SEMOS Heat Pipe に関する研究*

西尾茂文^{*1}, 永田真一^{*1}, 馬場史郎^{*2}

Study of SEMOS Heat Pipe

Shigefumi NISHIO^{*3}, Shinichi NAGATA and Shiro BABA^{*3} Institute of Industrial Science, The University of Tokyo,
4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo, 153-8505 Japan

The SEMOS-HP (Self-Exiting Mode Oscillating-Flow Heat Pipe) consists of a closed capillary loop meandering between heated and cooled parts. The closed loop is vacuumed and then it is charged with an operating liquid up to a volume fraction. When the temperature difference between the heated and cooled parts is increased beyond a critical value, the operating fluids lining up as liquid columns and vapor plugs along the closed loop starts to oscillate and circulate in the loop. In the present paper, the effects of some system parameters on the heat transport characteristics of the SEMOS-HP were experimentally investigated and the following results were obtained. A vertical SEMOS-HP with R 141 b and 0.8 mm in inner diameter can transport sufficient amount of heat. The SEMOS-HP can operate at inclination angles ($=0$ for the horizontal plain) down to 3 degree. The effective thermal conductivity of SEMOS-HPs is not sensitive to wall material and initial vacuum of the tube. The contribution of sensible heat transport to the total heat transport is not negligible. Finally, a stop valve effect of liquid columns is presented as one of the mechanisms driving the pulsating flow of the operating fluids.

Key Words: Heat Pipe, Evaporation, Condensation, Oscillating Flow, Pulsating Flow

1. はじめに

本稿では、封入流体の流動を利用して、小さい温度差で大量の熱を輸送するデバイスをヒートパイプ(HPと略記)と総称する。HPの典型は、高温部で蒸気を生成し、低温部でその蒸気を凝縮し、凝縮液を高温部に還流する形式(液還流式HPと呼んでおく)のものである。液還流式HPには、凝縮液の還流を重力により行うサーモサイフォンと、毛管力により行う毛管力型HP(狭義のHP、C-HPと略記)とがある。

さて、周知のように、高集積化および高密度実装化によりLSIチップの発熱密度は急速に増大しており、チップからの発熱を放熱するために、放熱面積を稼ぐ熱拡散板や放熱部まで熱を輸送する熱輸送板などが必要となっている。熱拡散板および熱輸送板の双方とも、実効熱拡散率や実効熱伝導率を高めるためにHPを内蔵することが考えられる。LSIチップを内蔵した電子

機器のコンパクト化を考えると、当然、熱拡散板および熱輸送板の双方とも薄板化が求められるため、必然的にHPの細径化が求められることになる。HPの細径化は、この他にも、3次元LSI内部からの熱除去やHP外部の熱抵抗軽減あるいはレーザーダイオード等の微細素子の冷却などの観点からも求められている。

液還流式HPは、外部動力の供給無しで作動する受動型熱デバイスとして優れた特徴を有するが、こうした細径化の観点に立つと、最大の問題はHP断面寸法の減少とともに熱輸送量の上限界すなわち熱輸送限界が急速に減少することである。例えば、一辺1mmの正方形断面を有するマイクロC-HP(断面寸法を、毛管力が発現する気液界面曲率半径程度以下に小さくしたC-HP)では、水を作動流体とした場合の熱輸送限界は高々0.4W(作動温度により変化)⁽¹⁾程度である。

一方、近年、作動流体の振動流による効果的熱輸送を利用した振動流式HP(O-HPと略記)が注目されている。O-HPは、作動流体の相変化を利用しない単相流型と、相変化を利用する二相流型とに大別される。単相流型O-HPは、加振器等により強制的に駆動され

* 原稿受付 2001年9月14日。

^{*1} 正員、東京大学生産技術研究所(〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)。^{*2} 東京大学大学院。

E-mail: nishios@iis.u-tokyo.ac.jp

た振動流の拡散促進効果⁽²⁾を利用する能動型熱デバイスで、Dream Pipe⁽³⁾や COSMOS-HP(Counter-Stream-Mode Oscillating-Flow Heat Pipe)⁽⁴⁾⁽⁵⁾などが考案されている。二相流型 O-HP は、高温部と低温部とを結ぶ閉ループ内に所定の封入率 α の液体を封入したもので、自励的に発生する振動流あるいは脈動循環流による熱輸送を利用した受動型熱デバイスである。これは、LCHP⁽⁶⁾、蛇行閉ループ熱輸送デバイス⁽⁷⁾、気泡駆動型熱輸送デバイス⁽⁸⁾あるいは SEMOS-HP (Self-Exciting-Mode Oscillating-Flow Heat Pipe)⁽⁵⁾などと呼ばれている。振動流式 HP は細径化に適している⁽⁵⁾と考えられ、筆者らはこれまで、SEMOS-HP については、振動流あるいは脈動循環流の駆動機構を示唆する蒸気プラグ伝播現象、熱輸送特性（熱輸送量や実効熱伝導率など）に対する液体封入率・管寸法・温度差あるいは作動液体などの影響について報告してきた⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

