報 文

一般報文

(昭和48年7月23日受理)

比重量と繊維の配列が織物の熱伝導率
におよぼす影響

東京農工大学工学部 仲 三郎・鎌田 佳伸

THE EFFECT OF BULK DENSITY ON THERMAL CONDUCTIVITY OF FABRICS

By Saburo Naka and Yoshinobu Kamata

(Faculty of Technology, Tokyo University of
Agriculture and Technology, Tokyo, Japan)

The specific thermal conductivity of textile materials in the direction parallel to the fiber arrangement is far greater than that in the direction perpendicular to it. For fabrics in which fibers lie mainly parallel to the surface, the thermal conductivity in the direction parallel to the surface has not been investigated, though that in the direction perpendicular to fabric surface is discussed in detail.

In this paper the specific thermal conductivities of polyester fabrics were measured in the directions parallel to the warp and filling, as well as in the direction perpendicular to the fabric surface. The results were compared with the theoretical values. Measurements of the thermal conductivities and thermal diffusivities were made by the line heat source method reported in our previous paper. The results obtained are as follows:

- (1) The theoretical values of the specific thermal conductivities in three directions are in satisfactory agreement with the experimental values for polyester fabrics.
- (2) The conductivities of fabrics increase with the increase in bulk densities in the density range of our tests. The fiber arrangement affects greatly the conductivity. For the filament fabrics of cuprammonium and polyester, the increase in conductivity with applied pressure can be attributed mainly to an increase in bulk density, for there is very little change in fiber arrangement in such fabrics. But for the hairy fabrics of wool, the change in density is counterbalanced by changes in the fiber arrangement. Hence the increase in conductivity of the formers is greater than that of the latters, and for wool flannel, the increase in conductivity in the direction parallel to the warp is far greater than that in the direction perpendicular to the fabric surface.
- (3) For the filament fabrics of cuprammonium and polyester, the conductivity in the direction parallel to the warp is three- to five-fold greater than that in the direction perpendicular to the fabric surface. For wool flannel, the conductivity depends little on the directions, because of the random arrangement of the fibers in this fabric.

(Received July 23, 1973)

1. 緒 言

繊維材料は、空気を多く含み、軽くて熱絶縁性に富むため断熱材としてすぐれており、その熱物性値、とくに有効熱伝導率に関する研究が多く報告されている。そしてそれらの研究はすべてある厚さをもった繊維材料の厚さ方向の伝熱性に関するものである。しかし繊維材料は一般に異方性であり、繊維の配列方向とそれに垂直方向ではこれらの値に大きな差のあることをまえに指摘した¹⁾。したがって本研究においては、織物について、たて糸、よこ糸および織物面に垂直方向の有効熱伝導率を表わす理論式を導き、線熱源法¹⁾を使用して比重量を変化したときの実験値と比較検討した。

2. 理 論

一般に熱は繊維材料内を伝導、ふく射および対流によって伝わるが、温度差が比較的小さくて、繊維の容積比率のあまり小さくない場合には、対流が無視できることはまえに述べた¹⁾。したがって、繊維材料の有効熱伝導率を考える場合、空気層と繊維の接触部を伝導で流れる熱と繊維間をふく射で伝わる熱を考慮する必要がある。これについては多くの理論式が提案されているからはじめにその主なものについて検討する。

2.1. 従来の理論式

上に述べたように、繊維材料内の伝導を考える場合、空気層を流れる熱と繊維の接触部を流れる熱を考慮することが必要であるが、繊維材料内の繊維の配列は一般に

3次元であるから、熱流に垂直な繊維のみならず、他の方向の繊維の存在を無視できない。また繊維の配列方向を考える場合には、繊維が一般に異方性であること、すなわち軸に垂直方向と軸方向の熱伝導率に大きな差のあることも無視できない。従来報告されている理論式では、熱流に垂直な繊維のみを考慮したものが多く、そこでここでは、理論式に考慮すべき四つの条件、すなわち繊維の配列方向、繊維の異方性、繊維の接触および繊維間のふく射をそれぞれ第1、第2、第3および第4条件と名付けることにする。また繊維材料の有効熱伝導率を K_e 、繊維の軸方向および軸に垂直方向熱伝導率をそれぞれ $K_{\parallel}$ 、 $K_{\perp}$ 、空気の熱伝導率を K_a 、繊維の容積比率を f で表わすことにする。

1) 四つの条件を考慮しない式

渡辺²⁾は2枚の板で挟まれた繊維集合体の有効熱伝導率を、ふく射を無視したときの有効熱伝導率と板の間のふく射による有効熱伝導率との和で表わした。

$$K_e = F_1(K_{\perp}, K_a, f) + \frac{\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4}{T_1 - T_2} \cdot \frac{D}{\frac{2}{C} - \frac{1}{C_s}} F_2(D, f) \quad (1)$$

