

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 31 日現在

機関番号：55501

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2011～2012

課題番号：23860063

研究課題名（和文） 疎水・親水のマイクロ構造を有する機能性伝熱面の創成と凝縮熱伝達特性に関する研究

研究課題名（英文） Study on Fabrication of Hydrophobic and Hydrophilic Micro-structured Condensing Surface and Enhancement of Condensation Heat Transfer

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・助教

研究者番号：20609797

研究成果の概要（和文）：現在，CPU に代表される高熱流束デバイスの熱負荷が増大し，マイクロ・ナノスケールでの伝熱促進技術の開発が求められている．そこで，凝縮熱伝達の促進を目的とした機能性伝熱面の製作を行った．この機能性伝熱面は，伝熱に貢献度の高い液滴を効果的に伝熱面に分布させるために，疎水面と親水面をマイクロスケールで交互に配置したものである．凝縮実験の結果，膜状凝縮よりも高い凝縮熱伝達特性を得ることができた．

研究成果の概要（英文）：The micro- and nano- scale phase change phenomena and cooling technology are more important because the MEMS technology develops rapidly in the fields of electro- devices such as CPU. Therefore, the functionalized heat transfer surface is made in order to realize the enhancement of condensation heat transfer. The hybrid-condensing surface with hydrophobic and hydrophilic patterns is fabricated in order to remove the grown droplets. This is because in the dropwise condensation on the hydrophobic surface, the heat transfer coefficient is determined by the departing droplet size. In experimental results, the heat transfer coefficients on the hybrid-condensing surface show the larger value than the filmwise condensation heat transfer.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2011 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2012 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,400,000	720,000	3,120,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：熱工学，滴状凝縮，MEMS，伝熱促進，マイクロ・ナノ伝熱

## 1. 研究開始当初の背景

微細加工技術の発展は，マイクロスケールの超小型デバイスや薄膜熱電対などの製作を可能にした．これにより，熱工学の分野においても高熱流束デバイスの高密度化，省ス

ペース化が進み，マイクロ・ナノスケールにおける伝熱促進技術の開発が求められている．例えば，パソコンの CPU に代表される高熱流束デバイスの冷却が大きな問題となっており，沸騰や凝縮などの高熱流束潜熱輸送，

さらには究極的な界面輸送が注目されている。このマイクロ・ナノスケール伝熱においては三相界面が重要であるが、なかでも相変化伝熱を活用しようとする場合、気液界面現象が最も重要である。すなわち、除熱限界の向上のためには気液界面輸送を活用することが要求される。そこで、この気液界面輸送機構の解明のために、分子動力学解析及び凝縮実験を行なってきた。凝縮実験では滴状凝縮法による気液界面抵抗の評価を主な目的とし、その熱伝達特性の評価を行なっている。その結果、凝縮係数約 0.8 を得るとともに、滴状凝縮において最も伝熱に貢献度の高い液滴は約  $7\mu\text{m}$  程度であることが分かった。すなわち、この伝熱に貢献度の高い液滴を凝縮面上に多数分布させることが出来れば、凝縮熱伝達特性の向上を実現できる。

## 2. 研究の目的

ナノ・マイクロスケールにおける伝熱においては、液滴の伝導抵抗よりも気液界面抵抗が支配的な要因となる。そのため、相界面現象の解明と、界面を活用する機能性伝熱面の設計は、エネルギー利用の高効率化・省エネルギー化を実現する。そこで、極めて伝熱に貢献度の高い液滴を伝熱面上に分布させるために、液滴の離脱径を制御する機能性伝熱面を設計・製作し、その熱伝達特性を評価することを目的とした。具体的には、疎水面と親水面をマイクロスケールで交互に配置し、膜状凝縮によって凝縮液滴径の制御と液滴離脱を促すとともに、滴状凝縮により凝縮熱伝達の促進を図る。加えて、より効果的な液滴離脱と伝熱促進効果を得るために、疎水のマイクログループ構造を有する機能性伝熱面を製作し、効果的な伝熱面構造について検討する。

