

# 次世代パワー半導体デバイス冷却のための 多孔質体内沸騰現象の解明と制御

Study on boiling phenomena in porous media and its control for cooling of  
next-generation power semiconductor device

研究代表者 東北大学流体科学研究所 准教授 岡島 淳之介

Junnosuke Okajima

共同研究者 産業技術総合研究所先進パワーエレクトロニクス研究センター 主任研究員 小関 国夫

Kunio Koseki

This study aims to investigate the heat and fluid transport characteristics of boiling phenomena inside a top-heat-oriented cooling structure and its relationship with the parameters of the porous structure, which is an essential factor for improving the performance of a top-heat-oriented vapor chamber. It was shown that the cooling performance is stable due to the liquid supply by the capillary force of the porous media, as evidenced by the fact that the heat flux did not change much with changes in immersion height. A heat flux of 5.6 MW/m<sup>2</sup> was achieved using a porous media with a particle size of 100 μm. The cooling performance of porous media, excluding those with a particle size of 100 μm, was comparable to that of a copper block, suggesting that boiling mainly occurs only on the side surfaces of these porous bodies.

## 要旨

本研究では、トップヒート型ベイパーチャンバにおいて、高性能化に重要な要素となるトップヒート型冷却構造での沸騰現象について着目し、トップヒート型冷却構造体内の沸騰現象がもつ熱・流体輸送特性と多孔質体構造のパラメータの関係を明らかにすることを目的とする。浸漬高さの変化に対して熱流束があまり変化しないことから、多孔質体の毛管力による液体の上方への供給により冷却性能が安定するというロバスト性が示された。粒径 100 μm の多孔質体を用いた際に熱流束 5.6 MW/m<sup>2</sup> を達成した。粒径 100 μm を除く多孔質体の冷却特性は、銅ブロックと同程度であることから、これらの多孔質体では、主に側面でのみ沸騰が生じていることが示唆された。

## 1. まえがき

低炭素社会を実現するため、電気自動車のみならず、今後、航空機やロケットエンジンにも電動化の流れがあり、動力制御に用いるパワー半導体デバイスに対する高性能化の要求がますます高まる。一方で、これら移動体を電動に置き換えたとしても、Well-to-Wheel で考えると、デバイス製造や発電時には二酸化炭素を排出してしまうことから、各移動体における電力損失を抑える必要がある。パワーデバイスの動作温度をより低下させると導通損失を低減させ

ることができ、結果的に消費電力を抑えることができる。このように高信頼・長寿命化のための冷却技術にますます期待が集まっている。

ベイパーチャンバとは、図 1(a) に示すような構造であり、内部に流体を封入し、その流体の蒸発・凝縮を利用し、一方の面に局所的に印加された熱を他方の冷却面側に広げるものである。単位面積あたりの熱量である熱流束は小さいほど冷却が容易になるため、ベイパーチャンバを用いて高密度の熱を広げることにより一般的な空冷フィンや水冷板の利用が可能になる。しかしながら従来技術では、熱流束が非常に高くなると、ベイパーチャンバ内において熱源付近で発生した大量の蒸気により液体の供給が滞り、冷却の限界を迎える。この発熱密度を限界熱流束と呼び、これは沸騰現象が潜在的に有する限界である。

冷却限界が蒸気による液体供給の障害に起因することに着目し、気液経路を分離することに注目した先行研究がある。Yuki らは微細流路を有する伝熱面を開発し、発生蒸気の排出経路と液体の供給経路を分け、かつポンプによって加熱部へ液体を強制的に供給した。この手法により、約 10 MW/m<sup>2</sup> という高い熱流束を達成している<sup>(1)</sup>。Mori らは、発生蒸気の排出と液相冷媒の供給の各経路を分離するための、ハニカム多孔体を伝熱面上に設置し、さらにナノ流体中の粒子を伝熱面に堆積させる事で実効的な沸騰面

積を広げた。この手法により、外部動力を用いずに  $3.1 \text{ MW/m}^2$  の熱流束が得られた<sup>(2)</sup>。また、Weibel らは熱源に対して水平方向に多孔質体内を冷媒供給し、垂直方向に蒸気の排出経路を設けており、熱流束  $5.6 \text{ MW/m}^2$  を達成した<sup>(3)</sup>。このように気液経路を分離することで冷却性能の向上が示されているが、さらに高い熱流束条件下ではやはり蒸気による液体供給の阻害が発生している。