ただし

T_1, T_2 ; 板の温度

D ; 板の間隔

C ; 板のふく射係数

C_s ; 黒体のふく射係数

$$F_1(K_{\perp}, K_a, f) = \left[\frac{1 - \sqrt{f}}{K_a} + \frac{1}{K_{\perp} + K_a \left(\frac{1}{\sqrt{f}} - 1 \right)} \right]^{-1} \quad (1.1)$$

$$F_2(D, f) = e^{-\beta f D} \quad (1.2)$$

(1) 式の第2項は繊維間でなく板の間のふく射であるから、板の間隔 D または繊維の容積比率 f が大きい場合は無視できる。

2) 第1条件のみ考慮した式

Bogaty 等³⁾は熱流方向に配列する繊維の割合を $1-a$ 、それに垂直方向の割合を a として、織物の有効熱伝導率を次の式で示した。

$$K_e = (1-a) \{ K_{\perp} \cdot f + K_a (1-f) \} + \frac{a}{\frac{1-f}{K_a} + \frac{f}{K_{\perp}}} \quad (2)$$

3) 第3条件のみ考慮した式

堀川⁴⁾は、空気の抵抗 R_a 、繊維とその接触抵抗が直列に配列した抵抗 $R_f + R_c$ 、および空気と繊維とその接触抵抗が直列に配列した抵抗 $R_a + R_f + R_c$ の三つの抵抗が並

列に並んだモデルを仮定して K_e を次の式で表わした。

$$K_e = \frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_f + R_c} + \frac{1}{R_a + R_f + R_c} \quad (3)$$

$$R_a = \frac{1}{(1-f)K_a}, \quad R_f = \frac{1}{fK_{\perp}}, \quad R_c = \frac{1}{fK_c},$$

$$K_c = \frac{K_a + K_{\perp}}{2}$$

4) 第1と第4条件を考慮した式

Vnukov 等⁵⁾は、ガラス繊維集合体について、比重量の小さい場合の K_e を次の式で示した。

$$K_e = K_f \left\{ f(1-a) + \frac{(1-f(1-a))^2}{af + \frac{1-f}{\beta}} \right\} + \frac{\pi \sigma}{8af} \left(4T_m^3 d + \frac{5C_s^2}{\pi^4 d} T_m \right) \quad (4)$$

ただし

K_f ; ガラス繊維の熱伝導率

a ; 熱流に垂直方向の繊維の割合

β ; 空気と繊維の熱伝導率の比

σ ; Stetan-Boltzmann 定数

d ; 繊維の直径

T_m ; 繊維を挟む2枚の板の平均温度 $^{\circ}\text{K}$

$C_s = 0.0144 \text{ m} \cdot ^{\circ}\text{K}$

5) 第3と第4条件を考慮した式

Hager 等⁶⁾は次の式を提案した。

$$K_e = \frac{1}{\frac{1-f}{K_a} + \frac{f}{K_{\perp}}} + 4K_{\perp} f^3 + \frac{4\sigma T_m^3 \frac{d}{f} \cdot D}{D + \frac{d}{f} \left(\frac{1}{2\epsilon_1} + \frac{1}{2\epsilon_2} - 1 \right)} \quad (5)$$

ただし

ϵ_1, ϵ_2 ; 繊維を挟む2枚の板のふく射率

6) 第1、第3および第4条件を考慮した式

Dulynev 等⁷⁾は熱流方向とそれに垂直の繊維が直角に交わってできた骨組構造のモデルを仮定して次の理論式をたてた。

$$K_e = K_f \left\{ c^2 + r(1-c^2) + \frac{2rc(1-c)}{rc + (1-c)} \right\} \quad (6)$$

$$2c^3 - 3c^2 + 1 = 1 - f \quad (6.1)$$

$$r = \frac{K_a + K_R}{K_f} \quad (6.2)$$

$$K_R = 2.36 T_m^3 Y \frac{d\sigma}{c^2(2-c)} \quad (6.3)$$

$$Y = 1 - \frac{3}{4\tau} (1 - 4K_s(\tau))$$

$$-\frac{2}{3\tau}(1-\varepsilon)\frac{(1-3K_s(\tau))^2}{1+2(1-\varepsilon)K_s(\tau)} \quad (6.4)$$

