

宇宙地球フロンティア実地研修 報告書

Report for Onsite Training in Earth-Space Frontier Science

氏名/Name	平田 大 Hirata Masaru		
所属部局/Affiliation	工学系研究科 航空宇宙工学専攻 Department of Aeronautics and Astronautics, Graduate School of Engineering		
研究機関・企業名 /Hosting Institution	三菱電機株式会社 (先端技術総合研究所) Mitsubishi Electric Corporation (Advanced Technology R&D Center)		
期間/Period	2023 年 01 月 16 日 01/16/2023	~	2023 年 01 月 27 日 01/27/2023 * 西暦で記入 mm/dd/yyyy

2023 年 1 月に企業インターンシップとして三菱電機株式会社先端技術総合研究所で実習を行ったので、その報告を行う。なお本報告書の内容は第 60 回日本伝熱シンポジウムで発表済である。

1. 緒言

ヒートパイプは密閉容器内の流体の相変化による潜熱を利用した熱輸送機器であり、高い熱輸送性能を持つため電子機器の冷却から人工衛星への搭載まで幅広く利用されている。ヒートパイプは内部流体の沸騰が起こる高温の蒸発部、凝縮の起こる低温の凝縮部からなり、凝縮した液体を蒸発部へ還流する駆動力が必要となる。金網や焼結体のウィックを用いた毛細管力により液体還流を行うヒートパイプが広く用いられているが、本研究で扱うヒートパイプはサーモサイフォンと呼ばれ、重力を液体還流の駆動力としている。サーモサイフォンの冷媒挙動を可視化し、動作特性に与える影響を調査した研究は円管では行われているが、扁平管などの特殊形状については行われていない⁽¹⁾。本研究では、円管と扁平管形状の管材に石英ガラス、作動流体に純水を使用したサーモサイフォン式ヒートパイプの内部流動現象の可視化実験を行った。蒸発部での間欠的な沸騰および液の凝縮部への吹き上げ、凝縮部から蒸発部への液膜流下などを観察し、サーモサイフォンの動作へ与える影響を考察したので、その結果について報告する。

2. 実験装置

2.1 実験系の全体構成

実験系の全体構成写真を Fig.1 に示す。左側に実験装置があり、ヒートパイプ全体が撮影できるように約 1 m 離れた場所にハイスピードカメラ (ナック, GX-8) を設置した。実験装置の写真を Fig.2 に示す。上部に冷水槽、下部に温水槽が配置されており、この 2 つの水槽を貫通するようにヒートパイプを設置した。ヒートパイプ上部には圧力計 (長野計器, GC31) が接続されており、ヒートパイプ内部の圧力測定が可能である。冷水槽は幅 150 mm × 高さ 190 mm × 奥行 150 mm のアクリル製水槽であり、チラーから冷却水を循環させることで冷水槽内温度を一定にし、ヒートパイプを冷却している。温水槽は幅 220 mm × 高さ 140 mm × 奥行 220 mm のクリスタルパイレックスガラス製水槽であり、温度調整機能付きのヒータによって水槽内液体を加熱することで温水槽内温度を一定にし、ヒートパイプを加熱している。また温水槽下部には攪拌器パワースターラー (アサヒ理化製作所, AMG-S) が設置され温水槽内を攪拌している。K 型熱電対を使用したヒートパイプと冷水槽、温水槽の温度測定も併せて実施した。冷水槽・温水槽は熱電対を一点ずつ水中に沈めて温度測定を行った。ヒートパイプの温度測定点に関しては次節で述べる。温度データの収集には、データロガー (Graphtec, GL240) を使用した。

2.2 可視化サーモサイフォン式ヒートパイプ

実験で使用したヒートパイプの写真と各管の緒元をそれぞれ Fig.3 に示す。今回の実験では、ヒートパイプ形状として円管と扁平管を用いた。いずれの管でも、材質には石英ガラスを使用し全長は 280 mm とした (継手部分を含まない)。円管においては全長に渡って断面形状が内径 14 mm、外形 18 mm の円形である。一方扁平管は、蒸発部断面形状は円形 (内径 14 mm、

