

温度制御可能な自励振動ヒートパイプの研究

宮崎 芳郎* 岩田 直子** 小川 博之** 福吉 芙由子**

Study on Temperature Controllable Oscillating Heat Pipe

Yoshiro Miyazaki, Hiroyuki Ogawa, Naoko Iwata and Fuyuko Fukuyosi

Spacecraft for future scientific missions demand evolutionary thermal control technologies with small resources of power and weight. An accurate temperature control technology of light weight is especially important. We proposed VC-OHP (Variable Conductance Oscillating Heat Pipe) as a candidate for such a requirement. VC-OHP is a new concept of a temperature control device, which consists of an oscillating heat pipe and a reservoir. The thermal conductance of the heat pipe can be varied with assist of the reservoir and the heating section temperature can be controlled. This paper describes the analytical study on temperature control mechanism of VC-OHP.

1. はじめに

宇宙における熱制御技術は地球を周回する実用の人工衛星に対しては一応の完成の域にある。これに対し、これから重要性を増す科学観測、宇宙探査のための宇宙機は地球周回軌道とは異なる厳しく多様な宇宙環境に対応しなければならない。また、搭載される観測機器などは高い精度の温度制御が求められるのに対し、重量、電力のリソースは制限される方向にある。このため、複雑な運用による発熱量の変化や放熱環境の変化に対しても搭載機器の温度を一定に保つように受動的に放熱能力（熱コンダクタンス）を変えることができる可変コンダクタンス熱制御システムが必要とされている(1)。

熱コンダクタンスを変える方法はサーマルルーバやサーマルスイッチ等、いくつかの方法があるが、LHP(Loop Heat Pipe)や TPFL(Two-Phase Fluid Loop)等の二相熱輸送システムの熱コンダクタンスを制御する方法が制御範囲、制御精度や重量等の点で優れていると思われる(2)。これらの二相熱輸送システムは放熱部が細管で構成されており、蒸気が細管内で凝縮しながら蒸気泡と凝縮液のプラグが管軸方向に分布した二相流の状態で行われている。このような伝熱様式では蒸気泡の部分だけが伝熱面として有効であるのでループ内の作動液の量により、凝縮部の有効伝熱面積を変え、熱コンダクタンスを制御することが出来る。ループ内の作動液の量はループとリザーバの間で液を移動させることによって行う。

* 宇宙通信工学科 ** JAXA

OHP(Oscillating Heat Pipe: 自励振動ヒートパイプ)は細管だけで構成されており、凝縮部の機能、構造は基本的には LHP や TPFL と同じである。したがって OHP にリザーバを設ければ可変コンダクタンスの機能が得られる(3)。

