

Effect of Hygroscopicity on Apparent Thermal Conductivity of Fabrics and Heat Transfer Model in Fabrics

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-03 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/510

布の見かけの熱伝導率に及ぼす吸湿の影響及び布内熱伝導モデル

松平光男

Effect of Hygroscopicity on Apparent Thermal Conductivity of Fabrics and Heat Transfer Model in Fabrics

Mitsuo MATSUDAIRA

Abstract

The change of apparent thermal conductivity of fabrics with moisture was investigated precisely for several kinds of fibers. Moisture regain of fabrics was controlled by relative humidity of environments. Heat transfer mechanism in fabrics was discussed with some models of heat resistance of air and fiber. Following conclusions were obtained. Apparent thermal conductivity of fabrics increase with moisture regain for both natural and man-made fibers except rayon fiber fabric. Average thermal conductivity of fiber in fabrics can be obtained approximately by a simple series model of thermal resistance of fiber and air using the data measured under various pressure.

1. 緒言

絹織物は多くの人々によって“軽くて暖かい”という評価を受けており¹⁻⁴⁾、その用途も秋・冬の衣料に集中している。筆者は以前、絹織物が相対湿度の低い、いわゆる乾燥時に保温性を発揮することを確認し⁵⁾、その原因の一つとして、絹織物が乾燥時にバルキーになることを報告している⁶⁾。しかしながら、絹繊維自体の熱伝導率が吸湿によりいかに変化するかについては検討出来なかった。

布の有効熱伝導率が吸水により増大するという詳細なデータが妹尾ら⁷⁾により報告されているが、不運にも絹織物の結果は含まれていない。また、彼女達の吸水条件は、布を水中に浸漬し、過剰の水分をろ紙で取り除くという方法でコントロールしている。この条件では、水分率数十%以上の多量の水分を含有している場合は十分信頼性のあるデータが得られるが、水分率数%以下の、繊維の飽和水分率以下の場合には、必ずしも信頼性があるとは思われない。衣服の快適感、衣服内のわずかな相対湿度の上昇に伴う

布の熱物性変化に対応するとも考えられるので、本報では、相対湿度の変化に伴う吸湿により布の熱伝導率がいかに変化するかを検討する。また、布中における熱伝導機構を解明するため、既に報告されている竹中による繊維と空気の配列モデル⁸⁾を参考にいくつかのモデルを考案し、実際の布の見かけの熱伝導率との対応を検討する。

2. 実験

2. 1 実験方法

熱に関する実験は、布の伝熱的特性を迅速かつ正確に行える Thermo Labo II⁹⁾を用い、定常熱移動法で布の見かけの熱伝導率を求めた。即ち、温度を制御した銅板 (BT-Box) と定温の水を流すことにより熱容量を無限大にした定温銅板 (Water-Box) との間に布をはさみ、BT-Boxから布への熱流量を加熱体への供給電力の測定により連続的に求める。布の表面の接触抵抗の影響も含めた見かけの熱伝導率 k (J/s/m/K) は次式で与えられる。

$$k = \frac{H \cdot L}{A \cdot \Delta T} \quad (1)$$

但し, H:熱流量 (J/s)

L:布の厚み (m)

A:銅板の面積 (m²)

ΔT: BT-BoxとWater-Boxとの温度差 (K)

布の吸湿率は飽和塩を含んだデシケータ中に試料を50時間以上保存することにより行った。用いた飽和塩としては, SiO₂·nH₂O (相対湿度 (RH) =17%), Zn(NO₃)₂·6H₂O (42%), Mg(NO₃)₂·6H₂O (53%), KI (69%), NaCl (75%), KNO₃ (92%) である。デシケータ中で調湿した試料はデシケータから取り出し後素早く重量測定をして, 絶乾時の重量差とから含有水分率を求めた。また, 熱伝導率の測定もデシケータから取り出し後, 5秒以内に銅板間にはさみ, 1分後のデータを定常熱流量とした。これらの測定

は20±0.2°C, 65±3%RH環境下で行った。

熱伝導率の圧力依存性を調べるため, BT-Boxの重量を変化させて実験を行った。BT-Boxの重量は150gであるため, これより軽い方は天秤棒を用いて軽くし, 重い方は重りを乗せることにより, 布にかかる圧力として, 49Paから3.53kPaの範囲で熱伝導率を求めた。