外形 18 mm) であり、凝縮部のみ扁平形となっている。扁平部アスペクト比は 1:3 であり、円形部と周長が一致するように設計されている。そのため円形部と扁平部では断面積が異なり、円管の内容積は 45.5 cc、扁平管の内容積は 31.4 cc となっている。温度測定点は、蒸発部・凝縮部共に 3 点ずつで、各部 40 mm 間隔で熱電対が接地されている。

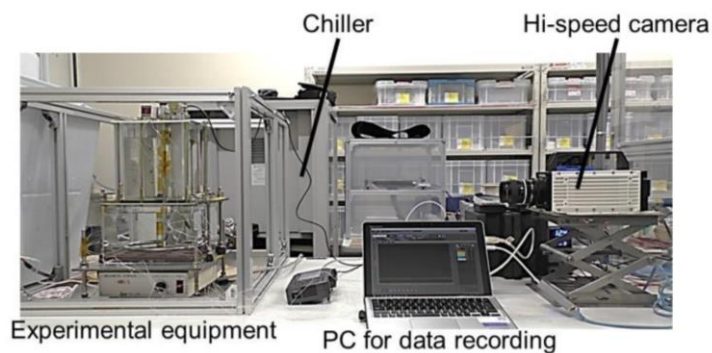


Fig.1 Picture of experimental setup.

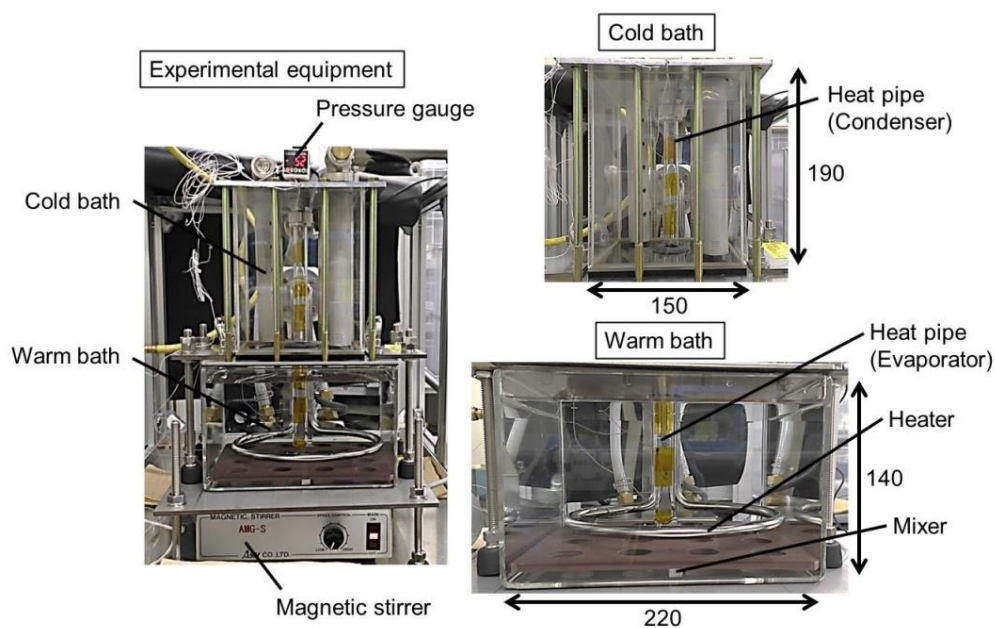


Fig.2 Warm bath and cold bath around the glass heat pipe.

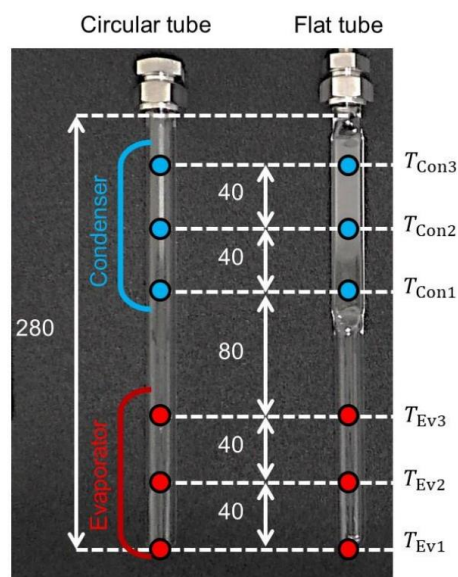


Fig.3 Picture of the glass heat pipe with thermocouple locations.

