

自励振動ヒートパイプの振動流

宮崎 芳郎* ・ 有川 政之**

Oscillatory Flow in the Oscillating Heat Pipe

Yoshiro Miyazaki and Masayuki Arikawa

In the present paper, oscillatory flow characteristics observed in a visualization test are described and the experimental results are compared with theoretical predictions. The proposed theoretical predictions are based on an analytical model of self-excited oscillation, in which reciprocal excitation between pressure oscillation and oscillatory flow is assumed.

The visualization test revealed that the oscillatory flow forms waves that travel among turns. The characteristics of the wave are examined, especially with respect to the phase relationship with pressure oscillation, and the oscillatory flow and pressure oscillation are demonstrated to have a mutual relationship whereby each excites the other, as predicted by the proposed theory. The measured wave velocity is also compared with that predicted theoretically and approximate agreement is obtained. These results strongly support the proposed theory.

Key Words: Oscillating Heat Pipes, Oscillatory Flow, Wave, Self-Excited Oscillation, Visualization

1. はじめに

自励振動ヒートパイプは従来のヒートパイプやサーモサイフォンとは動作原理のまったく異なる新しい概念のヒートパイプである。このヒートパイプは Fig.1 に示すように加熱部と冷却部の間を細管が何回も往復する構成となっている。細管内には作動流体が封入されており、蒸気泡と液プラグの状態で管内に分布している。動作状態では作動流体の振動流が自励的に発生し、加熱部と冷却部との間に蒸気と液の熱輸送サイクルを構成する⁽¹⁾。

作動流体の自励振動の機構に関する理論は著者により提案されており、その概要は以下に示す通りである⁽²⁾。

ヒートパイプ流路内のボイド率分布が一様でないとターン間に圧力差が発生する：ボイド率が小さいと圧力は上昇し、ボイド率が大きいと圧力は低下する。この圧力差によりターン間に流れが起こる。一方この流れにより、圧力の高いターンのボイド率は小さくなり、圧力の低いターンのボイド率は高くなる。このような圧力とボイド率の相互作用により自励振動が起こる。

* 機械工学科 ** 機械工学専攻大学院生

この自励振動はFig.2に示すように $\Delta\alpha$ - Δp 平面上の原点を中心とした右回りの円として模式的に示される。ここで $\Delta\alpha$ と Δp は各々ボイド率と圧力の平均値からの差である。

この解析モデルに基づきボイド率と圧力の波の存在が予測されており、その波動方程式も導かれている⁽³⁾。Fig.2に示されている $\pi/2$ の位相差で右側に向かっている圧力とボイド率の波はこの波動方程式の解のひとつである。

