

平成31年度

戦略的基盤技術高度化・連携支援事業

戦略的基盤技術高度化支援事業

「焼結による高均熱、高熱輸送ベーパーチャンバーの開発」

研究開発成果等報告書

令和2年5月

担当局 関東経済産業局

補助事業者 公益財団法人新潟市産業振興財団

目次

第1章 研究開発の概要	
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1-2 研究体制	3
1-3 成果概要	5
1-4 当該研究開発の連絡窓口	7
第2章 本論	
(1) 金属粉焼結の利用による、高熱輸送量・高発熱密度化	8
1-1 高毛細管力構造の開発	
1-2 負荷分散構造の開発	
1-3 高アスペクトパターン印刷技術の開発	
(2) 金属粉構造の最適配置による、高熱伝導率化	11
2-1 蒸气流路の低圧損化	
(3) 低温～高温で使用可能な作動冷媒による、作動温度の広範囲化	12
3-1 作動冷媒の選定および最適構造の開発	
3-2 Ti材料による高耐圧化	
(4) 実製品形状を想定した試作	14
4-1 実製品形状を想定した試作品の製作と評価	
最終章 全体総括	
3-1 研究成果	15
3-2 研究開発後の課題・事業化展開	15

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

(1) 研究開発の背景・研究目的

熱を素早く伝える手法としては、高熱伝導材料（例えば銅やアルミニウム、銀等）を使用する方法が簡便である。しかし、熱伝導率は物性値であり、一般的な材料である無酸素銅であっても 398 W/mK 程度である。例えば部品が薄い場合や距離が長い場合、効率よく熱を伝えるのは困難となる。

他の手法として、ヒートパイプ（図 1）がある。ヒートパイプは内部に封入した作動冷媒（主に水など）が蒸発して熱を奪い、蒸気となった作動冷媒が熱輸送するため、見かけ上の熱伝導率は銅の 10 倍になると言われている。しかし、ヒートパイプはその名の通りパイプ形状をしており、伝熱面へ取り付けするためには扁平加工などが必要となる。扁平加工を行うと内部空間が減少し、蒸気の流れが阻害されるため、性能低下が避けられない。

川下のニーズとして、これらを両立するもの、すなわち平面形状であり、かつ熱輸送能力が高いものが求められている。(株) WELCON は上記ニーズに鑑み、平板上ヒートパイプである、WEL-HeatRibbon®（図 2）を開発した。本製品の特長として、厚さ 1mm 未満の平板、熱輸送量最大 30W（水平時）が挙げられる。本製品をベースに顧客への提案を行っていたが、さらなる高性能化（高熱伝導率、高熱輸送量）のニーズが明らかとなった。

性能向上のため、(株) WELCON では内部に金属粉体焼結を適用し、一定の結果を得た。さらなる性能向上及びニーズの達成のため、本事業に取り組む。



図1 ヒートパイプ



図2 WEL-HeatRibbon®

各種分析、評価装置では、評価対象の温度管理が重要となる。特に、半導体などの評価においては、電氣的な負荷をかけた際に発生する発熱を迅速に除去し、対象の温度を均熱化したいというニーズがある。

