

布地の熱伝導率の評価に関する研究

高橋 カネ子*・山田 悦郎**

The study on the evaluation of thermal conductivity of clothing materials

Kaneko TAKAHASHI* and Etsuro YAMADA**

(Abstract)

This report is the review on the studies of the effective thermal conductivity of clothing materials, which have been investigated by the authors over about fifteen years.

The clothing materials have been used to protect human body from cold (or hot) surroundings. These are made of various materials such as cotton, wool, polyester, etc.. However, there are a few studies on the thermal conductivity of cloths from the viewpoint of heat transfer.

Firstly, the authors investigated the phenomena of heat-flows through the cloths by conduction. The measurement method employed in this experiment was based upon the steady-state comparison method. It has been clarified that the effective thermal conductivity increases slightly with increasing temperature and is dependent on materials of fiber.

Secondly, the authors developed the apparatus with a water tank. In this apparatus, heat flowed through the cloths accompanied with moisture diffusion. The effectiveness of vaporizing rate as well as the temperature difference between the heater (simulated skin-temperature of the human body) and room are studied.

Lastly, the interesting various phenomena are pointed out for the future investigation.

1. はじめに

人間生活に衣食住は欠くことの出来ない3要素であることは言うまでもない。この中でも衣類は人間に密着した形で用いられ、古くは動植物の天然素材から、最近では色々な機能を持つ化学繊維など、多種多様な物が作られ、ファッション性等にむしろ重点をおいて使用されている状況は周知のことである。しかしながら、もともとの衣類は人間を寒さや場合によっては暑さから身を守る用具として作られ、工夫を重ね現在の形まで到達したもので、衣類の最

も素朴な物性は熱物性値であると考えてよい。著者らは以上の考えと文献検索の結果、家政学的には多くの研究はなされてはいても、伝熱工学的な面からの熱物性値の研究は少ないのではないかと考え、今日まで約15年間にわたって布地の熱伝導率の評価に関する研究を行ってきた。この研究の最初に当たる口頭発表(高橋, 1981)を行った時、家政学の分野の研究者から「布地は空気の占める比率が大半で、繊維の種類による布地の熱伝導率の相違があるとは考えられない」といった質問があったことをつい最近のように思い出す。しかしながら、著者らの研究

(平成9年1月10日受付、平成9年2月17日受理)

*秋田大学鉱山学部機械工学科。

Department of Mechanical Engineering, Mining College, Akita University.

**秋田大学鉱山学部附属素材資源システム研究施設。

Research Institute of Materials and Resources, Mining College, Akita University.

が端緒になって、多くの研究者が類似の研究を始め、この分野の研究業績が大きく伸びたことはこれらに関するレビュー（丹羽，1994）を見ても明らかではないかと自負している。

この文献は筆頭著者の高橋がこれまでの一連の研究を纏め学位を取得したことを機会に、著者らが発表した論文および学位論文（高橋，1996b）を基礎に解説として述べるものである。しかしながら、学位取得にあたってこれまでを振り返ると、多くの知見を得たことは勿論ではあるが、まだ解釈が十分ではない興味ある現象も少なくない。従って、この解説は高橋の学位論文の内容を主として述べながら、布地の熱伝導率の評価の研究のこれまでと現状を解説するが、そのみならず、学位論文では割愛された口頭発表の講演前刷中の興味あるデータも引用しこれからの問題点としての示唆も行うことにした。

2. 布地の中に生じている現象

布地は前述のように、材質・織り方についてだけ見ても多種多様である。しかし、ほとんどの場合の基本的な構造は繊維を撚って作った糸を織ることにより出来ているものと理解してよい。従って、布地は繊維と空気との複合材料といえ、空気を多く含むために軽くかつ断熱性能に優れていることになる。著者らは以上の理解の上に立って、布地を連続相の空気に不連続相の繊維が混合して成立している複合材料としてとらえ考察を行ってきた。

しかしながら、実際に人間に着用されている布地は(1)空間を占める空気がほとんど流動せず、熱のみが移動し、その熱物性値を単純な有効熱伝導率と取り扱ってよいと見做せる場合と、(2)汗またはそれと感知しないいわゆる不感蒸泄の状態のような、空間中を湿り空気が流動し、熱伝導のみならず物質移動をも伴った熱移動状態、の2種類の現象が存在すると予想される。この研究で最終的に目指すものは(2)の現象であるが、直ちにこれの検討を行えば現象の複雑さのために、他の因子の影響も混在し本質を見極め難くなることを想定し、二段階の検討を行った。

次章で上述の(1)の場合に関して検討した結果を述べるが、この場合でも巨視的には布地の表面から裏

面まで熱が伝導のみで移動したように測定出来たとしても、微視的には単一の繊維および隣り合う繊維、さらに、これらの周囲の空気との間で、寄与の程度は異なるが、熱伝導、熱伝達、熱放射のすべての伝熱機構が働いていると予想（矢木ら，1954）される。この微視的現象の考察については著者らも述べて（1981）いるが、残念なことにそれらの定量的な検討までは踏み込んでおらず、いわゆる有効熱伝導率で評価するに止まっている。従って、ここでは微視的伝熱機構の図などは省略する。

なお、この解説中での有効熱伝導率 λ_e [W/(m·K)] は次の式(1)で定義される。

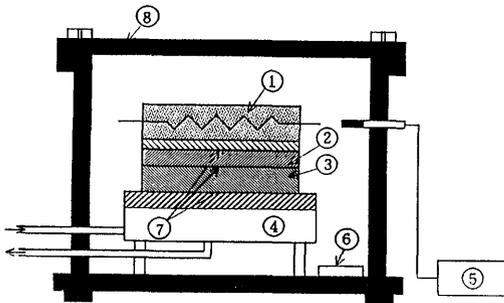
$$Q = \lambda_e A \Delta T_c / (N_c D) \quad (1)$$

ここで、 Q は伝熱量 [W]、 A は伝熱面積 [m²]、 ΔT_c は測定試料上下面間の温度差 [K]、 N_c は試料の枚数 [sheets]、 D は試料布地の1枚当りの厚さ [m/sheet] である。

