

# 超撥水面における凝縮熱伝達

## Condensation Heat Transfer on a Super Hydrophobic Surface

高橋 章・神永 文人\*・松村 邦仁\*

福島工業高等専門学校機械工学科

\*茨城大学工学部機械工学科

Akira Takahashi, Fumito Kaminaga\*, and Kunihito Matsumura\*

Fukushima National College of Technology, Department of Mechanical Engineering

\*Ibaraki University, Department of Mechanical Engineering

(2010年9月17日受理)

Condensation heat transfer technologies are applied to heat pump systems, heat pipes etc. Dropwise condensation heat transfer coefficient is about 20 times in Filmwise condensation heat transfer coefficient as large. A possibility that it improves further by using super hydrophobic surface is expected. Then, in the purpose of investigating condensation heat transfer characteristics on a super hydrophobic surface, experiments had been carried out. Super hydrophobic surfaces are made by coating PTFE (polytetrafluoroethylene), using Alkyl Ketene Dimers or plating etc. The coating PTFE was used at this study. Also, a hydrophilic surface was used to compare with the super hydrophobic surface.

Super hydrophobic and hydrophilic treatment were done at 40 mm × 40 mm area of a metal plate. Experiments were carried out with pure water in pressure of 101 kPa and steady condition. The circulating water flow was 200 liter per hour. Atmosphere in a vessel was pure steam or steam including air. The condensation surface was stood vertical direction. Temperatures were measured vertical and horizontal direction by thermocouples. Heat flux and temperature of cooling surface was calculated by the horizontal temperature distribution.

The results were obtained as follows.

The super hydrophobic surface did not have a large condensation heat transfer coefficient. The super hydrophobic nature appears with a fractal micro structure and existing  $-CF_3$ . But, the super hydrophobic nature was lost by filling with water condensate of steam in the fractal micro structure.

**Keywords:** condensation, heat transfer, super hydrophobic surface, hydrophilic surface

### 1. 緒言

近年、表面処理技術が発展して、水が非常に濡れやすい超親水面や非常に濡れにくい超撥水面処理が応用されるようになってきた。超親水性については酸化チタンの表面に紫外線を照射すると接触角が徐々に減少してやがてゼロになる「光励起超親水性現象」が1995年に発見された<sup>(1)</sup>。超撥水性については、フッ素ポリマーの粒子をニッケルメッキ中に分散させた分散メッキ法を利用した方法、アルキルケテンダイマーを融解後、固化させることによりフラクタル表面を得る方法、PTFE(ポリテトラフルオロエチレン)を電着塗装する方法などがある<sup>(2)</sup>。超撥水性は、フラクタル性の微細凹凸面内の空間に存在する空気と  $CF_3$  基が

空気側界面に向かって高密度に配向した塗膜を形成することによって発現する。超撥水面は、防汚の目的や、船底の流動抵抗低減<sup>(3)</sup>の目的で用いることが考えられている。

凝縮熱伝達は、蒸気から液体へ相変化する際の熱伝達であり、ヒートポンプシステムや高性能伝熱機器であるヒートパイプなどをはじめとして、多岐にわたって利用されている。凝縮してできた液相の形状が液滴である滴状凝縮は、形状が液膜である膜状凝縮に対して20倍近く高い伝熱性能を有する。超撥水面は、水を非常に良く弾く性質があって、滴状凝縮の伝熱性能を向上できる可能性が考えられる。

