



# 放熱デバイスの性能向上に寄与する 高熱伝導の多孔質金属材料

Highly Conductive Porous Metal Materials Enhancing Cooling Device Performance

前田 徹\*  
Toru Maeda

三谷 敦己  
Atsuki Mitani

小林 亮平  
Ryohei Kobayashi

カーボンニュートラル、CO<sub>2</sub>排出削減といった国際的な環境規制強化の動向に対し、年々発熱密度の増大が進む電子製品や車載電動化製品において熱マネジメントが重視されている。これまで主流であった空冷や水冷といった冷却機構だけでなく、ヒートポンプやベーパーチャンバー、蓄熱システムなど放熱能力に優れた冷却機構の利用拡大が期待される。これらのシステムの能力を決めるカギとなる放熱デバイスとして熱交換器や蓄熱器があるが、その性能向上に寄与する素材として高熱伝導率と高空隙率、微細孔径を両立させた多孔質金属材料を開発した。本材料は、冷却に必要なエネルギーの低減を実現し、CO<sub>2</sub>排出削減に貢献できると考えている。

In response to the tightening international environmental regulations for carbon neutrality and CO<sub>2</sub> emission reduction, the importance of thermal management has been emphasized in electronic products and automotive electrified products, where heat generation density is increasing year by year. In addition to the cooling mechanisms such as air cooling and water cooling, which have been the mainstream so far, there is an anticipated expansion of cooling mechanisms with excellent heat dissipation capabilities, such as heat pumps, vapor chambers, and heat storage systems. The effectiveness of these systems largely depends on the capabilities of heat exchangers and heat storage devices. To enhance their performance, we have developed porous metal materials that have both high thermal conductivity, high porosity, and micropore size. These materials can contribute to the reduction of CO<sub>2</sub> emissions by reducing the energy required for cooling.

キーワード：多孔質金属、高熱伝導、熱交換、蓄熱、熱マネジメント

## 1. 緒言

近年、仮想空間の進化や自動車の自動運転など通信量の増加や計算機演算能力の向上を背景に、それを担う通信、演算用の半導体デバイス、その動作を支える電源デバイスが発生する発熱密度の増加が著しい<sup>(1)</sup>。これに対し、空冷、水冷や蒸発式など種々の冷却システムが採用されている。一方で、世界各国で、CO<sub>2</sub>排出規制やカーボンニュートラル指向の政策が推進される中、冷却の省電力化や回収熱のリユースなどの熱マネジメントが重要性を増している。

このような熱マネジメントにおいて、①熱源から冷却媒体への熱交換、②熱移送、③蓄熱/電力変換といった要素技術の革新が求められていると予想される。この観点において、高熱伝導性、高比表面積、高空隙率を兼ね備える点の特長とする粉末冶金プロセス由来の多孔質金属材料を開発したので報告する。

## 2. 多孔質金属材料の放熱デバイスへの応用

まず、熱交換においては、冷却媒体に効率良く熱を伝える観点から、1) 熱源から冷却媒体までの熱移動の熱抵抗を低くしたり、2) 流路の細径化や複雑化で熱伝達を促進することによって熱交換温度差を低減すること、及び、3) 冷却媒体の移動圧損が小さいことが重要と考えられる<sup>(2)</sup>。また、4) 冷却媒体が乱流状態になることも重要な観点である。

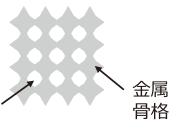


開発多孔質金属の特長を表1に示す。比較として無加圧焼結で作製した低密度焼結材、メッキ材<sup>(3)</sup>を示した。開発材は純アルミニウムや純銅などの高導電率の金属を骨格としており、公知の粉末冶金プロセスによる金属多孔体製法<sup>(4)</sup>をベースに、当社の焼結部品製造などで用いられる高圧成形技術により改善を行い、骨格が緻密質で60%以上の高空隙率の領域でも比較的熱伝導率が高い点が特長の材料とした。

要求される特性の1点目の熱源から冷却媒体までの熱移動の熱抵抗に関して、高熱伝導を活かし大きく低減できる期待がある。さらに、緻密体との一体成形も可能なことから、熱源の放熱板から多孔質金属をシームレスに接合し、熱抵抗低減に寄与することも期待される。シームレス接合品の試作例を写真1に示す。

2点目、3点目の冷却媒体との接触面積と冷却媒体の移動圧損は多孔質金属の比表面積と空隙率のバランスで決まるが、一般的に孔径と相関し、前者は小径化、後者は大径化が好ましいことからトレードオフの関係となる。開発材の粉末冶金プロセスでは、比表面積、空隙率を独立制御できるように改善し、トレードオフをできるだけ抑えることを目指した。4点目の冷却媒体への乱れ付与の観点では、ミクロ的な流路が材料内部で1mm以下の周期で増減する多孔質金属材料では優位となることが期待できる。