この問題を解決するためにトップヒート型ベイパーチャンバを提案する。トップヒート型ベイパーチャンバは、トップヒート型冷却構造を有していることが特徴である。それは図 1(b) に示すように金属多孔質体を用いて熱源からの熱の流れと冷媒の流れを対向させる構造をとり、多孔質体内部の広い面において熱交換性に優れた核沸騰を発生させ、さらに発生した蒸気の排出経路と冷媒の供給経路を完全に分離独立化する構造である。多孔質体側面から排出された蒸気は凝縮部において凝縮し、多孔質体内を液体状態で輸送され、冷却のサイクルが成立する。

このようなトップヒート型冷却構造においては、多孔質体の空隙率が液体供給に関わる毛管力と冷却性能に関わる蒸気排出特性にトレードオフとして作用するため、最適な空隙率を見出すことが重要である。本研究では、トップヒート型ベイパーチャンバにおいて、高性能化に重要な要素となるトップヒート型冷却構造での沸騰現象について着目し、トップヒート型冷却構造体内の沸騰現象がもつ熱・流体輸送特性と多孔質体構造のパラメータの関係を明らかにする。

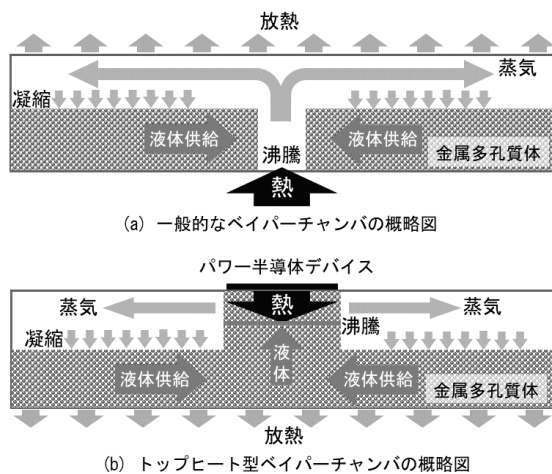


図1 (a) 既存と (b) トップヒート型のベイパーチャンバの概略図

## 2. トップヒート型冷却構造体

ヒートパイプや一般的なベイパーチャンバでは、高熱流束下で発生した大量の蒸気が流路を閉塞し、液相冷媒の供給が滞ることにより冷却性能が著しく低下するドライアウトが存在する。このときの熱流束を限界熱流束と呼ぶ。本研究で提案するトップヒート型冷却構造体は発生した蒸気の排出経路と沸騰に必要な液相冷媒の供給経路を分離独立化することでパワーデバイスの冷却において要求される  $10 \text{ MW/m}^2$  という極めて高い熱流束での冷却を目指したものである。図 2 はトップヒート型冷却構造体の蒸発部を表している。トップヒート型冷却構造では、熱と液体の流れの向きが対向しており、多孔質体内液面において沸騰・蒸発が発生している。高熱流束になると毛細管現象で吸い上げた多孔質体内液面高さ  $H_l$  が発生した蒸気の圧力により押し下げられ、蒸気層厚さ  $\delta$  が大きくなる。しかし高熱流束時においても多孔質体内の低温部で沸騰・蒸発が継続するため、構造体全体が膜沸騰に遷移しにくい特徴を持っている。

トップヒート型冷却構造の冷却特性は、沸騰が生じている気液領域が多孔質体内で 1 次元平面を形成し、一様な飽和温度  $T_{sat}$  で相変化すると仮定すると、熱流束  $q_{in}$  とデバイス直下温度  $T_p$  の関係式として以下のように表される。

