

## 繊維充填材料の熱・水分・空気の移動特性に関する 実験的研究

中西正恵, 丹羽雅子\*

(神戸女子大学家政学部, \*奈良女子大学生活環境学部)

平成7年2月3日受理

### The Experimental Study on Heat, Moisture and Air Transfer Properties of Fibrous Packing Materials

Masae NAKANISHI and Masako NIWA\*

*Faculty of Home Economics, Kobe Women's University, Suma-ku, Kobe 654*

*\*Faculty of Human Life and Environment, Nara Women's University, Nara 630*

The heat, moisture and air transfer through fibrous waddings of futon, thermal protective clothing, etc., influence our thermal comfort. The objective of this study is to obtain basic experimental data which will be useful in the theoretical analysis of this transfer phenomena.

The following is a list of the main results obtained from the measurement of the transfer properties of various kinds of waddings.

- 1) Air resistance per unit thickness of wadding  $R/L$  is inversely proportional to the square of the fiber diameter.
- 2) Apparent thermal conductivity  $k_e$  decreases as fiber packing density  $P$  increases within the measurement range of  $P$ . The larger the single fiber denier of polyester waddings, the larger the  $k_e$  value. The  $k_e$  values of polyester waddings tend to be larger in comparison with wool waddings of equivalent diameters.
- 3) Hollow fibers tend to have higher  $R$  values and lower  $k_e$  values in comparison with solid fibers of the same denier. The effect of the difference of fiber arrangement in the wadding can also be seen in both the  $R$  and  $k_e$  values, from the results of knops and card webs of wool fiber.
- 4) The heat transfer that accompanies water evaporation, which is measured by placing a sheet of wet filter paper on a heated plate simulating sweaty skin, is influenced by many fiber properties such as the shape of the cross section, hygroscopicity, thermal conductivity etc., the packing density and the fiber arrangement in the waddings.

(Received February 3, 1995)

**Keywords:** air resistance 通気抵抗, thermal conductivity 熱伝導率, fiber diameter 繊維直径, wadding わた, heat and moisture transfer 熱・水分移動.

### 1. 緒言

寝具や防寒用衣服などには、各種の繊維が充填材料として用いられているが、人間の体温調節や快適な着心地・寝心地には、充填材料の熱・水分・空気の移動特性が関与する。一般の充填材料は、材料の体積の大半を占める空気と材料の形を与える繊維とから構成され、さらに繊維の吸湿性により水分も含み、繊維、空

気、水からなる複合材料である。このような充填材料の熱・水分・空気の移動特性には、構成繊維の性質、繊維の形態とその集合状態により、様々に変化するが、これらの関係を把握することにより、材料の性能設計が可能となるため、従来から多くの研究が行われてきた。特に、繊維塊や不織布の通気性に関しては、粒子充填層の通気性を記述する Kozney-Carman 式を繊維塊

に適用する試み<sup>1)~3)</sup>や、基準長さに繊維の直径を用いたレイノルズ数と、円柱繊維が流れに垂直にあるとして流れ方向への投影断面積を用いた有効抗力係数とを検討した理論的研究<sup>4)</sup>など多くみられる。

繊維集合体中での熱移動についても、保温を目的とする用途が多いだけに、多くの研究が行われてきた<sup>5)~11)</sup>。繊維塊や不織布の有効熱伝導率については、繊維の熱伝導率や繊維形態などの繊維特性および充填率などを用いて理論計算する試み<sup>5)~7)</sup>がなされた。しかし、近年、繊維軸方向とそれと直交する方向の繊維の新しい熱伝導率のデータが報告されて<sup>12)</sup>、繊維の熱伝導率は強い異方性をもつことが明らかにされ、今後、この効果についても見直される必要があると考えられる。

また、着用時には、身体からの汗や外界からの水分を繊維塊は含むことがあり、水分の移動特性も快適性に関与するため、これらの研究もいくつか行われている<sup>13)14)</sup>。しかし、実際の着用状態において、繊維充填材料内では、熱と水分、時には、空隙が大きいことから空気も同時に移動し、繊維充填材料の熱移動は、繊維・空気・水の熱伝導、繊維間の輻射伝熱や対流伝熱、水分の吸脱着による潜熱移動などが組み合わさって生じ、非常に複雑であり、実際の着用状態で生じている熱・水分同時移動の研究はこれまで数少ない<sup>14)</sup>。

