

■ 特 集 ■ 省エネルギー

省エネルギー機器としてのヒートパイプ

The Heat Pipes for Energy Saving Equipments

大 谷 茂 盛*

Shigemori Ohtani

宍 戸 郁 郎**

Ikuro Shishido

1. はじめに

1.1 ヒートパイプとは

ヒートパイプは(1)構造が簡単で、(2)機械的な動作部分がなく、(3)しかも小温度差で比較的多量の熱を輸送できるという特徴を有している。

ヒートパイプとはウイックと呼ばれる多孔質物質(たとえばスクリーンなど)を内張りした容器を真空にした後に、液体(作動流体という)を適量封入したものである。この概略を図-1に示す。このヒートパイプがある温度に保たれているとすると、容器内は真空になっているので封入されている作動流体は蒸発し、ヒートパイプ内の空間はその時の温度の飽和蒸気圧と等しい蒸気で満たされる。この一端を加熱し、他端を冷却してわずかに温度差をつけたとすると、この時加熱部ではウイック内の液体が蒸発し、発生した蒸気はわずかな圧力差によって中央の蒸気通路を通り他端まで移動する。冷却部に到達した蒸気はここで凝縮する。この時に多量の潜熱を放出する。この様にヒートパイプは潜熱の形で熱を移動させるので小さな温度差で多量の熱を輸送させることが出来る。さて冷却部で凝縮した液体はどうなるのであろうか。今水槽に1本のガラス製毛細管の下端をわずかに水面の下になるようにして垂直に立てた場合を考える。この時水面は毛細管中を或る高さまで上昇して行く。すなわち毛細管現象である。これをヒートパイプで利用するためのものがウイックと呼ぶ多孔質物質である。

すなわち冷却部で凝縮した作動液はウイックの毛管

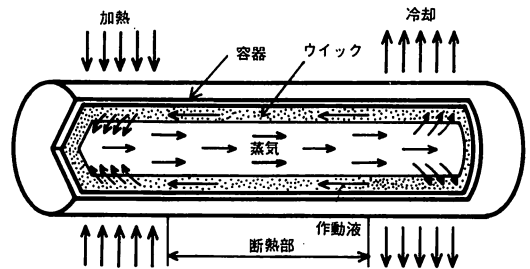


図-1 ヒートパイプ

作用によって加熱部まで移動する。この様に作動流体が循環することによって熱は連続的に輸送される。

1.2 ヒートパイプの歴史

このヒートパイプは1940年代に米国G. E.社のGauglerによって特許が取られたが、当時の技術水準ではこれを利用するには至らなかった。それとは独立に1960年代のはじめになるとGroverはこれに“ヒートパイプ”と命名して特許を取り、彼の指導の下にLos Alamos研究所において組織的な研究がはじめられ、学会にはじめて報告¹⁾された。以後数多くの研究報告がなされている。我国の代表的な文献情報検索システムである科学技術情報センターのJOISシステム・JICSTファイルによると1975年4月から1980年10月までに本ファイルに登録された文献中ヒートパイプに直接関係しているものの数は687件にも及んでいる。

さてヒートパイプは各国で研究されているが、特に米国の航空宇宙局(NASA)で多大な研究費と優秀な人材を投入してその開発に成功した技術の1つで

* 東北大学工学部化学工学科 教授

☎ 980 仙台市荒巻字青葉

** 東北大学工学部化学工学科

ある。

しかし元来、宇宙船の温度制御用に開発されたため、地上での利用技術すなわち重力下でのヒートパイプの開発ならびに応用という点についてはいまだ克服すべき問題が幾つか残されている。またヒートパイプは伝熱関係のあらゆる分野への利用が考えられるが、逆にこの事が応用技術を開発する場合に仲々の絞りにくいという点もある。

ヒートパイプが本格的に研究されはじめて約15年を経過した現在、特定の分野については各企業で製造技術・利用システムの開発が行なわれ、集積回路やモーターなどの冷却、各種工場の排熱回収用熱交換器あるいは民生用のステレオやソーラーシステム中の太陽熱集熱器などに応用されている。このヒートパイプが昨今の省エネルギー時代に注目され始めたのは当然の成り行きである。特に事業用の省エネルギー設備に対する特別償却の対象設備の1つにヒートパイプ式顕熱交換器が含まれており²⁾、今後益々ヒートパイプについての関心と需要は高まっていくものと思われる。

