

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03905

研究課題名（和文）3次元マイクロ流路ネットワークの構築による集積熱制御デバイスの研究

研究課題名（英文）Study on Integrated Thermal Management Devices through the Construction of 3D Microchannel Networks

研究代表者

馬場 宗明（Baba, Soumei）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エネルギー・環境領域・主任研究員

研究者番号：10711773

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、シリコンエッチング技術を用いて高密度マイクロ流路ネットワークを統合した集積熱制御デバイスの開発と高性能化のために必要な要素技術開発を行った。感温性蛍光粒子（TSP）を用いた可視化計測では、流動沸騰の気泡成長やドライパッチに伴う熱伝達率分布の変化を高い時空間分解能で観察することに成功した。また、自然界の超撥水表面を模倣したナノ・マイクロ階層構造を伝熱面に適用することで、凝縮液滴の成長および自発ジャンプの促進効果を確認することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、シリコンエッチング技術とナノ・マイクロ構造を用いて、効率的な熱制御デバイスの開発を行った。学術的意義としては、沸騰および凝縮現象のメカニズム解明に寄与する基盤的技術として可視化計測と伝熱促進のための微細加工技術の開発を行い、熱伝達率の向上を実証した。社会的意義としては、今後課題となる高性能電子機器の冷却効率向上に寄与し、省エネルギー化と機器寿命の延長への貢献が期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, we developed an integrated thermal control device with a high-density microchannel network using silicon etching technology. Visualization techniques using temperature-sensitive paint (TSP) allowed us to visualize the heat transfer distribution on the heating surface with high temporal and spatial resolution. We also controlled multi-scale condensation phenomena using bio-inspired nano- and microstructured surfaces. These advancements enabled stable boiling without dryout at heat fluxes up to 15 W/cm² and provided detailed insights into heat transfer mechanisms during forced convective boiling. Our findings propose a novel approach to enhancing heat exchange processes through precise surface structure adjustments, potentially improving the efficiency of thermal control devices.

研究分野：熱工学

キーワード：微細加工 滴状凝縮 TSP 可視化計測 伝熱促進 jumping droplet マイクロチャネル

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

GaN や SiC 等の WBG パワーデバイスや情報通信分野の技術革新に伴い高発熱密度の除熱は喫緊の課題となっており、沸騰・凝縮伝熱を利用した高効率熱制御の重要性が増している。沸騰伝熱は非常に熱伝達率が高いが、一度ドライアウトすると局所的な伝熱の劣化により無効な伝熱面積が生じるだけでなく、最悪の場合は温度が急上昇し溶損する場合がある。近年の国内外における沸騰研究では、微細加工・表面処理技術を応用して表面凹凸形状やポーラス等のウィック構造、濡れ性制御を流体力学的スケールでパターン化することによる伝熱促進が試みられており、熱流束の増大にともない伝熱面過熱度が低下する特異な伝熱促進効果が報告されている。実用的に重要となるのは単位体積あたりの熱交換量の向上であり、ペーパーチャンバやマイクロチャンネル熱交換器などの熱制御デバイスにおいても、前述した沸騰研究にみられるような、気液流動構造の最適化や液膜蒸発による伝熱促進による性能向上が期待できる。しかしながら、熱制御デバイス内では複雑な液相・気相流路構造の3次元造形手法が確立されておらず、また複雑な相変化伝熱現象の可視化計測が十分でないため設計の指針はあくまで技術者の経験と試行錯誤によるという課題がある。

2. 研究の目的

本研究では、シリコンのエッチング技術および接合技術を応用したマイクロ流路ネットワークを高密度に統合した集積熱制御デバイスの研究開発を行う。さらに、積層したマイクロ流路内における相変化を伴う内部流動制御を目的として、以下の(1)から(3)の研究項目を実施する。

(1) マイクロ流路ネットワークの構築では、液供給流路と蒸気拡散流路を熱源配置や熱負荷に応じて分離し、熱伝達向上に寄与する固気液三相界線を効果的に拡大させることを目的とする。反応性エッチング技術を用いてシリコンウエハの表面に微細な流路や構造体を加工し、高密度にマイクロ流路やピラーウィック構造を持つ集積型熱制御デバイスを製作する。液供給流路や蒸発面、蒸气流路を熱源配置や熱負荷に応じた最適化指針を構築することで、体積当たりの熱交換性能を飛躍的に向上させる。