近年、極細繊維や特殊な形態をもたせた繊維や新しい集合構造をもたせる技術の開発もあり、ふとんわたや防寒用衣服の充填材料に用いられる繊維の種類も多くなっている。そこで、本研究では、繊維充填材料の熱・水分・空気の移動特性の理論的解析のために、まず、その基礎データを得ることに主眼をおいて、各種の繊維充填材料の通気性およびみかけの熱伝導率、さらに、着用状態を模擬したモデル実験により、繊維充填材料を通しての熱・水分同時移動特性を測定し、繊維素材や充填密度の影響についての実験的研究を報告する。

## 2. 実験方法

### (1) 通気抵抗

通気性試験機 KESF-8AP<sup>15)</sup>に、わたの厚さ  $L$  (m) を任意に変化できる試料ホルダー (断面積 =  $62.8 \times 10^{-4} \text{m}^2$ ) をとりつけ、 $u = 0.004 \text{m/s}$  の一定流速 (単位時間、単位面積あたりの流量) 条件下での試料厚さ表裏の圧力差  $\Delta P$  (Pa) の測定から次式で定義される通気抵抗  $R$  ( $= \Delta P/u$ ) を求める。

$$R = \Delta P/u$$

繊維塊の厚さ  $L$  と  $R$  とは、Fig. 1 の例のように比例関係が成立するため、単位厚さあたりの通気抵抗  $R/L$  を充填材料の通気性を表す特性値としてとりあげる。

### (2) みかけの熱伝導率

Fig. 2 の保護平板熱板を用いて、Thermo Labo II 型<sup>16)</sup>により、一定厚さのわたの両面に温度差を与え、定常状態での高温の主熱板から低温の water box 面への熱移動量  $q$  (W) を測定する。熱板の構造は直径 56 mm の円形主熱板の周囲に 2 mm の断熱材をはさんで、幅 35 mm のガードリングがあり、そのガードリング

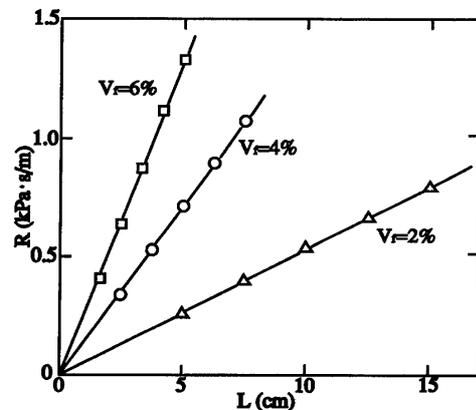


Fig. 1. The relation between air resistance  $R$  and the length of fiber assembly  $L$  for sample P 7 in Table 1

$V_f$ : fiber volume fraction.

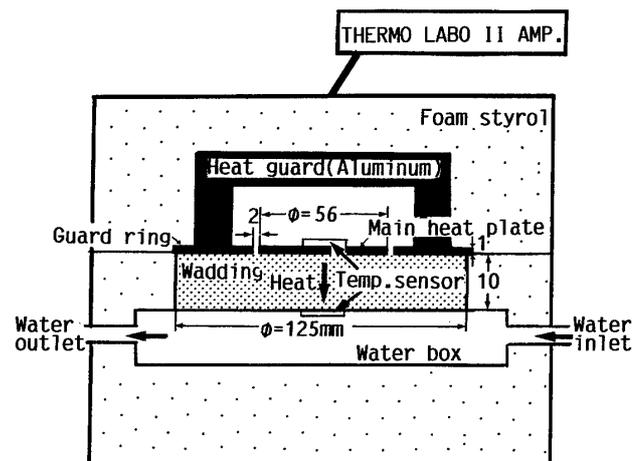


Fig. 2. The measurement method of thermal conductivity of wadding by Thermo Labo II

Heat plate temperature:  $T_h = 308 \text{K}$ ; water box temperature:  $T_l = 293 \text{K}$ .

## 繊維充填材料の熱・水分・空気の移動特性に関する実験的研究

は、主熱板をコの字に囲むようなアルミニウム板と連結され、ガード温を主熱板と同温に制御することにより、主熱板の熱が上・側面へ漏れるのを防いでいる。ここでは、上面を高温として、熱流を重力の方向と一致させているため、わたの中での対流の影響は排除される。

みかけの熱伝導率  $k_e$  (W/(m·K)) は測定した  $q$  より次式で求めた。

$$k_e = qL/[a(T_h - T_l)]$$

ここで、 $L$ ：わたの厚さ (m)、 $a$ ：主熱板有効面積 (m<sup>2</sup>)、 $T_h$ ：熱板温度、 $T_l$ ：water box 表面温度 ( $T_h > T_l$ )。本実験では、熱板の直径が小さく、一次元熱流の成立する  $L$  の限界を考慮し<sup>17)</sup>、測定は  $L = 0.01$  m とし、また、温度設定を  $T_l = 293$  K、 $T_h = 308$  K (ガード温度も同温度) に設定し、294 K、61% RH の室温下で行った。ふとんわたのような低密度充填材料の場合、試料を挟む上面と下面 (熱板と water box 面) の表面放射率が熱伝導率の測定値に影響を及ぼすと考えられるため、実験 I として、上面下面ともに、アルミ箔の低放射率面とした場合、実験 II として、両面を放射率 0.94 の黒体スプレーを塗布した場合について行った。