$$K_n(\tau) = \int_0^1 e^{-\frac{\tau}{\mu}} \mu^{n-2} d\mu \quad (6.5)$$

$$\mu = \cos \theta$$

$$\tau = \zeta D$$

ただし

ζ : 繊維材料のふく射エネルギーの吸収係数

ε : 板のふく射率

K_R : ふく射による有効熱伝導率

以上の理論式の多くは繊維集合体に関するものであるから、繊維の容積比率 f の小さいときは、第3条件が無視できるし、 f の大きいときは第4条件が無視できる。しかし(1)(2)式のようにこれら二つの条件を同時に無視することはできない。またガラス繊維のような異方性でない繊維の場合は第2条件は不必要であるが、(1)式は第1条件をも無視している。(2)式は織物のような f の大きい試料に対して、第3条件とともに第2条件をも考慮していない点に問題がある。(3)式においては、接触部の熱伝導率が繊維と空気の熱伝導率の平均値で表わしうることの根拠が不明確である。(4)式はガラス繊維の比重量の小さい場合であるから、この試料に対する理論式としては条件が満足されている。(5)式は、第1条件を無視していること、繊維の接触面積を繊維の断面積で表わしているが、これはHager自身も指摘しているように過大であることに問題がある。(6)式も繊維集合体を繊維が互いに直角に交わってできた骨組構造で表わしているから、接触面積を過大に評価していることになる。

以上のごとくこれらの理論式はいずれも異方性繊維で構成された三次元構造をもつ織物の有効熱伝導率を表わす理論式としては不充分である。よってはじめにあげた四つの条件を考慮した、織物面に垂直方向のみならず、たて糸、よこ糸方向の有効熱伝導率を表わす理論式を考えてみる。

2.2 4条件を考慮した理論式

2.2.1 第1, 第2, 第3条件を考慮した理論式

有効熱伝導率は、伝導による有効熱伝導率、すなわち第1, 第2, 第3条件を考慮した値と第4条件を考慮したふく射による有効熱伝導率との和で表わすことができるから、まず前者について考える。

1) 直線状繊維が平行に配列している場合

繊維を直線と仮定し、これが平行に並んでいる場合であって、それらの間隔は任意で、離れている部分と接触している部分が存在するものとする。

繊維の配列方向の有効熱伝導率を $K_{e\parallel}$ 、繊維に垂直方

向の有効熱伝導率を $K_{e\perp}$ で表わすと、これらは次の式で表わすことができる⁸⁾。

$$K_{e\parallel} = fK_{\parallel} + (1-f)K_a \quad (7)$$

$$K_{e\perp} = nK_{e\parallel} + (1-n)K_{e\perp} \quad (8)$$

$$K_{e\perp} = \left[\frac{1-\sqrt{f}}{K_a} + \frac{1}{K_{\perp} + K_a \left(\frac{1}{\sqrt{f}} - 1 \right)} \right]^{-1} \quad (9)$$

$$K_{e\parallel} = \left[\frac{1-\sqrt{1-f}}{K_{\perp}} + \frac{1}{K_a + K_{\perp} \left(\frac{1}{\sqrt{1-f}} - 1 \right)} \right]^{-1} \quad (10)$$

$K_{e\perp}$ は空気が繊維を囲む部分の有効熱伝導率で、 $K_{e\parallel}$ は繊維が空気を囲む部分の有効熱伝導率を表わし、それらの占める割合をそれぞれ $1-n$, n とする。

2) 曲った繊維が全体として平行に配列する場合

Fig.1に示すように、曲った繊維が直交座標の X 軸に平行に配列している場合を考える。いまこれを真直ぐな繊維が X 軸に平行に配列した繊維層とそれに垂直に配列した繊維層との組み合わせからなるものと仮定し、前者の割合を $1-a$ 、後者の割合を a とすると、繊維の配列方向、すなわち X 軸方向の有効熱伝導率 $K'_{e\parallel}$ は、同図モデル1から次の式で表わされる。

$$K'_{e\parallel} = (1-a)K_{e\parallel} + aK_{e\perp} \quad (11)$$

また繊維の配列に垂直方向、すなわち Y 軸または Z 軸方向の有効熱伝導率 $K'_{e\perp}$ は、モデル2に示すごとく、その方向の繊維の割合が $a/2$ となるから次の式で表わされる。

$$K'_{e\perp} = \frac{a}{2}K_{e\parallel} + (1-\frac{a}{2})K_{e\perp} \quad (12)$$

3) 織物の場合

織物を、たて糸の繊維層とよこ糸の繊維層が重なって

Fig.1 Parallel arrangement of curved fibers. X -axis is taken parallel to the direction of fiber arrangement. Curved fibers are represented by fibers parallel and perpendicular to X -axis. $1-a$ and a are the effective fractions of the formers and the latters, respectively. Therefore, the effective fractions of fibers parallel to Y -axis (or Z -axis) will be $a/2$. The specific thermal conductivity of fiber-air assembly in the direction parallel to X -axis and Y -axis (or Z -axis) is denoted by $K'_{e\parallel}$ and $K'_{e\perp}$, respectively.