$$q_{in} = \epsilon_p k_{Cu} \frac{T_p - T_{sat}}{\delta} \quad (1)$$

ここで、 $\epsilon_p$  は空隙率、 $k_{Cu}$  は銅の熱伝導率である。

(2.1) の式から冷却性能は蒸気層厚さ  $\delta$  に支配され、沸騰曲線の傾きに  $\delta$  の影響が表れる。

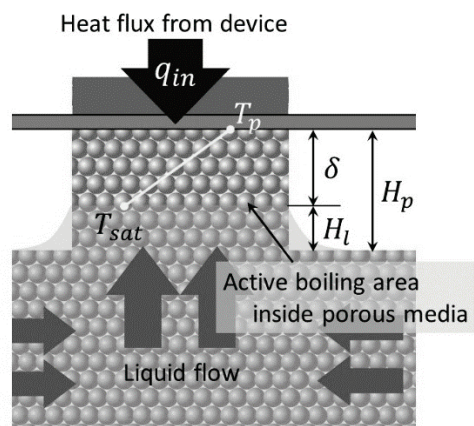


図2 トップヒート型冷却構造体の蒸発部の概念図

### 3. 実験装置

本研究で構築した実験装置の概略図を図3に示す。実験装置は電動スライダ(AZM46MK, Oriental Motor Co., Ltd.), レーザー変位計(IL-S100, Keyence), ホットスターラ(RSH-1DN, As one), 容器(STV-18(1/4B), Nittokinzoku kogyo Co, Ltd), ステンレス投げ込みヒーター(LYMAA105, Just), 100 V用温度調節器, 200 V用温度調節器, 加熱試験体で構成されている。容器内は精製水が入っており, 100 V用温度調節器と投げ込みヒーターで容器内の温度が 98 °Cとなるように設定してある。容器内温度を大気圧下での飽和温度 100 °Cに設定するとヒーターでの沸騰により容器内の液面が大きく揺れるため, 飽和温度に近い 98 °Cに設定した。電動スライダは 0.01 mm 単位で制御可能で多孔質体の浸漬高さを設定するため用いた。またレーザー変位計は液面の変動を計測しており, 70~130 mmの範囲を精度 0.025 %で計測できる。

図4に多孔質体へ熱を供給する加熱部の概略図を示す。加熱試験体は長さ 79.4 mm, 直径 20 mmで, 下部には 5 mm×5 mmの多孔質体を焼結させるための土台がついてある。加熱試験体上部に長さ 50 mm, 直径 6.5 mmのカートリッジヒーター用の穴が設けられており, 250 Wのカートリッジヒーター(UA0I30, Nippon Heater Co. Ltd.)を2本挿入した。よって本試験体の最大出力は 500 Wである。カートリッジヒーターの最高耐熱温度は 750 °Cである。200 Vの商用電源でヒーターへ電力を供給し, 200 V用温度調節器を用いて T0 に設置した K 型熱電対 (GW/GB-K-36-2, Ishikawa trading Co, Ltd.)で計測した温度が指定した温度になるように制御した。加熱試験体の T1, T2, T3, T4 の4か所に線径 0.32 mmの K 型熱電対 (TH-8296-1, ThreeHigh Co., Ltd.)を設置した。計測値をそれぞれ T1, T2, T3, T4 と表記する。熱電対の挿入深さは加熱面上部から 10 mmである。

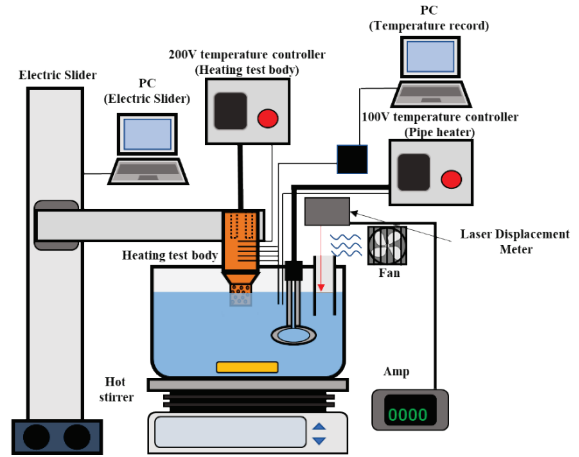


図3 実験装置概略図

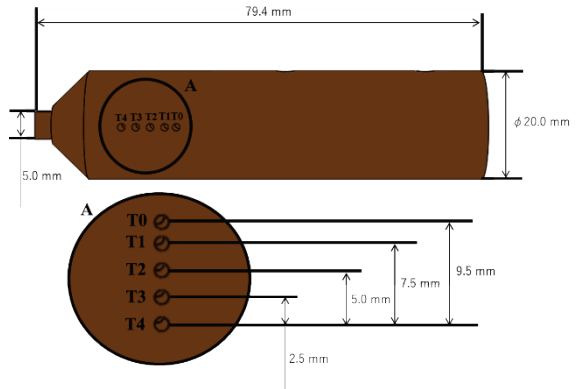


図4 加熱試験体概略図

本研究では粒径 50  $\mu\text{m}$ , 100  $\mu\text{m}$ , 300  $\mu\text{m}$ , 500  $\mu\text{m}$ の粒子により構成される銅粒子焼結多孔質体と同サイズの銅ブロックを用いて沸騰実験を行った。図5に各多孔質体の表面の顕微鏡写真を示す。また, 表1に多孔質体の各パラメータを示した。本研究で用いた多孔質体は銅粒子を圧縮させながら焼結させるため, 多孔質体の寸法は構成粒径によって大きさは変わるものの, 約 5 mm×5 mm×4 mmである。銅ブロックは多孔質の毛管力の効果を比較するために用いる。加熱試験体と多孔質体はアルコナノ銀ペースト (Nihon Superior Co., Ltd.、ANP-1) を用いて焼結した。ア