本稿では、これらを背景として SEMOS-HP について以下の研究目的を設定した。(1)細径化の可能性探索の観点から、（これまでに内径 $D=1.8\text{mm}$ までの作動は確認した⁽⁸⁾ので） $D=0.8\text{mm}$ での作動可能性を検討する。(2)前報まで⁽⁷⁾⁽⁸⁾は内部流動観察を重視しガラス管を用いてきたが、実用 HP の観点から管材料の影響を検討する。(3)実用性あるいは汎用性を検討する観点から、HP の姿勢の影響を検討する。(4)製造コストおよび安定性の観点から、熱輸送特性に対する初期真空度の影響を検討する。(5)同一形状の SEMOS-HP において作動液体が水の場合に比べて（蒸発潜熱が水のほぼ 1/10 である）R141b の場合の熱輸送量が約半分程度であること⁽⁸⁾を鑑み、熱輸送量に占める潜熱・顕熱割合を検討する。(6)気液の流動を観察し、二相流動の駆動機構を検討する。

2. 実験装置および実験方法

図 1 に実験装置の概略図を示した。実験装置の中核部は、4本の直管と上下各2組の U 字管とにより構成される 2-turn 閉ループの SEMOS-HP である。この SEMOS-HP の直管部は、内部流動を観察するためガラスにより作成した。SEMOS-HP の総延長は 1836mm、高さは 396mm である。SEMOS-HP の上・下の各々 55mm を恒温槽より供給される循環水により冷却・加熱し、残りの中間部分は真空断熱を施した。加熱・冷却部に相当する U 字管部分は、壁材料の影響を検討するため、銅管あるいはガラス管にて作成した。実験対象の管内径は $D=2.4\text{mm}$ および 0.8mm 、姿勢は水平面から測った冷却部の角度（冷却部が上にある場合を正） $\theta=0, 3$ および 90 度について行い、試験流体は水、

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

エタノール、R141b である。冷却水入口温度は 20°C で一定とし、加热水入口温度を調整して温度差を設けた。以下で使用する温度差 ΔT は加热水、冷却水の入口温度差である。

封入液体の前処理および液体の封入方法については前報⁽⁸⁾を参照されたい。熱輸送量 Q は、デジタル流量計により測定した冷却水の流量と、素線径 0.1mm の K 型熱電対により測定した冷却水出入口温度差より算出した。また、実効熱伝導率 k_{ef} は、加熱・冷却部の U 字管内部の各頂点で測定した作動流体温度差 ΔT_f より温度勾配 Ω を求め、上記の熱輸送量 Q を Ω と流路総断面積との積で割って求めた。したがって、本報告で用いる k_{ef} は「流体温度差基準の実効熱伝導率」と呼ぶべき値であるが、以下では単に実効熱伝導率と呼ぶ。なお、実験に際しては、管全体を上下に分け、2 台のハイスピードカメラを用いて 500fps で気液の流動状況の記録を行った。

3. 実験結果

ここで示す結果は、特に断らない限り、U 字管を含めてガラス製で下方加熱鉛直姿勢の場合の結果である。

3.1 細径化の可能性 図 2 に、内径 $D=0.8\text{mm}$ の場合の R141b の熱輸送量 Q を、加熱・冷却水入口温度差 ΔT をパラメータとして液体封入率 α に対して示した（付記参照）。この図より、R141b の場合、 $D=0.8\text{mm}$

Fig. 2 Heat transport rate of SEMOS-HP
(R141b, Glass tube, $D=0.8\text{mm}$)