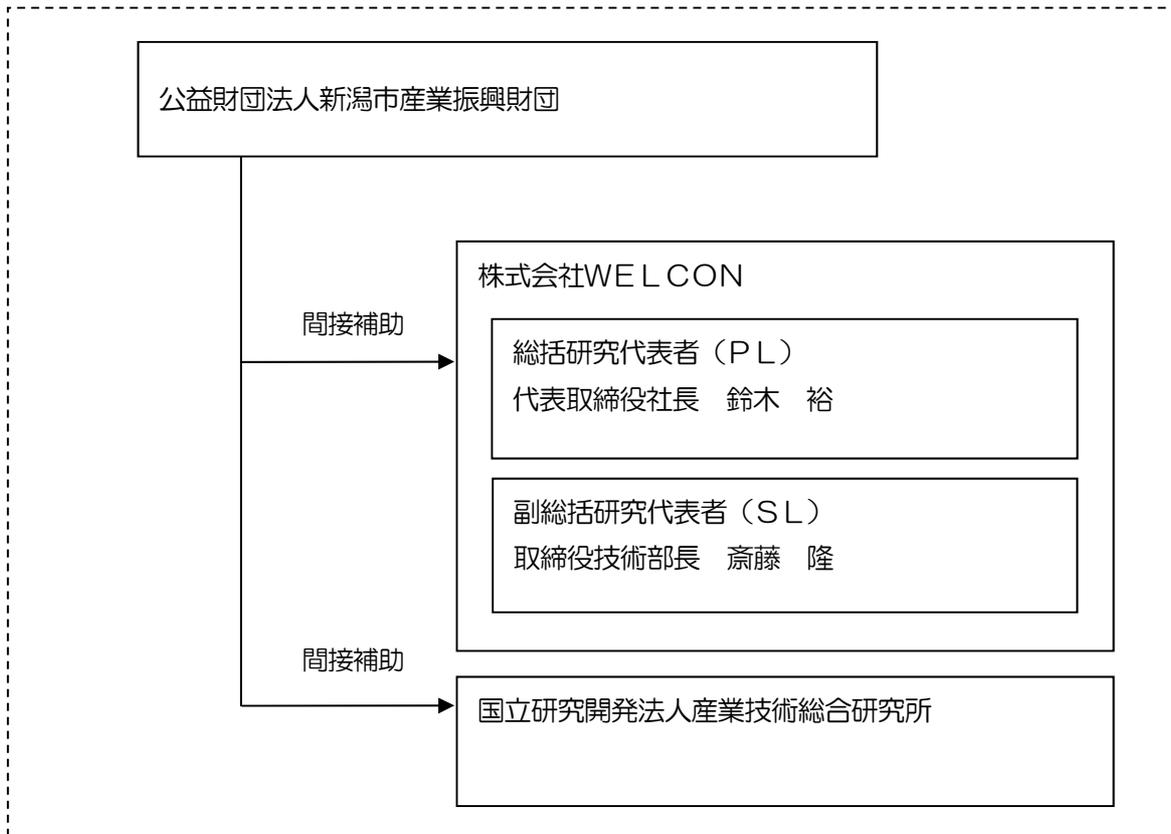
当該分野の開発状況として、従来から薄型のヒートパイプは存在している。しかし、従来のものは熱輸送能力が十分で無く、数 W 程度であった。また、平板化の強いニーズが存在していなかった。最近では情報機器の小型化と高発熱量化が進み、ベーパーチャンバーに注目が集まっており、研究開発が盛んである。金属粉体を利用した例も幾つか見られる。しかし、ベーパーチャンバーで難しいのは密閉容器となる金属筐体をリーク無く製作するところにある。(株) WELCON では拡散接合を使い、ケースのリークが無い接合状態を容易に得ることが出来ている。さらに内部構造について本事業で最適化し、ベーパーチャンバーの高性能化の先駆けとなることを目指す。

(2) 研究目標

研究テーマ	研究目標
(1) 金属粉焼結の利用による、高熱輸送量・高発熱密度化	
1-1 高毛細管力構造の開発	熱輸送量 200W、 最大発熱密度 100W/cm ²
1-2 負荷分散構造の開発	受熱面積 1.5 倍
1-3 高アスペクトパターン印刷技術の開発	200℃焼成カーボン残存率 5%以下、 積層位置精度 ±20um 300Pa・s ペースト吐出
(2) 金属粉構造の最適配置による、高熱伝導率化	
2-1 蒸气流路の低圧損化	熱伝導率 5,000W/mk
(3) 低温～高温で使用可能な作動冷媒による、作動温度の広範囲化	
3-1 作動冷媒の選定および最適構造の開発	-40℃以下での駆動、 300℃以上での駆動
3-2 Ti 材料による高耐圧化	Ti 材料駆動
(4) 実製品形状を想定した試作	
4-1 実製品形状を想定した試作品の製作と評価	顧客要求能力達成

1-2 研究体制

(1) 研究組織・組織体制



アドバイザー



(2) 研究員・管理員

【事業管理機関】

公益財団法人新潟市産業振興財団

	氏名	所属・役職
管理員	長谷川 央	ビジネス支援センター チーフ
管理員	山路 大地	ビジネス支援センター スタッフ
管理員	井島 勇幹	ビジネス支援センター スタッフ

