ヒートパイプの機能限界と作動流体の充てん量について

手　嶋　　　桓

1. ま　え　が　き

熱交換の新分野にあるヒートパイプの機能を考えると，それが作動流体の相転移を特色とすることから，パイプ内の循環流が，気液の二相に分れて構成されていることに意義があると考えられる。従ってその状態変化は，P-v 線図における飽和限界線内，すなわち湿り蒸気域内に限定されなければならない。もしまたその状態が定容変化をなすと見なし得るならば，その変化は比容積が一定の線上を移行する。温度の上昇と共に圧力が高くなると，飽和液線か飽和蒸気線に近づくが，流体比容積がその臨界比容積より小さいか大きいかによってそのいずれかが決まる。いずれにしても，どのような圧力または温度に達すると飽和限界線に達して，ヒートパイプとしての理論的機能限界を示すかは，比容積の価によって定まる。その比容積を決定づけるものは作動流体充てん量であることから，充てん量とヒートパイプの機能限界との関連性についての推論と解説を試みたものであり，引用文献や参考文献はない。また若干の数値例は，作動流体を水としたが，これは水の物性値が明らかな理由にもとずくもので，実験結果を示したものではない。

2. 標準状態の設定

ヒートパイプの機能を論ずる場合，その中心部の中空を作動流体の飽和蒸気が，ウイックの空隙をその飽和液がそれぞれ充満していると考えるのがほとんどである。ここではこれを標準状態と呼び，それを表わす記号には添字 n をつけることにした。また v'，v'' のように $'$，$''$ は，それぞれ流体の状態の液体，気体を示すものとする。

2. 1　寸法諸元とその関連：

図1に代表的なヒートパイプの構造を断面で示した。以下用いられる寸法記号は次の通りである。

D：コンテナ内径，

d：ウイック内径，中心中空部直径，

D_E：コンテナ有効内径，

l：ウイックおよびコンテナの長さ

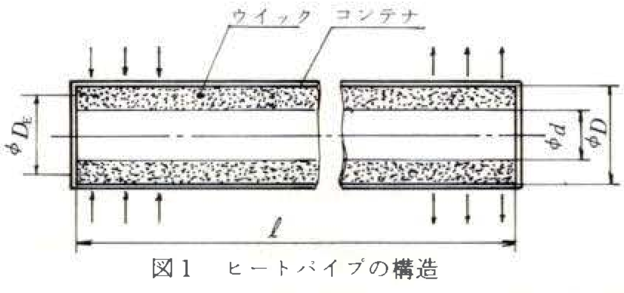

図1　ヒートパイプの構造

さらに関連諸元の記号として次のものが使用され，それぞれの関係をもっている。

ε：ウイック空隙率，　$V_0=\frac{\pi}{4}D^2\cdot l$：コンテナ容積，　$V_S=\frac{\pi}{4}d^2\cdot l$：中心中空容積，

$V_w=\frac{\pi}{4}(D^2-d^2)\ l\cdot\varepsilon=(V_0-V_s)\ \varepsilon$：ウイック空隙容積，

$V_E=V_s+V_w=\frac{\pi}{4}D_E{}^2\cdot l$：作動流体容積，

$m=\frac{V_o}{V_s}=\left(\frac{D}{d}\right)^2$：コンテナ対中空容積比，　$m_E=\frac{V_E}{V_s}=\left(\frac{D}{d}\right)^2$：作動流体対中空容積比，

$m_E-1=\frac{V_E-V_s}{V_s}=\frac{V_w}{V_s}=\varepsilon\cdot(m-1)=\frac{V_o-V_s}{V_s}\cdot\varepsilon$：ウイック空隙対中空容積比，

$m-1=\frac{V_o-V_s}{V_s}$：ウイック対中空容積比，

2．2　作動流体諸元とその関連

t：温度，G：質量，V：容積，v：比容積，x：乾き度，

t_s：飽和温度，　t_c：臨界温度，v_o：臨界比容積

とするとき

$G=G_n'+G_n''$，　$V=V_n'+V_n''$，　$V_n'=G_n'\cdot v_n'$，　$V_n''=G_n''\cdot v_n''$，　$V=G\cdot v$

ここで，G，V および v は，作動流体（気液二相）の質量，容積，および比容積を，G_n'，V_n' および v_n' はそれぞれ上記標準状態の飽和液，また G_n''，V_n'' および v_n'' は同じ状態の飽和蒸気の質量，容積，比容積を示すもので，以降同様な符号を用いるものとする。したがって

