

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：55501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04227

研究課題名（和文）濡れ性勾配を有するマイクロ複合伝熱面による凝縮伝熱促進実現と燃料電池への応用展開

研究課題名（英文）Enhancement of Condensation Heat Transfer on Bi-philic Condensing Surface with Wettability Gradient and the Application to Fuel Cells

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） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：凝縮伝熱促進実現のために濡れ性勾配を有する複合伝熱面を作成し、その凝縮伝熱促進効果について実験検証を行った。濡れ性勾配とは、疎水面と親水面の面積比を徐々に変化させることによって液滴前後に接触角が生じるため、その駆動力によって液滴を輸送できる構造のことである。この構造によって、滴状凝縮の高い熱輸送特性を活かすとともに、液滴を積極的に離脱させることで凝縮伝熱促進を実現する。研究実施期間において、濡れ性勾配の最適構造を検討するとともに、周期的配置による伝熱促進効果について検討した。その結果、伝熱促進を実現できたものの未だ最適な形状については検討すべき課題である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

濡れ性勾配を有する複合伝熱面を活用した凝縮伝熱促進に取り組んでいる。この伝熱面によって液滴を輸送することが可能であり、また微小な液滴を活用した伝熱促進を実現した。本研究成果はデバイスへの応用展開が期待でき、例えばヒートパイプなどへの活用が考えられる。凝縮伝熱促進によってヒートパイプなどの性能の向上が達成されれば、スマートフォンやパソコンの小型化・高性能化を実現できるなど産業界への貢献度は極めて高いものである。

研究成果の概要（英文）：The bi-philic condensing surface with a wettability gradient was fabricated to enhance the condensation heat transfer, and the condensation experiment has been carried out to verify effect of the bi-philic condensing surface on condensation heat transfer. The wettability gradient was formed by gradually changing the pattern width of the hydrophilic surface. Therefore, the droplet could move from the hydrophobic area to the hydrophilic area by the difference of the contact angle between the frontward side and backward side of the droplet. During the research period, the optimal condensing surface with wettability gradient was investigated and the enhancement of the condensation heat transfer rate on the condensing surface with the periodic wettability gradient was also examined. As a result, the enhancement of the heat transfer rate was achieved, however the optimum shape is still an issue to be investigated.

研究分野：熱工学

キーワード：凝縮伝熱促進 MEMS 滴状凝縮 濡れ性勾配

### 1. 研究開始当初の背景

近年、MEMS 技術の発展に伴って、CPU に代表される高熱流束デバイスの発熱量が増加しており、その熱管理技術の開発が求められている。そこで、沸騰や凝縮などの潜熱輸送を活用した相変化伝熱が注目されている。しかし、マイクロスケールの現象では代表寸法が極めて小さくなり、重力や蒸気せん断力などの効果が期待できず、凝縮においてはプラッキングの発生が容易に想定される。

現在、凝縮伝熱促進において滴状凝縮の利用が注目されており、表面加工により滴状凝縮を実現しようとするものも多い。その多くはナノ構造を形成するもので、いわゆる Cassie-Baxter モデルを実現しようとするものである。その中で、超撥水面において合体液滴が跳躍する jumping-droplet などの新しい挙動も報告されている。極めて小さい液滴が跳躍によって離脱することは、蒸気流速などを活用してきた従来の方法と比較して大きな利点である。ただし、伝熱面過冷度が大きくなり熱流束が増した状態では、ナノ構造を凝縮液が覆ってしまうフラッディングが発生することで伝熱は低下する。これは、Cassie-Baxter モデルから Wenzel モデルに遷移し、またピニング効果も相まって離脱が抑制されることが原因である。高熱流束における伝熱の劣化は、他のナノ構造でも報告されており、伝熱を促進すれば伝熱面上に凝縮液が多く発生し、その熱抵抗が増大するという凝縮伝熱の宿命ともいえる課題である。

これまでに、凝縮伝熱促進のためにマイクロスケールの微小液滴を活用する複合伝熱面の製作を行ってきた。ここではマイクロスケールの濡れ性こう配による伝熱面の機能化に基づいて、液滴の積極的離脱効果を付与している点に大きな特徴がある。この濡れ性こう配とは、液滴前後の接触角差によって液滴を輸送することができる機構であり、疎水面と親水面を交互に配置しさらに面積比を徐々に変更することによって実現する。この濡れ性勾配によって液滴離脱を促進するとともに、凝縮伝熱促進効果を達成することができると考えた。