【研究実施機関】

株式会社WELCON

	氏名	所属・役職	備考
管理員	鈴木 裕	代表取締役社長	
研究員	斎藤 隆	取締役技術部長	管理員を兼ねる
研究員	田村 勝義	技術部 開発課	
研究員	佐藤 大輔	技術部 開発課	
研究員	山野上 卓也	技術部 開発課	
研究員	長澤 義彦	技術部 開発課	
研究員	細山 健	技術部 開発課	
研究員	三ツ井 雪菜	技術部 開発課	
研究員	樋浦 想太	技術部 開発課	
研究員	五十嵐 慎吾	技術部 設計課 課長	
研究員	山際 貴弘	技術部 設計課	
研究員	古川 隆	製造部 製造課	
研究員	斎藤 紘子	製造部 製造課	
研究員	久保 大地	製造部 製造課	
研究員	近藤 隆幸	製造部 製造課	
研究員	加藤 勝	製造部 製造課	
研究員	松本 厚二	顧問	
管理員	帆苅 アイ子	総務課 課長	
管理員	佐藤 直子	総務課	
管理員	古谷 ひろみ	総務課	

国立研究開発法人産業技術総合研究所

	氏名	所属・役職	備考
研究員	吉田 学	センシングシステム研究センター スマートインターフェース研究チーム チーム長	
研究員	植村 聖	センシングシステム研究センター フレキシブル実装研究チーム チーム長	
研究員	金澤 賢司	センシングシステム研究センター フレキシブル実装研究チーム	

(3) その他

開発推進委員会 委員

氏名	所属・役職	備考
鈴木 裕	株式会社 WELCON 代表取締役社長	PL
斎藤 隆	株式会社 WELCON 取締役技術部長	SL
吉田 学	国立研究開発法人産業技術総合研究所 センシングシステム研究センター スマートインターフェース研究チーム チーム長	
内藤 晃子	公益財団法人新潟市産業振興財団 事務局長	
A	A 社	アドバイザー
B	B 社	アドバイザー

1-3 成果概要

(1) 金属粉焼結の利用による、高熱輸送量・高発熱密度化

1-1 高毛細管力構造の開発

ベーパーチャンバーに高毛細管銅粉構造を適用し、熱輸送量 300W、最大発熱密度 104W/cm²を達成した。銅粉はアトマイズ粉（球形）、電解銅粉（杉の葉形状）を用いているが、強度はアトマイズ粉が良く、毛細管力は電解銅粉が高い。ここでは性能達成のために電解銅粉を用いた。一方で、両方の粉を用いたハイブリッド粉は、両者の良い特性を併せ持つ可能性が示されている。

1-2 負荷分散構造の開発

受熱部拡大構造によって、受熱面積を 3 倍にしたトライをおこなったが、受熱面積を広げるために板厚が厚くなり、結果的に全体の性能としては低下した。これにより、全厚が厚くなる多層による熱負荷分散も性能が低下することが示された。また、気液分離構造による流路最適化だが、産総研の取り組みで提案された特殊樹脂材料を用いることで、複雑な構造の試作が可能となった。

1-3 高アスペクトパターン印刷技術の開発

大気圧プラズマとステージ加熱を用いることで、150℃でのペースト焼成が可能となった。ま

た、高粘度ペーストの塗布は、特殊樹脂材料をマスクとして用いるという発想で、 $300\text{Pa}\cdot\text{s}$ でΦ3、厚さ3mmの銅ペーストを焼成可能となった。加えて、特殊樹脂材料マスクは特殊樹脂材料を板状に成型し、レーザー切断により加工する。加工精度は良好で、目標値 $\pm 20\mu\text{m}$ を達成した。

(2) 金属粉構造の最適配置による、高熱伝導率化

2-1 蒸気流路の低圧損化

試作した製品の性能を熱伝導率で換算し、 $5000\sim$ 最大 10000W/mK の高い熱伝導率を有していることを確認した。

(3) 低温～高温で使用可能な作動冷媒による、作動温度の広範囲化

3-1 作動冷媒の選定および最適構造の開発

性能を決めるメリット数および、温度に対する圧力から、低温ではメタノール、高温では水を選定した。低温域側ではメタノールの封入と作動を確認した。高温域側では水を用いるため、作動は問題ないが、内部圧力の増加に耐える必要がある。そこで、部材にTiを用いたVCを製作し、作動を確認した。

3-2 Ti材料による高耐圧化

強度の高いTi材料で形状製作し、注液して作動することを確認した。

(4) 実製品形状を想定した試作

4-1 実製品形状を想定した試作品の製作と評価

顧客要求性能は達成したが、コストの点で課題があるため、事業化に向けて低コスト化の取り組みを進めている。複雑な構造を銅粉ペーストの塗布のみで行えるようにし、製作コストの低減を図るほか、銅粉ペーストの調合を調整し、安定した塗布を早く、長時間に渡って行えるように進めている。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

