

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 10 月 21 日現在

機関番号：55501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25871042

研究課題名(和文)機能性伝熱面による相変化伝熱の促進とマイクロヒートパイプへの展開

研究課題名(英文) Enhancement of Phase Change Heat Transfer on Micro-structured Surface and Application to Micro Heat Pipe

研究代表者

徳永 敦士 (Tokunaga, Atsushi)

宇部工業高等専門学校・機械工学科・准教授

研究者番号：20609797

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：現在、高熱流束デバイスの熱管理技術の開発が求められており、マイクロナノスケールでの凝縮熱輸送特性の促進に着目した検討を行った。本研究では、伝熱に貢献度の高い微小液滴を活用するため、濡れ性こう配を有するマイクロ複合伝熱面を製作した。濡れ性こう配とは、疎水面の幅を徐々に減少させることで、液滴を輸送する機構である。製作した伝熱面を用いて低圧環境下で凝縮実験を行い、液滴前後の接触角差で発生する駆動力によって液滴の排除効果が高くなり、膜状凝縮と比較して高い熱輸送特性を示すことが分かった。

研究成果の概要(英文)：The micro- and nano-scale phase change phenomena become more important because recent MEMS technologies enable us to create new surface structures for high heat flux devices. In the condensation heat transfer, it is well known dropwise condensation on a hydrophobic surface has a larger heat transfer coefficient than filmwise condensation. Larger droplets in ordinary systems depart from the condensing surface by the gravity or the vapor shear-flow and the bare surface is created for the rapid condensation. But, those forces cannot be expected in the micro- and nano-systems. In order to realize enhancement of condensation heat transfer, it is necessary to develop new method for removing the larger droplets from the condensing surface. In this study, the micro- structures with wettability gradient are fabricated as the hydrophobic-hydrophilic surfaces. It is found that the condensation heat flux on the micro-structured surface can be enhanced due to its drainage ability.

研究分野：熱工学

キーワード：熱工学 滴状凝縮 機能性伝熱面 MEMS 伝熱促進 濡れ性こう配

1. 研究開始当初の背景

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知られており、その実用化に再び注目が集まっている。一般的に、滴状凝縮においては離脱液滴半径が熱輸送特性に大きな影響を及ぼし、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、マイクロスケール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プラグングの問題などもあり、これらの効果は期待できない。すなわち、マイクロ・ナノスケールにおいて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。これまでに、気液界面の高い伝熱特性に着目した滴状凝縮実験において、低圧水蒸気では半径 7mm 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 (A. 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。この機能性伝熱面の主な特徴は、疎水面と親水面をマイクロスケールで交互に配置し、親水面に形成される液膜の液滴排除効果によって疎水面から液滴を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での複合伝熱面による凝縮実験は行われている。山内らは滴・膜状凝縮を同一面上に配置した凝縮面で、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 程度のグループ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)。そこで、これまでにマイクロスケール幅の疎水・親水のグループ構造を有する複合伝熱面の製作を行い、その熱伝達特性の評価を行った (研究活動スタート支援, 課題番号 23860063)。その結果、熱輸送特性は膜状凝縮と比較して大きく向上することを示したものの、フラiddingが発生し、複数のパターンを覆う液膜が観察された。この液膜を効果的に排除することができれば、さらなる伝熱促進が実現できるものと考えられる。

2. 研究の目的

前述したように、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ことから、伝熱へ

の貢献度の高い数 μm の液滴を活用する疎水・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。また、ストレート型のマイクロ複合伝熱面のみならず、液滴前後の接触角度差で駆動力を与える濡れ性こう配を形成した伝熱面も製作し、液滴排除効果及び伝熱促進効果について凝縮実験により検証した。

3. 研究の方法

(1) 実験装置

本研究では、高真空チャンバー内での凝縮実験によって、機能性伝熱面上の熱伝達特性を評価する。凝縮実験においては不凝縮性気体の影響が大きいため、系内の不凝縮性気体を排出することによって、機能性伝熱面の効果を明らかにする。凝縮実験装置は図 1 に示すように、蒸気発生用の蒸発器、製作した機能性伝熱面を取り付けたテストコンデンサー、及び凝縮器によって構成されている。

実験前に真空チャンバーを減圧し、系内の不凝縮性気体を排出する。その後、水を導入して脱気処理を行うことで、不凝縮性気体の影響を極力少なくする。蒸発器で発生した蒸気は、その一部がテストコンデンサーで凝縮し、残りの蒸気は主凝縮器で完全に復水して再び蒸発器に戻る。

なお、製作した伝熱面はテストコンデンサー一部の銅製の冷却ブロックに接合している。この冷却ブロックには $\phi 0.5\text{mm}$ の T 型シース熱電対を 5 本挿入しており、凝縮熱流束の計測を行う。

