資 料

繊維集合体内の熱移動*

会 員 仲 三 郎**

1. ま え が き

単一固体や流体内の熱移動については広く研究されているが、それらの混合形態である多孔性物体、特に繊維集合体内における熱移動に関する研究は比較的少ない。

一般に物体の熱移動に関する特性は熱伝導率と温度伝導率とによって表わすことができる。前者は熱移動の速さ、後者は温度変化の速さを示す。いま前者を k 、後者を a で表わすと、

$$a = k / c \rho$$

である。 c は比熱、 ρ は密度を示す。したがって、 c と ρ がわかっているときは、 a と k のどちらか一方がわかれば他を知ることができる。そこで以下繊維集合体の集合状態が、その熱伝導率にいかにか影響するかを考察する。

2. 繊維集合体のモデルと熱伝導率

熱は繊維集合体内を、繊維と空気層内の伝導、繊維と繊維の間のふく射および対流によって伝わる。したがってそれらにより伝わる熱から求めた見かけの熱伝導率をそれぞれ k_{cd} 、 k_{rd} 、 k_{cv} とすると、集合体全体の有効熱伝導率 k はつぎの式で表わすことができる。

$$k = k_{cd} + k_{rd} + k_{cv}$$

しかし繊維集合体内では対流は起こりにくいから、強制対流でないかぎり k_{cv} を無視できる場合が多い。そのときは

$$k = k_{cd} + k_{rd}$$

また繊維の熱伝導率は空気のそれよりはるかに大きいから、集合体の熱伝導率はそのなかに含まれる繊維の容積比率とその配列状態の影響を受けることが大きい。

2.1 伝導のみ考慮した場合の有効熱伝導率

a. 繊維が熱の流れに垂直に配列している場合

繊維の断面を1辺の長さ l の正方形と仮定し、それが

(第1図) 繊維が熱の流れに垂直の場合のモデル

1辺の長さ L の正方形の空気層で囲まれていると考える(第1図)。

繊維と空気の熱伝導率をそれぞれ k_s 、 k_g とし、全体の有効熱伝導率を k_{cd-1} とすると、繊維単位長さ当たりの抵抗を考えて、

$$\begin{aligned} \frac{L}{k_{cd-1} L} &= \frac{L-l}{k_g L} + \frac{l}{k_s l + k_g (L-l)} \\ \therefore k_{cd-1} &= \left[\frac{1-f^{1/2}}{k_g} + \frac{1}{k_s + k_g (f^{-1/2} - 1)} \right]^{-1} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$f = l^2 / L^2 \quad \text{繊維の容積比率}$$

b. 繊維が熱の流れに平行に配列している場合

第2図に示すように、繊維と空気層の横断面積をそれぞれ s_1 、 s_2 、長さ L の間の温度差を $\Delta\theta$ 、繊維の長さ方向の熱伝導率を k'_s 、全体の有効熱伝導率を k_{cd-2} とすると、

$$\begin{aligned} k_{cd-2} \frac{(s_1 + s_2) \Delta\theta}{L} &= k'_s \frac{s_1 \Delta\theta}{L} + k_g \frac{s_2 \Delta\theta}{L} \\ \therefore k_{cd-2} &= k'_s f + k_g (1-f) \quad \dots\dots\dots (2) \\ f &= s_1 / (s_1 + s_2) \end{aligned}$$

第3図は $k_s = k'_s$ 、 $k_s/k_g = 40$ として k_{cd-1} 、 k_{cd-2} と f

* Heat Transfer in Fiber Assemblies.

** S. Naka, Member. 東京農工大学工学部

(第2図) 繊維が熱の流れに並行の場合のモデル

(第3図) 有効熱伝導率と容積比率との関係

との関係を示したものである。

2.2 ふく射のみ考慮した場合の有効熱伝導率

繊維間のふく射伝熱はきわめて複雑であるが、長岡は²⁾繊維が熱の流れに垂直で互いに平行に配列している場合のふく射による有効熱伝導率 k_{rd} をつぎの式で表わしている。

$$k_{rd} = 4 C_s \frac{T_m^3}{(100)^4} \Delta\theta F \sum_{n=1}^n n^2 \alpha_n \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし

C_s = 黒体 (繊維を黒体と考える) のふく射係数

T_m = 平均絶対温度

$\Delta\theta$ = 単位長さの温度差が1の場合の繊維層間の温度差

F = 繊維直径と繊維間距離との比

α_n = ある層の繊維がその層から n 番目の層の繊維を望む角の和

繊維層の間隔が同一層内の繊維の間隔の2倍になるようなモデルでは、繊維の比重を ρ' 、集合体のそれを ρ 、繊維の直径を d とすると、

$$F = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{0.785 \rho'}{\rho} \right)^{-1/2}$$

$$\Delta\theta = \frac{d}{\sqrt{2}} \left(\frac{0.785 \rho'}{\rho} \right)^{1/2}$$