2. 2 試料

身近にある代表的な天然繊維及び人造繊維素材を選び, その概略を表1に示す。絹及びポリエステル布については, 糸の撚りの効果を考えるため, 何点か選んだ。これらの試料は前処理として, 糊抜き及びエーテル洗浄を行った⁷⁾。各試料の繰り返し数は5とした。

3. 結果

各試料布の見かけの熱伝導率の相対湿度依存性を, 天然繊維の結果は図1に, 人造繊維の結果は図2に, 平均値と標準偏差で示す。また,

Table 1 Outlines of Fabric Samples

Fabric Name	Yarn	Structure	Weight (mg/cm ²)	Thickness* (mm)	Twist (/m)		Density (/m)	
					Warp	Weft	Warp	Weft
Cotton-Broad	Spun	Plain	12.87	0.424	700	1000	2700	5300
Wool-Muslin	Spun	Plain	12.65	0.468	600	400	2300	2700
Polyester-Muslin	Spun	Plain	14.03	0.884	800	700	3200	3800
Acrylic-Muslin	Spun	Plain	10.42	0.522	700	700	2700	3000
Polyester-Habutae	Filament	Plain	6.32	0.129	0	0	4200	3400
Polyester-Dechine	Filament	Plain	8.32	0.279	0	1200	5400	3800
Silk-Habutae	Filament	Plain	8.17	0.215	0	0	5200	3300
Silk-Dechine	Filament	Plain	6.76	0.215	0	2800	5500	4200
Rayon-Habutae	Filament	Plain	7.32	0.140	0	0	2700	4000
Nylon-Habutae	Filament	Plain	6.52	0.123	0	0	3400	4400

* Thickness is measured under the pressure 49 Pa.

吸湿率依存性の結果を各々図3, 4に示す。天然繊維布は相対湿度の増加によって熱伝導率が增大しているが、これは繊維の吸湿率の増大によるためであることが明らかに示されている。天然繊維の中では綿が最も吸湿率の効果が大きく、見かけの熱伝導率も大きかった。一方人造繊維布は相対湿度依存性が小さいが、これはレーヨンを除いて吸湿率が小さいからである。吸湿性の大きなレーヨン布も吸湿率の熱伝導率への効果は小さかった。理由はわからないが、同じセルロース系の綿に比べてその挙動は大きく異なっていた。見かけの熱伝導率はアクリルが最も大きく、ポリエステルが最も小さかった。フィラメント繊維からなる布に比べ、スパン布の方がデータのバラツキは大きかった。

各試料布の見かけの熱伝導率の測定時の圧力依存性を図5, 6に示す。全ての試料で熱伝導率は圧力が高い方が大きな値となっている。標準圧力は590Paであるので⁹⁾、標準圧力以上での変化は小さく、標準圧力以下での値が極めて小

さくなっている。これは、圧力が小さい場合、繊維—繊維間や銅板—繊維間の接触面積が極端に小さくなることを意味している。フィラメント布に比べ、スパン布の方が高压下での変化が大きいようであるが、これはスパン布の方が圧力による変化量が大きく、繊維の配列が変化して熱を伝導しやすくなるためと考えられる。

4. 考察

4. 1 布の見かけの熱伝導率に及ぼす吸湿の影響

吸湿性繊維は吸湿によって熱伝導率が增大するが、これは繊維内部の空気が水で置き換わるためと考えられる。水の熱伝導率は 0.603 (J/s/m/K) であるのに対して、空気は 0.0256 (J/s/m/K) であり¹⁰⁾、水分を多く含む方がその熱伝導率は大きくなる。妹尾らの研究⁷⁾では、糸構造による熱伝導率の変化が認められたが、この場合は過剰の液体水を布に与えているため、繊維表面への水の吸着が主体となり、糸構造や密度

