

被服地の有効熱伝導率*

高橋カネ子** 山田悦郎** 藤枝アイ***

Effective Thermal Conductivity of Clothing Materials

Kaneko TAKAHASHI** Etsuro YAMADA** and Ai FUJIEDA***

Abstract

Measurements have been made by the steady state comparison method for the effective thermal conductivity of the clothing materials which consist of fibre (discontinuous phase) and air (continuous phase or matrix). The influence of factors affecting the effective thermal conductivity of clothing materials is discussed. The experimental apparatus and the test specimen are inserted into a box which is able to control the humidity or the pressure inside it.

The thermal conductivity increases slightly with temperature for any specific weight of clothing materials in the present experimental range in a similar way to that of the air, and it is also increases with the volume fraction of fibre except small that range. The effective thermal conductivity is, however, almost independent to relative humidity for cotton cloth and polyester one.

Experimental results are compared to predicting equations for the fibrous materials, and the one which has a wider range applicability has not been found from among the existing equations.

1. 緒 言

被服は、われわれの日常生活において、非常に重要な役割を果たしている。それ故、その素材である布地についても、あらゆる方面からの研究がなされているといつてよい。しかしながら、熱物性値、中でも熱伝導率に限定して考えると、被服地の主な素材である織物でも、種類が多岐多様にわたること、伝熱機構が織物の構造とも関連して複雑であること、などの理由により、これまでの多くの研究^{(1)~(5)}にもかかわらず、解明されていない点がいくつか残されている。

本報告では、以上のような立場から、衣服に使用される布地の熱伝導率を、その材質、みかけ比重量、湿度、温度などの因子を変え、定常比較法によって測定し、また、参考文献に報告されている値とも比較検討した。さらに、布地を繊維と空気との混合物であると考え、布地内の伝熱機構が熱伝導のみであると考えた既存の熱伝導率の推定式と比較し、考察を加えたものである。

記号

N_c : 布地枚数

S_c : 布地の厚さ

Y_d : 織密度

T : 温度

x_1, x_2 : (2)式の係数

y : (4)式の係数

γ_e : 大気のみかけ比重量

γ_f : 繊維のみかけ比重量

γ_e : 布地のみかけ比重量

λ_c : 大気熱伝導率

1983年7月27日受理

* 昭和56年(11月, 札幌), 57年(11月, 浜松), 日本熱物性シンポジウムにて講演

** 秋田大学鉱山学部機械工学科
Department of Mechanical Engineering, Mining
College, Akita University

*** 秋田大学教育学部家政学研究室
Department of Home Economics, The Faculty of Education, Akita University.

- λ_d : 繊維の熱伝導率
 $\lambda_d^* = \lambda_d / \lambda_c$: 繊維の無次元熱伝導率
 λ_e : 布地の有効熱伝導率
 $\lambda_e^* = \lambda_e / \lambda_c$: 布地の無次元有効熱伝導率
 λ_{ea} : 大気中の λ_e
 λ_{ev} : 真空中の λ_e
 η : (7)式で定義される熱伝導率の低下率
 ϕ : 繊維の体積率
 ψ : 大気の相対湿度

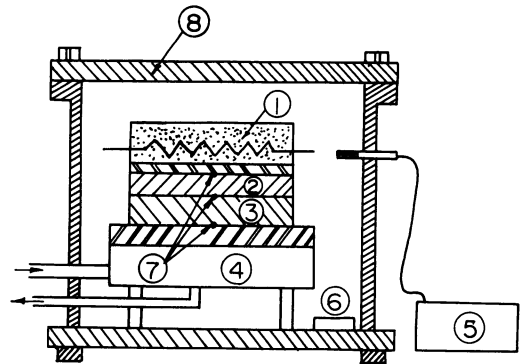
2. 実験装置, 試料および実験方法

2.1 実験装置

熱伝導率の測定には、繊維系についても多くの方法^{(2),(6),(7),(8)}があり、それぞれ特長を持っている。その中で、本報では、定常熱流を用いる平板比較法⁽⁹⁾を採用した。この方法は、定常状態に達するまで長時間を要すること、その保持が難しいことなどの欠点があるが、伝熱量の測定が不要で精度が高く、試料を平板状のまま測定でき、厚さを適切に選ぶことによって熱の流れの方向の均質さを得やすい利点がある。Fig. 1に、実験装置の概略を示す。

