

令和元年6月26日現在

機関番号：25503

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06134

研究課題名(和文) 省エネルギー・低炭素化社会を支える一方向性ユニポーラス銅ヒートシンクの開発

研究課題名(英文) Development of Uni-directional Porous Copper Heat Sink with Energy and Carbon saving

研究代表者

結城 和久 (Yuki, Kazuhisa)

山陽小野田市立山口東京理科大学・工学部・教授

研究者番号：90302182

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、次代の省エネルギー・低炭素化社会の実現を大きく牽引するパワーエレクトロニクスの冷却技術を開発するため、一方向性ユニポーラス型ヒートシンクの飽和プール沸騰および流動沸騰特性を評価する。まず機械加工によって製作されたユニポーラス体をグループ伝熱面に設置して流動沸騰試験を実施し、従来技術よりも低いポンプ動力で1000W/cm<sup>2</sup>に迫る冷却性能を実証した。飽和プール沸騰試験では、機械加工により沸騰伝熱面を製作し、限界熱流束300W/cm<sup>2</sup>が達成可能であることを実証し、ユニポーラス上部から自発的に液が供給されていることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ユニポーラス体を用い、従来技術よりも低いポンプ動力で、1000W/cm<sup>2</sup>に迫る冷却性能を実証した。更に飽和プール沸騰試験では、限界熱流束300W/cm<sup>2</sup>を達成可能であることを実証した。これらの成果は省エネルギー社会の普及を後押しする有益な成果であり、今後、実装ベースでの冷却ユニット設計を可能とするものである。

研究成果の概要(英文)：Saturated pool boiling and flow boiling/evaporation with unidirectional uni-porous heat sinks are investigated to develop pumpless cooling and low pumping power cooling technologies for thermal management of high power electronics, which will largely drive the realization of the next generation energy saving and low carbon society. First, by attaching the uniporous copper manufactured by machining onto the grooved surface, we have demonstrated the cooling performance approaching 1000 W/cm<sup>2</sup> with low pumping power less than 2W. In the saturated pool boiling experiments, a boiling surface with grooves and uniporous pores that are fabricated by machining enables the critical heat flux over 300W/cm<sup>2</sup>.

研究分野：熱工学

キーワード：高熱流束 冷却 ポーラス体 一方向性気孔 電子機器 インバータ

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

現在、省エネルギーならびに低炭素化社会を構築するための革新技術の導入が求められている。内閣府戦略市場創造プランでは、電気エネルギーの効率的な利用を実現するパワーエレクトロニクス技術が注目され、2020年には次世代型パワーエレクトロニクスが生産から流通・消費の全てに組み込まれることが強く推奨されている。特に、次世代パワー半導体材料として期待されているSiCが実用化の段階に入り、特に低炭素化社会の構築を目指して車載用インバータへの適用が強く期待されている。ところが、SiC導入で期待される低エネルギー損失の反面、大電流密度化、高出力化、小型化により発熱密度 $300\text{ W/cm}^2$ の冷却、更に、半導体素子によってはホットスポット発熱密度 $1000\text{ W/cm}^2$ の冷却が重要な課題となっている。例えば現在の車載用インバータの冷却設計では、 $300\text{ W/cm}^2$ の発熱に対しSiCチップの最適動作温度（約 $220^\circ\text{C}$ ）と冷却液との高い温度差を利用する強制対流熱伝達により十分に冷却可能とされているが、より低いポンプ動力そして究極的にはポンプレスでの冷却技術開発が望ましい。

研究代表者はこれまで高熱負荷 $1000\text{ W/cm}^2$ （ $10\text{ MW/m}^2$ ）の冷却を目的として、ポーラス金属を用いた冷却デバイスEVAPORONを開発している。本デバイスの特徴は、蒸気排出サブチャンネルの装荷により冷却液を積極的に蒸発させることが可能であるため、冷却水が有する潜熱ポテンシャルを最大限に活用し、発熱量に応じて低流量での冷却を実現できる点にある。一方、ポーラス型ヒートシンクEVAPORONの課題として、①蒸気排出性能の更なる向上、②ポーラス体の有効熱伝導率の向上、③発熱面とポーラス体との接触熱抵抗の低減、④発熱面への直接的液供給、の4点が挙げられ、これらを解決することにより冷却液の殆どを蒸発させることができる究極のエバポレータ型冷却デバイスを開発できることを指摘している。