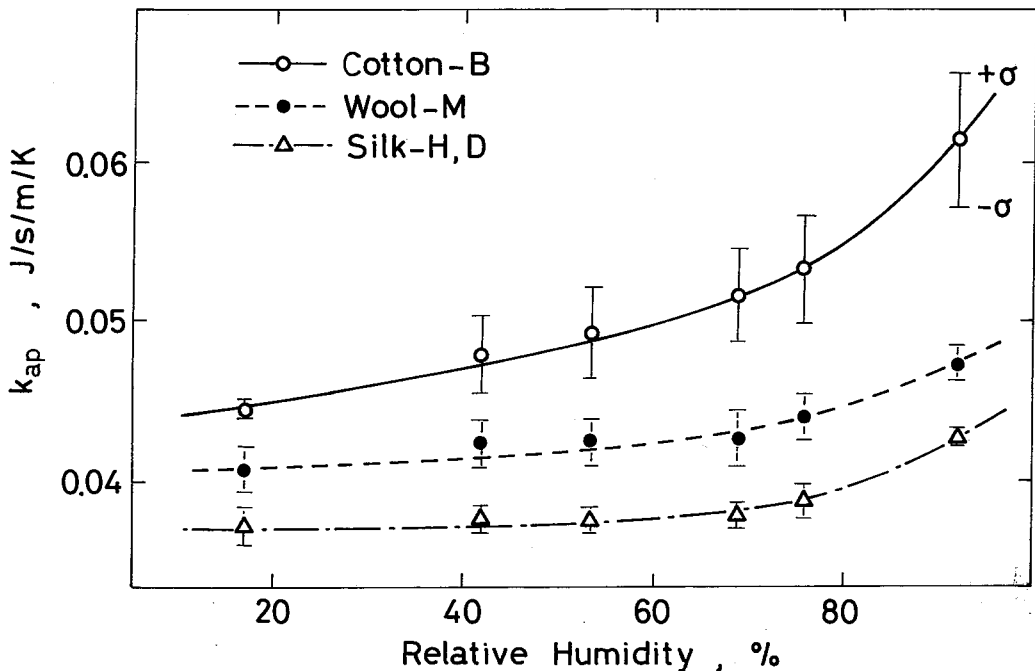


Fig.1 Dependency of apparent thermal conductivity of natural fiber fabrics on relative humidity.

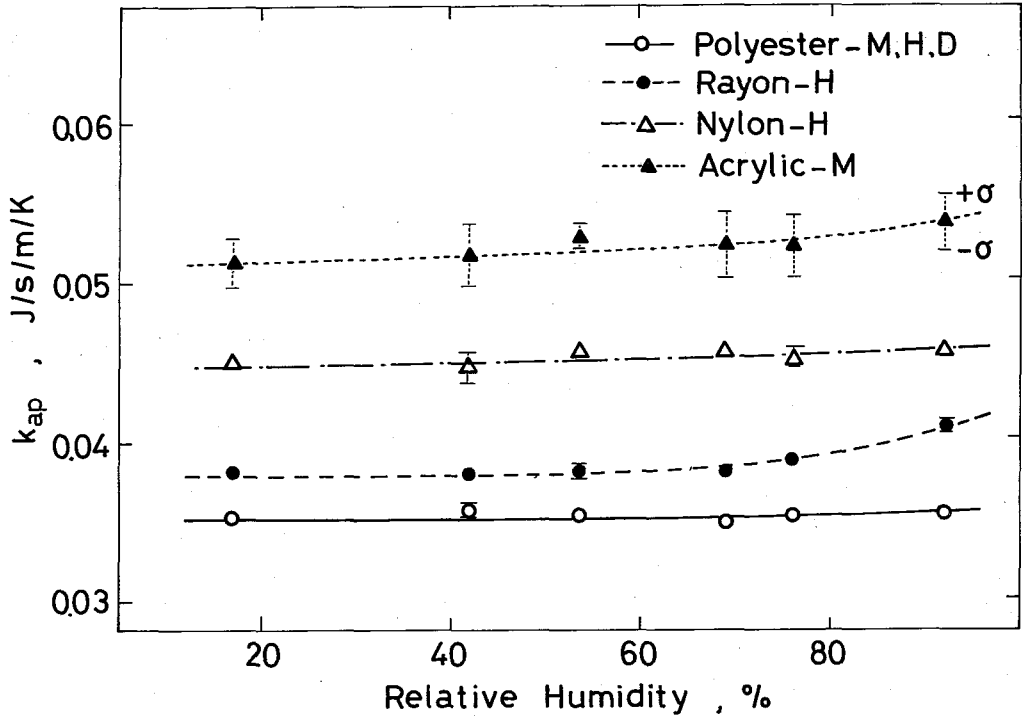


Fig.2 Dependency of apparent thermal conductivity of man-made fiber fabrics on relative humidity.

