金網ウィックの浸透率*

池 田 義 雄**

The Permeability of a Screen Wick

by Yoshio IKEDA

The permeability of a screen wick is a significant factor that governs the performance of heat pipe. The modified Blake-Kozeney equation indicates that the permeability of the screen wick is subject to the porosity of the screen wick. However, the porosity of the screen wick is usually unknown because of the structural complexity of the screen wick especially in the operating condition. Several conceivable parameters such as inter-wire clearance, inter-layer clearance, number of layers, etc. affect the porosity of the screen wick. Nevertheless, Marcus equation does not include these parameters. To include these significant parameters, the present study employs a geometric model in which the shape of the woven structure of the screen wick is represented by piecewise arcs and clearance exists between layers. Based on this model the equation for the permeability of the screen wick is derived. Numerical calculations are performed and experimental measurements are conducted for validation.

Key Words: Heat Pipe, Screen Wick, Porosity, Coefficient of Shrinkage, Permeability

1. 緒 言

1944年 Gaugler の特許に始まり, 64年 Grover, Cotter らによりヒートパイプと命名されて以来, 主として宇宙用として開発されてきたが, そのすぐれた伝熱特性が注目され, 地上での機器, 装置用として活発な研究が行われ多くの分野で実用化が促進されている。ヒートパイプの性能はウィックによってきまるといっても過言ではない。すなわち, 液を支持し管内面全体をぬらしていること, 毛管作用により凝縮した液を蒸発部へ還流させること, 液を含んだウィックの熱抵抗の小さいことなどが要求される重要な要件である。

したがってこれらの性能を予測できることが設計上重要な問題となる。

ウィックとしては金属の金網, 発泡材, フェルト, 焼結材, あるいはグループ, およびそれらの組み合わせ等いろいろあるが, 地上用としては, コスト, 入手の容易さなどを考慮して平織りの金網ウィックを対象とした。

金網ウィックの浸透率に関しては多くの研究がなされているが装着時の巻き方の硬軟, 層数等の影響については全く不明である。多くの場合, 変形 Blake-Kozeney の式⁽¹⁾

$$K = \frac{\epsilon^3 d^2}{122(1-\epsilon)^2} \dots\dots\dots (1)$$

ここで K : 浸透率, d : 線径, ϵ : 空隙率である。が用いられているが, 実際とは6~8倍の違いがあるといわれている。師岡⁽²⁾らは層間すき間や, 網の端末のすき間に Poiseuille 流を考慮して補正を行っているが, その根拠は明らかではない。

式(1)によると, 浸透率 K は空隙率 ϵ の大小により大きく影響されることが予想されるが, ウィック装着時の空隙率は全く不明である。

空隙率 ϵ に対しては, 一般には Marcus の式⁽²⁾⁽¹⁾ が用いられているが層間すき間は含まれていない。

$$\epsilon = 1 - \pi d S N / 4 \dots\dots\dots (2)$$

ここで S : 縮れ係数, N : メートル当たりの目数 また縮れ係数 S ⁽¹⁾ も 1.03~1.15 程度であり 1.05 を推奨するというものであまり明確にはされていない。

本研究は, これらの影響を明確にするために, 金網の素線の形状を円弧のつながりと仮定し, ウィックの浸透率を求める式を誘導したものである。

* 昭和61年3月15日 東海支部第35期総会講演会において講演, 原稿受付 昭和60年4月8日。

** 正員, 日本工業大学 (〒345 埼玉県南埼玉郡宮代町学園台4-1)。

2. モデル

1層の金網の厚さを測定してみると線径の2倍より大きいのが普通である。これは線同士は密着していたとしても金網の平面度は完全なものではなく図1(a)のような測定が行われるためと考えられる。