【法認定企業】

株式会社 WELCON 取締役技術部長 斎藤 隆

TEL : 0250-38-1900 FAX : 0250-38-1901 E-mail : takashi_saito@welcon.co.jp

【事業管理機関】

公益財団法人新潟市産業振興財団 ビジネス支援センター スタッフ

TEL : 025-226-0550 FAX : 025-226-0555 E-mail : info@niigata-ipc.or.jp

第2章 本論

(1) 金属粉焼結の利用による、高熱輸送量・高発熱密度化

1-1 高毛細管力構造の開発

1-1-① 焼結金属構造の毛細管力向上

金属粉体によるウィック構造は、従来の溝やメッシュを活用するより、高い毛細管力を得ることが可能である。粉体の種類や径により、得られる性質は異なる。そこで、粉体の種類や径をパラメータとし、基本的な性能の評価を行った。

金属粉体の種類だけでなく、径や焼結温度、酸化の状態などが毛細管力のパラメータとなることが示された。

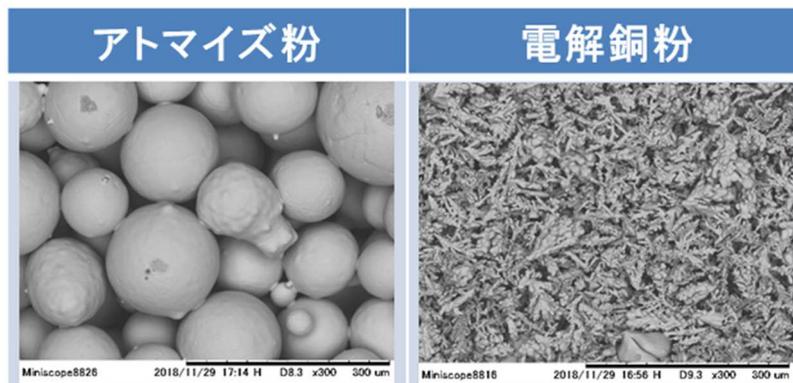


図 1-1-①-1 粉体焼結後 SEM 像

1-1-② ハイブリッド構造による毛細管力向上

毛細管力構造のためには、単純な粉体の焼結のみでは達成は困難である。1-1-①で述べたように、粉体の種類により得られる性質は異なる。そこで、異なる種類の焼結金属を組み合わせたウィック構造を検討した。

電解銅粉の焼結体単体では強度が低い。しかし、アトマイズ粉と混合することで、強度がある程度改善することが示された。混合の比率によって、それぞれの粉体の持つ特性にシフトする。目的によって、最適な混合粉体比率を選択する。

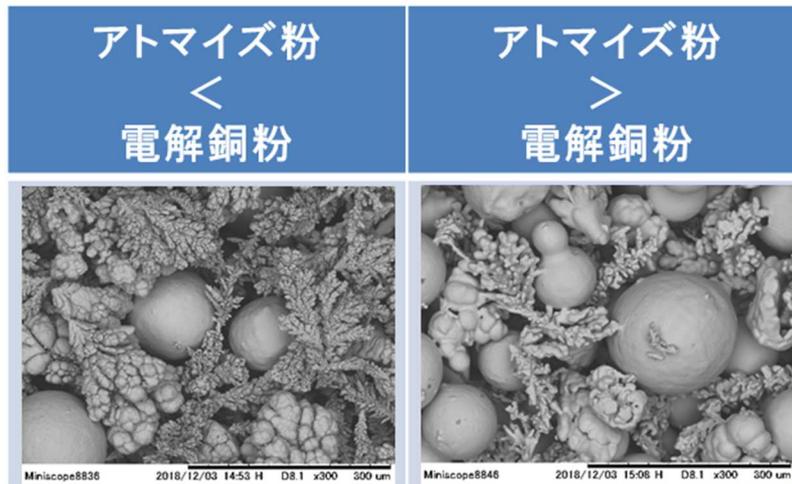


図 1-1-②-1 銅粉種比率を変えた場合の焼結後SEM像

1-2 負荷分散構造の開発

1-2-① 受熱部拡大構造の開発

受熱部の熱流束を低下させるように板厚を増加し、熱伝導を利用して受熱面積の拡大を試みた。受熱部の厚さ増加による熱抵抗の増加が支配的となり、結果として性能が低下することが明らかとなった。

