

上部が加熱された垂直管内の水・蒸気柱の熱的自励振動現象の可視化と圧力変動の測定

Flow Visualization and Measurement of Pressure Change of Heat-Driven Oscillations in Liquid-Vapor Column in a Vertical Tube Heated Upper Part

高島武雄, 荒井義樹*1, 小林健敏*1

Takeo TAKASHIMA, Yoshinori ARAI and Taketoshi KOBAYASHI

Key Words : Phase change, Visualization, Heat-driven, Heat engine, Oscillation, Heat transfer

1. はじめに

外部から振動を与えた流体を用いる熱機器には、ヒートパイプや熱音響冷凍機などがある。前者は、流体を振動させることで、振動がない場合に比べて伝熱量を飛躍的に増大させることができることから「ドリムパイプ」と呼ばれている(1)。

さらに、加熱部と冷却部を往復する金属細管に封入された作動流体の蒸発と凝縮の相変化を利用した自励振動型 ヒートパイプは、構造が簡単で高い熱輸送特性を示すことから、電子機器などの冷却装置としての使用がはかられている。

一方、熱的自励振動現象の身近な例ではおもちゃの「ポンポン船」があげられる。流体に熱を与えて相変化を伴う熱的自励振動を生じさせることで、動力を取り出すことができることがわかる。

この現象を、機械的駆動部のない液体輸送装置として応用する研究(2)~(5)も行われている。この現象を利用したポンプは、複雑な機械部分が必要なくなるほか、騒音の発生もない利点があると考えられる。この場合、パイプ内では、蒸発や凝縮など相変化を伴う現象が起こっているが、現象の様相など基本的なことが明らかにされていない。

閉ループの振動型ヒートパイプ(Pulsating heat pipe:PHP)内の流体の流れの可視化の研究はいくつか報告がある。Tongら(6)は、作動流体としてメタノールを用い、内径1.8mmのガラス管で作成したPHPの底部を50Wで加熱したときの流れの観察を行い、加熱開始時には液プラグの振動が起こり、定常運転時には流体の循環がおこることなどを明らかにした。可視化は閉ループ型ということもあり、熱移動を促進する循環流に焦点を当てており、局

所的な振動の詳細については報告されていない。

一方、一端開放の振動型ヒートパイプ(Open oscillatory heat pipe;OOHP)内の流れの可視化に関しては、最も単純な体型である垂直管(I字型)の振動現象に関する報告は、高島・荒井(11)の他はみあたらない。

そこで本研究では、水を作動流体にして、内部の様相が観察できるガラス管を用いた垂直なOOHP内の流れの可視化を行い、相変化を伴う熱的自励振動現象の観察と解明を試みる。

さらに、系に加えられた熱の一部が熱的自励振動現象によって仕事に変換されると考え、この現象が熱機関のサイクルとなることを定量的に明らかにすることも試みる。具体的には、ガラス管内の液体に熱を加えて熱的自励振動現象を生じさせ、発生した蒸気スラグの圧力変動と、液面変動の測定を同時に行いP-V線図を画き、サイクルが右回りとなることを示して、本現象が熱機関であることを明らかにする。

おもな記号

h : 長さ (m)
 h_{fg} : 蒸発潜熱 (J/kg)
 P : 圧力 (Pa)
 Q : 熱量 (J)
 t : 時間 (s)
 T : 温度 (°C)
 V : 体積 (m³)
 W : 仕事 (J)
 x : 変位 (m)
 α : ボイド率 (-)
 η : 熱効率 (-)
 ρ : 密度 (kg/m³)