## (3) 熱・水分同時移動特性

着用状態を模擬した熱・水分同時移動の実験として、Fig. 3 のように、熱伝導率の測定に用いた熱板の上に発汗皮膚を模擬する湿潤濾紙 (水分率約 300% 程度) を密着させ、その上にわたを詰めて、太さ 0.5 mm のワイヤーを 5 mm 間隔に渡した中枠でわたの厚さ 0.01 m に固定し、さらに薄手のポリエステルフィラメント糸織物 (厚さ 0.218 mm、布重量 96 g/m<sup>2</sup>、通気抵抗 0.329 kPa·s/m) でカバーした状態で、熱損失量  $Q_w$  (W/m<sup>2</sup>) を測定した。熱板温度 308.6 K、環境空気条件 293.6 K、64% RH で、風速 0.25 m/s とした。また、湿潤濾紙を置かず、黒体熱板上を充填材料で覆って、水分移動を伴わない熱移動量  $Q_d$  (W/m<sup>2</sup>) も測定した。

## (4) 試料

試料は、主として掛け布団や敷き布団などに用いられるわたで、繊維の太さやクリンプ率を異にする羊毛 4 種 (試料 N は、繊維を粒状に絡ませたもの)、太さや断面形態が異なるポリエステル 12 種類、良い品質の木綿、絹、羽毛を用いた。その詳細を Table 1 に示す。

わた試料はハサミで裁断できる程度の厚さにカードウェブを層状にはがして、通気抵抗の測定試料はホル

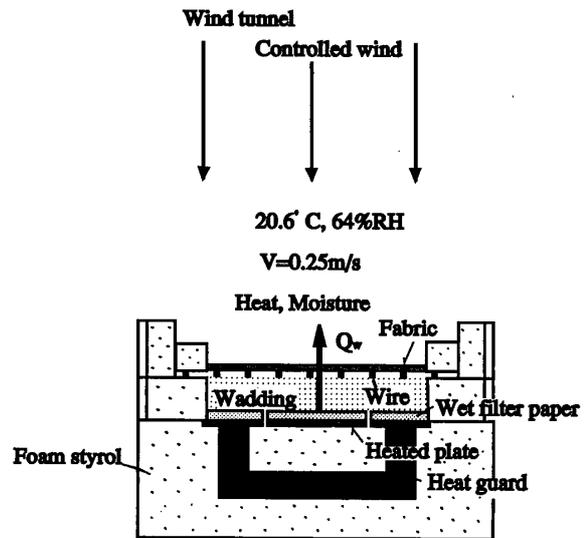


Fig. 3. The measurement method of heat and moisture transfer

Fabric: polyester filament plain fabric; weight = 96 g/m<sup>2</sup>; thickness at pressure 49 Pa = 0.218 mm; air resistance = 0.329 kPa·s/m. Wire: diameter = 0.5 mm, interval = 5 mm, heated plate temperature = 308.6 K.

ダーの内径にあわせて切り、これを重ねてホルダーに入れて、わたを押さえるための金網で試料の厚さを変化させ、すなわち、充填密度を変化させて測定した。熱伝導率、熱・水分移動の実験では、まず通気性試料と同様に測定面積 (直径 125 mm) に裁断してから、その円形の厚紙で両側の厚さ 1 cm 程度になるように押さえてはみ出したわたを切って、各測定充填密度ごとに試料を作った。

本実験では、わたの重量を体積で除した充填密度  $P$  (kg/m<sup>3</sup>) を、できる限り実用の掛け布団、敷き布団の充填密度に近似するように設定した。文献<sup>18)19)</sup>によると、実用されているふとんわたの充填密度については、わた素材により異なるが、敷き布団の新品で  $P = 10 \sim 26$  kg/m<sup>3</sup> で、使用に伴って「へたり」が生じて、羊毛わたで 3 年間使用した場合で 60 kg/m<sup>3</sup>、木綿わたで 5 年間使用すると 100 kg/m<sup>3</sup> 程度まで充填密度が増すと報告されている。

## 3. 結果と考察

## (1) 通気抵抗

Fig. 4 は、代表的な試料について、繊維充填密度  $P$  と単位厚さあたりの通気抵抗  $R/L$  (Pa·s/m<sup>2</sup>) との関係を示している。同一の充填密度の場合、羽毛が最も  $R/L$  が大きく、絹や木綿、デニールの小さいポリエ