本論文では VC-OHP の熱伝達現象を単純な熱節点を用いてモデル化し、温度制御の機構を解析的に検討している。

2. VC-OHP の解析モデル

2-1 ヒートパイプの熱コンダクタンスと動作特性

LHP や OHP 等のヒートパイプを介し熱源から冷却源まで熱を輸送する現象は Fig.1 に示すように熱抵抗が直列に接続されたモデルで表される。

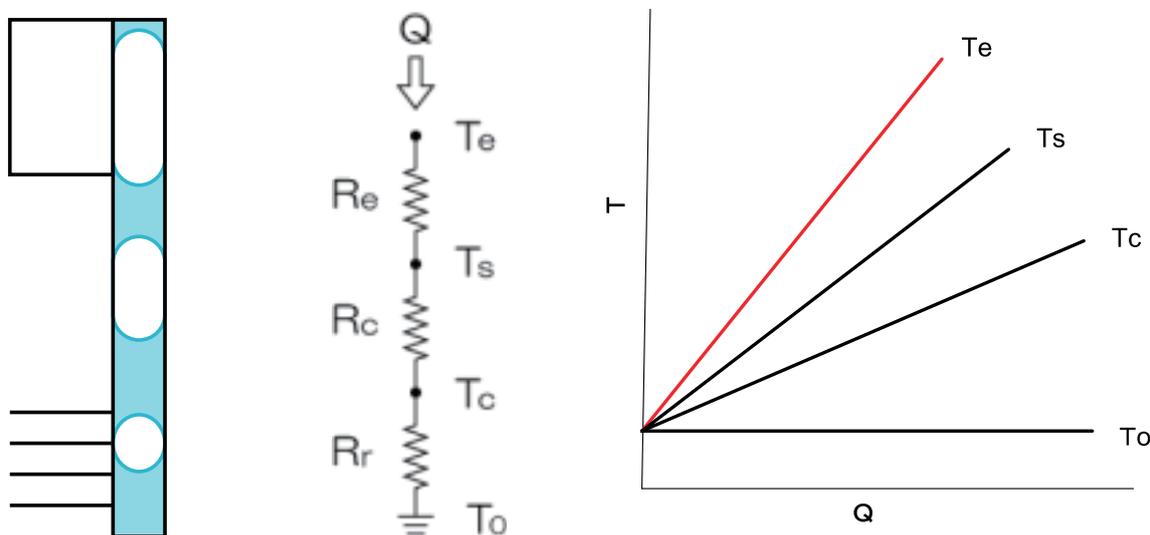


Fig. 1 Analytical model of fixed conductance heat pipe

ヒートパイプが正常に動作している範囲では熱コンダクタンスは一定であると考えてよい。この場合、ヒートパイプの各部の温度、加熱部： T_e 、作動流体： T_s 、冷却部： T_c 、と冷却源の温度 T_o の温度差は熱負荷 Q に比例して変化する。

ヒートパイプをリザーバに接続し、リザーバの圧力を一定に保てばヒートパイプの作動流体の圧力も一定に保たれ、作動流体の温度 T_s はその圧力の飽和温度となる。冷却部と冷却源の間の熱コンダクタンスは一定であるので冷却部と冷却源の温度差は熱量に比例する。作動流体と冷却部の間の熱コンダクタンスはこの条件を満たすように変化する。LHPでは加熱部と作動流体の間の熱コンダクタンスは変化しないので、その温度差は熱量に比例する。Fig. 2 にその様子を模式化して示す。