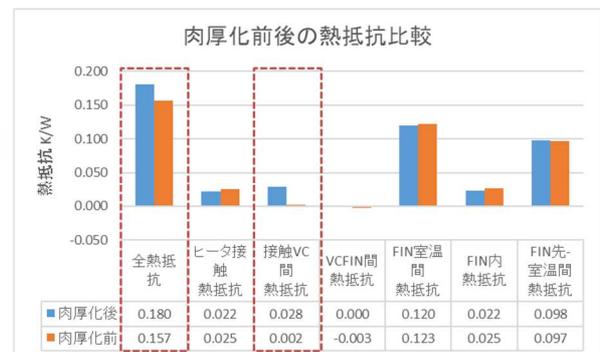
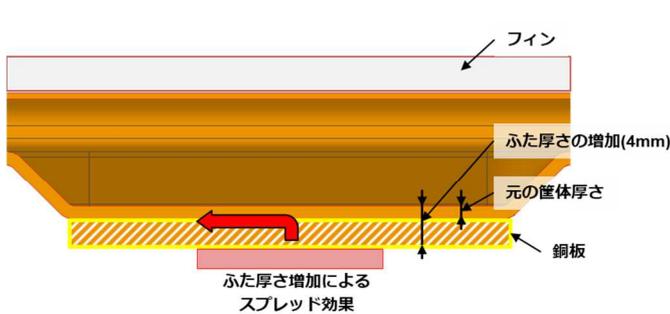


図 1-2-①-1 受熱部厚さ効果の検証結果

1-2-② 多層構造による負荷分散

多層構造による負荷分散についても1-2-①と同様に、多層とすることによって生じる熱抵抗が支配的となり、結果として性能が低下することが示された。

1-2-③ 気液分離構造による流路最適化

受熱部付近の構造を変更し、毛細管力により液体を導入する流路と、気化した蒸気を優先的に排出する流路を設けた試作品を製作し、評価を行った。従来の優先流路を持たない構造と比べて性能の向上が確認され、他の取組も含めた成果となるが、熱輸送量 300W、最大発熱密度 104W/cm²を達成した。

1-3 高アスペクトパターン印刷技術の開発

1-3-① ペーストの低温焼成技術

金属ペーストに含有する有機成分を低温で効率よく除去するための材料やプロセスを開発した。

図 1-3-①-1 に示すように 150°Cのステージ加熱と大気圧プラズマ照射効果を複合させることにより樹脂を完全に除去する技術を開発した。

■ペーストの低温焼成

大気圧プラズマ焼成+
150°Cステージ加熱で
完全に樹脂を分解する
ことが可能となった。



図 1-3-①-1 大気圧プラズマを用いた銅ペースト低温焼成技術

1-3-② 高粘度ペーストの調製・吐出技術

樹脂製マスクを作製し、高粘度ペーストを印刷したのちマスクを除去するという手法で、高アスペクトパターンを形成する技術を開発した（図 1-3-②-1）。

■樹脂マスクによる高粘度ペースト吐出・厚膜パターンの形成

300Pa・s以上の粘度のペーストを用いて3mm以上の膜厚の銅焼成パターンが作製可能となった

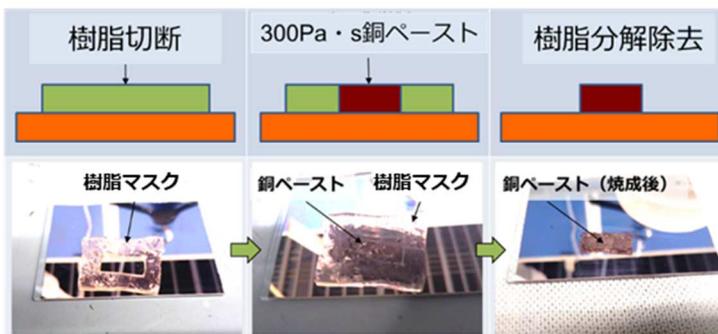


図 1-3-②-1 高アスペクトパターンの形成プロセス

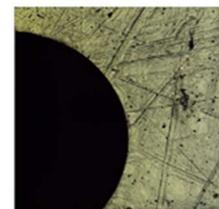
1-3-③ 積層印刷のための高精度位置合わせ技術の開発

樹脂マスクの3Dパターニングに高精度レーザー加工機を用いることによりパターン分解能4 μ m、位置合わせ精度 $\pm 15\mu$ mで高アスペクト銅パターンを形成することに成功した。

Trotec (Speedy 360 flexx)



