

疎水・親水マイクロ複合伝熱面の凝縮熱伝達促進効果

徳永 敦士^{*1}, 鶴田 隆治^{*2}

Enhancement of condensation heat transfer on hydrophobic and hydrophilic micro-structured surfaces

Atsushi TOKUNAGA^{*1} and Takaharu TSURUTA^{*2}

^{*1} Department of Mechanical Engineering, National Institute of Technology, Ube College
2-14-1 Tokiwadai, Ube-shi, Yamaguchi 755-8555, Japan

^{*2} Department of Mechanical Engineering, Kyushu Institute of Technology
1-1 Sensui-cho, Tobata-ku, Kitakyushu-shi, Fukuoka 804-8550, Japan

Abstract

It is well known that the dropwise condensation on a hydrophobic surface has a larger heat transfer coefficient than the filmwise condensation. Larger droplets in ordinary systems depart from the condensing surface by the gravity or the shear-force of vapor flow and the bare surface is created for the rapid condensation, resulting in higher heat transfer performance. However, those forces cannot be expected in the micro- and nano-systems because the spaces for the liquid and vapor flow are limited. In order to obtain the larger condensation heat transfer rate, it is necessary to use high heat transfer characteristics of microscopic droplets together with developing a new method for removing the grown droplets from the condensing surface. A challenging work has been carried out in the present paper to remove the droplets effectively, where the micro-scale groove patterns were fabricated with the hydrophobic and hydrophilic surfaces. The experimental results have shown that the condensation heat flux on the micro-structured surface is 1.4 times enhanced compared with the milli-scale structure. For further heat transfer enhancement, improving the drainage ability is required to reduce the condensate flooding.

Keywords : Condensation heat transfer, Micro-structure, Hydrophobic and Hydrophilic, MEMS, Enhancement, Dropwise condensation

1. 緒 言

高熱輸送デバイスの小型・高性能化を目的とし、相変化伝熱の更なる伝熱促進が望まれている。中でも凝縮においては、滴状凝縮が極めて高い熱輸送特性を示すことが古くから知られており（棚沢, 1976 ; Tanasawa, 1991, Rose, 2002）、凝縮伝熱促進への活用に再び注目が集まっている。

滴状凝縮においては離脱液滴が熱輸送特性に影響し、一般にその離脱径が小さければ熱輸送特性は向上する。そのため、蒸気流によるせん断力や重力による体積力の利用が液滴離脱促進法として主に考えられてきた。しかしながら、電子デバイスなどのマイクロシステムにおいては体積力よりもむしろ表面張力が支配的となり、また空間的な制限のある状況下ではこれらの効果は期待できない。すなわち、マイクロチャンネルなどの代表寸法が小さい系に滴状凝縮を活用しようとする場合、液滴を積極的に排除する機構が必要となる。

著者らは、これまでに気液界面の伝熱特性に着目した滴状凝縮実験において、1kPa程度の低圧水蒸気では半径7 μ m程度の液滴が滴状凝縮熱伝達に最も貢献度の高いことを明らかにしており（Tokunaga et al., 2011）、このミクロンオーダーの液滴の高い熱輸送能力を活用する機能性伝熱面の創製を考えた。その主な特徴は、疎水面と親

No.18-00149 [DOI:10.1299/transjsme.18-00149]

^{*1} 正員, 宇部工業高等専門学校 (〒755-8555 山口県宇部市常盤台 2-14-1)

^{*2} 正員, フェロー, 九州工業大学 大学院 機械知能工学研究系 (〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町 1-1)

E-mail of corresponding author: a_tokunaga@ube-k.ac.jp

水面をマイクロスケールで交互に配置し、疎水面に形成される液滴を親水面に積極的に排除しようとする点にある。

これまでに、ミリスケールまたはサブミリスケールの幅を有する複合伝熱面による凝縮実験は行われている。山内らは、疎水・親水面の面積比が 1:1 の場合、熱伝達特性は双方の単純な平均とはならず、高い値となること、またパターン分割を多くするほど熱伝達特性が向上することを報告している（山内他, 1985）。また、Izumi らは伝熱面に 2mm 程度のグルーブ構造を設けて液滴の離脱を促進し、伝熱特性が向上することを報告している（Izumi et al., 2004）。最近では、Peng らが、銅表面に 0.46mm~2.30mm の幅の疎水面を親水面と交互に配置するパターンで実験を行っている。滴径分布と熱流束を計測したところ疎水面幅 0.55mm、離脱液滴半径にして約 0.25mm の場合に最も高い熱輸送特性を示すことを報告している（Peng et al., 2015）。また、M. Grooten らはポリフッ化ビニリデン（PVDF）、チタンコーティング、さらに PVDF にチタンコーティングを 1mm 幅で 3mm 間隔に 19 度傾けて配置した凝縮面を作製し、PVDF 面における滴状凝縮と比較して PVDF にチタンコーティングを配置した複合凝縮面で伝熱特性が向上することを示している（Grooten and Geld, 2012）。さらに、A. Chatterjee らは、疎水面に孤立した円状の親水面を規則的にパターンニングした凝縮面を作製し、直径 0.25mm の円状パターンにおいて、全面疎水面の滴状凝縮よりも熱伝達率が向上することを示している（Chatterjee et al., 2014）。このように、複合伝熱面を製作することにより凝縮熱伝達を促進しようとする研究は多くなされているものの、その多くはミリスケールであり、マイクロスケールの液滴の高い熱輸送特性を積極的に活用しようとする報告は少ない。

本研究では、スペースの極小化や高熱輸送能力が要求される課題に対し、凝縮伝熱への貢献度の最も高い数 μm 程度の微小液滴を活用することにより、滴状凝縮熱伝達を越える疎水・親水のマイクロ複合伝熱面の製作が必要と考え、その伝熱特性の評価を行った。