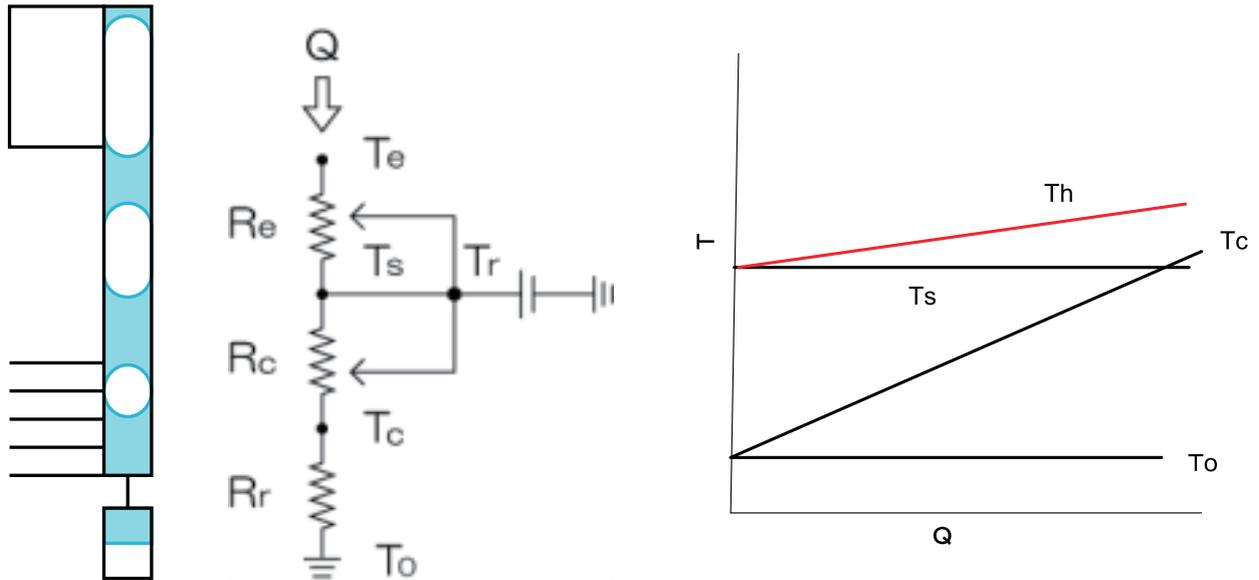


Fig. 2 Analytical model of variable conductance heat pipe

作動流体と冷却部間の熱コンダクタンスが変化するメカニズムを Fig. 3 に示す。熱負荷が小さいとヒートパイプの温度の低下とともに蒸気圧が低くなり、リザーバから作動液がヒートパイプに流入する。この液は冷却側に送られ、冷却部の蒸気泡の割合が小さくなり、その結果、実効的な凝縮伝熱面積が減り、熱コンダクタンスが小さくなる。この現象は液ブロック (Liquid Blockage) と呼ばれる。熱量が増すと逆に液がヒートパイプの冷却部からリザーバに移動し、実効的な凝縮伝熱面積が増し熱コンダクタンスが大きくなる。

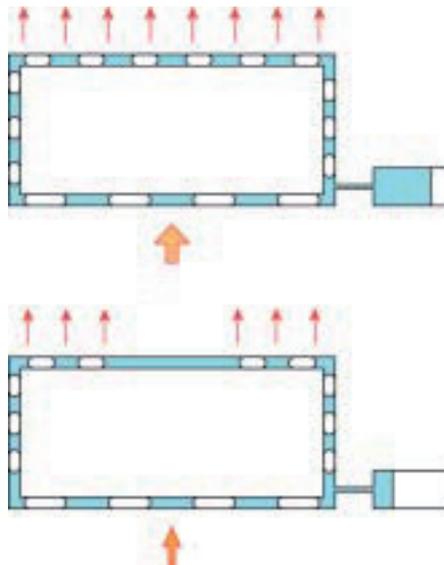


Fig. 3 Effect of liquid blockage

2-2 固定コンダクタンスと可変コンダクタンスの解析モデル

ヒートパイプを介し熱源から冷却源まで熱を輸送する現象は Fig. 1 と Fig. 2 に示すように熱抵

抗が直列に接続されたモデルで表され、熱量と各部の温度の関係は次式で表される。

$$Q = Ce(Te - Ts) \quad (1)$$

$$Q = Cc(Ts - Tc) \quad (2)$$

$$Q = Cr(Tc - To) \quad (3)$$

ここで Q は熱量、 Te 、 Ts 、 Tc 、 To は各々、加熱部、作動流体、冷却部、冷却源の温度、 Ce 、 Cc 、 Cr は各々、加熱部と作動流体、作動流体と冷却部、冷却部と冷却源のあいだの熱コンダクタンスである。

固定コンダクタンスヒートパイプの場合、 Te 、 Ts 、 Tc が未知数である。

リザーバを用い、作動流体の温度をリザーバの温度に保持すればヒートパイプ内の液量が変わり、蒸発および凝縮の実効伝熱面積が変わるため熱コンダクタンスが変化する。この条件は次式で表される。

$$Ts = Tr \quad (4)$$

$$Ce = f_1(\alpha) \quad (5)$$

$$Cc = f_2(\alpha) \quad (6)$$

ここで、 Tr はリザーバ温度、 α はヒートパイプのポイド率である。

2-3 液量と熱コンダクタンス

ヒートパイプの冷却部の温度は放熱量と冷却源の温度より定まり、作動流体の温度はリザーバの圧力によって定まる。したがって冷却部ではこの境界条件を満たす熱コンダクタンスとなるように液ブロックの程度が変わる。