この論文では提案されている理論の実験による実証が報告されている。理論の実証のため、ヒートパイプ内の振動流の可視化が行われ、その波の特性が解析されている。

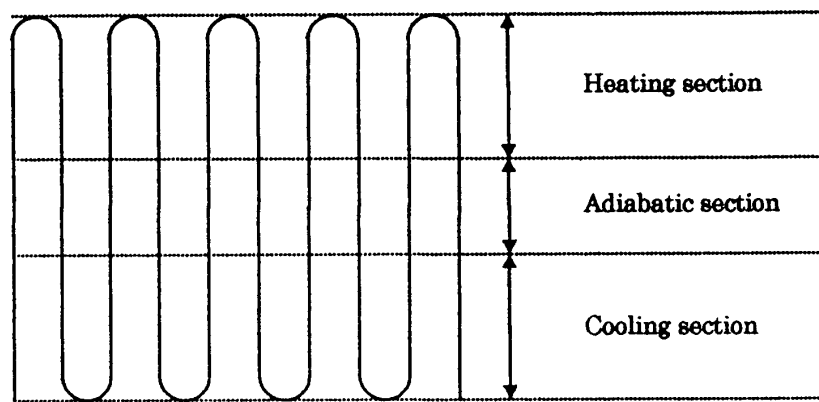


Fig.1 Schematic diagram of oscillating heat pipe

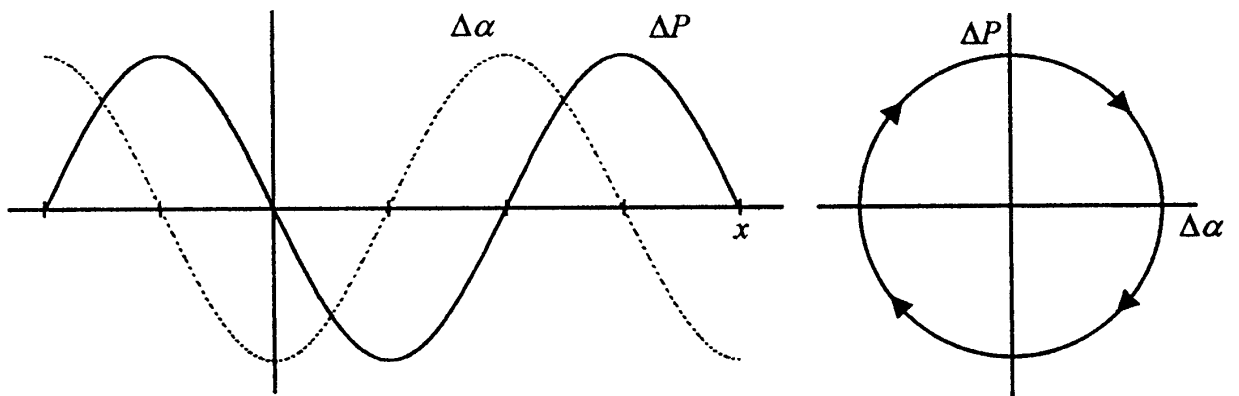


Fig.2 Analytical model of self-excited oscillation

2. 振動流の可視化

2-1. 実験装置

可視化実験に用いた自励振動ヒートパイプを Fig. 3 に示す。このモデルは銅の基板とポリカーボネートの窓板とから成っている。基板には断面が矩形の 25 ターンのグループが設けてありグループの両端は接続されループとなっている。グループを設けた面には窓板が接着剤で取り付けられており、窓板とグループとで囲まれた流路が構成されている。加熱部と冷却部とはヒートパイプの両端に設けられ、加熱部にはシリコンラバーヒータ、冷却部には水冷の冷却板が取り付けられている。基板の中央には作動流体の封入管があり、この管は圧力測定の導圧管としても用いられる。

作動流体は R-142b である。

2-2. 振動流

振動流のビデオ画像の例を Fig. 4 に示す。流路内の黒く見える部分は液体であり、明るい部分は蒸気である。図の上の部分は加熱部で下の部分は冷却部である。作動流体は各々のターン内で蒸気の部分と液の部分にほぼ二分され、液は冷却側で U 字状の液柱となっている。液柱は振動しており、この振動によって蒸発部への液の進入と凝縮部への蒸気の進入が起こり、液-蒸気の二相熱輸送サイクルが構成されている。熱負荷が大きい場合は液柱が蒸発部の端を越え隣のターンに流入することもある。

液柱の振動の位相はターン間で少しずつ異なっており波を形成している。波は 25 ターン内に数個存在し、生成、成長、減衰を繰り返しながらターン間を伝播している。Fig.5 に振動流の波の様子を模式的に示す。この場合には波はヒートパイプの右側で発生し、左側へ伝播しながら成長し、左端で減衰、消滅している。

3. 考察

3-1. 圧力振動と振動流

自励振動の解析モデルでは自励振動は圧力振動とボイド率振動の位相差が $\pi/2$ の場合に起こり位相差が $\pi/2$ から外れると振動は減衰することが示されている。したがって圧力とボイド率の振動の位相差を検討することは理論の実証のためには重要である。

Fig.6 に液柱の変位、ボイド率、圧力の位相の関係が示されている。ボイド率の波は液柱の振動によって生じる疎密波であり、変位とは $\pi/2$ の位相差がある。

圧力振動は振動流を引き起こすが、この現象は次の運動方程式で表される。

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \mu_v \frac{\partial y}{\partial t} \quad (1)$$