次に、熱移送の観点では、無給電駆動の観点で多孔質材

表1 開発多孔質金属の特徴

材料	開発多孔質金属	低密度焼結材	メッキ材 <sup>(3)</sup>
内部構造 (概念図)			
孔径 (μm)	5-1000	5-100	400-3000
比表面積 (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )	10 <sup>4</sup> ~10 <sup>6</sup>	10 <sup>3</sup> ~10 <sup>6</sup>	10 <sup>2</sup> ~10 <sup>4</sup>
空隙率 (vol%)	60~85	40~70	50~98
熱伝導率* (W/mK)	20~50	5以下	-
電気伝導率* (S/m)	4.0×10 <sup>6</sup>	-	~1×10 <sup>6</sup>
強度* (MPa)	5~	-	~1
みかけ密度* (g/cm <sup>3</sup> )	0.6	-	-

\*アルミニウムの場合、代表値

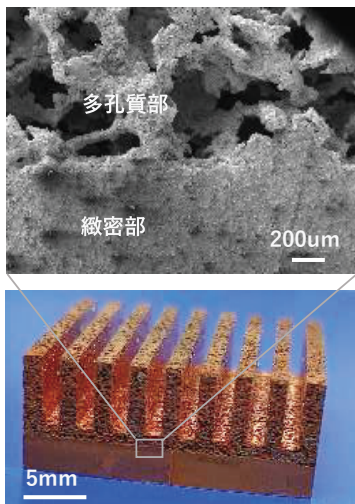


写真1 シームレス接合試作品

ス由来の多孔質金属について、熱交換器、ループヒートパイプ、蓄熱材としての基本性能の評価結果について評価したので報告する。

### 3. 放熱デバイス性能の基礎評価

#### 3-1 熱交換器への搭載効果

熱交換器の性能の基礎評価系として図1に示す実験系を構築した。多孔質金属は、材質は純銅（純度99.5%）、空隙率は80vol%とした。筐体試料の上面（放熱板とシリコングリースを介して接触する面）と多孔質金属は、一体成形によりシームレス構造としたものと、単純に装填し圧着のみとしたもの2点を準備した。冷却媒体は純水を使用し、流量は0.1L/minとした。熱抵抗、圧損は下記式(1)~(3)によって算出した。

$$\text{熱抵抗 } R = (T_s - T_w1) / Q \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{入熱量 } Q = c_w \cdot f \cdot (T_w2 - T_w1) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{圧損 } \Delta P = P2 - P1 \quad \dots\dots\dots (3)$$

$c_w$  : 冷媒の比熱、 $f$  : 冷媒の流量

$P1$  : 入口側の水圧、 $P2$  : 出口側の水圧

料ウィックを活用したループヒートパイプ技術に注目することができる。熱源からのエネルギーにより冷却媒体を蒸発させ駆動エネルギーを得る気化式や磁性流体の磁性・非磁性変化による磁気体積効果により駆動エネルギーを得る磁気式などが研究されている<sup>(5)、(6)</sup>。これらのエネルギー変換部分へ多孔質金属を適用することで性能向上が期待される。

最後に蓄熱に関しては、所望温度域で作動する相変態型蓄熱材 (PCM) の応用が検討されている<sup>(7)、(8)</sup> が、液化時の体積変化の大きさや形状保持、漏出対策、PCM 自体の熱伝導の低さによる応答速度の小さい点が課題と考えられる。適度に孔径を低減した多孔質金属にPCMを含浸させることで、毛細管力による液化時の閉じ込め効果が生じることを活かし、液化時の体積変化なく、形状も不変の蓄熱材を構成することが期待でき、また、熱伝導率の低い点も多孔質金属の高熱伝導によってカバーできると期待できる。

