

令和 4 年 6 月 6 日現在

機関番号：17401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04242

研究課題名（和文）ヒートパイプ機構形成による高熱伝導性プラスチック薄板の開発と設計学理の構築

研究課題名（英文）Development of a thermally conductive plastic plate by integrating heat pipe technology

研究代表者

小糸 康志 (Koito, Yasushi)

熊本大学・大学院先端科学研究部（工）・准教授

研究者番号：70347003

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、内部に自励振動式ヒートパイプを形成することにより、高熱伝導性プラスチック薄板を開発することを目的としている。熱輸送実験により、ヒートパイプ蒸発部の流路壁熱抵抗を低減させ、プラスチック薄板のプロトタイプについて、最大で $432 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ の有効熱伝導率を得た。また、可視化実験と映像解析により、プロトタイプ内ではランダムな流動パターンで自励振動が誘起されて熱輸送が行われていることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

内部に自励振動式ヒートパイプを形成することにより、プラスチック薄板の有効熱伝導率を大幅に増加させることが可能である。従来から、熱を伝える必要がある機器には銅やアルミなどの金属材料が使用されているが、プラスチックは軽量でコストが低く、形状の自由度が高いなどの特長を有する。このため、本研究の高熱伝導性プラスチック薄板は、ヒートシンクなどの放熱部材をはじめ、様々な用途への応用が期待できる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to develop a thermally conductive plastic plate with a pulsating heat pipe. Through heat transfer experiments, the thermal resistance of the heat pipe wall at the evaporator section was reduced, and the maximum effective thermal conductivity of $432 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ was obtained for the prototype of the plastic plate. In addition, by visualization experiments and video analysis, a random flow pattern was confirmed for the oscillating flow in the prototype.

研究分野：熱工学

キーワード：ヒートパイプ 自励振動 伝熱促進 プラスチックシート 3Dプリンター 可視化 映像解析

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

プラスチックは金属と比べて熱伝導率が小さい材料である。このため、熱を伝える必要がある機器には銅やアルミなどの金属材料が使用されているが、プラスチックは軽量でコストが低く、形状の自由度が高いなどの特長があるため、高熱伝導性のプラスチックが開発できれば、ヒートシンクなどの放熱部材をはじめ、様々な用途への応用が期待できる。

研究代表者は、プラスチック材料を用いたヒートパイプの開発研究を進めている。ヒートパイプは外部動力を要することなく熱を輸送する伝熱デバイスである。これまでに様々なヒートパイプが開発されているが、中でも自励振動式ヒートパイプ (Pulsating Heat Pipe, PHP) は従来のヒートパイプと異なり、内部にウイックと呼ばれる毛細管構造を設ける必要が無いために薄型化に適している。自励振動式ヒートパイプは細い蛇行流路内に、液スラグと蒸気プラグの状態で作動液が封入されたものであり、液スラグと蒸気プラグがヒートパイプの受熱部と放熱部の間を自励振動し、蒸発・凝縮潜熱と振動流で熱が輸送されるヒートパイプである。

2. 研究の目的

本研究では、内部に自励振動式ヒートパイプを形成することにより、高熱伝導性プラスチック薄板を開発することを目的とする。プラスチック薄板内の自励振動式ヒートパイプを研究対象とし、熱輸送実験を実施して熱抵抗の低減を図る。また、可視化実験と映像解析により、プラスチック薄板内で誘起される自励振動現象の流動パターンを明らかにする。さらに、ヒートパイプの薄型化についても検討する。

3. 研究の方法

まず、自励振動式ヒートパイプが内部に形成されたプラスチック薄板のプロトタイプ (Type 1) を製作した。具体的には、長さ 175 mm、幅 34 mm、厚さ 2.6 mm のプラスチック薄板内に、図 1 (a) に示したように蛇行流路を設け、自励振動式ヒートパイプを形成した。ここでは、流路設計に関する事前検討を踏まえ、断面が 1.3 mm × 1.1 mm (幅 × 高さ) の矩形流路 14 本からなる蛇行流路を形成した。プロトタイプ製作には 3D プリンターを利用し、3D プリンターの素材には半透明の ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) フィラメントを用いた。作動液には HFE (HydroFluoroEther) 7100 を用いた。