*1 小山工業高等専門学校機械工学科卒業生

添字

- a: 大気
- l: 水
- v: 蒸気

2. 実験装置および実験方法

2.1 振動の様相の観察用実験装置 Fig.1に実験装置の概略を示す。内径5.5mm、外径7.0mm、長さ520mmの透明石英ガラス管（以下、ガラス管または管）の一端を熔融密閉する。管の上部外側に加熱用ヒーターとして $\phi 0.5$ のニクロム線を巻き、高温接着剤（商品名；アロンセラミック）で固定する。ヒーター発熱量 Q は変圧器で制御する。管上部の内部には、過熱による突沸を防ぐためと水への熱の伝わりを良くするために、アルミニウム片を詰めた。

管の内部に水を満たし、開放された一端を、水を張った水槽に入れ、垂直になるように保持される。水槽は、ガラス管内での振動時に水位の変化を感じさせないように、ガラス管内径に対して十分に大きいものを使用した。

ヒーターの発熱量 Q は約14Wになるように電力を加え、管上部のみを加熱する。アルミニウム片を詰めた端部から蒸気が発生し液面が低下して、振動を生ずる。管内部で発生した水・蒸気柱の自励振動の様子をハイスピードビデオカメラによって撮影した。また、振動中の管内部の蒸気または水の部分の温度を、 $\phi 0.1$ のアルメルクロメル熱電対とオシロスコープによって測定した。水柱部分の加熱開始から液面低下、振動時、振動停止までの温度変化の過程も測定した。さらに熱電対を移動させて軸方向の温度分布の測定も行った。

オシロスコープのトリガー信号によって、ハイスピードカメラでの撮影も同時に行い、液面変位と蒸気

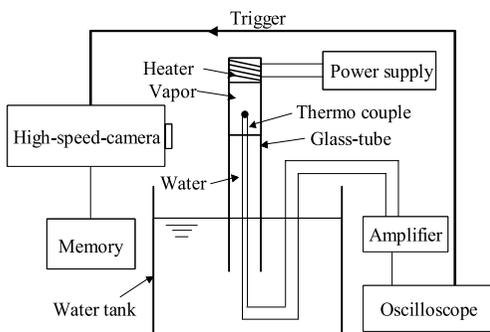


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

の温度変化の対応も試みたが、 $\phi 0.1$ の熱電対では応答時間が長いため対応を得ることはできなかった。

ガラス管による実験のほかに、アルミニウム管を逆U字型にして湾曲部を加熱した場合の振動についても実験した。

2.2 圧力変動測定用装置 Fig.2に蒸気プラグの圧力変動測定用実験装置の概略を示した。一端を閉じた長さ360mm、内径5.5mmのガラス管は、水を満たして垂直に保持する。ガラス管先端部にはニクロム線を巻き、高温接着剤で固定した。ガラス管の内側先端部分には、熱の伝わりをよくするため金網を丸めて挿入した。水槽はFig.1と同様のものを使用した。

実験は以下の手順で行った。変圧器の電圧を所定の値として、ガラス管先端部分を加熱する。ガラス管内で沸騰が始まり蒸気スラグが形成され成長して、蒸気スラグ容積が増加し、液面が低下していく。液面の低下がある位置に至ると、液柱の振動が始まる。

本実験では、加熱部に Q が約14Wとなる電力を加えた。

振動時の蒸気スラグの圧力変動は、ガラス管先端から120mmの水柱部分に設置した半導体圧力センサー（固有振動数が約35kHz、出力0.03 mV/(MPa)）によって検出して、アンプで増幅し、デジタルオシロスコープを用いて記録した。測定された圧力変動の測定値は、蒸気スラグの圧力ではなく、水柱部分の静圧であるが、水柱部の圧力と水柱の運動に伴う動圧は、蒸気プラグの圧力変動値に比べて十分小さく、測定値は蒸気部スラグの圧力変動値と見なせる。

発生している振動の変位 x 、蒸気プラグ体積 V_v は、デジタルオシロスコープと同期させた、ハイスピードビデオカメラによって撮影して求めた。シャッタースピードおよびフレーム数は、それぞれ1/10000 s、毎秒500コマ(fps)とし、変位の変化の映像から体積を、オシロスコープの値から圧力を、それぞれ算出しP-V

