

自励振動型ヒートパイプの動作特性

日大生産工 (院) ○田中 高博
日大生産工 野村 浩司
日大生産工 氏家 康成

1. 緒 言

現在，電子機器や融雪機器などにおいて，小さい温度差で大量の熱を運ぶヒートパイプは，熱制御あるいは省エネルギーシステムとして重要な役割を果たしている。

ヒートパイプは，作動流体が加熱部で蒸発し，冷却部で凝縮することにより，熱を潜熱として加熱部から冷却部へ運んでいる。ヒートパイプの種類は，作動流体の還流方式によって，重力式・毛細管力式・自励振動式の3種類に大別される。実用化されているものでは，重力を利用したサーモサイフォンや毛細管力を利用したウイック式がある。前者は使用姿勢に限定があること，後者では，管内壁に特殊構造が必要で細径化に限界があることが，問題になっている。また共通して，還流限界などに基づく熱輸送限界の発生による性能の低下も問題になっている。

そのため，熱輸送特性の簡単な制御や，低コスト化を目指した単純構造化が求められている。そこで，これらに対処する新しいヒートパイプとして，自励振動を利用した自励振動型ヒートパイプが注目されている。

2. 作動 原理

作動原理のイメージ図を Fig. 1 に示す。一端を加熱すると作動流体が蒸発するので気泡が膨張し，他方を冷却すると気泡が凝縮する

ので，管内に圧力差が生じ，振動流が発生して駆動すると考えられている。(1)

自励振動型ヒートパイプは，試行錯誤の中から発見されたもので，現在，多くの研究がなされている。液体封入率，作動温度差が熱輸送特性に与える影響は完全に解明されたとは言えず，まだまだ装置の改良の指針となるべきものはわかっていない。そこで本研究では，可視化によって作動流体の確認を行うとともに，熱輸送特性との関係を解明する。

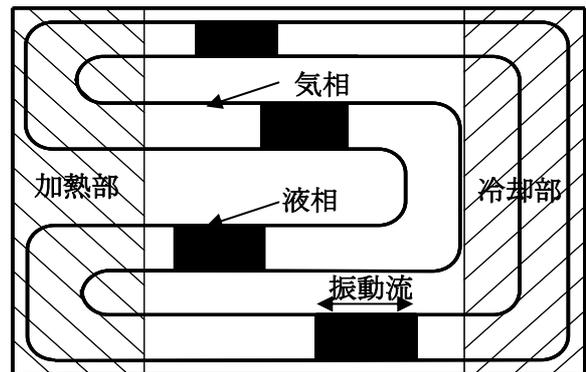


Fig. 1 Image figure of an operation principle

3. 実験装置

3.1 動作実験

実験装置の概略図を Fig. 2 に示す。

ヒートパイプが自励振動で実際に稼動するか確認するため，ガラス管を用いて管の中の様子を確認できるようにして，実験を行った。ガラス管は2ターンの閉ループとし，管内径は $D=2\text{mm}$ (外形 3mm) とした。頂点間距離は 350mm ，管の全長は 1450mm である。管

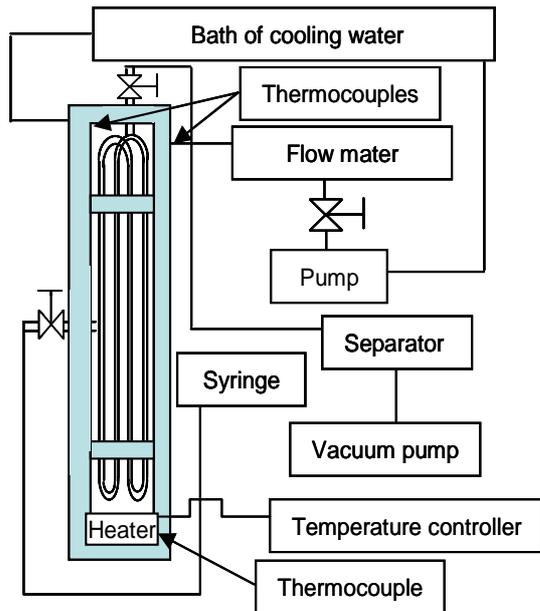


Fig.2 Schematic of experimental apparatus

内は真空ポンプで減圧し、注射器で作動流体を注入する。作動流体には水に着色したものをを用いた。封入率は、もっとも高い能力が得られると考えられている50%とした。筐体は鉛直に立てて使用し、下部はヒーターで水を加熱、上部は水を流して冷却した。中央部は真空断熱をして、途中の放熱を低減した。加熱部、冷却部にはそれぞれ熱電対をつけて温度を計測した。