$x_n=G_n''/G=(V_n''/v_n'')(v/V)=(v-v_n')/(v_n''-v_n')$　は標準状態の作動流体の乾き度を示す。

2.3　寸法的諸元と作動流体諸元との関連

この章では，標準状態に限定された作動流体のみを論じるので，その諸元と寸法的諸元との間に以下のような関連を生じる。

$V_O=\frac{V_n'}{\varepsilon}+V_n''$，　$V_W=V_n'$，　$V_S=V_n''$，　$V_E=V$

$$m=\frac{V_o}{V_s}=\frac{1}{\varepsilon}\frac{V_n'}{V_n''}+1,\qquad m_E=\frac{V_E}{V_S}=\frac{V}{V_n''}=\frac{G\cdot v}{G_n''\cdot v_n''}=\frac{1}{x_n}\cdot\frac{v}{v_n''}=\frac{v_n''-v_n'}{v-v_n'}\cdot\frac{v}{v_n'}$$

$$x_n=\frac{v-v_n'}{v_n''-v_n'}=\frac{1}{m_E}\cdot\frac{v}{v_n''},\qquad v=\frac{m_E}{\frac{m_E-1}{v_n'}+\frac{1}{v_n''}}$$

m_Eは作動流体容積と中心中空部との容積比であるから，ヒートパイプの構造寸法によって定まり，v_n' と v_n'' は作動流体の液相と気相の比容積で，その作動状態は標準作動状態での流体温度の選定で定まる。この温度は t_n で表わされるので上記最後の式は

$$v=F\ (m_E,\ t_n)$$

とすることができる。すなわち作動流体の比容積は，ヒートパイプの寸法だけでなく，標準作動状態の温度にも左右されることを示す。これはまた，構造寸法をきめても，標準作動温度 t_n をきめないと比容積 v がわからないので，作動流体の全質量もきまらないと云う当然の結果を示すことになる。しかしながら，問題は作動流体を封入するときの温度が，作動時の温度と異ることにあり，封入容積が判明していても，その質量は作動温度をきめなければ定まらないことである。図 2 は，水を作動流体とした場合の上記 v，m_E，および t_n の関係を示したものである。t_n を 20℃，100℃，200℃および 300℃としたときの関係を 4 本の実線の曲線で示してある。このグラフを使用して数値例を示すと