次に、プラスチック薄板の薄型化、ならびに、加熱部と冷却部におけるヒートパイプ流路壁の熱抵抗の低減を図るため、図 1 (b) に示したように、薄いプラスチックシート上に自励振動式ヒートパイプを形成してプロトタイプを製作した (Type 2)。プラスチックシートとして、厚さが 0.21 mm の ABS シート、厚さが 0.25 mm、0.12 mm の PC (Polycarbonate) シートを用い、それぞれのプロトタイプを Type 2-a, Type 2-b, Type 2-c とする。さらに、プロトタイプ内で誘起される自励振動現象を鮮明に撮影するために、Type 2-c からカメラ側のヒートパイプ流路壁を透明の PC シートに変更したプロトタイプ (Type 3) も製作した。PC シートの厚さは 0.25 mm である。なお、Type 2, Type 3 についても、3D プリンターの素材には半透明の ABS フィラメントを、ヒートパイプの作動液には HFE 7100 を用いた。

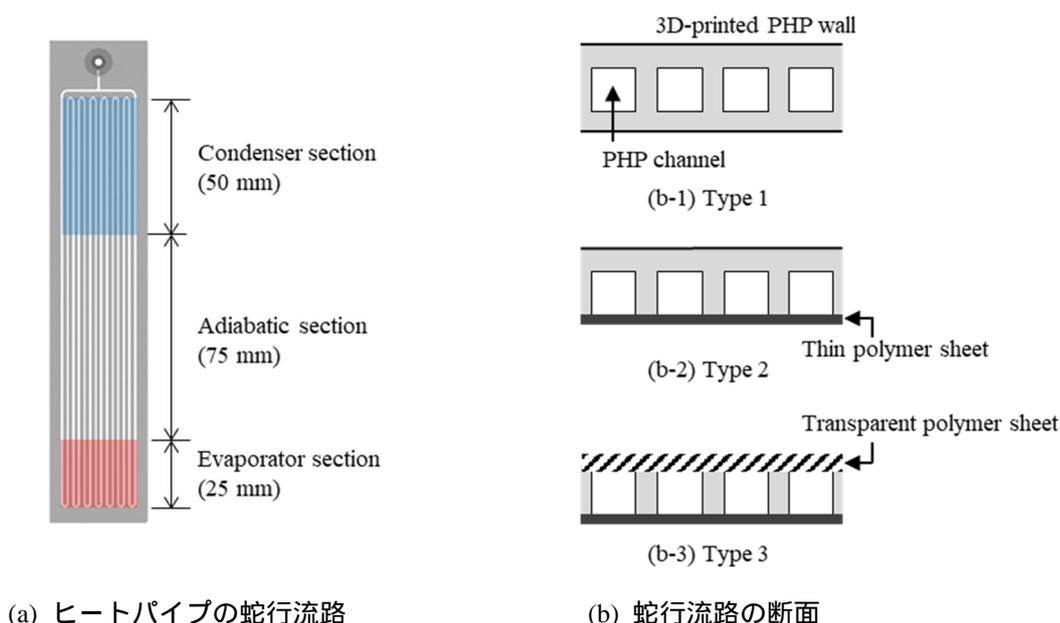


図 1 プロトタイプの概要

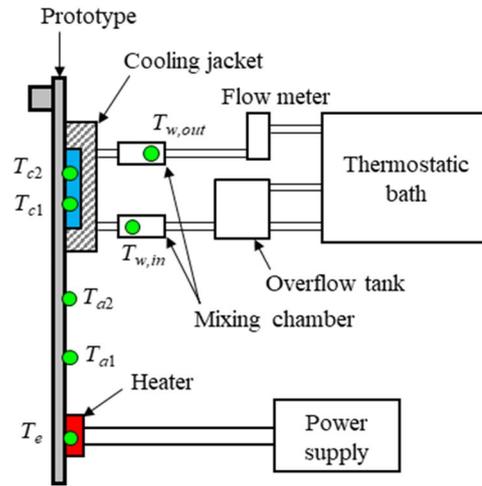


図2 実験装置

各プロトタイプの実験装置を評価するための実験装置を図2に示した。プロトタイプは鉛直方向に向けて実験装置に設置し、下部に加熱ヒーターを、上部に冷却ジャケットを取り付けた。ヒートパイプの加熱部（受熱部、蒸発部）長さは25 mm、冷却部（放熱部、凝縮部）長さは50 mm、その間の断熱部長さは75 mmである。実験では、加熱ヒーターと冷却ジャケットによりプロトタイプを加熱・冷却してヒートパイプを作動させ、図2に示した各位置の温度（蒸発部温度： T_e ；断熱部温度： T_{a1} 、 T_{a2} ；凝縮部温度： T_{c1} 、 T_{c2} ；冷却水流入温度： $T_{w,in}$ ；冷却水流出温度： $T_{w,out}$ ）の経時変化を熱電対で測定した。4.0 Wのヒーター入力電力から加熱を開始し、温度変化が定常になる毎に1.0 Wずつ増加させた。冷却ジャケットへの冷却水流入温度を恒温槽により制御して $T_{w,in}$ を5~10°Cに設定した。なお、Type 3については、加熱ヒーター、冷却ジャケットと反対側に高速度ビデオカメラを設置し、温度測定とともに作動液の自励振動現象の撮影も行った。また、冷却水の質量流量 \dot{m} 、比熱 c 、流入温度 $T_{w,in}$ 、流出温度 $T_{w,out}$ を用い、熱輸送量 Q を式(1)で評価した。