2. ミクロサイズの疎水・親水面からなる複合伝熱面による凝縮伝熱促進効果の予測

前述したように、滴状凝縮の熱伝達に最も寄与する液滴がミクロンオーダーであることから、凝縮面上にこれらの微小液滴を分布させる構造を形成することができれば、面平均の伝熱特性は大きく向上することが期待される。そこで、微小液滴を活用するマイクロ複合伝熱面の有効性を確認するため、疎水面と親水面とをミクロンサイズで交互に配置することによって凝縮熱流束にどの程度の増大が期待できるかをまず予測する。疎水面の面積を A_d 、親水面の面積を A_f 、両者を合わせた伝熱面積を A とし、滴状凝縮熱伝達率 h_d と膜状凝縮熱伝達率 h_f を用いれば、疎水面の 100%が滴状凝縮に活用される場合の面平均熱流束は、過冷度を ΔT として次式で表される。

$$q = \frac{1}{A} (h_d A_d + h_f A_f) \Delta T \quad (1)$$

ここで、疎水・親水面の幅がミクロンオーダーに狭い場合には、凝縮液によって凝縮面のパターンが覆われてしまうことが容易に推察される。現に、後述するようにその影響が無視できない状況のあることから、疎水面がミクロンオーダーの液滴のみによって活用される面積割合として η を導入し、次式により評価する。

$$q = \frac{1}{A} (h_d A_d \eta + h_f A_f + h_f A_d (1 - \eta)) \Delta T \quad (2)$$

当然のことながら、 $\eta = 1$ においては疎水面全域において微小液滴による滴状凝縮が生じ、式(1)となる。

滴状凝縮の熱伝達率 h_d は、滴径分布から予測することができ、次式で与えられる（幡宮, 田中, 1986a, 1986b, Tanaka, 1975）。

$$\frac{h_d}{h_i} = \int_{R_{min}}^{R_{max}} \frac{2\pi}{3.5} r_1 r^2 \left(1 - \frac{r_{cri}}{r} \right) \ln \left(1 + 3.5 \frac{r}{r_1} \right) N(r) d(\ln r) \quad (3)$$

ここで、 h_i は気液界面熱伝達率、 r_l は液滴内熱伝導抵抗と気液界面抵抗が等しくなる特性寸法、 r_{cri} は熱力学的限界半径であり、最大半径 R_{max} は疎水面の幅の半分と考える。気液界面の熱伝達率 h_i については、気体分子運動論に基づいた式がある (Labuntsov and Kryukov, 1979)。

$$h_i = \frac{2\bar{\sigma}_c}{2 - 0.798\bar{\sigma}_c} \frac{1}{\sqrt{2\pi R T_v}} \frac{h_{fg}^2}{v_g T_v} \quad (4)$$

R は水蒸気的气体定数、 v_g は気体の比体積、 T_v は蒸気温度、 h_{fg} は凝縮潜熱である。 $\bar{\sigma}_c$ は凝縮係数であり、分子動力学法などによる検討が行われており (Nagayama and Tsuruta, 2003, Tsuruta et al., 1999, Tsuruta and Nagayama, 2004)、本実験では、著者らの低圧水蒸気による滴状凝縮実験により得られた 0.8 を用いた。滴径分布 $N(r)$ については田中らによる以下の理論式が適用できる。

$$N(r) = 0.118 R_{max}^{-0.321} r^{-2.679} \quad (5)$$

以上の関係式から、後に述べる低圧水蒸気に対する実験条件 (表 1 参照) を想定した場合、滴状凝縮の熱伝達率として疎水面幅 $12\mu\text{m}$ に対して $h_d = 83.0\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 程度となる。

親水部については、疎水面の膜厚が数ミクロン程度、もしくはそれ以下と考えるため、一般的な層流膜状凝縮を仮定することが妥当と判断し、以下の式を用いた (藤井, 上原, 1973)。

$$Nu_x = 0.45 \left\{ 1.20 + \frac{Pr_L h_{fg}}{c_{pL}(T_v - T_s)} \left(\frac{\rho_v \mu_v}{\rho_L \mu_L} \right)^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{3}} (Re_x)_L^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

Nu はヌセルト数、 Pr はプラントル数、 Re はレイノルズ数、 c_p は比熱、 T は温度、 ρ は密度、 μ は粘度である。この物性値には実験条件と合わせて 2kPa の物性値を用いている。レイノルズ数の導出においては流路長さを考えて実験で使用する凝縮面の直径である $x=19.8\text{mm}$ を用いた。レイノルズ数の評価に必要な流速についても、実験条件を考えてヒーターの加熱量及び動圧から計算した流速 4.8m/s を用いる。

なお、本論文においては、ミリあるいはサブミリスケールの複合伝熱面との差異を明らかにすることを目的としている。つまり、疎水・親水のパターン幅をミクロンオーダーで製作することの有効性を示すために、疎水面幅として一般的な滴状凝縮における離脱半径 1.5mm を想定した疎水面幅 3.0mm の結果と比較することにする。この際の熱伝達率としては、著者らの滴状凝縮実験で評価された $h_{macro}=43.0\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ (徳永他, 2010) を用いて次式とした。

$$q = \frac{1}{A} (h_{macro} A_d + h_f A_f) \Delta T \quad (7)$$

図 1 に、 $A_d : A_f = 1 : 1$ ($20\mu\text{m}$, $20\mu\text{m}$) に対して予測した凝縮熱流束を示す。最も貢献度の高い液滴寸法である $7\mu\text{m} \sim 10\mu\text{m}$ 程度の液滴を活用することを目的とした設計とし、疎水面で発生する液滴の排水を確保するために親水面の幅も等しくした。疎水面全域が滴状凝縮に活用できる場合の式(1)が当然ながら最も高い値を示す。さらに、疎水面上の滴状凝縮の割合が低下する程熱流束は低下し、膜状凝縮の値に近づいている。ここで、式(2)と式(7)を比較すると、離脱半径 1.5mm を想定して複合伝熱面を製作した場合は、マイクロ複合伝熱面において滴状凝縮が約 50% の面積割合の熱流束とほぼ同等の値を示していることが分かる。すなわち、マイクロ複合伝熱面では疎水面全域で滴状凝縮が活用できれば、ミリスケールで製作した伝熱面と比較して約 2 倍の高い熱輸送特性を