### 2. 研究の目的

本研究では、濡れ性勾配を有する複合伝熱面を作製し、その伝熱促進効果について実験的に検証する。

### 3. 研究の方法

複合伝熱面の伝熱促進効果を評価するため、ここではシリコンウエハを基板として、図 1 に示すパターンで設計し、製作を行った。凝縮面の端から端までを濡れ性勾配を配置したもの（図 1(a)）と、濡れ性勾配を周期的に配置したもの（図 1(b)）である。なお、設計寸法は表 1 に示している。具体的な製作方法は後述の研究成果にて説明する。この製作した伝熱面を用いて実験を行い、その伝熱特性の評価と液滴輸送効果について検討する。

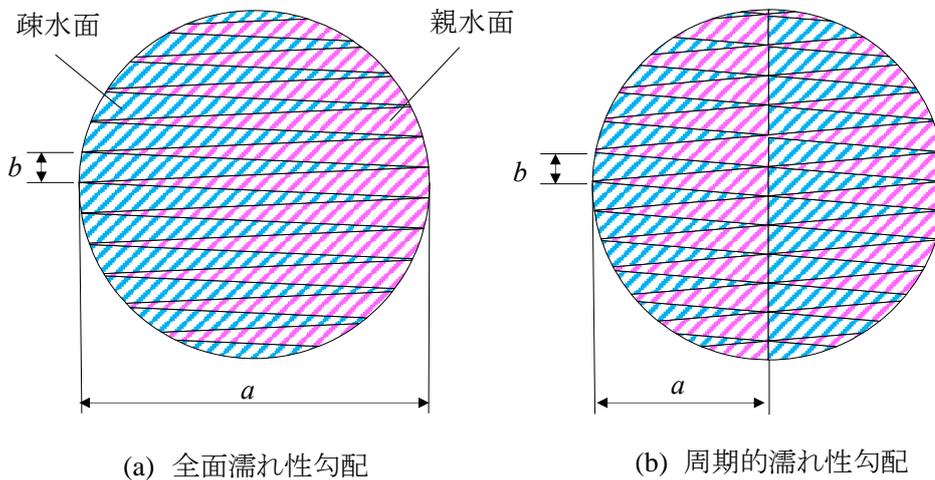


図 1 濡れ性勾配のパターン形状

表 1 設計寸法

	a mm	b $\mu\text{m}$
全面濡れ性勾配	20	200
	20	125
	20	60
周期的濡れ性勾配	20	125
	20	60

凝縮伝熱の実験には図 2 に示す高真空の凝縮実験装置を用いる。相変化においては不凝縮性気体の影響が大きいため、高真空条件で実験を行うことでその影響を排除することができる。冷却ブロックにはシース径 0.5mm の K 型熱電対を挿入し、温度こう配から熱流束の計測を行った。凝縮面表面温度は、冷却ブロックの温度こう配と接触熱抵抗を含む凝縮表面層の熱抵抗から評価した。凝縮面の微視的観察には、顕微鏡に取り付けた高速度カメラとデジタルカメラを用い、凝縮面全体の観察にはデジタルカメラを使用した。