加熱部温度は加熱側の熱コンダクタンスを定める境界条件としては働かない。したがって加熱側の液量と熱コンダクタンスは別の要因によって定まる。

LHP では加熱側の液量は毛細管構造内で気液界面が形成されるという条件で定まり、熱コンダクタンスは基本的には変化しない。しかし OHP の場合、加熱部に定まった気液界面が形成されることはなく、作動流体の封入量によって液量が増減する可能性がある。

OHP の代表的な流動パターンを Fig. 4 に示す。

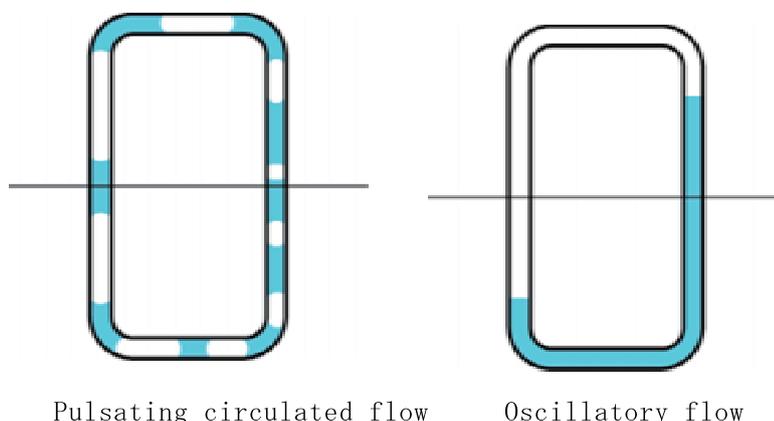


Fig. 4 Two types of flow pattern of OHP

振動流の場合の有効伝熱面積とボイド率 α の関係を単純化して Fig. 5 に示す。

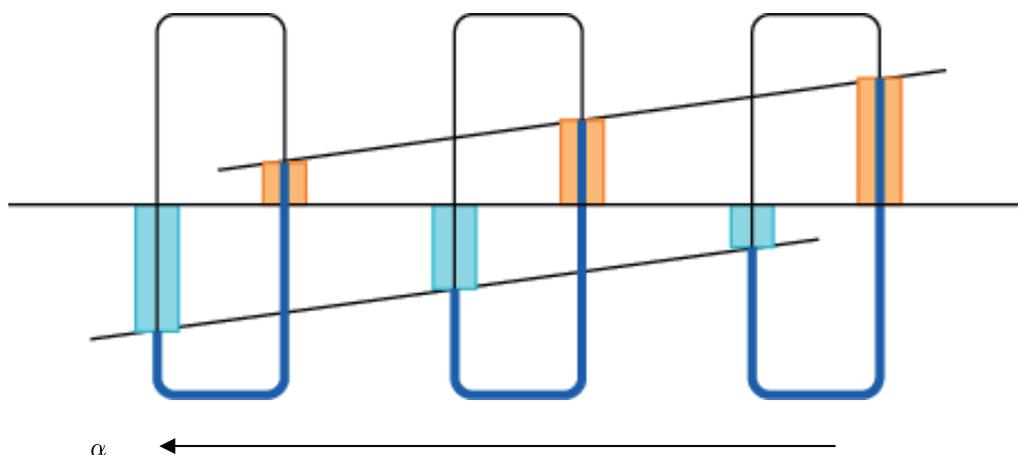


Fig. 5 Effective heat transfer area in the case of oscillatory flow

有効伝熱面は加熱側は液が侵入する部分、冷却側は蒸気が侵入する部分と考え、作動流体の振動の振幅が同じとすれば冷却側の有効伝熱面積は α に比例し、加熱側の有効伝熱面積は $1 - \alpha$ に比例すると考えられる。したがって、熱コンダクタンスは単純化して次のように表される。