この運動方程式から得られる圧力と振動流の位相差は慣性項と粘性項の比によって 0 から $\pi/2$ まで変化する。Fig.6 には慣性項を無視できる場合と粘性項を無視できる場合の両極端の場合の圧力振動が示されている。解析モデルでは慣性項は無視できるという仮定が用いられており、このばあい Fig.6 に示されているように圧力と振動流の変位とは同じ位相を持っている。

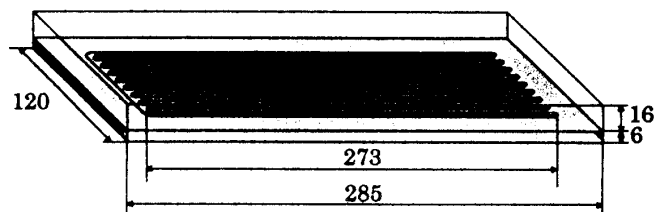


Fig.3 Heat pipe used for visualization test

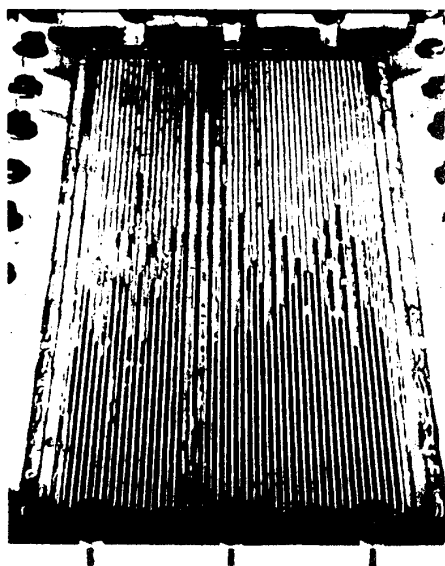


Fig.4 Oscillatory flow in the heat pipe

Heating Mode : Horizontal
 Tube End : Closed
 Working Fluid : R-142b
 Charging Quantity Ratio : 0.42
 Heat Load : 80 W