3. 空気の流動がない場合の熱伝導率

3.1 実験方法と実験装置、試料

熱伝導率の測定方法には多くの種類があり、必ずしもそのうちの一つが普遍的に適用出来るものとは限らず、測定試料の性質や形状に対して適した方法が幾つか（日本熱物性研究会，1983）ある。布地に限定して考えても適用出来るものは1種とは限らない、特に、最近は測定時間が短い特徴を持つ非常状態測定で測定出来る方法が提案（川端，1984）されこの装置を用いた報告（妹尾ら，1985）も見られる。この方法は前述の特徴を有しているが、布地は衣服に加工して使用される場合、人体に長時間接触していること、複合材料の場合必ずしも非常測定が精度のよい値が求められるとは限らない（山田ら，1994）こと、などを考慮し、試料の形状が広い平板状で布地の形に最も適する定常比較法を選んだ。この方法はJIS (A1412) に決められていることから推定できるように、比較的簡単な装置でありながら精度のよいことが特長である。ただし、ここでは幾つかの影響因子を検討するために、基本構造に湿度調節および圧力調節の可能な部分を加えた構成にしている。用いた装置の概略図（高橋ら，1981、



- 1: Heater 5: Hygro thermometer
 2: Sample 6: Glass dish
 3: Standard plate 7: Thermocouple
 4: Cooler 8: Acrylic plate

Fig. 1 Schematic diagram of steady state comparison apparatus.

1982) を Fig. 1 に示す。

一方、布地の試料を多くのものから選ぶことも大切である。始めは基本的な素材と織物構造を選定した方が、因子の考察やこれまでの比較的少ない実験結果との比較検討のため有利と考え、構造は平織りを選び、素材は天然繊維の代表として綿布および化学繊維の代表例としてもっとも広く使用されているポリエステルを2種を中心に選んだ。試料の詳細を Table 1 に示す。試料の見掛け密度は広い範囲にわたっていることがわかるが、中間のものが少なかったため、最も密度の大きい試料の縦糸または横糸を

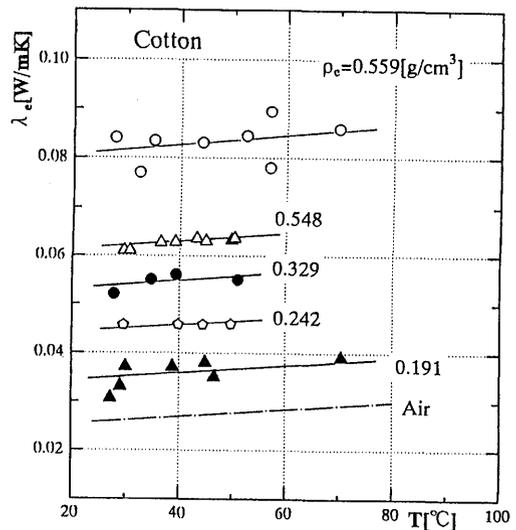
Table 1 Details of testing cloths.

Name	Material	D [mm]	ρ_e [g/cm ³]	ρ [num/cm]
Softdenim	Cotton 100	0.512	0.559	19×27
Broadcloth	"	0.236	0.515	52×28
"	"	0.218	0.588	26×14
Bleached Cott.	"	0.347	0.329	24×24
"	"	0.291	0.242	12×12
Gauze	"	0.182	0.191	13×13
Sharkskin	"	0.292	0.548	23×15
"	"	0.294	0.477	23×10
"	"	0.301	0.428	16×15
Tetoron	Polyester 100	0.376	0.339	20×26
Yohryu	"	0.354	0.279	—
Broadcloth	Poly. 65, Cott. 35	0.226	0.511	—
Gabardine	Poly. 65, Rayon 35	0.330	0.567	—
Net	Polypropylene	0.541	0.191	7×7

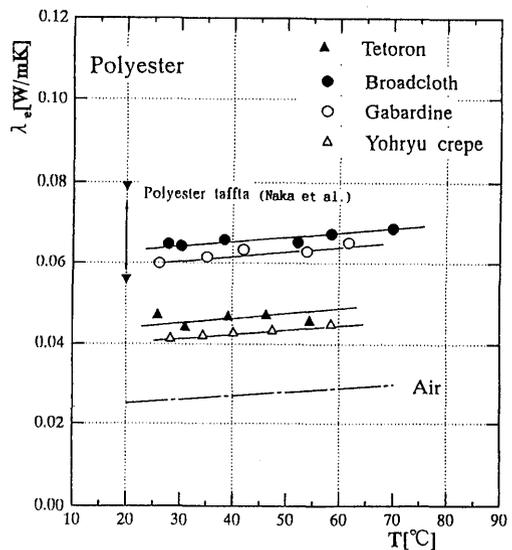
等間隔に抜いたものも採用した。

3.2 実験結果と考察

布地の熱伝導率に影響する因子は前述のように多くのものと予想されるが、材質と織物構造を規定すると、それ以外の主な因子は、温度、見掛け密度、周囲の空気の状態等であると考えられる。最



(a) Cotton cloth



(b) Polyester cloth

Fig. 2 Effective thermal conductivity (λ_e) of cloths vs. temperature (T) diagram.