条件
 パワー100%
 スピード 0.6%
 解像度 6000ppi/Hz



高速高精度レーザー加工機を用いることにより、パターン分解能4 μ m、位置合わせ精度 $\pm 15\mu$ m以下で樹脂マスクを加工することに成功（目標である位置合わせ精度20 μ m以下達成）

図 1-3-③-1 レーザー加工機による樹脂マスクパターンの形成プロセス

(2) 金属粉構造の最適配置による、高熱伝導率化

2-1 蒸气流路の低圧損化

蒸気の圧力損失を低減するには、内部の構造が広く、蒸気の流れを妨げないことが重要となる。

そのためには、内部空間を厚くすることが考えられる。しかし、ベーパーチャンバー自体が厚くなってしまい、薄型化のニーズと逆向いてしまう。そこで、空間を支える構造体の最適配置を試みた。

配置を検討する場合、考慮しなければならないのは強度である。構造体は少なければ少ないほど蒸気の圧力損失は低減される。しかし、構造体を少なくし過ぎた場合、ベーパーチャンバー作動時の圧力に耐えられない。そこで、構造に対する解析を行った。

解析結果の一例を図 2-1 に示す。ここではベーパーチャンバーのフタ厚さを $t0.05$ とし、配置種類、柱径、柱ピッチを変えた場合のフタにかかる最大応力の計算を行った。

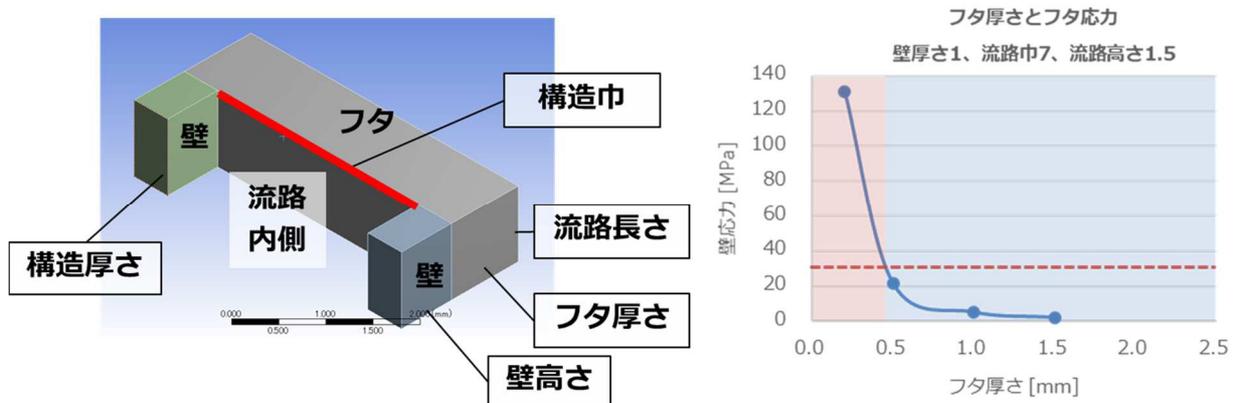


図 2-1 構造解析例

(3) 低温～高温で使用可能な作動冷媒による、作動温度の広範囲化

3-1 作動冷媒の選定および最適構造の開発

3-1-① 低温側作動冷媒の選定および最適構造の開発

0°C未満でも凍結せずに作動可能なベーパーチャンバーのニーズがある。ここでは-40°Cで凍結せず、かつ物性的に適している作動冷媒をメリット数の観点から選定した。メリット数とは毛細管力を利用したベーパーチャンバーにおいて、作動液の熱輸送能力を示す指数であり、密度、表面張力、蒸発潜熱、粘度により求められる。メリット数の観点からは、フロン系冷媒、アルコール系冷媒、アンモニアなどが適している。ここでは取り扱いの容易性から、メタノールを選定した。実際に封入し、作動の確認を行った。

試験環境の整備の問題から、 -20°C 雰囲気での試験を行った。低入力 W 時には、作動は確認されない。恐らく、低入力 W 時は蒸気の持つエネルギーが小さく、作動冷媒が内部を移動する前に凝縮してしまうためと考えられる。また、 $40W$ 程度で熱伝導率は一定値を示した。メタノールによる熱輸送能力の限界と考えられる。 30°C 雰囲気の熱伝導率が高いのは、周囲との温度差が小さくなり、蒸気が先端まで熱を輸送しやすくなるためと考えられる。

