

自励振動ヒートパイプの作動限界

宮 崎 芳 郎*

Operating Limits of Oscillating Heat Pipes

Yoshiro Miyazaki

This paper describes the experimental analysis of the operating limits of oscillating heat pipes. An oscillating heat pipe with check valves was used to eliminate the effect of amplitude shortage of oscillatory flow. The existence of a limit of the operating temperature and the maximum heat load is confirmed and it is shown that the limit of the operating temperature exhibits strong dependence on heat load. The result is discussed by comparison with the pressure oscillation and heat transfer characteristics and it is suggested that the limit of the operating temperature is stimulated by the increase in necessary flow rate due to the decrease in latent heat of evaporation with a rise in temperature. The pattern of increase of pressure oscillation with heat load governs the variation in the operating limit.

1. はじめに

自励振動ヒートパイプは相変化を利用した熱輸送システムであり、加熱部と冷却部とを何回も往復する細管で構成されている。作動流体は細管の内容積の約半分程度の量が細管を真空排気した後封入され、液プラグと蒸気泡の形で管に分布する。ヒートパイプの動作時には自励的に発生する圧力振動により、作動流体は加熱部と冷却部の間を往復する。この結果、加熱部から冷却部へ向かう蒸気の流れと冷却部から加熱部へ向かう液の流れの循環サイクルが構成され、潜熱による熱輸送が行われる。このヒートパイプは赤地により発明され、Polasek により、5th IHPS において発表された(Akachi and Polasek, 1996)。

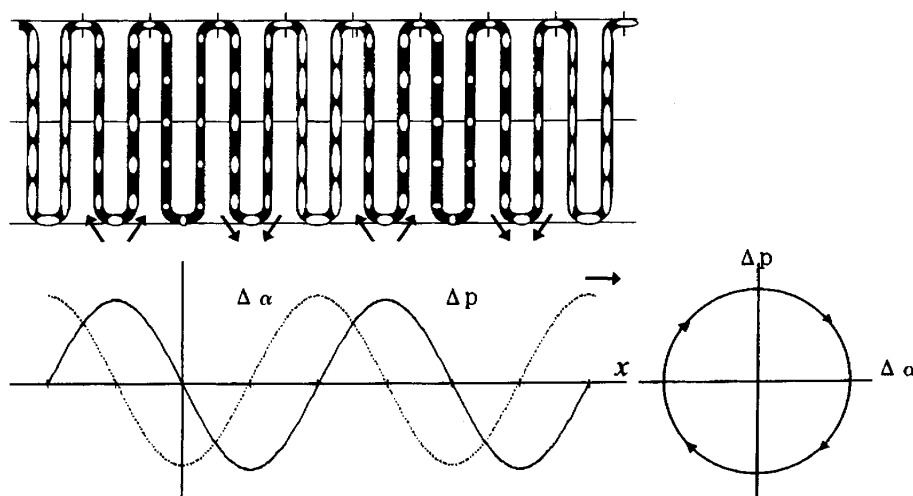


Fig. 1 Analytical model of self-excited oscillation

* 宇宙通信工学科

自励振動の機構は、Fig. 1 に示すように、圧力とボイド率との相互作用である。すなわち、ターン間にボイド率の変化があるとボイド率が高いところでは圧力が低下し、ボイド率が低いところでは圧力が高くなる方向へ圧力の変化を生じる。この圧力変化により、作動流体の流れが生じ、圧力の高いターンでは作動流体が流出するためボイド率が低下し、圧力の低いターンでは作動流体が流入するためボイド率が高くなる。このような圧力とボイド率との相互作用により、自励振動が起こる。この理論は宮崎により提案され(Miyazaki and Akachi, 1998)実験により実証されている(Miyazaki and Arikawa, 1999)。

ヒートパイプが正常に動作している状態では、液と蒸気とは分離され、液は冷却側に、蒸気は加熱側に分布している。冷却側の液は各々のターンで U 字状の液柱を形成し、液柱の振動は波を形成し、ターン間を伝播している。そのような振動流の状態では有効な熱伝達面は振動流の波の振幅の間に限られる。したがって、振動が十分に発達せず、Fig. 2 に示すように振動流の振幅が断熱部を越えることがなければ、加熱面部と冷却部には有効な作動流体の供給が行われず、ヒートパイプの動作は停止する。この振動流の振幅の不足による作動限界は自励振動ヒートパイプに特有なものである(Miyazaki et al., 2000)。この作動限界は自励振動ヒートパイプのループに逆止弁を設け、一方向の流れの成分を生じさせることにより回避できる。