後の因子に関しては空気の湿度を主に検討した。他に、伝熱機構を検討する目的と特殊環境下を意図して圧力を変化させ実験した。

Fig. 2 (a), (b) に綿布とポリエステル熱伝導率の温度依存性(高橋ら, 1981, 1982)を示す。両図の結果共に非常に緩やかではあるが、温度の増加と共に有効熱伝導率が大きくなっていることが認められる。図には、空気の熱伝導率も併記しているが、これと比較すると、布地の温度依存性は空気の定性的性質によっていると考えられる。また、両図とも見掛け密度 ρ [kg/m³] によって明らかに有効熱伝導率 λ_e [W/(m·K)] が異なることが分かる。さらに、Fig. 2 (b) 中に仲ら (1974) のポリエステルの結果も示しているが、この文献には温度を変えた実験結果がないのでこのような形で示したが、後で別の比較を行う。

環境の湿度は季節、天候、時刻等によって刻々と変化しているが、それが布地の熱伝導率にどのように影響しているか明らかにした結果は見られないようである。実験装置の都合上広範囲に温度と湿度を変えることは出来なかったが、試料の平均温度をほぼ 25 [°C] とし、シリカゲルの量を加減することで実験箱内の相対湿度 ϕ [%] を比較的広い範囲に変

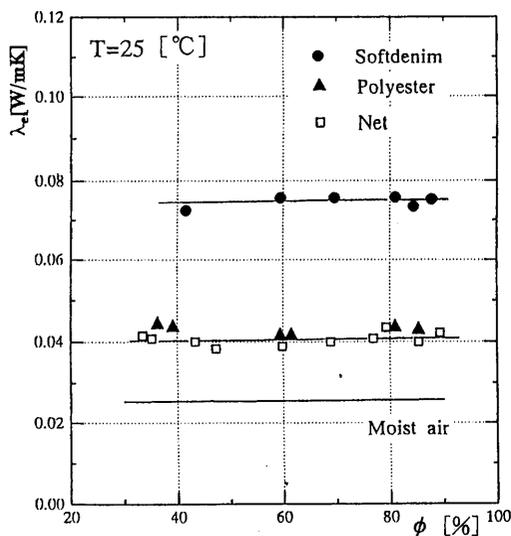


Fig. 3 Effectiveness of relative humidity (ϕ) on λ_e .

えて得られた結果の代表例を Fig. 3 に示す。綿布、ポリエステルのいずれの場合にも湿度依存性はほとんど見られないことが明らかである。この原因は同時に示している湿り空気の熱伝導率(高橋ら, 1994 a) が湿度によってほとんど変わらないことによると思われる。しかしながら、布地は濡れてはいないが繊維自体には水分が収着されており、実際の測定は繊維が水分を含んだままで行われている。従って、この結果から判断すると、この収着水は強固に繊維内にあり、高温乾燥等を行わない限り、定常比較法の数時間から十数時間の時間間隔と常温近傍の温度における湿度変動程度では変化しないものと推定される。

この他に、周囲の空気の圧力を 10 [Pa] 程度まで下げて実験を行い、圧力によって熱伝導率が大きく異なること、すなわち、布地内の空気の熱伝導と微小対流が布地の熱移動に大きく寄与していることも明らかにした(高橋ら, 1981) が、微視的機構の定量的な評価までに至らなかったためここでは結果を割愛する。

以上求められた結果をまとめ、布地の見掛け容積に占める繊維の容積比 F_v の関係で熱伝導率を示すと Fig. 4 のようになる。比較のため既存の竹中 (1961) のグラスウール、仲ら (1974) のポリエステルの結果も合わせて示している。この図から、材質毎にそれぞれの曲線で結果を表現出来ることが認められ、著者らのポリエステルの結果は仲らの結果とほぼ 1 本の曲線上にあることが分かる。また、竹中らの結果は $F_v = 0.13$ 付近で極小値を持ち、これま

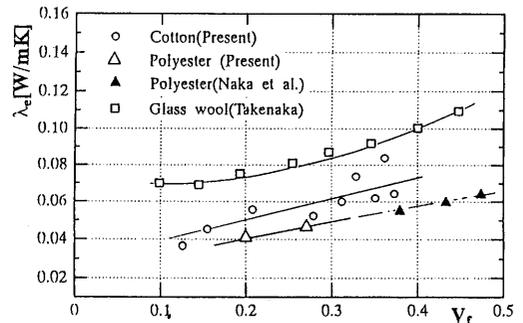
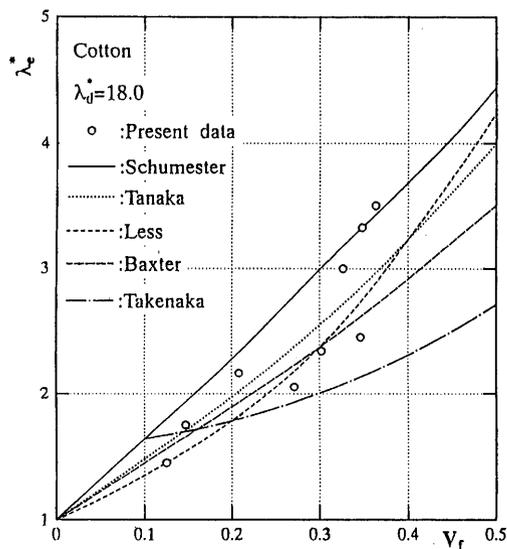
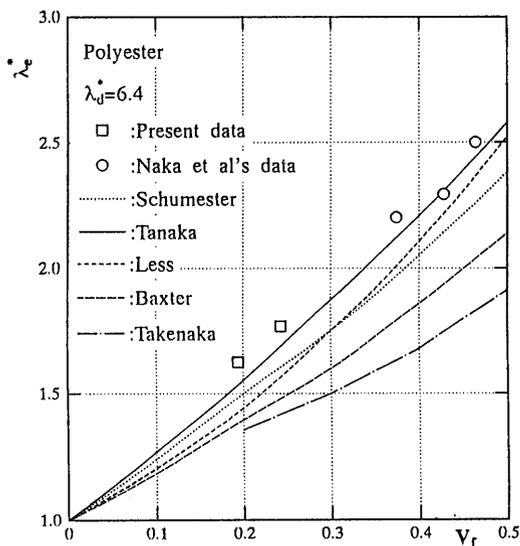


Fig. 4 Relation between λ_e and volume fraction of fiber (v_v) of various cloths.

で断熱材では良く知られている現象 (C. M. Pelanne) をも捕らえていることが評価できる。著者らの綿布の結果で縦糸または横糸を引き抜いた3点の結果が他の正常な綿布の曲線から大きく離れているが、これは、引き抜く行為によって布地の巨視的均質性



(a) Cotton cloth



(b) Polyester cloth

Fig. 5 Comparison of experimental data of cloths with predicting formulae.