加熱器、試料などの測定部は、大気中の他に真空中および湿度を一定にした状態でも実験を行えるように、密閉容器内に入れられている。真空中以外の実験では、メタ・アクリル(10mm厚)の天板を用い、実験中も、中の状態を観察できる。シャーレは、水

またはシリカゲルを入れることによって、密閉容器内の湿度調節を行うためのものである。湿度計は、実験中の数値を外部で読めるように、プローブを差し込んで、測定できるものである。また、標準試料は、広さ200×200mm、厚さ20.7mmのシリコンラバー($\lambda_e = 0.203 - 0.00019T$)を用いた。



- 1: Heater 5: Hygrometer
 2: Sample Plate 6: Glass Dish
 3: Standard Plate 7: Thermocouple
 4: Cooler 8: Acrylic Plate

Fig. 1 Experimental apparatus

Table 1. Details of testing cloths.

Symbol	Name	Material	S_c mm/sheet	γ_e g/cm ³	Y_d number/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
▲	Tetron	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 100	0,541	0,191	7 × 7

2. 2 試料

布地は、材質、織物組織、などの組み合わせから、多数の種類があるが、その中から、できるだけ基礎的な測定を行うために、広く使用されている布地で、入手しやすく、他の研究者との比較ができるようなものを選んだ。

また、みかけ比重量が広い範囲にわたるように試料を集めようとしたが、限界があったので、比較のみかけ比重量の大きい布地のたて糸、またはよこ糸を等間隔に、毛抜きを用いて抜き、みかけ比重量を変える方法も用いた。ただし、布地のみかけ比重量 γ_e は次式で表される。

$$\gamma_e = \gamma_d \phi + \gamma_c (1 - \phi) \quad (1)$$

これにより、例えば、シャークスキンの布地は、 $\gamma_e = 0.548 \sim 0.428$ の範囲で、 γ_e を変えることができた。これらをまとめて、他の物性値も合せ Table 1 に示す。

2. 3 実験方法および条件

布地の厚さは、ダイヤル式の厚さ測定器⁽¹⁰⁾ (最小目盛0.01mm) により求めた。Fig. 2 にガーゼの測定例を示す。図から、1枚の厚さが最も大きい値を示し、重ね枚数が増加するほど厚さの平均値は小さくなり、一定値に漸近することが明らかである。しかしながら、真の厚さを示す1枚で、熱伝導率の測定を行うことにすると、厚さ方向の均質性が不足することによる誤差および温度測定の誤差などが増加し、測定値のばらつきが大きくなると推定されるので、本報告では、厚さの均質性が得られると考えられる布地を3~10枚重ねたものを測定試料とした。

温度測定には厚さ50 μ mのC-C箔型熱電対を用いた。この感温部は4×4mmの大きさで、試料表面を広く覆うことができるので、織目などによる不均質性の影響を少くできる特長を持つ。また、測定温度範囲は、日常の使用温度を含む約20~70℃で行った。

密閉そう内の湿度の調節方法は、次のようである。湿度を下げる場合には、既知湿度に対し、シャーレ内に入れるシリカゲルの量を加減した予備測定を行っておき、目標値に合う量を入れた。また、湿度増加の場合は、湿り空気線図を用いて大気湿度と目標湿度との絶対湿度差を求め、これとそう内の空気容積から付加すべき水分量を求めて、それをシャーレに入れた。例えば、25℃、 $\psi = 50\%$ のとき、 $\psi = 90\%$ にするには、約1.5gの水量であった。水を多く入れすぎると、露点以下になった場合、部分的に水滴ができ、誤差を生ずることになるので、水量は少なめにおさえている。さらに露の有無は、湿度計の測定値によるチェックだけでなく、アクリル天板からも観察し、露の付着のないように注意をはらった。また、水を付加した後、試料中に、湿り空気が充分行きわたるように、実験は、1日間放置した後行い、さらに、期間をおいて、同一条件で、測定し、湿度の変動のないことも確かめた。