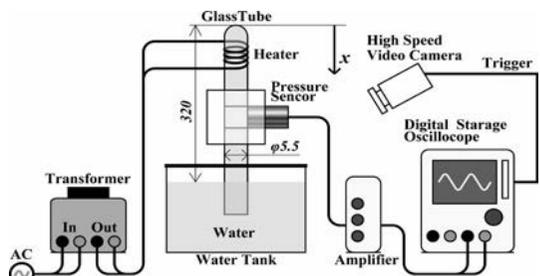


Fig.2 Schematic diagram of experimental apparatus for measuring pressure change

線図を画いた。変位は管先端をゼロとして下向きにプラスとする。体積は、先端部の充填物と形状の影響を補正した。得られたP-V線図から、仕事Wを計算し、加えた熱量Qの推定値からサイクルの熱効率 η を算出した。

3. 実験結果

3.1 振動の様相の詳細 実験はあらかじめ水を満たしたガラス管に熱を供給することから開始される。閉ループであるPHPを模擬した装置では、あらかじめ液スラグと蒸気プラグが存在した状態から開始されるのに対し、OOHPを模擬した装置による実験では蒸気プラグがあらかじめ存在しない。

加熱を開始して加熱部が100°Cを超えたあたりから蒸気が発生して液面が低下してくる。やがて低下が停止して液面の振動が開始する。

加熱開始からの管内の様相は次のように推移した。

- (i) 加熱により、管内部に蒸気が発生した。
- (ii) 蒸気プラグ体積が増加していき、蒸気と水の界面が徐々に下降していった。
- (iii) あるところで蒸気プラグ体積の増加が停止して、水柱の自励振動が開始した。
- (iv) 水柱は振動しながら、徐々に蒸気部プラグ体積が減少していき、界面が少し上昇する。
- (v) やがて、自励振動が停止するが、蒸気プラグ体積の減少、界面は上昇が続く。
- (vi) 界面の上昇が停止する。

石英ガラス管では、自励振動の持続時間は、数分程度であった。これに対し、管の形状が同一でないがアルミニウム製の逆U字管の自励振動は数十時間の持続時間が確認された。この理由については、①現象が異なる、②ガラスとアルミの熱拡散率の相違による管の軸方向の温度分布の違いや、液体や大気への熱移動量の相違、などの理由が考えられるが、説明は今後の課題である。

Fig.3にFig.1の装置を用いて観察された振動現象の様子を撮影した映像の1部を示す。周期は92msであった。

Fig.3の1は蒸気プラグ体積が最大、すなわち水面が最も下降したときの画像である。このときの時間を基準にする。ここで、蒸気プラグ内の管壁には水膜が見られる。この水膜は、水柱が管内を下降していく際に管壁に残ったものである。

Fig.3の2は18ms後の蒸気プラグ体積の減少過程、

すなわち水柱が上昇していくときの画像である。このとき、水柱と管壁に沿って降下する水膜が衝突するため、水面に波が見られる。

Fig.3の3は48msの状態、蒸気プラグ体積が最小、すなわち水面が最も上昇したときの画像である。このとき、液面変位xが最小になった後にも、管壁を液膜となって水が壁を這うように上昇している。

Fig.3の4は68ms後の水柱が下降していく際の画像である。このときにおいても、水膜先端部分が丸くなっていることから、水膜が管内壁に沿ってわずかに上昇していく様子が観察され、1の状態に戻る。自励振動中は、この1から4までの過程を繰り返す。

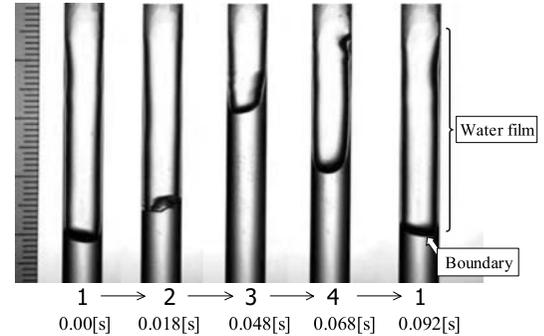


Fig.3 Photographs oscillation water-vapor column (500f.p.s.)