が失われたためと思われる。

布地の熱伝導率はその都度測定によって求めることが最も望ましいことはもちろんである。しかしながら、少なくとも現時点では電気回路におけるテスターのような簡便な測定機器は見当たらないので実際の測定は困難になる。従って、材質と他のもう1個の物理量(多くの場合、見掛け密度または繊維の容積比の場合が多い)を知ることで熱伝導率がある精度で推定出来れば便利である。この考えの下にこれまで布地または繊維系材料に対し幾つかの推定式が提案されてきた。式の詳細は他の文献(高橋, 1994a)に記載されているのでここでは省略し、結果のみを示すと Fig. 5 (a) および (b) になる。ただし、ここに比較した式はいずれも熱伝導のみを考慮した式のみを取り上げている。前述したように微視的には3種のメカニズムが働いていることは推定されているが、この両図から判断すると、伝導のみの式でも布地の熱伝導率を推定出来るように見える。ただし、綿布とポリエステル両者に最も良く一致する式が同一の著者の提案した式では見当たらない点にまだ研究の余地があると考えている。

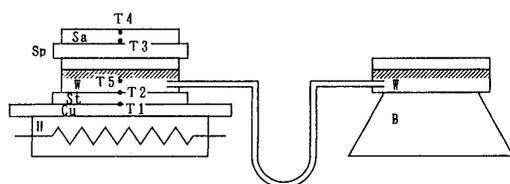
4. 湿分移動を伴う場合の実験

4.1 実験装置, 試料

著者らは湿分の移動を伴う実験を行う場合でも、前章の結果と定量的な比較を行うために、基本的には定常比較法と出来るだけ同じ原理の装置を作ろうと考えた。特に不感蒸泄のように蒸発量が極めて少なく、緩やかな現象まで検討するためには非定常実験はふさわしくないと考えられたからである。しかしながら、熱伝導のみを行わせる前章の装置、すなわち、熱を上から下方に流動させ、巨視的な自然対流を防ぐものでは湿り空気の流動を実現出来ない。また、水を貯蔵あるいは補給する部分を持ち、それを蒸発させ、かつ、その量も加減可能で、さらに蒸発量を精度良く測定出来なければならぬ。

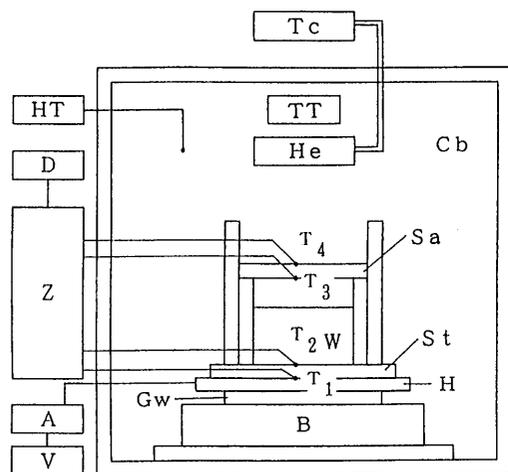
以上の条件を満たすために、水の容器を電子天秤に乗せる方法を採用した。また、ヒーターは最下部に置き試料の上方は解放として人体に衣類が着用される様子を模擬することにした。望ましい方法は、

ヒーター，流出熱量を測定する標準板，水容器，試料等の主要部を全て天秤上に乗せることであったが，最初は1 [mg] の精度と3 [kg] の容量を満たすことの出来る容量の天秤が見当たらず，同じ大きさの水容器を2個用いてそれらを細いビニール管で結ん



H: Heater
Sa: Sample plate
Sp: Porous plate
St: Standard plate
Cu: Copper plate
T₁ ~ T₅: Thermocouple
W: Water
B: Balance

(a) Prototype apparatus



B: Balance
W: Water
H: Heater
A: Ammeter
V: Volt stabilizer
Sa: Sample plate
St: Standard plate
Gw: Glass wool
T₁ ~ T₄: Thermocouple
Z: Zero conditioner
D: Digital voltmeter
HT: Hygro thermometer
He: Heat exchanger
TT: Thermometer
Tc: Temperature control system
Cb: Constant temperature box

(b) Advanced apparatus

Fig. 6 Schematic diagram of experimental apparatus, where heat flows accompany with moisture transfer.

だものを採用した。この装置の概略図（高橋ら，1986）を Fig. 6 (a) に示す。数年後，容量の大きな天秤を購入出来たので，それまでの実験結果や操作性などを何段階かにわたって検討し改良した装置の概略図（高橋ら，1994b）が Fig. 6 (b) である。現在はさらに環境室温を調節出来，実験箱内に局所湿度計を取付けた構造（高橋ら，1996d）に改良されている。実験を行う上での，測定物理量の主なものは，温度と蒸発量である。温度は初期においては重ね着全体の有効熱伝導率を求めることのために，試料に関しては高温側と低温側の2本のみであったが，実験が進むにつれて局所の熱伝導率や温度の振舞いを解明する目的で試料中に数本の熱電対を入れている（高橋ら，1994b）。ただし，この場合湿り空気の流動を出来るだけ妨げないように $\phi 70 \mu\text{m}$ の T 熱電対を用いた。

測定試料は機能性を持たせたポリエステルなども含み，前章とも少し異なるが，平織りの布地を選んだことは同様である。ポリエステル以外の試料を Table 2 (a) に機能性（吸湿性）ポリエステルの試料を Table 2 (b) に示す。

Table 2 Details of testing cloths, where heat flows accompany with moisture transfer.