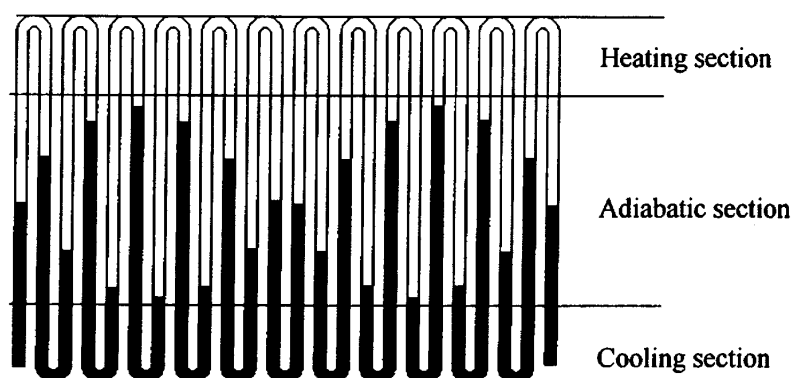


Fig. 2 Operating limit of insufficient of amplitude of oscillatory flow

本研究では振動流の振幅の不足による作動限界以外の自励振動ヒートパイプの作動限界について実験的に検討を行っている。このために、実験には逆止弁を設けた自励振動ヒートパイプを用いている。

2. 実験装置

2. 1 ヒートパイプ

実験に用いた逆止弁付自励振動ヒートパイプを Fig. 3 に示す。ヒートパイプの流路は内径 2mm の銅パイプで構成されている。流路は加熱部と冷却部の間を 18 回往復し、両端は接続されループを構成している。加熱部の長さは 100mm、冷却部の長さは 600mm、断熱部の長さは 300mm である。逆止弁は断熱部に計 10 個設けられている。

作動流体は R-134a であり、封入量割合は約 0.5 である。

ヒートパイプは重力の影響を受けないようにするため、水平に設置されている。

2. 2 逆止弁

逆止弁を Fig. 4 に示す。逆止弁は浮遊型であり、銅管とルビーボールとで出来ている。銅管の一方の端には弁座が設けられ、他方にはボール止めが設けられており、ルビーボールは弁座とボール止めの間を自由に動く

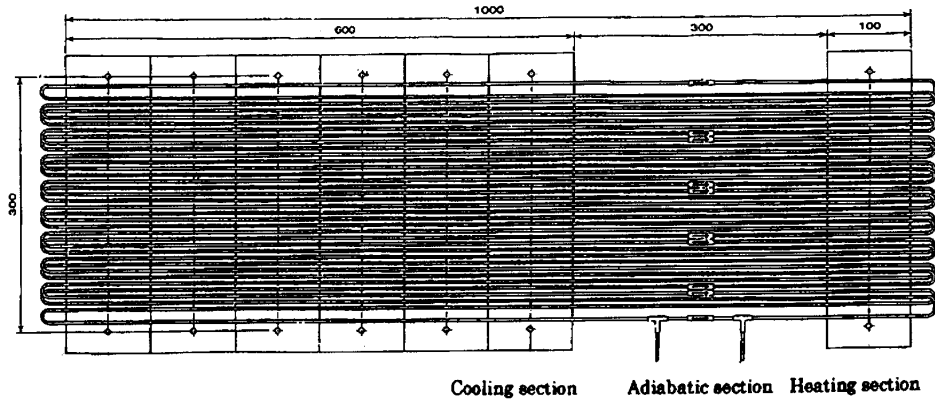


Fig. 3 Experimental heat pipe with check valves



Fig. 4 Check valve

ことが出来る構造となっている。

3. 実験結果と考察

3. 1 最大熱輸送量

加熱側の熱伝達特性を Fig.5 に示す。熱伝達特性は熱負荷に強い依存性を持っていることがわかる。熱コンダクタンスは 400W 以下の領域では小さく、熱量が増加すると大きくなる傾向がある。この領域では動作が不安定であり、再現性にも乏しい。400W を越えると動作は安定となり、高い熱輸送性能が得られる。1400W 以上ではドライアウト開始点は定まっていず、1400W から 1800W の範囲にある。

対応する圧力振動の様子を Fig. 6 に示す。100W の場合、振動の振幅は小さく、振動数は高い。200W になると振幅が大きく振動数が低い間歇的な振動が小さな振動に重なって現れる。この大きな振幅の圧力振動は熱負荷が増すとともに頻度がまし、400W ではほぼ連続的に現れるようになる。