### 2. 研究の目的

前述の課題を克服して次世代SiC型車載用インバータの自立型ポンプレス冷却もしくは極低流量冷却デバイスを開発するため、一方向性の気孔構造を有するユニポーラス銅を新たに導入する。本ポーラス体は、ポーラス金属のなかでも極めて高い有効熱伝導率を有し、冷却液を直接的に伝熱面に供給でき、更にポーラス体と伝熱面が面接触状態となるため接触熱抵抗を最大限に低減することができる。また、伝熱面上に格子状もしくは一方向のグループを形成することで蒸気を円滑にポーラス外へ排出することも可能となる。このため液の蒸発潜熱を最大限に活用でき、極めて低いポンプ動力で $1000\text{ W/cm}^2$ の発熱を冷却できる可能性を有している。更に、プール沸騰環境において伝熱面にユニポーラス体を設置することで生成蒸気が孔から噴出し、それに伴い自立的に液が伝熱面グループから供給されることも期待でき、限界熱流束 $300\text{ W/cm}^2$ を達成できる可能性がある。そこで本研究では、近年問題となっているパワー素子のホットスポット冷却に対応するため、ユニポーラス体を用いた流動沸騰・蒸発デバイスEVAPORON-4により $1000\text{ W/cm}^2$ の限界熱流束を達成し、更に大気圧環境における水飽和プール沸騰環境において $300\text{ W/cm}^2$ の限界熱流束を達成することを目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究では、先ず以下の項目(1)、(2)の基礎伝熱試験を実施する。更に相変化メカニズムを解明し、目標値を達成するための試験項目(3)、(4)について実施する。

- (1) 流動沸騰試験装置を製作し、流量・サブクール度等をパラメータとしてEVAPORON-4の伝熱性能を評価する。
- (2) 大気圧環境下におけるプール沸騰伝熱試験装置を製作し、グループ伝熱面にユニポーラス体が接合された沸騰伝熱面で沸騰伝熱試験を実施する。
- (3) 内部二相流状態について把握するための可視化試験装置を製作し、沸騰形態に対する熱流束の影響について高速度カメラにより明らかにする。
- (4) 数値シミュレーションによりポーラス体内の相変化現象を定性的に把握し、プール沸騰限界熱流束向上に対する主要因子を抽出する。

### 4. 研究成果

#### 4. 1 ユニポーラス銅を用いた流動沸騰・蒸発試験

冷却液である蒸留水はストレージタンクから冷却液供給用ポンプで圧送され、流量計、圧力計を経て後述する伝熱試験部に流入する。伝熱試験部から排出された液・蒸気は、熱交換器で凝縮され、再びストレージタンクに戻る。伝熱試験部下部には、高出力ヒータ8本を装荷したピラミッド形状の銅製ブロックが用いられる。伝熱銅ブロックは、直径 $30\text{ mm}$ 、高さ $10\text{ mm}$ の円柱部を有し、この円柱部上端面が伝熱面となる。伝熱面から $3.0, 5.0, 7.0, 9.0\text{ mm}$ の位置における中心軸上の温度がK型シース熱電対（ $\Phi 0.5\text{ mm}$ ）により計測される。これにより加熱銅ブロックとポーラス体の接合界面での熱流束と熱伝達率が評価される。