我国においても最近ヒートパイプについての解説書^{3, 4)}が幾つか刊行されており、今更の感もないではないが、更に多くの方々と共に省エネルギー機器としてのヒートパイプの利用技術を開発するためにここではその概要を簡単に説明する。

2. ヒートパイプの基礎理論

ヒートパイプを正常に作動させるためには作動流体を循環させることが不可欠である。この循環作用を最大にすることが出来ればヒートパイプの最大の熱輸送能力を得ることができるが、これは後述する幾つかの限界によって妨げられる。

この熱輸送限界を理論的に取り扱ったのはCotter⁵⁾がはじめてであり、ヒートパイプ内で起きる現象を①加熱部での作動流体の蒸発、②蒸気の流れ、③冷却部での凝縮、さらに④ウイック内の作動液の流れに分けて考察し毛管限界を解析した。以後多くの研究が行なわれている。WinterとBarsch⁶⁾は合計170編もの文献を引用して解説しているが、これによるとこれまで報告されている理論の多くはいずれも基本的にはCotterのそれを若干修正しているにすぎない。そこで以下にはCotterの提出した理論に基づいて説明する。

2.1 毛細管圧力

前述のように作動流体は定常状態のヒートパイプの中では連続的に循環している。すなわち蒸気は蒸気通

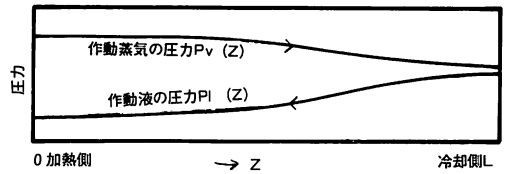


図-2 ヒートパイプの軸方向圧力分布

路に沿って加熱部から冷却部へと流れ、逆に凝縮液はウイック中を冷却部から加熱部へと流れている。これらの流れが生じるためには蒸気通路に沿っての蒸気の圧力勾配およびウイック中での液圧勾配が必要である。この様子を図-2に模式的に示す。これらの圧力が平衡を保つためには気液界面すなわちウイック表面において蒸気の圧力と液圧とが異ならなければならない。今図-2の任意の位置Zにおける気液界面での蒸気の圧力 $P_v(z)$ と液圧 $P_l(z)$ との圧力差は界面の曲率半径をRとすると

$$P_v(z) - P_l(z) = \frac{2\sigma}{R} \quad \dots\dots\dots(1)$$

但し σ は表面張力

で表わされる。式(1)はLaplace-Youngの式で曲面における主曲率半径が等しいとおくことによって得られる。ここでウイックが仮に半径 r_c の毛細管で表現できるものとする

$$r_c = R \cos \theta \quad \dots\dots\dots(2)$$

但し θ は接触角

となり式(1)は次の様になる。

$$P_v(z) - P_l(z) = \frac{2\sigma \cos \theta}{r_c} \quad \dots\dots\dots(3)$$

さて図-2によるとこの圧力差の最大値は加熱端($z=0$)で、また最小値は冷却端($z=L$)で得られる。この加熱端と冷却端における気液界面圧力差がウイック内を作動流体が流れるための駆動力 ΔP_c となり次式を得る。

$$\begin{aligned} \Delta P_c &= \Delta P_{i, \max} - \Delta P_{i, \min} \\ &= P_v(0) - P_l(0) - P_v(L) + P_l(L) \\ &= P_v(0) - P_v(L) + P_l(L) - P_l(0) \\ &= \Delta P_v + \Delta P_l \quad \dots\dots\dots(4) \end{aligned}$$

また(3)式と(4)式より

$$\Delta P_c = \frac{2\sigma}{r_c} \{ \cos \theta(0) - \cos \theta(L) \} \quad \dots\dots(5)$$

