度が低くなっており、逆に、(a)の面は発泡開始過熱度が高くなっているのがわかる。

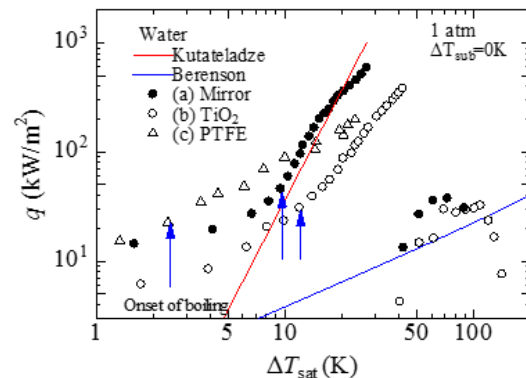


図3 銅, TiO<sub>2</sub> および PTFE 面における飽和沸騰特性

また、(b)の面は高熱流束域で熱伝達が悪くなっており、限界熱流束が低くなっている。(a)の面のデータは、ヒータの都合上、途中までしか測定されておらず、限界熱流束まで達していない。(a)の面の発泡開始過熱度が高くなったのは、超親水であることから表面のキャビティに水が満たされやすく、気泡核ができにくかったことが原因として考えられる。

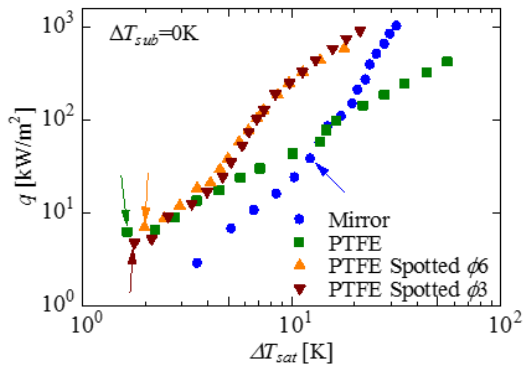


図4 銅, PTFE, PTFE 斑点伝熱面における飽和沸騰特性

図4に、鏡面仕上げ面、テフロン加工を全面に施した面、テフロン加工を斑点状に付けた面の実験結果を示す。図の矢印は発泡開始点を示す。過去の研究結果と比べて、撥水加工を施した面の発泡開始過熱度が小さくなっているのがわかる。これは、おそらく実験前の撥水面の接触角が  $130^\circ$  程度あり、撥水性が向上していたからではないかと考えられる。

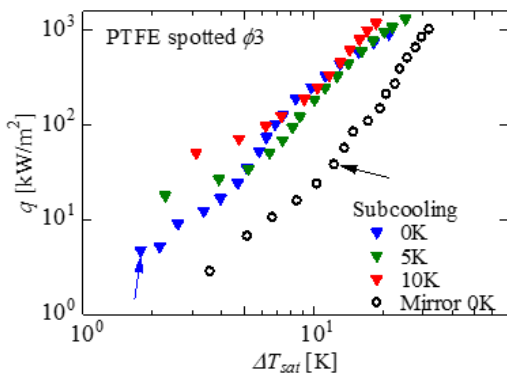


図5 PTFE 斑点径φ3における沸騰特性に及ぼすサブクールの影響

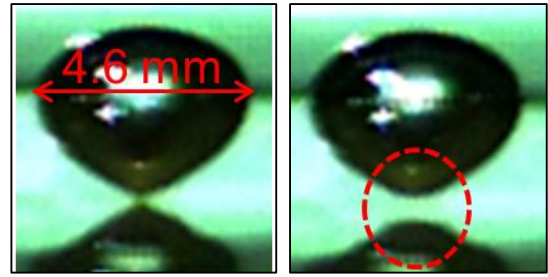
図5は PTFE 斑点径 3mm の伝熱面における沸騰特性である。サブクールの影響を示した。銅面に比べて全体的に伝熱特性が向上して

いることがわかる。また、沸騰開始過熱度も低い。



図6 PTFE 斑点径φ3における沸騰様相 ( $q=71.8\text{kW/m}^2$ ,  $\Delta T_{sat}=4.8\text{K}$ ,  $\Delta T_{sub}=10\text{K}$ )

図6はサブクール時における沸騰様相の写真である。気泡は PTFE 斑点を覆い、上下に震動しながらも離脱することはほとんどない。熱伝達の機構としては、固気液3相回線からの蒸発と気泡頂部での凝縮による潜熱による輸送と考えられる。すなわち、気泡がヒートパイプのような役割を果たしていると考えている。

