逆止弁付自励振動ヒートパイプの内部流動モデル構築 Mathematical Modeling of Oscillating Heat Pipes with Check Valves

○大丸 拓郎 吉田 周平 (東北大院) 永井 大樹 (東北大)

岡本 篤 安藤 麻紀子 杉田 寛之 (JAXA)

Takuro Daimaru, Shuhei Yoshida, Hiroki Nagai

Tohoku University, 6-6-01 Aramaki-Aza-Aoba, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8579

Atsushi Okamoto, Makiko Ando, Hiroyuki Sugita

Japan Aerospace Exploration Agency, 2-1-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki 305-8505

A mathematical model of Oscillating Heat Pipes (OHPs) with check valves has been constructed. The mathematical model was a one-dimensional slug flow model. Movement of liquid slugs was governed by pressure differences among vapor plugs and by pressure drops in the tubes. Check valves were reproduced by change of liquid slug's momentum. As a result, check valves caused the circulation flow in OHP.

Key Words: Oscillating Heat Pipes, Mathematical Modeling, Check Valves

1. 背景・目的

近年の研究により、逆止弁の付いた自励振動ヒートパイプ (OHP) が通常のタイプに比べて非常に高い熱輸送性能を発揮することが明らかとなっている⁽¹⁾。現在、JAXA においても、このタイプの OHP の宇宙応用が検討されており⁽²⁾、流動現象の解明と熱輸送性能の予測を可能にすることが急務である。しかしながら、これまで逆止弁付 OHP の数値モデルを作成した例はない。そこで、本研究では数値モデルを構築し、これらの課題を解決することを目的とする。

2. 内部流動モデル

構築した内部流動モデルは流路に沿った 1 次元モデルである。流動様式は気液が分離したスラグ流であることを仮定している。流動現象はエネルギー保存則・運動量保存則を時間発展的に解くことによって再現される⁽³⁾。

2.1 エネルギー保存則

管壁、液体スラグ、気体プラグのそれぞれの温度はエネルギー保存則を解くことにより求める。管壁のエネルギー保存則は一次元の熱伝導方程式である。右辺の第一項が加熱部、冷却部における外部との伝熱を、第二項が作動流体との強制対流による伝熱を表している。離散化手法にはオイラー陰解法を用いる。

$$c_{p,w} \rho_w A_w \frac{\partial T_w}{\partial t} = q_{ex} p_{out} - q_{w-f} p_{in} + k_w A_w \frac{\partial^2 T_w}{\partial z^2} \quad (1)$$

液体スラグのエネルギー保存則も同様に一次元の熱伝導方程式であり、管壁との強制対流項を含んでいる。モデル中では、オイラー陽解法を用いて離散化する。

$$\left[c_{p,l} \rho_l A_{cr} \frac{\partial T_l}{\partial t} = q_{w-f} p_{in} + k_l A_{cr} \frac{\partial^2 T_l}{\partial z^2} \right]_i \quad (2)$$

各気体プラグにおける温度は同様であると仮定し、管壁との強制対流熱伝達、隣り合う液体スラグとの熱伝導を考慮して算出する。

$$dQ_{v,j} = q_{w-f} p_{in} (z_{f,j} - z_{b,j}) + k_l A_{cr} \frac{\partial T_l}{\partial z} \Big|_{z_{f,j-1}} - k_l A_{cr} \frac{\partial T_l}{\partial z} \Big|_{z_{b,i}} \quad (3)$$

$$\left[T_v^{t+1} = T_v^t + \frac{dQ_v}{c_{v,v} \rho_v V_v} \right]_j \quad (4)$$

2.2 運動量保存則

液体スラグの運動は、隣り合う気体プラグ同士の圧力差、および直管、ターン部における管摩擦損失によって支配される。

$$\left[\frac{dm_i}{dt} = A_{cr} (dp_v - dp_r - dp_k) \right] \quad (5)$$

各タイムステップにおける液体スラグの移動量は質量流量の値から決定される。

$$\dot{m}_i^{t+1} = \dot{m}_i^t + \dot{m}_i \quad (6)$$

$$\Delta z_i = \frac{\dot{m}_i^{t+1}}{A_{cr} \rho_{l,i}} dt \quad (7)$$

2.3 気泡の発生・成長モデル

本モデルでは液相の中での気泡の発生・成長が再現可能となっている。直径が管内径に満たない小さな気泡は無視し、以下に示す条件を全て満たした場合に気泡が発生する。

(a) 液体スラグ内の過熱度 T_{sup}

$$T_w - T_l \geq T_{sup} \quad (8)$$

(b) 液体スラグの速度 u_l

$$u_l \leq 0.2 [m/s] \quad (9)$$

(c) 発生する気泡の圧力 P_v

$$P_v(T_l) > \max \left[\left(P_{sat}(T_v) + \frac{2\sigma}{r} \right)_j ; \left(P_{sat}(T_v) + \frac{2\sigma}{r} \right)_{j+1} \right] \quad (10)$$

発泡条件の過熱度 T_{sup} を 5°C に、液体スラグの最大速度 u_l を 0.2m/s に設定した。これらの値はフィッティングパラメータであり、Senjaya ら⁽⁴⁾が OHP 内部で気泡が発生する条件を実験的に検証した結果に基づいて値を決定している。

2.4 逆止弁モデル

逆止弁の効果は液体スラグの質量流量を変化させることにより再現する。液体スラグの前後のメニスカス位置が Fig.1 に示した逆止弁の位置 z_{cv} にオーバーラップした場合に質量流量の変化量を一方向に制限する。

$$z_{b,i} \leq z_{cv} \text{ and } z_{f,i} > z_{cv} \quad (11)$$

Fig.1 Computational domain.