$m_E=1.8$，　$t_n=100$℃で $v\fallingdotseq 0.00235$ m³/kg

$t_n=100$℃，　$v\fallingdotseq 0.006$ m³/kgとしたいときの $m_E=1.2$

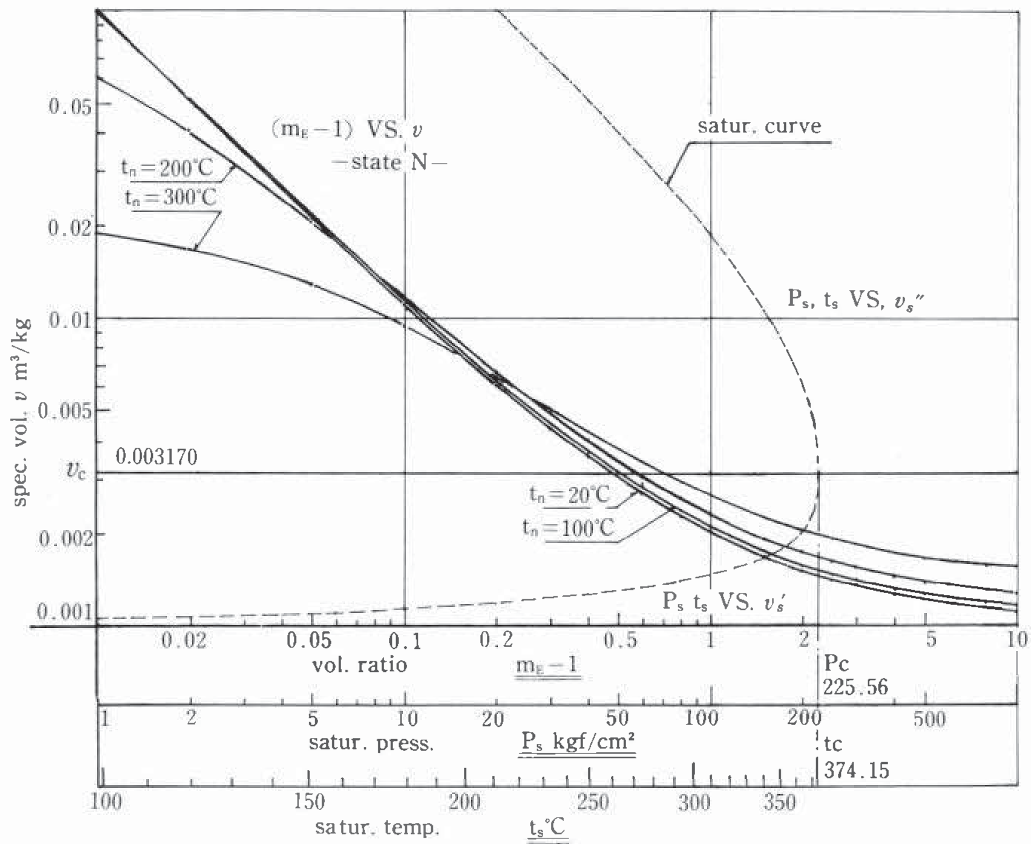

図 2　飽和曲線と標準状態の（m_E-1）$-v$ 曲線（H_2O）

3．ヒートパイプとしての機能限界

3.1　静的機能限界

ヒートパイプ内の作動流体には，気液二相間の相転位と，それぞれの相の流体が逆流して一つの循環流をなすことの，二つの機能があることは前述した。そのいずれの機能を失っても，その

ものはもはやヒートパイプではなくなる。前者は静的な現象であり後者は動的現象と考えることができる。ここに述べる静的機能限界とは，この静的現象である相転位を消失する限界をいゝ，後述する動的機能限界は循環流が消失する限界をいう。

任意の温度 t における作動状態では，ヒートパイプ内作動流体の乾き度 x が次式で与えられる。

$$x = \frac{v - v'}{v'' - v'}$$

特定のヒートパイプでは，その V_o，V_sおよび ε が定められているので，流体比容積 v は封入量 Gによってきめられる。すなわち作動流体が密封された後は，v に変化を生じない。また$v = F$（m_E，t_n）で明らかなように，そのヒートパイプが標準状態で作動するための標準温度 t_n があって図2に多くの t_n 線を加えることによってこれを求めることができる。

その作動流体が，$P-v$ 線図において水と同じ様相を示すならば，作動流体比容積 v がその流体のもつ臨界比容積v_cより大きいか小さいかによって，作動温度の上昇につれて乾き度 x が1又は0に近づく。更に高温に移行すると，飽和蒸気線又は飽和液線に到達する。いずれの場合も，このとき気液何れかの単相になるので，相の転移は消滅することになる。つまり静的機能限界に到達したことになる。図2は，水の$P-v$ 線図を示し，破線の曲線が飽和曲線，$t_c = 374.15$℃，$v_c = 0.00317$ m³/kgである。この図による数値例を次に示す。

〔例〕 $D = 18$ ㎜，$d = 9$ ㎜，$\varepsilon = 0.85$，$t_n = 100$℃ 作動流体を水，とした場合の静的機能限界を求める。

蒸気表より $t_n = 100$℃に対する$P_n = 1{,}03323$ kg$f$/m²，$v_n' = 0.0010437$ m³/kg$f$，$v_n'' = 1.6730$ m³/kgf，$v_c = 0.00317$ m³/kgfを得る。以下1 kgfの質量は1 kgとする。

$m = (D/d)^2 = (18/9)^2 = 4$　　$m_E - 1 = (m-1)$　　$\varepsilon = (4-1) \times 0.85 = 2.55$

図2により，$t_n = 100$℃の曲線を，$m_E - 1 = 2.55$ の線までたどると，$v = 0.00145$ m³/kgを得る。さらに，$v = 0.00145$ が，破線の飽和曲線と交わる点を求めると $P_s \fallingdotseq 110$ kgf/㎠，$t_s \fallingdotseq 310$℃が得られる。$v_c = 0.003170$ m³/kgであるから，$v < v_c$となり，この飽和圧力，飽和温度で，作動流体は飽和水一相のみとなって，乾き度 $x = 0$ である。したがって310℃がこのヒートパイプの静的機能限界であることを知る。前述の式を用いて求めるには

$$v = \frac{m_E}{\dfrac{m_E - 1}{v_n'} + \dfrac{1}{v_n''}} = \frac{3.55}{\dfrac{2.55}{0.0010437} + \dfrac{1}{1.6730}} = 0.0014526 \fallingdotseq 0.00145 \text{ m}^3/\text{kg}$$