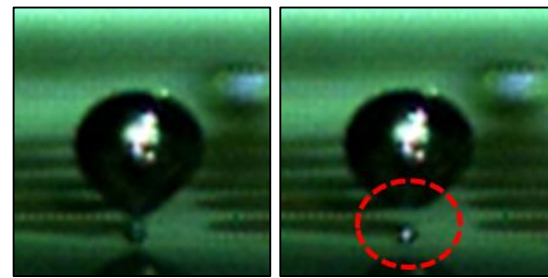


0 ms

0.5 ms

(a) Mirror

$q=24.7\text{kW/m}^2$ ,  $\Delta T_{sat}=8.6\text{K}$



0 ms

0.5 ms

(b) PTFE spotted φ4, P=5  
 $q=22.3\text{kW/m}^2$ ,  $\Delta T_{sat}=4.5\text{K}$

図7 気泡離脱時の写真

図7は銅面および PTFE 斑点から気泡が離脱する前後の写真を示したものである。銅面の場合には気泡の離脱とともに伝熱面から蒸気は無くなるが、PTFE の場合は常に蒸気が存在する。したがって、PTFE の場合、気泡の成長離脱サイクルにおいて待ち時間が無く、すぐれた気泡核として作用することが分かる。

これが核沸騰領域における良好な伝熱特性の理由である。

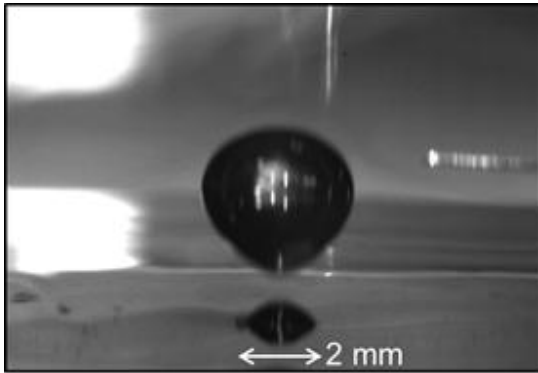


図8 沸点以下の加熱面温度での PTFE 斑点からの気泡離脱( $\phi=2$ ,  $T_w=99.9^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T_{sub}=10\text{K}$ )

さて、サブクール下においては伝熱面温度が沸点以下においても周期的に気泡が成長して離脱する現象が観察された。図8の写真はその一例である。このときの気泡内部の温度を計測した。計測位置を図9に示す。