3.2 液面、液膜先端の運動 Fig.4は液面(○)と水膜先端の位置(△)の時間変化の測定例の比較を示す。縦軸は、液面から水側(下向き)にプラスとする。画像を詳細に観察すると、液面の変動中も水膜の存在が認められた。このため、液面は約10mmの振幅で規則正しく振動しているのに対して、水膜先端の位置の顕著な変動はなかった。

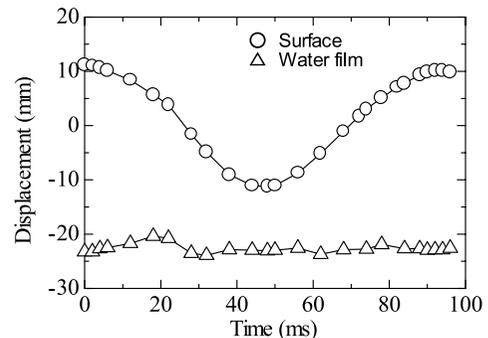


Fig.4 The comparison between displacement change of water surface and front of water film

3.3 液体プラグ温度と振動の持続 Fig.5は、実験開始から蒸気プラグが形成され、振動がはじまり、や

がて振動が停止するまでの液体部分の温度を、Fig.1の装置によって測定した結果の1例である。管口からおよそ380mmの位置に、管壁に接触しないように熱電対を設置して測定した。

測定開始から振動が始まるまでは液温がほぼ直線的に上昇した。これは蒸気プラグ体積が増加し、気液界面が下降して温められた水が测温位置に近づくためであると考えられる。振動開始後は下部の水の影響で一度水温が低下する。

その後、振動しながら蒸気プラグ体積が減少していく。このとき、液面が測定点から離れていくにも関わらず、温度が上昇している。他方、振動が終了して蒸気プラグ体積が減少していくときには、温度が低下する。これらのことは、振動時の水への熱移動量が、非振動時に比べて大きいことを表している。

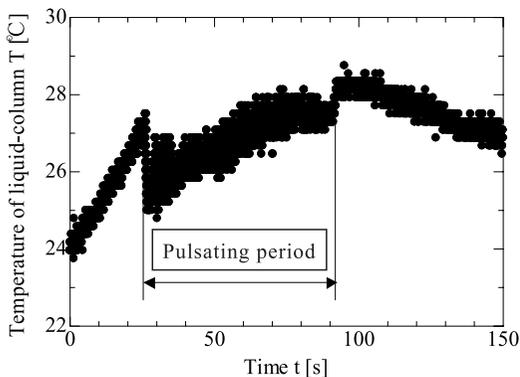


Fig.5 A temperature history for water column

3.4 自励振動時の圧力変動測定 宮崎⁽⁹⁾は、定性的なモデルによって自励振動ヒートパイプが熱機関となることを説明した。Fig.6に圧力変動と蒸気プラグ体積変動の模式図を示す。すなわち圧力変動 ΔP とボイド率（蒸気プラグ体積に相当）変動 $\Delta \alpha$ の位相は $\pi/2$ ずれており、 ΔP と $\Delta \alpha$ の間にこのような関係があるとき、サイクルのP-V線図は右回りとなり熱機関となることを示している。 ΔP と $\Delta \alpha$ の間に位相差が生じるのは、相変化の影響によるもので、 ΔP と $\Delta \alpha$ が同時に減少するのは凝縮の効果であり、 ΔP と $\Delta \alpha$ の増加が同時に起こるのは蒸発の効果による。