また Verschoor³⁾ は、間隔 L_f の繊維層が熱の流れに垂直に配列し、各繊維層に入射する ふく射エネルギーのうち α だけがその繊維層で吸収されると仮定して ふく射による有効熱伝導率をつぎの式で表わしている。

$$k_{rd} = 2.74 \times 10^{-13} \frac{T_m^3 L_f}{\alpha^2} \quad \text{B.t.u in/hr ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ただし

T_m = 平均絶対温度

$$L_f = 0.785 \frac{D}{f}$$

f = 繊維の容積比率

D = 繊維の直径 (μ)

第(3), (4)式からわかるように、繊維集合体の ふく射による有効熱伝導率は、温度が高く容積比率の小さい場合に大きくなる。

3. 空気圧と繊維集合体の熱伝導率

気体分子の平均自由行路がその気体の存在する空間に比しはるかに小さい自由気体においては、気体の熱伝導率は分子の平均自由行路と気体の密度に比例する。したがって圧力が小さくなると、密度はそれに比例して小さくなるか、平均自由行路が大きくなるから、ごく低圧の場合を除き熱伝導率は圧力に無関係である。しかし繊維集合体のように間隔の狭い場合には、気体分子の繊維に衝突する確率が大きくなり、低圧において平均自由行路が自由気体のそれより短くなるため熱伝導率が小さくなる。

Verschoor³⁾ は繊維集合体内の気体の熱伝導率 k_{cd} をつぎの式で表わしている。

$$k_{cd} = k_g \frac{L_f}{L_f + L_g} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$L_f = 0.785 \frac{D}{f} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ただし

k_g = 自由気体の熱伝導率

L_g = 自由気体分子の平均自由行路

L_f = 分子が繊維に衝突するときの平均自由行路

f = 繊維の容積比率

D = 繊維の直径

繊維が熱の流れに垂直に配列している場合には、熱は空気層を通しての伝導、対流、ふく射と一部繊維の接触部を通しての伝導によって伝わるが、ふく射と接触部の

伝導は気体の圧力に無関係で、空気層の伝導と対流は圧力とともに小さくなる。そしてある圧力以下においてはふく射と接触部の伝導のみとなるため、集合体の熱伝導率は一定の値を示すようになる。また圧力が大きくなると、 L_g が L_f よりはるかに小さくなると第(5)式からもわかるように $k_{ca}=k_g$ となり、集合体の熱伝導率は一定になる。第4図は直径 2.58μ 、比重2.01のガラス繊維を平行平板ではさんで測定した場合の熱伝導率と空気圧との関係を示したものである。繊維の容積比率 f が小さいとふく射による伝熱が大きくなるため熱伝導率も大きくなっている。

- ① 0.546 lb/ft³ ($L_f=465\mu$, $f=0.00436$)
- ② 1.50 lb/ft³ ($L_f=169\mu$, $f=0.012$)
- ③ 4.63 lb/ft³ ($L_f=54.8\mu$, $f=0.0369$)

(第4図) 繊維集合体の熱伝導率と空気圧との関係

4. 繊維集合体の厚さと熱伝導率

絶対温度 T_1 , T_2 ($T_1 > T_2$) の2枚の同質の平行平板の間の伝熱量は、板の間隔を D 、板および黒体のふく射係数を C , C_s とすると、対流を無視できるときはつぎの式で表わすことができる。

$$Q = \frac{k_g(T_1 - T_2)}{D} + \frac{1}{\frac{2}{C} - \frac{1}{C_s}} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (7)$$

この式から空気層の見かけの熱伝導率を k'_g とすると、

$$k'_g = \frac{DQ}{T_1 - T_2} = k_g + \frac{D}{\frac{2}{C} - \frac{1}{C_s}} \frac{\left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]}{T_1 - T_2} \quad (8)$$

つぎにこの空気層に繊維を充填した場合を考えると、ふく射伝熱量は層の厚さ D と繊維の容積比率 f との関数となり、伝導による伝熱量は繊維および空気の熱伝導率 k_s , k_g と f の関数となるから、全体の有効熱伝導率 k はつぎの式で表わすことができる。

$$k = F_1(k_s, k_g, f) + \frac{\left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]}{T_1 - T_2} \cdot \frac{D}{\frac{2}{C} - \frac{1}{C_s}} F_2(D, f) \quad (9)$$