そこで線同士は互いに密着しており完全な平面度を保たれた状態を基準状態と考えると実測された厚さ h は図1(b)のように次式で表される。

$$h = 2d + \delta = 2d(1 + \beta_0)$$

ただし δ : すき間, $\beta_0 = \delta/2d$

β_0 は厚さ測定時のすき間率を表す。さらに装着時の巻き方の硬軟により β_1 が加わるとすれば

$$h = 2d(1 + \beta_0 + \beta_1) = 2d(1 + \beta) \quad (3)$$

ただし $\beta = \beta_0 + \beta_1$

となる。したがって n 層の厚さ H は次式となる。

$$H = 2dn(1 + \beta) \quad (4)$$

3. 縮れ係数

平織り金網の素線の形状はあまり明確ではないが、空隙率を正しく求めるためには簡単な形状で表現できれば都合がよい。顕微鏡写真図2を拡大しコンパスを当ててみると円弧で置き換えられそうである。

これをもとにして、基準状態のモデルとして図3のようなモデルを考えた。

素線の曲率半径を R , 中心角を 2θ , 素線間隔(ピッチ長)を p とすると幾何学的条件より次式が成り立つ。

$$R - R \cos \theta = d/2 \quad (5)$$

(a)

(b)

図1 考え方のモデル

図2 金網の顕微鏡写真

$$R \sin \theta = p/2 \quad (6)$$

$$\therefore \tan \frac{\theta}{2} = d/p \quad (7)$$

したがって線径 d とピッチ長 p (目数) がわかれば θ が求められ式(5)または式(6)より R が求められる。縮れ係数 S は定義より次式で求められる。

$$S = 2R\theta/p \quad (8)$$

この式を用いて、JIS G 3555, および H 6102 の金網規格の寸法諸元をもとに計算した結果を図4に示す。

実線が各メッシュごとに線径と縮れ係数の関係を示している。各メッシュとも線径とともに大きくなり、1.03~1.15の範囲にあり一般にいわれている⁽¹⁾ものと一致する。ここで、便宜上、以後の各メッシュの種別は図4の()内の記号で、メッシュ A, ...等で表す。

縮れ係数は重量測定によって検定できる。幅 B , 長さ L の金網1層の重量 W は素材の密度を ρ とすると、次式で表される。

$$W = \frac{2\pi d^2 SLBN\rho g}{4} \quad (9)$$

測定された重量に対して適当な線径を中心に少しずつ線径を変化させて S を計算すると、図4の点線のようになり実線との交点の S と d を求めれば、これが最も確からしい線径、および縮れ係数となる。

$L=246$ mm, $B=26$ mm のサンプル各5枚の重量測定を行い、この平均値をもとに上記の方法で求めた線径および縮れ係数を表1に示す。

図3 基準状態のモデル

図4 線径と縮れ係数

4. 空隙率

図5のような n 層の金網を詰めた流路を考える。全長を L 、内幅を B 、内高を H とすると全容積 V は

$$V = LBH \quad \dots\dots\dots (10)$$

金網の全素線の体積 V_w は

$$V_w = \frac{\pi d^2 SLBNn}{4} \times 2 \quad \dots\dots\dots (11)$$

したがって空隙率 ε は

$$\varepsilon = 1 - V_w/V$$

$$= 1 - \frac{\pi d SN}{4(1+\beta)} \quad \dots\dots\dots (12)$$

となる。この式は $\beta=0$ のとき Marcus の式と一致する。すなわち、Marcus の式は層間すき間の全くない基準状態での空隙率を示すことがわかる。

5. 浸透率

図5のような流路に対して Hagen-Poiseuille の式が成り立つとすれば、圧力損失 ΔP は次式で表すことができる。

$$\Delta P = \frac{k_0 \mu V_e L_e}{m^2} \quad \dots\dots\dots (13)$$

ここで

k_0 : 定数で円管の場合 2 である。

μ : 作動液の粘性係数

V_e : 絶対速度の平均値

L_e : 素線に沿った流路の長さ

m : 動水力半径

さらに

Q : 液の体積流量

A : 流路の断面積

A_e : ウィックの空隙の平均面積

U_e : 平均有効速度

U_m : 通路面積の平均速度

γ_h : 等価円管半径

とすると、以下の関係式が成り立つ。

表 1 線径と縮れ係数

Mesh	Mesh no. 1/m	Weight N	Dia. m	Coef. of shrinkage
A	1.97×10^3	76.0×10^{-3}	0.210×10^{-3}	1.11
B	3.94	36.0	0.103	1.10
C	5.91	19.9	0.063	1.09
D	7.84	17.4	0.051	1.10
E	9.84	13.0	0.039	1.10
F	11.81	14.9	0.038	1.13
G	12.80	11.7	0.032	1.11