$$Q = \dot{m}c(T_{w,out} - T_{w,in}) \quad (1)$$

4. 研究成果

(1) 熱抵抗の低減

プロトタイプの蒸発部から凝縮部までの全熱抵抗 R_t を蒸発部側の熱抵抗 R_e と凝縮部側の熱抵抗 R_c に分け、それぞれ式(2)、(3)で評価した。

$$R_e = \frac{T_e - T_a}{Q} \quad (2) \quad R_c = \frac{T_a - T_c}{Q} \quad (3)$$

ここで、 T_a は断熱部平均温度、 T_c は凝縮部平均温度であり、有意な差が確認できなかったことから、それぞれ T_{a1} と T_{a2} 、 T_{c1} と T_{c2} の平均値を用いた。なお、 $R_t = R_e + R_c$ である。

Type 1、Type 2-a~Type 2-cの各プロトタイプについて、定常状態における R_e と Q の関係を図3に、 R_c と Q の関係を図4に示した。 R_e については、Type 1よりもType 2-a~Type 2-cの方が小さな値を示しており、プロトタイプの加熱冷却面側の流路壁に薄いプラスチックシートを用いた効果があらわれていることが確認できる。また、Type 2-aのABSシートを用いた場合、ヒートパイプの流路形成時にシートが流路内側に変形する現象がみられたため、プラスチックシートの効果は限定的であったが、Type 2-b、Type 2-cのPCシートを用いた場合にはシートの変形はほとんど無く、Type 2-bよりもシートが薄いType 2-cの R_e が最も小さくなっている。なお、シートの変形によりヒートパイプの流路が狭くなり、さらに加熱ヒーターおよび冷却ジャケットとの接触熱抵抗が大きくなるため、その効果が限定的になると考えられる。一方、 R_c については、 R_e のようなプロトタイプによる顕著な違いは確認されず、プラスチックシートは蒸発部の熱抵抗の低減に効果的であるといえる。

流路壁の厚さを δ 、熱伝導率を λ 、蒸発部の加熱面積を A_e として、蒸発部の流路壁の熱抵抗 $R_{e,w}$ を式(4)で評価し、Type 1とType 2-cについて、 R_t に占める $R_{e,w}$ の割合を図5に示した。