できているものと考え、それらの各層はそれぞれ曲った繊維の平行配列をしている。いまたて糸、よこ糸の繊維層の繊維配列方向の有効熱伝導率をそれぞれ $K'_{\epsilon_{\parallel}w}$, $K'_{\epsilon_{\parallel}f}$, それに垂直方向の有効熱伝導率をそれぞれ $K'_{\epsilon_{\perp}w}$, $K'_{\epsilon_{\perp}f}$ とすると、織物面に垂直方向の有効熱伝導率 K_v , たて糸方向の有効熱伝導率 K_w , よこ糸方向の有効熱伝導率 K_f はそれぞれ次の式で表わすことができる。

$$K_v = \left[\frac{d_w}{K'_{\epsilon_{\perp}w}} + \frac{d_f}{K'_{\epsilon_{\perp}f}} \right]^{-1} \quad (13)$$

$$K_w = d_w K'_{\epsilon_{\parallel}w} + d_f K'_{\epsilon_{\perp}f} \quad (14)$$

$$K_f = d_f K'_{\epsilon_{\parallel}f} + d_w K'_{\epsilon_{\perp}w} \quad (15)$$

ただし

d_w ; たて糸繊維層の厚さ

$d_f = 1 - d_w$; よこ糸繊維層の厚さ

$K'_{\epsilon_{\perp}w}$, $K'_{\epsilon_{\perp}f}$ は (12) 式, $K'_{\epsilon_{\parallel}w}$, $K'_{\epsilon_{\parallel}f}$ は (11) 式で, また $K_{\epsilon_{\parallel}}$ は (7) 式, $K_{\epsilon_{\perp}}$ は (8) 式で与えられるから, 繊維の熱伝導率 $K_{\parallel}$, $K_{\perp}$, 繊維の容積比率 f , たて糸繊維層の厚さ d_w , モデルの割合 n および α を知ることにより, ふく射を考慮しない場合の織物の有効熱伝導率 K_v , K_w , K_f をもとめることができる。

2.2.2 第4条件を考慮した理論式

二つの黒体面を仮定し, その面積を A_1 , A_2 , その温度を T_1 , T_2 とし, 面 A_1 の A_2 に対する角関係を F_{12} で表わすと, 単位時間における A_1 から A_2 へのふく射伝熱量 Q_r は次の式で表わされる。

$$Q_r = A_1 F_{12} \sigma (T_1^4 - T_2^4)$$

温度差が小さい場合には, 平均温度を T_m とすると近似的に

$$Q_r = 4 A_1 F_{12} \sigma T_m^3 (T_1 - T_2)$$

となる。

二つ面が平行で, その距離を D , ふく射による有効熱伝導率を K_{er} とすると $A_1 = A_2 = A$ の場合は,

$$K_{er} \frac{A(T_1 - T_2)}{D} = 4 A F_{12} \sigma T_m^3 (T_1 - T_2)$$

$$\therefore K_{er} = 4 D F_{12} \sigma T_m^3 \quad (16)$$

繊維集合体内のふく射伝熱においては, ふく射熱の到達する距離 D は繊維の容積比率 f が大きいほど小さくなり, 角関係 F_{12} は繊維の直径 d の大きいほど大きくなること, また繊維が黒体でないことなどを考慮すると, (16) 式は次の式で表わすことができる。

$$K_{er} = \alpha \sigma T_m^3 \frac{d}{f} \quad (17)$$

α は, 繊維のふく射率, 直径, 形態, 配列状態, 容積比率などによって定まる係数である。

さらに α の値について考えると, (4) 式の右辺第2項を変形して (17) 式で表わすと, $T_m = 300^\circ\text{K}$ の場合

$$\left. \begin{aligned} d = 10 \mu & \text{で } \alpha = 2.05 / a \\ d = 20 \mu & \text{で } \alpha = 1.70 / a \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

が得られる。 α は熱流に垂直に配列する繊維の割合である。Vnukov 等⁹⁾ はガラス繊維の太さを変えて実験したデータと比較し, d が 3μ 以上の場合理論値は実験値より小さくなると述べている。