熱負荷が 400W 以上では圧力振動の変化は異なった様相を示す。すなわち、熱負荷が増加すると振幅も振動数も熱負荷に比例して大きくなる。

1400W 以上の領域では圧力振動はもはや成長することがなく、振動数も振幅もほぼ一定である。ドライアウトが起こると圧力振動は停止し、圧力の低下と加熱部温度の急激な上昇が観察される。

これらの結果は圧力振動の発達の様子は熱伝達特性に非常に大きな影響を及ぼしていることを示している。熱負荷が低い領域での熱コンダクタンスの増加は圧力振動が間歇的な振動から連続的な振動へ変化することに対応している。それより高い熱負荷の領域での安定な動作は熱負荷に比例して圧力振動が成長することによってもたらされていると考えられる。最大熱負荷の領域では圧力振動が熱負荷とともに成長しないので圧力振動によって供給される流量と必要な流量とのバランスが微妙となり、ドライアウトが起こりやすくなると考えられる。

圧力振動の発達の限界がどのような原因で起こるのかについては、まだ明確な理論はない。しかし最大熱負荷が非常に大きいことを考えると蒸発部での蒸気の成長速度が大きいことが大きいことが蒸発部への液の流入を妨げている可能性が考えられる。

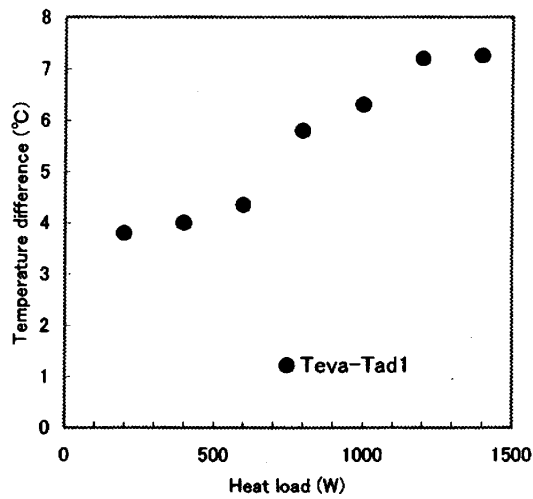


Fig. 5 Heat transfer characteristics

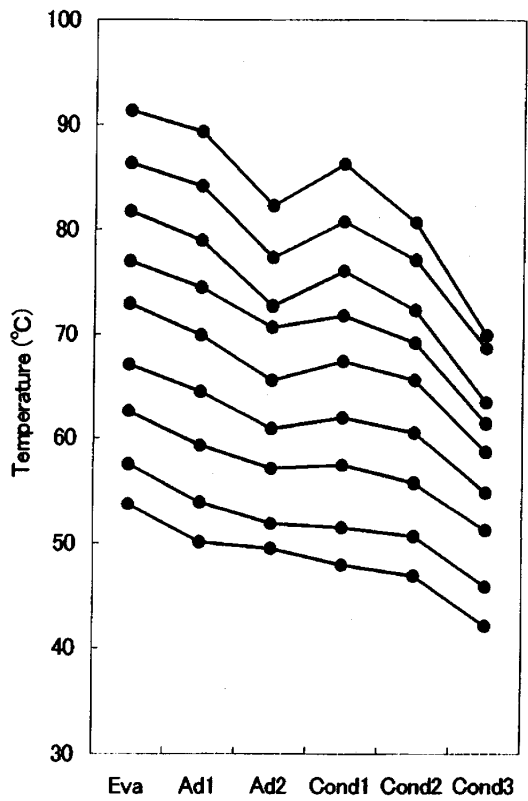


Fig. 7 Temperature distribution

