

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 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：2014～2016

課題番号：26420150

研究課題名（和文）柔軟性プラスチックの濡れ性の制御とフレキシブル・ヒートパイプへの応用展開

研究課題名（英文）Wettability control of flexible plastics and development of a flexible heat pipe

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） 3,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、はじめに、ヒートパイプに関する基礎実験を行い、その上で、グラフェンを混入させたプラスチック素材を用い、3Dプリンターを使用して自励振動式ヒートパイプを製作した。作動液には素材との濡れ性が良好なエタノールを使用した。実験結果から、ヒートパイプを曲げた場合（角度：20度）と曲げない場合を比較し、ヒートパイプを曲げると加熱量が5.0Wと6.0Wのとき熱輸送性能が少し低下するが、いずれの場合も内部で作動液が流動し、ヒートパイプが作動して定常的な熱輸送が行われていることを確認した。

研究成果の概要（英文）：Fundamental experiments on a heat pipe were conducted, and then a pulsating heat pipe was fabricated by using a 3-D printer and a graphene-laden plastic material. Because of high wettability, ethanol was used as a working fluid. Experimental results for a 20 degree bent pulsating heat pipe and a straight one were compared. It was found that the heat transport performance of the bent pulsating heat pipe was slightly lower than that of the straight one at heat inputs of 5.0W and 6.0W. However, steady-state operation and heat transport were confirmed for the both pulsating heat pipes.

研究分野：熱工学

キーワード：ヒートパイプ 自励振動 3Dプリンター グラフェン 表面処理 濡れ性 相変化 プラスチック

1. 研究開始当初の背景

パソコンやスマートフォンなど、電子機器の高性能化とともに発熱量・発熱密度が増大している。また、これと並行して機器筐体の小型化も進んでおり、限られた筐体内のスペースで発熱部から効果的に熱を逃がす伝熱機構の形成が必要となっている。電子機器の熱問題は、機器の高性能化、小型化とともに難しくなっており、さらに最近では、柔軟性を有するフレキシブルな電子機器も開発されている。

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熱輸送デバイスである。構造がシンプルな熱輸送デバイスであり、これまでに、様々な種類のヒートパイプが開発されている。ヒートパイプは、現在、電子機器の除熱促進をはじめ、熱輸送が求められる様々な機器に実用されているが、各種の熱問題を背景に、さらなる用途拡大が期待されている熱輸送デバイスである。なお、ヒートパイプは従来から、銅などの金属材料を用いて製作されている。

2. 研究の目的

本研究では、プラスチック材料を用い、曲げることができるヒートパイプを開発することを目的とする。ここでは、このヒートパイプをフレキシブル・ヒートパイプと名付け、従来の金属製ヒートパイプに対して、形状の自由度が高いヒートパイプを開発することを目指す。

3. 研究の方法

本研究では、はじめに、濡れ性の観点からプラスチック材料と作動液の選定を行うとともに、ヒートパイプの設計に関する基礎データを取得するため、プラスチック材料を用いて熱サイフォン式のヒートパイプを製作し、伝熱特性に関する基礎実験を行った。ここでは、図1に示したように、高速度ビデオカメラを用いて狭小な矩形流路内での作動液の流動現象、伝熱現象について検討するとともに、プラスチック材料の熱伝導率が一般的に低いことから、加熱部と冷却部を薄くすることにより、伝熱抵抗の低減についても検討を行った。その上で本研究では、グラフェンを混入させたプラスチック素材(グラフェン・フィラメント)を用い、3Dプリンターを使用して自励振動式ヒートパイプを製作することとし、作動液にはグラフェン・フィラメントとの濡れ性が良好なエタノールを使用した。なお、自励振動式ヒートパイプは、細い蛇行流路内に適量の作動液を封入したものであり、加熱・冷却を行うと流路内で蒸気プラグと液スラグが自励振動し、振動流によって加熱部から冷却部へと熱が輸送されるヒートパイプである。