$$U_e = \frac{Q}{A_e} = \frac{Q}{A\varepsilon} = \frac{U_m}{\varepsilon}$$

$$V_e = U_e \frac{L_e}{L} = \frac{U_m}{\varepsilon} \cdot S$$

$$\gamma_h = 2m = 2 \times \frac{\text{流れの面積}}{\text{浸辺長}}$$

$$= 2 \times \frac{(\text{流れの体積})}{(\text{線の全表面積} + \text{管内面積})}$$

$$= \frac{2\varepsilon BHL}{2\pi ndLBSN + 2(B+H)L} \quad \dots\dots\dots (14)$$

式(14)に式(4)および式(12)を代入し整理すると

$$\gamma_h = \frac{\varepsilon d}{2(1-\varepsilon)Z} \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$Z = 1 + \frac{1}{\pi d SN} \left\{ \frac{1}{n} + \frac{(1+\beta)}{k'} \right\} \quad \dots\dots\dots (16)$$

$$k' = B/2d \quad \dots\dots\dots (17)$$

となる。 Z は等価円管半径に影響を及ぼす係数で、金網の線径、目数、縮れ係数、層数、すき間率、およびアスペクト比 k' の関数である。 k' は流路の幅 B と 1 層当たりの基準状態の厚さの比であるので流路のアスペクト比とも考えられる量である。通常のウィック内の流れでは、 $(1+\beta)$ に比べて k' は非常に大きいので $\{ \}$ 内の第 2 項は無視してもあまり影響はないであろう。

しかしながら層数 n はかなり影響することが予想される。

以上の式を式(13)に代入し整理すると

$$\Delta P = \frac{k_0 \mu V_e L_e}{m^2} = \mu U_m L \cdot \frac{16k_0(1-\varepsilon)^2 S^2 Z^2}{\varepsilon^3 d^2}$$

となる。したがって Darcy の法則で定義される浸透率 K は次式のようにになる。

$$K = \frac{\mu U_m L}{\Delta P} = \frac{\varepsilon^3 d^2}{16k_0 Z^2 S^2 (1-\varepsilon)^2} \quad \dots\dots\dots (18)$$

これは、Blake-Kozeney の式(1)と同じ形をしており $(16k_0 Z^2 S^2)$ が係数 122 に相当することがわかる。空隙率 ε はすき間率 β により影響を受けるし、 Z は層数 n によって影響されるので浸透率 K はかなり

図 5 金網を含む流路モデル

大きく変化するものと考えられる。

ウィック中の流れのレイノルズ数 R_e は一般に小さいので、 $k_0=2$ として係数を計算した結果を表 2 に示す。

1 層の場合、113~121 程度となり Blake-Kozeny の係数値とほぼ一致する。しかし層数 n が多くなるとかなり違ってくる。

6. 実験

以上の結果を確認するために強制流方式によるテストを行った。金網ウィックの浸透率の測定には多くの研究⁽³⁾が行われている。実際のヒートパイプの状態に近づけるため重力方式、コンデンサ方式等種々の方法が行われているが、いずれも不確定な要素を含んでいるので式(18)の確認という観点から最も簡単で確実な強制流方式を利用した。

図 6 に装置の概略を示す。

図 6 (a) は装置全体である。①のオーバーフロー孔をもつフラスコに作動液を供給しヘッドを一定に保つ。②がウィックホルダである。③はマノメータで各部の圧力測定用である。④から流出した液をメスシリンダで受けて重量測定を行った。⑤はオーバーフロー用タンクである。図には示していないが①および④で液温の測定を行っている。

図 6 (b) はウィックホルダの概略である。a, d はアクリルの透明な板で作製し気泡の有無、溜り具合等のチェックを行った。c がテスト用金網ウィックで、b

はパッキングである。パッキングの厚さを調整してすき間の調整を行った。

最も留意したのは空隙率で、金網の装着ごとにホルダ全体の厚さを測定し、上下の板材の厚さを差し引いて流路の高さ H を求めすき間率 β および空隙率 ϵ を求めた。テストは、ステンレス鋼のメッシュ A, B, C, D, E の 5 種類につき 1~3 層に対して行った。作動液としてはエチルアルコールを使用した。実験結果を図 7, 8 に示す。