これらの観点から、有効性が期待される粉末冶金プロセス

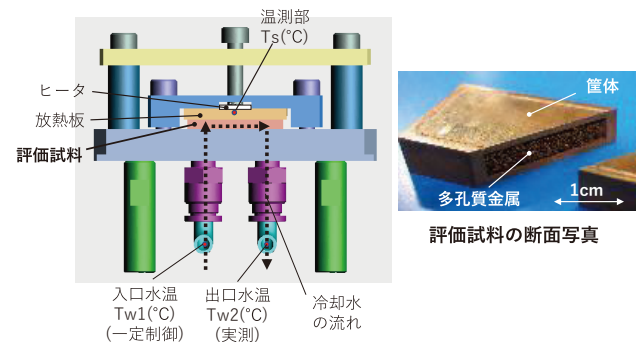


図1 熱抵抗性能の基礎評価系

図2にヒータ通電からの放熱板部の温度上昇の測定結果を示す。空隙率80%の多孔質金属を一体成形で装填した場合、空洞の場合に対し、25℃の飽和温度の差が見られ、放熱性能が向上したことがわかる。評価結果から算出した熱抵抗、圧損を図3に示す。熱抵抗値には熱源と筐体試料間のシリコングリース部の熱抵抗（約0.2K/W）を含んでいる。空洞の値を1として表示、ピンフィンの結果も合わせて示す。試作多孔質金属を挿入した場合、シームレスの場合（図3の●）と圧着の場合（図3の▲）では、熱抵抗に明確な差が生じ、一体成形によるシームレス化の効果が大きく得られることがわかる。熱抵抗値はピンフィンに対し最大25%低減、空洞に対し最大60%低減と大幅に低減できることがわかった。多孔質金属の流路中の配置を最適制御して、圧損を低く設計できればピンフィンや空洞の場合に対して、冷却効果向上のメリットが得られることが期待される。

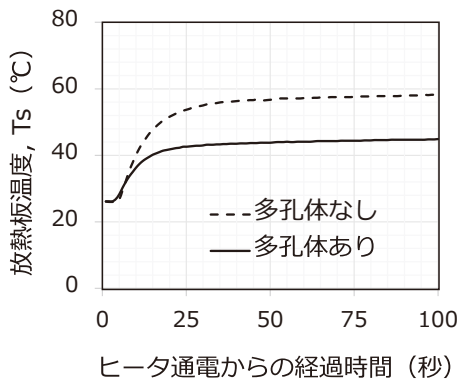


図2 放熱板温度の測定結果

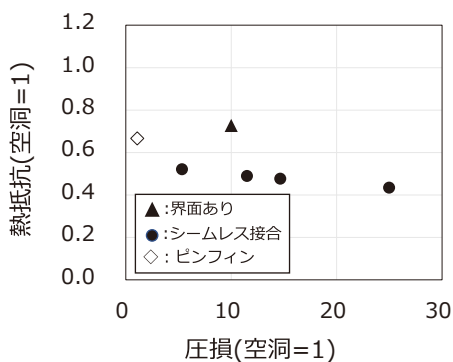


図3 熱抵抗と圧損の評価結果

### 3-2 ループヒートパイプへの搭載効果

次に無給電熱移送デバイスであるループヒートパイプへの多孔質金属の搭載効果を検証した。

図4に気化式ループヒートパイプの評価系を示す。蒸発器

の上部から供給された冷却媒体（エタノール）が純アルミニウム製の多孔質金属（空隙率60%）からなるウィックに毛細管力により吸引され、ウィック下部で発熱体の熱を受けて蒸発しグルーブを通して蒸発器の下部に放出される。この時の圧力増大と毛細管力を駆動力に凝縮器方向へ熱移送が起こる原理である。

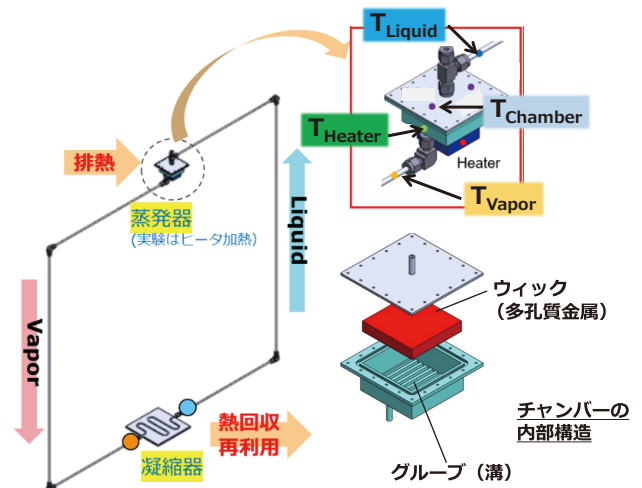


図4 気化式ループヒートパイプ特性の評価系

図5にヒータを駆動させヒータブロック温度を上昇させながら動作させた際の蒸気温度 ( $T_{Vapor}$ )、リザーバタンク水温 ( $T_{Liquid}$ )、多孔体部分温度 ( $T_{Chamber}$ ) の関係を示す。ヒータブロック温度 ( $T_{Heater}$ ) が80℃を超えると30℃以下にリザーバタンクの水温を保ったまま、蒸気管部分の温度が70℃程度に上昇した状態となっており、定常的な熱移送が行われていることがわかる。使用した多孔質金属材は空隙径の小さいもので良好な特性を示すこともわかった。この時の熱伝達係数を計算したところ、10,000W/m<sup>2</sup>kを超える優れた放熱性能であった。