本研究では、超撥水面における凝縮熱伝達特性

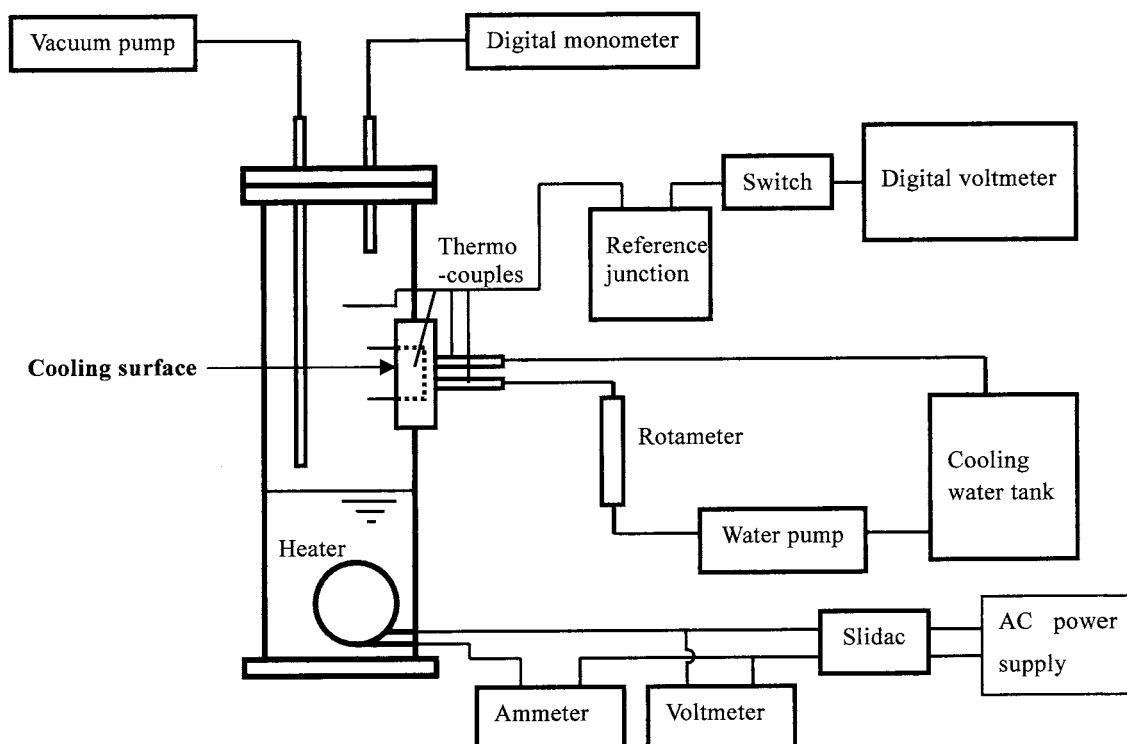


Fig.1 Experimental apparatus

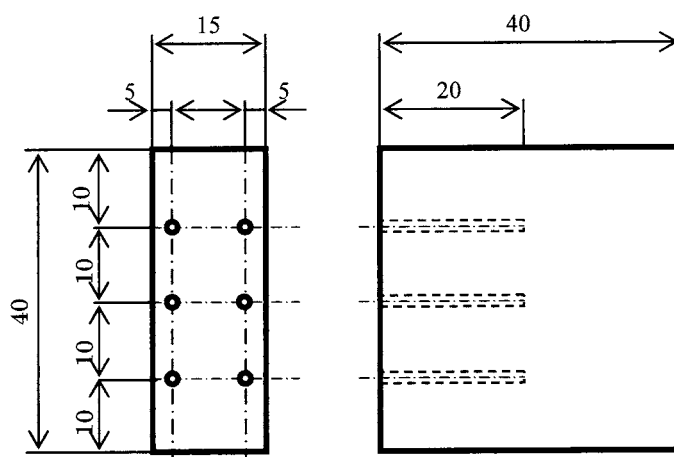


Fig.2 Detail of cooling plate

を調べるために実験的研究を行った。なお、比較のために親水面の実験も行った。

$T_c$  : 金属板冷却水側平均温度 [°C]  
 $T_{sat}$  : 蒸気温度 [°C]

2. 記号

$h$  : 凝縮熱伝達率 [W/(m<sup>2</sup>·K)]  
 $q$  : 熱流束 [W/m<sup>2</sup>]  
 $T_w$  : 金属板蒸気側面平均温度 [°C]

$\lambda$  : 金属板の熱伝導率[W/(m·K)]  
 $\lambda_L$  : 液体の熱伝導率[W/(m·K)]  
 $\mu$  : 液体の粘性係数[Pa·s]  
 $\nu$  : 液体の動粘性係数[m<sup>2</sup>/s]