また (5) 式右辺第3項において, 板のふく射率 ϵ_1 , ϵ_2 が大きく, かつ $D \gg d/f$ の場合には

$$K_{er} = 4 \sigma T_m^3 \frac{d}{f} \quad (19)$$

となり, これは繊維の直径に等しい厚さの板が熱流に垂直に配列し, その容積比率が繊維集合体のそれに等しいような condensed sheet model のふく射による有効熱伝導率を表わしている。Hager 等⁹⁾ はさらに詳細に解析して, 繊維が温度勾配に垂直に配列している場合, 熱流に垂直な一つの面の両側からそれに達するふく射熱の差をふく射伝熱量と考えて次の式を導いた。

$$K_{er} = 4.5 \sigma T_m^3 \frac{d}{f} \quad (20)$$

また (6.3) 式を (17) 式で表わすと α は

$$\alpha = 2.36 \frac{Y \cdot f}{c^2 (2 - c)}$$

(6.1), (6.4), (6.5) 式を使用して α をもとめると, 板のふく射率 $\epsilon = 1$ の場合には, $f = 0.14 \sim 0.6$ に対して

$$\alpha = 7.6 \sim 1.8 \quad (21)$$

が得られる。

(18) ~ (21) 式から, (17) 式の α の値は, 繊維の配列方向と繊維の容積比率の影響を大きくうけ, $1 \sim 8$ の値をとると考えられる。

以上のことから, 織物の有効熱伝導率は, (13) ~ (15) 式で表わされる空気層と繊維接触部の伝導による有効熱伝導率と (17) 式で表わされるふく射による有効熱伝導率との和で与えられる。

3. 実験

3.1 実験試料と実験方法

実験には Table 1 に示す4種類の試料を使用した。

測定には線熱源法¹⁾を使用した。すなわち, 多数重ね合わせた試料の中心に直交座標の原点をとり, たて糸に平行に x 軸, よこ糸に平行に y 軸, 織物面に垂直に z 軸をとると, x 軸上に置かれた線熱源から, $t > 0$ において単位時間, 単位長さ当たり q の熱を発生する場合, 時刻 t における試料の温度上昇 v は次の式で表わされる。

$$v = - \frac{q}{4\pi\sqrt{K_f K_v}} E_i \left[- \frac{1}{4t} \left(\frac{y^2}{K_f} + \frac{z^2}{K_v} \right) \right] \quad (22)$$

Table 1 Properties of fabrics used in the tests

Fabric	Fiber			
	Warp		Filling	
Cuprammonium rayon	Cuprammonium rayon		Cuprammonium rayon	
Polyester-wool blend	Polyester		Wool	
Wool flannel	Wool 92%, Nylon 8%		Wool 92%, Nylon 8%	
Polyester taffeta	Polyester		Polyester	

Thread count		Threads per cm	
Warp	Filling	Warp	Filling
110d	110d	44	30
2/40d	2/30's	103.8	22.4
11's	11's	14	14
50d/24f	50d/24f	40.8	36.6

κ_f , κ_v はそれぞれよこ糸方向および織物面に垂直方向の温度伝導率である。

したがって面 $z = 0$ 上の熱源から距離 y の位置の時刻 t_1 における上昇温度を v_1 , $t_2 = n t_1$ における上昇温度を v_2 とすると,

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{E_i\left(-\frac{y^2}{4 n t_1 \kappa_f}\right)}{E_i\left(-\frac{y^2}{4 t_1 \kappa_f}\right)} \quad (23)$$

となるからこの式を利用して κ_f がもとめられ, したがって (22) 式を用いて $K_f \cdot K_v$ がわかる。同時に面 $y = 0$ 上の熱源から距離 z の位置の温度を測定して同様に κ_v が得られるから

$$K_f = \kappa_f \rho c, \quad K_v = \kappa_v \rho c$$

なる関係を使用して K_f , K_v を知ることができる。ただし ρ は試料の比重量, c は比熱である。たて糸方向の κ_w , K_w は, 線熱源をよこ糸に平行に置くことによって同様にもとめられる。

また試料の比重量を変化するため, Fig.2に示すごとく, 試料を挟む上下2枚の厚さ1.5 cm のベークライト板の4隅にボルトを通し, 試料を圧縮しながら測定した。実験は20℃, 65% R.H.の恒温恒湿室で行ない, 加熱開始後1minと2min後の温度を測定した。すなわち(23)式の t_1 は1min, n は2を採用した。

Fig.2 Apparatus for compressing the samples placed in layers.

4. 結果と考察

Fig.3～Fig.8は各試料の温度伝導率および熱伝導率と比重量との関係をプロットしたものである。前報¹⁾において述べたように, たて糸とよこ糸方向の値は, 試料面に垂直方向の値に比し, 熱電対と熱源との距離の不安定のためにばらつきが一般に大きい。

Fig.3 Dependence of thermal diffusivity of fabric in the direction parallel to the warp κ_w on its bulk density ρ .