3. 実験条件

3.1 共通条件

温水槽と冷水槽の内部液体には水道水を使用し、温水槽温度は 80 °C、チラー温度は 10 °C で温度調節を行った。ヒートパイプ内の作動流体には純水を使用した。可視化実験における映像撮影にはハイスピードカメラを使用した。

3.2 実験別条件

今回は、ヒートパイプ形状と作動流体封入率をそれぞれ変化させ、全 3 条件で実験を行った。実験 I では、ヒートパイプは円管形状で、作動流体封入率は内容積の 20% (封入量にして 9.1 cc) とした。実験 II では、ヒートパイプに扁平管を用い作動流体封入率は内容積の 20 % (封入量にして 6.3 cc) とした。実験 III のヒートパイプ形状は扁平管であり、作動流体は実験 I と同様 9.1 cc 封入し封入率は結果的に全容積の 29 % となった。ハイスピードカメラのフレームレートは実験 I で 500 fps, 実験 II で 50 fps, 実験 III で 500fps とした。

3.3 実験手順

実験手順を下記に示す。

- ① 作動流体を封入したヒートパイプの蒸発部が温水槽内、凝縮部が冷水槽内に収まるように設置する。
- ② チラーを作動し冷却水をチラー-冷水槽間で循環させ、冷水槽温度を一定にする。
- ③ ロガーを使用し、各部温度履歴の取得を開始する。
- ④ 温水槽ヒータを作動させ、温水槽内の水を加熱する。
- ⑤ ヒートパイプの動作が確認されたら、ハイスピードカメラでヒートパイプ内作動流体の流動を撮影する。

4. 結果と考察

4.1 実験 I

実験 I で取得した各部温度履歴を Fig.4 に示す。時刻 1700 s 付近までは温水槽温度の上昇に従ってヒートパイプ蒸発部温度も上昇するが、時刻 1750 s 付近で蒸発部温度の急激な降下を確認された。この時、ヒートパイプ内部では最初の沸騰が起こったと考えられ、実際に目視で内部流体が上方へ打ち上っている様子が確認できた。その後、時刻 1750 s から 1950 s にかけて蒸発部温度が温水槽温度と比較して約 15 °C から 20 °C 低く、凝縮部温度が冷水槽温度と比較して約 6 °C 程度高くなっていった。この時、ヒートパイプは定常動作していると考えられ、目視で内部流体が連続的に上方へ打ち上っている様子が確認された。時刻 1950 s 付近では突如蒸発部温度の上昇と凝縮部温度の下降が見られ、それぞれ温水槽温度と冷水槽温度に追従するように温度変化した。これはヒートパイプの定常動作が停止したためであると考えられ、目視では内部流体の打上現象が確認されなくなった。時刻 1750 s 以降はこのようなヒートパイプの定常動作と動作停止を周期的に繰り返す様子が確認された。これは沸騰が間欠的に生じる不安定流動であるガイゼリング現象²⁾が起こっていると考えられる。ガイゼリング現象が起こった理由として、管材ガラスの熱伝導率が低くヒートパイプ内に流入する熱が低熱流束となっているためであると考えられる。今回の実験の装置構成では、ヒータが温水槽内の水を加熱して昇温しているが、可視化のためにヒートパイプや温水槽まわりを断熱処理していない。その結果、ヒータからの熱負荷は全てヒートパイプへ流入するわけではなく、温水槽内の水の蒸発や大気への熱流出によって熱収支が保たれる。ヒートパイプ材質の熱伝導率が低い場合、ヒートパイプ内部へ入熱する熱量がその他の熱リークと比較して相対的に小さくなる。よって今回のような低熱伝導率を有するガラスを管材として使用した場合には、ヒートパイプ内に流入する熱が低熱流束となっていると考えられる。動作開始時のヒートパイプ内作動流体の流動の様子を Fig.5 に示す。(1)では、沸騰が起こる直前で作動流体の液はほとんどが蒸発器下部に溜まっており、液面高さは最大である。(2)では、液内部から気泡が発生し沸騰が起こっている様子が確認できる。(3)では発生した気泡が成長し気泡上部にある液を押し上げながら上昇するため、液がヒートパイプ上部に打上げられる様子が確認できる。(1)から(3)の現象は温度履歴の時刻 3845 s で約 0.1 秒の間で起こっている。このことから、ヒートパイプ動作の様子(沸騰・液の打上・液の還流)がよく観察できたといえる。