Table 1. Details of samples

Sample code	Fiber type	diameter * <sup>1</sup> ( $\mu\text{m}$ )	Fiber length (mm)	Polyester fiber		Wool crimp contraction (%)	Remarks	
				Denier	Shape			
P 1	polyester	9.3	38	0.8	●			
P 2		11.4	38	1.25	●			
P 3		14.5	51	2	●			
P 4		18.2	64	3	▲			
P 5		19.1	76	4	●			
P 6		24.4	51	6	●			
P 7		29.5	51	6	○* <sup>2</sup>			
P 8		26.6	51	6	○* <sup>2</sup>			
P 9				64	6	---* <sup>3</sup>		
P10		44.1	64	14	○* <sup>2</sup>			
P11		63.9	76	38	●			
R 4	45.0	64	12	○* <sup>2</sup>				
B	wool	28.8	46			24.0	NZ Prendale	
C		25.1	52			29.9	Australia	
D		34.8	62			27.3	English	
N		32.4					NZ knops* <sup>4</sup>	
R 6	cotton	25.5, 13.5* <sup>5</sup>					USA	
S	silk	12.0					Japan	
U	down	4.7					Hungary	

\*<sup>1</sup> The width projected from fiber side. \*<sup>2</sup> Hollow fiber. \*<sup>3</sup> Hydrophilic surface treatment. \*<sup>4</sup> Each about 6.5 mg of fibers are entangled in a ball. \*<sup>5</sup> The longer and shorter width of a cross section of fiber.

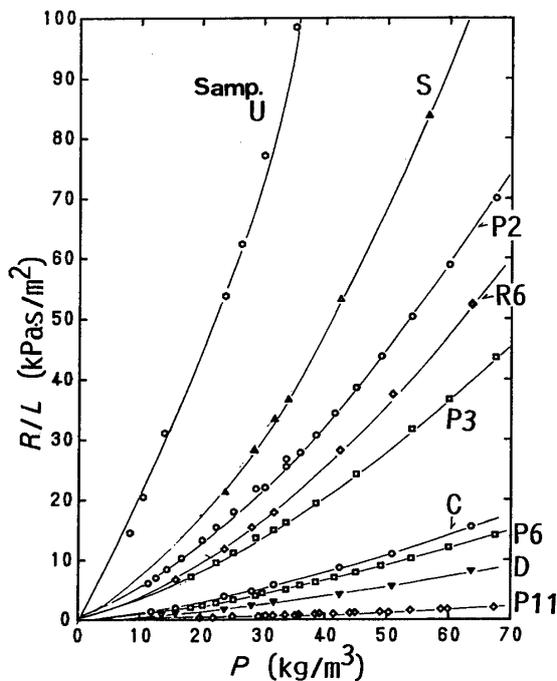


Fig. 4. The relation between apparent packing density  $P$  and air resistance per unit thickness of wadding  $R/L$  for several kinds of wadding

テルも  $R/L$  が大きく、羊毛や太いポリエステル繊維は小さい。

Fig. 5は、繊維充填密度  $P = 40.7 \text{ kg/m}^2$  のときの各種ポリエステルわたの繊維のデニール数と通気抵抗  $R/L$  との関係を示している。図ではデータのプロットを繊維の断面形状で示しているが、円形断面繊維については、勾配が-1の直線関係がみられ、デニールと  $R/L$  との逆比例の関係が成立している。中空繊維や異形断面繊維では、同一デニールの円形断面繊維よりもやや通気抵抗は大きくなる傾向が認められる。

円形断面のポリエステル繊維と、断面が円形に近い羊毛繊維について、繊維の直径と通気抵抗との関係を見るために、等しい繊維体積分率で比較してみる。繊維体積分率は、繊維充填密度  $P$  を繊維の比重（標準状態においてポリエステルは  $1.39 \text{ g/cm}^3$ 、羊毛は  $1.31 \text{ g/cm}^3$ ）<sup>20)</sup> で除して求め、繊維体積分率  $V_f$  とする。Fig. 6は  $V_f = 0.029$  (Fig. 5と同一の充填状態に相当) のときの繊維の直径と通気抵抗との関係の両対数プロットである。図中の直線から外れた試料は、繊維が塊状