Fig.4 Dependence of thermal diffusivity of fabric in the direction perpendicular to the fabric surface K_v on its bulk density ρ .

Fig.5 Dependence of thermal conductivity of fabric in the direction parallel to the warp K_w on its bulk density ρ .

Fig.6 Dependence of thermal conductivity of fabric in the direction perpendicular to the fabric surface K_v on its bulk density ρ .

Fig.7 Dependence of thermal diffusivity of polyester taffeta on its bulk density ρ . (a) and (b) in the direction parallel to the warp and filling, respectively. (c) in the direction perpendicular to the fabric surface.

Fig. 8 Dependence of thermal conductivity of polyester taffeta on its bulk density ρ . a and b; in the direction parallel to the warp and filling, respectively. c; in the direction perpendicular to the fabric surface. Full lines and broken lines were drawn by means of the empirical and theoretical equations, respectively.

Table 2はこれらのデータからもとめた実験式である。

4.1 理論値と実験値の比較

理論値を計算するために、その試料に使用されている繊維の熱伝導率 $K_{\perp}^{(8)}$, $K_{\parallel}^{(9)}$ がすでにもとめられている試料のポリエステル・タフタについて考える。

はじめにふく射による有効熱伝導率 K_{er} を考えると、本実験に使用した比重量の範囲が $540 \sim 810 \text{ kg/m}^3$ であるから、繊維の容積比率 f の値は $0.391 \sim 0.587$ の範囲にある。 K_{er} は f の小さいほど大きくなるから、 $f = 0.39$ とすると、繊維の直径 $d = 10 \times 10^{-6} \text{ m}$ 、温度 $T_m = 293^\circ \text{K}$ を (17) 式に代入すると

$$K_{er} = 0.315 \times 10^{-4} \alpha \text{ kcal/m} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ \text{C}$$

が得られる。 α は $1 \sim 8$ であるから

$$K_{er} < 2.5 \times 10^{-4} \text{ kcal/m} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ \text{C}$$

となり、この値は Fig. 10 の K_v の最小値の 0.5 % であり、 K_{er} が無視できることがわかる。

つぎに空気層と繊維接触部の伝導による有効熱伝導率を考える。ポリエステル・タフタのたて糸とよこ糸は、Table 1 に示すごとく同じ糸であるから、たて糸とよこ糸の繊維層における繊維の容積比率 f が等しいと仮定すると、両繊維層の厚さは糸密度に比例する。したがって Table 1 より

$$d_w = 0.53 \quad d_f = 0.47$$

が得られる。また

$$K'_{e\perp w} = K'_{e\perp f} = K'_{e\perp}, \quad K'_{e\parallel w} = K'_{e\parallel f} = K'_{e\parallel}$$

とおくことにより、(13), (14), (15) 式から

$$K_v = K'_{e\perp} \quad (13')$$

$$K_w = 0.53 K'_{e\parallel} + 0.47 K'_{e\perp} \quad (14')$$

$$K_f = 0.47 K'_{e\parallel} + 0.53 K'_{e\perp} \quad (15')$$

が得られるが、これらの式にはモデルに関する係数 n と a が未知数として含まれている。

織物をその面に垂直に圧縮すると、自然の状態では曲っている糸や繊維が織物面内で真直ぐになろうとするから、ある範囲において、 a は繊維の容積比率 f に反比例し、また n は前報⁸⁾ で述べたように f に比例すると考えられるから

$$a = k_1 / f, \quad n = k_2 f \quad (24)$$

とおき、 K_v の実測値を使用して (13') 式により、 k_1, k_2 をもとめると

$$k_1 = 0.57 \times 10^{-2} \quad k_2 = 0.54$$

が得られる。この k_1, k_2 を用いて (13'), (14'), (15') 式で計算した理論値を Fig. 8 に点線で示した。繊維の熱伝導率は $K_{\perp} = 0.14 \text{ kcal/m} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ \text{C}$, $K_{\parallel} = 0.93 \text{ kcal/m} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ \text{C}$ を使用した。図の実線は Table 2 の実験式に

Fig. 9 Diagrams showing the relations between specific thermal conductivities K_e and fiber volume fractions f for polyester fiber assemblies drawn by means of other theoretical equations (1), (2), (3), (4), (5), and (6). Full line was drawn by our empirical equation for K_v .

Table 2 Empirical equations showing the dependence of thermal diffusivities $\kappa(\text{m}^2/\text{hr})$ and thermal conductivities K (kcal/m-hr·°C) of fabrics on their bulk densities $\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$.