3.2 実験結果及び考察

実際の動作状況を Fig.3 に示す。実験条件は加熱部温度 90℃、冷却部温度 20℃である。液相と蒸気相が交互に存在し、時間を追うごとに、蒸気相が膨張し液相が収縮している様子が観察された。このとき、真空度が不十分であると、温度を上げてまったく自励振動することは無かった。加熱部の温度を上昇させることで、動きはより活発になっていくことがわかった。以上のことからこの装置では、条件がととのえば自励振動していることが確認された。この装置での結果をもとに計測用のヒートパイプを製作した。

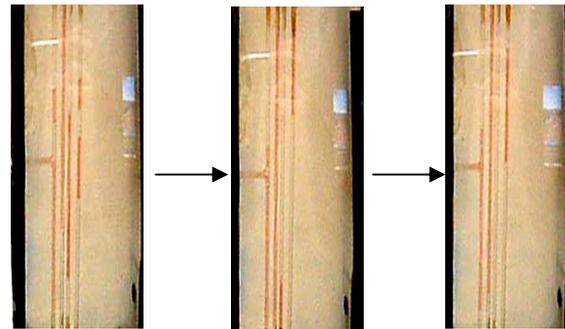


Fig.3 Situation of self-exciting-mode

4.計測実験

4.1 実験装置

実験装置を Fig.4 に示す。ヒートパイプ本体は、縦 496 mm 横 156 mm、厚さ 15 mm のアルミ板に幅、深さ各 2 mm の矩形断面の溝を彫り、その溝を内部流動の観察のためにポリカーボネイト板で密閉した。溝は 12 ターンの閉ループとし、上端から下端までの頂点間距離は 426 mm、総延長は 10249 mm とした。アルミ板の両端にはそれぞれ縦 130 mm、横 100 mm の冷却部と加熱部を設けた。冷却部は、取り付けした冷却ジャケットに水を流すことで冷却するようにした。

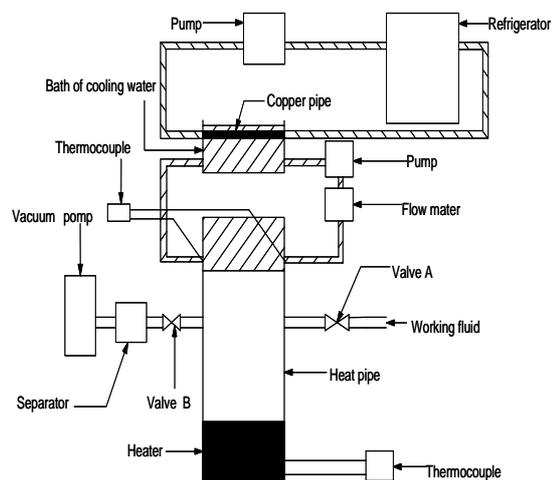


Fig.4 Experimental apparatus

冷却システムは当初、ペルチェ素子を使用していたが、冷却不足のため蛇管式冷却器を使用することにした。システムの構成は、冷却水槽、循環ポンプ、流量計、流量調節弁である。冷凍機で冷やした冷却水を一次冷却

水，ヒートパイプを冷やす冷却水を二次冷却水とし，二次側入口を一定温度に制御することにした．このとき冷却部の熱損失を低減するために，二次冷却水が冷却ジャケットに入る温度は周囲との温度差が小さくなるように，20℃に設定した．加熱部は，シリコンラバーヒーターを管体に直接取り付け加熱する．

温度計測には素線径 0.1 mm の K 種熱電対を用いて冷却部の入口・出口温度と加熱部温度を計測する．ヒートパイプ本体を Fig.5 に示す．

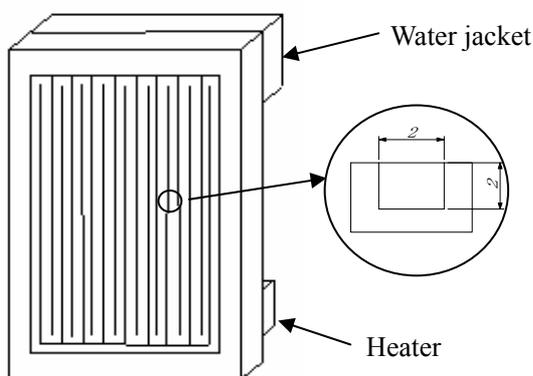


Fig.5 Heat pipe

ヒートパイプ内径は次式から算出した。(2)

$$D_{\max} = 1.84 \sqrt{\sigma/g(\rho_L - \rho_V)} \quad (1)$$

ここで， σ は表面張力， g は重力加速度， ρ は密度，添字 L，V はそれぞれ液相，蒸気相を意味する．

4.2 実験方法

作動流体は，水を用いることにした．封入方法は，以下の手順で行う．

一端のバルブを開き，他端のバルブは閉じて真空ポンプで流路管内部を真空にする．次に少量水を注入するバルブを開き，もう一度管内を真空にする．その後，作動流体を所定の封入率になるまで注入する．このときの真空圧力は，ゲージ圧 - 600 mm Hg 以下の初期