(2) 感温性蛍光粒子 (Temperature Sensitive Paint、以下 TSP) の発光・蛍光スペクトル形状を画像解析することで、高い時間・空間分解能で伝熱面表面の温度分布の変化を可視化し、これまで定量評価が困難であった相変化伝熱に伴う非定常な熱伝達現象を明らかにする。

(3) 凝縮伝熱面については、マルチスケールでの凝縮現象 (核生成、液滴成長・合体、自発跳躍) および伝熱因子 (液滴接触状態、三相界線) の制御を目的とした微細加工を行う。特に、自然界のバイオマテリアルに着想を得た新規なナノ・マイクロ階層構造・濡れ性制御を適用した伝熱面を創製し、当該表面での液滴跳躍を伴う滴状凝縮挙動を調べる。ナノ・マイクロ階層構造を有する凝縮面上でのマルチスケール凝縮現象および伝熱因子の制御を試みる。

3. 研究の方法

(1) シリコンウエハに 100 μm 以下のマイクロ流路構造をドライエッチングにより加工してマイクロ流路ネットワークの試作および評価を行った。チップの発熱領域から直接熱を取り出すため、発熱部には蒸発制御機構として液膜形成を促すマイクロピラー構造を設け、熱源直下において薄液膜蒸発が促進されることを狙い、局所的かつ効率的な熱交換を図った。特性評価では強制流動沸騰実験を行い、発熱体を模擬して熱流束を変化させた際の発熱部温度変化とそれに伴う熱伝達率変化の定量評価を実施した。

(2) 強制流動沸騰実験は、高さ 4 mm、幅 10 mm の矩形チャネルを用いて、HFE-7100, HFE-7000 を試験流体とした実験を行った。TSP 層には蛍光材料として PtTFPP、Ru(phen)を選定し、ポリマーバインディングとして PolyIBM、PMMA、PAA、PVP K90 の組み合わせでの薄膜形成条件を探索した。最終的に採用した膜は PtTFPP と PMMA の組み合わせで、温度感度-0.50%/K で長期間安定した発光特性を示す TSP 膜の形成に成功した。UV-LED による高強度パルス励起光を照射し、高速カメラで TSP 発光強度を撮影することで、流動沸騰時の気泡成長および乾燥パッチ拡大による非定常熱伝達係数の変化を定量的に評価した。

(3) 自然界の超撥水表面として、常緑の多年生植物であり、その葉は超撥水面として知られている *E. myrsinites* の葉に着目した。*E. myrsinites* が持つ特徴的な階層的なナノ・マイクロ構造を模倣した人工表面を作製し、凝縮挙動を観察した。基板にはシリコンウエハを用い、Bosch プロセスにより微細な柱状構造を形成した。柱の直径は 1.2 μm ~ 16 μm 、間隔および高さを変更したときの凝縮特性を調べた。作製した人工表面の撥水性を高めるために、Au 薄膜の thermal dewetting により形成させた金ナノ粒子をマスクとし、ナノ構造形成用に最適化された Bosch プロセスによりナノピラー構造を付与した[1]。凝縮実験ではマイクロスコブ観察により凝縮液滴の核生成から成長、合体、自発ジャンプに至る一連の挙動を観察した。

4. 研究成果

各研究項目における研究成果を以下に示す。

(1) マイクロ流路構造の一例として、流路高さ 50 μm のマイクロ流路を形成させた蒸発面を図 1(a)に示す。発熱部にマイクログループとマイクロピラー構造を加工し、蒸発面の上流側には沸騰の圧力変動による逆流とそれに起因する流量分配の不均一が生じないように絞り部を設けた構造とした。本サンプルを用いた流動沸騰実験での発熱体温度を図 1(b)に示す。非常に薄い構造であるが、熱流束 15 W/cm² でもドライアウトに至ることなく安定して沸騰させることができる。