繊維充填材料の熱・水分・空気の移動特性に関する実験的研究

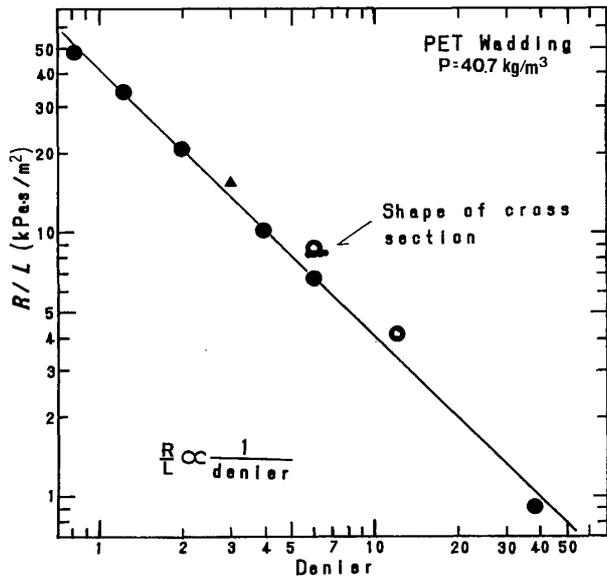


Fig. 5. The effect of fiber shape on the air resistance of polyester waddings

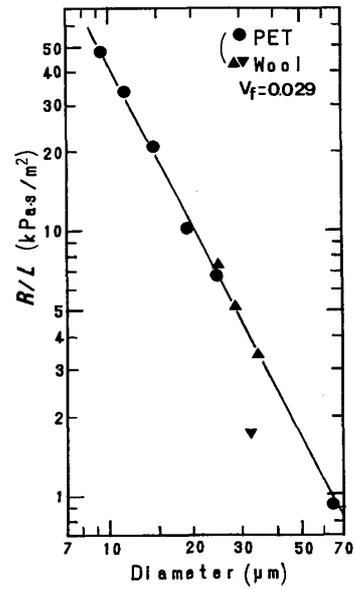


Fig. 6. The relation between fiber diameter and air resistance for circular polyester and wool fiber samples

Fiber arrangement also influences the air resistance of wadding, as shown in the result of knops sample (▼) and card web samples (▲) of wool fiber.

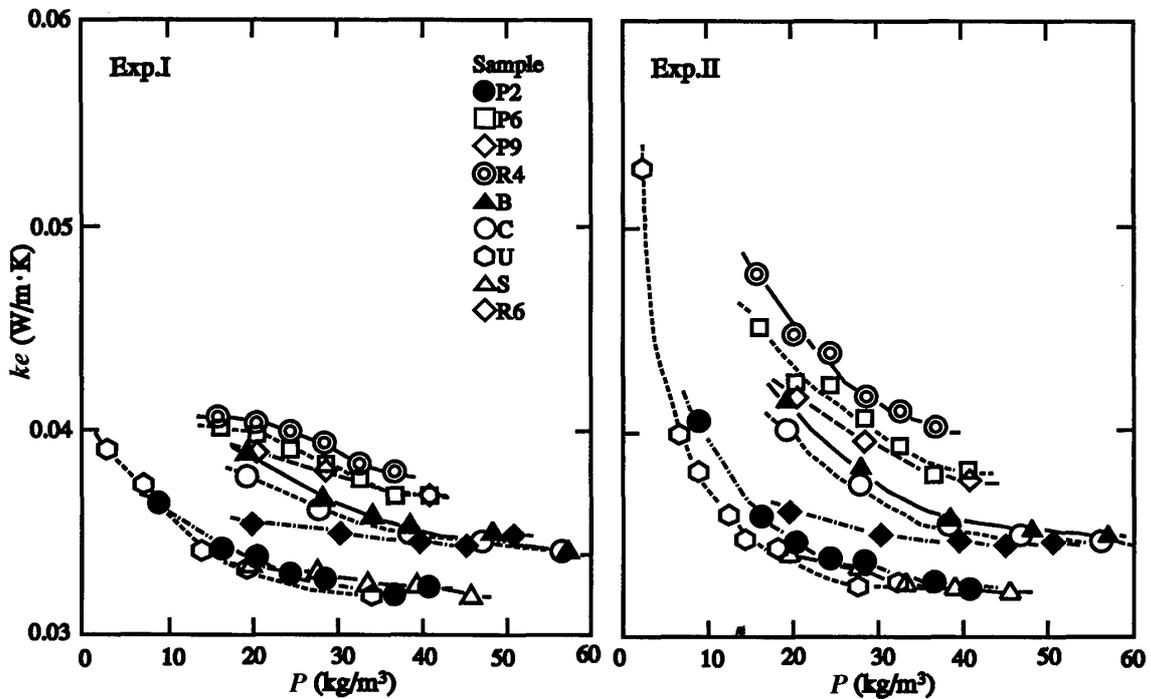


Fig. 7. The relation between apparent thermal conductivity,  $k_e$  and  $P$  for several samples

Experiment I : both surfaces of the heated plate and the water box plate (see Fig. 2) are covered with commercial aluminum foils.  $k_e$  without wadding is  $0.0304 \pm 0.00028$  W/(m·K). Experiment II : both plates are covered with black spray (emmissivity=0.94).  $k_e$  without wadding is  $0.0792 \pm 0.00017$  W/(m·K).