ユニポーラス体の詳細構造ならびに加熱ブロックとユニポーラス体を接合した冷却デバイスEVAPORON-4の概略図をFig. 1に示す。本研究で用いるユニポーラス体は、円柱状の無酸素銅ブロックに多数の冷却液供給用の小口径気孔と、蒸気排出用の大口径気孔を機械加工で施工した一方向性気孔のポーラス銅である。ユニポーラス体は、直径 $0.5\text{ mm}$ の冷却液供給口を、ポーラス体の中心から半径 $10\text{ mm}$ 内に $1.0\text{ mm}$ 間隔で248個有する。また、直径 $2.6\text{ mm}$ の蒸気排出口を、ポーラス体の中心と中心から径方向 $8.5\text{ mm}$ の位置に $90^\circ$ 間隔で4個の合計5個有す

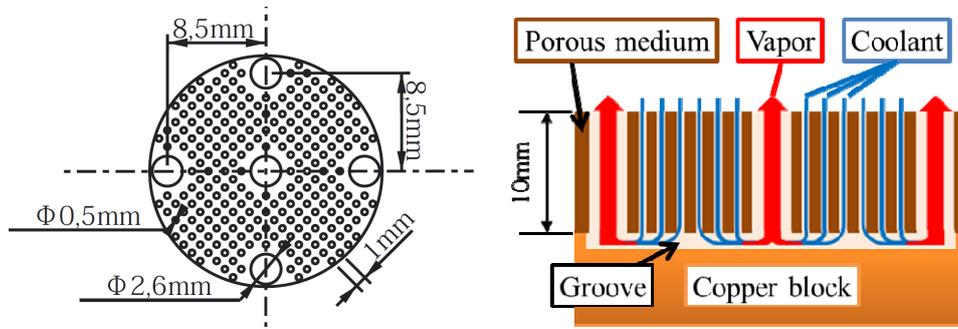


Fig. 1 Schematics of uni-directional porous medium and EVAPORON-4

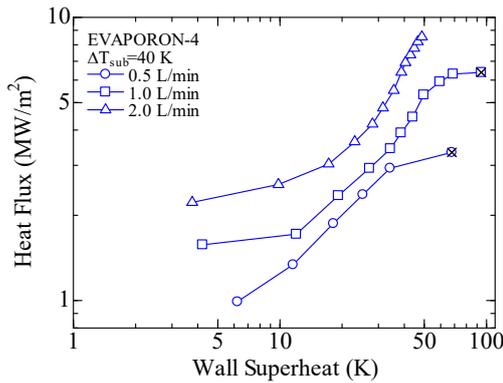


Fig. 2 Boiling heat transfer performance

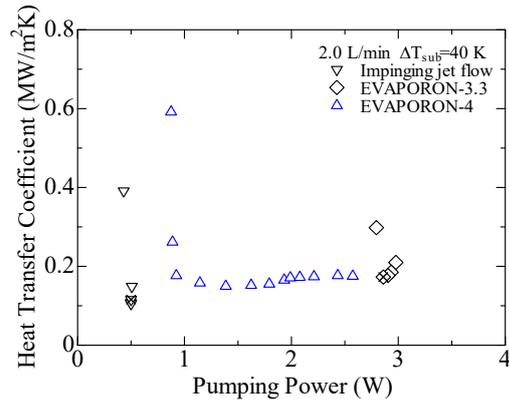


Fig. 3 Pumping power of each device

る。ポーラス体の直径は 20 mm であり、厚みは 10 mm、気孔率は 19.6 % である。このユニポーラス体が、グループ伝熱面に機械的接合もしくは半田接合される。伝熱面上には、蒸気を排出するためのグループ（幅 1.0 mm、長さ 20 mm、深さ 0.5 mm）が縦に 9 本、横に 5 本格子状に施工されている。冷却液は、ユニポーラス体の多数の冷却液供給用の小口径気孔から伝熱面に供給され、伝熱面上のグループを介して蒸発しながら蒸気排出用の大口径気孔へと流れていく。