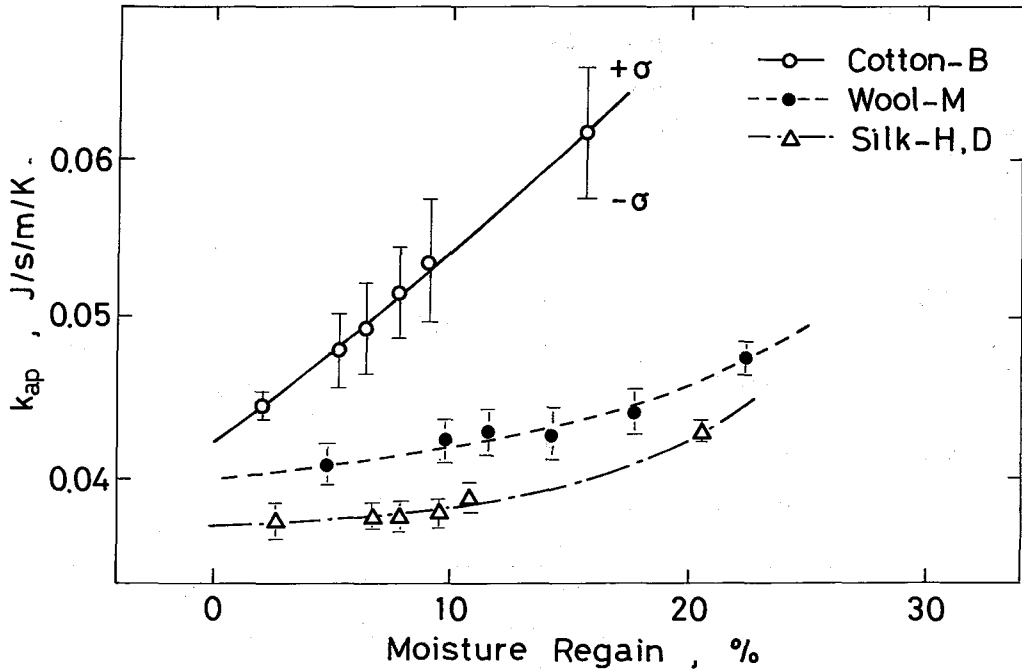


Fig.3 Apparent thermal conductivity of natural fiber fabrics plotted versus moisture regain of fiber.

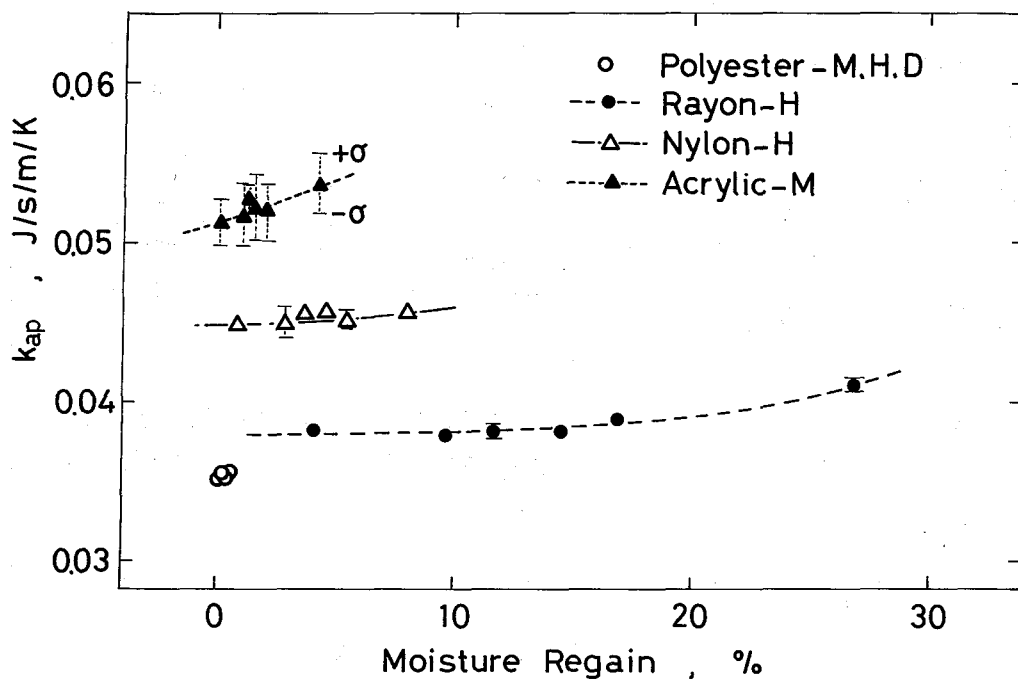


Fig.4 Apparent thermal conductivity of man-made fiber fabrics plotted versus moisture regain of fiber.