すなわち(5)式で表わされる毛細管圧力 ΔP_c は蒸気の圧力損失と液の圧力損失によって(4)式で表わされる。実際には地上では重力も作用するのでこれを考慮した次の(6)式が使われる*).

$$\Delta P_c = \Delta P_v + \Delta P_l \pm \rho_l \frac{g}{g_c} L \sin \phi \quad \dots(6)$$

但し ϕ : 傾斜角 +: 上部加熱 -: 下部加熱

(6)式中の ΔP_v および ΔP_l は熱負荷の増加と共に増加する。

したがって毛細管圧力 ΔP_c もそれに伴って増加するが、その最大値 $\Delta P_{c, \max}$ は使用しているウィックと作動流体との組み合わせによって決まりこれ以上は大きくすることはできない。すなわち

$$\Delta P_{c, \max} \cong \Delta P_v + \Delta P_l \pm \rho_l \frac{g}{g_c} L \sin \phi \quad \dots(7)$$

が成立しなくなると作動液はもはや循環することができなくなるために加熱部でウィックが乾ききってしまう、もはやヒートパイプとしては作動し得ない事になる。

2.2 ウィック内の作動液流れ

作動液は非圧縮性であり、ウィック内の流れは遅く流動状態は層流になっているものとする。この様な場合の多孔質体中の圧力勾配は Darcy 則によって表わされる。

$$\frac{dp_l}{dz} = - \frac{m_l}{KA_w \cdot g/g_c} \quad \dots(8)$$

但し m_l は作動液の質量速度

(8)式中の K は液体が多孔質物質内を流れる際の流れ易さを表わす係数であり permeability と呼ばれている。この値が判れば(8)式を積分することによってウィック内の作動液圧力損失を計算できる。もしもウィックが単純な構造ならば K は計算によって求めることができる。しかしながら実際のウィックの構造は複雑なために多くの場合実験によって求めているのが現状である。

2.3 蒸気の流れ

蒸気流の場合には粘性力の他に慣性力も考慮しなければならず、また蒸気の圧縮性についても検討しなければならず前項の液流れの場合に比べて少々複雑となる。さらに蒸発および凝縮にともなう半径方向の流れも存在する。この時には次式で定義される半径方向レイノルズ数 Rer の大きさによって分類すると便利で

ある。

$$Rer = - \frac{\rho_v r_v v_v}{\mu_v} = - \frac{1}{2\pi \mu_v} \frac{dm_v}{dr} \quad \dots(9)$$

但し r_v は蒸気通路の半径、 m_v は蒸気速度
 v_v は蒸気半径方向速度

2.3.1 | Rer | $\rightarrow 0$ の場合

(i) 粘性流領域⁵⁾

$$\frac{dP_v}{dz} = - \frac{32 \mu_v \bar{u}_v}{d_v^2 g_c} = - \frac{8 \mu_v m_v}{\pi g_c r_v^4 \rho_v} \quad \dots(10)$$

但し \bar{u}_v は平均速度であり次式で表わされる。

$$u_v = 2 \bar{u}_v \left(1 - \frac{4r_v^2}{d_v^2}\right) \quad \dots(11)$$

d_v は蒸気通路直径

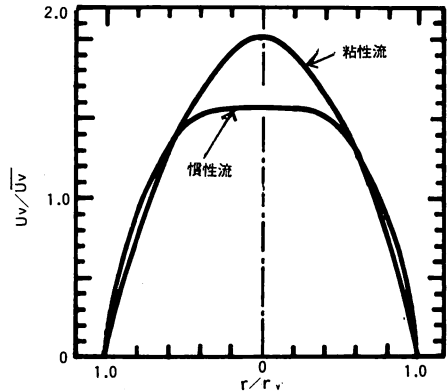


図-3 軸方向蒸気速度分布

すなわち Poiseuille の流れとなる。

(ii) 慣性流領域⁷⁾

$$P_v(0) - P_v(L) = \rho_v u_v^2 / g_c \quad \dots(12)$$

この時の速度分布は蒸気を非圧縮性として扱うと次式が得られる**).

$$u_v = \frac{\pi}{2} \bar{u}_v \cos\left(\frac{2\pi r_v^2}{d_v^2}\right) \quad \dots(13)$$