$$C_e = C_{e0}(1 - \alpha) \quad (7)$$

$$C_c = C_{c0}\alpha \quad (8)$$

ここで C_{e0} 、 C_{c0} は各々加熱側熱コンダクタンスと冷却側熱コンダクタンスの最大値を表す。脈動循環流の場合、正常に動作していれば LHP と同じように加熱部の気液分布は変わらず、熱コンダクタンスは一定である可能性がある。このような仮定に基づけば、脈動循環流の場合の熱コンダクタンスは次式のようになる。

$$C_e = C_{e0} \quad (9)$$

$$C_c = C_{c0}\alpha \quad (10)$$

ここで α は冷却部のボイド率である。

2-4 可変コンダクタンス OHP の動作と作動範囲

冷却源の温度が 0 K とした場合のヒートパイプ各部の温度を模式的に Fig. 6 に示す。宇宙の熱真空環境では宇宙空間からの熱放射は無視できるので冷却源の温度は近似的に 0 K と考えてよい。

この環境で搭載機器の温度を常温に保つことを考えると、熱負荷が小さい場合ヒートパイプの加熱部と冷却部の温度差は大きくなり、熱伝導による熱リークが熱負荷を上回る領域が生じる。この領域ではヒートパイプは液単相となり、ヒートパイプは機能せず、ヒートパイプの熱コンダクタンスは一定となる。したがって、熱負荷と伝導による熱リークが等しい点が可変コンダクタンス領域の下限となる。この点の近傍でヒートパイプが動作を開始するため、加熱部側の熱コンダクタンスは不連続となる。

可変コンダクタンス領域の上限は冷却部の温度がリザーバの温度に達する付近にある。この点

の付近では作動流体の蒸気圧がリザーバの圧力より高くなり、ヒートパイプの液がリザーバに排出されることにより、ヒートパイプが動作を停止する。

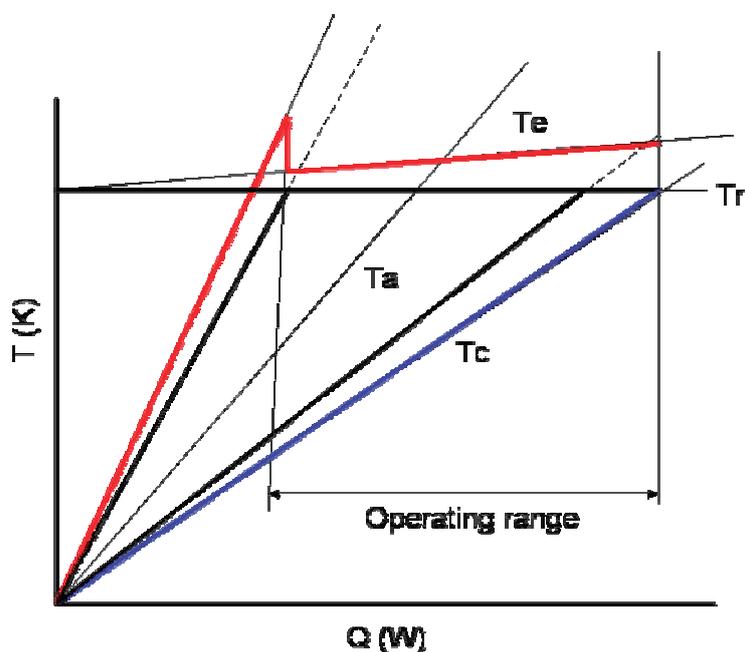


Fig. 6 Schematic diagram of VC-OHP operation

3. 考察

逆止弁を付けた脈動循環流方式のOHPにリザーバを付けたVC-OHPの実験結果をFig. 7に示す(3)。

冷却源である空気の温度:約 20°C とリザーバ温度:約 50°C の差が小さいため、実験範囲では作動限界の下限は現れていないが、基本的には解析モデルで示された作動特性と同様の特性を示している。加熱部:Hとリザーバ:Rとの温度差はほぼ熱量に比例しており、温度加熱部側の熱コンダクタンスもほぼ一定という仮定の妥当性を示している。