表1 銅粒子焼結多孔質体の諸元

Particle diameter $d_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	50	100	300	500
Dimensions [mm]	4.4×4.4×3.5	4.9×4.9×4.1	4.9×4.9×4.2	4.8×4.8×4.0
Porosity $\epsilon_p$ [%]	41.9	41.5	36.8	43.0
Average pore diameter [ $\mu\text{m}$ ]	7.7	15.4	46.4	77.4
Permeability $K$ [ $\mu\text{m}$ ]	3.0	11.6	62.4	339

ルコナノ銀ペーストはアルコール誘導体で被膜された銀粒子により構成される。アルコール誘導体の還元作用により、基材への接合力が向上し、銅に直接接合が可能となる。焼結後のアルコナノ銀ペーストの熱伝導率は330~360 W/(m・K)と非常に高い。加熱試験体の土台部分にアルコナノ銀ペーストを厚さ 0.3 mm 塗布し、多孔質体と加熱試験体を軽く圧着させた後、焼結させた。

浸透率 $K$ は多孔性を持つ物体が、流体をどの程度通しやすいかを表す指標のことである。浸透率は平均粒径と空隙率から算出することができ、以下の式(2)で表される。

$$K = \frac{d_p^2}{180} \frac{\epsilon_p^3}{(1 - \epsilon_p)^2} \quad (2)$$

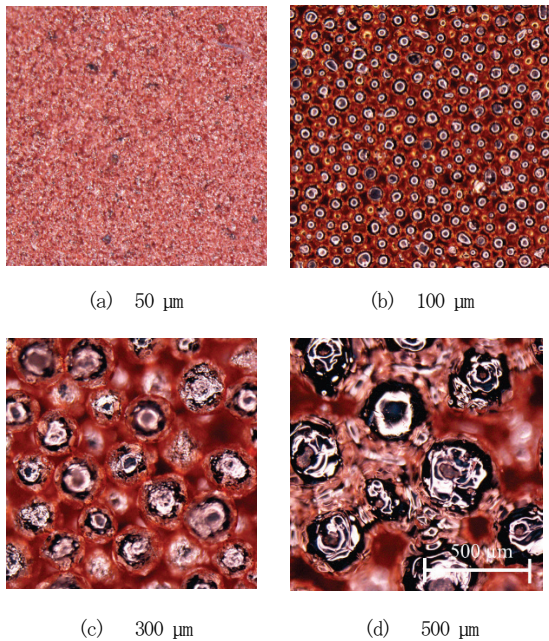


図5 各多孔質体の顕微鏡写真

冷却性能は沸騰曲線を用いて評価する。沸騰曲線とは、加熱面温度と熱流束の関係を図示したものである。一般的に、沸騰曲線の傾きが大きいほど冷却性能が高く、小さな温度変化で大きな熱を輸送できることを表している。加熱ブロック内では温度分布が一次的に変化するとみなして、フーリエの法則より、熱流束と温度勾配が関係付けられる。

$$q_{exp} = -k_{Cu} \frac{dT}{dx} \quad (3)$$

本研究では加熱面温度として、多孔質体上面温度を用いる。多孔質体上面温度は、計測温度から熱伝導方程式により外挿して算出した。

$$k_{Cu} \frac{d}{dx} \left( A(x) \frac{dT}{dx} \right) = 0 \quad (4)$$

式(4)は断面積変化を考慮した熱伝導方程式である。

実験においては多孔質体の粒径の他に、浸漬高さ $H_i$ もは図6のように1 mm, 2 mm, 3 mmと変更した。浸漬高さは図2に示す多孔質体露出高さ $H_p$ と同等の意味を有する。なお、液面と多孔質体の間にメニスカスが形成されるため、多孔質体側面での液面付着位置は遠方における液面よりも1-2 mm 高い位置になる。