2.5 計算条件

計算領域及び条件を Fig.1 に示す。流路は 8 ターンで、加熱部、断熱部、冷却部から構成されており、内径は 2mm、外径は 3mm である。逆止弁は各ターンの断熱部中央に 1 個ずつ加熱部に向かう向きに設定した。作動流体にはエタノールを用い、充填率は 55% である。初期の気液分布に関してはこれまでに影響を考察しており⁽⁹⁾、本研究では図に示すように、100 個の微小な液体スラグを均等に配置した。また、姿勢角は 0° において計算を行った。

3. 結果および考察

Fig.2 に全液体スラグの運動量の和を(a) 逆止弁が無い OHP のケース、(b) 逆止弁付の OHP のケースに関して示した。左図より、逆止弁が無いタイプの OHP では加熱開始から 30s ほどで自励振動が始まり、徐々に振幅が大きくなっている様子が見られる。一方で、右図、逆止弁を付加したタイプの結果では先の結果と同様に、運動量が振動しているが、正の値のみをとっていることから、内部流動が一方方向の脈動循環流⁽¹⁾になっていることが分かる。加えて、逆止弁を付加したことにより、振動が始まるタイミングが早くなっており、OHP のスタートアップ特性が改善していることが分かる。

次に、脈動循環流発生の要因について数値解析結果から考察する。そこで、液体スラグがターン間を大きく流動する時間帯の気液分布を Fig.3 に示す。なお、図中の赤丸は流動に関与していると思われる気体プラグに関して示している。まず、流動が始まる前の左図の気液分布に着目する。ここでは加熱部に流入している液体スラグの中に微小な気泡が発生している。次に、中央の図を見てみると、先ほどの微小な気泡が、加熱部で熱せられ、圧力が高くなることで、成長していることが分かる。気泡はこのまま成長を続け、右図では大きく隣のターンへと液体スラグを押し出しており、液相自体は次のターンの加熱部へと流入している。このときに、気体プラグが液相を押し出している反対側のターンには逆止弁が存在しているため、これがストッパーの役割を果たすことで、気体の高い圧力を効率よく一方方向の流れを起こすことに用いることができていると考えられる。以上の気泡の発生、成長、拡大の一連のパターンが内部流動に多く見られたことから、逆止弁付 OHP の中に発生した、脈動循環流のメカニズムにおいて、気泡の発生が大きな役割を果たしていることが分かる。

(a) w/o check valve. (b) w/ check valve.

Fig.2 Momentum of liquid slugs.

Fig.3 Generation and expansion of a vapor plug.

結言

逆止弁付 OHP の内部流動モデルを構築し、流動特性に関して検討を行った。その結果、逆止弁を採用することでスタートアップ特性が改善すること、および OHP 内の流動が振動流から脈動循環流に変化することが明らかとなった。

Nomenclature

A	:cross section, m^2	Subscripts	
c_p	:specific heat, $J/kg \cdot K$	b	:back menisci
c_v	:specific heat at constant volume, $J/kg \cdot K$	f	:working fluid / front menisci
D	:diameter, m	i	:liquid slug index
k	:thermal conductivity, $W/m \cdot K$	j	:vapor plug index
$\dot{m}$	:mass flow rate, kg/s	K	:turn
p	:perimeter, m	l	:liquid
q	:heat flux, W/m^2	sat	:saturated condition
Q	:heat, W	v	:vapor
u	:velocity, m/s	w	:tube wall
V	:volume, m^3		
z	:axial direction coordinate, -		
ρ	:density, kg/m^3		
τ	:shear stress, N/m^2		
dP	:linear pressure drop, Pa/m		
σ	:surface tension, N/m		

参考文献

- (1) Miyazaki, Y., Polasek, F., Akachi, H., Proc. of the 6th Int. Heat Pipe Symp., Thailand, (2000), pp. 389-393.
- (2) Okamoto, A., Ando, M., Sugita, H., Proc. of 17th Int. Heat Pipe Conf., (2013), Paper No. 115.
- (3) Holley, B., Faghri, A., Analysis of Pulsating Heat Pipe with Capillary Wick and Varying Channel Diameter, Int. journal of heat and mass transfer, 48.13, (2005), pp. 2635-2651.
- (4) Senjaya, R., Inoue, T. Bubble Generation in Oscillating Heat Pipe, Applied Thermal Eng., 60, (2013), 251-255.
- (5) Daimaru, T., Yoshida, S., Nagai, H., Okamoto, A., Ando, M., Sugita, H., Proc. of 44th Int. Conf. on Environmental Systems, Tucson, (2014), Paper No. ICES-2014-121