$$R_{e,w} = \frac{\delta}{\lambda A_e} \quad (4)$$

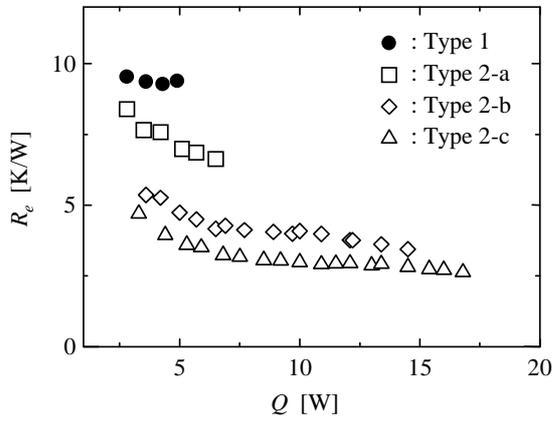


図3 蒸発部の熱抵抗

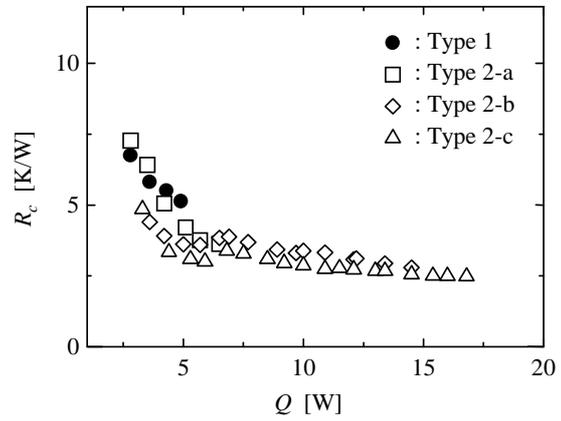


図4 凝縮部の熱抵抗

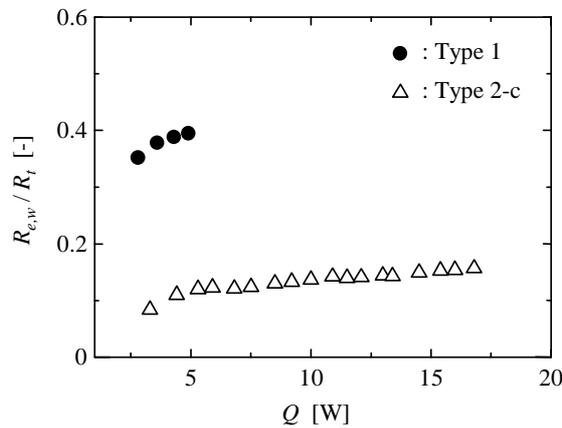


図5 全熱抵抗に占める蒸発部流路壁熱抵抗の割合

Type 1 については、 $R_{e,w}$ が R_t の 35 ~ 40% を占めているが、Type 2-c については 8 ~ 16% となっており、プラスチックシートにより R_t に占める $R_{e,w}$ の割合が 7 割程度低下している。さらに、蒸発部から凝縮部までの流路長さを L 、プロトタイプの前断面積を A_p とし、プロトタイプの有効熱伝導率 λ_{eff} を式(5)で評価すると、Type 2-c の $Q = 16.8 \text{ W}$ において $\lambda_{eff} = 432 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ で最大値となり、銅の熱伝導率を超える値が得られた。

$$\lambda_{eff} = \frac{QL}{(T_e - T_c)A_p} \quad (5)$$

(2) 可視化

Type 3 のプロトタイプを用い、高速度ビデオカメラで撮影したヒートパイプ流路内の様相の一例を図 6 に示した。 $Q = 7.3 \text{ W}$ 、 $T_{c,in} = 10^\circ\text{C}$ において撮影したものであり、紙面の都合上、画像を横に向けて示した。Type 2-c からカメラ側のヒートパイプ流路壁を透明の PC シートに変更したものが Type 3 であるが、プロトタイプ内の流路ならびに流路内の液スラグと蒸気プラグが鮮明に確認できる。なお、Type 2-c から Type 3 に変更しても、ほぼ同等の熱輸送性能が得られることを確認している。

液スラグと蒸気プラグの挙動を鮮明に撮影することができたことから、液スラグと蒸気プラグの流路内での時間的変位を映像解析ソフトを用いて解析することができるようになり、解析結果の一例を図 7 に示した。ここでは、図 6 において矢印で示した上から 6 番目の流路 1 本に着目し、蒸発部から凝縮部までの熱輸送方向の全領域を対象として映像解析を行い、液スラグと蒸気プラグの時間的変位を得た。薄い灰色部が液スラグ、濃い灰色部が蒸気プラグであり、8.7 秒間の映像を解析している。ヒートパイプの流路内では液スラグと蒸気プラグの自励振動が誘起されるが、これらの挙動には周期性が認められないことがわかる。また、液スラグと蒸気プラグのサイズや分布にも規則性がなく、本研究のプロトタイプ内ではランダムな流動パターンで自励振動が誘起されて熱輸送が行われている。作動液 (HFE 7100) の表面張力が比較的小さいことが要因の一つであると考えられる。