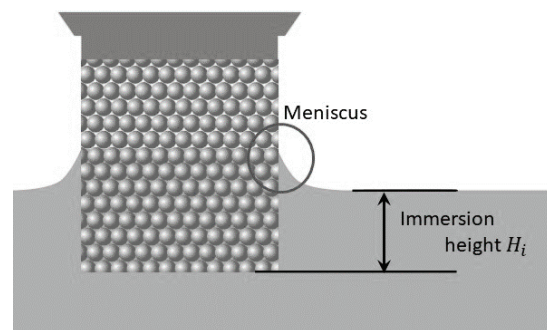


図6 多孔質体の浸漬高さの定義

#### 4. 実験結果

図7, 8はそれぞれ粒径100 μm, 300 μmの多孔質体で浸漬高さを1 mm, 2 mm, 3 mmと変化させた際の沸騰曲線を表す。一方で、図9は同サイズの銅ブロックを用いた際の沸騰曲線を表している。まず多孔質体と銅ブロックの結果を比較すると熱流束は大きく異なるが、多孔質体を用いると浸漬高さの影響が小さくなるのがわかる。図7, 8に示した多孔質体の結果では、浸漬高さが大きいほど熱流束が大きいが、沸騰曲線の形状は概ね同一である。図9に示した銅ブロックでは、浸漬高さにより沸騰曲線の変化の傾向も異なっている。このことから、多孔質体の毛管力による液体の上方への供給機構により浸漬高さの変化に対して熱流束があまり変化しないという冷却機構としてのロバスト性が示された。

また、粒径の違いに着目すると、粒径300 μmよりも粒径100 μmの多孔質体のほうがより熱流束が大きくなっていった。このように多孔質体の空隙サイズの違いを詳細に説明する。



図 10 は浸漬高さ 1 mm での異なる多孔質体に対する沸騰曲線を表す。まず、この条件において、粒径 100  $\mu\text{m}$  は 5.4 MW/m<sup>2</sup> という高い熱流束を達成した。なお、最大の熱流束を計測した際は、実験装置の上限温度に達したため実験を中断しており、現象自体はより大きな熱流束での熱輸送を達成できる可能性がある。一方で、その他の多孔質体および銅ブロックでは概ね 2.5 MW/m<sup>2</sup> 程度が上限となった。図 11 は浸漬高さ 2 mm での異なる多孔質体に対する沸騰曲線を表している。図 10 の条件と同様に粒径 100  $\mu\text{m}$  は 5.6 MW/m<sup>2</sup> という高い熱流束を達成した。一方で、それ以外の多孔質体および銅ブロックは概ね同等の沸騰曲線となった。つまり、粒径 100  $\mu\text{m}$  の多孔質体はその他のものよりも熱流束が 2 倍程度の高く、さらに、粒径 100  $\mu\text{m}$  を除く多孔質体の冷却特性は、銅ブロックと同程度であることが示された。

銅ブロックは内部構造を持たないため、側面でのみ沸騰が生じている。この際に、側面に生じるメニスカスが液体を上部に輸送することから、浸漬高さの影響を受けやすいと考えられる。先に述べたように、粒径 100  $\mu\text{m}$  を除く多孔質体の冷却特性は、銅ブロックと同程度であることから、これらの多孔質体では、主に側面でのみ沸騰が生じていることが推測される。

また、粒径 50  $\mu\text{m}$  の多孔質体は、粒径 100  $\mu\text{m}$  のものよりもより強い毛細管力の発現が期待されたが、得られた冷却性能は、粒径 300  $\mu\text{m}$  以上のものと同程度であった。このことから、粒径 50  $\mu\text{m}$  の多孔質体では、内部の流動抵抗が高く、蒸気の排出性が不十分であったことが推測される。蒸気の排出性が不十分な場合、加熱によって内部圧力が上昇、それに伴い、沸点も上昇するため、蒸発量が抑制されることが考えられる。結果として、沸騰は促進されず、粒径 100  $\mu\text{m}$  よりも冷却性能が低くなったと考えられる。この際も先に述べたように側面での沸騰が支配的になり、結果として銅ブロックと差のない熱流束になったと考えられる。

図 12 は粒径 100  $\mu\text{m}$  と 300  $\mu\text{m}$  の多孔質体側面から観察した沸騰の様子である。多孔質体上面温度が 100  $^{\circ}\text{C}$  をわずかに上回る状態では、粒径 100  $\mu\text{m}$  と 300  $\mu\text{m}$  とともに、多孔質体側面から気泡が排出される様子が観察された。粒径 100  $\mu\text{m}$  では、多孔質体上面温度 126  $^{\circ}\text{C}$  および 170  $^{\circ}\text{C}$  まで加熱量を増加させる

と、多孔質体上面が完全に乾き、その下部に激しく蒸気が噴出している領域が観察された。結果として、多孔質体は液体に完全に浸漬した領域、蒸気が激しく噴出した領域、そして完全に乾いた領域の三層構造になっていた。一方で、粒径 300  $\mu\text{m}$  では、そのような激しい蒸気の噴出層は観察されなかった。これは、粒径 100  $\mu\text{m}$  では結果として 2 倍以上の高い熱流束が達成されたことから発生蒸気量も 2 倍以上となっているため、激しい蒸気噴出が観察されたものと考えられる。