Fabric	Bulk density (kg/m ³)	Empirical equation
Cuprammonium rayon	640 ~ 860	$\kappa_w = (0.231 + 0.202 \times 10^{-3}\rho - 0.157 \times 10^{-6}\rho^2) \times 10^{-3}$
		$\kappa_v = (-0.373 + 0.169 \times 10^{-2}\rho - 0.105 \times 10^{-6}\rho^2) \times 10^{-3}$
		$K_w = 0.040 + 0.321 \times 10^{-3}\rho$
		$K_v = -0.041 + 0.185 \times 10^{-3}\rho$
Polyester-wool blend	430 ~ 650	$\kappa_w = (2.95 - 0.644 \times 10^{-2}\rho + 0.499 \times 10^{-6}\rho^2) \times 10^{-3}$
		$\kappa_v = (1.05 - 0.252 \times 10^{-2}\rho + 0.235 \times 10^{-6}\rho^2) \times 10^{-3}$
		$K_w = 0.11 + 0.130 \times 10^{-3}\rho$
		$K_v = 0.002 + 0.129 \times 10^{-3}\rho$
Wool flannel	200 ~ 460	$\kappa_w = (2.73 - 0.959 \times 10^{-2}\rho + 0.110 \times 10^{-4}\rho^2) \times 10^{-3}$
		$\kappa_v = (2.22 - 0.803 \times 10^{-2}\rho + 0.923 \times 10^{-6}\rho^2) \times 10^{-3}$
		$K_w = 0.096 + 0.372 \times 10^{-4}\rho$
		$K_v = 0.080 + 0.744 \times 10^{-5}\rho$
Polyester taffeta	540 ~ 810	$\kappa_w = (1.68 - 0.826 \times 10^{-3}\rho + 0.603 \times 10^{-6}\rho^2) \times 10^{-3}$
		$\kappa_f = (1.43 - 0.218 \times 10^{-3}\rho + 0.152 \times 10^{-7}\rho^2) \times 10^{-3}$
		$\kappa_v = (0.53 - 0.672 \times 10^{-3}\rho + 0.474 \times 10^{-6}\rho^2) \times 10^{-3}$
		$K_w = 0.091 + 0.155 \times 10^{-3}\rho + 0.158 \times 10^{-6}\rho^2$
		$K_f = 0.061 + 0.243 \times 10^{-3}\rho + 0.470 \times 10^{-7}\rho^2$
		$K_v = 0.048 - 0.497 \times 10^{-4}\rho + 0.905 \times 10^{-7}\rho^2$

$\kappa_w, \kappa_f, \kappa_v; K_w, K_f, K_v$: Thermal diffusivity and thermal conductivity of fabric in the direction parallel to warp and filling, and perpendicular to the surface of fabric, respectively.

より画いたものである。図から理論値と実験値のおおむね一致していることがわかる。

Fig.9は理論式(1)~(6)を用いて計算した結果であって、繊維の接触を考慮しない(1), (2), (4)式は実験値より小さい値を示し、接触を考えた(5), (6)式は大きい値を示している。とくに(5)式の第2項の接触による熱伝導率は過大であり、 f の小さい場合しか適合しないことを示している。また(6)式の結果と実験値との差はモデルの構造と織物のそれとの違いによるものと思われる。

4.2 繊維の配列と有効熱伝導率

ポリエステル・タフタやベンベルグのようにマルチフィラメント系の織物では、繊維の配列が良いため、糸の方向の有効熱伝導率 K_w が織物面に垂直方向の値 K_v よりはるかに大きくなるが、フラノのように繊維の配列が比較的ランダムな織物では、方向による熱伝導率の差が小さい。Table 3は各試料について K_w と K_v の比を示している。この比の値は繊維の熱伝導率の比 $K_{\parallel}/K_{\perp}$ によっても影響されるが、タフタの値がベ

ンベルグよりはるかに大きいのは、Table 1の糸密度と糸の太さから明らかなように、タフタは組織が疎で糸のクリンプが小さいことも原因の一つと考えられる。

4.3 試料の見掛けの比熱

式

$$K = \kappa \rho c$$

によってもとめた織物の見掛けの比熱をTable 4に示す。

Table 3 Specific thermal conductivity ratio $\overline{K_w}/K_v$.

Fabric	Bulk density(kg/m ³)	$\overline{K_w}/K_v$
Cuprammonium rayon	700	3.0
Polyester-wool blend	500	2.6
Wool flannel	300	1.3
Polyester taffeta	700	4.9

For the smooth surfaced fabrics of cuprammonium and polyester, the thermal conductivity in the direction parallel to the warp is far greater than that in the direction perpendicular to the fabric surface. For fuzzy surfaced fabric of wool, there is a little difference of thermal conductivity in relation to the direction, because of the random arrangement of the fibers in this fabric.