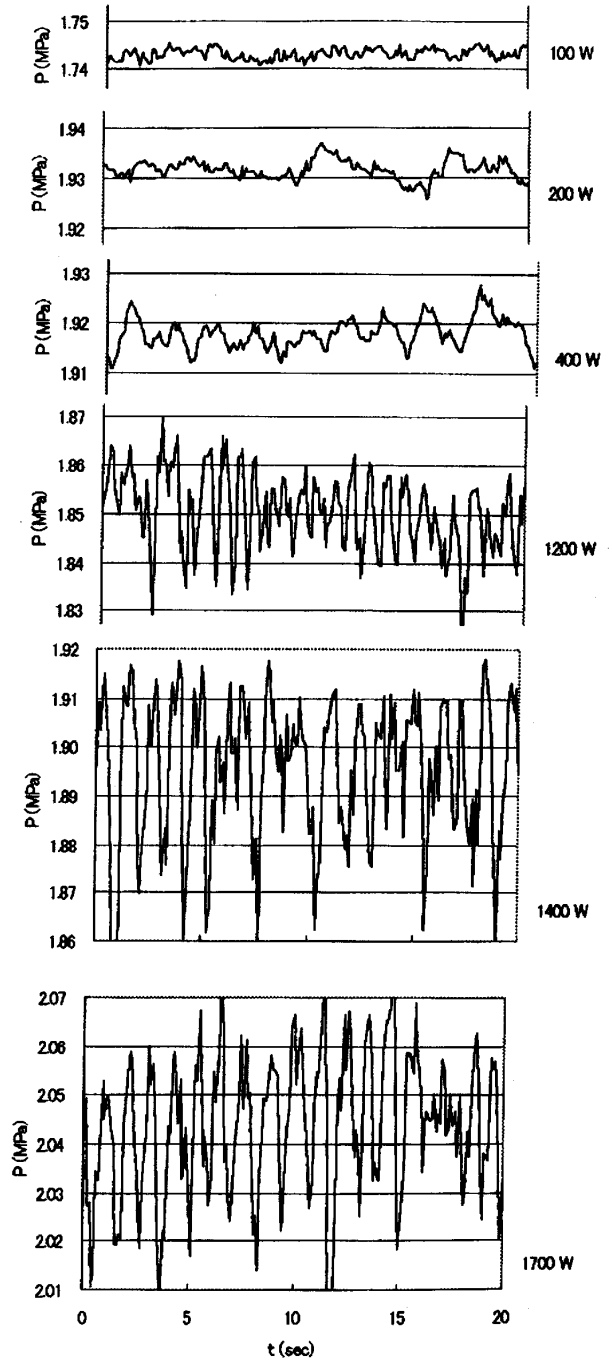


Fig. 6 Pressure oscillation vs. heat load

3. 2 作動限界温度

幾つかの作動温度に対するヒートパイプの温度分布を Fig. 7 に示す。ここで ad1 と ad2 は断熱部の管に取り付けた熱電対を示しており、ad1 は蒸発管からの流れがある管であり、ad2 は蒸発管への流れがある管を示している。したがって ad1 の温度は ad2 の温度より高い。

動作温度が低い場合は ad1 と ad2 の温度差は非常に小さいので熱負荷のほとんどは潜熱として作動流体に伝えられており、作動流体の温度はほぼ飽和温度であることがわかる。ad1 と ad2 の温度差は動作温度が高くなるにしたがって大きくなる。このことは作動温度が高くなると熱負荷のある程度の割合が顕熱で輸送されていることを示している。

動作温度がある程度以上高くなるとドライアウトが起こる。熱負荷が 400W の場合、作動限界温度は約 90℃ である。ここで作動限界温度としてはドライアウトが起こるときの ad1 の温度を用いている。

動作温度が高くなるにしたがって顕熱での熱輸送の割合が増加するという熱輸送特性の変化は、動作温度が高くなるにしたがって必要な作動流体の供給が行えなくなり、不足分を顕熱の熱輸送で補っていることを示していると

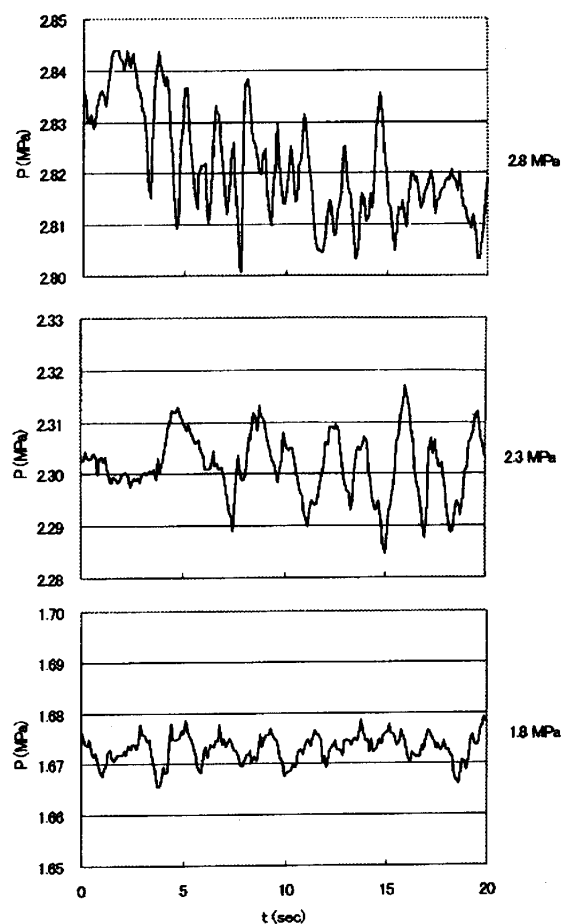


Fig. 8 Pressure Oscillation (400 W)