この式の第1項は(1), (2)式などで表わすことができ、 $F_2(D, f)$ は $f=0$ で1となり、 f の増加とともに小さくなる関数である。渡辺によると、

$$F_2(D, f) = e^{-rfD} \quad (10)$$

x の値は、たとえば直径 10μ 、比重量 2.2 g/cm^3 の岩綿で温度 60°C の場合には、

$$f = 0.091; \quad x = 660$$

$$f = 0.0273; \quad x = 1833$$

第(9)式の第2項から、

$$\begin{aligned} \frac{d}{dD} [D \cdot F_2(D, f)] &= \frac{d}{dD} [D \cdot e^{-rfD}] \\ &= e^{-rfD} (1 - Dxf) \end{aligned}$$

したがって

$$D = \frac{1}{xf}$$

において第(9)式の第2項は最大となる。すなわち比較的 f の小さい集合体の熱伝導率は厚さとともに大きくなり、 $D = \frac{1}{xf}$ で最大で以後小さくなる。

5. 繊維集合体の密度と熱伝導率

繊維が熱の流れに垂直に配列している場合を考えるとき、比較的密度の小さいときは繊維の接触は無視できる

- ① 集合体の有効熱伝導率
- ② 空気の熱伝導率
- ③ ふく射による熱伝導率
- ④ 対流による熱伝導率
- ⑤ 繊維の接触による熱伝導率

(第5図) 集合体の比重量と熱伝導率との関係

から、熱は主として空気層の伝導、対流およびふく射で運ばれる。それらのうち伝導は前に述べたように、密度すなわち繊維の容積比率とともに増加し、ふく射と対流は密度が小さくなるほど大きくなるから、全体の有効熱伝導率は、密度のごく小さい範囲では密度の増加とともに小さくなり、ある密度で最低となったのち増加する。

第5図(前ページ)はガラス繊維集合体の760mmHg, 150°Fにおける比重量と熱伝導率との関係を示したものである。また第6図は鉾津綿を高さの異なる鉛直平板ではさんで測定したもので、この場合は高さが高いほど対流が起こりやすいために密度の小さいところでは高いほど熱伝導率が大きくなる。

① 高さ 60 in ② 高さ 20 in ③ 高さ 12 in
(第6図) 比重量と熱伝導率との関係

6. 繊維集合体の温度と熱伝導率

繊維や気体の熱伝導率は温度とともに大きくなり、ふ

繊維直径 1.5 μ 比重量 250 N/cm³
空気圧 10⁻²~10⁻³ N/m²
(第7図) 鉾津綿の温度と熱伝導率との関係

① 常圧, ② 空気圧 10⁻²~10⁻³ N/m²
繊維直径 14 μ , 比重量 1580 N/m³
(第8図) ガラス繊維の温度と熱伝導率との関係

① 常圧 ② 空気圧 10⁻²~10⁻³ N/m²
繊維直径 1 μ
(第9図) 鉾津綿の比重量温度と熱伝導率との関係

く射伝熱量は絶対温度の3乗に比例するから、集合体の有効熱伝導率は温度とともに大きくなる。特に繊維の容積比率の小さいときはふく射の影響が大きく表われるために温度による差が大である。第7~9図は常圧と低圧の場合の温度、比重量と熱伝導率の関係を示したものである。

7. 繊維集合体の水分と熱伝導率

水分が繊維集合体内に入ると、空気層の伝熱抵抗を低下し、繊維が吸水するときは繊維の熱伝導率も増加するから、全体の有効熱伝導率は毛管吸水とともに急激に大きくなる。

また高温部で蒸発した水分は低温部で凝縮し、それが毛管現象で高温部に移動して再蒸発を繰り返すことにより熱伝導率を著しく増加する。

Behmann⁶⁾は繊維集合体の空隙率を ψ とし、そのなかで自由毛管水の占める容積の割合を ψ_w , 残りの $\psi - \psi_w$ のうち蒸気の拡散の起こる部分を b , 自由気体の存在する部分を $1 - b$ とし、それらが熱の流れに垂直な層と平行な層をなしていると考え、前者の割合を a , 後者の割

(第10図) 吸水した繊維集合体のモデル

合を $1-a$ として全体の有効熱伝導率をつぎの式で表わしている (第10図)。

$$k = \frac{1}{\frac{1-a}{k_1} + \frac{a}{k_2}} \quad (11)$$

$$k_1 = (1-\psi)k_s + \psi w k_w + b(\psi-\psi_w)(k_L + k_{air}) + (1-b)(\psi-\psi_w)k_L \quad (12)$$

$$k_2 = \left[\frac{1-\psi}{k_s} + \frac{\psi w}{k_w} + b \frac{\psi-\psi_w}{k_L + k_{air}} + (1-b) \frac{\psi-\psi_w}{k_L} \right]^{-1} \quad (13)$$