Fig. 3 Dependence of heat transport rate of SEMOS-HP on tube diameter

においても本 HP が作動することが分かる。但し、水およびアルコールでは作動しなかった。これは、水やエタノールに対して R141b の粘性係数が小さい(水: 693.7、エタノール: 464.8、R141b: 392 μPas) ことと関連していると考えられる。また、文献(8)と比べると、 $D=0.8\text{mm}$ の場合の熱輸送量 Q は、 $D=2.4\text{mm}$ の場合のそれに比べてかなり小さいことがわかる。図 3 に、 $\alpha=0.5$ の場合の熱輸送量を、これまでの 2-turn 型 SEMOS-HP の測定値⁽⁷⁾⁽⁸⁾を含めて無次元管径 D/λ_0 (λ_0 は毛管長さ) に対して示した。破線で結んだ R141b-glass tube 系の測定値に注目すると、 $D/\lambda_0 > 1$ 程度では熱輸送量の管径依存性は弱く、 $D/\lambda_0 < 1$ 程度では管径

Fig. 4 Dependence of transport heat flux of SEMOS-HP on tube diameter

Fig. 5 Dependence of heat transport rate of SEMOS-HP on tube material

の減少とともに熱輸送量が減少し始めることをがわかる。

但し、以下のことに留意する必要がある。図 2 の二本の水平一点鎖線は先に示したマイクロ C-HP (直径 2mm の円形断面⁽⁹⁾および一辺 1mm の正方形断面⁽¹⁾で作動流体は水) の最大熱輸送量である。本 SEMOS-HP は直管 4 本により構成されているので、マイクロ C-HP についても 4 本分の値を示した。本 SEMOS-HP が $D=0.8\text{mm}$ でガラス製でもありまた作動液体が R141b で

Fig. 6 Dependence of effective thermal conductivity of SEMOS-HP on tube material

あることを考えると、本 HP の熱輸送量は $D=0.8\text{mm}$ でも（同一断面寸法の）C-HP の限界熱輸送量より有意に大きいと考えられる。また、図 4 は熱輸送量を流路断面積で割った輸送熱流束を管内径に対して示したものであるが、輸送熱流束は 0.8mm の場合でも未だ増大していることがわかる。これらのことは、SEMOS-HP が細径化に適していることを示していると考えられる。

3.2 壁材料の影響 作動流体が水、管内径が $D=2.4\text{mm}$ の場合について、図 5 に熱輸送量に対する壁材料の影響を、図 6 に実効熱伝導率 k_{eff} に対する壁材料の影響を示した（図 3 も参照）。図 5 より、当然のことながら同一の ΔT では、管材料がガラスの場合に比べて銅の場合の方が熱輸送量は増大している。一方、SEMOS-HP における二相流動が加熱部における発泡の影響を強く受けるとすれば、既存気泡核が多く存在すると考えられる銅管の方が実効熱伝導率が高くなると推測されるが、図 6 に示した実効熱伝導率は、双方で大差ない値となっている。このことは、SEMOS-HP における二相流動の駆動に対して核沸騰のような発泡の影響が小さいことを示唆していると考えられる。

3.3 姿勢の影響 図 7 は、作動流体が R141b、管内径が $D=2.4\text{mm}$ の場合について、壁材料の影響を含めて姿勢の影響を示したものである。銅管、ガラス管いずれの場合も、SEMOS-HP は水平姿勢に近い $\theta=3^\circ$ 度でも作動することがわかる。但し、 $\theta=3^\circ$ 度では鉛直姿勢に比べて熱輸送量が大幅に低下しており、また本

Fig. 7 Dependence of heat transport rate of SEMOS-HP on tube material

Fig. 8 Dependence of heat transport rate of SEMOS-HP on initial vacuum

実験の範囲内では水平姿勢（ $\theta=0^\circ$ ）では本 SEMOS-HP は作動しなかった。

3.4 初期真空度の影響 図 8 に、 $D=2.4\text{mm}$ における R141b の熱輸送量（ $\Delta T=40\text{K}$ ）を管内初期ゲージ圧（作動液体を封入する前の管内ゲージ圧）に対して示した。図より、ゲージ圧が -600mmHg 以上では熱輸送量は小さいが、それ以下となると急速に上昇し、ゲージ圧が -700mmHg 程度となるとほぼ飽和する傾向にある。これは、C-HP が 0.010mmHg 程度の初期真空を要する⁽¹⁾のに比べると、SEMOS-HP の初期真空度に対する依存性が極めて小さいことを意味している。こ

Fig. 9 Visualization of flow pattern in SEMOS-HP (R141b, $\alpha=0.6$)

れは、C-HP では微量の不凝縮性ガス分子が凝縮部（低温部）に堆積するのに対して、SEMOS-HP では後述するように閉ループ内に脈動循環流が励起され不凝縮性ガスの堆積が起りにくいことに起因していると考えられる。なお、ゲージ圧が低い場合には脈動循環流が励起されるが、高くなると平均速度が低下し、振動流へと変化し、やがて振幅の小さな振動流となることが観察された。