ことを確認した。研究項目(2)、(3)に示す可視化計測技術および表面微細構造を適用することで、流路構造の最適化を図ることができる。

(2) TSP を用いた流動沸騰伝熱面における熱伝達率分布の評価内容を図 2 に示す。高強度パルス励起光 (395 nm) を 2 kHz、20 μ s 照射し、パルス励起光に同期された高速カメラを用いて中心波長 650 nm の発光状態を露光時間 50 μ s で撮影し、発光特性より伝熱面の表面温度を可視化した。また、伝熱面内の 3 次元熱伝導を解析的に解くことで伝熱面表面における熱流束分布および熱伝達率分布を算出した。質量速度 104 kg/m²s、熱流束 9.6 W/cm² の条件下で、沸騰気泡底部における熱伝達率分布の変化を捉えることに成功した。具体的には、沸騰核生成に伴い気泡周囲の液膜形成部での伝熱促進と中心部の伝熱劣化が同時に計測され、スラグ気泡通過時に液膜が乾きドライアウト面が拡大することに伴い低熱伝達率域が拡大し伝熱面温度が上昇し、スラグ通過後のリウェettingにより広い領域が高熱伝達率を示す、という一連の沸騰過程を観察することができた。本研究の結果、TSP を用いた可視化計測により 1 kHz を超える高い時間分解能とピクセルあたり 16 μ m の高い空間分解能で温度分布を可視化でき、強制流動沸騰における熱伝達メカニズムの解明に有効であることが示された。ただし本研究では有機蛍光物質を用いており、100 を超える温度条件では蛍光の劣化が確認され、高温域での適用のためには無機蛍光物質の選定と塗膜手法の開発が必要である課題が明確になった。

(3) *E. myrsinites* と同程度のマイクロピラーのサイズについて、マイクロピラー直径と高さによる凝縮液滴の生成と成長の違いを調べた。顕著に違いが表れたのは直径 5.6 μ m、高さ 19.5 μ m の微細構造表面であり、液滴合体に駆動される自発的な液滴ジャンプが頻繁に発生し、大きな液滴の再付着を防ぐことができた。この結果、10 分以上の観察期間において継続的に 35 μ m 以上の大きな液滴が存在しないことが確認された。高速度カメラを用いた側面からの観察によると、初期の非常に小さな液滴が連続してジャンプする現象が確認された。この現象は、特に小さな直径のピラー (5.6 μ m) 上で顕著であり、液滴が連続してジャンプし続けることで、表面に大きな液滴が形成されるのを防ぐ効果が得られたことが示された。また、人工表面上での凝縮液滴の成長速度が *E. myrsinites* の葉と同様に早いことが確認され、特に、ピラー高さが 19.5 μ m の場合、凝縮速度が顕著に向上し熱・質量輸送量が増加することが示された。次に、直径を 1.2 μ m と非常に細いマイクロピラーを形成させたサンプルを作製して同様に凝縮特性を評価したところ、ピラー間隔が狭くピラー高さが十分に高いサンプルでは、マイクロピラー間に存在する液滴に働くラプラス圧力の上下差により Cassie 状態に速やかに移行し、Cassie 状態の液滴同士の合体頻度が向上したことにより、液滴径 20 μ m 以下の自発液滴ジャンプが極めて高頻度で発生することがわかった。本研究により、表面構造の微細な調整により、凝縮液滴の核生成、成長、および自己除去のメカニズムを効果的に制御できることが分かり、熱交換プロセスの効率を向上させる新たな手法を提案することができた。