図-3に粘性流および慣性流の場合の軸方向速度分布を示した。慣性流の場合には放物線の形になっていないことが判る。

2.3.2 | Rer | $\ll 1$ の場合

加熱部で蒸気の吹き出し、冷却部では逆に吸込みが一様に起きていると仮定した Yuan と Finkelstein⁸⁾ の摂動解から次式を得る。

$$\frac{dP_v}{dz} = - \frac{8 \mu_v m_v}{\pi g_c r_v^4 \rho_v} \left(1 + \frac{3}{4} Rer - \frac{11}{270} Rer^2\right) \quad \dots(14)$$

*1) この他に蒸発および凝縮による圧力損失も考えられるがここでは省略する。

**1) Busse は蒸気の圧縮性を考慮した場合の速度分布も求めているがここでは省略する。

(14)式において $Re_v \rightarrow 0$ とすると前述の(10)式を得る。すなわち(14)式の右辺第2項以降が蒸発または凝縮の影響を表わしている。

2.3.3 | $Re_r \gg 1$ の場合

やはり Yuan ら⁹⁾の解析から次式を得る。

$$\frac{dP_v}{dz} = - \frac{8 \mu_v m_v}{\pi g_c r_v^4 \rho_v} Re_r (0.61685 + 1.3253 Re_r + \dots) \quad \dots\dots\dots (15)$$

さて(14)および(15)式において半径方向レイノルズ数 Re_r は加熱部では正、逆に冷却部では負の値となる。つまり冷却部では蒸気の圧力は回復することになる(前掲の図-2はこれを無視して画いてある)。更に Clasi-us-Clapeyron の式

$$\frac{dP_v}{dT_v} \approx \frac{\rho_v h_{lv}}{T_v} \quad \dots\dots\dots (16)$$

によれば圧力回復とともに蒸気温度も回復することになる。Kempe⁹⁾はこれをナトリウムヒートパイプで確認した。Tien と Rohani¹⁰⁾はこの圧力および蒸気温度の回復を連続の式ならびに Navie-Stokes の式を差分法によって解いている。

また Cotter は Knight と McInter¹¹⁾の解析から冷却端では $\frac{4}{\pi^2}$ すなわち 40.5% だけ回復すると述べているが Parker ら¹²⁾は蒸気の圧縮性を考慮し、圧力回復は熱負荷によって変化し Cotter の示した値よりも大きくなると報告している。その他蒸気流の解析としては Bankston ら¹³⁾, Gupta ら¹⁴⁾, Levy¹⁵⁾, Pauluis ら¹⁶⁾, の報告が挙げられるがここでは割愛する。

3. ヒートパイプの熱輸送限界

3.1 熱輸送限界の種類

ヒートパイプは作動流体の流れに関する幾つかの制限によってその熱輸送能力には限界が生じることはすでに述べた。図-4はヒートパイプの移動熱量 Q と加熱部と冷却部との温度差の関係を模式的に示したものである。今加熱部の温度 T_h を一定にし冷却部の温度 T_c を下げていった場合を考える。この温度差 ΔT に応じて Q は増加するが点④に到達すると Q は急激に減少する。これは(7)式が成立しなくなるためでありこれを①毛管限界という。これは(5)式の r_c の小さなウィックにするかあるいは(8)式中の K の大きなものを用いるかアーテリーと称する作動液通路を設けることによって改善される。すると ΔT と共に Q は増加しだす。ここで Q の増加は蒸気速度が速くなることを意味する。