3.5 流動様相と流動励起機構 図9は、ハイスピードカメラで撮影された管内の二相流動画像を気液で2値化し、管に沿った長さ x を縦軸に、時間 t を横軸として示した流動マップの典型（図5などに示したように $\alpha \sim 50\%$ 程度で Q が高くなるため、この封入率近くに注目した）を示したものである。黒い部分が液相、白い部分が蒸気相に対応している。

温度差 ΔT の大きい(b)~(d)では、比較的周期性をもった（逆流を伴う）脈動循環流が明瞭に観察できる。この図より、作動流体の循環速度を計算すると、 $\Delta T = 60\text{K}$ では約 0.32m/s 、 50K では約 0.30m/s 、 40K では 0.26m/s となり、 ΔT の減少とともに循環流速が低下することがわかる。ちなみに、(a)の $\Delta T=30\text{K}$ では循環流は形成されておらず、振動流となっている。

ここで、脈動循環流を励起する機構を考えてみる。図10は、図9(c)と同一図であり、以下に議論する時刻(1)~(5)を示したものである。この(1)~(5)の時刻における流動様相を模式的に図11に示した。因みに、時刻(1)を時刻原点とすると、(2)は 0.16sec 、(3)は 0.57sec 、(4)は 0.75sec 、(5)は 1.19sec である。図10からもわかるように、閉ループ内には3つの主蒸気プラグ（短い

Fig. 10 Flow pattern in SEMOS-HP (R141b, $\Delta T=50\text{K}$, $\alpha=0.6$) Fig. 11 Schematic flow pattern in SEMOS-HP (R141b, $\Delta T=50\text{K}$, $\alpha=0.6$)

液柱を含む)を挟んで3つの主液柱(短い蒸気プラグを含む)が存在している。図11では、主液柱を実線で、主蒸気プラグを点線で示した。この条件では脈動循環流が発生しているので、説明の都合上、循環流が下降する管を下降管、上昇する管を上昇管と呼び、まず主液柱A、Bおよび主プラグbaに注目する。

図10あるいは11の時刻(1)では、主液柱Aは下降管を下降、主液柱Bは上昇管を上昇し、主蒸気プラグbaは下降管内の加熱部直前にいる。時刻(2)では、プラグbaが加熱部に流入し成長し始めており、液柱Aは下降管内で停滞し、液柱Bは上昇管を上昇し続けている。時刻(3)では、プラグbaは一端が冷却部に至るまで成長し、液柱Aは下降管を緩やかに上昇(循環方向から見れば逆流)し、液柱Bは冷却部を通過し下降管に入っている。前報⁽⁸⁾で報告したように蒸気プラグは管壁との間に0.2~0.3mm程度の液膜を伴っており、またここで述べたようにプラグbaが加熱部で成長することから、蒸気プラグの成長は主として管壁との間の液膜の蒸発に起因していると考えられる。時刻(4)では、プラグbaは最大長さに近くなっており、液柱Aは下降管内で下降を再開し、液柱Bは時刻(1)における液柱Aのように下降管内で停滞している。時刻(5)では、プラグbaが冷却部で短縮し、液柱A、Bの間隔が狭くなっている。同様の過程は、主液柱B、Cおよび主蒸気プラグcb、あるいは主液柱C、Aおよび主蒸気プラグcaについても成立する。

上述の過程において、循環流の駆動力の生成は、時刻(2)、(3)における主蒸気プラグbaの成長過程に代表されと考えられる。すなわち、時刻(1)で下降管内を下降している液柱Aの両端間差圧 ΔP_A は、加熱・冷却部に位置する蒸気プラグ(ba、ac)に随伴する液膜界面温度に相当する飽和圧力差に近いと考えられる。加熱・冷却部における液膜界面温度は液膜内の熱伝導に関連して時間変化する。したがって、 ΔP_A はプラグbaの成長とacの凝縮に同期して増大し、液柱Aを減速・停滞・逆流させ、プラグbaの成長に対して、いわば「逆止弁」の効果を果たす。このため、プラグbaの成長は時刻(1)の液柱Bの上昇管内上昇運動を加速し、循環流を加速することとなる。