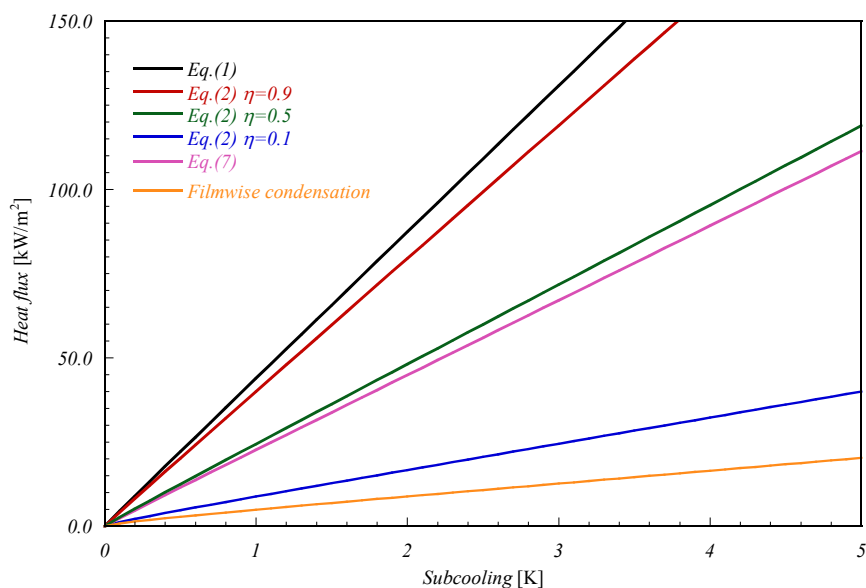


Fig.1 Estimation of condensation heat flux on structured surfaces with a same hydrophilic/hydrophobic surface ratio (1:1). Micro structured surface (Eq. (1)) has a possibility to increase heat transfer rate up to around two-times the milli-scale structure (Eq. (2)).

得ることができるとともに、その割合が 50%程度にとどまったとしても、ミリスケールの複合伝熱面と同等であり、有効な伝熱促進技術になり得る可能性が高いと判断する。

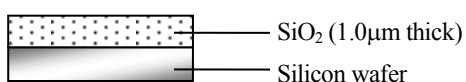
3. 疎水・親水のマイクロ複合伝熱面の製作

前章の予測を元に、近年の MEMS 技術を用いて、凝縮面上に疎水・親水のマイクロ複合伝熱面を形成することを計画した。疎水面と親水面を交互に配置した構造であり、疎水面で滴状に凝縮し、疎水面の幅を越えて成長する液滴は親水面に吸収されるため、液滴の離脱径を疎水面幅に制限できると考えた。

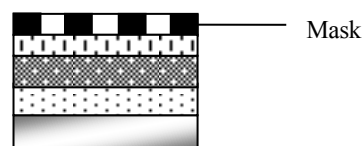
本研究では、親水面はシリコンウエハ表面を熱酸化により酸化膜 (SiO₂) を成膜し、撥水部分は CYTOP (旭硝子株式会社製) を用いることにした。製作フローを図 2 に示す。基板は厚さ 525 μ m、直径 ϕ 19.8mm のシリコンウエハであり、まずアセトン、IPA 及び希フッ酸により洗浄した後、熱酸化炉で表面層約 1 μ m を変質させて親水面とした。その後、CYTOP を異なる膜厚で塗布し、バイキングを行った。次にフォトレジストを塗布し、疎水面幅 20 μ m、親水面幅 20 μ m を交互に配置したマスクパターンを両面マスクアライナーによってレジスト表面に転写した。半径が 10 μ m 以下の液滴による滴状凝縮を想定するとともに、疎水・親水面の面積比を 1:1 に設定している。実際のパターン形成加工はドライエッチングによって行い、その後にフォトレジストを除去して疎水面が露出される。なお、疎水面となる CYTOP の膜厚はレーザー顕微鏡により計測し、本研究では 360nm, 800nm, 1700nm の三通りとした。その膜厚を高さとする凹凸構造の親水・疎水複合伝熱面が形成され、疎水面である凸部の幅による液滴サイズの制御と、親水部である凹部による凝縮液排除機能を活用することを目的としたものであり、後に述べる理由から CYTOP の膜厚、すなわち凹部の深さによる伝熱性能の比較を行っている。

製作した複合凝縮面の顕微鏡写真を図 3(a)に示すとともに、空気中においてペルチェ冷却素子上で観察した結露の様子を図 3(b)に示す。実際に製作した複合凝縮面は、露光や現像作業において設計したマスクパターンよりも親水面幅が拡大してしまっただけで、疎水面幅が設計値よりも狭く 12 μ m、親水面幅が逆に 28 μ m と広くなり、疎水・親水面の面積比は 3:7 となった。なお、結露の様子から、親水面である SiO₂部と疎水面となる CYTOP 部の接触角度は、それぞれ約 30°、100° と評価された。実験装置に取り付ける際は、凝縮面を鉛直面とし、パターンの向きが蒸気の流れと同じく水平方向になるように設置している。

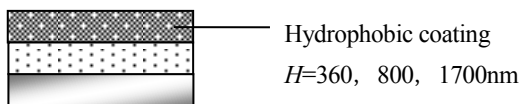
1. SiO₂ film is made by thermal oxidation.



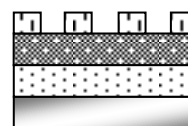
4. Mask pattern is transferred.



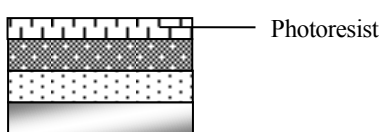
2. Hydrophobic promoter is coated.



5. Photoresist is removed after exposure.



3. Photoresist is applied to condensing surface.



6. Microscale pattern is fabricated by etching.

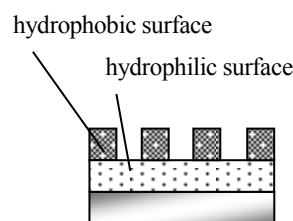


Fig. 2 Fabrication process of micro-structured hydrophobic-hydrophilic hybrid surfaces.