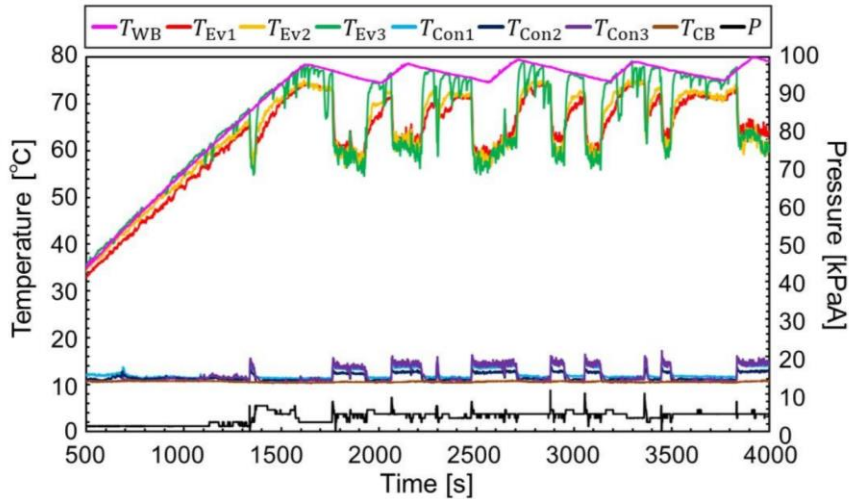


Fig.4 Temperature history at experiment I.

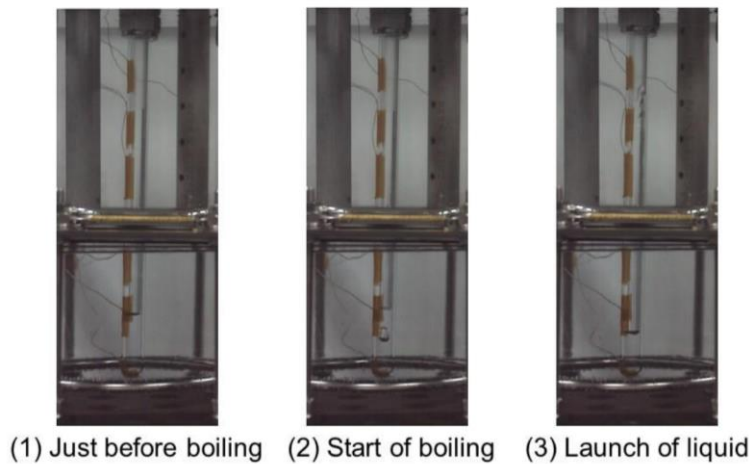


Fig.5 Flow behavior at experiment I.