参考までに，充てんすべき流体の全質量は差長1 m当り 0.1018 kg N状態の乾き度は

$x_n = (0.00145 - 0.00104) / (1{,}6730 - 0.00104) \fallingdotseq 0.000245$ となる。

作動流体が水である場合の上記例の構造寸法のヒートパイプについて検討を進めてみることにする。今かりに誤って質量で20%多く充てんしたとする。その比容積は質量に逆比例するので，$v = 0.00145/1.2 \fallingdotseq 0.00121$ m³/kgをうる。図2では，標準状態の($m_E - 1$)とvの関係を示す曲線

は t_n =300℃, 200℃, 100℃, 20℃の4本だけであるが, v =0.00121と m_E-1 =2.55の交点は, t_n =20℃の曲線より, はるかに低温側に存在することになる。その様な温度で標準状態を保ち, 水が気液2相で共存しうるかどうかははなはだしく疑問である。しかしながら, 図によってこのパイプの機能限度は t =220℃に達し得る。もしこのパイプを例えば150℃のような温度で使用するときは, 標準状態から外れていて, ウイックの空隙は飽和水を収容できずに, 中心中空部の蒸気通路にはみ出て蒸気の流れを妨げ, ベーパーロックの現象が発生することが懸念される。このことについては, 動的機能限界の分野に移行するので後述する。

図3は比容積 v が, 臨界比容積 v_c に等しい場合の (m_E-1) と t_n との関係を示したもので, 根拠は

$$m_E=\frac{v_n''-v_n'}{v_c-v_n'}\cdot\frac{v_c}{v_n''}$$

である。あるヒートパイプについて, その構造寸法から求めた (m_E-1) と, 想定する標準温度 t_n との関係が, この図の曲線より上方地域にあるときはその流体比容積 v は臨界比容積 v_c より小さく, 下方地域にあるときは $v>v_c$ となることを示したものである。

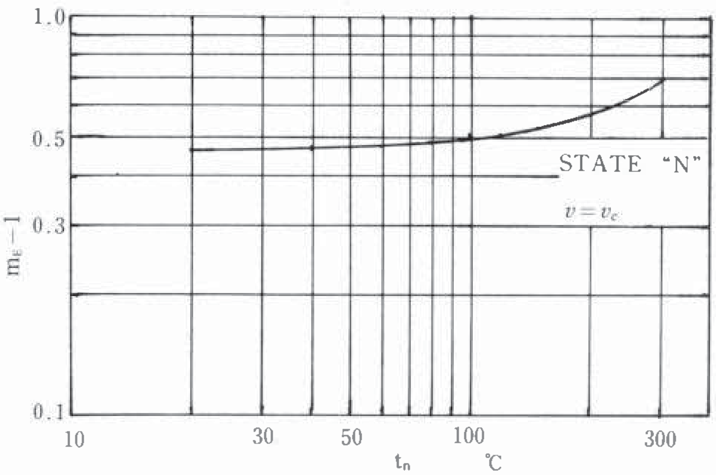

図3　臨界比容積を作動流体の比容積としたときの標準状態の作動温度と構造寸法の関係
(H_2O)

この考えを応用して, 図2を参照し, ある特定の流体比容積 v_x を採用したいときは, 図3に画いたように上記 v_c の代りに v_o とした同様のグラフを用意するならば, 任意の m_E と t_n との組合せが求められ, 充てんすべき水の質量が算出される。

3.2　動的機能限界

前述のように, 静的機能限界は, 管内が気液いずれかの相のみで充満するに至って現われる。その温度は, 充満する作動流体の比容積と, ヒートパイプの構造寸法のみによってきまる一種の物性値とも考えられる。充満される作動流体の質量が, 厳密に規正されない限り標準状態で作動しているとは限らない。また静的機能限界は突如として現われるのではなく, 作動温度が上昇して, ついに到達する性質のものであり, その過程において, 過剰の飽和液または飽和蒸気のいずれかゞ, 漸次増してゆく現象を思うとき, 当然予想されるのがベーパーロックの現象である。もし作動流体のパイプ内循環機能が, ウイックの毛細管現象（表面張力）によって維持される形式のものは, その能力が微小なため, 流路での抵抗, 妨害はその機能に大きく影響する。僅かな過剰液が蒸気進路を閉塞したり, 僅かな過剰蒸気がウイック内に浸入して液路を閉塞したりする懸念があるが, これはそれぞれの場合について実験的に求めなければ, その様子は判明しないであ