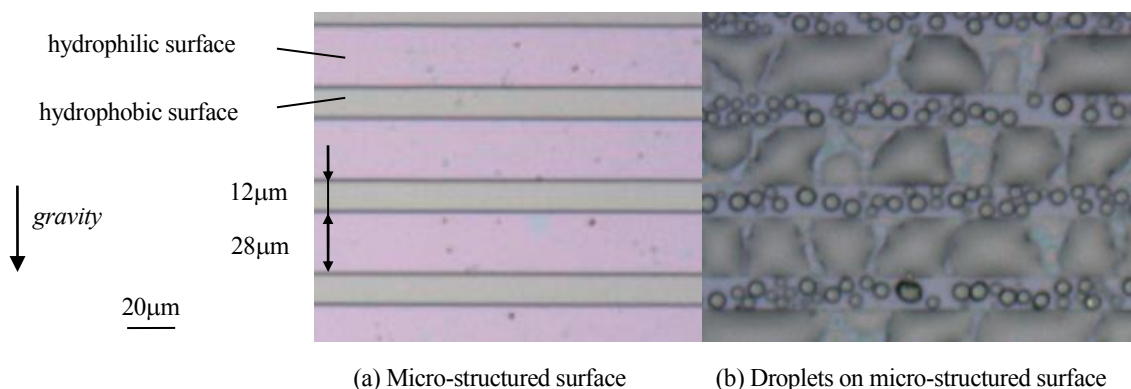


Fig. 3 Microscopic top-view of hybrid surface and droplets.

4. 実験装置及び方法

実験装置は、滴状凝縮から水の凝縮係数を評価した実験に使用したものであり、高真空系の機器から構成され、不凝縮性気体の影響を極力排除できるシステムとなっている (Tokunaga et al., 2011). その構成は、図 4(a)に示す通り、ボイラー、テストコンデンサー、主凝縮器、そして排気系からなり、装置内を真空減圧して不凝縮性気体を系外に排出した後、系内に蒸留水のみを導入し、ボイラーと主凝縮器の操作により真空排気系からの脱気を行っている。標準的な実験条件として、1~3kPa 程度の低圧条件下において、凝縮面への蒸気の凝縮速度に対して供給蒸気の平均流速が 10 倍となるようにボイラーの加熱量を調整した。図 4(b)には、装置上部から見たテストコンデンサーの構造を示し、その中心部に位置する試験部である冷却ブロックの詳細を図 4(c)に示す。冷却ブロックは銅製で直径 20mm の円柱状であり、その端面に製作したマイクロ複合伝熱面を銀ペーストにより接合している。冷却ブロックの他端は、液体窒素ガスの衝突噴流によって冷却する構造となっており、低圧条件下においても低過冷度から高過冷度までの幅広い条件下での凝縮実験が可能である。この冷却ブロックには、 $\phi 0.5\text{mm}$ の T 型熱電対が 5 本挿入されており、その温度勾配から熱流束が求まる。凝縮面表面温度は、これらの熱電対からの

外挿によって求めるが、その際に必要となる凝縮面と冷却ブロックとの接合部の接触熱抵抗については、事前に衝突噴流実験によって評価している。

凝縮面の観察は、正面に設けた観察窓を通して、マクロな接写観察と顕微鏡観察の両方を行った。観察窓は、厚さ2mmの石英ガラスであり、凝縮面から2mmの間隔をおいて設置されている。観察は、デジタルカメラと毎秒1000~2000コマの高速カメラを用いて行った。得られた画像の解析では、必要に応じて二値化処理等の画像処理を利用した。