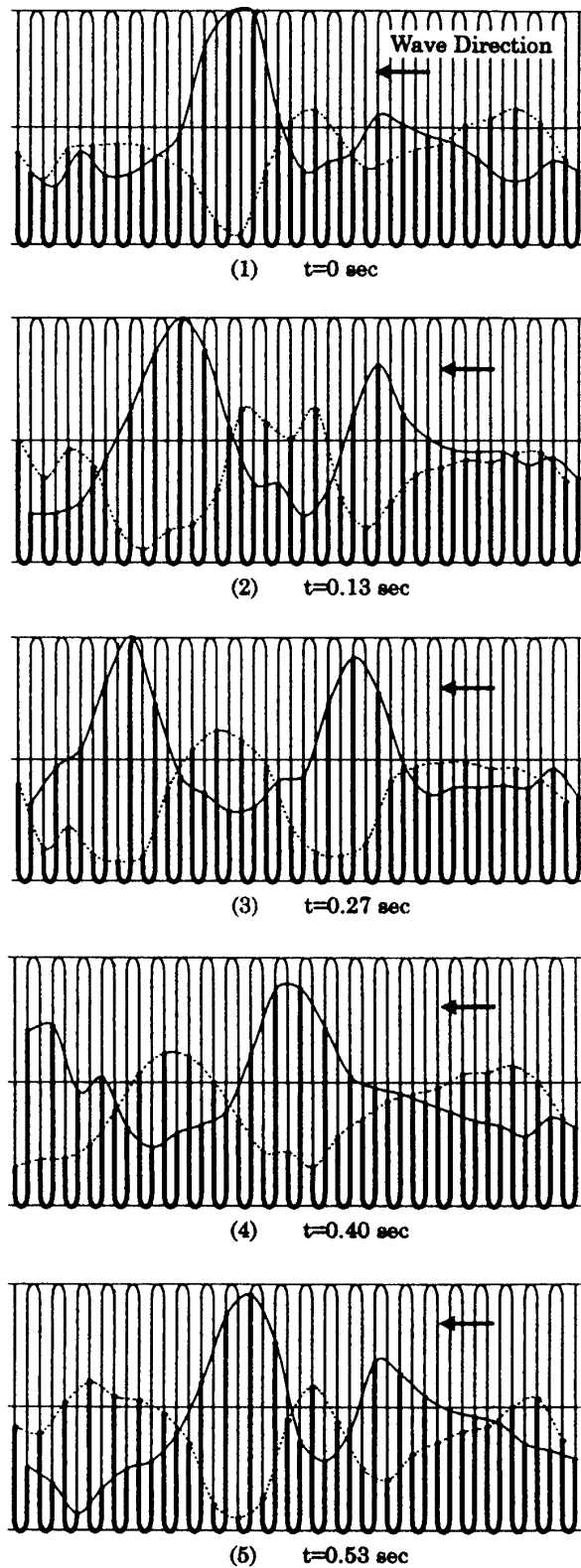


Fig.5 Schematic diagram of oscillatory flow
 in the heat pipe

Oscillatory Flow

Displacement

(Liquid Column Oscillation)

$$y = y_0 \sin(\omega t - kx)$$

Void Fraction

$$\alpha = \alpha_0 \sin(\omega t - kx - \frac{\pi}{2})$$

Pressure Oscillation

$$\mu_* \frac{\partial y}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x}$$

$$P = P_0 \sin(\omega t - kx)$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x}$$