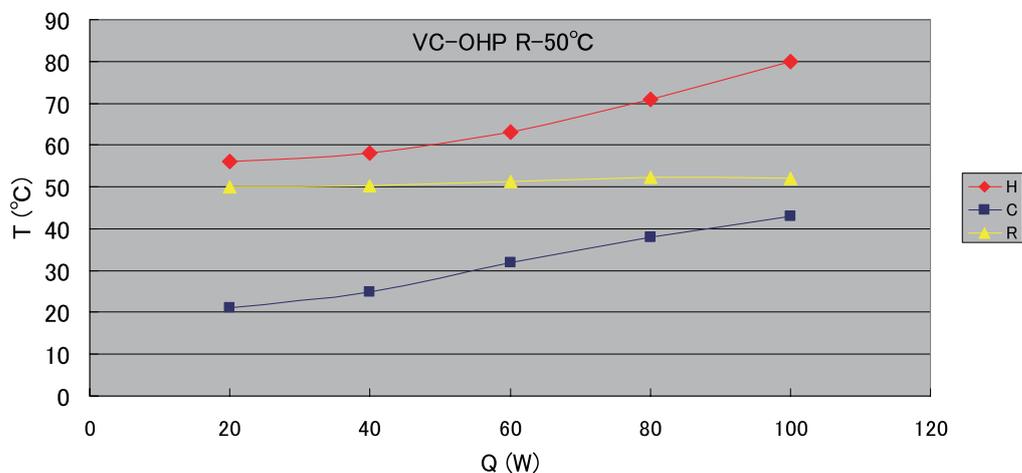


Fig. 7 Experimental results of VC-OHP (Atmospheric environment)

スペースチャンバーを用いた熱真空試験での実験結果の例を Fig. 8 に示す。加熱部の温度は H、冷却部の温度は C、リザーバ温度は R で表されている。

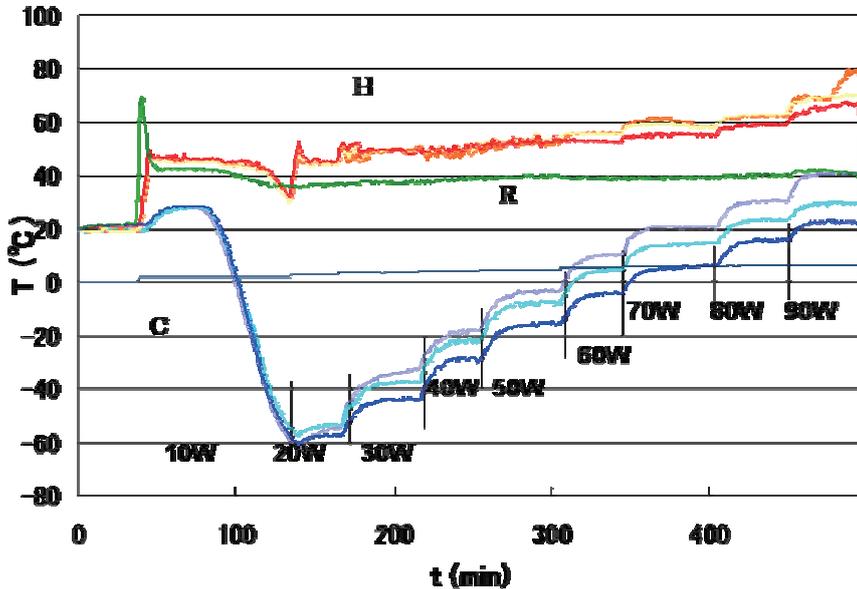


Fig. 8 Experimental results of VC-OHP (Thermal vacuum test)

10W では定常に達していないが、加熱部の温度がリザーバ温度 40°C より低くなっており、VC-OHP の作動限界以下であることが示されている。90W では冷却部の温度がリザーバ温度に近くなっており、作動範囲の上限付近にある。ここでは動作は安定せず、ローカルドライアウトの発生がみられる。すなわち、解析モデルで示されている作動範囲の下限は熱真空試験では 10W~20W の間にあり、上限は 90W 付近であることが示されている。