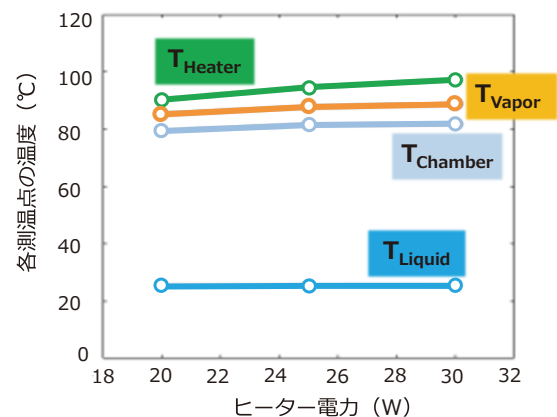
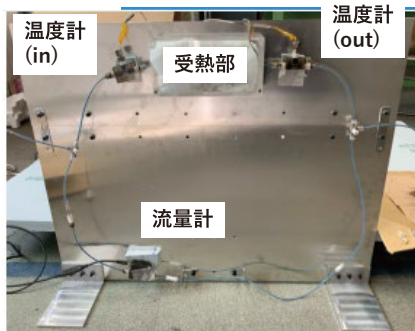


図5 ヒータ出力と放熱板温度の関係

図6に磁性流体式ループヒートパイプの評価系を示す。磁性流体式では、冷却媒体に感温性を有する磁性流体を使用し、受熱によって磁石への吸着がされなくなる特性を利用している。つまり低温の磁性流体が熱源の手前に配置された磁石に吸引され、熱源からの受熱で磁気吸引されなくなることで磁石からの束縛力が無くなり押し出されることで熱移送が実現する原理である。

図7にヒータ電力と発生流量の関係を示す。多孔質金属のない場合に対して、純アルミニウム製の多孔質金属（空隙率70%）を装填したとき発生流量の増大、すなわち熱移送性能の改善が確認された。この用途の場合は多孔体内部で磁性変化を起こすことで圧損の影響を小さくできると考えられている。

(a) 装置全体



(b) 受熱部拡大図

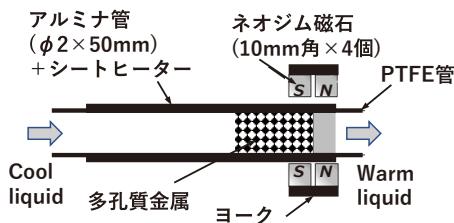


図6 磁性流体式ループヒートパイプ特性の評価系

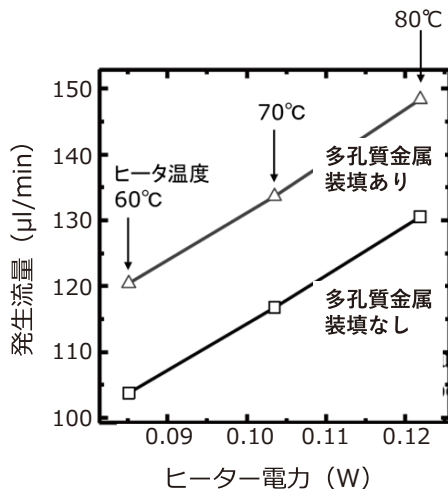


図7 ヒータ電力と発生流量の関係

### 3-3 蓄熱器への搭載効果

蓄熱器に関しては、純アルミニウム製の多孔質金属（空隙率70%）に、蓄熱材として融点60℃のパラフィンを充填させた。100℃程度に加熱した融解パラフィン中に多孔質金属を浸漬し、毛細管力を利用して内部に吸引、その後冷却して内部でパラフィンが固化された状態とした。図8に蓄熱性能の基礎評価系を示す。

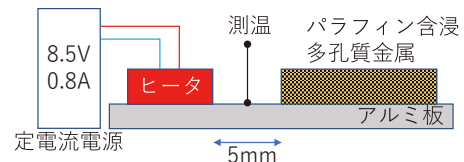


図8 蓄熱器特性の基礎評価系

図9にヒータ通電からの昇温挙動を単純なアルミニウム板を設置したときと比較して示す。パラフィンを含浸させた多孔質金属を用いた場合、パラフィンの融点付近で昇温が急激に止まることがわかる。図10に変化融解時の潜熱を