- $L$  : 金属板の厚さ[m]  
 $l$  : 代表長さ[m]  
 $\Gamma$  : 冷却面の単位幅あたりに流下する液体の質量流量 [kg/(m·s)]  
 $Re_f$  : 膜レイノルズ数 [-]  
 $Nu$  : ヌッセルト数 [-]  
 $Nu^*$  : 凝縮数 [-]

### 3. 実験装置および実験方法

実験装置の系統を Fig. 1 に示す。実験装置は、水蒸気を発生させて冷却面で凝縮させ、その際の温度や圧力を測定できるようにしたもので、密閉容器、冷却面、蒸気発生用ヒータ、圧力計、熱電対、基準接点、デジボル、冷却水タンクなどで構成されている。

Fig. 2 に冷却面の詳細を示す。冷却面は、40 mm × 40 mm の金属板の面に表面処理して用いた。金属板の厚さは 15 mm であり、超撥水面はアルミニウム、親水面は銅を用いた。図示しているように、垂直に配置された金属板の側面の 6 個所に直径 0.6 mm、深さ 20 mm の穴をあけ、熱電対が挿入できるようにしてある。これにより、垂直方向と水平方向の温度が測定できる。熱電対は、シース径 0.5 mm の K 型を用いた。蒸気温度も同じ熱電対を用いて密閉容器内温度を測定した。超撥水面は、(株)日立製作所日立研究所で PTFE(ポリテトラフルオロエチレン)を電着塗装する処理を行っていた。親水面は、ガラス皮膜が形成される市販の自動車用品を用いて作製した。使用液体は純水(精製水)を用いた。この金属板は、厚さ 20 mm のポリカーボネート製ホルダーにはめ込んで、密閉容器の側面に設置した。なお、下部からの蒸気流の影響がないように、カバーを取り付け、蒸気が冷却面の垂直方向からのみ移動するようにした。密閉容器はポリカーボネートパイプとベークライト製平板で作製した。減圧には、ダイヤフロム型真空ポンプを、圧力測定には、デジタルマノメータを用いた。蒸気発生には、渦巻型ヒータを用い、50 Hz、100 V の交流電源をスライダックで調節して電力を供給した。実験条件は、圧力、冷却水量を同一として定常状態で行った。圧力は 101 kPa、冷却水量は 200 l/h とした。冷却水量は比較的多いため十分な冷却ができ、熱流束の増加に対して、冷却水出入口温度差はほとんど変わらなかった。

超撥水面は、不凝縮性ガスである空気が存在する場合としない場合の 2 通りとし、比較のための親水面は、不凝縮性ガスが存在する条件で行った。不凝縮性ガスである空気がない場合、すなわち純蒸気での実験のためには、十分な脱気を行った後、加熱により 101 kPa まで圧力を上昇させた。

冷却面温度  $T_w$  は、金属板側面に挿入した熱電対による温度指示を外挿して求めた。また、凝縮によって放出する潜熱は、金属板を通して冷却水に伝わるため、金属板の水平方向温度分布を用いて、熱伝導による熱流束として(1)式で求めた。 $T_w$ 、 $T_c$  は垂直方向 3 点の温度を平均して、それぞれの値とした。

$$q = \lambda \frac{(T_w - T_c)}{L} \quad (1)$$

### 3. 実験結果および考察

Fig. 3 に熱伝達率の比較を示している。

超撥水面は、不凝縮性ガスである空気を含んでも含まなくてもほぼ同じ値となっている。凝縮熱伝達においては、不凝縮性ガスを含むことによって、冷却面近傍の分圧が低くなり、熱伝達性能が低下するということが知られている<sup>(4)</sup>が、不凝縮性ガスの悪影響は明確ではなかった。観察において、不凝縮性ガスである空気を含んでも含まなくても、超撥水面では水滴の接触角が小さくなり、また水滴の径も大きくなって、超撥水性が失われていることがわかった。この原因を調べるために、