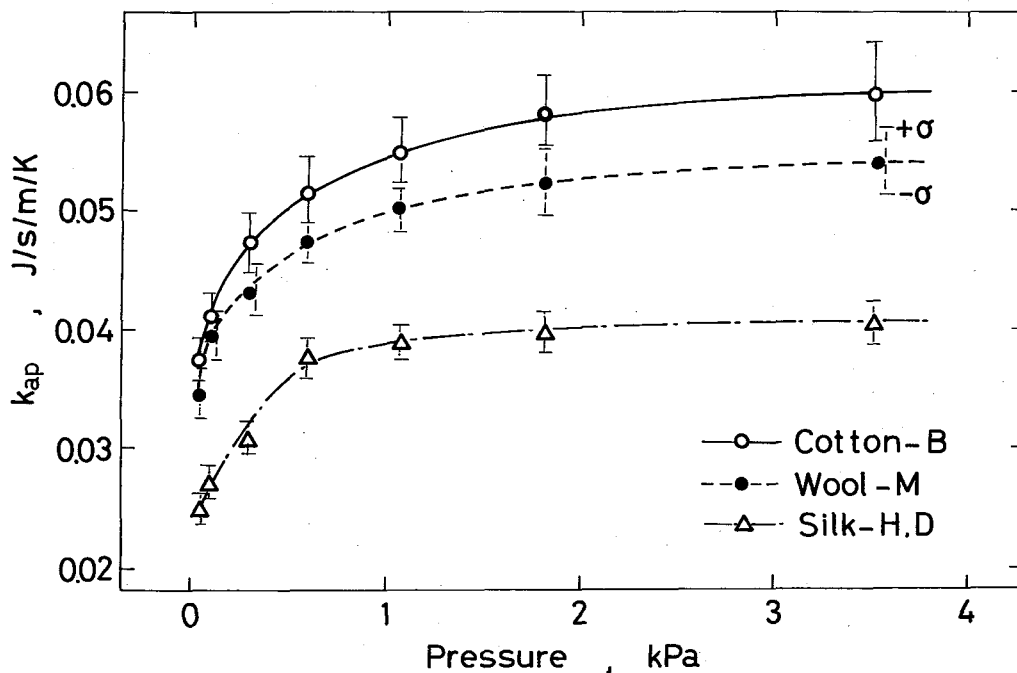


Fig.5 Relationship between apparent thermal conductivity of natural fiber fabrics and pressure at the measurement.