流動沸騰試験では、先ずサブクール度を 40 K で固定し、流量をパラメータとした沸騰伝熱実験を行う。流量は 0.5 L/min (25.6 kg/m<sup>2</sup>/s), 1.0 L/min (51.2 kg/m<sup>2</sup>/s), 2.0 L/min (102.4 kg/m<sup>2</sup>/s) とする。本実験における熱流束の不確かさは、熱流束 8.2 MW/m<sup>2</sup> (820 W/cm<sup>2</sup>) のとき 7.1 % である。

Fig. 2 は、EVAPORON-4 においてユニポーラス体を伝熱面に機械的接合した場合の沸騰・蒸発伝熱性能を表している。横軸は伝熱面過熱度、縦軸は熱流束である。グラフ中の×印は、そのデータが限界熱流束であることを示している。流量増加に伴って全体的に低過熱度側へ移動しているため、冷却性能が向上していることを確認できる。限界熱流束についても、流量 0.5 L/min では 3.3 MW/m<sup>2</sup> (330 W/cm<sup>2</sup>, 伝熱面過熱度 68.0 K)、流量 1.0 L/min では 6.4 MW/m<sup>2</sup> (640 W/cm<sup>2</sup>, 伝熱面過熱度 94.4 K)、2.0 L/min では 8.5 MW/m<sup>2</sup> (850 W/cm<sup>2</sup>, 伝熱面過熱度 48.6 K) の高い熱流束を達成している。特に 2.0 L/min では限界熱流束ではなく高出力ヒータの耐熱温度による限界値であるため、さらに高い熱流束を得ることができる。流量 2.0 L/min において衝突噴流沸騰伝熱と比較したところ、EVAPORON-4 の限界熱流束が 2.1 倍に増加していることを確認した。また焼結粒子を用いた先行研究である EVAPORON-3.3 と比較しても、最大熱流束は 1.5 倍増加し、特に先行研究で見られなかった高熱流束域での熱流束の大幅な上昇を確認した。EVAPORON-4 は、入口流速が EVAPORON-3.3 に比べ 1/7 以下の 0.7 m/s と非常に低流速の流入条件であるが、一方向性ポーラス体が有する沸騰・蒸発促進効果により冷却液が蒸発したため、高熱流束域で熱流束が大幅に向上したと考えられる。Fig. 3 は、ポンプ動力に対する熱伝達性能を示している。通常の衝突噴流沸騰と EVAPORON-3.3 は、熱流束の上昇に従って熱伝達率が減少しているが、EVAPORON-4 は、熱流束の上昇に伴い熱伝達率が横ばいから上昇に転じている。最大熱流束におけるポンプ動力は 2.6 W、熱伝達率は 0.18 MW/m<sup>2</sup>/K である。EVAPORON-4 は、衝突噴流沸騰にくらべてポンプ動力は増加しているが熱伝達率は 1.5 倍に向上している。また、EVAPORON-3.3 にくらべてポンプ動力は減少し、熱伝達率は向上している。一方、EVAPORON-4 は、熱流束の上昇に伴いポンプ動力が増加している。これは、生成された蒸気が排出口付近でベーパーロックを起こしたためと考えられ、生成蒸気の増加に伴い圧力損失が増加し、ポンプ動力の増加を招いたと考えられる。

Fig. 4 は、EVAPORON-4 においてユニポーラス体をグループ伝熱面にはんだで接合した時の沸騰・蒸発伝熱性能を表しており、左図は流量依存性、右図がサブクール度依存性を示している。これより、はんだ接合することで機械的接合に比べグラフ全体が低過熱度側にシフトして