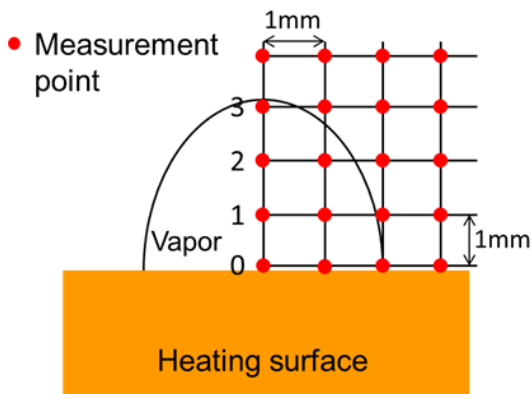


図9 気泡内の温度計測位置

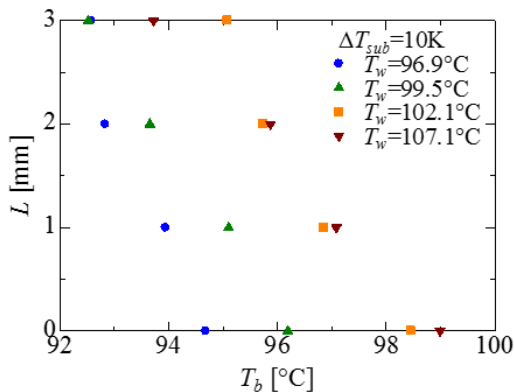


図10 気泡内部の温度分布

測定結果を図10に示す。内部の温度はいずれの位置においても沸点以下である。加熱面に近い位置では温度が高く、頂部に近くなる

につれて直線的に温度が下がっていることが分かる。

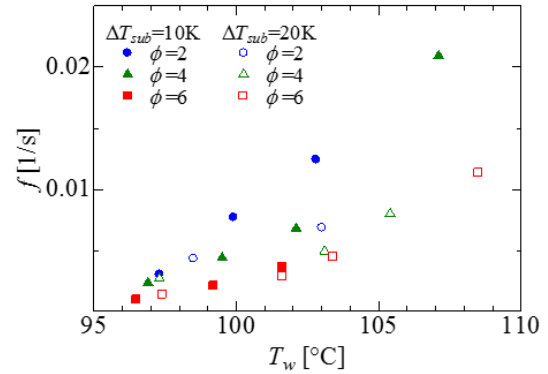


図11 気泡離脱頻度

この時の気泡離脱頻度を図11に示す。加熱面温度が高くなるにしたがって離脱頻度は増加するが、飽和沸騰に比べると3桁ほど小さい。

離脱気泡を捕集してみたところ、不凝縮性のガスが含まれていることが判明した。したがって、沸点以下で気泡が周期的に成長・離脱するメカニズムには溶存空気が深く影響を及ぼしているものと思われる。すなわち、PTFE に溶存空気が凝集し気泡核を形成すると気泡内部は水蒸気と空気の混合物となるが、空気分圧分だけ水蒸気の飽和温度が低下するために、沸点以下の壁面温度でも蒸発は可能である。その際に徐々に溶存空気が気泡内部に溜まっていき、あるサイズになったときに浮力によって伝熱面から離脱するのである。このような現象は沸騰現象といえるのかどうかは疑問であるが、加熱面温度を上昇させていくと通常のサブクール沸騰に移行する。

結論として撥水面上にサブクール下でも存在する蒸気膜は空気と蒸気の混合物であると言える。今後は溶解度を測るとともに溶存空気を完全に排除した状態での実験が必要であろう。

#### 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6件)

(1) E.-S. R. Negeed, S. Hidaka, M. Kohno, Y. Takata, High speed camera investigation of the impingement of single water droplets on oxidized high temperature surfaces, International Journal of Thermal Sciences, Vol.63, pp.1-14, 2013 January

ンス 2012, 2012 年 11 月

(2) Takashi Nishiyama, Takanori Nakayama, Koji Takahashi, Yasuyuki Takata, The effect of nanocarbon materials on surface wettability, Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Forum on Heat Transfer, IFHT2012-173, Nagasaki, 2012 November

(3) Fukatani, Y., Fukuda, S., Hidaka, S., Kohno, M. and Takata, Y., Heat Transfer of Small Droplet Impinging onto a Hot Surface (Effects of Droplet Diameter, Impinging Velocity, Surface Roughness), Proceedings of the ECI-8<sup>th</sup> International Conference on Boiling and Condensation, Lausanne, p\_1521, 2012 June

(4) Tashiro, M., Suroto, B.J., Kakitani, T., Hidaka, S., Kohno, M. and Takata, Y., Subcooled Boiling from a Surface with Spotted Patterns of Hydrophilic and Hydrophobic Coatings, Proceedings of the ECI-8<sup>th</sup> International Conference on Boiling and Condensation, Lausanne, p\_1520, 2012 June

(5) Yasuyuki Takata, Sumitomo Hidaka, Masamichi Kohno, Effect of Surface Wettability on Pool Boiling -Enhancement by Hydrophobic Coating-, International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, Vo.20, No.1, 1150003, 2012 March

(6) Y. Takata, S. Hidaka, K. Tagashira, S. Fukuda, B. J. Suroto, M. Kohno, Effect of Surface Conditions on Boiling and Evaporation, Proceedings of International Conference on Air-Conditioning & Refrigeration 2011, ICACR2011-KN-3, July 6-8, 2011, Yongpyong Resort, Gangwon-Do, Korea

[学会発表] (計 3 件)

(1) 田代雅浩, B.J. Suroto, 柿谷継孝, 日高澄具, 河野正道, 高田保之, 斑点状に撥水コーティングを施した伝熱面からのサブクール沸騰, 熱工学コンファレンス 2011, 2011 年 10 月

(2) 田代雅浩, B.J. Suroto, 日高澄具, 河野正道, 高田保之, 親水・撥水複合伝熱面におけるサブクール沸騰, 第 49 回日本伝熱シンポジウム

(3) 平林佐那, 田代雅浩, B.J. Suroto, 日高澄具, 河野正道, 高田保之, 親水・撥水複合伝熱面における沸騰伝熱-PTFE 斑点サイズ及びサブクールの影響-, 熱工学コンファレ

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

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし