

# 逆作動対応ヒートパイプの開発

## Development of Heat-Pipe for Top Heat

高田 早紀\*  
Saki Takada

上久保 将大\*  
Masahiro Uekubo

### 〈概要〉

電子機器の性能向上に伴い、高発熱、高密度実装による熱問題が顕在化し、放熱対策は重要な課題となっている。放熱設計が多様化する中、逆作動におけるヒートパイプの性能改善は、放熱設計の自由度の向上に貢献する。当社では、ヒートパイプ内部の圧力損失の分析を行い、ウィックに毛細管力の高い銅粉と透過率の高い銅短繊維を用いることで、重力による性能低下を改善し熱輸送量を向上するヒートパイプを開発した。本稿では逆作動対応のヒートパイプに関する技術について紹介する。

### 1. はじめに

電子機器の設計において、放熱対策は重要な課題となっている。近年は電子機器の性能向上に伴い、高発熱、高密度実装による熱問題が顕在化し、その放熱設計の難易度も年々上がってきている。高性能な熱輸送デバイスであるヒートパイプを実装したヒートパイプヒートシンクは、熱を効率良く拡散することが可能であるため、様々な製品に放熱部品として採用されてきた<sup>1),2)</sup>。

しかし逆作動(ヒートパイプの蒸発部が凝縮部よりも高い位置にある姿勢)においては、重力の影響によって、ヒートパイプの輸送可能な熱量が大幅に減少する課題がある。つまり放熱対象である発熱源が、空冷フィンや水冷位置に比べて比較的高い位置にある場合、ヒートパイプ本来の熱輸送性能を発揮することが難しくなるため、適用可能な製品が制約されることになる。

そこで当社は、逆作動においても十分な熱輸送量を確保可能なヒートパイプを開発した。本稿では、逆作動において熱輸送量を向上させたヒートパイプの内部構造と、その動作原理を解説する。

### 2. 逆作動とは

ヒートパイプ内部においては、**図1**に示すように蒸発部(加熱部)で液から蒸気に相変化させられた作動流体が、蒸発部から凝縮部(冷却部)に流れ、凝縮部で蒸気から液に相変化し、凝縮部から蒸発部に戻る。このようにして、蒸発部と凝縮部の間で作動流体の循環流れが形成されることによって、管状容器内の蒸発部と凝縮部の間で潜熱による熱輸送が行われる。逆作動で動作する場合、作動流体の還流は毛細管力によって実現され、その最大熱輸送量は下記の釣り合いの式で決定される<sup>3)</sup>。

$$\text{毛細管力} = \text{蒸発圧損} + \text{蒸気流圧損} + \text{凝縮圧損} + \text{液流圧損} + \text{カウンターフロー圧損} + \text{体積力による圧損}$$

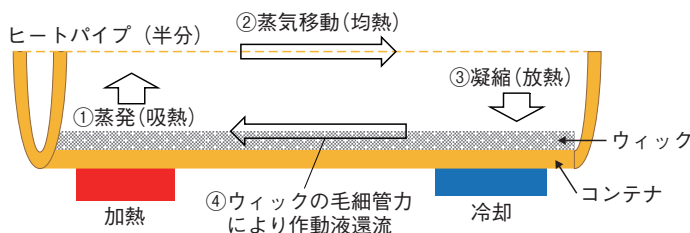


図1 (a) ヒートパイプの動作イメージ  
Sketch of the heat pipe operation.

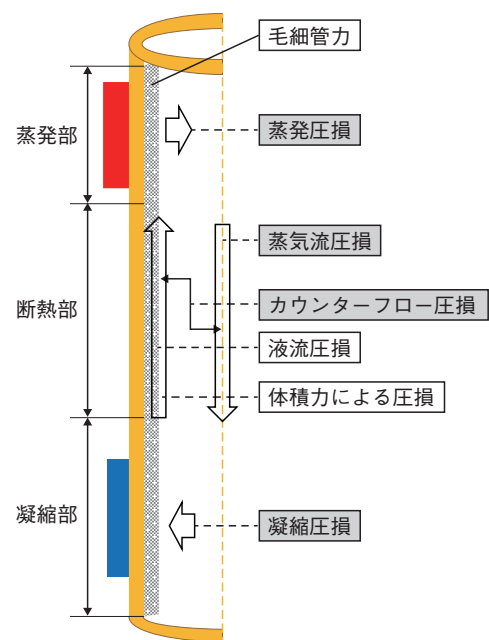
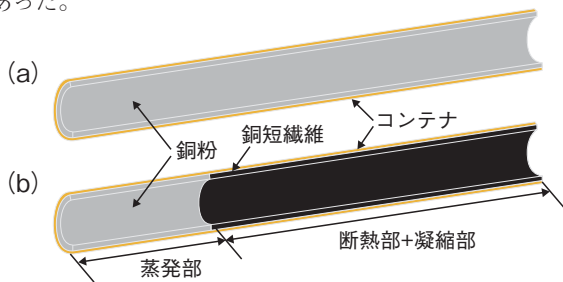


図1 (b) ヒートパイプ内部の圧力損失  
The pressure drops in a heat pipe.

\* 研究開発本部 自動車・エレクトロニクス研究所

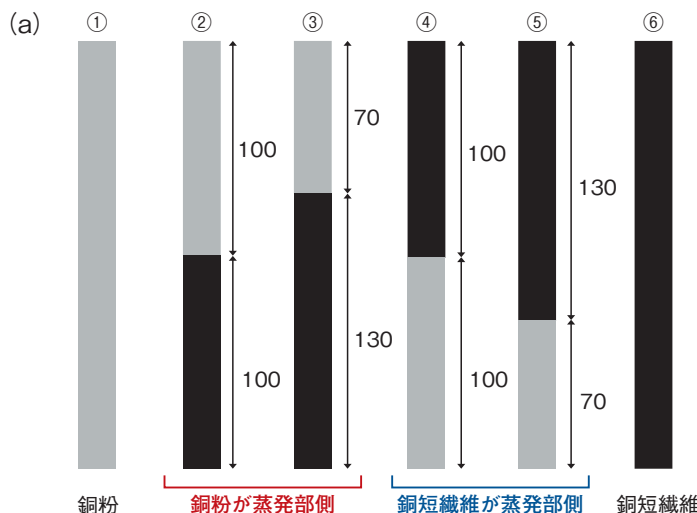
毛細管力と各圧力損失はヒートパイプ内部のウィックの構造によって決まるため、ウィックの性能がヒートパイプの能力を左右する要因となる。従来逆作動で使用されるヒートパイプは、**図2 (a)**で示されるように全長に銅粉が焼結されたウィックが用いられてきた。銅粉の焼結体は毛細管力が大きいので、逆作動で使用しても、重力による体積力の圧力損失に打ち勝って熱を輸送することが可能であった。しかし銅粉の焼結体は液の透過率が小さく、液流の圧力損失が大きくなるため、熱輸送の最大値(最大熱輸送量)が小さい。液流の圧力損失を低減するには銅粉の焼結体を厚くする方法もあるが、ヒートパイプの外径を維持したまま焼結体を厚くすると内部の蒸気空間が小さくなり蒸気流による圧力損失が大きくなるため、対策が困難な状況であった。



**図2** (a) 従来の銅粉焼結ヒートパイプの構造  
 (b) 今回開発品の銅粉+銅短繊維焼結ヒートパイプの構造  
 (a) Structure of a conventional heat pipe.  
 (b) Structure of a newly developed heat pipe (sintered copper powder + sintered copper short fiber).

### 3. 逆作動対応ヒートパイプの内部構造

**図2 (b)**に今回開発した、逆作動において熱輸送量を向上させたヒートパイプの内部構造を示す。長手方向に2種類の焼結体を組み合わせて使用しており、蒸発部には従来から使用される銅粉、断熱部から凝縮部までは銅短繊維の焼結体を設置した。逆作動で重力による体積力の圧力損失に打ち勝つためには蒸発部に高い毛細管力が必要となるため、従来から使用される銅粉を採用した。一方、断熱部から凝縮部までは毛細管力以上に液流による圧力損失の影響が大きい。透過率の大きい銅短繊維を採用することで液流の圧力損失を小さくすることを可能にし、結果として熱輸送量が向上することを見出した。

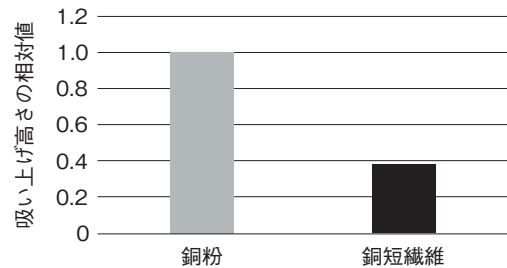


**図4 (a)** ウィック構成検討用のヒートパイプの構造  
 The structure of heat pipes to examine the wick configuration.

### 4. ウィック構成の検討

#### 4.1 ウィックによる液の吸い上げ性能とウィック構成の想定

ウィック構成による性能変化を確認するため銅粉と銅短繊維の位置及び長さの割合を変えたヒートパイプの作製を行った。銅粉と銅短繊維に関して、室温における液の吸い上げ高さを**図3**に示す。銅粉が銅短繊維よりも液の吸い上げ高さが高いことが分かる。毛細管力は吸い上げ高さに比例するので、液流圧損の小さい銅短繊維で吸い上げた後、毛細管力の大きい銅粉で吸い上げる構造の性能が向上すると予測される。参考として蒸発部側に銅短繊維がある場合も実施した。



$$\Delta P_c = \frac{2\delta \cos \theta}{r_c} = \rho_l g h = \rho_l g h_{ave}$$

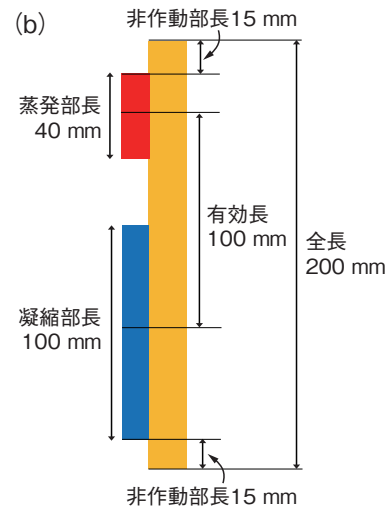
$\Delta P_c$ : 毛細管力 (Pa),  $h$ : 吸い上げ高さ (m),  $h_{ave}$ : 吸い上げ高さ平均 (m),  
 $\rho_l$ : 純水の密度 (kg/m<sup>3</sup>),  $\sigma$ : 表面張力 (N/m),  $\theta$ : 接触角 (rad),  
 $r_c$ : 細孔半径 (m),  $g$ : 重力加速度 (m/s<sup>2</sup>)

**図3** ウィックの吸い上げ高さと毛細管力の計算式  
 銅粉の吸い上げ高さを1.0とする

The equation to calculate the suction height and the capillary force of a wick.  
 The suction height with the sintered copper powder is set at 1.0.

#### 4.2 ウィック構成検討用ヒートパイプの作製

外径φ8 mm全長200 mmの銅管の内部に、銅粉と銅短繊維の焼結体を**図4 (a)**の構成になるように装填した。作動液として水を注入して実験用のヒートパイプを作製した。仕様を全長が銅粉(図4 (a)の①)、全長が銅短繊維(⑥)、銅粉+銅短繊維で性能向上が見込まれる、銅短繊維、銅粉の順に液を吸い上げる場合(②、③)、参考用として銅粉+銅短繊維で、銅粉、銅短繊維の順に液を吸い上げる場合(④、⑤)とした。



**図4 (b)** 測定条件  
 The measuring condition of heat pipes.

### 4.3 ウィック構成検討用ヒートパイプの測定条件

ヒートパイプの蒸発部にグリスを塗布して、長手方向40 mmの半割りの銅製のヒーターブロックに取り付けた。蒸発部側のヒートパイプ非作動部長さは15 mmとした。ヒーターブロックの加熱はカートリッジヒーターをヒーターブロックにグリスで熱接触させて行った。また、凝縮部側はヒートパイプにグリスを塗布したのち、長手方向100 mmのアルミ製の冷却ブロックに取り付けた。凝縮部側のヒートパイプ非作動部長さは蒸発部と同様に15 mmとした。冷却ブロックの冷却には、銅製の水冷ジャケットをグリスで熱接触させて行った。姿勢は図4(b)に示す逆作動姿勢とし、垂直は角度計を用いて確認した。作動温度は50℃固定で測定した。最大熱輸送量は、ヒーターブロックの温度とヒートパイプの断熱部の温度差から求めた熱抵抗が急激に上昇する直前の値の入熱量とした。