Fig.10 Diagram showing the relations between specific thermal conductivities K_w , K_v and fabric densities ρ drawn by means of empirical equations in Table. 2. 1; cuprammonium rayon fabric, 2; polyester-wool blend, 3; wool flannel, 4; polyester taffeta, full line; K_w , broken line; K_v .

Fig.11 Diagram showing the relations between specific thermal diffusivities κ_w , κ_v and fabric densities ρ drawn by means of empirical equations in Table. 2. 1; cuprammonium rayon fabric, 2; polyester-wool blend, 3; wool flannel, 4; polyester taffeta, full line; κ_w , dotted line; theoretical curve for κ_v of polyester taffeta, broken line; κ_v .

Table 4 Apparent specific heats of fabrics

Fabric	Water contained in (% dry weight)	Apparent specific heat (kcal/kg·°C)
Cuprammonium rayon	13.8	0.44
Polyester-wool blend	7.8	0.35
Wool flannel	12.6	0.42
Polyester taffeta	0.4	0.28

The values are apparent specific heats calculated on the equation $\kappa = K/\rho c$ for all datas.

ρ : Bulk density, c : Apparent specific heat.

Table 5 Increase and percent increase in specific thermal conductivity of fabric due to the increase in its bulk density by 1 kg/m³.

Fabric	Bulk density (kg/m³)	Increase in conductivity (kcal/m·hr·°C)		Percent increase in conductivity	
		K_w	K_v	K_w	K_v
Cuprammonium rayon	640~860	32.3×10^{-6}	18.5×10^{-6}	0.13	0.24
Polyester-wool blend	440~640	13.0	12.9	0.08	0.22
Wool flannel	200~400	3.5	0.8	0.03	0.01
Polyester taffeta	550~800	36.8	7.2	0.16	0.15

The increase in thermal conductivity of smooth surfaced fabric is larger than that of fuzzy surfaced fabric. And for the latter, the increase in thermal conductivity in the direction parallel to the warp is far larger than that in the direction perpendicular to the fabric surface.

見掛けの比熱は繊維、水分、空気の密度と比熱および繊維の容積比率などによって定るが、とくに水分の影響が大きく、ペンベルグとフラノは大きい値を示している。

4.4 比重量と有効熱伝導率および温度伝導率

Fig.10 はTable 2の実験式を使用して、 K_w , K_v と比重量との関係を図に画いたものである。一般に比重量が大きくなると有効熱伝導率も大きくなるが、その場合繊維の配列状態の影響が大きい。Table 5は比重量 1 kg/m^3 の増加にもとづく K_w , K_v の増加と平均増加率を示したものである。

本実験のように試料面に垂直に圧縮して比重量を変化させるときは、圧縮方向の繊維の割合の多いフラノのような試料では、その方向の繊維が比重量の増加とともに減少するため K_v の変化が小さく、増加率は K_w の方が大きくなる。

Fig.11 は比重量と温度伝導率 κ_w , κ_v との関係を実験式により画いたものである。曲線 5 はポリエステルタフタについて、ふく射と繊維の接触を無視して理論式で計算したもので、見掛けの比熱 c はTable 4の $0.28 \text{ kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ を使用した。一般に温度伝導率は比重量の小さ

いときは比重量の増加とともに急激に小さくなり、以後比重量の増加とともに変化が少なくなる。これは比重量の小さいときは熱伝導率の変化が小さくて、比重量が大きくなると繊維の接触などのため急激に大きくなるためである。

文 献

- 1) 仲, 木村, 鎌田; 繊維誌, **26**, T34(1973)
- 2) 渡辺; 衛生工業協会誌, **29**, 433(1955), **30**, 77(1956)
- 3) H. Bogaty, N. R. S. Hollies, M. Harris; *Textile Res. J.*, **27**, 445(1957)
- 4) 堀川; 繊維機械学会編; 基礎工学, p.169(1965)
- 5) S. P. Vnukov, V. A. Rjadov, D. V. Fedoseev; *Inj-Fiz. J.* XXI, 797(1971)
- 6) N. E. Hager, R. C. Steeve; *J. Appl. Phys.*, **38**, 12(1967)
- 7) G. N. Dulynev, B. L. Muratova; *Inj-Fiz. J.* XIV, 29(1968)
- 8) 仲, 鎌田; 繊維誌, **26**, T43(1973)
- 9) 仲, 鎌田, 吉野; 本誌, 繊維の軸方向熱伝導率の測定「投稿中」No.3188