圧力範囲はできるだけ低圧まで広い範囲にわたることが望ましいが、真空ポンプの容量から、本報告では、大気圧から10⁻¹mmHgまでの範囲に留まった。

本報告の測定値の精度は、温度測定における誤差(1.5%程度)、標準板と試料との側面からの熱損失による誤差⁽¹¹⁾ (1%以内)、試料の厚さの測定における誤差(約1%)などを考慮すると、 $\pm 4\%$ 以内と推定される。さらに、同種布地を数日後に設置しなおして測定し、再現性のチェックも行い、充分再現性の得られることを確かめた。

3. 繊維系物質に対する有効熱伝導率の推定式

布地は、連続相の母材である空気に繊維が不連続相として混入している混合物であると認識できると思われる。それ故、繊維系物質の有効熱伝導率 λ_e の推定式についても、混合物の最も素朴な合成熱抵抗

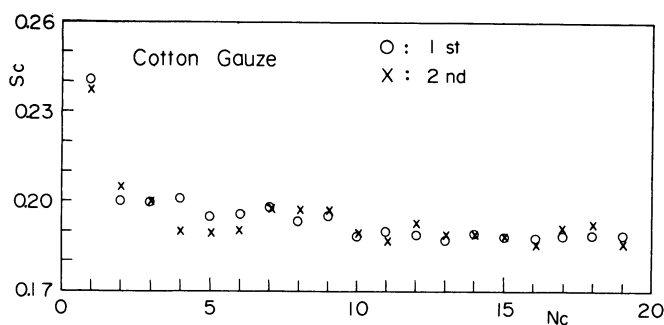


Fig. 2 Sc vs. Nc diagram of cotton gauze.

の並列あるいは直列結合を考えた式から始まったといっよい。

従来提案された多くの式を大別すると、

- (a) 熱は伝導のみで伝わるとして考えられた式
 (b) 微視的には、伝導以外の対流、放射による伝熱も考慮した式
- になる。本報告では、常温領域で実験しており、対流および放射による伝熱量は少いと考えられるので、比較的簡単な形をもつ (a) に属する式をとり上げて比較する。

Pratt⁽¹⁾は、彼のレビューにおいて、布地に対して提案された代表的な式として、次の式(2)~(4)を上げている。即ち、Schuhmesterの式は、次式のようになる。

$$\lambda_e = x_1 (\lambda_c (1 - \phi) + \lambda_d \phi) + x_2 \lambda_c \lambda_d / (\lambda_c \phi + \lambda_d (1 - \phi)) \quad (2)$$

ここで、係数 x_1 および x_2 は、 $x_1 = 1/3$, $x_2 = 2/3$ であるとしている。ただし、 λ_e , λ_c , λ_d は、それぞれ、布地の有効熱伝導率、空気熱伝導率、繊維の熱伝導率であり、 ϕ は繊維の体積率である。

Baxter は、彼の実験値をもとにして、式(2)の係数を修正し、次式を与えた。

$$x_1 = 0.21, \quad x_2 = 0.79 \quad (3)$$

また、Leesの式は次式である。

$$\lambda_e = \lambda_c^{(1-\phi)} \lambda_d^\phi \quad (4)$$

この式は、 $\gamma_e = 285 \sim 531 \text{ kg/m}^3$ の範囲で、実験値とよく合うとされている。

次に、竹中⁽¹²⁾は、繊維相互の接触を等価断面係数 y という値で評価して、

$$\lambda_e = \frac{(1-y)\lambda_d(y(\lambda_d - \lambda_c) + \lambda_c)}{(\phi - y)(y(\lambda_d - \lambda_c) + \lambda_c) + (1-\phi)\lambda_d} \quad (5)$$

を提案し、 y を λ_e の実験値から逆に求め、考察している。さらに、布地の熱伝導率を分散系混合物の式で説明出来ないかを考えるため、その代表例として、次に示す Maxwell⁽¹³⁾の式についても比較した。

$$\lambda_e^* = \frac{2 + \lambda_d^* - 2 \cdot \phi (1 - \lambda_d^*)}{2 + \lambda_d^* + \phi (1 - \lambda_d^*)} \quad (6)$$

また、仲ら⁽⁵⁾は、繊維に関係する放射伝熱を含めた条件を4個取り入れ、推定式を提案しているが、諸物性が明らかでないので、本報告では、ポリエステル曲線を引用することにとどめた。

