

公益財団法人 荏原 畠山記念文化財団
2022 年度 研究成果報告書

研究題目：焼結金属多孔質流路壁を有する自励振動ヒートパイプの伝熱特性と動作安定性

代表研究者：黒瀬 築

所属：東京理科大学 創域理工学部 機械航空宇宙工学科 ※2023 年度より名称が変更になりました

1. 研究目的

自励振動ヒートパイプ (Pulsating Heat Pipe, PHP) (Fig. 1) は [1], 小型・高性能かつパッシブな冷却機器として, 小型端末や宇宙機器での応用が期待されているが, そのロバスト性 (動作の安定性) に課題がある. 例えば, 加熱量が増大した場合に, 加熱区間が蒸気で覆われて伝熱性能が著しく低下してしまうこと (熱輸送限界) や, 動作停止後再起動する場合に, 加熱区間に液体が不足していると沸騰が生じず自励振動が発生しないこと (始動安定性) 等である. この課題を解決する方策の 1 つとして, 加熱区間に液体供給を促進する機構を設けることが考えられる. 本研究では, 加熱区間への液供給促進機構を付与した高性能かつ高信頼なヒートパイプの実現を大目的とする. 具体的には, 流路壁が金属焼結多孔質体で形成されたヒートパイプ (次節 Fig. 2 (b)に示す) を考案し, その伝熱・流動特性を実験的に明らかにする.

金属粉を真空焼結させると, 空隙のある多孔質体となる. Fig. 2 (b)に示す PHP では, 焼結多孔質体の薄層に蛇行流路を切削することで, 多孔質壁の毛管力による液体輸送と, 蛇行流路内の相変化流動現象を組み合わせた高効率熱伝達の実現を期待している. 本研究では, 上述した PHP を製作して伝熱・可視化実験を行い, 多孔質体が伝熱性能に及ぼす影響を検討する.

2. 実験装置および実験方法

Fig. 2 (a)に多孔質体のない裸面の PHP (以下, bare PHP と記す), Fig. 2 (b)に流路壁が多孔質体の PHP (以下, porous PHP と記す) の概略を示す. bare PHP は, 130 × 100

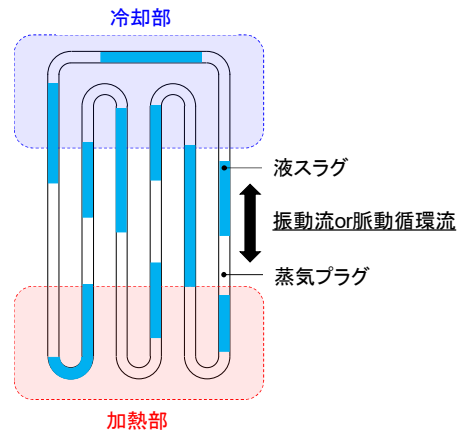


Fig. 1: 自励振動ヒートパイプ (Pulsating Heat Pipe, PHP) の概要

冷媒の潜熱を利用する熱輸送デバイスで, 加熱部では蒸発, 冷却部では凝縮が生じる. 冷媒流路は蛇行ループ状になっており, 冷媒が自励振動して加熱部と冷却部を行き来し熱を輸送する. 通常は, 図に示すように, 加熱部と冷却部の間を複数回往復するように製作される.

mm の銅板に、幅 1.0 mm × 深さ 0.8 mm、ターン数 10 の閉ループ矩形流路溝を切削することで製作した。porous PHP は、銅板上に厚さ 0.8 mm の窪みを作り、その窪みに厚さ 0.8 mm の銅焼結多孔質体層を形成した上で、bare PHP と同様の蛇行溝を切削して製作した。多孔質体の厚さ 0.8 mm に対して、矩形溝の深さは 0.8 mm と等しいため、流路の底面は銅面となっており、流路の側壁部のみが多孔質体となっている。Fig. 2 中下部の断面図に示すように、流路の片面は、可視化ブロックを圧着して密閉し、内部を観察できるようにした。

実験装置の全体図を Fig. 3 に示す。PHP への加熱および冷却は、それぞれ流路背面に設置した銅ブロックを介してヒータおよび冷却水を用いて行った。伝熱量は、ヒータにかかる電圧と電流から見積もった。また、熱電対により流路底面近傍の温度を測定した。熱電対の設置位置の概略を Fig. 4 に示す。冷却部 (T_1-T_3)、非伝熱部 (T_4, T_5)、および加熱部 (T_6-T_8) の計 8 点の測定を行った。流動様相は、CCD カメラを用いて撮影した。