(a) Various cloths

Name	Material	D [mm]	ρ_e [g/cm ³]	ρ_f [g/cm ³]	V_f
Broadcloth	Cotton	0.229	0.5890	1.52	0.6121
Softdenim	Cotton	0.556	0.5396	1.17	0.5406
Tetoron	Polyester	0.411	0.3250	1.23	0.7361
F lannel	Wool	0.508	0.5383	1.31	0.5891
Nylontaffeta	Nylon	0.118	0.5735	1.41	0.4969

(b) Polyester cloths which can absorb moisture

Material	Mw(X)	D 6 N [mm]	-COONa polym. (g equiv./g fiber)
Polyester [L1]	0.4	4.25	
" [L2]	2.0	4.22	0.8×10^{-3}
" [L3]	5.0	2.30	1.28×10^{-3}
" [L4]	8.0	4.70	1.86×10^{-3}

4.2 結果と考察

最も基本的な結果である、ほぼ定常状態になってからの経過時間 τ [min] と温度との関係 (高橋ら, 1986) を Fig. 7 に示す。ただし、ここでは温度そのものではなく、試料の高温側と低温側との温度差 ΔT_c [°C] を布地の重ね枚数 N_c [sheets] をパラメーターとして示している。 ΔT_c はそれほど大きな値ではないが変動していることが認められる。これを定常状態とみなすかどうかは判断に苦しむ所であるが、時間を経過させてもこのような状態は継続するので平均的な値を用いて以下の処理を行った。後で示す Fig. 12 のように、高温側の温度はほとんど安定しているので、 ΔT_c の変動は主に低温側の温度の揺らぎに原因があり、このような現象は湿分移動を伴う場合の典型的なものであることが多くの実験結果を求めた後理解出来た。

Fig. 8 に前図と同様の他の結果も合わせ ΔT_c と N_c との関係を示す。ばらつきはあるが N_c の増加と共に ΔT はほぼ直線的に増加すること、すなわち、熱抵抗が布地枚数に比例している妥当な結果であることが分かる。ただし、直線からの少しのずれに関しては装置の改良後さらに細かく検討した。

湿分移動の定量的な評価は蒸発率 η [g/min] によってなされる。Fig. 7 と同様な条件における η と経過時間 τ との関係 (高橋ら, 1987) を Fig. 9 に示す。この図から、温度の場合よりもさらに時間経過に伴う変動が大きいことが認められる。この図の場合 η は10分毎の値で現わしたものである。この測定

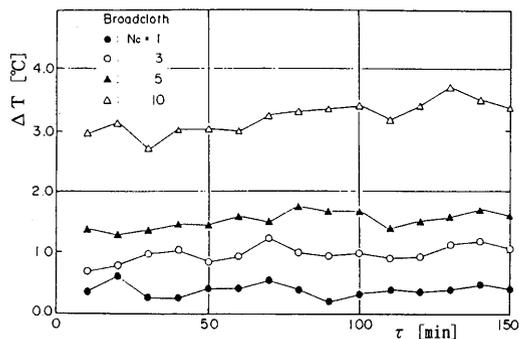


Fig. 7 Temperature difference between heater and room (ΔT) vs. elapse time (τ) diagram.

時間間隔をさらに細かくし、30秒毎に測定し現わしたものが Fig. 10 である。この図から蒸発率は約15

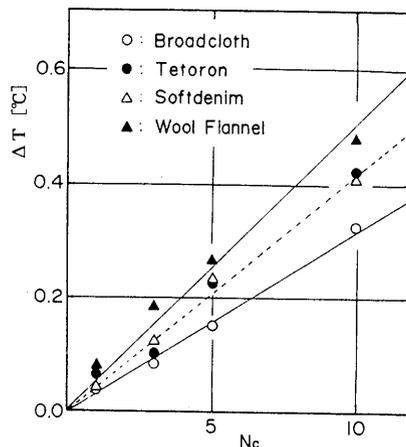


Fig. 8 ΔT vs. the number of cloths (N_c) diagram.

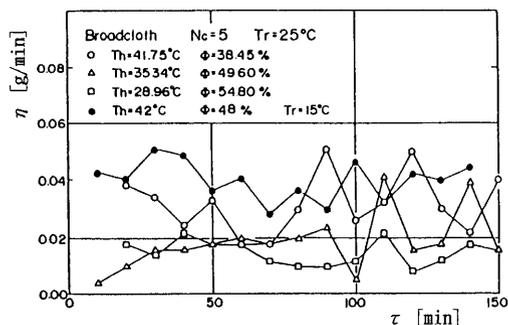


Fig. 9 Vaporizing rate (η) vs. τ diagram.

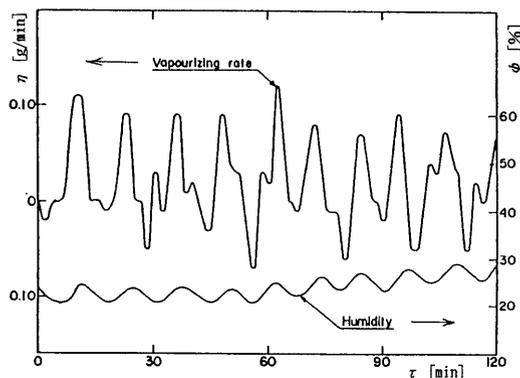


Fig. 10 Cyclic behavior of η and ϕ .

分の周期で周期的に増減し、それらの波形はそれぞれ類似している様子が明らかに分かる。また、周囲の相対湿度もこの現象の影響を受け、少しの時間遅れを保ちながら変動していることも認められる。この現象は Fig. 6 (a) の装置を用いた実験であるので、蒸発の水容器と天秤上の水容器とが別になっており、その間を細いパイプで結んでいるための時間遅れが主たる原因かと推定していたが、後の Fig. 12 の温度変動に示すように、直接天秤上に置いた水容器から蒸発させた場合でもこの様な現象は消滅しないことが明らかになり、先にも述べたように、このような現象は布地内を湿分が移動する場合の特徴的な様子であると考えている。

しかしながら、現象面はこれが実際に現わすものと理解したとしても、熱伝導率を評価する場合何等かの処理が必要である。この手段としてはある長時間の平均値を機械的に求めてしまうことも可能ではあるが、Fig. 9 または Fig. 10 からこれを求めるのは誤差が大きくなると予想される。そこで、ここでは経過時間を基にする平均の蒸発率を計算した。その結果は Fig. 11 のようになる。すなわち、ヒーター温度の最も高い場合を除いて η の値が平坦化し容易に平均的な η が精度良く求められることになる。