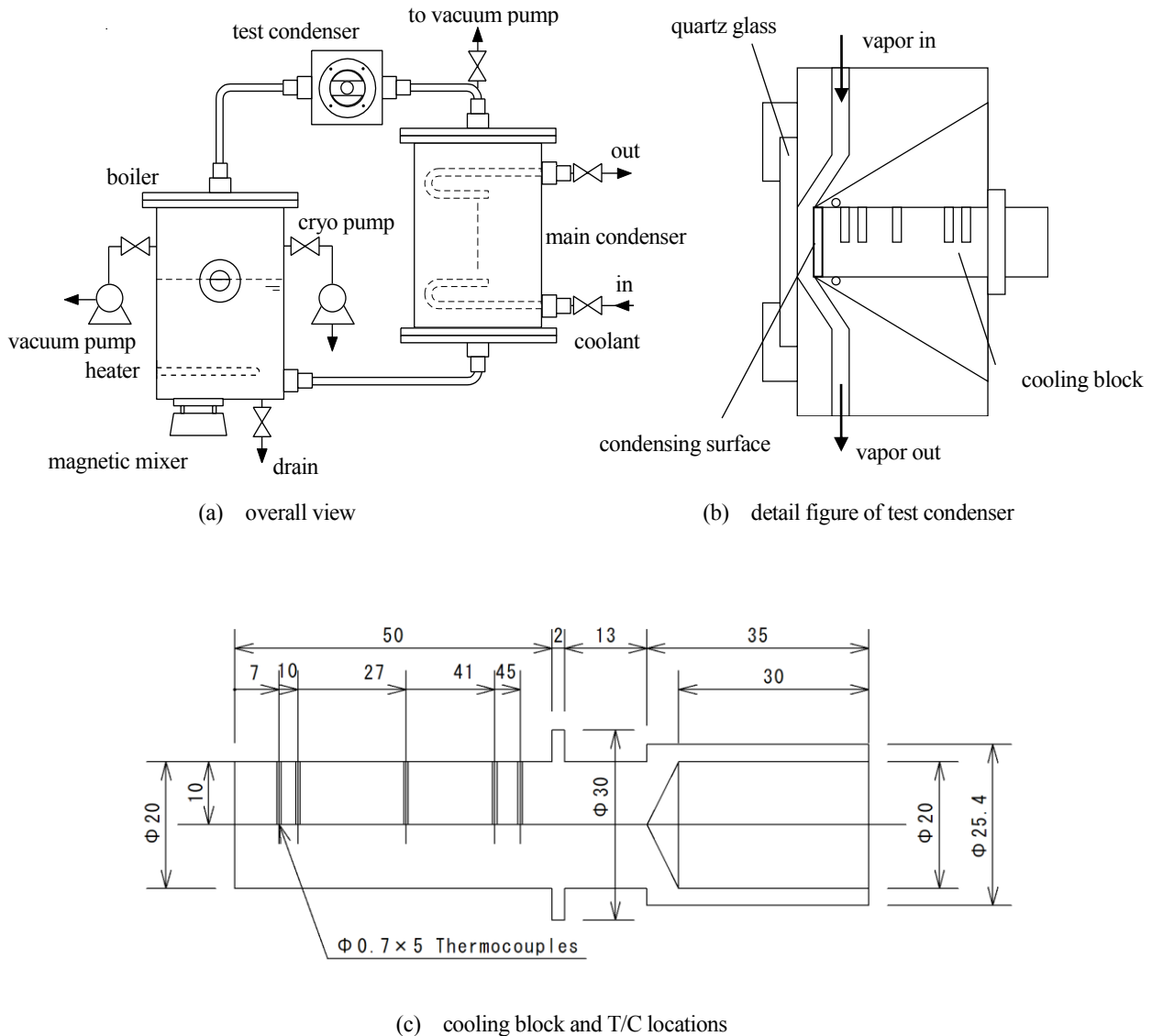


Fig.4 Experimental apparatus.

5. 実験結果

5・1 凝縮面の観察

代表的な実験条件の詳細と結果を、疎水面の高さ（凹部の深さ）を H と表記し、表 1 に示す。実験は前述したように低圧条件下で行っているため、蒸気の飽和温度は $10\sim 14^{\circ}\text{C}$ 程度となっている。なお、表中の熱伝達率は実測した熱流束と過冷度から算出している。

疎水・親水面の実際の機能を確認するために、図 5 に各疎水面高さにおける凝縮面全体の写真を示し、合わせて顕微鏡写真を図 6 に示している。疎水面上の液滴を効率的に除去することで微小液滴の高い熱輸送特性を利用する計画であったが、図 5 に示すように、大きな液滴がパターンを覆うように存在している。さらに、図 6 を見ると明らかなように、凝縮液膜が複数の疎水面を覆ってしまう現象が生じる結果となった。親水部の凹みを越えるという意味で、本論文ではこの現象をフラッディングと呼ぶことにする。このフラッディング部は、図 5 の凝縮面全体写真では黒い筋状の部分に相当していることから、二値化画像処理を行うことにより、フラッディング

Table 1 Experimental conditions and results.

H [nm]	T_v [$^{\circ}\text{C}$]	p [kPa]	q [kW/m^2]	h [$\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]	ΔT [K]
(a) 360	11.3	1.40	42.1	18.3	2.3
	10.4	1.32	64.4	16.1	4.0
(b) 800	10.8	1.35	38.9	13.0	3.0
	11.3	1.40	57.7	14.1	4.1
(c) 1700	13.4	1.60	44.0	21.9	2.0
	13.7	1.62	69.2	23.1	3.0

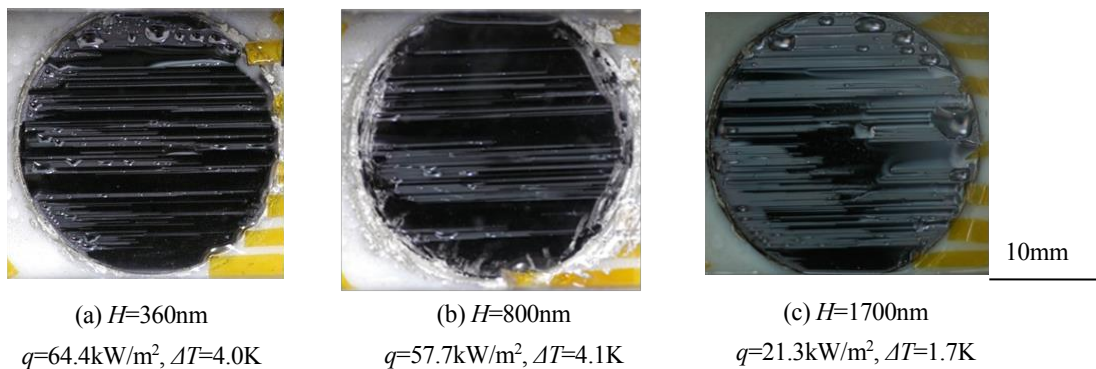


Fig.5 Effects of micro-structure on drainage behavior.

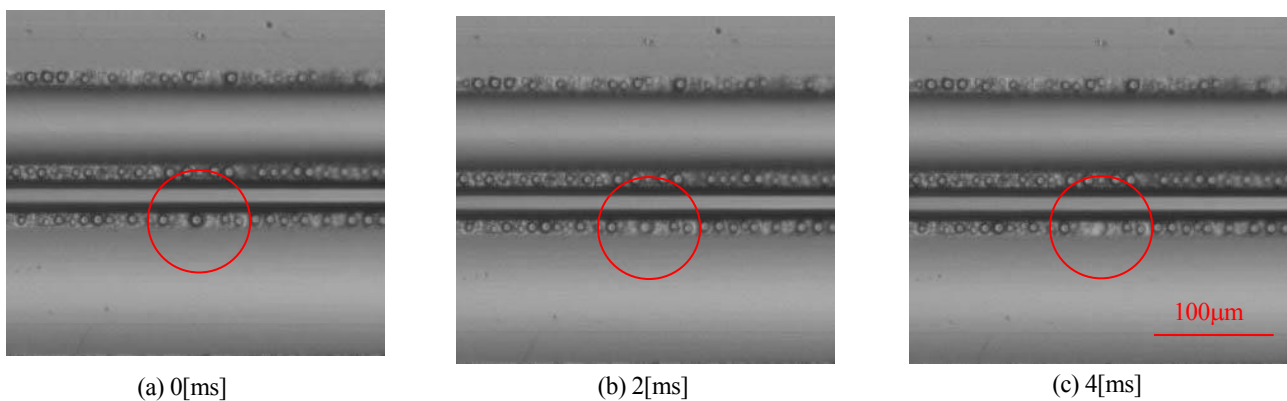


Fig. 6 Microscopic behaviors of droplets and liquid film. ($H=1700\text{nm}$, $T_v=9.4\text{K}$, $q=33.5\text{kW}/\text{m}^2$, $\Delta T=2.5\text{K}$)