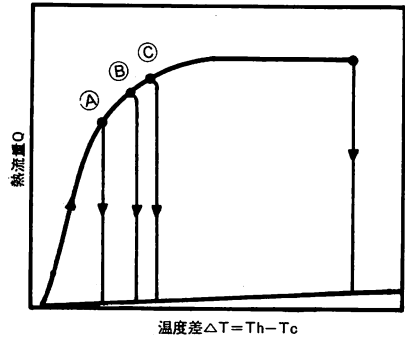


図-4 熱輸送限界の概念

蒸気速度が速くなると気液界面から作動液を蒸気流中に飛散させてしまう。いわゆる飛沫同伴が生じる。その分だけ加熱部へもどる作動液量が減少するためにウィックが乾ききってしまう。これが点②の状態であり②飛散限界と呼ばれるものである。これを改善するためには気液界面でのウィックを r_c の小さなものにすればよい。この様な対策によって Q は再び ΔT と共に増加するようになる。更に Q が増加すると加熱部のウィック中で核沸騰が生じて気泡が発生し、これが液の循環を妨げるようになる。これが点③で③沸騰限界である。これは有効熱伝導度の大きなウィックを使用すれば回避できるであろう。さらに ΔT が大きくなると Q は増加するがもはやある値以上にはならなくなってしまおう。これが④音速限界あるいは⑤粘性限界と呼ばれるものである。また T_c を作動流体の凝固点以下まで下げれば当然作動流体の凍結が起きて液は循環しなくなるはずである。

3.2 毛管限界

この様にヒートパイプには種々の熱輸送限界があるが特に中・低温用ヒートパイプ(常温~500°C程度)では①の毛管限界がもっとも重要であり、ヒートパイプの設計にあたって十分に検討しなければならない項目の1つである。これは通常次の様にして推算される。

すなわち(7)式において蒸気の圧力損失は小さいので無視すると(5), (7)式および(8)式の積分により次式が得られる。

$$Q_{max} = \left(\frac{\lambda K A_w}{L'} \right) \left(\frac{2 \sigma \cos \theta}{r_c} \frac{g}{g_c} + \rho L \sin \phi \right) \dots (17)$$

λ : 蒸発潜熱 L' : ヒートパイプ実効長

これよりウィックの r_c と K が判れば毛管限界が求められる。ここで r_c は毛管上昇高さ H から次式で求められる¹⁷⁾。

$$\rho_l \frac{g}{g_c} H = \frac{2\sigma}{r_c} \dots\dots\dots(18)$$

したがってKの値を何らかの方法で求めればよい。ところが前述したように一般にウィックは複雑な構造を有しているために実測によらざるを得ないのが現状である。今ウィックとしてある粒子層を用い、このKの実測値を求めることにする。さて permeability の測定方法としては幾つか報告^{18,19,20)} されているが基本的には(8)式を用いる。すなわち液圧の分布と液流量を測れば良いことになる。この時に得られるKは Kozeny-Carman の式と比較すると次の様な内容であることが判る。

$$K = \frac{\rho_l g e^3}{k S^2 \mu_l (1 - \epsilon)^2} \dots\dots\dots(19)$$

但し ϵ : 空隙率 S : 比表面積

ここでkはいわゆる Kozeny 定数で、非圧縮性粒子層の場合には約5となることが知られているから(19)式によってKが計算できることになる。事実実測値と(19)式による計算値はほぼ一致する。さて Kozeny-Carman 式は汙過のように層内の間隙全てを流体が満たしている場合に適用できる式である。そこで前述の測定方法で得られるKの値とヒートパイプのウィックのように自由表面がある場合のKの値は同じになるか否か疑問が残る。今次の様な思考実験²¹⁾ をしてみる。図-5・A-I は上面を自由表面とした粒子層の両端にガラスのフィルターを取り付け、オーバーフロータンクの高さを調節して図のように置いた場合である。また図-5・B-I は粒子層の上面に蓋をして前述の測定方法と同じように自由表面を無くした場合である。A, Bいずれの場合も矢印の方向に液体が移動し各々A-II, B-IIで示されるような液分布が観測されるであろう。尚A-III, B-IIIの水面の高さが液の飽和度を表わしている。これらの図によれば自由表面が存在する場合には液飽和度に分布が生じ、液で満たされていない状態の生じることが判る。図-6は実際に作動しているヒートパイプの液飽和度分布を実測した例²²⁾ である。これは作動液の封入量(図中では平均飽和度 \bar{S} に換算してある)を種々変化させた場合であるがいずれも加熱側で液飽和度は急激に減少していることが判る。さて著者ら^{23, 24, 25)} や Mualem²⁶⁾ によれば一般の粒子層や土壤では permeability は液飽和度によって大きく変化することが報告されている。このことは多孔質物質内の液の流動を取り扱う上で当然考慮しなければならない事項である。前述のような自由表面が存在しないような方法