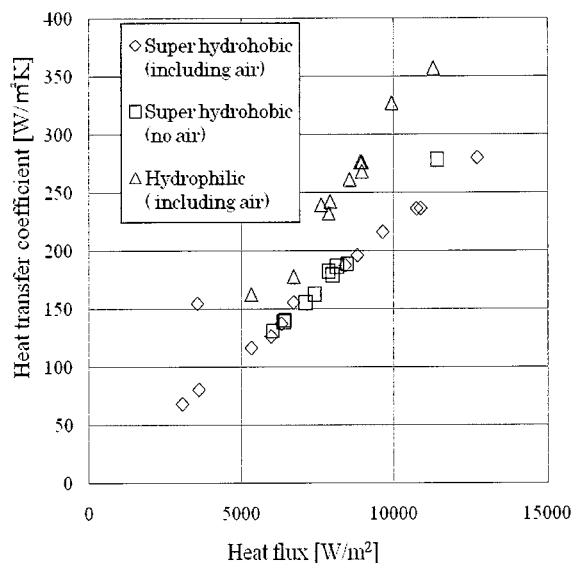


Fig.3 Heat transfer coefficient

超撥水面を十分に乾燥させ、大気中で水滴を垂らして観察したところ、再び超撥水性を示した。

Fig. 4 に超撥水面の SEM 写真を示す。写真からフラクタルで微細な構造とその中の空間が明確に確認できる。水分子の大きさは、おおよそ  $0.0003 \mu\text{m}$  であるので、この空間に水蒸気が入り込み、凝縮して水が溜まるのが可能である。凝縮が進んで空間が水で満たされると、撥水効果のある空気が無くなる。また、超撥面上の水滴と付着し、水滴を保持してしまう。このようにして超撥水性が失われたと考えられる。空気が無い場合には、超撥水性を発現する条件が欠けているので、微細構造内に水が満たされることと、冷却面上の水滴を保持することにより凝縮熱伝達が低下すると考えられる。空気の存在の有無の違いで、グラフ上は熱伝達率の差が無いので、分圧の低下による性能低下よりも、水滴の保持による熱抵抗増大が支配的であるとされる。

これらの結果から、超撥水面は凝縮熱伝達には適さないと言えることができる。

Fig. 5 は、膜レイノルズ数  $Re_f$  に対して、ヌッセルト数  $Nu$  を示し、無次元表示したものである。

$Re_f$  は(2)式、 $Nu$  は(3)式で計算した。

$$Re_f = \frac{4\Gamma}{\mu} \quad (2)$$

$$Nu = \frac{hl}{\lambda_L} \quad (3)$$

さらに Fig. 6 は凝縮数  $Nu^*$  であり、(4)式で計算した。

$$Nu^* = \frac{h(v^2/g)^{1/3}}{\lambda_L} \quad (4)$$

Fig. 5 および Fig. 6 には、3種類の実験値の他に参考のために Nusselt の膜状凝縮の理論式<sup>(5)</sup>から求めた値も示している。理論式から求めた値は、3種類の実験値よりもはるかに大きな値となっている。この理由は、まず理論式から求めた値は純蒸気に対する式である。それから、今回の実験では膜レイノルズ数が非常に小さく、通常、膜レイノルズ数が 100 以上でない、理論値と実験値はあまり合わない。それから、理論式による値は、粘性力と重力の釣り合いから求められた、液膜厚さが非常に薄い場合の値であるが、今回の実験では、冷却面が小さいために、冷却面の縁の部分が表面張力によって影響を受け、面全体に液膜の厚