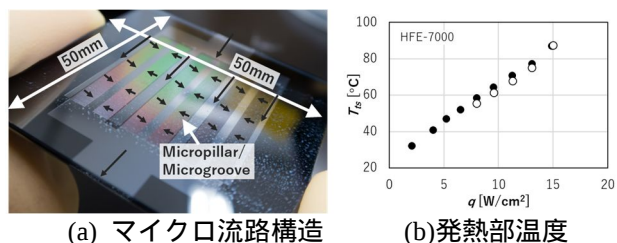


図 1 試作したマイクロ流路構造と冷却特性評価結果

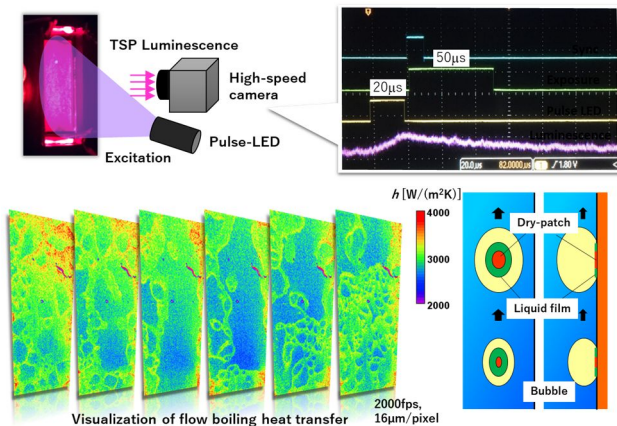


図 2 強制流動沸騰熱伝達率分布の可視化結果

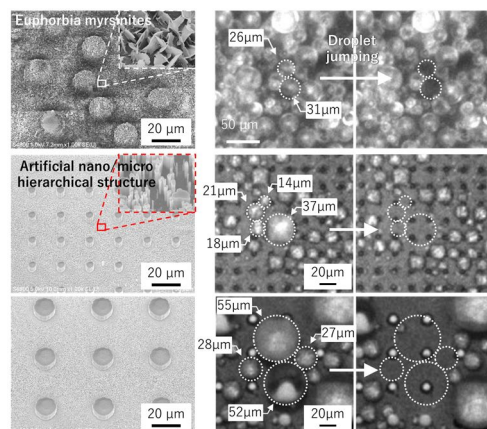


図 3 バイオミメティクスに基づくナノ・マイクロ微細構造の作製

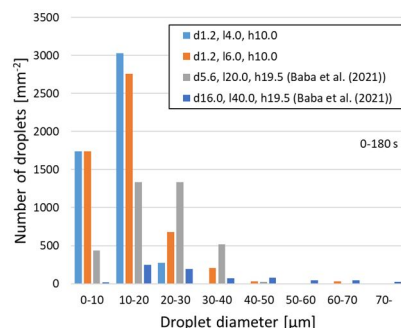


図 4 自発的液滴ジャンプの液滴サイズと発生頻度の比較

< 引用文献 >

[1] S. Baba et al., Langmuir 36, 10033 (2020)

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 0件）

1. 著者名 Baba Soumei, Saito Shimpei, Takada Naoki, Someya Satoshi	4. 巻 197
2. 論文標題 Visualization of flow boiling heat transfer using temperature sensitive paint with high spatial and temporal resolution	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 123367 ~ 123367
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123367	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 -

1. 著者名 Soumei Baba, Kenichiro Sawada, Kohsuke Tanaka, Atsushi Okamoto	4. 巻 13
2. 論文標題 Condensation Behavior of Hierarchical Nano/Microstructured Surfaces Inspired by Euphorbia myrsinites	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACS Applied Materials & Interfaces	6. 最初と最後の頁 32332 ~ 32342
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1021/acsami.1c01400	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6件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 馬場宗明、齋藤慎平、高田尚樹、染矢聡
2. 発表標題 マイクロビラーを持つ超撥水凝縮面における自発的跳躍液滴
3. 学会等名 混相流シンポジウム2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 馬場宗明、齋藤慎平、高田尚樹、染矢聡
2. 発表標題 TSPによる沸騰伝熱面温度分布の高時空間分解能計測
3. 学会等名 第59回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2022年

1．発表者名 馬場宗明、澤田健一郎、田中洸輔、岡本篤
2．発表標題 ナノ・マイクロ階層構造を持つ超撥水表面での滴状凝縮挙動
3．学会等名 第58回日本伝熱シンポジウム
4．発表年 2021年

1．発表者名 馬場宗明、澤田健一郎、田中洸輔、岡本篤
2．発表標題 シリコン製マイクロペーパーチャンバの熱流動特性
3．学会等名 第58回日本伝熱シンポジウム
4．発表年 2021年

1．発表者名 馬場宗明
2．発表標題 感温塗料（TSP）による伝熱面温度分布の高時空間分解能計測
3．学会等名 第14回相変化界面研究会
4．発表年 2021年

1．発表者名 馬場宗明
2．発表標題 次世代半導体の超省エネ動作を実現する伝熱促進技術
3．学会等名 エネルギー技術シンポジウム2023
4．発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔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
---------	---------