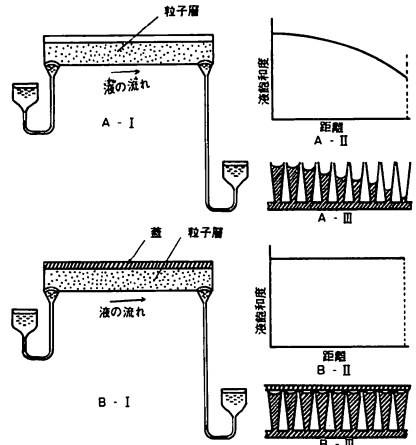


図-5 粒子層内液流れの思考実験

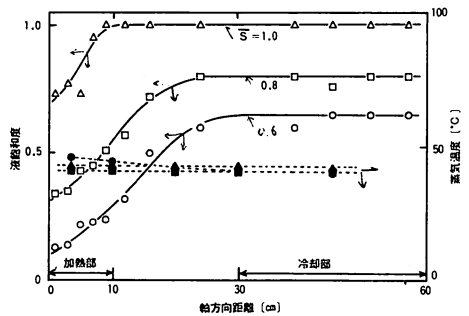


図-6 ヒートパイプのウィック内の作動液分布

で求めたKの値を用いて(7)式で推算した毛管限界の値は実際よりも大きな値となるであろう。この点については今後の重要な課題の1つと考えられる。

4. 特殊ヒートパイプ

ヒートパイプの応用分野は広範であり種々の用途が考えられ、色々な形状・構造のヒートパイプが開発されている。さて一般的なヒートパイプの特徴が作動液の循環にウィックの毛管作用を利用する点に有るとすると特殊なヒートパイプとしてはウィックを使わない方式が考えられる。この場合には①サーモサイフォン方式、②電気流体方式²⁷⁾、③回転方式²⁸⁾などが挙げられる。また熱の流れを一方のみにしたい場合には④熱ダイオード方式を使えばよい。さて一般にヒートパイプ内に不凝縮ガスが存在するとこれが冷却部に蓄積してヒートパイプの性能を低下させる⁵⁾。したがって通常のヒートパイプでは不凝縮ガスを極力なくすることが重要である。ここで我国のノーベル賞受賞者の江崎博士の発明がどのようにして生まれたのか思い出してみたい。それまでダイオードの開発には非常に純度の

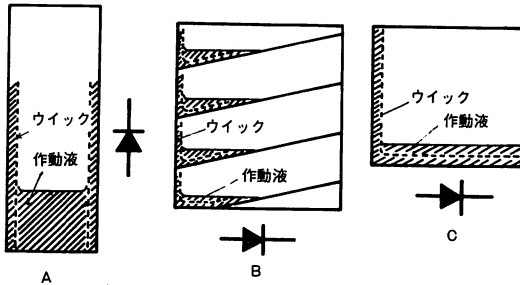


図-7 簡単な熱ダイオード

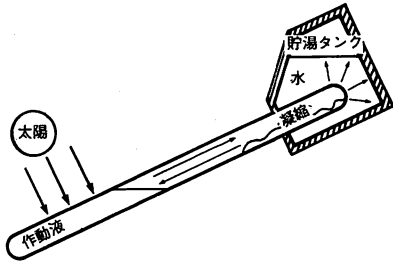


図-8 サーモサイフォンを利用した太陽熱温水器

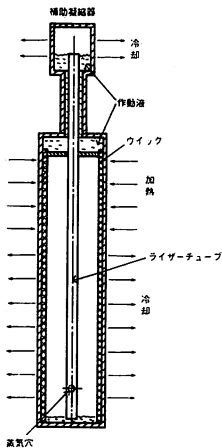


図-9 上部加熱方式サーモサイフォン

高い材料で pn 接合をつくるという考えが主流であった。博士はそれとは逆に不純物濃度を高くしてやることにより彼の有名なエサキダイオードが生まれたと聞く。ヒートパイプの場合にも不凝縮ガスを封入することによって冷却部として実際に作動する部分の長さを制御してやる事が可能となる。これが⑤可変コンダクタンス方式(例えば²⁹⁾)であり特に宇宙船の温度制御用に種々の形式のものが開発されている。