図 7 は摩擦係数 C_f とレイノルズ数 R_e の関係を示す。これより、 $C_f \cdot R_e \approx 16$ であるので、前述の式(13)の k_0 は 2 と考えてもよさそうである。

また図 8 は、浸透率 K と $d^2 \epsilon^3 / (1 - \epsilon)^2$ の関係を示したものである。一般には層数に無関係として式(1)で整理⁽¹⁾されているが明らかに層数により異なった結果を生じている。これよりそれぞれの係数を求めると表 2 に示した $32S^2Z^2$ の計算値とほぼ一致している。

ここで、 C_f はファニングの式で定義されている摩擦係数で、5 章で行ったと同様な処理を行うと

図 7 C_f と R_e の関係

図 8 金網の浸透率 (実験)

表 2 $32S^2Z^2$ の計算値

		Mesh				
		A	B	C	D	E
No. of layer	1	113	114	121	115	119
	2	72	71	74	72	73
	3	60	59	61	60	61

図 6 強制流法式による試験装置

$$C_f = \frac{\Delta P \epsilon^3 d}{\rho U_m^2 L 2(1-\epsilon) Z S^3}$$

となる。同様にして、レイノルズ数 R_e は、

$$R_e = \frac{\rho U_m d S}{\mu(1-\epsilon) Z}$$

となるので、これらの式より計算した。

7. 実際の浸透率

実際のヒートパイプの場合、ウィック内の流れは自由表面をもち前章の試験状態とは異なる。すなわち、ウィックの内面は蒸気に接しているため蒸気との摩擦抵抗を無視できるとすれば、この部分の管壁摩擦抵抗は無視できる。したがって、式(14)の分母の第2項を、 $(B+2H)L$ と置き換えて同様な演算を行い、円管に対する式を求めると

$$Z = 1 + \frac{1}{\pi d S N} \left\{ \frac{1}{2n} + \frac{(1+\beta)}{k''} \right\} \dots\dots\dots (19)$$

$$k'' = D_m / d$$

ここで

D_m : ウィックの平均直径

となる。

式(16)の Z と比べて見ると $\{ \}$ 内の第1項が $1/2$ となっている。したがって係数 $32 S^2 Z^2$ は表2の2層に対するものが円管の1層に相当することになる。

図9に内径15 mmの円管にメッシュCの金網5層に対して、 β を0~60%まで変化させたときの計算結果を示す。ただし β が変化すると流れの断面積 A も変化するので $A \times K$ の形で表してある。点線は式(1)に

図9 $A \times K$ の値

よる計算結果である。

一点鎖線は市販の内径15 mm、メッシュCの金網1.5捲きの水ヒートパイプの熱流実験を行い $A \times K$ を求めた結果である。管の半周は1層であるので図9の1層のところで見ると β が15~30%範囲に入っている。式(1)では3~6層程度ないとこれだけの熱量は流れないことがわかる。ほぼ妥当な結果と考えられる。なおこの実験は水平の状態で行った。

8. 考 察

さらに確認のために、本文末尾の文献(4)~(8)のデータをもとに検算してみた。この場合は毛管限界が問題となるので輸送熱量から $A \times K$ を求める式は次式⁽¹⁾で表される。

$$A \times K = \frac{\mu L_{eff} Q_h}{\Delta P \lambda \rho g} \dots\dots\dots (20)$$

$$\Delta P = \frac{2\sigma}{R_c} - \rho g (D_i \cos \phi - L \sin \phi)$$

$$R_c = \frac{d + \omega}{2}$$

ただし、 λ : 蒸発の潜熱、 ρ : 液の密度、 ΔP : 毛管力および重力によるポンピング圧力、 L_{eff} : ヒートパイプの有効長、 Q_h : 輸送熱量、 σ : 液の表面張力、 ϕ : 傾斜角度、 R_c : 有効細孔半径、 ω : 金網の目開きである。