4.2 実験 II

実験 II で取得した温度履歴を Fig.6 に示す. 蒸発部温度が約 75 °C に到達すると, 1~2 回の沸騰が確認できるもののその動作は継続しなかった. この原因を探るため, 実験 I と実験 II のハイスピードカメラ映像を比較した. 実験 I の方がヒートパイプ上部から下部へ還流する液 (還流液) の勢いがあり, 還流液による蒸発部下部に溜まっている液面への刺激が顕著であることが確認できた. 実験 I と比較して扁平管において還流液の勢いが小さいのは, 扁平部の断面積変化により液の流動抵抗が大きくなり還流液の下降速度が低下するため, もしくは絶対的作動流体封入量が少なく沸騰時に打上げられる液量が減少するため等の理由が考えられる. 動作開始時のヒートパイプ内作動流体の流動の様子を Fig.7 に示す. (1)では, 凝縮部で滴状凝縮が起こっている様子が確認できる. (2)では, 液滴の合体と液滴の下降が確認できる. (3)では下降し液面に到達した液滴が液面を刺激している. (4)では, 下降し液面に到達した液滴によって液面の刺激様子が確認できる. (1)から(4)の現象は温度履歴の時刻 3845 s で約 0.1 秒の間で起こっている.

4.3 実験 III

実験 III で取得した温度履歴を Fig.8 に示す. 実験 I と同様にヒートパイプの定常動作と動作停止を周期的に繰り返す様子が確認され, ガイゼリング現象が起こっていると考えられる. 動作開始時のヒートパイプ内作動流体の流動の様子を Fig.9 に示す. (1)は, 沸騰が起こる直前である. (2)は, 液内部から気泡が発生した様子が確認できる. (3)では発生した気泡が成長し気泡上部にある液を押し上げながら上昇するため, 液がヒートパイプ上部に打上げられる様子が確認できる. (1)から(3)の現象は温度履歴の時刻 4910 s で約 0.1 秒の間で起こっている. 実験 III では実験 II と比較して冷媒封入量が多いため, 沸騰により凝縮部に打ち上げられた液体が

重力によって蒸発部に還流し、激しく液面を刺激することで次なる沸騰が誘発されている様子が確認された。扁平管において定常動作に際して作動流体封入量の影響は非常に大きいことが示された。

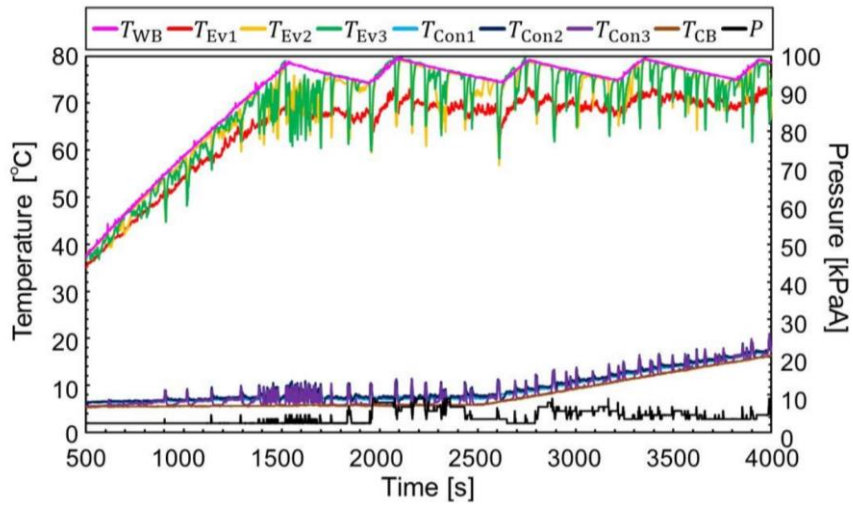


Fig.6 Temperature history at experiment II.



(1) Droplet condensation (2) Liquid descending (3) Liquid surface impulse (4) Launch of liquid

Fig.7 Flow behavior at experiment II.