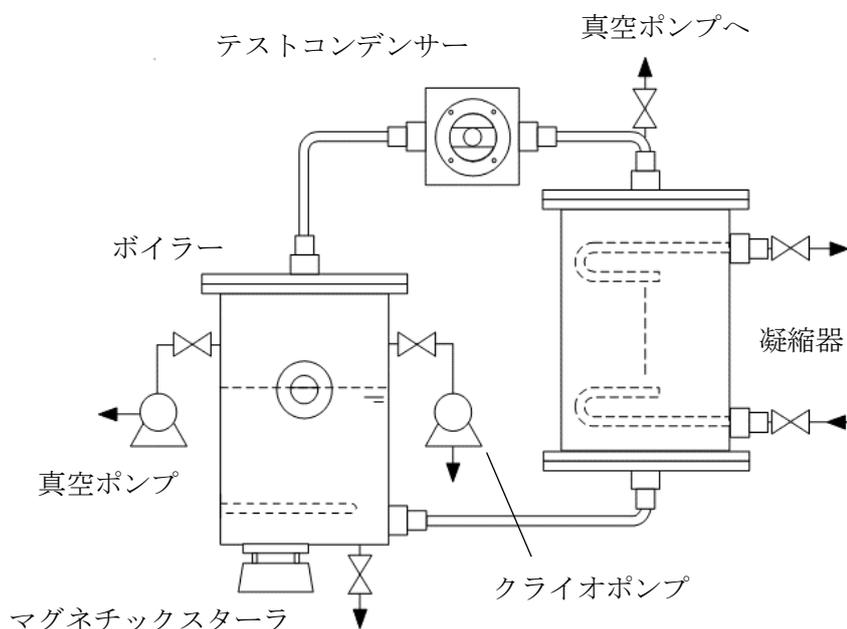


図 2 高真空凝縮実験装置

#### 4. 研究成果

##### 濡れ性勾配を有する複合伝熱面の製作と液滴輸送効果

複合伝熱面は MEMS 加工によって製作する。φ20mm シリコンウエハを基板として、酸化炉で表面に 1μm 程度の酸化膜を成膜することで親水面が形成できる。その後、サイトップを成膜することで疎水面を実現できる。さらにフォトレジストを塗布し、露光、現像を行い、RIE によって疎水面をエッチングする。最後にフォトレジストを洗浄することで複合伝熱面を製作できる。図 3 に製作した複合伝熱面の一例を示す。疎水面が徐々に変化していくことが顕微鏡画像より確認できる。なお、液滴を滴下した際の液滴輸送の様子を図 4 に示すが、液滴が疎水面から親水面に移動している様子が観察された。本研究期間において製作プロトコルを構築することができた。

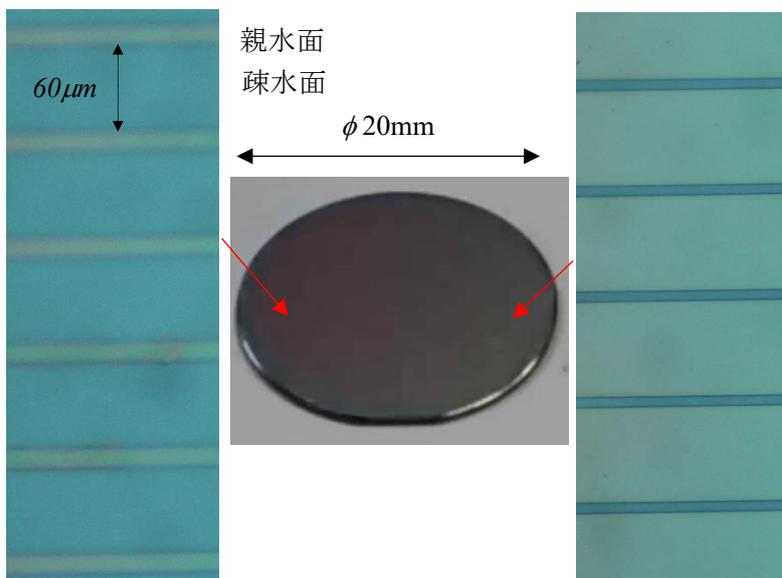


図 3 全面濡れ性勾配を有する複合伝熱面

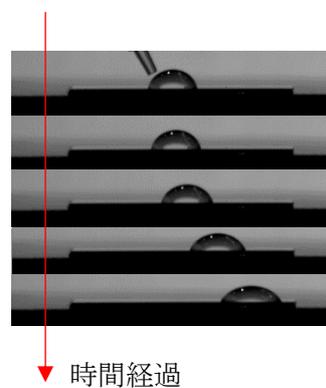
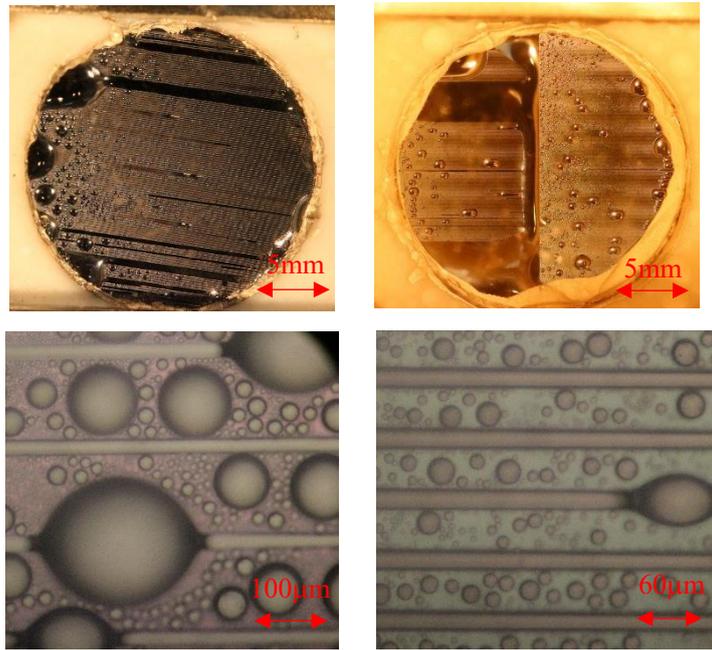