ヒートパイプの内部構造を図2に示した。グラフェン・フィラメントと3Dプリンターで製作したものであり、厚さ2.5mmの平板

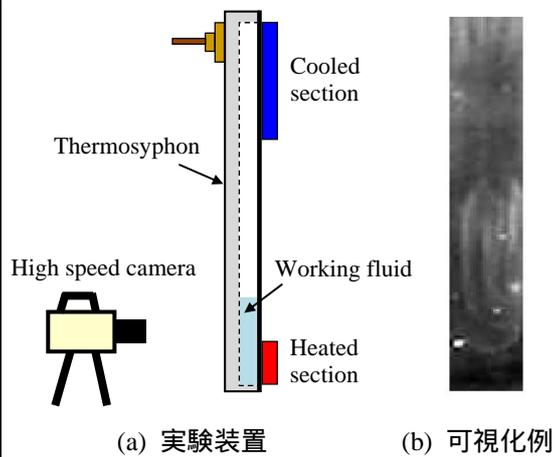


図1 可視化実験



図2 ヒートパイプ内の蛇行流路



図3 ヒートパイプの表面処理

上に10本の矩形溝(断面積:1.5mm×1.5mm,長さ:80mm)で蛇行流路を形成した。本研究では、この蛇行流路上に厚さ0.4mmの薄板を3Dプリンターで付加し、自励振動式ヒートパイプを形成した。さらに、ヒートパイプの製作後、十分な気密性を確保することを目的に表面処理を行い、図3に示したようにヒートパイプ表面を銅薄膜で被覆した。図3は、厚さ0.4mmの薄板側からヒートパイプを撮影したものであるが、以下では、この薄板側に加熱ヒーターと冷却ジャケットを取り付けて作動確認実験を行った。また、右端の円柱状の管はヒートパイプ内を減圧し、作動液を封入するためのものである。

伝熱評価実験の実験装置を図4に示した。ヒートパイプは鉛直方向に向けて設置し、下部に加熱ヒーター、上部に冷却ジャケットが取り付けられている。ヒートパイプの加熱部(蒸発部)と冷却部(凝縮部)の長さはいずれも20mm、その間の断熱部の長さは40mm

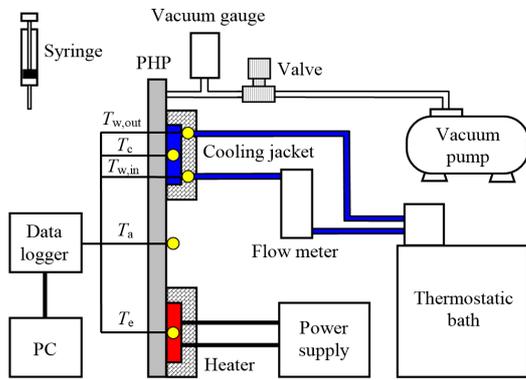


図4 伝熱評価実験装置

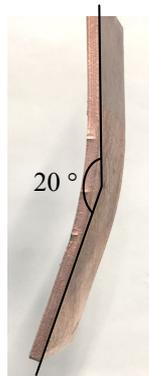


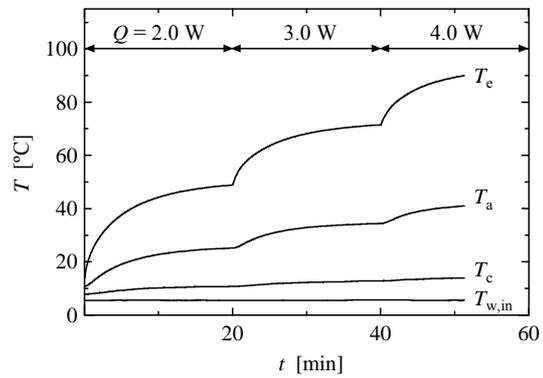
図5 曲がりをもつ熱パイプ

である。加熱ヒーターおよび冷却ジャケットと熱パイプとの接触熱抵抗を軽減するため、これらを接触させる際にサーマルグリースを使用した。また、熱損失を軽減するため、加熱部と冷却部を除く熱パイプ表面に断熱材を施した。