実験では、流路内を真空排気した後、任意の液体体積充填率 ϕ で作動流体を封入した。恒温水槽から吐出される循環水の温度は 5 °C で一定とし、ヒータの加熱量を段階的に増大させた。各加熱量において、測定温度が十分に定常状態となった後、温度測定および CCD カメラにより流動様相の撮影を行った。作動流体は FC-72 を使用し、液体充填率 ϕ は 0-0.7 の間で変化させた。また、PHP の設置姿勢は垂直と水平の 2 通りで行った。なお、垂直姿勢の場合は、冷却区間を上部、加熱区間を下部（ボトムヒート型）とした。

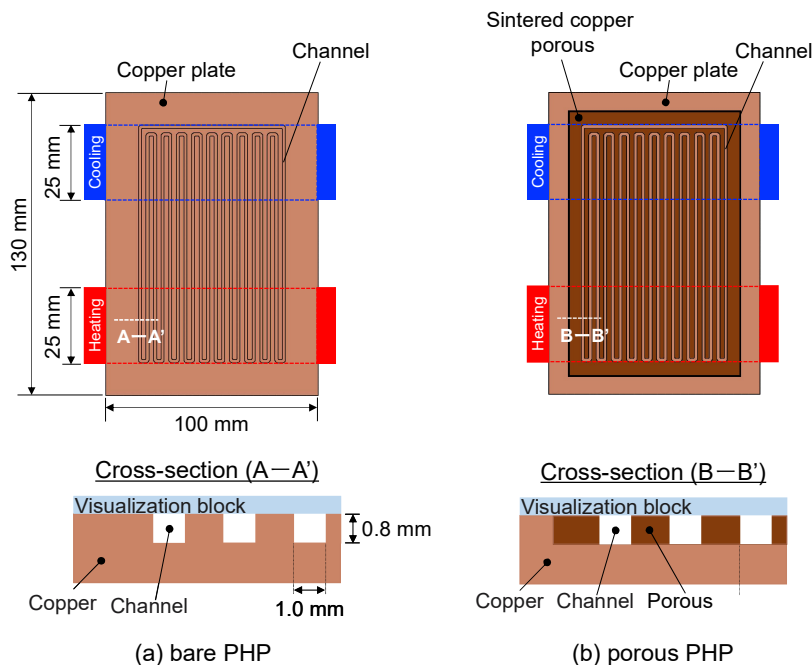


Fig. 2 : PHP 概略図 (not to scale) : (a) bare PHP : 通常の銅板に蛇行溝を切削して作製した。一般的な PHP 流路である。(b) porous PHP : 銅板上に多孔質体の層を製作し、その層に蛇行流路を切削して製作した。特に、加熱区間に液が少ない場合、多孔質体層の毛管力により、冷却区間から加熱区間へ液が自発的に給水される。蛇行流路内の自励振動現象と、毛管力流動を組み合わせることで、伝熱性能・動作安定性が向上する見込みである。

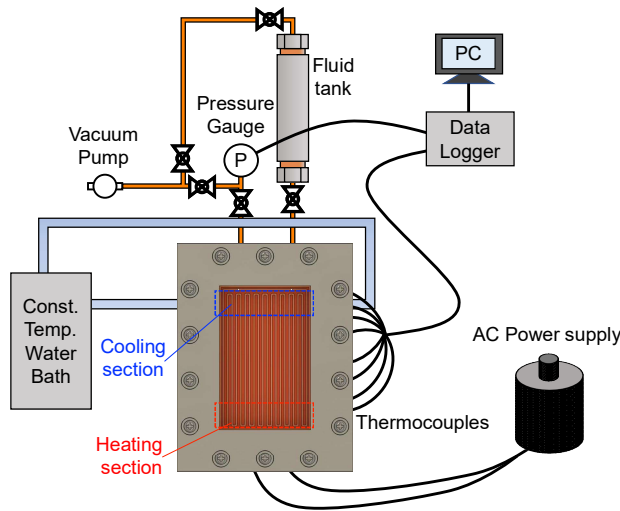


Fig. 3: 実験装置全体図

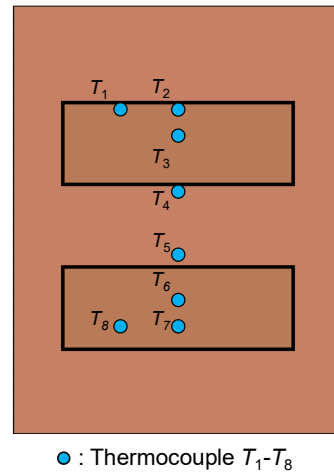


Fig. 4: 熱電対設置位置

3 実験結果

porous PHP での液体充填率 $\phi = 0.3$, 垂直姿勢の条件を例に, 各熱電対位置で測定した温度の時間変化を Fig. 5 に示す. 段階的にヒータの電圧 (加熱量) を増大させており, 各時間帯での伝熱量 [W] を図中に併記している. この条件では, 20 W から加熱区間で沸騰が生じており, 自励振動現象が発生した. 全般に, 伝熱量が増大するにつれて, 全区間の温度が増大した.