4. 実験結果と考察

4.1 温度の影響

Fig. 3に綿布の有効熱伝導率と温度との関係を示す。材料が同じでも織物組織によって、布地の有効熱伝導率 λ_e に相違があることがわかるが、これはみかけ比重 γ_e の相違に主な原因があると考えられる。いずれの綿布の場合にも、温度依存性が小さいことが

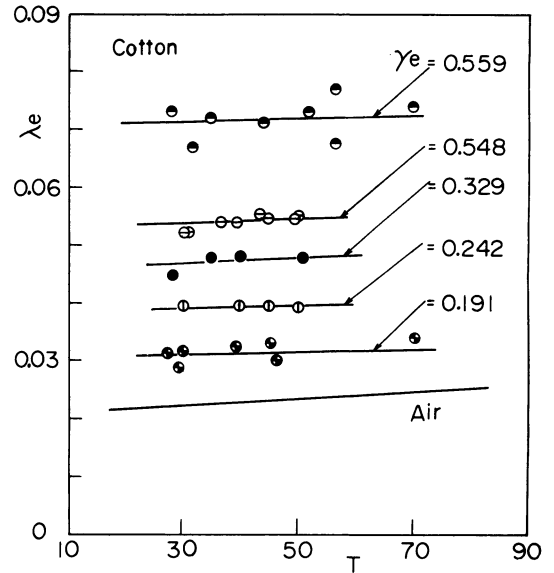


Fig. 3 Relation of λ_e and T.

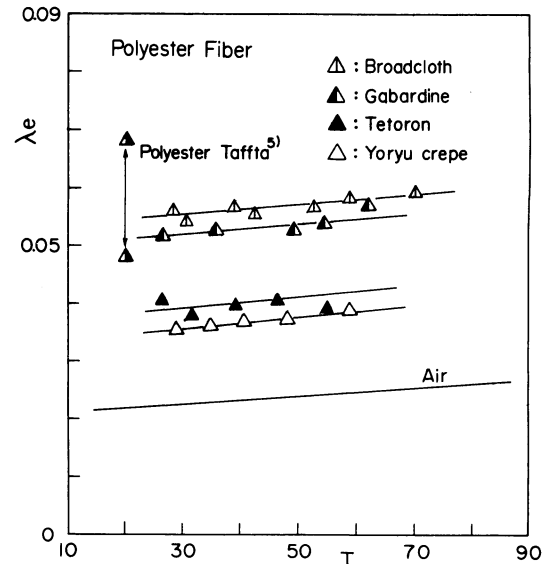


Fig. 4 λ_e vs. T diagram of polyester and polyester mix-spring cloths.

明らかである。高温領域あるいは、温度差の大きい場合には、放射および対流の影響が生じてくると考えられる⁽¹⁴⁾が、本報告の実験範囲では、熱伝導が主たる伝熱機構と考えられ、図に併せて示している空気の定性的性質と類似していることが明らかである。Fig. 4に、ポリエステル100%の2種と混紡の（ポリエステル65%・レーヨン35%）2種の結果を示す。混紡の λ_e は、いずれも、ポリエステルのみより大きい値を示し、混合している材質の熱伝導率の影響を受けていることが推定される。温度依存性は綿とほとんど同じであり、他の布地の場合も同様であった。また、仲⁽⁴⁾らによるポリエステルタフタの結果は、本実験値よりも高い値で分布しているが比重量が異なるので、後で、さらに比較する。

4.2 湿度の影響

Fig. 5に、布地の有効熱伝導率 λ_e と相対湿度 ψ との関係を示す。いずれも、 $\psi = 30 \sim 90\%$ の範囲で、ほとんど λ_e の変化がみられないことがわかる。これまで、織物を湿潤させて測定された結果は、報告されているが、湿度との関係を明らかにした例は少ない。綿の場合について、高橋⁽²⁾は、湿度を増すことにより、熱伝導率が指数関数的に増加する結果を与えているが、本報告の結果は、これとは異なる傾向である。ここで、湿り空気の熱伝導率⁽¹⁷⁾を求め示すと、図のごとくなり、相対湿度 $\psi = 20 \sim 100\%$ で、ほぼ一定であることがわかった。従って、 λ_e が湿度によって、ほとんど変化がないことは、この試料においては、妥当な結果と思われる。また、繊維の種類によって、吸湿性が異なることは知られているが、本報告の試料は、いずれも、吸湿性が少ないために、その影響があらわれなかったことも考えられ、吸湿性の大きな試料について、今後さらに、実験を行う必要がある。