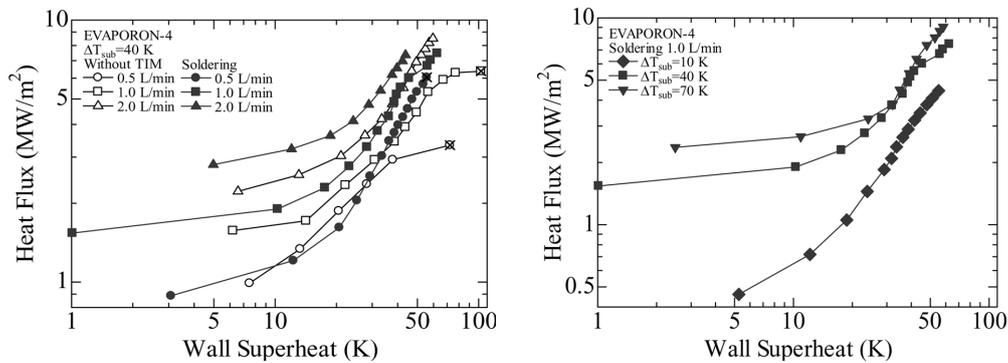


Fig. 4 Boiling heat transfer performance with soldering

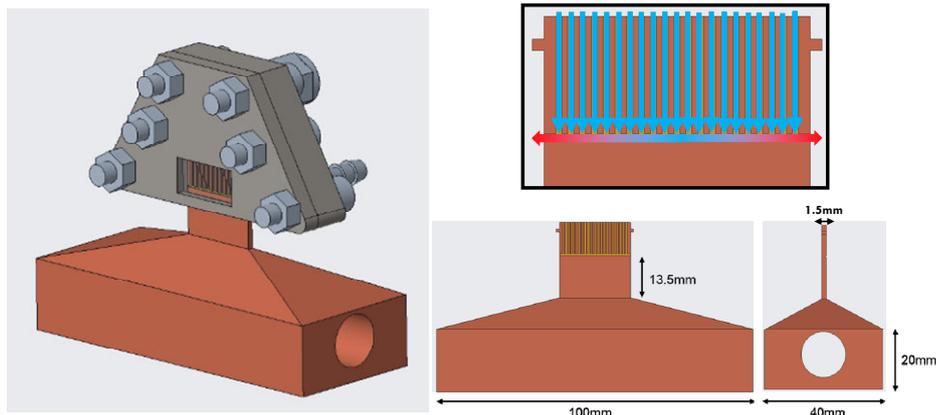


Fig. 5 Experimental apparatus for visualization of two-phase flow in EVAPORON-4

いる。更にはんだ接合時の流量 1.0 L/min では、限界熱流束の向上も見られる。流量 1.0 L/min におけるはんだ接合時の最大熱流束は  $7.5 \text{ MW/m}^2$  ( $750 \text{ W/cm}^2$ , 伝熱面過熱度  $52.9 \text{ K}$ ) であり、機械的接合時の限界熱流束にくらべ 1.2 倍増加している。一方、はんだ接合時の流量 2.0 L/min では、最大熱流束は  $7.4 \text{ MW/m}^2$  ( $740 \text{ W/cm}^2$ , 伝熱面過熱度  $34.3 \text{ K}$ ) であり、機械的接合時に比べ減少しているが、高出力ヒータの耐熱温度による限界値であるため、さらに高い熱流束を得ることができると考えられる。また、最大熱流束におけるはんだ接合時の熱伝達率は  $0.21 \text{ MW/m}^2/\text{K}$  であり、機械的接合時の熱伝達率にくらべ 1.2 倍増加している。これらの結果は、接触熱抵抗を低減したことで、方向性ポーラス体のフィン効果が促進され、ポーラス内部での冷却液の蒸発が促進されたためであると考えられる。一方、サブクール度を上げると除熱限界は向上することも Fig. 4 右図から明らかである。特にサブクール度  $70 \text{ K}$  では 1.0 L/min の流量で  $9.1 \text{ MW/m}^2$  ( $910 \text{ W/cm}^2$ ) を達成しており、この値は限界熱流束ではないため  $10 \text{ MW/m}^2$  ( $1000 \text{ W/cm}^2$ ) に近づくものと考えられる。