本実験の測定例を次に示す。

Fig.7は、圧力測定時の自励振動時の液柱の変動の撮影結果で、代表的なサイクルの1例を、Fig.8に測定した3サイクル分の変位(◇)と圧力変動

(□)の時間変化を示した。変位は、ガラス管最上端部から液面までの距離である。また圧力は、圧力センサーを取り付けた位置の水の静圧である。液柱の運動による動圧は、静圧変動に比べて十分小さいので無視した。圧力差は、オシロスコープ上の基準に対する変化分を表している。変位または蒸気プラグ体積と圧力変動には、ほぼ、 $\pi/2$ に相当する平均25.1msの位相差があることがわかる。また測定された圧力変動の振幅は約30kPaとなる。

様相はFig.3と比較して液面形状が平らであること以外顕著な差異は見られず、圧力測定による現象への影響はないと判断される。

Fig.3の時間は、変位が最小の時（液面が最上位にきたとき）をゼロとした。実験では、300ms間、振動の3周期を観察した。サイクルの周期は、ちょうど100.0msであった。

加熱後、蒸気が発生し、液面が降下する。蒸気プラグ長さが約50mm付近で液柱の振動が始まり、水の蒸発と凝縮による自励振動となる。(1)~(6)で1サイクルである。(1)→(2)→(3)は、蒸気プラグ容積の増大過程で、(1)→(2)では圧力も増加している。これは体積膨張による圧力減少分以上に、高温部分の液膜の蒸発による圧力増加分の方が大きくなるためであ

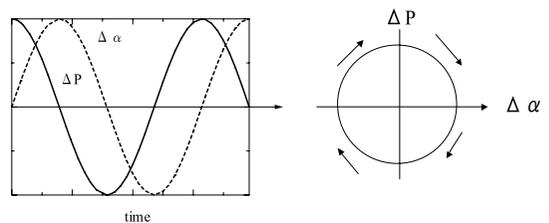
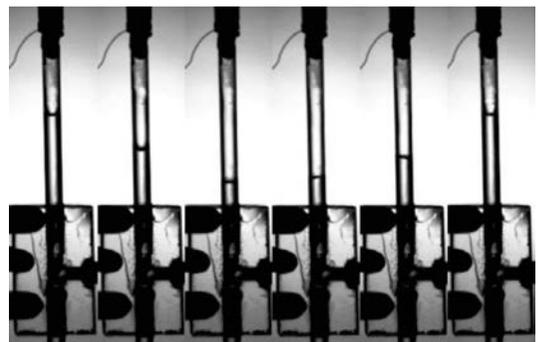


Fig.6 Oscillation model⁽⁹⁾



(1)0ms (2)24ms (3)48ms (4)62ms (5)74ms (6) 100ms
Fig.7 Photographs of oscillation in water-vapor column (500f.p.s.)

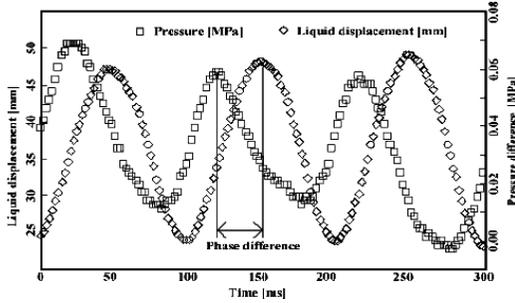


Fig.8 Typical pressure and displacement changes

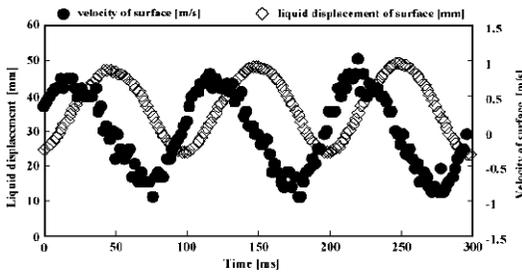


Fig.9 Displacement and velocity change of water surface

る。(2)→(3)では圧力が減少に転ずる。体積膨張による減圧と、蒸気プラグがより低温のガラス壁面に接触することによる凝縮の効果による。この過程では凝縮によって熱が放出されると思われる。