### 4.4 ウィック構成検討用ヒートパイプの測定結果

表1に各ヒートパイプの測定結果を示す。全長を銅粉または全長を銅短繊維としたヒートパイプと、銅粉+銅短繊維を用いたヒートパイプを比較すると、蒸発部側を銅粉とした②、③は熱輸送量が向上し、蒸発部側を銅短繊維とした④、⑤は熱輸送量が減少することが分かった。②、③では予想したように液流圧損の小さい銅短繊維で吸い上げた後、毛細管力の大きい銅粉で吸い上げることで性能が向上したと考えられる。④、⑤においては銅短繊維の毛細管力が足りず性能が悪化する結果になったと考えられる。

また銅粉+銅短繊維においては銅粉の焼結長さの割合が小さい(銅短繊維の割合が大きい)③、⑤が②、④に比べそれぞれ熱輸送量が大きくなる結果となった。これは透過率が大きい銅短繊維の割合が増えることにより、液流圧損の低減効果が現れ

ているものと考えられる。最大熱輸送量の値は理論計算の想定値と概ね一致することが確かめられた。銅短繊維を蒸発部側とした④、⑤に関しては理論値との乖離が見られる。計算上は銅短繊維の毛細管力を用いているが、実際は銅短繊維だけでなく銅粉の毛細管力が働くため理論値と比較して熱輸送量が大きくなっているものと考えられる。

## 5. ウィック構成の最適化検討

### 5.1 ウィック構成最適化検討用ヒートパイプの作製

4の測定結果から、蒸発部側を銅粉とし凝縮部側を銅短繊維とする構造が逆作動における性能改善に効果的であることが分かったため、蒸発部側を銅粉とする構造にて、銅粉と銅短繊維の割合の最適化に関して検討を行った。

銅粉によって毛細管力を実用上問題ないレベルに保てれば、銅短繊維部分が長いほうが液流圧損の低減による熱輸送量向上には好ましい。一方、焼結体が液を還流できる底面からの高さは毛細管力に応じて決まっており、銅短繊維の焼結長さが長すぎると銅粉の位置まで液を還流できない恐れがある。そこで逆作動姿勢(45°)にした際に、銅短繊維が還流可能である長さを基準とした(銅短繊維300 mm、図5(a)の⑨)。銅粉と銅短繊維の長さの比率変更による性能変化確認のため、基準値の上下1点ずつも作製した(⑧、⑩)。具体的には外形φ8 mm全長400 mmの銅管の内部に、銅粉と銅短繊維の焼結体を図5の構成になるように装填した。作動液として水を注入して実験用のヒートパイプを作製した。銅短繊維を使用した改善効果を確認するため、銅粉のみを長手方向全長に焼結したヒートパイプも作製した(⑦)。

表1 焼結長さの比率を変更したヒートパイプの熱輸送量測定結果(L200 mm) ウィックを全長銅粉とした構成(①)の最大熱輸送量(理論値)を1.0とする

The experimental result of maximum heat transfer rate of heat pipes (200 mm in full length) in which the wick proportion was varied. The maximum heat transfer rate of theoretical value is set as 1.0 when covering the full length of the wick with the sintered copper powder (①).

		①	②	③	④	⑤	⑥
最大熱輸送量の 相対値	実験値	1.4	2.0	2.8	0.7	0.9	1.4
	理論値	1.0	1.7	2.3	0.3	0.4	1.1
ウィック構成		銅粉	銅粉+銅短繊維(銅粉が蒸発部側)		銅粉+銅短繊維(銅短繊維が蒸発部側)		銅短繊維

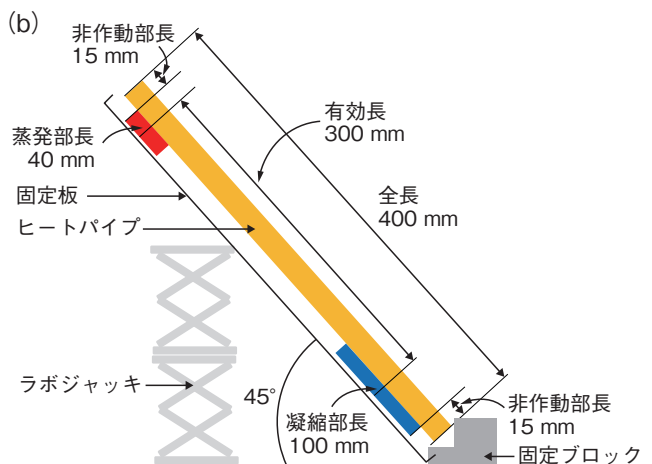
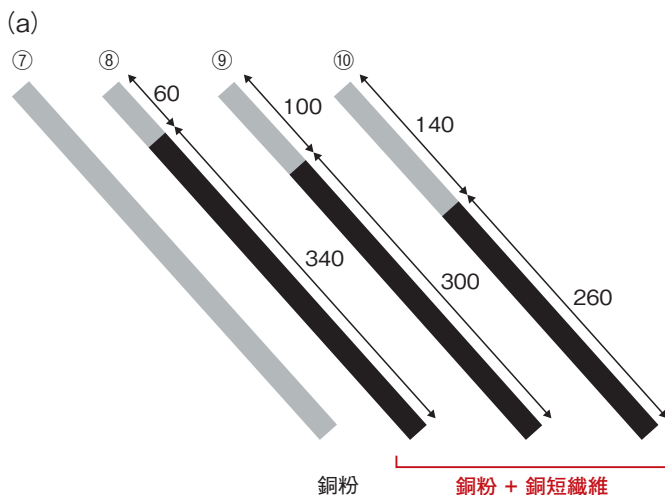