一方、先にも述べたごとく、Fig. 6 (b) のように装置を改良し、熱電対を試料の上下のみでなく、中間にも 2~3 本挟み、測定開始からの温度変化と時間との関係で示した代表例 (高橋ら, 1994b) が Fig. 12 である。ただし、ここでは試料の上下面温度 T_3 と T_4 のみを示している。この図の試料は Table 2

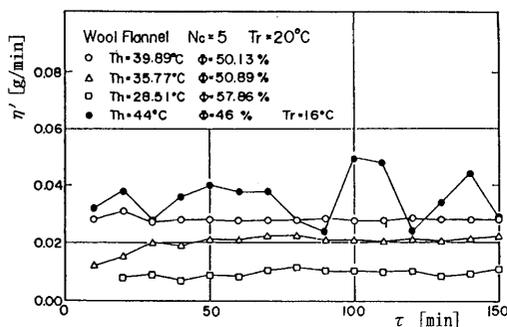


Fig. 11 Mean vaporizing rate (η') vs. diagram.

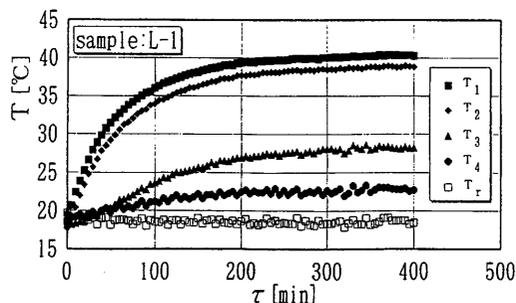


Fig. 12 Behavior of local temperature (T_i) in the cloths.

(b) に示す機能性を持たせたポリエステルの場合、定性的には他の材質の場合も同様であった。標準板の上下温度 T_1 および T_2 は極めて安定した状況を示し、約 300 [min] で定常状態と見做せる状況にあることも認められる。しかし、布地温度 T_3 と T_4 はこの時間以降も他の温度に比べ最も揺らいでいることがわかり、先に Fig. 6 (a) の装置で求めた Fig. 9, 10 の現象は装置の不備によるものではないことが確認出来た。即ち、この様な揺らぎは水分の繊維による吸収、放散、あるいは部分的に水分が凝縮する等の現象が起きているためと推定される。このような推定を確かにするため 5. に述べる現在の検討がなされているとよい。

さらに、前図のような温度変化から、試料を横切る全伝熱量は標準板の温度差から求められるので、湿分移動を伴う場合の有効熱伝導率 λ_e が求められる。代表例として Table 2(a) のブロードの場合 (高橋ら, 1987) を時間経過 τ との関係で示すと Fig. 13

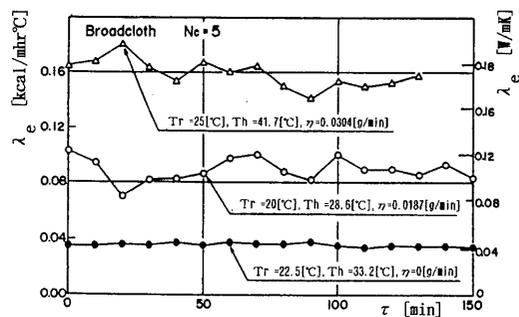


Fig. 13 Effective thermal conductivity of cloth (λ_e) vs. τ diagram.

のようになる。図中には比較のためと湿分移動の存在による熱伝導率への寄与を明らかにするために、 $\eta=0$ 、即ち、湿分の移動がない場合の熱伝導率も示している。これまでの物理量と同様に湿分移動を伴う場合の有効熱伝導率はある部分で変動があることがみられる。一方、 $\eta=0$ の場合は非常に安定した値を示していることは明らかで、この図からもこれまでの主張が確認されたといえる。

次に、蒸発率 η に影響を及ぼす因子として考えられるのは、皮膚温度に対応するヒーター温度 T_h 、環境温度 T_r 、周囲の相対湿度 ϕ 等である。この中で、 ϕ が極端に大きく飽和空気に近い場合を除けば、 $\Delta T = T_h - T_r$ に最も影響されることがわかった。この代表例としてTable 2 (b)の試料についての結果(高橋ら, 1994b)をFig. 14に示す。 ΔT の増加に伴って η が増加することが明らかである。布地の材質によって増加率は異なる(高橋ら, 1986)がTable 2 (a)の試料についても同様の傾向を示した。

湿分移動が存在する場合、熱は伝導によるもの Q_c [W]と水分の蒸発潜熱によるエンタルピー輸送 Q_e [W]の二者によって伝えられると考えて良い。 η の大きいほど Q_e は増大し全体の伝熱量 $Q_t = Q_c + Q_e$ も増すので、 λ_e の定義式(1-1)式の Q を Q_t に置き換えると λ_e は η の増加に伴って増大することが予想される。Fig. 15はTable 2 (a)の試料に対する結果を図示(高橋ら, 1986)したもので、試料材質によって増加率が多少異なること、ばらつきが比較的大きいことなどが見られるが、先の推定を確認できたものといえる。さらに、Fig. 13に示し

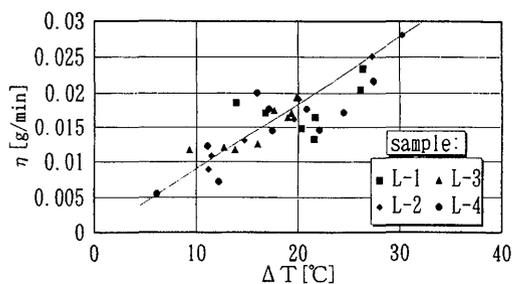


Fig. 14 η vs. ΔT diagram.

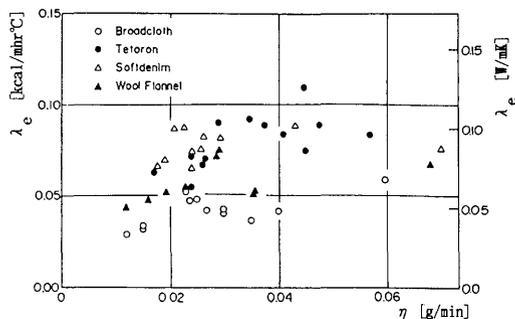


Fig. 15 Relation between λ_e and η .