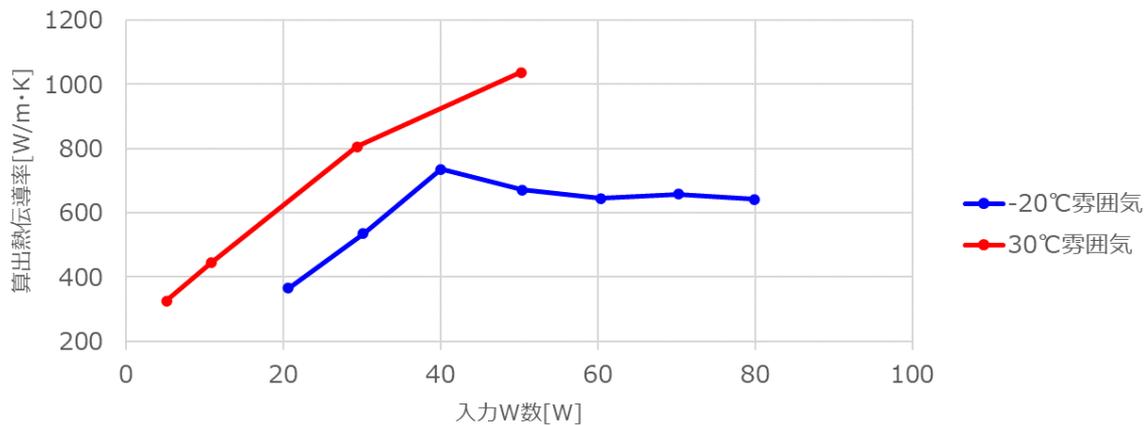


図 3-1-① 各温度雰囲気下における入力 W 数-算出熱伝導率

3-1-② 高温側作動冷媒の選定および最適構造の開発

ベーパーチャンバーを電子機器の冷却に使用する場合、作動温度は高々 100°C である。しかし、より高い温度で熱輸送を行いたいニーズがある。そこで 300°C で臨界に達せず、かつ物性的に適している作動冷媒を検討した。ここではメリット数と作動圧力の観点から選定を行った。メリット数を考慮すると、高温域では水が圧倒的に優れている。水による作動は十分確認されているため、改めて評価する必要はないが、 300°C の高温で作動させる場合、その内圧は 8MPa となる。材料強度と作動圧力の関係から、使用材料に制約が生じることが明らかとなった。

3-2 Ti 材料による高耐圧化

3-1-②で取り上げたように、高温で作動させる場合、密閉された筐体内の作動冷媒は高圧となることが多い。また、高温時は材料の機械的強度が低下する。そこで、高温作動に十分耐えることが可能な材料として Ti 製ベーパーチャンバーの検討を行った。

Ti製ベーパーチャンバー実現の難しい点の一つに、内部に作動冷媒を封入した後の封止がある。ベーパーチャンバーだけでなく、ヒートパイプにおいても、作動冷媒封入後に余計な非凝縮ガスが内部に入らないように速やかに封止する必要がある。銅の塑性加工は比較的容易であるが、Tiの場合、簡易的な塑性加工では封止が十分に出来ない。そこで、本取組では封止時のプロセスを見直し、ファイバーレーザーによる封止を試み、Ti製において十分に溶接による封止が可能であることを確認した。

そこで、Ti製ベーパーチャンバーを製作し、作動冷媒として水を封入し、駆動を確認した。

(4) 実製品形状を想定した試作

4-1 実製品形状を想定した試作品の製作と評価

川下企業のニーズを踏まえ、実製品形状を想定した試作品を製作し、評価を行った。顧客の要求性能は達成したが、コスト面での課題が明らかとなった。その取組として、工程の安定化、部材製造コストの低減、社内工程の自動化を進めている。

最終章 全体総括

3-1 研究成果

本研究を通じ、金属粉焼結によるベーパーチャンバーの実用化に大きく近づくことが出来た。ベーパーチャンバーの事業化に対する課題として、高熱輸送能力、高発熱密度の発熱源の冷却、高熱伝導率（小さい温度分布）、広い作動温度範囲、を掲げていた。

高熱輸送能力、高発熱密度の発熱源の冷却は、熱輸送量 200W、発熱密度 100W/cm² の目標値に対し、熱輸送量 300W、発熱密度 104W/cm² を達成した。