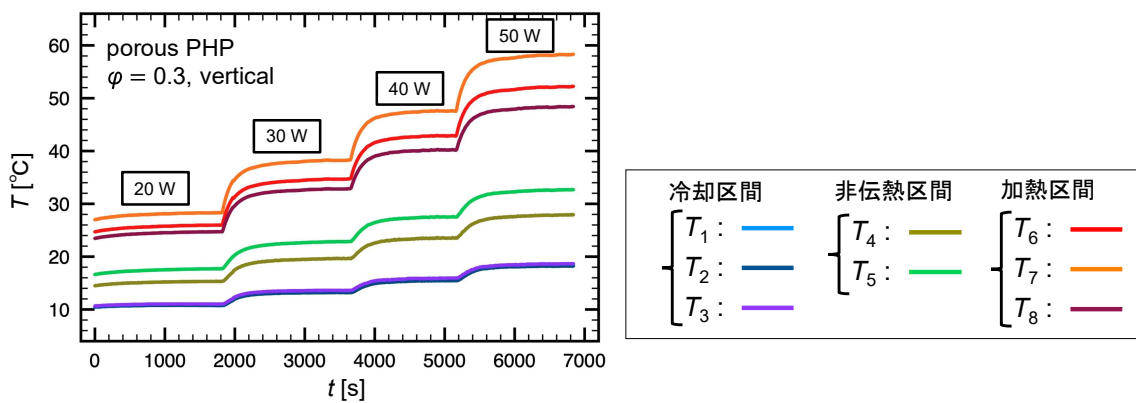


Fig. 5: 各温度の時間変化 (porous PHP, vertical, $\phi = 0.3$)

伝熱性能を評価するため, 熱抵抗 $R_{th} [K/W] = (T_H - T_C)/Q$ を算出した (ここで, T_H , T_C は, それぞれ加熱・冷却区間の平均温度, Q は伝熱量である. 熱抵抗が小さいほど伝熱性能が良いことを意味する).

Fig. 6 に, 熱抵抗比 $R_{th}/R_{th,\phi=0}$ と加熱区間平均温度 T_H の関係を, 充填率 ϕ をパラメータとして, bare PHP と porous PHP を比較して示す. ここで, $R_{th,\phi=0}$ はそれぞれの PHP で取得した銅板のみ ($\phi = 0$) の熱抵抗で正規化している (なお, 流体を封入していな

い場合、伝熱量によらず熱抵抗はほぼ同じ値を示すことを確認している。理論的に、フーリエの法則に基づき、熱伝導率が定数のときに熱抵抗は一定となることから、実験装置の健全性も合わせて確認することができた。)。また、Fig. 6 中、中抜きの記号が未沸騰、塗りつぶしの記号が沸騰（自励振動）している条件を示し、丸い点線はドライアウト（加熱区間が蒸気で覆われる現象）が生じている点を示す。まず、bare PHP の $\phi = 0.7$ の条件に着目する。 $T_H \approx 40^\circ\text{C}$ で沸騰が生じており、自励振動開始とともに熱抵抗比が大幅に減少した。これは、冷媒の自励振動による熱輸送が実現したことにより、熱伝達性能が向上したためである。さらに T_H が増加すると熱抵抗比は再び増大した。これは、ドライアウトが発生し、蒸発潜熱による高い熱輸送が行われなくなったためであると考えられる。これらの傾向は $\phi = 0.5$ でも同様であった。一方、 $\phi = 0.3$ では、ドライアウトが発生した後にさらに加熱量を増大させると、再び非常に激しい自励振動が発生し、 $T_H \approx 53^\circ\text{C}$ で熱抵抗比が大幅に減少した。この現象については、今後そのメカニズムと原因を考察していく。続いて、四角の記号で表す porous PHP では、比較的低い加熱区間温度から沸騰が開始し、蒸発温度の増加とともに熱抵抗が減少した。熱抵抗比の値は、bare PHP と比べて非常に小さかった。これは、多孔質体による核沸騰の促進効果[2]や、毛管力による液体往還により、熱伝達性能が向上したためと考えられる。また、観察結果から、伝熱量が大きくなるにつれて、自励振動の振幅・周波数が増加していることが認められた。すなわち、自励振動が激しくなり、熱輸送が促進されたため、加熱区間の温度増加とともに熱抵抗が減少したと考えられる。また、bare PHP で見られたようなドライアウトは見られず、熱抵抗が増大する現象はみられなかった。すなわち、熱輸送限界が向上した。