たような湿分移動の有無の場合の λ_e の差 $\Delta \lambda_e$ を $\Delta \lambda_e$ と η の関係として求め(高橋ら, 1987)、 η の寄与も定量的に明らかにできた。

一方、実験の状況の判断の一つの手掛かりとして、湿分移動を伴う実験状態において、標準板の温度差から求められる通過熱量 Q と乾いた布地の熱伝導率と温度差および試料厚さから得られる伝導伝熱量 Q_c 、 η から得られるエンタルピー輸送量 Q_e をそれぞれ求め、 $(Q_c + Q_e)$ と Q との比を求めて見た。代表例(高橋ら, 1990)をFig. 16に示している。実験は定常状態で行われているので、理論的には温度差 ΔT に無関係に100になるべきである。しかしな

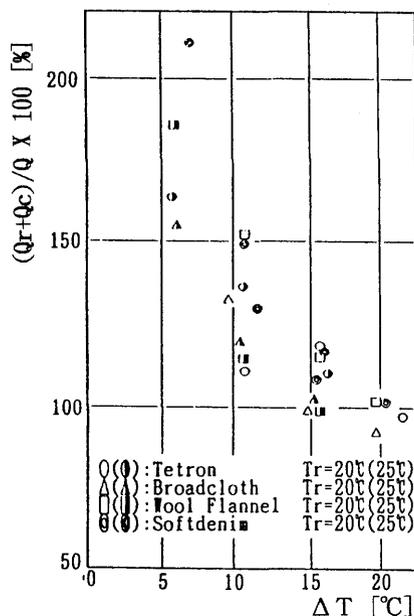


Fig. 16 $(Q_c + Q_e)/Q$ vs. ΔT diagram.

がら、この図の結果は明らかに ΔT が小さいほど1.0よりも次第に大きくなり、 $\Delta T = 5$ においては、ばらつきはあるがこの比は1.5~2.0に達している。この現象の解明は現在まだ成されておらず、発表時(高橋ら, 1990)には「実際の現象では、拡散による水蒸気がすべて繊維の空隙部を通過するのではなく、 ΔT の小さい範囲、つまり蒸発量が小さい場合には水蒸気濃度が薄く、水蒸気の透過速度が遅くなり、繊維内に水分が一旦吸収され、含有水分として存在するものと考えられる。～」のような考察を述べているが、これもまだ明快な説明とはいえない。これに伴い、厚さ方向の湿度分布を測定できれば後述の局所的な熱伝導率の変動も合わせて説明できるのではないかと考えた結果、現在の実験およびシミュレーションが始まったといえる。その点からも、この図は重要な意味を持つと考えている。

これまでの各種の実験結果の考察とあまった装

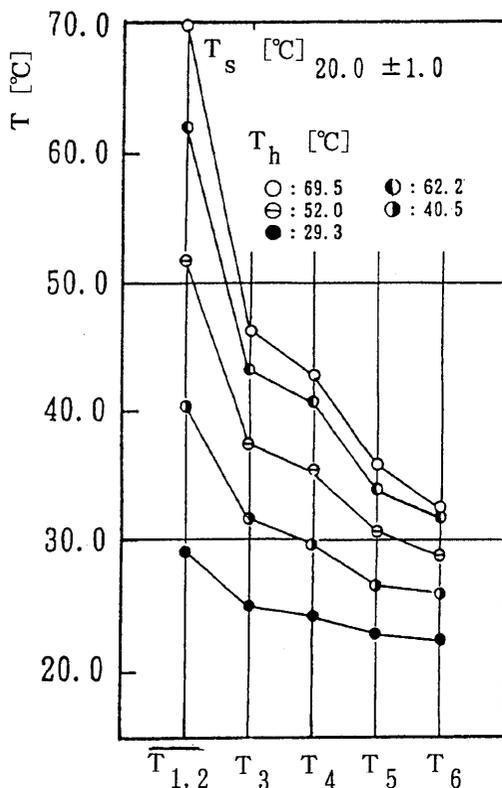


Fig. 17 Temperature distribution in the cloths.

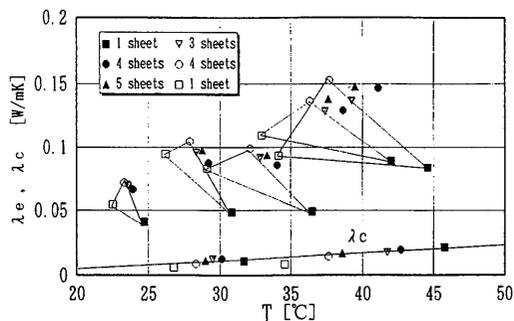


Fig. 18 Temperature dependency of λ_e of L_1 specimen.

置の改良を進めた結果、重ね合わせた試料の間に2~3本の熱電対を挿入して厚さ方向の温度分布を求めた。この代表例(高橋ら, 1994b)をFig. 17に示す。この図から、湿分移動を伴う場合の温度分布は高温部と低温部とを結んだ1本の直線にはならないことが明らかで、部分的に温度勾配の小さい箇所(すなわち、他の部分よりも熱伝導率の大きい部分)が存在することが認められる。これがFig. 8における測定点の直線上に乗らない一つの原因とも考えられる。各布地を流れる熱量は一定であるから、Fig. 17の温度勾配から局所熱伝導率を求めると、Fig. 18のようになる。やや分りにくい表現であるが、各3角形は一つの実験条件における結果を現している。これから、ここに示されたすべての温度条件で、高温側の熱伝導率が最も低く、次に、低温側の値が小さいことが認められ、中間部分はそれらよりも常に高い値を示している。この傾向は併記している乾いた状態の熱伝導率 λ_e とはまったく異なる現象であり、この図も現在の研究内容に繋がる重要な結果であると評価している。