これらの中で省エネルギー機器としてヒートパイプを考えた場合に特に重要と思われるのは④の熱ダイオード方式である。もっとも簡単な熱ダイオード方式は重力を利用する方法であり故 Luikov³⁰⁾ は図-7のような方式について述べている。この中でもっとも構造

が簡単なのは A の方式であり、さらにウイックを無くせばもっとも簡単な構造となる。すなわちサーモサイフォンとなる。図-8は民生用の太陽熱温水器(三洋電機カタログより)にサーモサイフォンを応用した例である。日中は太陽熱を集熱して中の作動液が蒸発し、この蒸気が他端まで移動し凝縮して貯湯タンク内の水を温たためる。この時凝縮液は重力によって下方へ移動する。一方夜間には貯湯タンク側の温度が高いが蒸発すべき作動液は下方に溜っているので蒸発せず、夜間の熱損失はわずかにサーモサイフォン容器の壁伝導のみに抑えられる。このようにサーモサイフォンは熱流を下方から上方へのみ移動させることができる。これに対して Chisholm³¹⁾ は上部加熱・下部冷却用のサーモサイフォンを開発している。これを図-9に示す。

これは補助凝縮器をサイフォン上部に設け、これを冷却するとサイフォン中央のライザー内を蒸気と液の 2 相流が上昇することを利用している。

5. おわりに

冒頭でも述べたが文献の数が多く、限られた紙面では到底全てを説明することはできないが、ヒートパイプの概要については概ね理解されたことと思う。我国においてもヒートパイプに関連した特許の数が最近ふえ、これについては橋本³²⁾の解説が役立つ。また省エネルギー機器としてのヒートパイプの作動温度範囲を考えると 50℃~500℃の低・中温領域になるが、この領域での最適な作動流体に関して鈴木ら³³⁾の報告があり今後の研究が期待される。

最後に省エネルギー機器としてヒートパイプを考える場合、単に排熱の回収にヒートパイプ式熱交換器を利用するだけでなく、各種の省エネルギー機器の一部品としてヒートパイプが益々利用されてゆくものと思われる。

引用文献

- 1) Grover, G. M., T. P. Cotter and G. F. Erickson: Structure of Very High Thermal Conductance, J. of Appl. phys., 35, 1990 (1964)
- 2) 上村雅一: 化学工業における省エネルギーのために, 化学と工業, 33, 373 (1980)
- 3) 大島耕一, 松下正, 村上正秀; ヒートパイプ工学, 朝倉書店, 1979
- 4) 山西哲夫, 清水定明: ヒートパイプとその応用, オーム社, 1980
- 5) Cotter, T. P.: Theory of Heat Pipe, Report LA-3264-MS, Los Alamos Sci. Lab. 1965