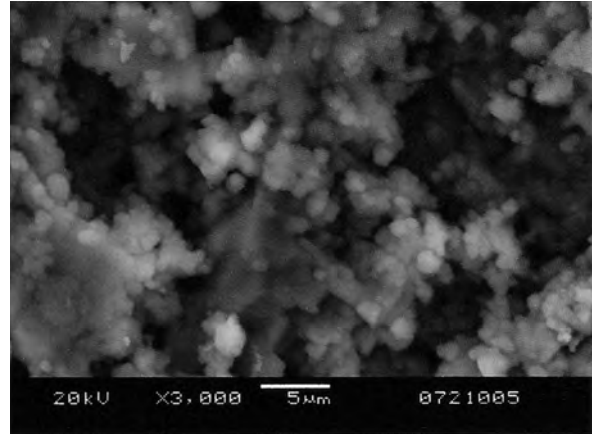


Fig.4 Photograph of Super Hydrophobic surface

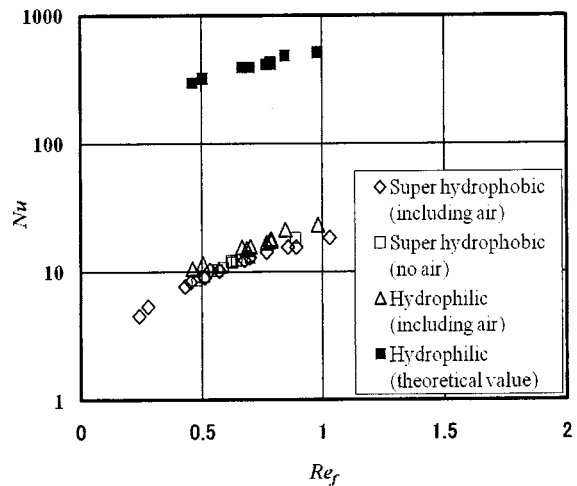


Fig.5  $Nu$  versus  $Re_f$

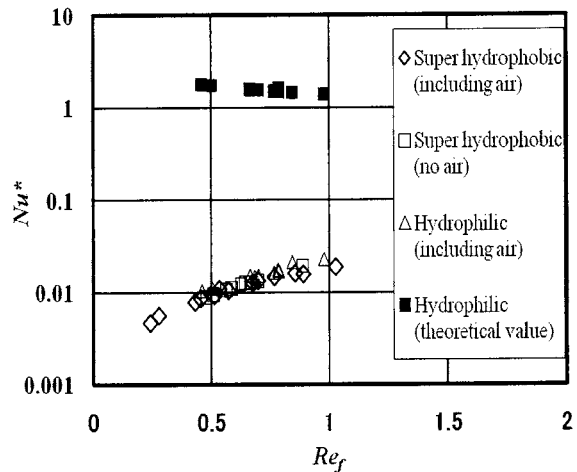


Fig.6  $Nu^*$  versus  $Re_f$

さが増してしまった。以上のような要因が考えられる。

#### 4. 結論

超撥水面における凝縮熱伝達特性を把握するために実験的研究を行った結果、次のような知見を得た。

- (1) 超撥水面における凝縮は、不凝縮性ガスである空気が存在する場合でも存在しない場合でも、超撥水性を発現するための微細構造部で水蒸気が凝縮してしまい、微細構造部外側の水滴を保持してしまうことにより超撥水性を失う。
- (2) 超撥水性を失った結果、凝縮した水滴が流下しないで停滞するために、大きな水滴となり、冷却面と蒸気間の熱抵抗となって、膜状凝縮よりも伝熱性能が低下する。

#### 謝 辞

超撥水の表面処理をしていただいた㈱日立製作所日立研究所、ならびに実験に協力いただいた平成

21 年度卒研生の菅野拓郎君、松崎充宏に深く感謝します。

#### 文 献

- 1) 高田 保之：濡れと相変化熱伝達－超親水と超撥水－、日本機械学会誌、112-1086、(2009) pp.398-401
- 2) 株) 東レリサーチセンター：高撥水技術の最新動向－超撥水材料から最新の応用まで－、(2007) p.25
- 3) 松村 邦仁、神永 文人、齋藤 寛：超撥水面への空気供給による摩擦抵抗低減に関する研究：第1報、気相膜形成時の流動状態と安定性（〈小特集〉異相界面における諸現象の物理）、日本機械学会論文集 B 編 68(671)、(2002) pp.1857-1863
- 4) 西川 兼康、藤田恭伸：伝熱学、理工学社、(1985) p.285
- 5) Nusselt, W. : *Die oberflächenkondensation des wasser dampfes*, Zeitschr., Verein Deutscher Ingenieur (VDI) 60-27、(1916) p.541