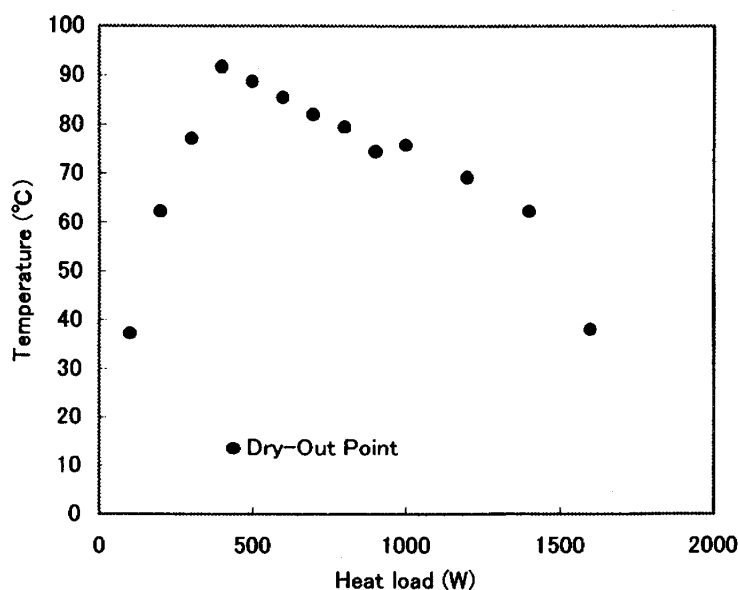


Fig. 9 Operating limit of oscillating heat pipe with check valves

考えられる。この作動流体の不足は作動流体の流量の減少と必要な作動流体の量が増加するという二つの原因が考えられる。この問題を検討するために、振動特性の変化を調べてみる。作動温度による圧力振動の変化を Fig. 8 に示す。圧力振動は動作温度が高くなるとともに激しくなっており、このことより作動流体の流量は減少していないと考えられる。したがって作動限界温度におけるドライアウトの発生の主な原因は作動流体の流量の減少ではなく必要な流量の増加であると考えられる。

作動流体が供給される流量と必要な流量のバランスは温度によって変化している。作動温度が低い場合、十分な流量が供給されているが、作動温度が作動限界温度に近づくにつれ、蒸発潜熱が減少し、必要流量が増加する。この必要流量を満たすため、作動流体の流量は増加し、不足分は顕熱輸送で補われる。しかし、ある温度に達すると必要流量を流量の増加や顕熱での熱輸送で補うことが出来なくなり、ドライアウトが起こる。この温度が作動限界温度であると考えられる。

作動限界に関する実験結果をまとめて Fig. 9 に示す。熱負荷が低い状態では作動限界温度は低く、熱負荷が増すとともに高くなる傾向を示している。熱負荷が大きい領域では作動限界温度は高いが熱負荷の増加とともに低くなる。そして最大熱負荷の領域では急激に低下する。ただしこの領域では動作が不安定であり、再現性にも乏しい。このような作動限界の特性は熱伝達特性が圧力振動の特性によって変化している様子と同じであり、作動限界の特性もやはり、圧力振動の特性に依存しているものと考えられる。

4. 結論

自励振動ヒートパイプの作動限界について実験的に検討を行った。実験では振動流の振幅の不足の効果を除くため、逆止弁付きヒートパイプを用いた。

実験では作動温度限界と熱輸送量の限界である最大熱輸送量という二つのタイプの作動限界が観察された。作動限界温度を決定する主要な要素は作動温度が臨界温度に近くなることによる潜熱の減少であると考えられる。また最大熱輸送量は蒸発管での蒸気泡の成長によってもたらされると考えられる。

しかし、自励振動ヒートパイプの動作可能範囲を完全に把握するためには、低温領域まで含めた体系的な実験が必要であると考えられる。

参考文献

- H. Akachi and F. Polasek, Pulsating Heat Pipes, Proc. 5th Int. Heat Pipe Symp., pp. 208-217, 1996
- Y. Miyazaki and H. Akachi, Self-Excited Oscillation of Slug Flow in a Micro Channel, Proc. 3rd Int. Conf. Multiphase Flow, 1998
- Y. Miyazaki and M. Arikawa, Oscillatory Flow in Oscillating Heat Pipe, Proc. 11th Int. Heat Pipe Conf., pp. 367-372, 1999
- Y. Miyazaki, F. Polasek and H. Akachi, Oscillating Heat Pipe with Check Valves, Proc. 6th Int. Heat Pipe Symp., pp. 389-393, 2000

(平成14年12月9日受理)