以上の内容をまとめ、多孔質体内部の沸騰現象の状況を推測した概略図を図 13 に示す。粒径 100  $\mu\text{m}$  では、他の多孔質体では計測されなかった非常に高い熱流束を示したことから内部の広い領域で熱伝達が生じたことが推測される。すなわち、図 2 のモデルに示したような一次元的な沸騰領域が多孔質体内部に発生し、高熱流束領域でも継続したと推測される。一方で、粒径 300  $\mu\text{m}$  以上では、低熱流束領域では図 2 のような一次元的な沸騰領域が形成された可能性はあるが、図 11 に示したように、浸漬高さ 2 mm では銅ブロックの冷却性能と差がなかったことから、高熱流束領域では側面での沸騰による熱伝達が支配的であると推測される。そのため、内部での沸騰は総合的な熱伝達に寄与していないと考えられる。粒径 100  $\mu\text{m}$  よりも毛細管力が小さいことから、内部で発生した蒸気により気液界面が図 13 に示すように内部で低下した可能性がある。一方で側面では、沸騰による冷却により多孔質体温度が低下し、より上部まで毛細管力により液面が上昇することが推測される。

## 5. まとめ

本研究では、トップヒート型ペーパーチャンバにおいて、高性能化に重要な要素となるトップヒート型冷却構造での沸騰現象について着目し、トップヒート型冷却構造体内の沸騰現象がもつ熱・流体輸送特性と多孔質体構造のパラメータの関係を明らかにすることを目的とし、以下の知見を得た。

- 浸漬高さの変化に対して熱流束があまり変化しないことから、多孔質体の毛管力による液体の上方への供給により冷却性能が安定するというロバスト性が示された。
- 粒径 100  $\mu\text{m}$  の多孔質体を用いた際に熱流束 5.6

MW/m<sup>2</sup>を達成した。なお、最大の熱流束を計測した際は、実験装置の上限温度に達したため実験を中断しており、現象自体はより大きな熱流束での熱輸送を達成できる可能性がある。