しかしながら、試験されているヒートパイプは管径および長さが異なるのでこのままでは整理がしにくい。そこで単位直径あたりに換算するために管内径 D_i で割って整理した。 $A \times K / D_i$ は次元的には $[m^3]$

図10 $(A \times K) / D_i$ と β の関係

で液流量を表す量と考えられる。したがってパイプごとには K がきまっているとすれば液流の厚さに関する量と考えられる。したがって管径には無関係に整理できる。

一方液流の厚さは式(4)より線径 d , 層数 n , すき間率 β の関数であり, また K も線径, 層数, すき間率および目数の関数である。計算してみると, 目数が同じ場合, 線径の違いによる K への影響は比較的小さいので, 目数の種類ごとに代表的な線径を用いるとすれば, $A \times K/D_i$ のすき間率 β に対する変化の様子は各目数の種類ごとに層数 n をパラメータとした1本の線で表すことができる。

このようにして整理したのが図10である。

実線が計算結果で, 左側はメッシュ A 1層とメッシュ D 6層まで, 右側にメッシュ B 4層までとメッシュ C 2層までを示してある。○, ▼印が熱流実験データから求めたものである。○印は水平, ▼印は角度づきの場合である。

A の場合はナトリウムで外径 12.7 mm~46 mm, 金網の捲数 2~4, その他は水で外径 9.5 mm~45 mm, 金網の捲数 2~10 である。

D 以外は1層の線上に集中している。すき間率は, A が 10%, B が 30%, C は 40%, D は 2層で 40% である。これより1層当たりのすき間 δ を求めるといずればほぼ 0.04 mm 程度となる。

B, D で 4~6層まで流れているものもあるがこの場合は熱抵抗が層数倍に増加するので, かなりの温度差を生じているものと考えられる。液注入量の多いときにこの状態が現れるようであるがヒートパイプの特徴である均温性は悪くなっているものと思われる。

すき間率 β の実態は不明であるが, ヒートパイプ全

体としての熱抵抗は, 初期の注入液量と蒸気流, および循環液流との関係でできる蒸発部, 凝縮部の液の厚さに関係しているものと思われるので, 熱抵抗の面からの検討が必要であると考えられる。

9. 結 言

金網ウィックの素線の形状を円弧のつながりと仮定し, 層間すき間を含んだモデルを考えることにより, すき間率, 層数の浸透率に及ぼす影響を明らかにした。

すなわち, 浸透率を Blake-Kozeny の式で表せば, すき間率は空隙率に, 層数は係数の部分にそれぞれ影響を与えることがわかった。

すき間率 β については不明であるが, 熱抵抗も含めて検討する必要があると思われる。

文 献

- (1) 大島・松下・村上, ヒートパイプ工学, (昭54), 48, 朝倉書店.
- (2) 師岡・黒木, ヒートパイプに関する研究, 機講論, No. 780-18 (昭53-11), 243.
- (3) Phillips, E. C., *Low Temperature Heat Pipe Research Program*, NASA CR-66792 (1969-6), 29.
- (4) 師岡・ほか3名, ヒートパイプに関する研究, 機論, 47-414, B (昭56), 351.
- (5) 野田・ほか3名, 円周金網形ヒートパイプにおける伝熱性能に関する実験的研究, 第19回伝熱シンポ講論, (昭57-5), 247.
- (6) 古谷, ウィック形ヒートパイプの伝熱特性に関する研究, 第19回伝熱シンポ講論, (昭57-5), 250.
- (7) 吉岡・ほか3名, 金網ウィックをもつヒートパイプにおける封入液量と最大熱輸送量に関する研究, 第18回伝熱シンポ講論, (昭56-6), 94.
- (8) 本田, 高温用ナトリウムヒートパイプ, 金属, 49-12 (昭54-12), 10 (別刷).