凝縮面の微視的観察には 10 から 20 倍の対物レンズを備えた顕微鏡に、ハイスピードカメラ及びデジタルカメラを取り付け、使用した。

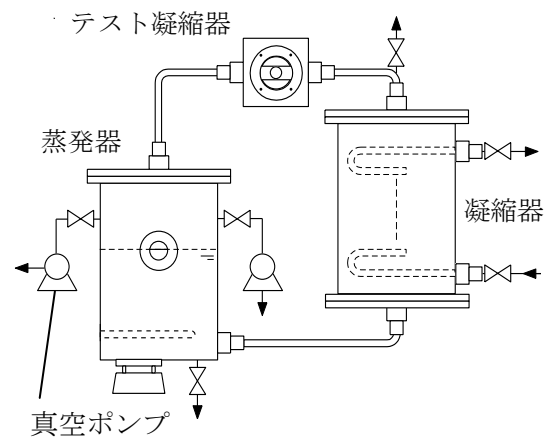


図1 実験装置

(2) 疎水・親水の機能性伝熱面の作製

伝熱に最も貢献度の高い液滴を有効に活用するために、マイクロスケールの疎水面と親水面の幅を交互に配置する凝縮面を設計・製作した。これまでに、ストライプ状に配置した複合伝熱面での凝縮促進効果を確認したものの、フラiddingによって十分な伝熱促進効果を得るに至らなかった。そこ

で、この問題を解決するために、液滴前後の接触角度差で液滴を輸送する濡れ性こう配を形成したマイクロ複合伝熱面の製作を行った。製作方法は以下のとおりである。

まず、シリコン基板上にプラズマ CVD (Chemical Vapor Deposition) によって SiO_2 を膜厚約 $1.0\mu\text{m}$ 成膜する。この酸化膜は凝縮において親水面となる。さらに、滴状凝縮を実現するための撥水処理剤である Cytop をスピンドーターで塗布した。膜厚は、約 300nm である。この撥水処理後に、フォトレジストを塗布し、フォトマスクを介した露光を行い、現像することでフォトレジストをパターンニングする。最後に、RIE (Reactive Ion Etching) によって Cytop を加工する。

この凝縮面を撮影した顕微鏡写真と概念図を図 2 に示すが、疎水面の幅が凝縮面の左端から右端まで徐々に変化する形状となっている。なお、左端を蒸気流れの上流側となるように実験ブロックに設置する。本実験では、マイクロ複合面上の上流側疎水面凸部幅が $60\mu\text{m}$ から下流側凸部幅 $15\mu\text{m}$ へと変化する濡れ性こう配(こう配率 $2.25\mu\text{m}/\text{mm}$, 以下 $b=60$)と、上流側疎水面凸部幅が $200\mu\text{m}$ から下流側凸部幅 $50\mu\text{m}$ へと変化する濡れ性こう配(こう配率 $7.5\mu\text{m}/\text{mm}$, 以下 $b=200$)を用いて実験・比較を行った。

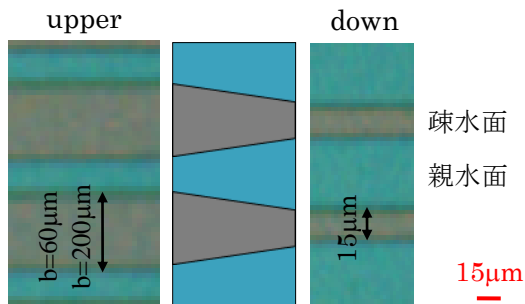
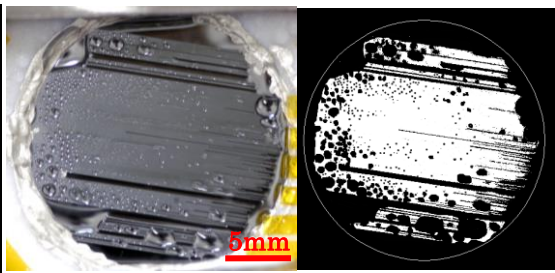


図2 濡れ性こう配

4. 研究成果

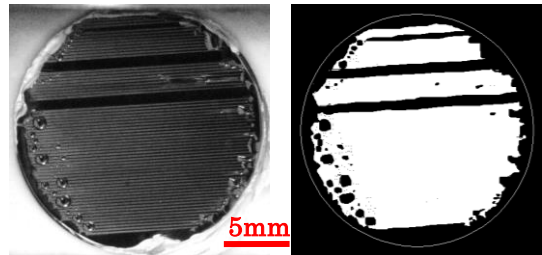
(1) 凝縮面の観察

図 3 に、凝縮実験中の凝縮面全体の写真を示す。 $b=60$ のパターンでは凝縮面上に排出されない液膜が存在していることが確認できる一方、 $b=200$ のパターンでは液滴が効果的に排出されていることが分かる。すなわち、液滴を排出する効果は後者の方が高いことが分かる。これは、こう配率が高くなることで液滴前後の接触角度差が大きくなるためであると考えられる。図 4 に、滴状凝縮が発生している面積割合を画像解析によって計測し、熱流束に対するその値を示している。これまでに作製したストレート型のマイクロ複合伝熱面ではフラッディングによって滴状凝縮の面積が低下する傾向が見られたものの、濡れ性こう配を形成することで、滴状凝縮が有効活用されていることが分かる。さらに、 $b=60$ と $b=200$ のパターンで比較した