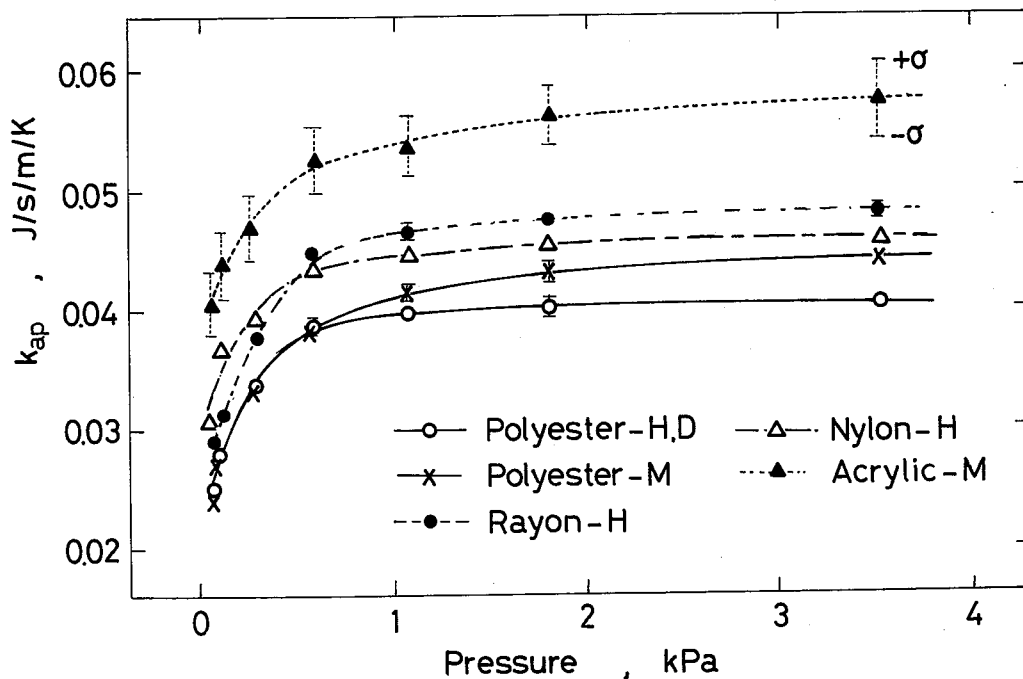


Fig.6 Relationship between apparent thermal conductivity of man-made fiber fabrics and pressure at the measurement.

によって熱伝導率が異なってくる。しかしながら本研究では、空気中の水蒸気圧によって水蒸気を与えているため、糸構造や密度の影響は考えられない。事実絹織物のハブタエ及びデシントの相違、あるいはポリエステル織物のハブタエ、デシン、モスリン間の相違は全く認められず、図1～4では区別なく示した。

4. 2 布内の熱伝導機構に関するモデルの検討

測定時の圧力が増加すると、布の見かけの熱伝導率は増加するが、これは圧力によって布中に含まれる空気の量が減少することによるものであると考えることが出来る。ここで、繊維自体の熱伝導率を簡単に求める方法を見出すため、布内の熱伝導に関するモデルを検討する。図7に従来からの竹中モデル⁹⁾及び竹中モデルを改良したモデル及び最も単純な直列モデルを考えた。本図で用いられている記号は以下の通りである。

- K_a : 繊維の熱伝導率 (J/s/m/K)
- k_f : 空気の熱伝導率 (J/s/m/K)
- f : 繊維層だけの厚み (m)
- a : 空気と繊維の並列部の厚み (m)
- y : 並列部の繊維層の比率, 等価断面計数⁹⁾
- R_a : 空気の熱抵抗 (smK/J)
- R_f : 繊維の熱抵抗 (smK/J)

布の総抵抗を R_t (sm²K/J) とすると、竹中モデルの場合以下の式が誘導できる。

$$R_t = f_e R_f + a / (y / R_f + (1-y) / R_a) \tag{2}$$

$$(f - fy) R_f^2 + (R_t + a R_a + (f R_a - R_t) y) R_f - R_t R_a y = 0 \tag{3}$$

但し、 $R_a > R_f > 0, 1 > y > 0$ である。

ここで繊維の厚みは布の重量と繊維の密度から近似的に求めることが出来、布の圧力-厚み曲線から空気の厚みも求めることが出来る。即ち、(3)式は繊維の熱抵抗 R_f と等価断面係数 y の3次式となり、測定点が2点あれば、解くこ