#### 4. 2 ユニポーラス銅内における流動沸騰様相の可視化試験

ユニポーラス体内での流動沸騰・蒸発挙動とメカニズムを解明し、より効率的な冷却デバイス EVAPORON-4 を開発するため、Fig. 5 のような可視化試験装置を製作した。装置は主にストレージタンク、ポンプ、流量計、試験部、熱交換器から構成され、可視化試験部はグループ流路および方向性気孔内での二相流状態を可視化するため、二つの流路にポリカーボネート板を貼り付けたものとなっている。ポーラス部での方向性流路は機械加工によって成型され、 $0.5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  の溝が 21 本施工されている。蒸気排出用のグループとして横方向に  $0.5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm} \times 22.5 \text{ mm}$  の溝が加工されている。銅ブロックの底部に装荷されたカートリッジヒーターを用いて銅ブロックを加熱し、加熱された試験部に上部から冷却水をポンプで圧送することでポーラス体内における沸騰伝熱の様子を観察できるようになっている。また並行して、試験部内の流量分配を確認するため、単相流における数値シミュレーションを実施した。

Fig. 6 は熱流束の上昇とともに相変化の様相の変化を捉えた写真である。ポーラス体内では、伝熱面温度が  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  を越えたあたりからグループ内での気泡生成が確認でき、更に熱流束の増大に伴い、ポーラス内の中心下部領域で発生した細かな気泡が合体し、これらが大きな気泡となって左右に流れていく様子が観察された。更に熱流束を上昇させていくと前述の合体泡の気液界面が伝熱面中央部から次第にドーム状となって周囲へ広がるように成長し、伝熱面全体（グループとポーラスの境界付近）を覆う様子を確認することができた。また特徴的な動的挙動として、この気液界面は上下に振動していることを明らかにした。このような蒸気相の成