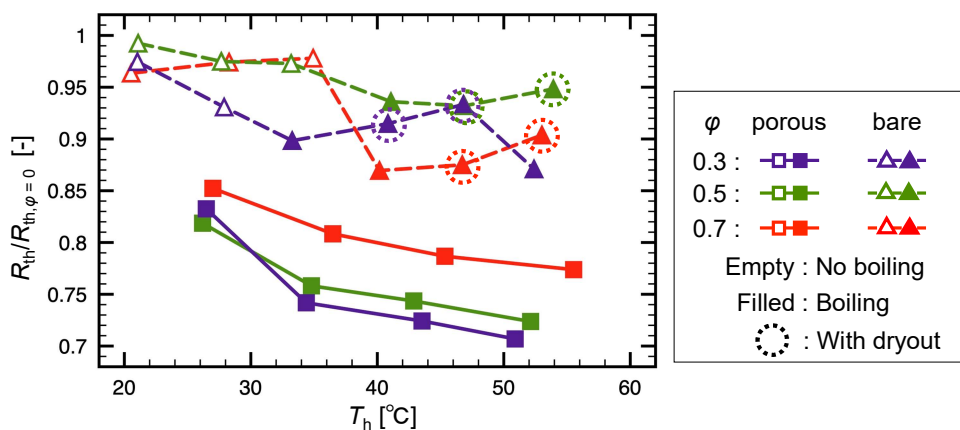


Fig. 6: 熱抵抗比 $R_{th}/R_{th,\phi=0}$ と加熱区間平均温度 T_H の関係, bare PHP と porous PHP の比較

また、porous PHP の $R_{th}/R_{th,\phi=0}$ に関して、垂直姿勢 (vertical) と水平姿勢 (horizontal) の比較結果を Fig. 7 に示す。図中に示すように、horizontal では、明確な沸騰現象（自励振動）が発生せず、垂直姿勢と比べて熱抵抗は高い値を示した。したがって、設置姿勢が熱伝達性能に与える影響は大きいことが明らかとなった。

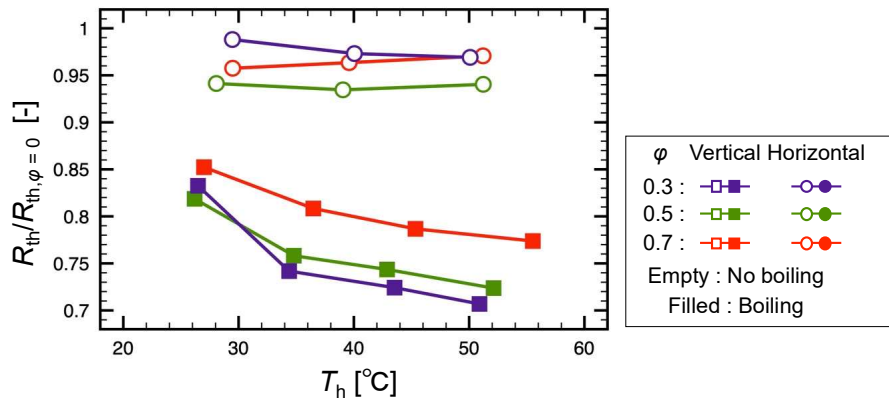


Fig. 7: porous PHP における熱抵抗比 $R_{th}/R_{th, \phi=0}$ と加熱区間平均温度 T_H の関係, 垂直と水平姿勢の比較

4. まとめ

流路壁が金属焼結多孔質体で構成される porous PHP を製作して伝熱・可視化実験を行い, 以下の結論を得た.

- (1) porous PHP の熱抵抗比は, 多孔質体のない bare PHP と比べて全般に小さかった. つまり, 多孔質体により熱伝達性能が向上することを明らかにした.
- (2) bare PHP でドライアウトが発生する条件においても, porous PHP ではドライアウトが発生しないことを明らかにした. すなわち, 多孔質体内の毛管力によって, 冷却区間から加熱区間への液体供給が促進され, 熱輸送限界が向上したと考えられる.

(参考文献)

1. Han et al., Renewable and Sustainable Energy Reviews, 59 (2016), pp.692.
2. Deng et al., Applied Thermal Engineering, 107 (2016), pp. 420.

(研究発表歴)

1. 一ノ瀬 樹, 伊勢 拓哉, 黒瀬 築, 宮田 一司, 金属焼結多孔質流路壁を有する自励振動ヒートパイプの熱輸送特性, 第 59 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, H321,2022.
2. 伊勢 拓哉, 一ノ瀬 樹, 黒瀬 築, 宮田 一司, 上野 一郎, 蛇行ミニチャネルおよび金属焼結多孔質体を有するヒートパイプの熱輸送特性, 第 34 回日本マイクログラフィティ応用学会 (JASMAC-34) 学術講演論文集, P15, 2022.

(指導学生の受賞)

1. 伊勢 拓哉, JASMAC-34 毛利ポスターセッション敢闘賞, 日本マイクログラフィティ応用学会, 2022.9.