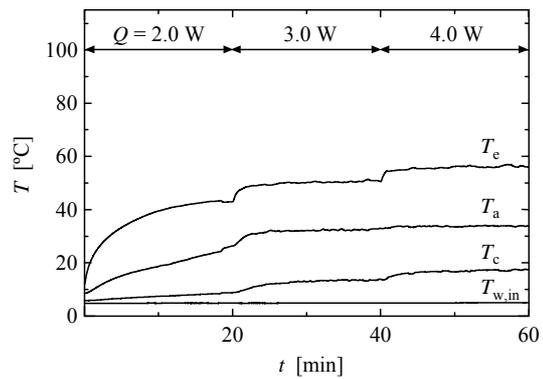
実験ではまず、恒温槽から冷却ジャケットに冷却水を流し、熱パイプがほぼ一様温度になった後、ヒーターによる加熱を開始して、熱パイプの蒸発部温度 T_e 、断熱部温度 T_a 、凝縮部温度 T_c 、ならびに、冷却ジャケット入口・出口温度 $T_{w,in}$ 、 $T_{w,out}$ の経時変化を測定した。実験条件として、作動液の熱パイプ内への封入率を 50%、恒温槽内の冷却水の温度を 2.5 °C、流量を 0.25 L/min とし、ヒーターによる加熱量 Q を 2.0 W から 20 分おきに 1.0 W ずつ増加させ、蒸発部温度 T_e が 90 °C となるまで実験を続けた。熱パイプを曲げない場合 (Case 1) と図 5 のように曲げた場合 (Case 2) について実験を行い、さらに比較検討のため、熱パイプ内に作動液を封入しない場合についても同様に実験を行った。なお Case 2 は、図 5 に示したように断熱部を 20° 曲げている。

4. 研究成果

Case 1 の曲がりがない熱パイプについて、作動液を封入しない場合と封入した場合の熱パイプ各位置の温度の経時変化を図 6 に示した。横軸 t は加熱開始からの時間



(a) 作動液を封入しない場合

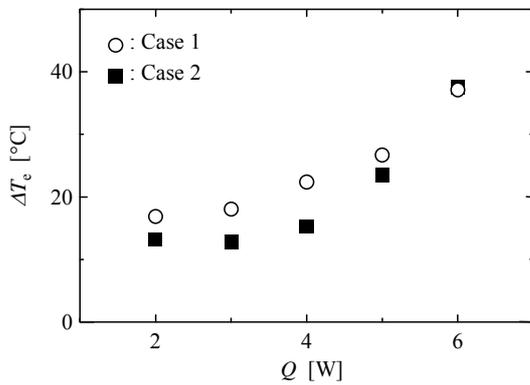


(b) 作動液を封入した場合

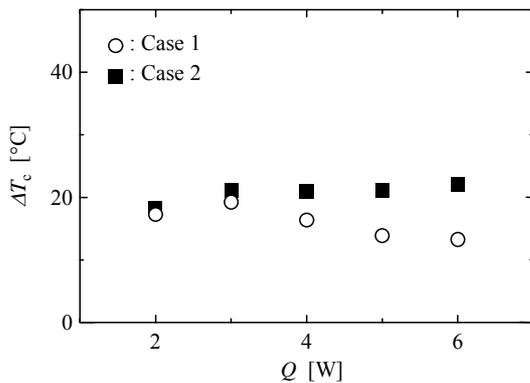
図6 熱パイプの温度変化 (Case 1)

であり、ここでは、図中に併記したように、加熱量 Q を 2.0 W、3.0 W、4.0 W と段階的に増加させたときの蒸発部温度 T_e 、断熱部温度 T_a 、凝縮部温度 T_c 、冷却ジャケット入口温度 $T_{w,in}$ の経時変化を示した。なお、冷却ジャケットに関しては、入口温度と出口温度の差が 1.0 °C 以下であったため、前者のみを示した。作動液を封入しない場合、熱パイプの壁内を熱伝導によってのみ熱が伝わるため、 Q の増加量に比例して T_e と T_c の温度差も大きくなり、 $Q=4.0$ W のときに $T_e=90$ °C に達する。一方、作動液を封入した場合、作動液を封入しない場合と比較して、 $Q=2.0$ W では大きな差がみられないものの、 $Q=3.0$ W および $Q=4.0$ W では Q の増加に対する T_e の変化量が小さくなり、 T_e と T_c の温度差が大幅に小さくなっていることがわかる。 $Q \geq 3.0$ W の範囲では、作動液の流動による熱輸送の効果があらわれていると判断でき、さらに、定常的な温度分布も得られていることから、熱パイプが安定的に作動していることがわかる。なお、Case 2 の熱パイプについても同様に、作動液の流動による熱輸送の効果を確認した。また、Case 1 と Case 2 のいずれの熱パイプについても、 $Q=7.0$ W のときに $T_e=90$ °C に達した。