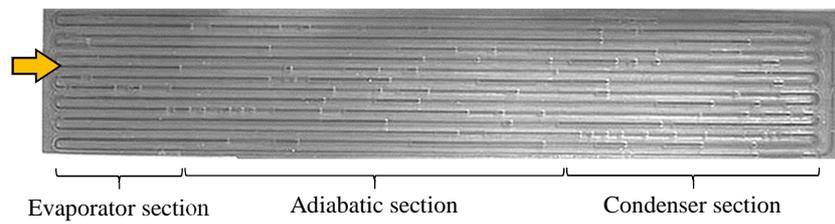


図 6 ヒートパイプ内の自励振動現象

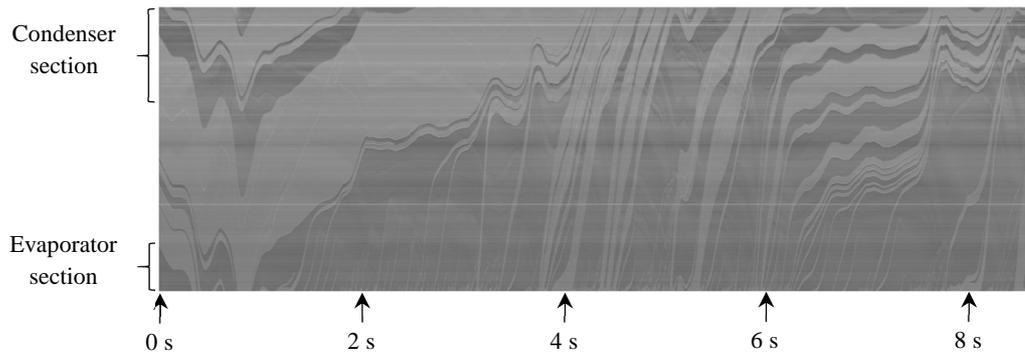


図 7 映像解析結果

(3) 薄型化

ヒートパイプの蛇行流路の断面を前述の $1.3 \text{ mm} \times 1.1 \text{ mm}$ (幅 \times 高さ) から $1.0 \text{ mm} \times 0.6 \text{ mm}$, $0.7 \text{ mm} \times 0.6 \text{ mm}$ と変更してプロトタイプの薄型化を進め、熱輸送実験を行うことにより、 $1.0 \text{ mm} \times 0.6 \text{ mm}$ の流路サイズのものまで自励振動が誘起されることを確認した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Koito Yasushi, Yoshida Hiroaki, Pei Zhengyuan	4. 巻 33
2. 論文標題 AN EXPERIMENTAL STUDY OF A POLYMER PULSATING HEAT PIPE 3D-PRINTED ON A THIN POLYMER SHEET	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Multiphase Science and Technology	6. 最初と最後の頁 31 ~ 43
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1615/MultScienTechn.2021040052	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Y. Koito, Y. Yoshimoto
2. 発表標題 Fabrication of a Polymer Pulsating Heat Pipe on a Thin Polymer Sheet
3. 学会等名 The 31st International Symposium on Transport Phenomena (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Z. Pei, Y. Shimogaki, M. Samuta, Y. Koito
2. 発表標題 Operational Characteristics of an ABS Polymer Pulsating Heat Pipe with an HFE Working Fluid (Effect of Orientation)
3. 学会等名 The 31st International Symposium on Transport Phenomena (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Zhengyuan Pei, Minoru Samuta, Nobuhito Nagasato, Yasushi Koito
2. 発表標題 Operational Characteristics of a Polymer Pulsating Heat Pipe (Experiments on Horizontal Heat Transport)
3. 学会等名 Second Asian Conference on Thermal Sciences (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉田大晃, 裴サウ元, 小系康志
2. 発表標題 自励振動式ポリマーヒートパイプの作動特性(壁熱抵抗の低減)
3. 学会等名 第58回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	吉田 大晃 (Yoshida Hiroaki)		
研究協力者	裴 サウ元 (Pei Zhengyuan)		
研究協力者	永里 信人 (Nagasato Nobuhito)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------