ΔT の減少とともに、主液柱が上昇管内を上昇するに足る ΔP が発生しなくなり、図9に示したように脈動循環流から振動流へと遷移すると考えられる。

3.6 熱輸送機構 図9、10の映像より主蒸気プラグは比較的周期的に成長・収縮を繰り返していることがわかる。そこで主蒸気プラグの長さ $L[t]$ を測定し、次式より潜熱輸送量 Q_{lh} を推定した。

$$Q_{lh} = \frac{1}{\tau_0} \int_0^{\tau} A \left(\frac{dL}{dt} \right) \rho_v h_{lv} dt$$

但し、 A は流路断面積、 ρ_v は蒸気相密度、 h_{lv} は蒸発潜熱、 τ は単一蒸気プラグの成長あるいは凝縮時間、 τ_0 は両者の和である。なお、一つの蒸気プラグが加熱・冷却部にわたる場合があり、この場合は上式の Q_{lh} には現れない潜熱輸送があり得るので、 Q_{lh} は潜熱輸送量の最小値に相当すると考えられる。下表はこの潜熱輸送量と全熱輸送量との比を示したものである。潜熱輸送は、本実験条件では全体の15%以下であることがわかる。このことは、本実験条件におけるSEMOS-HPでは、相変化は脈動循環流あるいは振動流の駆動力生成に寄与し、熱輸送については液柱の運動による顕熱輸送が無視できないことを示唆している。

Table 1 Ratio of latent heat transport to total heat transport (R141b)

	$\alpha = 0.5$	$\alpha = 0.6$	$\alpha = 0.7$	$\alpha = 0.8$	$\alpha = 0.9$
$\Delta T = 40K$	0.130	0.144	0.126	0.103	0.053
$\Delta T = 50K$	—	0.134	—	—	—
$\Delta T = 60K$	—	0.140	—	—	—

4. まとめ

- (1) $D=0.8mm$ のガラス管製SEMOS-HPの作動を、作動液体がR141bである場合について確認した。また、管断面積基準の輸送熱流束は $D \geq 0.8mm$ では D の減少とともに増大する。したがって、SEMOS-HPは細径HPに適していると考えられる。
- (2) 銅管製およびガラス管製SEMOS-HP(作動流体はR141b)の実効熱伝導率は同程度である。これは、発泡点密度などがSEMOS-HPの作動機構と密接な関連にはないことを示唆している。
- (3) SEMOS-HP(作動流体はR141b)の熱輸送特性は、60mmHg程度以下の初期真空であれば初期真空の影響を受けない。
- (4) SEMOS-HP内の二相流動様相は、 ΔT の増大とともに振動流から脈動循環流へと変化する。この脈動循環流の励起機構として液柱の逆止弁効果を提案した。
- (5) SEMOS-HPの熱輸送においては、本実験条件下では潜熱輸送に対して顕熱輸送も無視できない。

最後に、本研究は文部科学省科学研究費補助金特定領域研究「超機能グローバル(領域略称)」(課題番号13025214)の補助を得て行われたものであり、記して謝意を表す。

文 献

- (1) Peterson, G.P., An Introduction to Heat Pipes, (John Wiley & Sons Inc., (1994), 175.
- (2) Watson, E.J., J.Fluid Mech., Vol.133(1983), 233.
- (3) Kurzweg, U.H. and Zhao, L., Phys.Fluids, Vol.27 (1984), 2624.
- (4) Nishio, S. et al., Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.38 (1995), 2457.
- (5) Nishio, S, Proc. of 2000 IAMS Int. Seminar, (Fukuoka), (2000), 12.
- (6) Akachi, H., Japanese Patent, No.Hei6-97147, 1994.
- (7) 細田・他2名, 機論, Vol.64-No.622B(1998), 1845.
- (8) 西尾・他3名, 機論, Vol.65-No.640B(1999), 4077.
- (9) Eguchi, K.・他8名, Fujikura Technical Review, No.27 (1998), 63.

付 記

管外径を D_o 、内径を D 、管材料の熱伝導率を k_w とすると、軸方向の期間平均温度勾配は作動流体と管肉厚部とでは概ね同一であるので、管肉厚を通じて軸方向に伝わる伝導熱量 Q_w と全熱輸送量 Q との比は次式で与えられる。

$$\frac{Q_w}{Q} = \left\{ \left(\frac{D_o}{D} \right)^2 - 1 \right\} \left(\frac{k_w}{k_{ef}} \right)$$

本実験では、 $D_o=2\text{mm}$ 、 $D=0.8\text{mm}$ 、 $k_w=1.0\text{W/mK}$ (ソーダガラス) であるので、 k_{ef} を銅の 100 倍とすると、上式の値は 0.01% となる。したがって、管肉厚を伝わる伝導熱量は Q に対して無視できる。