5. 研究の現状と今後

現在もこの研究は継続され、ここで結果を上げた発表後にも国際会議を含め4回の口頭発表(高橋ら, 1995, 1996a, 1996c, 1996d)を行っている。それらをここで割愛したことは、それらの主要部(高橋ら, 1996c)(布地のモデル化とそれに基づくシミュレーション)が現在投稿中であり、まだ掲載されていないことによるところが大きい。また、局所湿度計の

導入(高橋ら, 1996d)も行われ実験も行っているが, データ数が不足で不十分であることもある。しかし, これらの内容はいずれも Fig. 17 や Fig. 18 の局所的な現象に興味を持ち, それを実験および数値シミュレーションを用いて解明しようとしていることである。このように, 今後は巨視的な有効熱伝導率を検討する目的でありながら, それを解決するためには微視的な見方も必要であることに仕事が拡大してきたものと考えて良い。しかしながら, 先にも指摘したように, これまでの多くの実験結果の中にもまだ説明のできない結果も多く, これらの解決も今後の課題として行きたいものと考えている。

6. まとめ

この文献では高橋の学位論文に書かれた内容を中心にし, さらに, 口頭発表で述べられた興味あるデータも加えて一連の研究の解説を行ったものである。この研究中で明らかにされた主な事項を列記すると以下のようである。

- (1) 布地の熱伝導率は繊維の量が少ない, 例えばガーゼのような繊維の容積比が0.2以下の布地の場合を除けば, 明らかに繊維材料の材質に依存した値を持つ。
また, 繊維の容積比の増大につれて有効熱伝導率も増加する。
- (2) 布地の有効熱伝導率の推定式は, 湿分移動が伴わない場合では, 熱伝導のみを考慮した式で推定可能のように思われるが, 現在のところ, どの材質の布地にも適用できる式は見当たらない。
- (3) 湿分移動を伴う熱移動現象は微視的に非常に複雑な現象を伴っており, 厳密にいうと, 定常状態は成立しておらず, 常に周期的な揺らぎ現象を呈しているものと思える。
- (4) 湿分移動を伴う重ね着の布地においては, 一般に温度依存性がプラスの性質を持っているにも拘らず, 部分的により低温部分で大きな熱伝導率を示すことがある。この原因はこの部分に湿り空気中の水蒸気の一部が凝縮したためとも考えられるがこの推論を確認するためには今後の継続研究が必要である。

文 献

- 川端季雄 (1984): 布の熱・水分移動特性測定装置の試作とその応用. 繊維機械学会誌, **37**, 130-141.
- 妹尾順子・米田守宏・丹羽雅子 (1985): 被服材料の熱伝導特性に関する基礎的研究 (第1報). 家政学会誌, **36**, 241-250.
- 仲 三郎・鎌田佳伸 (1973): 線熱源を利用する布の温度伝導率と熱伝導率の測定. 繊維工学, **26**, 34-42.
- 日本熱物性研究会 (1983): 熱物性資料集・断熱材編. 1-20.
- 丹羽雅子 (1994): 生活のなかの熱物性. 熱物性, **8**, 31-39.
- Pelanne, C.M. (前園明一訳) (1982): 断熱材とその熱伝導率および熱抵抗測定法. 真空理工ジャーナル, **11**, 69-79.
- 高橋カネ子・山田悦郎・藤枝アイ (1981): 各種布地の熱伝導率について. 日本熱物性シンポジウム講演論文集, no. 2, 159-162.
- 高橋カネ子・山田悦郎・藤枝アイ (1982): 布地の熱伝導率について (続報). 日本熱物性シンポジウム講演論文集, no. 3, 149-152.
- 高橋カネ子・藤枝アイ・三原孝之・山田悦郎 (1986): 湿分移動を伴う布地の有効熱伝導率. 日本熱物性シンポジウム講演論文集, no. 7, 73-76.
- 高橋カネ子・藤枝アイ・山田悦郎・佐藤利行 (1987): 湿分移動を伴う布地の有効熱伝導率. 日本熱物性シンポジウム講演論文集, no. 8, 65-68.
- 高橋カネ子・駒井弘和・山田悦郎 (1990): 湿分移動を伴う布地の有効熱伝導率. 日本熱物性シンポジウム講演論文集, no. 11, 349-352.
- 高橋カネ子・山田悦郎・藤枝アイ (1994a): 布地の有効熱伝導率. 素材物性学雑誌, **7**, 76-84.
- 高橋カネ子・菅原 勉・山田悦郎 (1994b): 湿分移動を伴う熱伝導率の評価. 日本熱物性シンポジウム講演論文集, no. 15, 339-342.
- 高橋カネ子・西原重信・山田悦郎 (1995): 布地の熱伝導率と湿分移動について. 日本熱物性シンポジウム講演論文集, no. 16, 149-152.

- 高橋カネ子・山田悦郎・太田照和 (1996a) : 湿分移動を伴う布地の熱伝導率の伝熱モデルによる考察. 日本伝熱シンポジウム講演論文集, no. 33, 171-172.
- 高橋カネ子 (1996b) : 繊維質材料の有効熱伝導率に関する研究 (学位論文). 1-182.
- Takahashi, K., Yamada, E. and Ota, T. (1996c) : Numerical Simulation on Effective Thermal Conductivities of Wet Clothing Materials. *Proc. 3rd KSME-JSME Thermal Engineering Conf.*, II 447-452.
- 高橋カネ子・西原重信・山田悦郎 (1996d) : 湿分移動を伴う布地の熱伝導率-伝熱モデルに基づく計算結果と局所測定値との比較. 日本熱物性シンポジウム講演論文集, no. 17, 147-150.
- 竹中はる子 (1961) : 繊維集合体の保温性について. 高分子, **10**, 925-930.
- 矢木 栄・国井大蔵 (1954) : 充填層の有効熱伝導率に関する研究. 化学工学, **18**, 576-585.
- 山田悦郎 (1994) : 「複合材料の熱物性値評価研究会」中間報告. 熱物性, **8**, 179-183.