熱パイプの蒸発部の温度差 ΔT_e 、凝縮部の温度差 ΔT_c 、ならびに、熱パイプの熱抵抗 R をそれぞれ次式で定義した。



(a) 蒸発部の温度差



(b) 凝縮部の温度差

図7 ヒートパイプ内の温度差

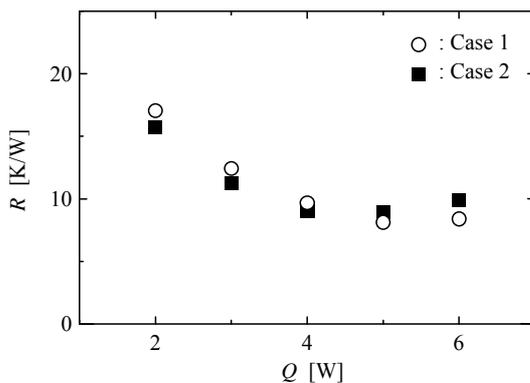


図8 ヒートパイプの熱抵抗

$$\Delta T_e = T_c - T_a \quad (1)$$

$$\Delta T_c = T_a - T_c \quad (2)$$

$$R = (T_c - T_e) / Q \quad (3)$$

作動液を封入した場合の Case 1 と Case 2 のヒートパイプについて、加熱量 Q を変化させて 20 分経過した後の ΔT_e 、 ΔT_c 、 R を求め、 ΔT_e および ΔT_c と Q の関係を図 7 に、 R と Q の関係を図 8 に示した。Case 1 と Case 2 のいずれのヒートパイプについても、 ΔT_e と ΔT_c を比較すると、 ΔT_e の方が Q の影響を受けていることがわかる。また、Case 1 と Case 2 の

R を比較すると、 $Q = 5.0 \text{ W}$ と $Q = 6.0 \text{ W}$ で Case 2 の R が Case 1 の R よりも大きくなっており、熱輸送性能が少し低下していることがわかる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

Yasushi Koito, Masamichi Sato, Soichiro Kubo, Toshio Tomimura, Fabrication of a Two-turn Closed Loop and Fundamental Experiments on Pulsating Heat Transfer in a Vertical Mode, International Journal of Industrial and Mechanical Engineering Sciences, Vol. 2, No. 3, pp. 83-86, 2016, 査読有.

〔学会発表〕(計 18 件)

Yasushi Koito, Performance of a Pulsating Heat Pipe Fabricated with a 3-D Printer, ASME 2017 Summer Heat Transfer Conference, 2017 年 7 月 12 日, ベルビュー (アメリカ合衆国)

Yasushi Koito, Heat Transfer and Two-Phase Flow in a Pulsating Heat Pipe Fabricated Using a 3-D Printer, 2017 Japan-U.S. Seminar on Two-Phase Flow Dynamics, 2017 年 6 月 24 日, 北海道大学 (北海道・札幌市)

小糸康志, 3D プリンターによる自励振動式ヒートパイプの製作と作動確認実験, 第 54 回日本伝熱シンポジウム, 2017 年 5 月 24 日, 大宮ソニックシティ (埼玉県・さいたま市)

Yasushi Koito, Operational Characteristics and Thermal Performance of a Rectangular Heat Pipe Fabricated on a Plastic Board, Joint 18th International Heat Pipe Conference and 12th International Heat Pipe Symposium, 2016 年 6 月 13 日, チェジュ島 (韓国)

Yasushi Koito, Fabrication and Test of a Thermosyphon on a Surface of a Plastic Board, Japan-the Netherlands Symposium on Soft-Tribology, 2015 年 9 月 11 日, 熊本大学 (熊本県・熊本市)

Yasushi Koito, A Capillary-wick Heat Pipe Fabricated on a Plastic Board (Fundamental Experiments on Heat Transport Characteristics), ASME 2015 International Technical Conference and Exhibition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Microsystems and ASME 2015 13th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels, 2015 年 7 月 8 日, サンフランシスコ (アメリカ合衆国)

6. 研究組織

(1) 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・准教授
研究者番号: 70347003

(2) 研究協力者

川路 正裕 (KAWAJI, Masahiro)

秀山 文彦 (HIDEYAMA, Fumihiko)