ただし

k_s = 吸水した繊維の熱伝導率

k_w = 水の熱伝導率

k_{air} = 水蒸気の拡散による熱伝導率

k_L = 自由気体の熱伝導率

乾燥時の空気と繊維の容積を V_L , V_s とし, 吸収した水の全容積を V_w とすると, その容積の割合 $\psi_{w, ges}$ は

$$\psi_{w, ges} = \frac{V_w}{V_L + V_s}$$

で表わされ, 繊維に吸収された水の割合を $\psi_{w, ad}$ とすると

$$\psi_w = \psi_{w, ges} - \psi_{w, ad}$$

となるから, 羊毛に対しては k_s は第11図で求められる。

また k_{air} はつぎの式で与えられる。

(第11図) 羊毛の吸水量と熱伝導率

$$k_{air} = \frac{\delta}{R_D T_m} \frac{P}{P-\varphi} \frac{d(\varphi P'')}{d\theta} \cdot r \quad (14)$$

ただし

R_D = 水蒸気の気体定数

r = 水の気化熱

φ = 空隙内の相対湿度

P'' = 水の飽和蒸気圧

θ = 温度

P = 気圧

T_m = 平均絶対温度

$$\delta = 0.086 \left(\frac{T_m}{273} \right)^{2.3} \frac{10000}{P} \text{ m}^2/\text{hr}$$

水蒸気の拡散係数

(第12図) $k_L + k_{air}$ と温度および湿度との関係

第12図は $k_L + k_{air}$ と温度および湿度との関係を示す。

また a はつぎのようにして求めることができる。すなわち乾燥した集合体において, 繊維層と空気層が熱の流れに平行な場合の熱伝導率を $k_{1, tr}$, 垂直の場合を $k_{1, v}$ とすると (第13図),

(第13図) 乾燥時の集合体のモデル

$$k_{1, tr} = (1-\psi)k_{s, tr} + \psi k_L \quad (15)$$

$$k_{1, v} = \left[\frac{1-\psi}{k_{s, v}} + \frac{\psi}{k_L} \right]^{-1} \quad (16)$$

$k_{s, tr}$ は乾燥繊維の熱伝導率である。したがって全体の有効熱伝導率はつぎの式で表わされる。

$$k_{lr} = \left(\frac{1-a}{k_{l,lr}} + \frac{a}{k_{l,lr}} \right)^{-1} \dots\dots\dots (17)$$

これらの式から k_{lr} , $k_{l,lr}$, $k_{l,lr}$ を測定して a を求めることができる。

(第14図) 紡毛織物の吸水率と熱伝導率 k , 温度伝導率 a , 比熱 c との関係

第14図は紡毛織物について熱伝導率と温度伝導率を測定した結果である。

熱伝導率は、吸湿量13%ぐらいまではほとんど変化なく、13%~40%の間は微視的毛管吸水の範囲で急激に増加し、40%以上で巨視的毛管吸水が起こり増加割合は前よりゆるやかになる。

9. む す び

以上繊維集合体の種々の条件と熱伝導率との関係について概観してみたが、熱の移動には空気や水分の移動を伴う場合が多く、この方面の研究がこれからの大きい課題であると思われる。

文 献

- 1) 渡辺; 衛生工業協会誌, 30, 2 (1956)
- 2) 長岡; 日本機械学会論文集, 23, 6 (1940)
- 3) J. D. Verschoor and P. Greebler; Trans. of A. S. M. E., P961 (1952-8)
- 4) Wilkes; Heat Insulation, John Wiley & Sons (1950) P84
- 5) V. M. Kostylev, V. T. Nabatov; Inzh-Fiz. Zhur., IX, 3 (1965)
- 6) F. W. Behmann; Melliand Textiber., 4 (1960)
- 7) N. P. Zamotaev; Tekh. Tekst. Prom., No. 3 (1965)

会 員 増 加 キ ャ ン ペ ー ン に ご 協 力 下 さ い

本会も創立以来20周年を経過し、各種講演会、発表会、見学会のほかに、本年度の継続活動としては現在下記のように各分野にわたって学会活動はますます活発に、行なわれております。

すなわち研究委員会はそのもっとも基礎的な活動として

○メリヤス研究委員会、(編成張力と製品の品質・物性に関する専門委員会)

○染色加工機械研究委員会(ヒート セット部会)、

○縫製技術研究委員会、○織物の力学的特性に関する研究委員会、○繊維計測研究委員会

とそれぞれ各大学、会社から多数研究者が参加され、熱心に討論、発表などされています。このような学会活動の活発化や会員の相互啓発は、会員が多数であればあるほど、より高まりかつ深くなります。20周年を迎えて本会では各種行事の企画とともに、より充実した学会活動を展開しようとして、会長以下各役員協力して会員増加キャンペーンをはじめております。会員各位もぜひこの増加キャンペーンにご協力頂き、お知り合いで未会員の方がおられましたら入会をおすすめ頂きたく、あるいは事務局までご一報下さいますようお願い申し上げます。