真空であれば，熱輸送特性に影響がないと報告されている。(3)

熱輸送特性の評価には以下の式を用いる．

$$Q = \dot{V} \cdot \rho \cdot c \cdot \Delta t \quad (2)$$

このとき， Q は熱輸送量， \dot{V} は体積流量， ρ は密度， Δt は冷却ジャケットでの冷却水の出入口温度差を示す．

4.3 実験結果及び考察

Fig.6 に加熱部と冷却部の各温度差における熱輸送量と温度差の関係を示す．

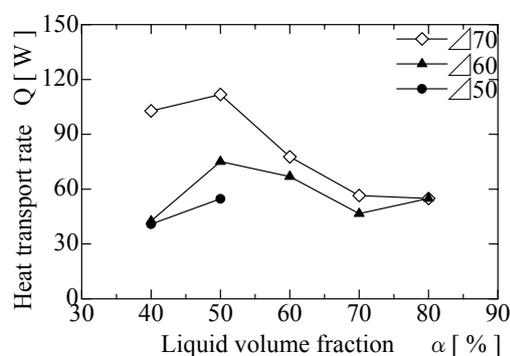


Fig.6 Relation between liquid volume fraction and heat transport rate

Fig.6 より，全体の傾向として液体封入率 50% のときに熱輸送量がピークに達し，その後は減少する傾向にある．また，液体封入率の増加に伴う熱輸送量の値は温度差が大きくなるほど増加する傾向にある．

内部流動の観察結果からも液体封入率が 50% に達するまでは，振動流が活発に動くことが観察された．反対に 50% を過ぎると，温度差を上昇させても，徐々に振動流は速度を減少させていく．本実験装置においては 70% をすぎたあたりからほとんど動かなくなり，熱輸送量も変わらない．これは，このヒートパイプが熱輸送限界に達したためだと考えられる．以上のことから，熱輸送量を増大させるには，作動流体（本実験では水）を適正な封入率で動作せると共に，振動流の速度を上昇させることも必要なのではないかと考えられる．

また本実験装置では、液体封入率 40%以下の状態では安定的に動作しなかった。これは、内部流動の観察結果から、液体の量が少ないため、加熱部で蒸発した作動流体を冷却することが間に合わず、加熱部に作動流体が存在しない状態であるドライアウト現象に至ったためだと考えられる。

このときには、前兆として水撃音が頻繁に聴取された。この現象はどの封入率でも確認された。水撃音が発生する代表的な例として、実験条件が液体封入率 50%、加熱部温度 90℃における写真を Fig.7 に示す。小さい気泡が散在しているが、ここが気液界面である。水撃音が発生するときは、この気泡が急激に上昇し同時に液相も押し上げる。この水撃音は液体封入率 10% のとき最も聴取され、30% までは減少し、40% で再び多くなり 50%以降は減少する傾向にある。ドライアウト時に最も活発になっていることから、この水撃音の発生機構および条件を解明することは、ヒートパイプを安定的に動作させる範囲を広げると考えられる。ヒートパイプが安定的に動作しているときにも、この音が間歇的に発生することから、安定時にも局所的にドライアウトが起きているのではないかと、考えられる。局所的ドライアウトは性能の劣化を招くので、その機構解明は、熱輸送量を増大する面からも大きな課題のひとつとなる。

また、動作確認用のヒートパイプと計測用ヒートパイプでの内部流動を比較すると気液の分布に大きな違いが見られた。動作確認用ではまばらに分布しているが、計測用は完全に液相と気相が分割して存在している。動作状況も、動作確認用ヒートパイプでは常にターン間を往復しているのに対し、計測用ヒートパイプは上昇も下降もしない気液相が存在していた。なお本実験装置のヒートパイプは、流路総断面積 96mm^2 、長さ 426mm のアルミ材と比較すると、約 30 倍の熱輸送量があり、

有用であることが認められた。



Fig.7 Collision of water

5. 結言

動作実験用ヒートパイプを用いた動作確認実験より以下のことが確認できた。

- 動作実験用ヒートパイプの自励振動を確認することができた。
- 真空度が不足しているときは、自励振動することを確認できなかった。

計測用ヒートパイプを用いた動作特性について以下のことが確認できた。

- 封入率 50%において熱輸送量のピークを確認できた。
- 不安定状態では水撃音が連続的に発生し、ドライアウト現象が起こっていた。
- 封入率 70% 以降は熱輸送量がほぼ一定になった。

参考文献

- (1) 宮崎芳郎, 日本機械学会誌, Vol. 106 , (2003) , 35 - 38
- (2) 西尾茂文・永田真一・沼田祥平・白樫了, 機論, 65 - 640, B (1999) , 4077 - 4083
- (3) 永田真一・西尾茂文・白樫了・馬場史朗, 日本伝熱シンポジウム講演論文集, 38 th , (2001) , 731 - 732