- 6) Winter, E. R. F. and W. O. Barsch : The Heat Pipe, *Advance in Heat Transf.*, **7**, 219 (1971)
- 7) Busse, C. A. : Theory of the Ultimate Heat Transfer Limit of Cylindrical Heat Pipes, *Int. J. Heat Mass Transf.*, **16**, 169 (1973)
- 8) Yuan, S. W. and A. B. Finkelstein : Laminar Pipe Flow with Injection and Suction through a Porous Wall, *Trans. ASME*, **78**, 719 (1956)
- 9) Kemme, J. E. : Ultimate Heat-Pipe Performance, *IE-EE Trans. Elec. Dev.*, ED-16, 717 (1969)
- 10) Tien, C. L. and A. R. Rohani : Analysis of the Effects of Vapor Pressure Drop on Heat Pipe Performance, *Int. J. Heat Mass Transf.*, **17**, 61 (1974)
- 11) Knight, B. W. and B. B. McInteer : Laminar Incompressible Flow in Channels with Porous Walls, Report LADC-5309, Los Alamos Sci. Lab. 1965
- 12) Parker, G. H. and J. P. Hanson : Heat Pipe Analysis, *Advance Energy Convers. Eng.*, 847 (1967)
- 13) Bankston, C. A. and H. J. Smith : Vapor Flow in Cylindrical Heat Pipe, *Trans. ASME*, **95**, 371 (1973)
- 14) Gupta, B. K. and E. K. Levy : Laminar Flow in Annuli and Flat - plate Channels with Mass Transfer at One Wall, *AIAA Prog. Astro Aero.*, **39**, 167 (1976)
- 15) Levy, E. L. : Theoretical Investigation of Heat Pipes Operating at Low Vapor Pressures, *Trans. ASME J. of Engineering for Industry*, **90**, 547 (1968)
- 16) Pauluis, G. and S. B. Lang : Theoretical Investigation on Hydrogen, Nitrogen, and Oxygen Homogeneous and Annular Wick Heat Pipes, *Cryogenics*, **16**, 415 (1976)
- 17) Tien, C. L. and K. H. Sun : Minimum Meniscus Radius of Heat Pipe Wicking Materials, *Int. J. Heat Mass Transf.*, **14**, 1853 (1971)
- 18) Ferrel, J. K., E. G. Alexander and W. T. Piver : Vaporization Heat Transfer in Heat Pipe Wick Materials, *AIAA Prog. Astro. Aero.*, **31**, 3 (1972)
- 19) Langston, L. S. and H. R. Kunz : Liquid Transport Properties of some Heat Pipe Wicking Materials, Preprint of ASME-AIChE Heat Transfer Conf. at Mineapolis, p3 1969
- 20) Sibayama, S. and S. Morooka : Study on Heat Pipe, *Int. J. Heat Mass Transf.*, **23**, 1003 (1980)
- 21) 大谷茂盛, 鈴木睦, 前田四郎 : 粒状物質内における液状水移動の起動力に関する考察, *化学工学*, **30**, 1130 (1966)
- 22) 穴戸郁郎, 松田剛, 飯田豊彦, 鈴木勝, 大谷茂盛 : ヒートパイプのウイック内における作動液分布, *化学工学論文集*へ投稿中
- 23) 大谷茂盛, 前田四郎 : 湿った粒子層における液状水移動の径路係数, *化学工学*, **31**, 463 (1967)
- 24) Endo, A., I. Shishido, M. Suzuki and S. Ohtani : Estimation of Critical Moisture Content, *AIChE Symp. Ser.*, **73**, 57 (1977)
- 25) Shishido, I., M. Suzuki and S. Ohtani : Determination of the Diffusivity of Moisture Within Wet Material, *Proc. 1st Int. Symp. on Drying* p30 (1978)
- 26) Mualem, Y. : A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media, *Water Resource Research*, **12**, 513 (1976)
- 27) Jones, T. B. : Electrohydrodynamic Heat Pipe, *Int. J. Heat Mass Transf.*, **16**, 1045 (1973)
- 28) Marto, P. J. and L. L. Wagenseil : Augumenting the Condenser Heat - Transfer Performance of Rotating Heat Pipes, *AIAA Journal*, **17**, 647 (1979)
- 29) Kirkpatrick, J. P. and B. D. Marcus : A Variable Conductance Heat Pipe/Radiator for the Lunar Magnetometer, *AIAA Prog. Astro., Aero.*, **31**, 83 (1972)
- 30) Luikov, A. V. and L. L. Vasiliev : Progress in Heat Pipe and Heat Exchanger Technology, *Int. J. Heat Mass Transf.*, **18**, 177 (1975)
- 31) Chisholm, D., I. D. R. Grant and P. J. Duncan : Condenser Operated Inverse Thermosiphones, 6th Int. Heat Transfer Conference, Toront 117 (1978)
- 32) 橋本伝一 : 最近の特許から一熱交換器—ヒートパイプ, *化学装置* 1979年7月号より連載中
- 33) 鈴木郷史, 小泉睦男 : 中温ヒートパイプに適した動作流体の選択, *機械学会論文集*, **46**, 734 (1980)