## 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

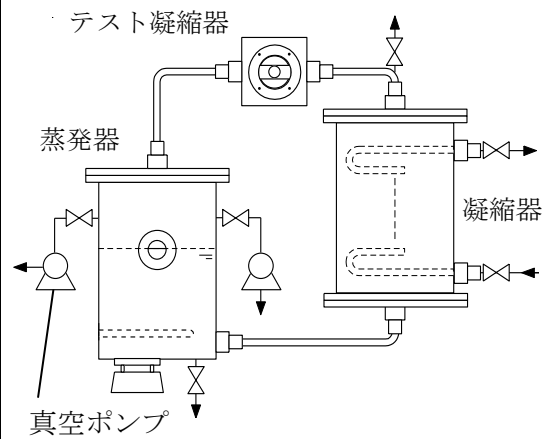


図1 実験装置

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撮影した。

### (2) 疎水・親水の機能性伝熱面の作製

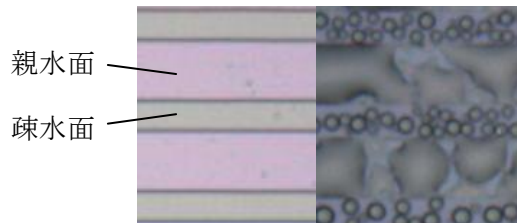
伝熱に最も貢献度の高い液滴を有効に活用するために、疎水面と親水面の幅をともに $20\mu\text{m}$ としてストライプ状に配置するマスクを設計・製作した。まず、シリコン基板上にプラズマCVD (Chemical Vapor Deposition) によって $\text{SiO}_2$ を膜厚約 $1.0\mu\text{m}$ 成膜する。この酸化膜は凝縮において親水面となる。さらに、滴状凝縮を実現するための撥水処理剤であるCytop (旭硝子株式会社)をスピンドーターで塗布した。膜厚は、 $360\text{nm}$ 、 $800\text{nm}$ 、 $1700\text{nm}$ の3通りである。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を図 2(a) に示すが、疎水・親水面の幅は $12\mu\text{m}$ と $28\mu\text{m}$ となった。また、合わせて凝縮時の様子を示しているが、疎水面部分で滴状凝縮が発生し、親水部分で膜状凝縮が発生していることが分かる。すなわち、滴状凝縮における離脱半径を制御することが可能となり、凝縮熱伝達特性の向上が見込まれる。

### (3) 疎水マイクログループを有する機能性伝熱面の作製

疎水のグループ加工によって、熱伝達特性が向上するとの報告があり、本研究でもそれを応用し、マイクロスケールで疎水面のグループ加工を施すことを計画した。

方法は(2)と同じであり、Cytopのグループ構造になるようにエッチングを行う。Cytopの膜厚は $1900\text{nm}$ であり、 $900\text{nm}$ エ



(a) 疎水面, 親水面



(b) 疎水面のグループ構造

図2 機能性伝熱面

ッチングを行った。図 2(b)に製作した伝熱面の顕微鏡写真を示すが、疎水グループ構造を形成することに成功した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 液滴の凝縮挙動

滴状凝縮において、凝縮熱伝達特性は液滴の離脱半径によって決定される。そこで、機能性伝熱面上の凝縮液滴及び液膜の観察を行った。図 3 に伝熱面全体を撮影した写真を示し、図 4 には顕微鏡を通して撮影した写真を示している。H=360nm においては、凝縮面全体が膜状凝縮となっており、設計よりも滴状凝縮領域が少なくなっていることが分かる。微視的観察によっても複数パターンをまたがった液膜が観察され、排水能力を越えてしまうことでフラッディングが発生している。そこで、液滴の排除能力向上のために膜厚を厚くし、凝縮実験を行った。