になった試料Nで、繊維直径のわりに通気抵抗が小さく、繊維の集合状態の影響も見られる。羊毛とポリエステル丸形断面繊維については、繊維直径と $R/L$ の両対数の関係が勾配が $-2$ の直線関係が成り立つことから、繊維直径の2乗の逆数と通気抵抗とが比例することがわかる。

## (2) みかけの熱伝導率

実験IとIIで測定した $k_e$ と充填密度 $P$ との関係をFig. 7に示す。本実験の繊維の充填域では、 $k_e$ は繊維の充填密度が増すと小さくなり、また、実験Iのみかけの熱伝導率よりもIIのほうが大きくなる。このことは、本実験では試料上面から下面への熱移動で対流の影響は含まれないことから、低い充填密度域でふく射伝熱の大きいことを示している。また、繊維の太さや形態による影響の大きいことも観測される。そこで、Fig. 8には、繊維体積分率が0.015と0.029のときの実験IとIIの熱伝導率の差 $\Delta k_e$ と繊維直径との関係を求めてみたが、繊維直径が小さいほど、また、体積分率が大きいほど、みかけの熱伝導率の差は小さく、この結果はふく射による熱移動が、繊維が細く体積分率が大きいと小さくなるのが主な理由と考えられる。防寒服などには、アルミ蒸着した布で充填材料を挟むものがあるが、繊維が太く、充填密度が小さいと、低放射率面により、例えば、38デニールのポリエステル

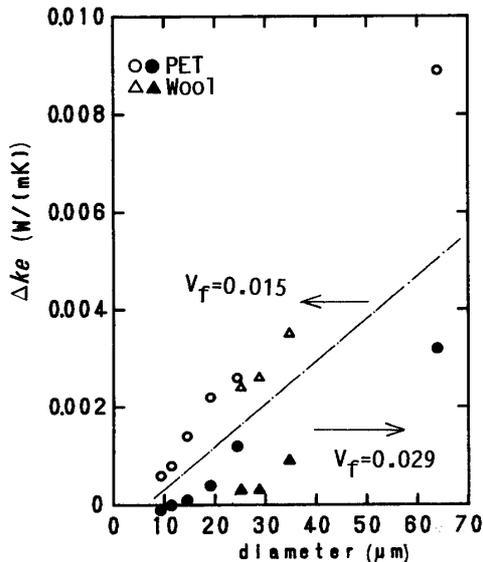


Fig. 8. The relation between fiber diameter and the difference of thermal conductivity  $\Delta k_e$  between exp. I and exp. II for wool and circular polyester samples

Open:  $V_f=0.015$ ; closed:  $V_f=0.029$ .

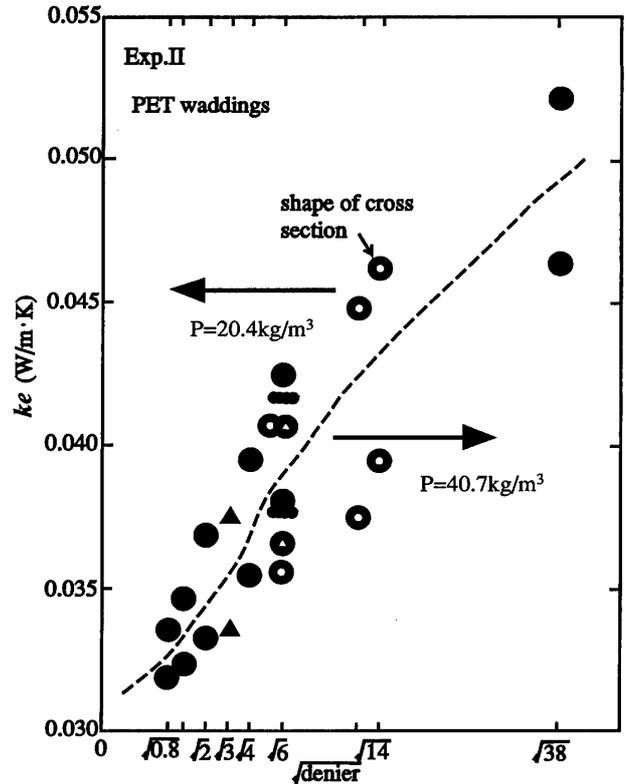


Fig. 9. The effects of the shape of cross section of polyester fiber on apparent thermal conductivity measured in exp. II