(3)→(4)→(5)→(6)は蒸気プラグ容積の減少過程で、(3)→(4)→(5)では、凝縮の圧力減少効果が収縮による圧力上昇を上回るため、圧力が減少している。(5)→(6)→(1)で、主に蒸気プラグの収縮によって、圧力が増加に転じている。以下この振動が繰り返され(2)の状態へと、再び変化していく。

Fig.9に液面変動(◇)の測定例を示す。併せて界面速度を●で示した。変位はFig.8と同じデータである。規則正しい振動となっており、振幅は約12.5mm、液面速度は最大約1m/sとなる。

Xuら⁽⁸⁾はPHP内の流体の可視化の実験結果から、蒸気泡の位置の変化と速度を示している。それによると周期が1.1s、速度は最大でも0.3m/sとなり、しかも三角関数の波形にはなっていない。これらの事実は本実験の結果と異なる点である。

Fig.8からもわかるように、規則正しく振動が行われており、どのサイクルにおいても変位、周期などがほぼ等しいことがわかる。また、加熱部の温度は測定していないので不明であるが、出力Qを14W以上では、ガラス管内径φ5.5の場合、振幅が大きくなったり、小さくなったり、あるいは

振動が停止したりと安定性が見られなかった。

3.5 P-V線図 サイクルをプロットするとそれぞれ形状が若干異なるが、実験で求めた、P-V線図の代表例をFig.10に示した。

Fig.10に示した代表例のように、サイクルは楕円形となる。このサイクルは、Fig.8の定性的モデルに示されるように時計回りにプロットされていて、仕事Wを発生している事がわかった。サイクルの仕事Wを、容積Vを50等分して、各点の圧力値を用い数値積分して行った。

また、加えた熱量 Q_{in} と仕事から熱効率 η を計算する。 Q_{in} を求めるためにヒーター損失はゼロと仮定して、半周期の時間 $t=50ms$ とした。各サイクルの熱効率 η は、1.9~2.8%となった。

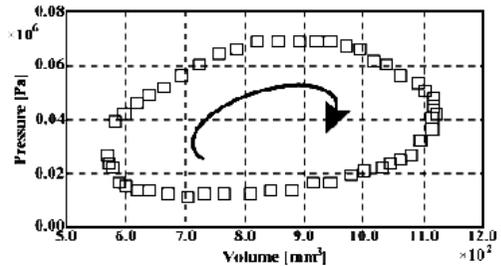


Fig.10 A typical P-V diagram

4. 振動の計算

一端開放の振動型ヒートパイプ(OOHP)の解析のうち、Y.Zhang and A.Faghri⁽¹⁰⁾はI字型のOOHPについて、本報告のFig.3に示したような薄い液膜をモデル化してその蒸発、凝縮量を計算している。

R.T.Dobson⁽¹¹⁾は、U字型のOOHPについて液膜を厚さを一様とした解析を行っている。

しかし、これらの解析では実験結果との詳細な比較がなされているとはいえない。そこで、本研究では、簡単な力学モデルで液面の運動の解析を行い測定値との比較を行った。

Fig.11は、力学的解析モデルである。液面の変位は振動の中心をゼロとした。液面変位の運動方程式は

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{P_v(x) - P_a}{\rho_l h_l} + g \quad (1)$$

$$\frac{dT_v}{dP_v} = \frac{T_v}{\rho_v h_{fg}} \quad (2)$$

式(1)となる。蒸気は飽和状態として式(2)のクラペールン・クラウジウスの式に従うとする。ここで、 h_{fg} は蒸発潜熱である。

境界条件は、 $t=0$ sで $x = x_0 (=8\text{mm})$, $v = dx/dt = 0$ m/s. $P_v = 0.101\text{MPa}$ で $T_v = 373.2\text{K}$ とする。