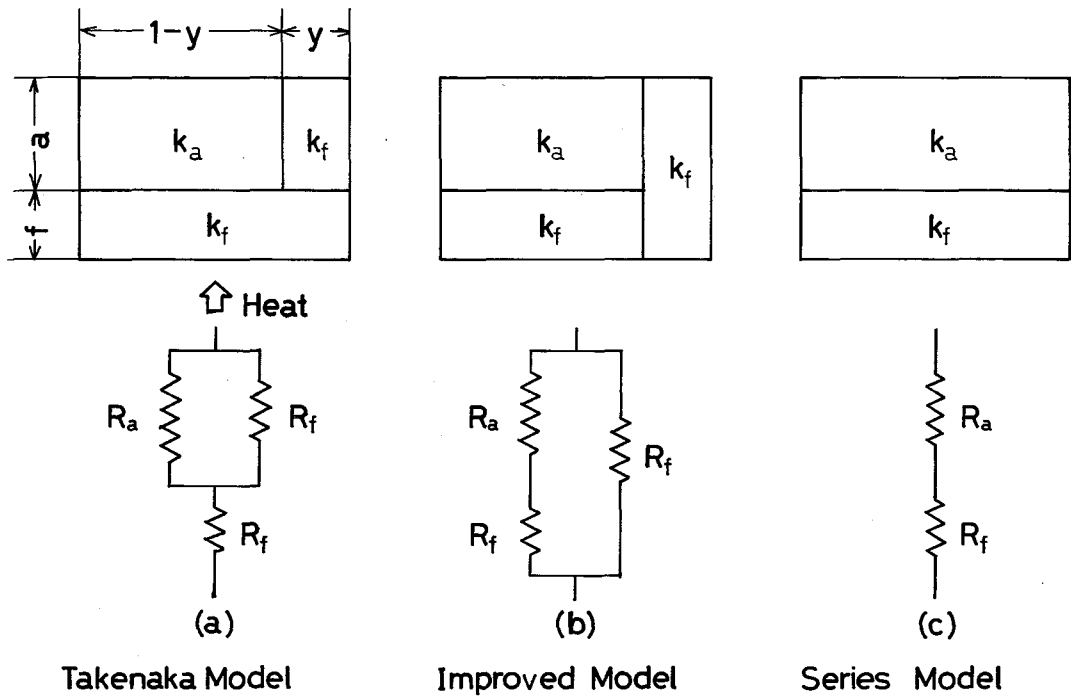


Fig.7 Some models for heat transfer mechanism in fabrics.

とが出来る。

一方、改良モデルでは、以下の式が誘導できる。

$$1/R_t = y / ((a+f)R_f) + (1-y) / (aR_a + fR_f) \quad (4)$$

$$(af + f^2)R_f^2 + (a^2R_a + afR_a - aR_t - fR_t + aR_t y)R_f - aR_t R_a y = 0 \quad (5)$$

本式では繊維の熱抵抗と等価断面係数の2次式となり、測定点が2点あれば、解くことが出来る。

最も単純な直列モデルの場合、以下の式となる。

$$R_t = fR_f + aR_a \quad (6)$$

この場合、測定点が1つあれば繊維の熱抵抗が求められる。

これらモデルを用いて、表1の試料について繊維の熱抵抗即ち繊維の熱伝導率を求めるべく

検討を行った。但し、以下の仮定をおいた。

- (1) f, y, R_f : 一定
- (2) 圧力の変化によって a (空気層の厚み) のみが増える
- (3) $R_a = 39.06 \text{ (smK/J)}^{10}$

実験結果は、上記のモデルのうちどれを用いても、繊維の熱抵抗 R_f がマイナスになったり、等価断面係数 y が1より大きくなったりして、満足できる値ではなかった。この理由としては、等価断面係数が圧力によって変化していることが考えられるが、この値が変化しては(3),(5)式は解くことが出来ない。竹中モデルで成功したのは、熱伝導率既知のガラスファイバーを用いたからである。それ故、布中の熱伝導機構は図7に示すような単純なモデルでは表すことが出来ないことが判明した。

そこで次に、繊維及び空気熱抵抗を未知数として、最も単純な直列モデルを用いて検討した。圧力を変えて測定した値が2つあれば、(6)式を解くことが出来る。得られた結果を表2に

示す。圧力は7点変化して求めたが、精度の不安な最小圧力(49Pa)の結果は除き、計6点の結果、即ち15組の結果の平均値を示してある。 k が最終的に求めた繊維実質の熱伝導率である。綿の熱伝導率が大きく、絹、ポリエステル、ナイロン、レーヨンの無撚のフィラメント織物の熱伝導率は小さくなっている。同じポリエステルの中ではスパン織物の方がフィラメントよりも大きくなっている。また、ハブタエとデシンでは絹もポリエステルもデシンの方が大きくなっている。繊維の熱伝導率は繊維軸方向とそれに直交する方向とでは大きく異なり、繊維軸方向の方が数倍以上大きいことがわかっている¹¹⁾。ハブタエに比べてデシンやスパン織物で熱伝導率が大きいという今回の結果は、撚りによって繊維軸方向の繊維数が増大しているためであると考えられる。参考のため、川端¹¹⁾によって測定された繊維軸方向(k_{ax})とそれに直交する方向(k_{ia})の熱伝導率も表2に示したが、今回得られた値は繊維軸方向よりは大幅小さい