ろう。このような動的機能限界は，少くともそのうち一つの現象としてこの過剰な飽和液または飽和蒸気を考えることができる。こゝに云う過剰とは，さきに述べた標準状態にある気液の容積に対しての増分である。それぞれの増分に記号△をつけ，以下の諸式を成立させた。

$$\triangle V'=V'-V_n',\qquad V'=G'\cdot v',\qquad V_E=V'+V''=G\cdot v,$$

$$\triangle V''=V''-V_n'',\qquad V''=G''\cdot v'',\qquad G'+G''=G,\qquad \frac{G'}{G}=(1-x)=\frac{v''-v}{v''-v'},$$

$$V_n'=V_w=V_E-V_S=V_E(m_E-1)/m_E\qquad \therefore \triangle V'=G'\cdot v'-G\cdot v\,(m_E-1)/m_E$$

$$V_n''=V_S,\qquad V_E=m_E\cdot V_S,\qquad \phi=V'/V_n',\qquad \phi-1=\triangle V'/V_n',\qquad \xi=\triangle V'/V_n''$$

こゝでϕは任意の飽和液の，標準状態の飽和液に対する容積比率であり，（$1-\phi$）はウイックからはみでた飽和液の標準飽和液に対する容積比率ξはその過剰飽和液の中心中空部に対する容積である。これらをそれぞれ飽和溶液の容積比率，過剰率および占有率と略称することにする。上記関連から次式をうる。

$$\phi=\frac{v''-v}{v''-v'}-\frac{v'}{v}\cdot\frac{m_E-1}{m_E},\qquad \xi=(\phi-1)(m_E-1)$$

以上に対して，標準状態，$v<v_c$の静的機能限界，$v>v_c$の静的機能限界の三つの場合について考察すると，

a）標準状態：

$$V'=V_n',\qquad \triangle V'=0,\qquad \phi=1,\qquad \xi=0$$

b）$v<v_c$ の静的機能限界：

$$v'=v,\qquad x=0,\qquad \triangle V'=V_n'',\qquad \phi=\frac{m_E-1}{m_E},\qquad \xi=1$$

c）$v>v_c$ の静的機能限界

$$V'=0,\qquad x=1,\qquad \triangle V'=-V_n',\qquad \phi=0,\qquad \xi=-(m_E-1)$$

図4は前述の数値例にあげたヒートパイプについて，ϕ，ξと流体温度との関係を，標準温度が20°，100°，200°，300℃になるような封入流体量をもつ4本について示したものである。今 $t_n=200$℃になるヒートパイプについてみるとき，流体作動温度が250℃では108％で過剰率（$1-\phi$）は8％程度であるが，この占有率ξは22％程にも達する。この値は，管長，蒸気速度の大きさいかんでは，ベーパーロック現象を誘発するに十分の値であろう。このときの静的機能限界は335℃が図2から得られ，上記250℃を85℃も上廻る価である。更に$t=230$℃では，（$1-\phi$）＝4％，ξ＝15％　程度が読まれるがこれは標準温度200℃より僅か30℃高いに過ぎない。このように，作動流体を水とした場合に限っては，動的機能限界は静的限界よりかなり低い温度で，かつ標準状態からさほどはなれていないという危険性をもつことがうかがえる。しかしながら動的機能限界を数値で示すことは，それが構成される材料の物性，構造に左右されることは十分に予想されるだけに，机上で求めることは困難であり，実験によって適確に知ることも容易ではあるまい。ただ上記のϕやξの価を知ることによって，静的機能限界温度がいか程の値になるように充てん量をき