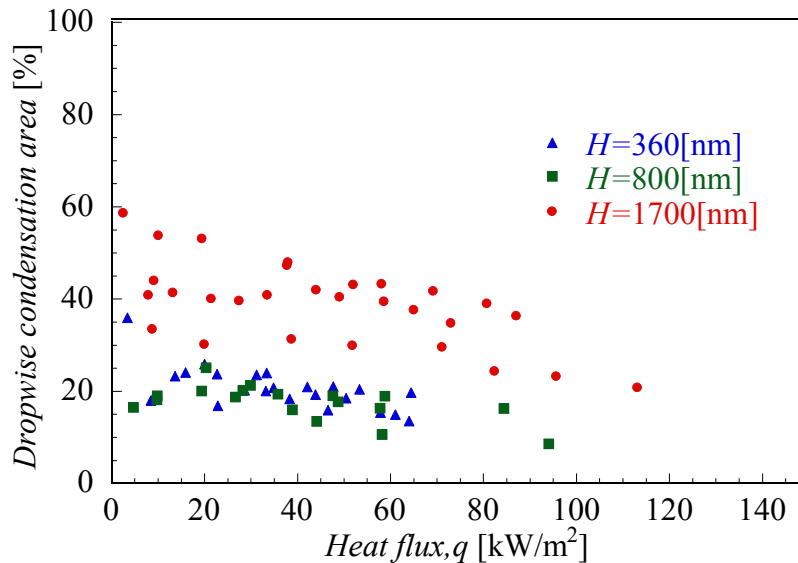


Fig. 7 Effective area ratio for dropwise condensation. The area ratio decreases with the heat flux, which is indicating that the flooding area increases with the condensing rate. The pattern $H=1700\text{nm}$ shows the higher value than the pattern $H=360\text{nm}$ and $H=800\text{nm}$.

が滴状凝縮伝熱の活用を妨げる程度を面積割合によって評価することとした。その結果を図7に示す。全ての疎水面が滴状凝縮に有効に利用される場合を100%とし、熱流束とともに滴状凝縮の面積割合が減少していることがわかる。この評価方法の精度は決して高いものではないが、ある程度の特徴は表現できると考えられる。この結果を見れば、膜厚が最も厚い $H=1700\text{nm}$ の凝縮面においてフラッディングの影響が小さく、低熱流束では40~60%程度の疎水面で滴状凝縮が活用できており、他の膜厚と比較して約2倍程度の排水性能を示していることがわかる。しかしながら、その面積割合は熱流束とともに低下する傾向にあり、疎水面と親水面をマイクロスケールで交互に配置することは液滴の除去に効果があるものの、凝縮量が多くなるとフラッディングの発生する割合が高くなると言える。特に、厚さが360nmと800nmの場合には、フラッディングの発生割合はさらに高くなり、面積割合に両者の差はほとんどない。この結果から、疎水面の厚さは1700nm程度に高くならないと伝熱促進による凝縮液量の増加に対応できず、フラッディングを抑制できないと判断される。親水部である凹部を深くして排水性能を高めることが必要である。

5・2 熱輸送特性の評価

まず、図8に滴径分布関数と合わせて顕微鏡写真を示す。この滴径分布は式(5)と顕微鏡写真により得られた滴径分布を比較したものである。理論式は凝縮点密度無限大、すなわち初生液滴間距離が0の極限として導かれているが、実際の液滴間距離は有限であり、液滴径 $1\mu\text{m}$ 以下では実測値は理論と比較して小さい値となっている。そこで、実験との比較を行うために、実測した滴径分布を式(3)に適用して数値積分を行い、熱伝達率を評価した。

以下に、本研究において得た熱伝達特性の実験結果を予測値と比較して検討する。過冷度と熱流束の関係を図9に示す。当然のことながら、複合伝熱面の熱流束と熱伝達率は全面が膜状凝縮の場合に比べて高い値となり、滴状凝縮の活用が効果的なことがわかる。さらに、疎水面の高さが低い場合(360nm, 800nm)と高い場合(1700nm)を比較すると、疎水面が高い程、凝縮熱流束は大きくなっている。前述したように疎水面を高くすることによってフラッディングが抑制されたためと理解できるが、疎水部と親水部の面積比から算出した理論値よりも低い値となっており、フラッディングの影響の度合いと推測する。今回製作したマイクロ複合伝熱面においては、滴状凝縮の面積割合が100%のものと比較して全ての実験結果が低い値を示している。これは図4で示したようにフラッディングにより疎水面を跨る大きな液膜が存在しているためと判断できる。しかしながら、 $H=1700\text{nm}$ の厚さで製作した伝熱面においては、他のパターンよりも高い値を示していることが分かり、実験結果と式(2)との比較により、その滴状凝縮の面積割合は $\eta=0.7$ 程度と評価される。一方で、他のパターンでは $\eta=0.5$ 程度と予測されることから、 $H=1700\text{nm}$ 程度まで厚くしなければ十分な排水効果は得られないものの、膜厚を厚くすることは

液滴除去効果をもつことに有効であると考えられる。さらに、マイクロ化することの有効性を検証するために、同じ面積比で、またミリスケールで製作した場合の予測値である式(7)と実験結果を比較している。図9において、本実験で製作した疎水面の高さが低い場合(360nm, 800nm)の熱流束は、ミリスケールで製作した場合の最大値、すなわちフラッディングが起こっていないと想定した場合の予測式(7)とほぼ等しい値を示していることが分かる。これはフラッディングが起こったとしても、ミリスケールで製作した複合伝熱面上の熱輸送特性よりも同等以上の値と評価されたことから、伝熱促進に効果的であることを示している。さらに、他のパターンと比較して高い値を示した $H=1700\text{nm}$ においては、ミリスケールで製作した場合の予測値と比較して、約1.4倍の熱輸送特性を示した。今回製作したマイクロ複合伝熱面においては微小液滴を活用することを可能にしており、凝縮熱流束が向上していることからその有効性が示されていると考えられる。