本解析では、蒸発と凝縮を考えていない。従って、 P_v や T_v と x との位相差は π となる。また液面は平らとしている。

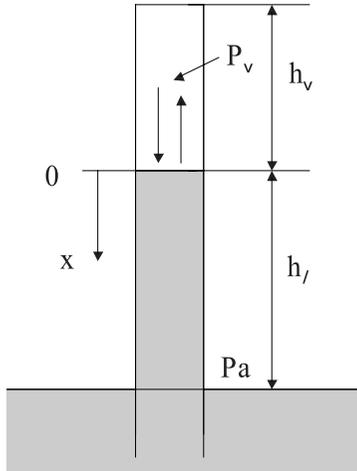


Fig.11 Analytical model

Fig.12 に実験値と計算値の比較例を示す。振幅は計算値がやや小さいが、変位の変化、周期ともよく一致した。

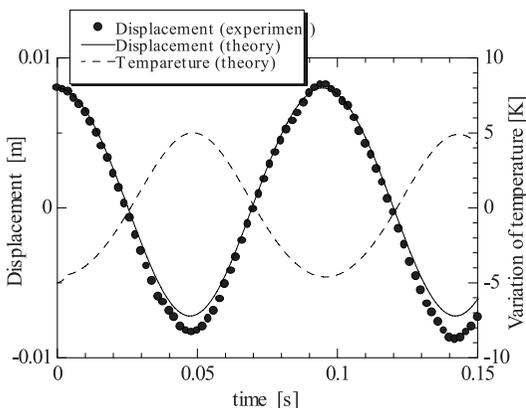


Fig.12 Comparison between calculated and experimental data

5. まとめ

透明石英ガラス管を用いて、一端開放の垂直単管の振動型ヒートパイプの熱的自励振動の現象を解明するため流れの可視化を行った。さらに、熱的自励振動時の圧力の変動を明らかにするため、圧力センサーを取り付けた装置によって、蒸気プラグの圧力変動と液面変位を同時に測定して、次の結論を得た。

- (1) ガラス管による熱的自励振動を再現することができること。しかし、振動の持続時間は約1分程度であること。
- (2) 液面の変位の変化に比べて液膜先端の変位の変化は小さいものとなること。
- (3) 蒸気プラグの体積変動と圧力変動を同時に測定して画いたP-V線図から、振動型ヒートパイプの蒸気サイクルが仕事を行っている熱機関であること、ヒーター損失をゼロと仮定した場合、その熱効率率は1.9~2.8%となること。
- (4) 振動時の液面変位と周期の計算値は実験結果とよく一致すること。

文献

- (1) U.H.Kurzweg and L.de Zhao, Phys. Fluids, 27-11 (1984), 2624.
- (2) J.W.Sheldone et al., J. Phys. D: Appl. Phys., 9 (1976), 1419.
- (3) 山本・ほか2名, 燃料協会誌, 59-644(1980),1016.
- (4) J.L.Xu et al., Int.J.Heat Mass Trans.,46-18(2003), 3329.
- (5) J.L.Xu et al., Int.J.Heat Mass Trans.,46-18(2003), 3337.
- (6) B.Y.Tong et al., Appl. Therm. Eng., 21(2001),1845-1862.
- (7) 高島・荒井, 日本機械学会関東支部ブロック合同講演会(2004).
- (8) J.L.Xu et al.,Int. J.Heat Mass Trans., 48(2005),3338-3351.
- (9) 宮崎芳郎, 日本機械学会誌, 106-1011(2003.2), 107-110.
- (10) Y.Zhang and A.Faghri, Int. J.Heat Mass Trans., 45(2002), 755-764.
- (11) R.T.Dobson., Int. J. Ther. Sci., 43(2004) 113-119.

(E-mail: takasima@oyama-ct.ac.jp)