(a) $h=49.3[\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$, $\Delta T=2.43[\text{K}]$

有効面積 51%, $b=60\mu\text{m}$



(b) $h=50.9[\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$, $\Delta T=2.68[\text{K}]$

有効面積 72%, $b=200\mu\text{m}$

図 3 機能性伝熱面の凝縮の様子

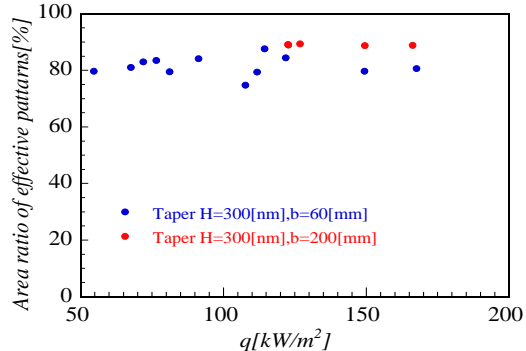
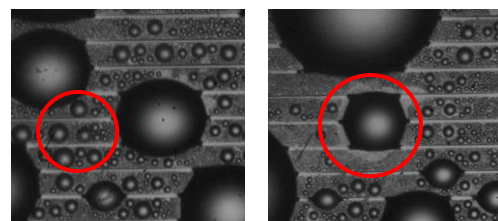
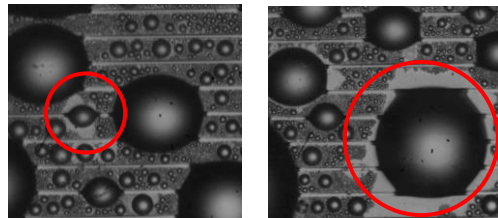


図 4 滴状凝縮の面積割合



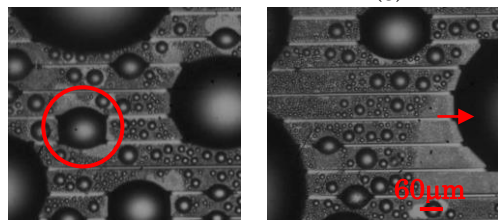
(1)

(4)



(2)

(5)



(3)

(6)

図 5 凝縮挙動の顕微鏡観察

時, $b=200$ の方が滴状凝縮の有効面積割合が高い値を示している. 図 5 に顕微鏡画像を示す. (1) をスタートとして, 1000fps で撮影した高速カメラのスナップショットであるが, 微小液滴が親水面へと引き込まれる様子が観察され, さらに濡れ性こう配の効果で液滴を積極的に排出する効果が観察された.

(2) 熱輸送特性の評価

熱伝達率の評価のためには表面温度の計測が必要である. そこで, 図 6 に示すような凝縮面表面に T 型の薄膜熱電対をスパッタリングによって製作し, 表面温度の直接計測を行った. そして, 直接計測により得られた表面温度を用いて熱輸送特性を評価した. 図 7 及び図 8 に, 凝縮熱流束及び凝縮熱伝達率を示すが, 濡れ性こう配を形成することで, 凝縮伝熱促進効果が得られていることが分かる. しかしながら, $b=200$ と $b=60$ の間に大きな差は見られなかった. この原因は, 液滴の離脱半径と滴状凝縮のサイクルによるものであると考えられる. $b=200$ では滴状凝縮のサイクルが低下してしまうものの, 離脱半径が大きくなることで液滴の排出効果は高くなっている. 一方で, $b=60$ では離脱半径が小さく, 滴状凝縮のサイクルは向上しているものの, 液滴を十分に排出できておらず, 複数のパターンを覆う液膜の存在が確認されている. すなわち, 液滴の離脱半径及び滴状凝縮のサイクルのバランスによって凝縮熱輸送特性に大きな差が見られなかったものと考えられる. 今後はこれらの結果から, より最適な形状を設計する必要があると考えられる.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