図 4 液滴の移動

### 凝縮伝熱促進効果の実験検証

実験は数 kPa の低圧条件下で行った。テストコンデンサー内の冷却ブロックに製作した複合伝熱面を銀ペーストで貼り付け、冷却ブロックの裏側を液体窒素により冷却することで大きな過冷度を与えた実験を可能にする。図5に伝熱面の様子と、顕微鏡写真を示す。全面濡れ性勾配の実験においては一部フラiddingが発生しているものの、全体的に液滴が効果的に除去されていることがわかる。一方で周期的に配置した濡れ性勾配では液膜が中央部で結合し、フラiddingが発生することが分かった。しかしながら中央より右側では液滴が効果的に除去でき、高蒸気流速を要することなくフラiddingを抑制できることが分かった。ただし、周期的に配置した場合は上部と下部で凝縮面のエッジ部分の影響が強くなるため、濡れ性勾配そのものの問題であるかは不明であり、これは今後実験装置を改良するなどして対応したいと考えている。図6に凝縮熱流束の比較を示す。本研究期間で実施した複合伝熱面は、全面を滴状凝縮とした場合の方が熱流束の向上することが分かった。高速蒸気流下の滴状凝縮と同程度まで伝熱促進を実現できており、有効性を確認した。一方で、周期的に配置した場合は伝熱特性として大きな向上は観察できなかつた。これは凝縮面上部と下部の液膜の存在が問題となっている可能性が極めて高い。しかしながら、中央部より右側は液滴の離脱によってフラiddingが抑制されており、高い熱輸送特性を実現できると考える。今後実験装置の改良を含めて検討したい。



(a) 全面濡れ性勾配中央部 (b) 周期的濡れ性勾配左中央部

図5 凝縮実験中の様子

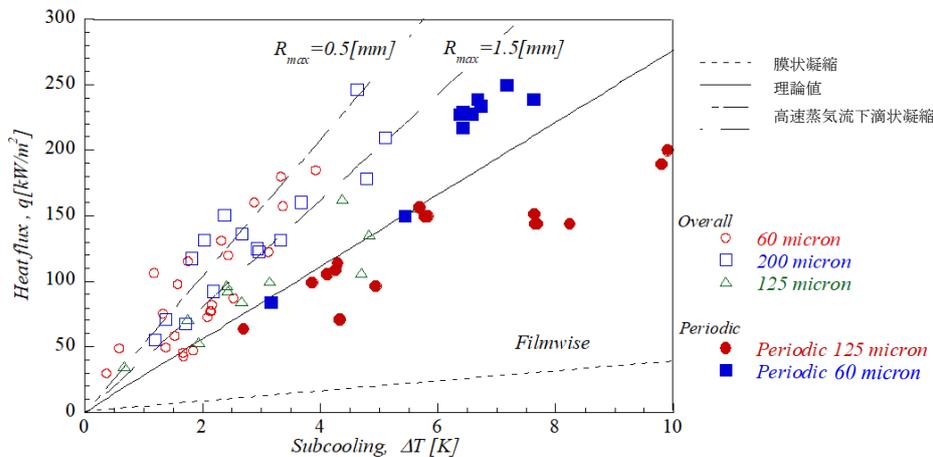


図6 凝縮熱流束

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Tokunaga Atsushi, Tsuruta Takaharu	4. 巻 156
2. 論文標題 Enhancement of condensation heat transfer on a microstructured surface with wettability gradient	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 119839 ~ 119839
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119839	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 鶴田隆治, 徳永敦士	4. 巻 95
2. 論文標題 液滴輸送による凝縮熱伝達促進	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 冷凍	6. 最初と最後の頁 15-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 山一 伶太, 徳永 敦士
2. 発表標題 周期的な濡れ性勾配を有する複合伝熱面による凝縮伝熱促進に関する研究
3. 学会等名 熱工学コンファレンス2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 徳永敦士
2. 発表標題 周期的な濡れ性勾配を有する複合伝熱面による伝熱促進効果
3. 学会等名 第60回伝熱シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 徳永敦士, 鶴田隆治
2. 発表標題 濡れ性勾配による滴状凝縮の液滴輸送効果に関する実験的検討
3. 学会等名 第57回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Atsushi TOKUNAGA, Takaharu TSURUTA
2. 発表標題 CONDENSATION HEAT TRANSFER ON BI-PHILIC SURFACE WITH WETTABILITY GRADIENT
3. 学会等名 The Second Pacific Rim Thermal Engineering Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 マイクロ・ナノ熱工学の進展編集委員会、丸山 茂夫、稲田 孝明ほか17名	4. 発行年 2021年
2. 出版社 エヌ・ティー・エス	5. 総ページ数 808
3. 書名 マイクロ・ナノ熱工学の進展	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------