以上より、マイクロ複合伝熱面による伝熱促進は実現可能であり、さらにフラッディングを抑制し、疎水面上

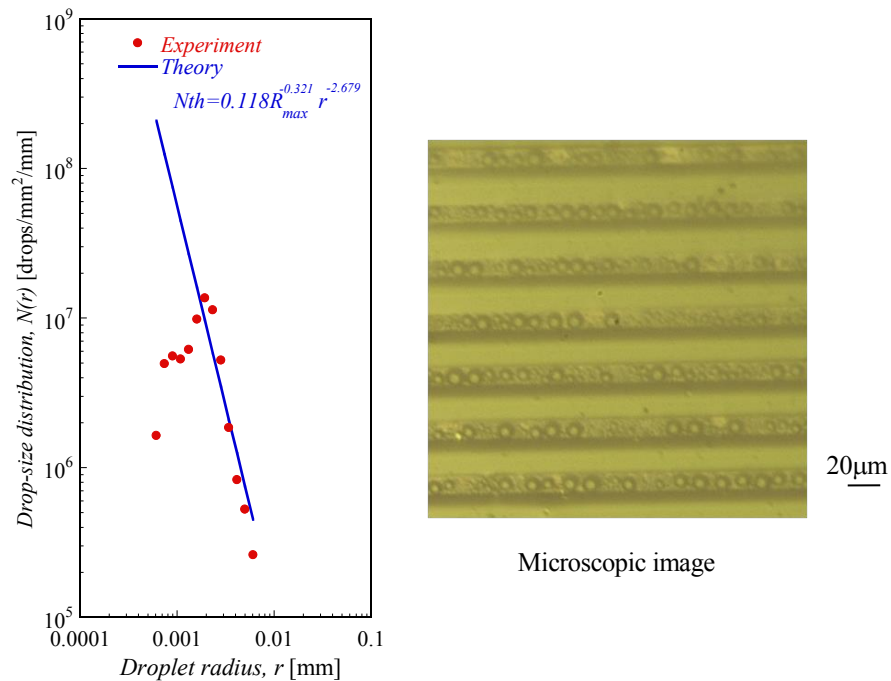


Fig.8 Drop-size distribution on hydrophobic region on micro-structured condensing surface.

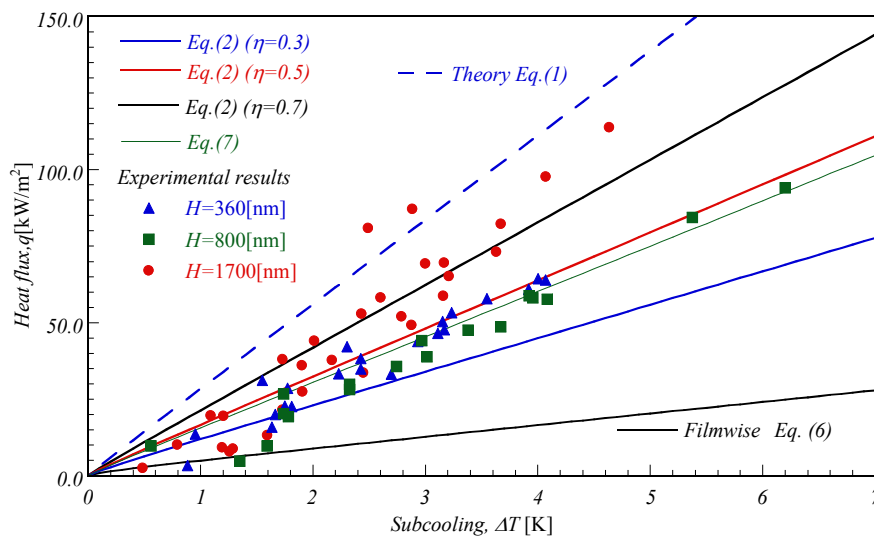


Fig.9 Heat transfer performances of micro-structured condensing surface. Micro-structured surfaces show the higher heat flux than the milli-scale structured surface. The condensation heat flux on the micro-structured condensing surface ($H=1700\text{nm}$) show the highest heat transfer performance because of the largest effective area ratio.

の滴状凝縮の有効面積割合を 100%にできれば、ミリスケールの複合伝熱面上の 2 倍程度の伝熱輸送特性を実現可能であり、さらなる促進が十分期待される。

6. 結言

滴状凝縮における微小液滴の高い熱輸送特性を最大限に活用することを目的として、液滴排除効果と伝熱促進効果を実現するために疎水面と親水面を交互に配置するマイクロ複合伝熱面の製作を行った。その結果、局所的に観察すれば疎水面上の凝縮液滴を積極的に除去することに成功した。また凝縮液量と液滴排除量のアンバランスによって生じるフラiddingに関しては、疎水面高さを高くすることで改善する傾向が見られた。一方で、凝縮伝熱特性を計測したところ、フラiddingの影響によって理論値よりも低い値を示した。しかしながら、本実験で製作したマイクロ複合伝熱面の熱輸送特性は、ミリスケールの複合伝熱面と比較して、高い熱輸送特性を示すことが分かった。具体的には、 $H=1700\text{nm}$ の疎水面厚さで製作すれば、滴状凝縮の面積割合が 70%と評価され、ミリスケールの複合伝熱面よりも高い熱輸送特性を得られたことから、伝熱促進を達成できたと考えられる。さらなる伝熱促進のためには滴状凝縮の面積割合を 100%にする工夫が必要であり、排水効果をより高めた機構が必要である。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 23860063 及び 25871042 の助成を受けて実施した。また、本研究を遂行するにあたり、九州工業大学の大学院生であった山脇翔太氏、水谷政樹氏、平野貴憲氏に多大な協力を頂いた。あわせて感謝の意を表す。