$$P = P_0 \sin(\omega t - kx + \frac{\pi}{2})$$

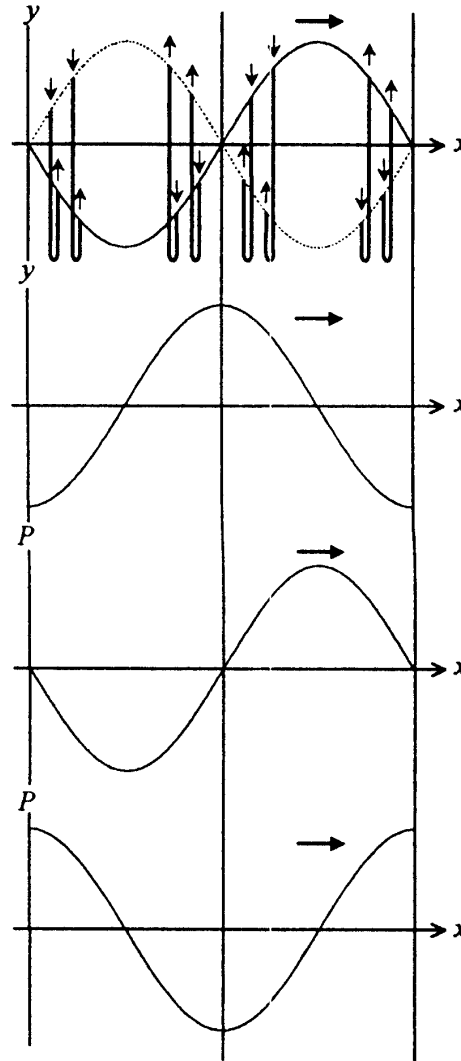


Fig.6 Phase relationship between oscillatory flow and pressure oscillation

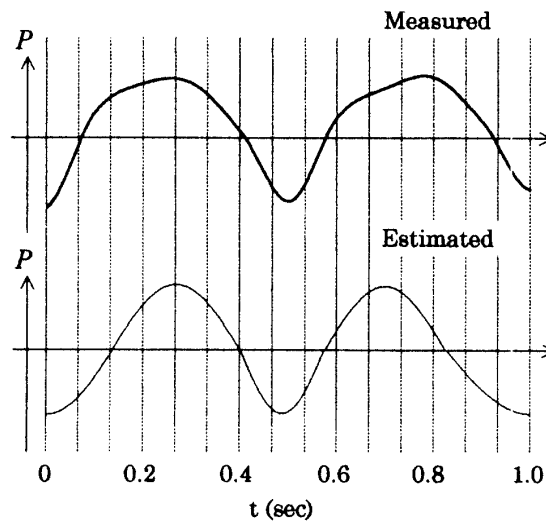


Fig.7 Measured and estimated pressure oscillation

従ってこの仮定を用いると測定点での圧力振動は可視化実験で観察される振動流の変位から推定できる。この方法によって推定される圧力振動が測定値と比較して Fig.7 に示されている。両者はほぼ一致してしている。この結果は圧力振動と振動流の変位とは一致しており、慣性項は無視できるという仮定は妥当であることを示している。この結果 Fig.6 に示されている位相の関係からわかるようにボイド率と圧力の振動の位相差は $\pi/2$ であることがわかる。この関係は Fig.2 に示されている解析モデルと一致しており、解析モデルの妥当性を支持する結果である。

3-2. 波の速度

自励振動モデルから波動方程式が導かれ、波の速度は次式で与えられる。

$$c = \sqrt{\frac{qRT_0}{4\pi l \alpha_o \rho_l v(r - RT_0)}} \quad (2)$$

ここで l はターンの長さであり、 q はターンあたりの熱輸送量である (3)。

Fig.8 には可視化実験で測定した波の速度を理論による予測値と比較して示してある。

波動方程式の導出には極端な単純化や線形化が仮定されていることや実験で観察される波動現象は不安定で複雑であることを考慮すると理論と実験とはよく一致しているといえる。特に熱負荷への依存性はよく一致している。

4. 結論

自励振動の解析モデルに基づいて圧力とボイド率の波の存在とその位相差、速度が予測されている。

この理論を実証するために自励振動ヒートパイプの可視化実験が行われた。可視化実験の結果、波の存在が確認され、位相差、波の速度も理論と一致することが確認された。これらの結果は理論の妥当性を示している。

参考文献

- (1) Akachi, H. and Polasek, F., "Pulsating Heat Pipes", Proc. 5th IHPS, Nov. 1996
- (2) Miyazaki, Y. and Akachi, H., "Heat Transfer Characteristics of Looped Capillary Heat Pipe", Proc. 5th IHPS, Nov. 1996
- (3) Miyazaki, Y. and Akachi, H., "Self Excited Oscillation in a Micro Channel", Proc. 3rd ICMF, June 1998

(平成11年12月9日受理)

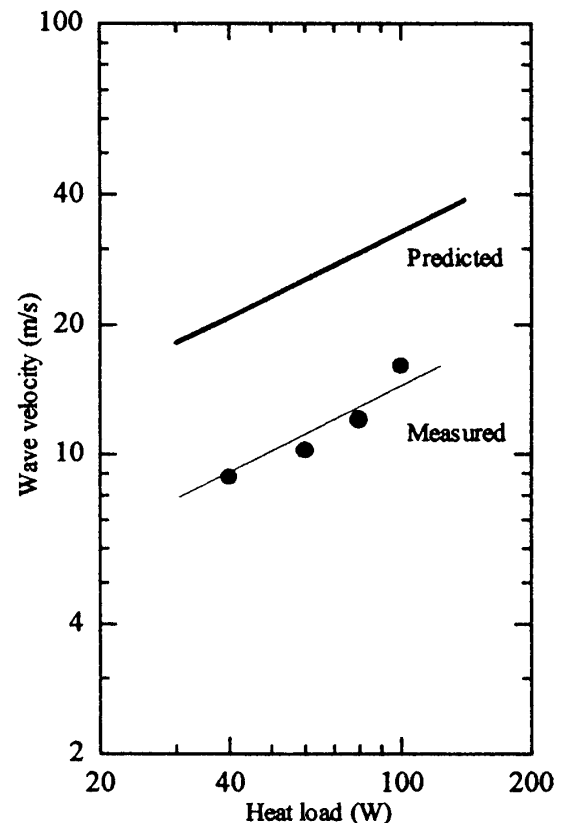


Fig.8 Wave velocity