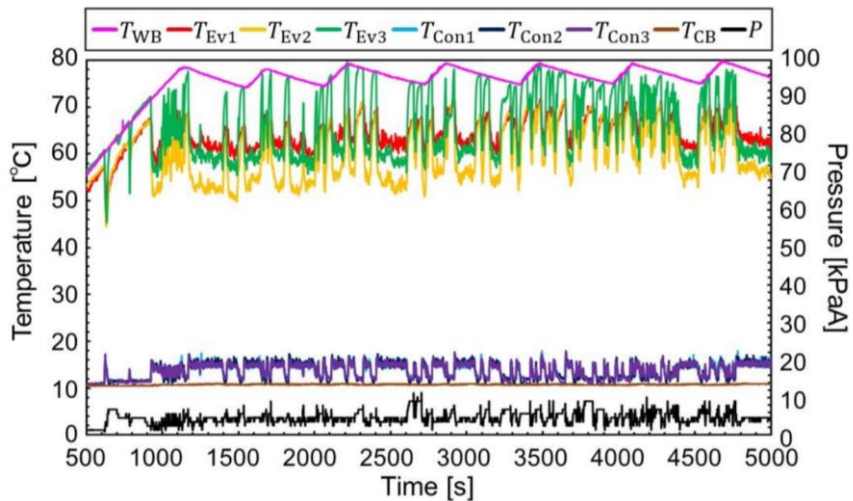
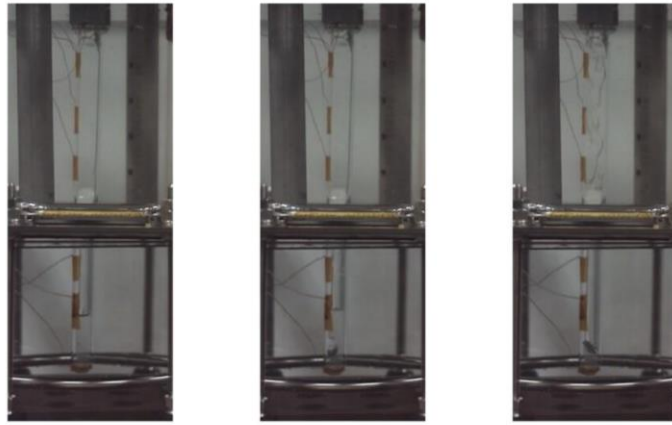


Fig.8 Temperature history at experiment III.



(1) Just before boiling (2) Start of boiling (3) Launch of liquid

Fig.9 Flow behavior at experiment III.

5. まとめ

本研究では管材に石英ガラス，作動流体に純水を使用した円管と扁平管形状のサーモサイフォン式ヒートパイプの内部流体可視化実験を行い以下の結論を得た。

(1) 円管を使用した実験で過熱状態と定常動作を間欠的に繰り返すガイゼリング現象が確認された。これは管材に低熱伝導率材料である石英ガラスを使用しており，蒸発部に印加される熱負荷が低熱流束となっていたためであると考えられる。

(2) 扁平管を使用した作動流体封入量 6.3 cc の実験では，凝縮部での滴状凝縮→液滴の合体→液滴の下降→液面 の刺激→沸騰という沸騰に至るプロセスが観察された。これにより，凝縮部より下降する液滴が定常動作開始の引き金となっていることが示唆された。

(3) 扁平管を使用した作動流体封入量 9.1 cc の実験では，沸騰により凝縮部に打ち上げられた液体が重力によって蒸発部に還流し，激しく液面を刺激することで次なる沸騰が誘発されている様子が確認された。液の還流は作動流体量が多いほど激しく，扁平管において定常動作に際して作動流体封入量の影響は非常に大きいことが示された。

参考文献

- (1) 山崎・相場，秋田工業高等専門学校研究紀要，21(1986)，17-20.
- (2) クンチョロ・他 3名，九州大学大学院総合理工学報告，16-4(1995)，415-419.

Overview of Onsite training

Thermosiphon is widely used for cooling electric devices. However, its operation characteristics have not been completely understood. In this study, visualization of flow behavior in circle and flat thermosiphons using glass as the pipe material and pure water as the working fluid is conducted. In the experiment using flat thermosiphon, the process leading to boiling was observed: drop condensation in the condensation section, coalescence of droplets, droplet descent, liquid surface stimulation, and boiling. This suggested that the droplets descending from the condensation section triggered the start of steady-state operation. It was confirmed that the liquid launched at the top of the tube by boiling returned and stimulated the liquid surface, triggering the next boiling. This suggested that the influence of the amount of working fluid is significant in the steady-state operation of the flat thermosiphon.