高熱伝導率（小さい温度分布）は、目標見かけ熱伝導率 5000W/mK に対し、最大で 10000W/mK の熱伝導率を達成した。

広い作動温度範囲は、目標値-40℃以下、300℃以上の駆動について、低温域については低温で凍結しない作動冷媒の選定、高温域については高温での作動に適した作動冷媒の選定、および高温作動に必要な高強度材での VC の製作を行い、それぞれ常温での作動を確認した。目標値を超えた作動については試験環境の準備が十分でないため未確認であるが、今後試験環境を整えて評価を行う。

もう一つ重要な成果として、VC の製作に重要な役割を果たした特殊樹脂材料が挙げられる。産総研殿にご紹介頂いた特殊樹脂材料を用いることで、銅粉体の焼結の形状自由度が増し、製作の効率化を達成することができた。この成果を活用し、標準品を見据えたベーパーチャンバーのサンプル品（50×100×t0.9）を新たに開発した。

3-2 研究開発後の課題・事業化展開

熱対策部品としてベーパーチャンバーは、これまでよりも一般的となってきた。一つの適用先として、次世代スマートフォンの冷却がある。これまではグラファイトシート等、素材の熱伝導率を利用した放熱が行われてきたが、近年の高速通信化や高演算化等に伴う処理能力の増大により、冷却能力が限界を迎えている。

スマートフォンのような小型製品に適用する場合、薄型・軽量が求められる。薄くした場合、内部構造の設計が適切でないと、熱を全面に伝えることが出来ない。蒸気流路の設計が重要となる。

その他の適用先として、自動車用 ECU などの高発熱部品の冷却用途がある。自動車用 ECU では安全機能のためのセンサーやカメラが追加され演算量が増大しており、非常に大きな発熱の冷却が求めら

れている。

高発熱部品の冷却の場合、薄型化の要求はそれほど強くはないため、蒸気流路の設計には余裕がある。しかし、発熱量が大きいため、ベーパーチャンバーの駆動に必要な水が十分還流出来ず、ドライアウトが生じる懸念がある。よって、ウィックの構造や液還流方法の設計が重要となる。

本事業で得られた成果はどちらの事業にも展開可能であり、幅広く市場展開を行う。展示会では実際に作動しているデモをサーモグラフで見せるなど、ベーパーチャンバーに馴染みのない方へ分かりやすく伝える工夫を実施している。興味を持っていただいた顧客には、すぐに提供出来る標準サンプルを準備し、評価をすぐに行って頂けるような体制を整える。また、量産を見据えた開発を継続し、各工程の自動化を進める。

顧客によっては単に熱移動デバイスとしてのベーパーチャンバーだけでなく、周囲への放熱技術も併せて必要としており、そのケースは多いと感じている。これら放熱技術の開発と提供も考慮することが、事業化展開に資するものと考えられ、今後開発を進めていく。

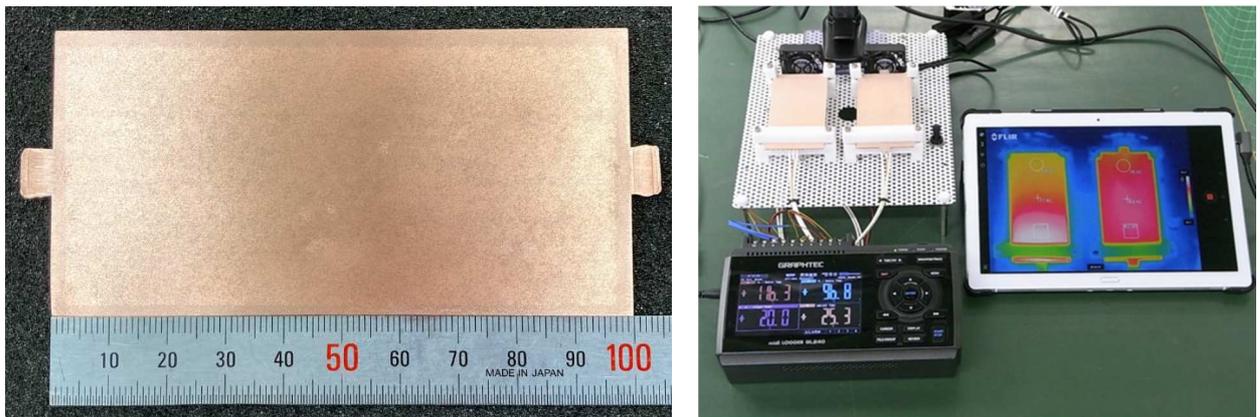


図 3-2-1 標準ベーパーチャンバーサンプル例（左）とデモ駆動の様子（右）