加熱部と冷却部の熱コンダクタンス C_e と C_c を Fig. 9 に示す。

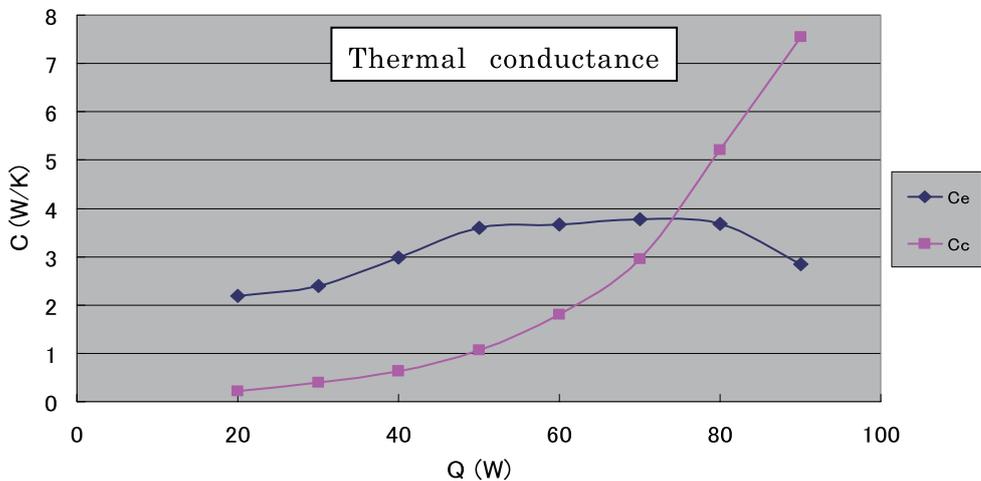


Fig. 9 Thermal conductance of VC-OHP

冷却部の熱コンダクタンスは作動範囲の下限付近では非常に小さく、冷却部が液でほぼ完全に満たされていることを示唆している。熱量の増加とともに熱コンダクタンスは急激に大きくなっており、液ブロックが熱量の増加とともに解消される様子が窺える。

加熱部の熱コンダクタンスは冷却部に比べると熱量による変化は小さいが、作動範囲の上限と下限に近い領域では熱コンダクタンスは小さくなる傾向がある。上限に近い部分ではヒートパイプ内の液量が少ないため、局所的なドライアウトが起こっているものと推測される。下限に近い部分では液は冷却部でサブクール状態になり、加熱部に流入するので単相の熱伝達部分が生じ、熱伝達率が低下するためではないかと思われる。

4. 結論

VC-OHP の熱伝達系を節点法により単純化した解析モデルを用いて、VC-OHP の動作特性の検討を行った。

解析モデルでは冷却側の熱コンダクタンスは作動流体と冷却部の温度差という境界条件を満たすように変化し、加熱側の熱コンダクタンスは変化しないと仮定した。

解析モデルで予測される VC-OHP の動作特性と実験結果とは基本的にはよく一致している。

しかしリザーバ温度と冷却源温度との差が大きいと、低熱量領域で加熱部側の熱コンダクタンスが低下する現象が見られる。これは作動流体がサブクール状態で加熱部に流入するためと考えられる。また、高熱負荷側では液量が少なくなるためローカルドライアウトが起こりやすくなり、加熱側の熱コンダクタンスの低下が見られる。

これらの効果を解析モデルに含める検討が必要である。

参考文献

1. 小川、宇宙衛星熱制御技術開発研究の戦略提案、平成 18 年度宇宙航行の力学シンポジウム、pp.83-86,2006
2. 宮崎、放熱システムの熱コンダクタンス制御、平成 18 年度宇宙航行の力学シンポジウム、pp.79-82,2006
3. 宮崎、可変コンダクタンス自励振動ヒートパイプ、平成 19 年度宇宙航行の力学シンポジウム、pp.187-190,2007

(平成 21 年 3 月 31 日受理)