(1) Atsushi TOKUNAGA, Masaki Mizutani, Gyoko Nagayama and Takaharu Tsuruta, “Condensation Heat Transfer Characteristics on A Microstructured Surface With Wettability Gradient”, International Heat Transfer Conference Digital Library IHTC159033, (2014), 査読有
 (2) Atsushi Tokunaga, Masaki Mizutani, Gyoko Nagayama and Takaharu Tsuruta, “Effect of Microstructured Surface on Dropwise Condensation Heat Transfer”, Proceedings of ASME 2013 11th International Conference on Nanochannels, Microchannels and Minichannels, ICNMM201373200, (2013), 査読有

[学会発表] (計 5 件)

(1) 徳永敦士, 平野貴憲, 長山暁子, 鶴田隆治, “濡れ性勾配を有するマイクロ複合伝熱面における凝縮熱伝達率の測定”, 第 52 回日本伝熱シンポジウム, 福岡, 2015.6.3-5, 査読無

(2) Atsushi TOKUNAGA, Masaki Mizutani, Gyoko Nagayama and Takaharu Tsuruta,

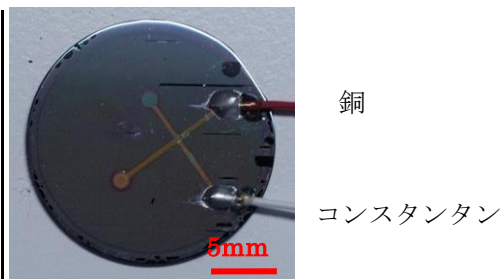


図6 T型薄膜熱電対

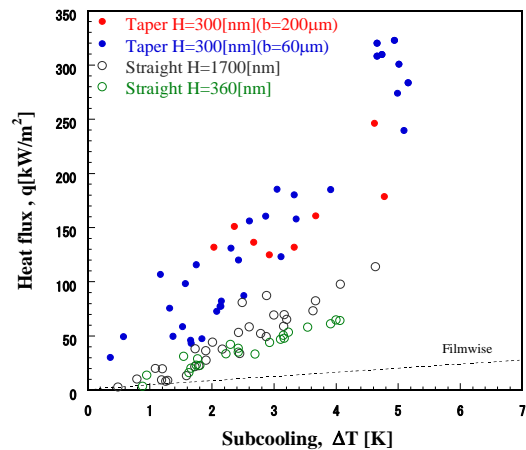


図7 凝縮熱流束

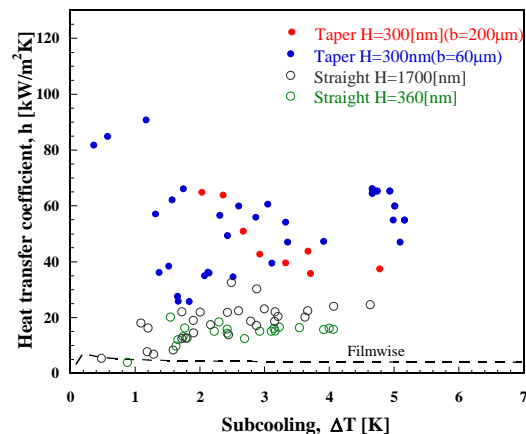


図8 凝縮熱伝達率

“Condensation Heat Transfer Characteristics on A Microstructured Surface With Wettability Gradient”, International Heat Transfer Conference Digital Library IHTC159033, Kyoto, 2014 Aug. 10-15, 査読有

(3) 徳永敦士, 水谷政樹, 長山暁子, 鶴田隆治, “濡れ性こう配を有するマイクロ構造複合伝熱面上の凝縮熱伝達”, 第 51 回日本伝熱シンポジウム, 浜松, 2014.5.21-23, 査読無

(4) 水谷政樹, 徳永敦士, 長山暁子, 鶴田隆治, “濡れ性勾配を有するマイクロ複合伝熱面における凝縮熱伝達”, 日本機械学会九州支部鹿児島講演会, 鹿児島, 2013.9.28, 査読無

(5) Atsushi Tokunaga, Masaki Mizutani, Gyoko Nagayama and Takaharu Tsuruta,

“Effect of Microstructured Surface on Dropwise Condensation Heat Transfer”,
Proceedings of ASME 2013 11th
International Conference on Nanochannels,
Microchannels and Minichannels,
ICNMM201373200, Sapporo, 2013
June.16-19, 査読有

6. 研究組織

(1)研究代表者

徳永 敦士 (TOKUNAGA ATSUSHI)

宇部工業高等専門学校・機械工学科・准教授

研究者番号：23860063

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

鶴田 隆治 (TSURUTA TAKAHARU)

九州工業大学・大学院工学研究院 機械知能
工学研究系・教授

研究者番号：30172068

長山 暁子 (NAGAYAMA GYOKO)

九州工業大学・大学院工学研究院 機械知能
工学研究系・准教授

研究者番号：60370029