ルわたで体積分率が0.015の場合には、20%も断熱効果が向上することが、実験IとIIとの結果からわかった。

繊維の断面形状が $k_e$ におよぼす影響をみるために、Fig. 9には繊維の太さおよび断面形状を異にするポリエステルわたの実験IIでの測定結果から、繊維充填密度が20.4, 40.7  $\text{kg/m}^3$ のときの熱伝導率とデニールの平方根が円形繊維では直径に比例することから、デニールの平方根との関係を繊維の断面形態でプロットしている。繊維が細いほど $k_e$ が小さく、単純な円形断面繊維よりも、異形断面や中空断面繊維の方が $k_e$ が小さくなる傾向がある。なお、この傾向は、実験Iでも同様であることを確認している。Fig. 10は、ポリエステルの円形断面繊維と羊毛について、同一体積分率で比較した場合の繊維直径と $k_e$ との関係であるが、羊毛わたの方が、同一直径で見た場合、 $k_e$ が小さい傾向があり、わたの熱伝導率は、単に繊維形態だけでなく、繊維自身の熱伝導率や繊維側面の状態なども関わることを示唆している。また、試料Nは、他の羊毛と比べて $k_e$ が大きくなり、繊維の集合構造も

繊維充填材料の熱・水分・空気の移動特性に関する実験的研究

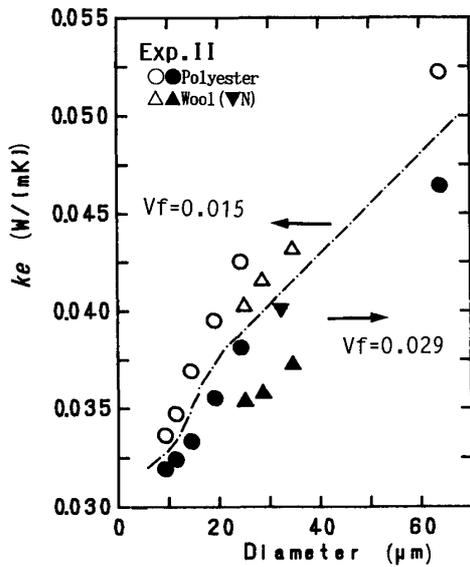


Fig. 10. The effects of fiber diameter and fiber type on  $k_e$  (exp. II) for circular polyester fiber and wool fiber

Open:  $V_f=0.015$ ; closed:  $V_f=0.029$ .

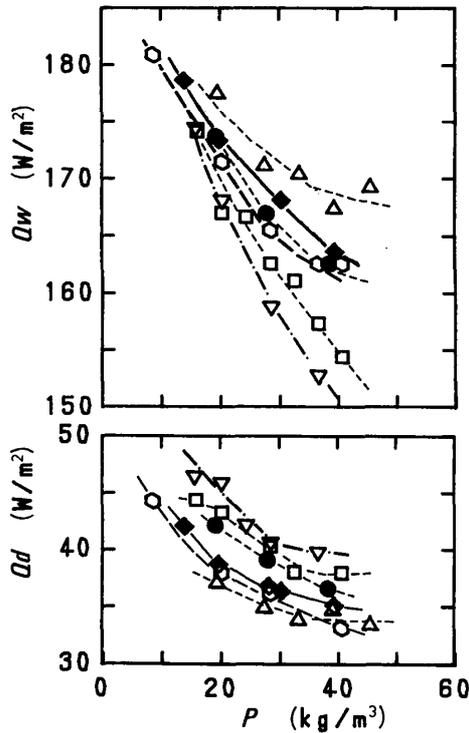


Fig. 11. Plots of  $Q_d$  and  $Q_w$  versus  $P$

$\Delta$ , S;  $\blacklozenge$ , R6;  $\circ$ , P2;  $\bullet$ , C;  $\square$ , P6;  $\nabla$ , R4.  $Q_d$  without wadding is  $73.9 \pm 0.8 \text{ W/m}^2$ , and  $Q_w$  is  $217.8 \pm 0.7 \text{ W/m}^2$ .