図 5 に、熱流束と図 3 に示す凝縮面の写真から得られる有効面積割合の関係を示している。ここで、有効面積割合は、凝縮面面積に対する滴状凝縮領域の割合と定義した。低熱流束条件においては凝縮速度と液滴の排出速度のバランスは保たれており、有効面積割合も高いことが分かる。一方、高熱流束条件では有効面積割合が低下している。これは、凝縮量と排出量のバランスが崩れるために液膜が疎水面を覆い、滴状凝縮の割合が低下しているためである。また、この有効面積割合に関して疎水面厚さで検討した場合、疎水面が厚い程有効面積割合が高くなっている。これは、グループ深さを H=1700nm にすることで排水能力が向上したためであり、グループを深く形成することで凝縮液滴を効果的に排除することが出来ると考えられる。

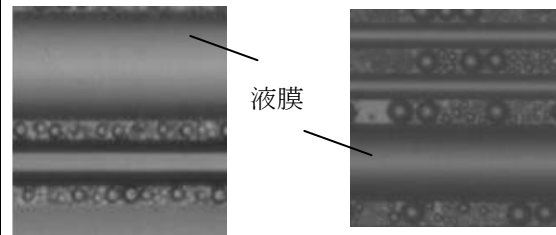
一方、疎水面のみのグループ構造とした機



H=360nm H=1700nm H=1000nm  
疎水面, 親水面 疎水面のみ

図3 伝熱面全体

10mm



H=360nm  
疎水面, 親水面

H=1000nm  
疎水面のみ

図 4 顕微鏡画像

20μm

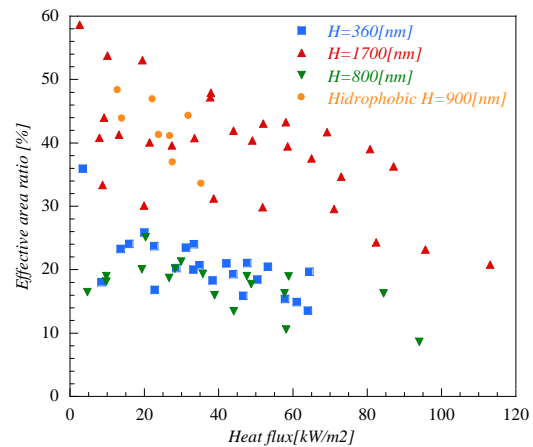


図 5 有効面積割合

能性伝熱面においても、グループ部分が凝縮液によって満たされ、疎水・親水の機能性伝熱面と同様の結果となった。図 3 及び図 4 に示す顕微鏡写真からも、複数パターンを覆う液膜が観察されており、グループ部の毛細管力が極めて大きいため液滴の排出効果を十分に得ることができていないと考えられる。

##### (2) 凝縮熱伝達特性

図 6 に、過冷度と得られた熱流束の関係を示している。合わせて、強制対流における膜状凝縮熱流束と、機能性伝熱面の設計条件に基づいて決定される理論熱流束を示している。実験により得られた熱流束は理論熱流束より低い値となっているものの膜状凝縮と比較して高い値を示しており、低過冷度の条件下では全てのパターンでほぼ同じ値となっている。一方、高過冷度条件では、疎水面厚さが厚いほど高い熱流束を示している。こ

れは、液滴の排出効果が高くなることでフラジディングが抑制され、伝熱に貢献する疎水面が活用されているためである。

図7には、過冷度と熱伝達率の関係を示しているが、図6と同様に疎水面厚さ $H=1700\text{nm}$ の場合が、他のパターンと比較して高い熱伝達特性を示している。一方、疎水のグループ構造伝熱面の結果も合わせて示すが、図5で示したように、毛細管力の影響でグループ部分が凝縮液で覆われたため、疎水・親水の凝縮面とほぼ同じ傾向を示している。