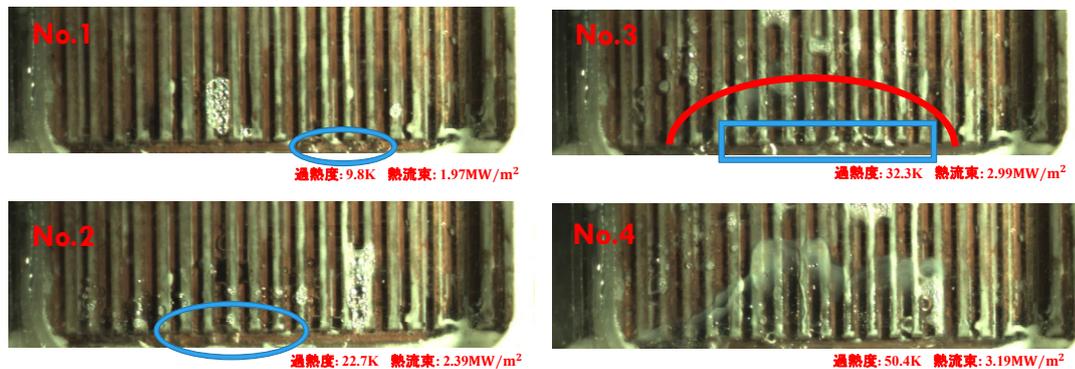


Fig. 6 Development of two-phase region

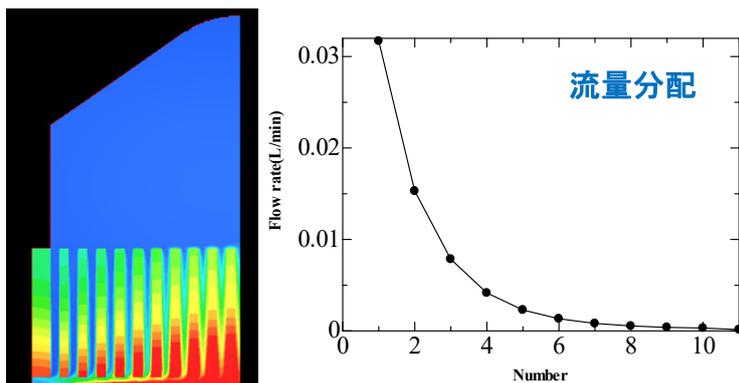


Fig. 7 Prediction of velocity profile in each pore

長と気液界面の非定常挙動は EVAPORON-4 の伝熱性能に大きく影響しているため、更に微視的な可視化によって液供給の詳細な様相を評価すべきである。

一方、等温場における試験部流路内の单相流 CFD シミュレーションを実施した。Fig. 7 はその結果の一部を表しており、左図が速度コンター、右図が径方向におけるポーラス内部の流速を表している。これよりポーラス部では、外側領域の流速が速く、中央部に近づくにしたがって流速が減速していることを明らかにした。この結果は等温場における特徴的な流量分配を表しているが、このような流動場において入熱がある場合、当然ながら流速が低い中央部で相変化が活発になり蒸気の内圧が上がることで中央部に供給される液量が更に減ることが予想される。これが先述の気液界面がドーム状に広がる最たる要因と考えられる。この現象は、最終的にドーム内におけるドライパッチ領域の拡大に結び付き EVAPORON-4 の除熱限界につながるため、今後、より均一に液供給できるようなポーラス構造、ならびにそのような体系でも円滑に蒸気を輩出できるようなグループ構造・デバイスからの蒸気排出構造を検討する必要がある。

#### 4. 3 飽和プール沸騰におけるユニポーラス銅による限界熱流束向上

本試験では、飽和プール沸騰環境においてグループ伝熱面上に設置されたユニポーラス体が限界熱流束向上に寄与するかについて検証する。沸騰冷却試験と可視化試験を同時に実施できる Fig. 8 のような装置を製作した。Fig. 8 左図は試験装置全体を表しており、右図は可視化部を表している。沸騰容器はガラス製であり、その大きさは 70 mm×64 mm×100 mm である。冷却液は蒸留水である。可視化部のグループとユニポーラスの一方方向性気孔は機械加工によって成型され、グループ断面寸法は 1.0 mm×1.0 mm、ポーラスの気孔断面寸法は 0.5 mm×0.5 mm である。可視化部下の角柱中心軸上 2.0, 6.0, 10.0, 14.0 mm の位置に熱電対を貼りつけ、最小二乗法から伝熱面温度、フーリエ則から熱流束を算出する。沸騰伝熱試験では加熱銅ブロックに装荷されているカートリッジヒータの印加電圧を 3 V ずつ上げながら限界熱流束に到達したときに実験を終了する。気泡の様相は高速度カメラを用いて 240fps で撮影される。Fig. 9 は沸騰曲線を表している。蒸留水では 1.0 mm グループサイズの CHF が 328 W/cm<sup>2</sup> であり、ターゲットとしている 300 W/cm<sup>2</sup> を超えることを実証した。Fig. 10 の可視化試験結果から、ユニポーラス体上部で形成されていた気泡が急激にユニポーラス体内へ吸い込まれる現象を確認できた。すなわちグループからの蒸気の排出にともない、確実に冷却液がポーラス上部から吸い込まれていることを実証した。なお、この技術ではグループからの蒸気の排出とポーラス側からの液供給が完全に分離できていることも CHF 向上に大きく寄与していると考えられる。今後、更に可視化試験を実施し、グループ構造とポーラス構造が CHF 向上に与える影響について評価し、機構論的なモデル構築に取り組む予定である。一方、MARS 法を用いてグループおよびポーラス内での蒸気泡の成長シミュレーションを実施した。グループ内で気泡が成長し、グループ外に蒸気が排出される際に蒸気内の圧力が低下し、液が伝熱面側に供給されることを確認した。

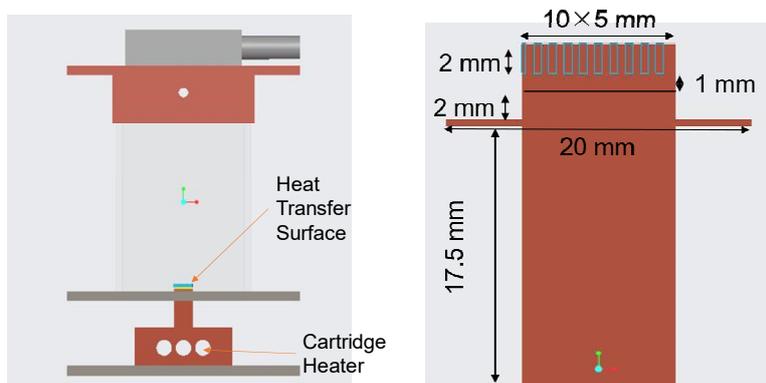


Fig. 8 Experimental setup and test surface for visualization under pool boiling conditions