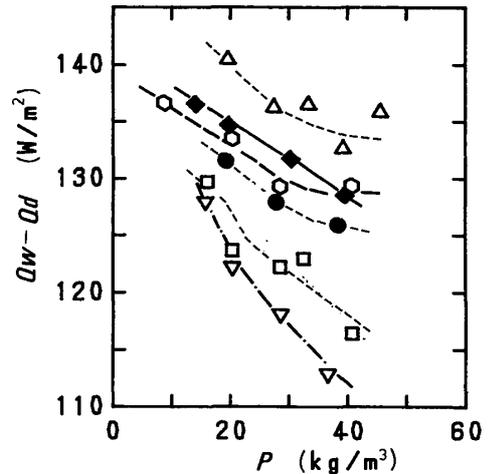


Fig. 12. Plots of  $Q_w - Q_d$  versus  $P$

$\Delta$ , S;  $\blacklozenge$ , R6;  $\circ$ , P2;  $\bullet$ , C;  $\square$ , P6;  $\nabla$ , R4.

みかけの熱伝導率に影響することも確認される。

(3) 熱・水分同時移動

顕熱移動  $Q_d$ 、水分移動に伴う熱移動が含まれた熱移動量  $Q_w$  と繊維充填密度  $P$  との関係を図 11 に示す。 $Q_d$  は、みかけの熱伝導率の結果と同様に、繊維が細いほど、また、充填密度が大きいほど小さくなる。 $Q_w$  は充填密度が大きくなると、小さくなり、同一充填密度では、絹や綿は大きい。ポリエステル 12 デニールの中空繊維 R 4 は、水分移動を伴わない熱移動量  $Q_d$  は繊維が太く有効熱伝導率が大きいためこの試料の中で最大であるが、 $Q_w$  は最小となり、逆に、絹は  $Q_d$  は小さいが、 $Q_w$  は大きくなり、絹は、高い保温性ととも、発汗時には水分を速やかに蒸発させる性質をもつことが示されている。 $Q_w$  と  $Q_d$  との差を水分移動の指標と考え、Fig. 12 にプロットしたが、ポリエステルでも細い繊維の方が水分移動量が大きい傾向があり、羊毛は、同一直径のポリエステルよりも大きく、繊維形態や吸湿性の影響が考えられる。

4. 結 語

繊維充填材料の繊維素材や充填密度が通気抵抗、熱伝導率、熱・水分同時移動特性などにおよぼす影響を調べた。通気抵抗では、特に繊維の太さの影響が顕著にみられ、熱伝導率、および、熱・水分移動特性では、繊維の太さだけでなく、繊維の熱伝導率や吸湿性などの繊維特性も関与し、各種繊維素材の特徴がみられることがわかった。本研究では、実験結果の整理にとどまったが、今後、繊維固有の熱物性や繊維形態および

その集合構造をパラメータとした、熱・水分・空気の移動特性の理論的解析へと発展させる予定である。

### 引用文献

- 1) Lord, E.: *J. Text. Inst.*, **46**, 191~213 (1955)
- 2) Hertel, K.L. and Craven, C.J.: *Text. Res. J.*, **21**, 765~774 (1951)
- 3) 中西正恵, 丹羽雅子: 家政誌, **41**, 841~851 (1990)
- 4) Wong, J.B., Ranz, W.E. and Johnstone, H.F.: *J. Appl. Phys.*, **27**, 161~169 (1956)
- 5) Farnworth, B.: *Text. Res. J.*, **53**, 717~725 (1983)
- 6) 今駒博信, 尚 熙善, 岡崎守男: 化学工学論文集, **15**, 44~51 (1989)
- 7) Stuart, I.M. and Holcombe, B.V.: *Text. Res. J.*, **54**, 149~157 (1984)
- 8) 藤本尊子, 丹羽雅子: 織機誌, **42**, T 27~T 35 (1989)
- 9) Obendorf, S.K. and Smith, J.P.: *Text. Res. J.*, **56**, 691~696 (1986)
- 10) Martin, J.R. and Lamb, G.E.R.: *Text. Res. J.*, **57**, 721~727 (1987)
- 11) 名倉光雄: 家政誌, **13**, 25~28 (1962)
- 12) 川端季雄: 織機誌, **39**, T 184~T 186 (1986)
- 13) 名倉光雄, 井本宜子: 家政誌, **26**, 412~415 (1975)
- 14) Farnworth, B.: *Text. Res. J.*, **56**, 653~665 (1986)
- 15) 川端季雄: 織機誌, **40**, T 59~T 67 (1987)
- 16) 川端季雄: 織機誌, **37**, T 130~T 141 (1984)
- 17) 日本規格協会: JIS, A1412 (1989)
- 18) 山崎義一: 織消誌, **29**, 231~236 (1988)
- 19) 田村照子, 嶋根歌子, 武田俊一: 織維誌, **45**, 229~237 (1989)
- 20) Morton, W. E. and Hearle, J. W. S.: *Physical Properties of Textile Fibers*, 2nd ed., Text. Inst., Manchester, 156~156 (1975)