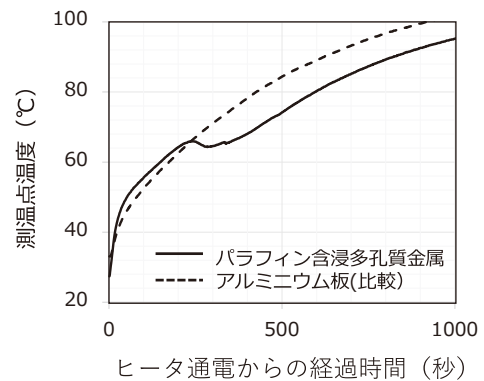


図9 ヒータ出力と放熱板温度の関係

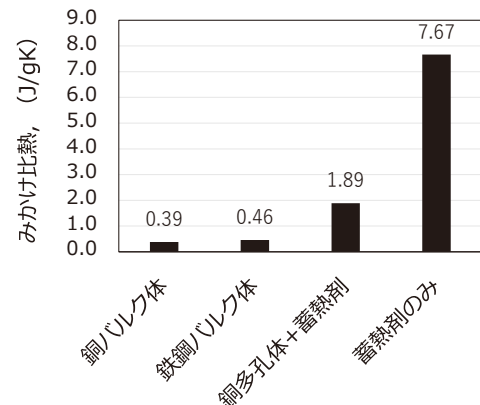


図10 見かけ比熱の試算



盛り込んだ見かけの比熱を計算した結果を示す。純金属に対して、パラフィン含浸多孔質金属材は4倍強の大きな比熱を保有することとなり、さらに多孔質金属材の高熱伝導を活かして急速に全面的な融解が起こることで短時間での応答が実現したと考えられる。

#### 4. 結 言

当社の粉末冶金プロセスを活用し高熱伝導を特長とする多孔質金属材を開発し、熱マネジメント用途を想定し、各種放熱デバイスとしての基礎評価を行った。熱交換器、ループヒートパイプ、蓄熱器といった用途で性能向上させる素材として活用されることが期待される。

#### 5. 謝 辞

本開発において、気化式ループヒートパイプの評価に関し名古屋大学 長野方星教授に多大なる支援をいただきました。磁性流体式ループヒートパイプの評価に関し名古屋工業大学 岩本悠宏准教授に多大なる支援を頂きました。

#### 用語集

##### ※1 粉末冶金プロセス

アルミニウムや銅などの金属粉末と添加粉末（造孔材）を混合した粉末を所定温度に昇温した金型に装填し、500MPa以上の圧力をプレス装置で印加させ緻密化させる工法。

##### ※2 熱伝導率

熱の伝えやすさを示す指標。高いほど熱が伝わりやすく放熱材料として有用となる。

#### 参 考 文 献

- (1) 国峯、「放熱材料・冷却デバイスの最新動向」(2021)  
<https://www.ciaj.or.jp/ciaj-wp/wp-content/uploads/2021/02/semimar20210205.pdf>
- (2) 浅野、「熱交換器の高性能化技術と今後の展望」、Abstract of SCEJ 41st Autumn Meeting 667-668 (2009)
- (3) 境田、後藤、木村、奥野、西村、細江、「三次元連続気孔を有するアルミ金属多孔体（アルミセルメット）」、SEIテクニカルレビュー第190号、79-83 (2017)
- (4) European powder metallurgy association, "Introduction to Functional Materials," 12-13 (2021)  
<https://www.epma.com/epma-free-publications/product/introduction-to-functional-materials-brochure>
- (5) N. Watanabe, T. Mizutani, H. Nagano, "High-performance energy-saving miniature loop heat pipe for cooling compact power semiconductors," ENERGY CONVERSION AND MANAGEMENT 236 (2021)
- (6) 岩本、山口、牛、「感温性磁性流体を用いた自己循環型熱輸送装置」、混相流 24巻5号、641-648 (2011)
- (7) 半崎、能村、盛、秋山、「高温用Al合金系潜熱蓄熱マイクロカプセルの開発」、粉体工学会誌 vol.54, 37-40 (2017)
- (8) R. Nakamura, T. Kawanami, Y. Ishibashi, A. Fujita, and Y. Kinemuchi, 「二酸化バナジウムおよびその成型体の相転移時における熱特性評価」、Netsu Bussei 35 (3) 90-96 (2021)

#### 執 筆 者

前田 徹\* : アドバンストマテリアル研究所 主幹  
博士 (工学)



三谷 敦己 : アドバンストマテリアル研究所



小林 亮平 : アドバンストマテリアル研究所



\*主執筆者