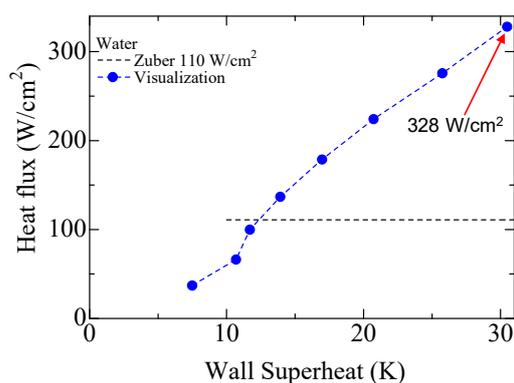


Fig. 9 Boiling curve of unidirectional porous

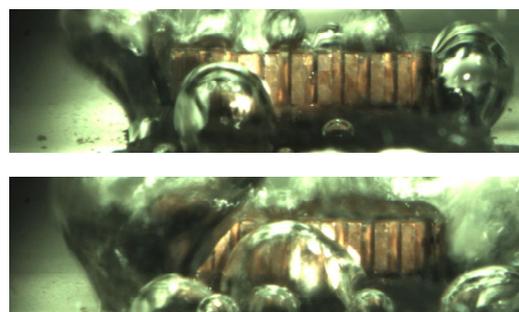


Fig. 10 Visualization results

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計2件)

- ① K. Yuki, et al., Immersion Cooling of Electronics utilizing Lotus-Type Porous Copper, Transactions of the Japan Institute of Electronics Packaging, 査読有, vol. 9, pp. 13-16 (2016).
- ② K. Takai, K. Yuki, et al., Heat Transfer Performance of an Energy-saving Heat Removal Device with Uni-directional Porous Copper for Divertor Cooling, Fusion Engineering and Design, 査読有, vol. 136, pp. 518-521, 2018.

〔学会発表〕 (計6件)

- ① K. Yuki et al., Heat Transfer Performance of Uni-directional Porous Heat Sink for Cooling of Next Generation On-vehicle Inverter, Proceedings of 2017 International Conference on Electronics Packaging (ICEP2017) 2017.
- ② 高井貴生, 結城和久, ほか, 一方向性ポーラス銅を用いた高熱流束除去デバイス EVAPORON-4 の伝熱特性, 第54回日本伝熱シンポジウム, 2017.
- ③ 結城和久, 辻利佳子, ほか, 一方向性ポーラス銅を用いた小型冷却デバイスの開発, 第54回日本伝熱シンポジウム, 2017.
- ④ K. Yuki, et al., Heat transfer performance of a small cold plate with uni-directional porous copper for cooling power electronics, Proceedings of 19th International Conference on Fluid Mechanics and Thermodynamics ICFMT 2017, 2017.
- ⑤ Takai Kio; Yuki K. et al., Two-Phase Flow Boiling and Evaporative Heat Transfer Promoted with Uni-Directional Porous Copper, Proceedings of 16th International Heat Transfer Conference, pp. 8143-8147, 2018.
- ⑥ 高井貴生, 結城和久, ほか, 3D プリンターを用いた一方向ポーラス金属の製作と伝熱特性の評価, 第56回日本伝熱シンポジウム, 2019.

〔図書〕 (計0件)

〔産業財産権〕 ◦出願状況 (計0件), ◦取得状況 (計0件)

〔その他〕 ホームページ: <https://risakokibushi.wixsite.com/yuki-kibushi-lab>

## 6. 研究組織 なし