なお、高熱流束デバイス（例えばCPU）の冷却システムへの応用を考えれば、高過冷度条件よりも低過冷度条件である場合が多いと考えられる。本研究で製作した機能性伝熱面は、低熱流束条件下において液滴の排出と液滴径制御をある程度実現できており、膜状凝縮熱伝達率よりも高い熱輸送特性を示している。すなわち、この機能性伝熱面はマイクロ・ナノシステムにおける凝縮熱伝達の促進に効果があると考えられる。今後は、高熱流束条件でも効果的な液滴排出と熱輸送特性の向上を実現できる機能性伝熱面の設計・製作が必要である。

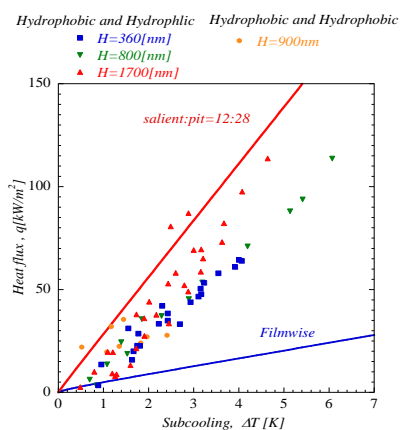


図6 熱流束

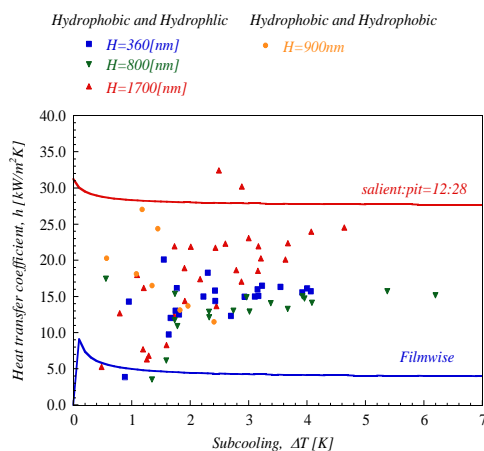


図7 凝縮熱伝達

## 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2件)

① Atsushi Tokunaga, Masaki Mizutani, Gyoko Nakayama, Takaharu Tsuruta, “Effect of Micro-structured Surface on Dropwise Condensation Heat Transfer”, Proceedings of ASME 2013 11th International Conference on Nanochannels, Microchannels and Minichannels, 2013, ICNMM2013-73200 (8 pges), 査読有. (掲載確定)

② Atsushi Tokunaga, Shota Yamawaki, Gyoko Nakayama, Takaharu Tsuruta, “Condensation Heat Transfer on A Micro-structured Surface with Hydrophobic and Hydrophilic Patterns”, Proceedings of The Eighth KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference, 2012, FR11-013 (2 pges), 査読有.

[学会発表] (計4件)

① Atsushi Tokunaga, Masaki Mizutani, Gyoko Nakayama, Takaharu Tsuruta, “Effect of Micro-structured Surface on Dropwise Condensation Heat Transfer”, ASME 2013 11th International Conference on Nanochannels, Microchannels and Minichannels, 2013, June. 17, Hokkaido University (Hokkaido, Japan), (発表確定)

② 徳永敦士, 水谷政樹, 長山暁子, 鶴田隆治, 「マイクロ構造を有する凝縮面上の熱伝達特性」, 第49回日本伝熱シンポジウム, 2012年5月31日, 富山国際会議場 (富山県)

③ Atsushi Tokunaga, Shota Yamawaki, Gyoko Nakayama, Takaharu Tsuruta, “Condensation Heat Transfer on A Micro-structured Surface with Hydrophobic and Hydrophilic Patterns”, The Eighth KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference, 2012, Mar. 19, Songdo Convensia Center (Incheon, Korea)

④ 山脇将太, 徳永敦士, 長山暁子, 鶴田隆治, 「疎水・親水マイクロパターン面上の凝縮熱伝達」, 第48回日本伝熱シンポジウム, 2011年6月1日, 岡山コンベンションセンター (岡山県)

## 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・助教

研究者番号: 23860063