討 論

〔質問〕 伊藤 謹司 [(有)ジェーアイ]

金網ウィックは, ヒートパイプの伝熱特性を左右する重要部材である。

従来, 金網ウィックの浸透率については主としてマクロ的解析が進められており, 実際とのかい離が指摘されていた。

著者がこの難問に対しミクロ的解析を試みられたことに敬意を表する。

さて, 著者の解析(表2)によれば, ウィック1層の場合は, 浸透率 K の中の係数が 113~121 となり, 式(1)*における係数 122 にほぼ一致している。また,

2層の場合はその係数が 71~74 と約 60% に, さらに3層の場合は 59~61 と約 50% になっている。

これまで, 式(1)*から求めた浸透率が実際とは 6~8 倍の違いがあるとされていた(2612 ページ右欄7行) こととは大差がある。式(18)と実際との違いはどの程度か。

その理由を貴解析のキーポイントとの関連で教えていただきたい。

〔回答〕 還流液量は wick の断面積と浸透率の積

* Blake-Kozeny の式。

付図 1

によって影響を受ける。基準状態の wick の面積を A' 、Marcus の式による空けき率を ε' 、係数の倍率を f とすると次式が得られる。

$$A = A'[1 + \beta] : \varepsilon' = 1 - \pi dsN/4$$

$$: f = 32s^2z^2/122$$

本文の式(12)より

$$1 - \varepsilon = [1 - \varepsilon'] / [1 + \beta]$$

したがって、

$$\varepsilon = 1 - [1 - \varepsilon'] / [1 + \beta] = [\varepsilon' + \beta] / [1 + \beta]$$

$$= \varepsilon' [1 + \beta / \varepsilon'] / [1 + \beta]$$

本文の式(18)、および式(1)より、

$$A \times K = [A' \times K'] \times [1 + \beta / \varepsilon']^3 / f$$

ここで、 K' は Blake Kozeny の式による浸透率である。

以上のように係数の倍率 f だけではなく、空けき率 ε の β による増加により影響される。この項はすきま率 β の三乗で効くので、この影響のほうが大きい。例えば、 ε' を 0.6 程度とすれば、 $\beta = 0.3$ のとき、1 層では $f = 0.6$ でほぼ 5.6 倍、2 層では $f = 0.5$ で 6.7 倍程度になる。

〔質問〕 師岡 慎一

〔(株)東芝原子力技術研究所〕

(1) 2615 ページ左欄 2~4 行め、「ウィック中の……示す。」で、レイノルズ数 Re が小さいので $k_0 = 2$ を使用するのではなく、 Re が小さく（層流）そして、金網ウィックの流路を円管と近似できるので $k_0 = 2$ を使用するのではないか。

(2) 図 6 の試験装置において付図 1 に示す gap を流れる水の影響はないのか。

(3) 図 10 内の記号についてご説明願いたい。

〔回答〕 (1)レイノルズ数 Re が小さいということとは層流であるということで、円管に近似できると

付図 2

は、この時点ではいえない。便宜上 $k_0 = 2$ を使用しただけである。実験により $C_f \cdot Re = 16$ である確認がなければ、 $k_0 = 2$ とはできない。粒子層の場合 $C_f \cdot Re \neq 16$ であるので k_0 は違った値をとる。 $k_0 = 2$ を使用するならば別の係数を掛ける必要がある。

(2) この gap の影響は大きいので、可能なかぎり小さくすることが望ましい。単純に、gap をく形閉断面とし、面積を A'' 、幅 a の基準金網厚さ $2d$ に対する倍率を k とすると、 $a = 2dk$ 、 $A'' = (2dk) \cdot [2dn(1 + \beta)]$ となる。またこの断面の浸透率を K'' とすると、式(13)より $K'' = m^2/k_0$ 、したがって、

$$A'' \cdot K'' = A'' \cdot m^2/k_0$$

$$= 2d^4 \cdot kn[1 + \beta] / [1/k + 1/n(1 + \beta)]^2$$

で求められる。wick の $A \cdot K$ との比を%で付図 2 に示す。150 mesh, $\beta = 0.3$ の場合である。 $k = 3$ 以下であれば 20% 以下の影響となる。Blake Kozeny の式を用いれば、3 倍程度〔層数の多いときは更に大きくなる〕に増加する。実際のヒートパイプでは、この影響はもっと少なくなるものと思われる。

(3) A, B などの記号は mesh の種類、1, 2 などの数字は層数である。