文献

- Chatterjee, A., Derby, M., Peles, Y. and Jensen, M., Enhancement of condensation heat transfer with patterned surfaces, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 71 (2014), pp.675-681.
- 藤井哲, 上原春男, 膜状凝縮熱伝達, 伝熱工学の進展, Vol. 1, 養賢堂 (1973), pp. 1-172.
- Grooten, MHM. and van der Geld, CWM., Surface property effects on dropwise condensation heat transfer from flowing air-steam mixtures to promote drainage, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 54, No.1 (2012), pp.220-229.
- 幡宮重雄, 田中宏明, 滴状凝縮伝熱機構に関する研究 : 第 1 報, 低圧水蒸気の凝縮熱伝達率の測定, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 52, No.476 (1986a), pp. 1828-1834.
- 幡宮重雄, 田中宏明, 滴状凝縮伝熱機構に関する研究 : 第 2 報, 低圧における水の凝縮係数, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 52, No.477 (1986b), pp. 2214-2221.
- Izumi, M., Kumagai, S., Shimada, R. and Yamakawa, N., Heat transfer enhancement of dropwise condensation on a vertical surface with round shaped grooves, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol.28 (2004), pp. 243-248.
- Labuntsov, DA. and Kryukov, AP., Analysis of intensive evaporation and condensation, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.22 (1979), pp.989-1002.
- Nagayama, G. and Tsuruta, T., A general expression for the condensation coefficient based on transition state theory and molecular dynamics simulation, *Journal of Chemical Physics*, Vol.118 (2003), pp. 1392-1399.
- Peng, B., Ma, X., Lan, Z., Xu, W. and Wen, R., Experimental investigation on steam condensation heat transfer enhancement with vertically patterned hydrophobic-hydrophilic hybrid surfaces, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.83 (2015), pp. 27-38.
- Rose, JW., Dropwise condensation theory and experiment: a review, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy* (2002), 216 A2, pp. 115-128.
- Tanaka, H., A theoretical study of dropwise condensation, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 97 (1975), pp. 72-78.
- 棚沢一郎, 滴状凝縮, 伝熱工学の進展, Vol. 4, 養賢堂 (1976), pp. 229-325.
- Tanasawa, I., Advances in condensation heat transfer, *Advances in Heat Transfer*, Elsevier B. V., Vol. 21 (1991), pp. 55-139.
- 徳永敦士, 長山暁子, 鶴田隆治, 滴状凝縮法による高熱流束輸送と界面熱伝達, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2010 講演論文集 (2010), pp.265-266.

- Tokunaga, A., Yamawaki, S., Nagayama, G. and Tsuruta, T., Effect of non-condensable gases on interface resistance in microscopic dropwise condensation, Proceedings of The 4th International Conference on Heat Transfer and Fluid Flow in Microscale (2011), Paper No. HTFFM-IV-118.
- Tsuruta, T., Tanaka, H. and Masuoka, T., Condensation /evaporation coefficient and velocity distributions at liquid-vapor interface, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.42 (1999), pp. 4107-4116.
- Tsuruta, T. and Nagayama, G., Molecular dynamics studies on the condensation coefficient of water, Journal of Physical Chemistry B, Vol. 108 (2004), pp. 1736-1743.
- 山内昭良, 熊谷哲, 武山斌郎, 滴・膜状凝縮混在面のパターン変化による熱伝達特性, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 51 (1985), pp. 2606-2613.

References

- Chatterjee, A., Derby, M., Peles, Y. and Jensen, M., Enhancement of condensation heat transfer with patterned surfaces, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 71 (2014), pp.675-681.
- Fujii, T. and Uehara, H., Filmwise condensation, Progress in Heat Transfer, Vol.1, Yokendo (1973), pp. 1-172 (in Japanese).
- Grooten, MHM., van der Geld, CWM., Surface property effects on dropwise condensation heat transfer from flowing air-steam mixtures to promote drainage, International Journal of Thermal Sciences, Vol. 54, No.1 (2012), pp.220-229.
- Hatamiya, S. and Tanaka, H., A study on the mechanism of dropwise condensation : 1st report measurement of heat-transfer coefficient of steam at low pressure, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol. 52 (1986a), pp. 1828-1834(in Japanese).
- Hatamiya, S. and Tanaka, H., A study on the mechanism of dropwise condensation : 2nd report condensation coefficient of water at low pressures, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol. 52 (1986b), pp. 2214-2221(in Japanese).
- Izumi, M., Kumagai, S., Shimada, R. and Yamakawa, N., Heat transfer enhancement of dropwise condensation on a vertical surface with round shaped grooves, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol.28 (2004), pp. 243-248.
- Labunsov, DA. and Kryukov, AP., Analysis of intensive evaporation and condensation, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.22 (1979), pp.989-1002.
- Nagayama, G. and Tsuruta, T., A general expression for the condensation coefficient based on transition state theory and molecular dynamics simulation, Journal of Chemical Physics, Vol.118 (2003), pp. 1392-1399.
- Peng, B., Ma, X., Lan, Z., Xu, W. and Wen, R., Experimental investigation on steam condensation heat transfer enhancement with vertically patterned hydrophobic-hydrophilic hybrid surfaces, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.83 (2015), pp. 27-38.
- Rose, JW., Dropwise condensation theory and experiment: a review, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy (2002), 216 A2, pp. 115-128.
- Tanaka, H., A theoretical study of dropwise condensation, Journal of Heat Transfer, Vol. 97 (1975), pp. 72-78.
- Tanasawa, I., Dropwise condensation, Progress in Heat Transfer, Vol.4, Yokendo (1976), pp. 229-325(in Japanese).
- Tanasawa, I., Advances in condensation heat transfer, Advances in Heat Transfer, Elsevier B. V., Vol. 21 (1991), pp. 55-139.
- Tokunaga, A., Nagayama, G. and Tsuruta, T., High heat flux dropwise condensation and interface heat transfer, Proceedings of Thermal Engineering Conference 2010 (2010), pp.265-266 (in Japanese).
- Tokunaga, A., Yamawaki, S., Nagayama, G. and Tsuruta, T., Effect of non-condensable gases on interface resistance in microscopic dropwise condensation, Proceedings of The 4th International Conference on Heat Transfer and Fluid Flow in Microscale (2011), Paper No. HTFFM-IV-118.
- Tsuruta, T., Tanaka, H. and Masuoka, T., Condensation /evaporation coefficient and velocity distributions at liquid-vapor interface, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.42 (1999), pp. 4107-4116.
- Tsuruta, T. and Nagayama, G., Molecular dynamics studies on the condensation coefficient of water, Journal of Physical Chemistry B, Vol. 108 (2004), pp 1736-1743.
- Ymauchi, A., Kumagai, S. and Takeyama, T., Condensation heat transfer on various dropwise-filmwise coexisting surface, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol. 51 (1985), pp. 2606-2613(in Japanese).