図5(a) ウィック構成最適化検討用のヒートパイプの構造  
The structure of a heat pipe to examine the optimum wick configuration.

図5(b) 測定条件  
The measuring condition of heat pipes.

### 5.2 ウィック構成最適化検討用ヒートパイプの測定条件

逆作動姿勢での角度の付け方を説明する。姿勢の安定性確保と作業性向上のため、ヒートパイプ及びブロックの一式を平板の上に載せ固定した。図5(b)に示すように蒸発部側を上側とし、角度が45°となるように傾けた。固定板の下にラボジャッキを設置し高さ変更することで傾きを調整した。凝縮部側にブロックを置くことで全体を固定した。

その他の測定条件に関しては4.2と同様にした。

### 5.3 ウィック構成最適化検討用ヒートパイプの測定結果

図6に測定結果を示す。ウィックを銅粉+銅短繊維としたヒートパイプ(⑧, ⑨, ⑩)は、いずれの場合も、全長を銅粉としたヒートパイプに対して、逆作動での熱輸送量が2倍程度向上する結果となった。4.3の検討結果と同様に、透過率が大きい銅短繊維が増えることにより、液流圧損が低減する効果が表れているものと考えられる。銅粉と銅短繊維の割合による性能変化に関して、計算上は銅粉の焼結長さが短くなるほど熱輸送量が向上するが、割合によらず性能は横ばいになった。実験値が理論値と概ね一致した4.3(②, ③)と比較すると、焼結長さ全長に対する銅短繊維の焼結長さの変化の割合が小さいためと考えている。

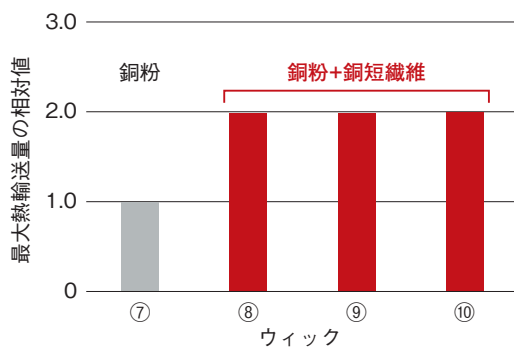


図6 ウィックを変更したヒートパイプの熱輸送量測定結果  
ウィックを全長銅粉とした構成(⑦)の最大熱輸送量(実験値)を1.0とする

The experimental result of maximum heat transfer rate of heat pipes in which the wick proportion was varied.

The maximum heat transfer rate of the theoretical value is set at 1.0 when covering the full length of the wick with the sintered copper powder (⑦).

## 6. おわりに

蒸発部に毛細管力の高い銅粉、断熱部と凝縮部に液流の圧力損失が小さい銅短繊維の焼結体を設置することで、逆作動における熱輸送量を向上することを見出した。

これからますます進歩する電子機器に対応するため、ヒートパイプ、及びヒートパイプヒートシンクの性能をさらに向上させ、それらを用いる電子機器の発展に貢献していく。

### 参考文献

- 1) 上久保将大: データセンタ向け銅短繊維ヒートパイプの開発, 古河電工時報, 139 (2020), 37-40.
- 2) 国内特許 上久保将大: ヒートパイプ, 特許第6827117号 (2021), 外国特許 Masahiro Uekubo: ヒートパイプ, I694232 (2020) 台湾.
- 3) 大島耕一: ヒートパイプ工学, 朝倉書店, (1979), 14-61.