- 粒径 100 μm を除く多孔質体の冷却特性は、銅ブロックと同程度であることから、これらの多孔質体では、主に側面でのみ沸騰が生じていることが示唆された。

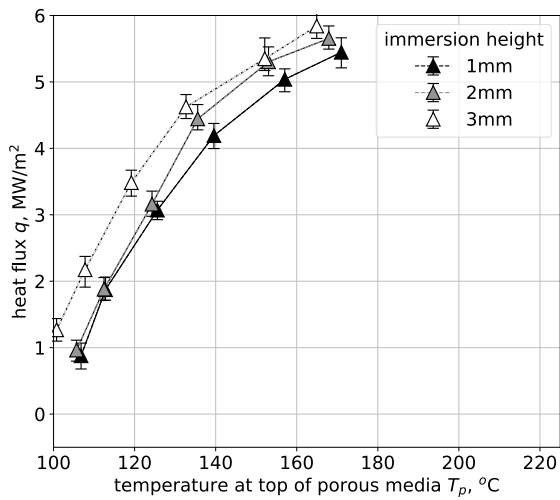


図7 粒径 100 μm の多孔質体での異なる浸漬高さに対する沸騰曲線

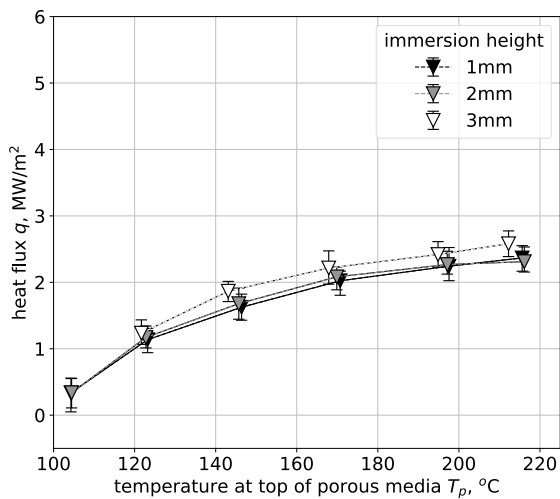


図8 粒径 300 μm の多孔質体での異なる浸漬高さに対する沸騰曲線

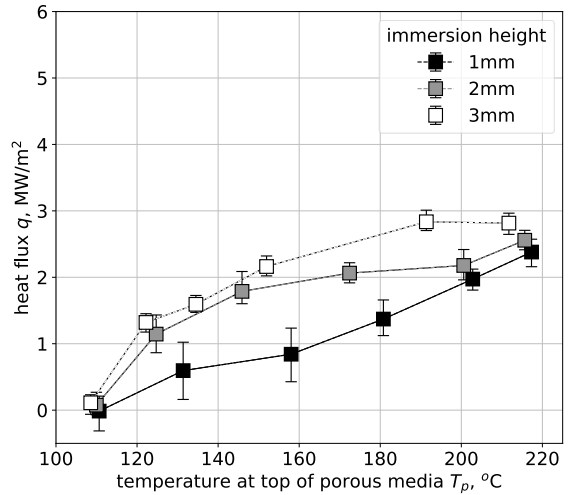


図9 空隙を有さない銅ブロックでの異なる浸漬高さに対する沸騰曲線

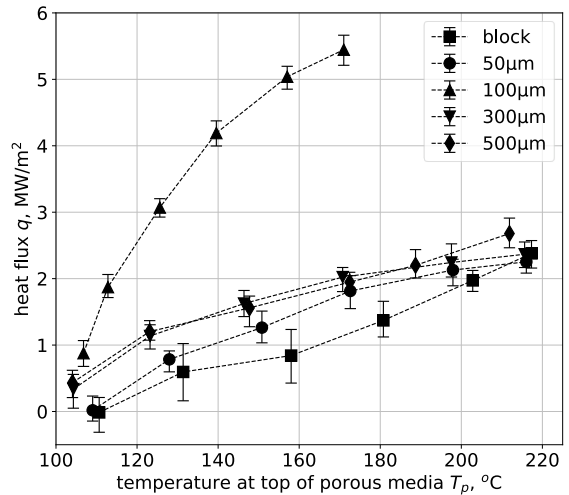


図10 浸漬高さ 1 mm での異なる多孔質体に対する沸騰曲線

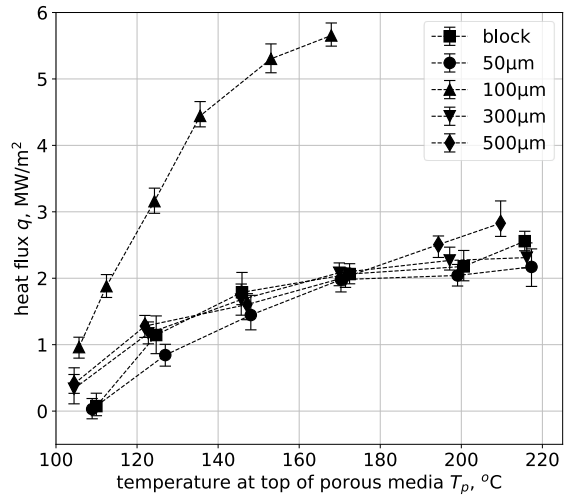


図11 浸漬高さ 2 mm での異なる多孔質体に対する沸騰曲線

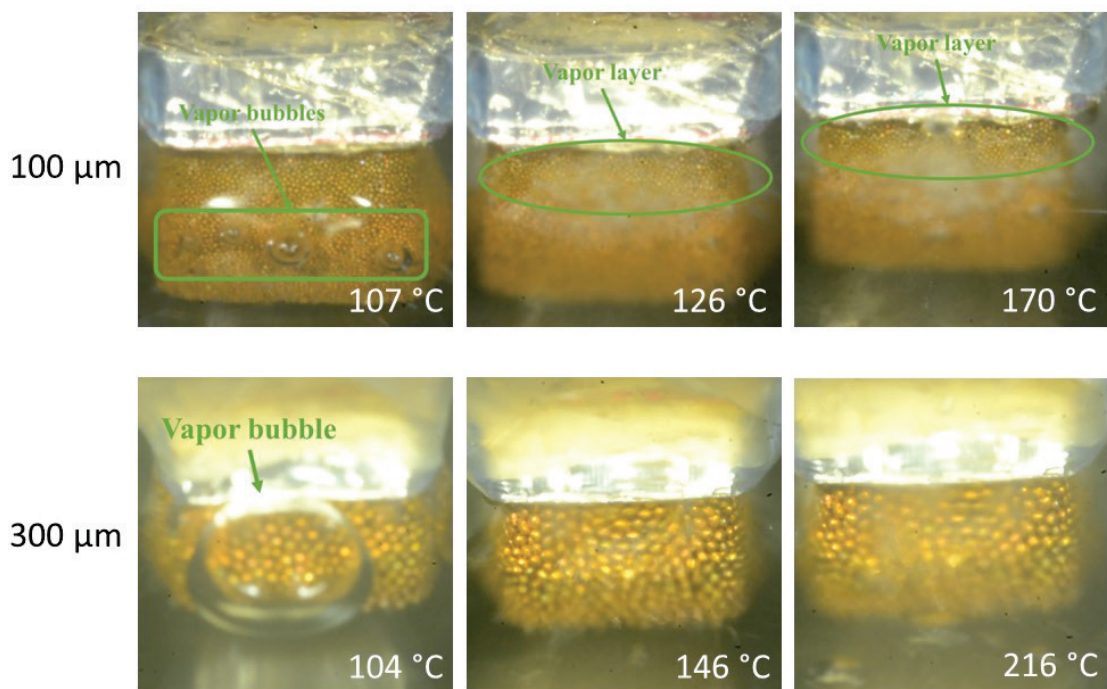


図12 各条件における多孔質体側面から観察した沸騰の様子

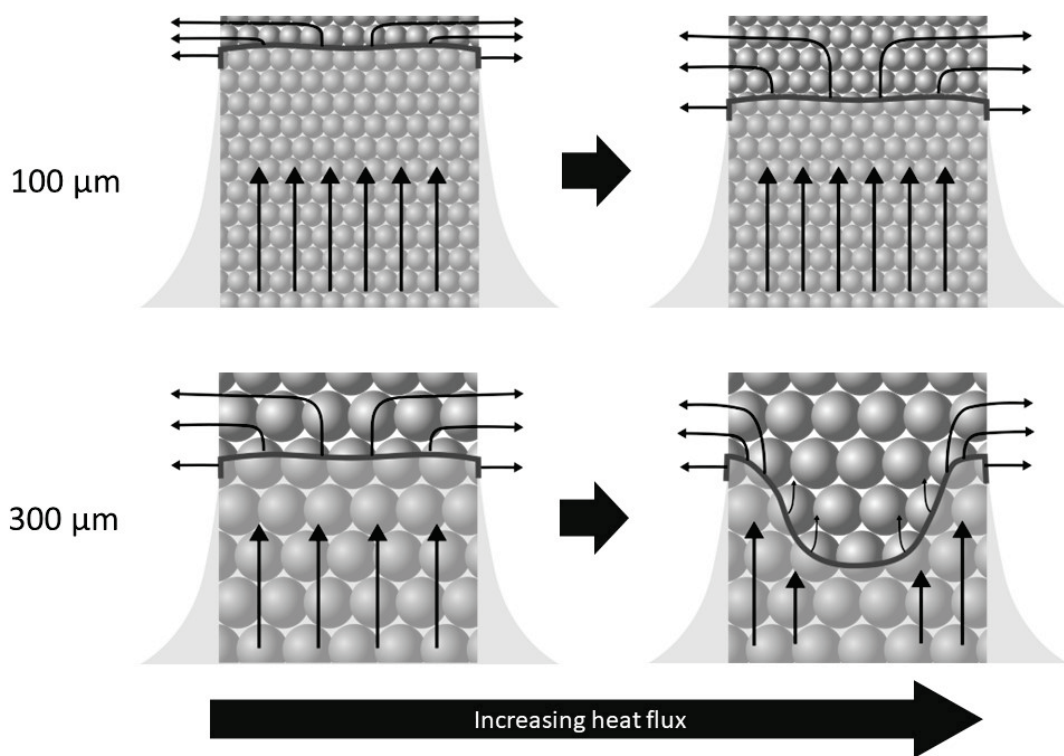


図13 粒径100μmおよび300μmでの沸騰の内部構造の推定

## 発表論文

- [1] 杉本浩輝, 岡島淳之介, 小関国夫, 高発熱デバイス冷却のためのトップヒート型多孔質体沸騰現象の実験的研究, 熱工学コンファレンス 2022 講演論文集, (2022/10) C213.

## 口頭発表、受賞等

- [2] 杉本浩輝, 岡島淳之介, 小関国夫, 高発熱デバイス冷却のためのトップヒート型多孔質体沸騰現象の実験的研究, 熱工学コンファレンス 2022, (2022/10) C213.

## 参考文献

- (1) K. Yuki, K. Takai, Y. Indou, K. Suzuki, Proposal of utilizing uni-directional porous copper for extremely high heat flux removal, Proceedings of the Sixth International Conference on Porous Media and Its Applications in Science, Engineering and Industry (2016/7), porous\_media\_vi, 14.
- (2) S. Mori, S. M. Aznam, K. Okuyama, Enhancement of the critical heat flux in saturated pool boiling of water by nanoparticle-coating and a honeycomb porous plate, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 80 (2015/1) pp. 1-6.
- (3) J. A. Webel, S. V. Garimella, Visualization of vapor formation regimes during capillary-fed boiling in sintered-power heat pipe wicks, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 55 (2012/4) pp. 3498-3510.