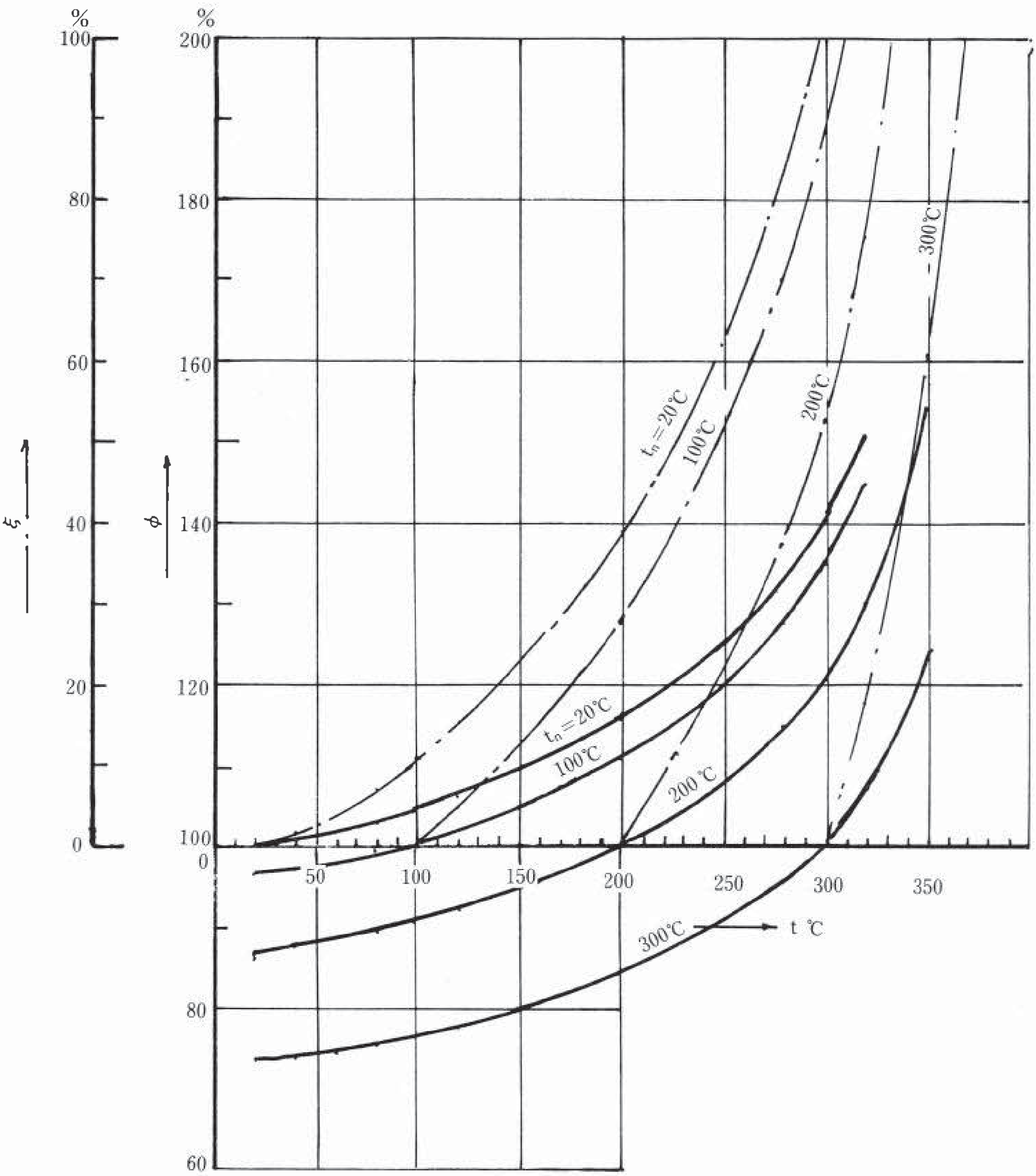

図４　作動流体温度と ξ, φ の関係

めればよいかについて，適正な勘を働かせるには役立つであろう。

４．ま　と　め

密閉容器であるヒートパイプ内には，作動流体が気液二相で共存し，その温度に応じた乾き度を示す。これは温度の変化によって変化して，ウイック空隙内に蒸気が浸入したり，中心部蒸気

通路に液体がはみ出したりして，変化が大きくなると，パイプ内は気液いずれかの単相となり，図2に示す破線（飽和曲線）に到達する。この状態を静的機能限界としたが，この限界に達する以前に，ベーパーロックによる動的機能限界が予期されることについて述べた。しかしながら，前述した飽和液の占有率や過剰率は，気液二相が完全に一体となって分離在存する場合であって，それぞれ分散して，例えばウイック内に分散して，共存する部分がないとは限らない。このときは，その見掛け上の占有率は計算値を当然上廻り，予想するよりも小さい占有率で蒸気進路は閉塞されて動的な機能限界に致達することになる。また作動温度に変動を伴うことが多いならば，一度ウイック内に浸入した蒸気が，温度の変動で完全に脱出できるかも疑問である。之等の不確定要因はすべて動的機能限界に加担することを考えると，ここで定義した標準状態でヒートパイプを常用することに疑問を抱かせる。したがってその標準状態を左右する作動流体の充てん量を決定することは，ヒートパイプを作るに当って重要な要素の一つと考えられる。