が、それに直交する方向よりは大きな値となっている。即ち、単純な直列モデルを用いることにより、繊維軸方向とそれに直交する方向の繊維両者が混在する布の繊維の平均的な熱伝導率を求めることが出来ることを示している。今回得られた値は布状態における繊維の熱伝導率という点に意義があり、布間の簡単な比較に用いることが出来ると思われる。

今回の検討では空気の熱抵抗に既知の値(39.06smK/J)を用いた場合、繊維の熱抵抗がマイナスの値になったりして、合理的な結果を得られなかった。未知量として求めた場合、その値は試料によって異なり、既知値よりも全ての場合で小さな値であった。一般にスパン織物に比べフィラメント織物の方が大きな値を示しているが、この理由については不明である。本方法によるモデル化の限界とも考えられる。

熱伝導率に及ぼす吸湿の効果との関連では、直列モデルの場合、単純に空気の一部が水に置き換わったと考えられる。例えば、吸湿により

Table 2 Results of Thermal Conductivity

Fabric Name	R_a (smK/J)	R_i (smK/J)	k (J/s/m/K)	k_{ia}^* (J/s/m/K)	k_{ax}^* (J/s/m/K)
Cotton-Broad	25.5	3.15	0.32	0.24	2.88
Wool-Muslin	24.8	3.92	0.26	0.17	0.48
Polyester-Muslin	19.1	3.84	0.26	0.13	1.18
Acrylic-Muslin	21.4	3.45	0.29	0.17	1.02
Polyester-Habutae	35.7	5.51	0.18	0.16	1.26
Polyester-Dechine	26.5	4.15	0.24	0.16	1.26
Silk-Habutae	33.8	5.74	0.17	0.12	1.49
Silk-Dechine	28.3	3.74	0.27	0.12	1.49
Rayon-Habutae	31.8	4.17	0.24	-	1.90
Nylon-Habutae	29.0	6.35	0.16	-	-

* measured by Kawabata: J. Text. Mach. Soc. Japan, 39, T184 (1986).

最も大きく熱伝導率が增大した綿織物の場合、環境相対湿度が60%から90%になることにより、布の見かけの熱伝導率は0.05から0.06 (J/s/m/K) へと増大しているが(図3)、この時直列モデルを用いて、繊維の熱抵抗一定として空気の熱抵抗を計算すると、25.5から20.9(smK/J)へと減少していることになる。空気の熱抵抗を一定とした場合、繊維の熱抵抗はマイナスの値となってしまう、合理的な結果は得られない。即ち、本直列モデルでは、繊維の効果よりも空気の効果が大きく現れる。それ故、必ずしも満足出来るモデルとは言えず、今後更に良いモデルの探索が必要と考えられる。

5. 結論

相対湿度の変化に伴う繊維の吸湿により、布の見かけの熱伝導率がいかに変化するかを代表的な繊維について調べ、布中の熱伝導機構について検討した結果、以下の結論を得た。

(1) 繊維の吸湿率の増大により、見かけの熱伝導率は天然繊維布も人造繊維布も増大するが、レーヨン布については変化が小さかった。

(2) 繊維と空気の熱抵抗に関する単純な直列モ

デルを用いることにより、熱伝導率測定時の圧力を変化させて求めた値を使い、布中の繊維の平均的な熱伝導率を近似的に求めることが出来る。

文献

- 1) 細田一夫：繊維と工業，2，285 (1969)。
- 2) B.P.Corbman: "Textiles, Fiber to Fabric", McGraw-Hill Book Co., New York, 301 (1983)。
- 3) 有本 肇：繊維製品消費科学，24，82 (1983)。
- 4) 平林 潔，荒井三雄，松村政明：繊維機械学会誌(繊維工学)，38，P40 (1985)。
- 5) 松平光男：日本家政学会誌，39，987 (1988)。
- 6) 松平光男：日本家政学会誌，39，1179 (1988)。
- 7) 妹尾順子，米田守宏，丹羽雅子：日本家政学会誌，36，251 (1985)。
- 8) 竹中はる子：日本家政学会誌，14，77 (1963)。
- 9) 川端季雄：繊維機械学会誌(論文集)，37，T130 (1984)。
- 10) 日本化学会編："化学便覧，改訂2版"，丸善，p.982 (1975)。
- 11) 川端季雄：繊維機械学会誌(論文集)，39，T184 (1986)。