4.3 空気の圧力の影響

布地を構成する連続相に相当する空気を真空ポンプにより減少させ、真空にした場合の結果をFig. 6に示す。この図には、一般の布地とは異なり、単一繊維から編まれているポリプロピレン防虫網の値も併記している。いずれも真空中の熱伝導率 λ_{ev} は空気中の値 λ_{ea} よりかなり小さい値を示している。これらの結果から、熱伝導率の減少率 η を次式で定義する。

$$\eta = (\lambda_{ea} - \lambda_{ev}) / \lambda_{ea} \quad (7)$$

図に併記している概略値から明らかなごとく、 η は布地により異なるが、これは主として糸の太さと糸の種類に伴う繊維数の相違によって生ずる現象と

思われ、繊維の容積比 ϕ 、糸の太さの小さいほど、 η は小さい値を示すことになる。このような測定により、繊維接触部および繊維近傍の空気層の熱伝導量などが推定でき、布地中の微視的伝熱機構⁽¹⁶⁾を明らかにすることが可能と考えられるが、伝熱機構の解明は、他の実験結果も併せ、次報以降で行う。

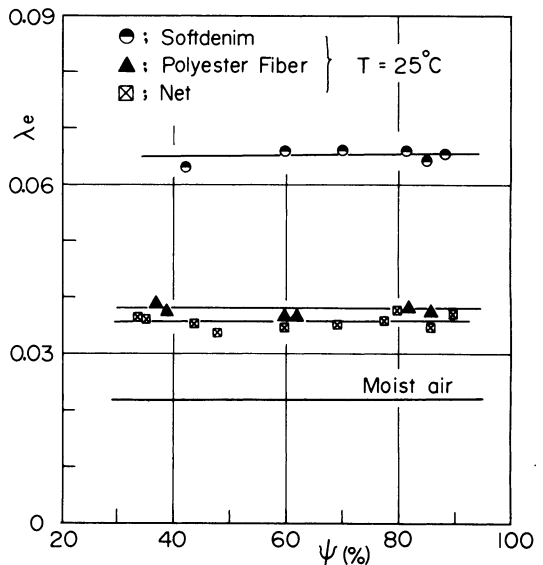


Fig. 5 Effectiveness of relative humidity.

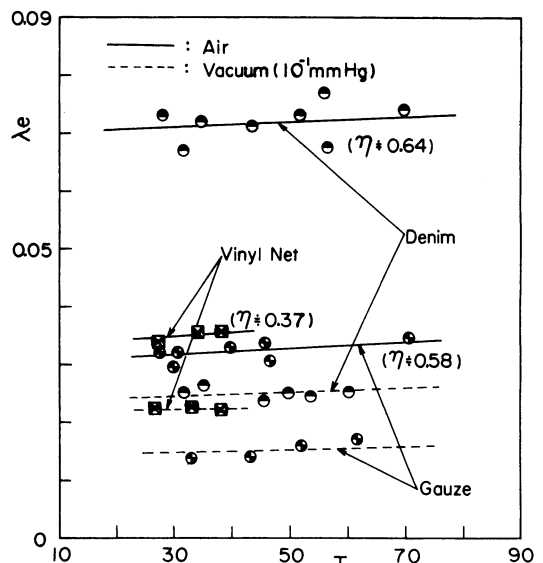


Fig. 6 λ_e and λ_{ev} vs. T diagram on cotton clothes and net.

4. 4 繊維の容積比 ϕ (みかけ比重 γ_e) と材質の影響

Fig. 3 および 4 で明らかなごとく、材質、織物構造が同じでも、布地の有効熱伝導率 λ_e が異なることがあり、この原因は、繊維の容積比 ϕ の相違によると考えられる。これまで、 ϕ (または γ_e) を広範囲に変えた実験値は、あまり見当たらないといつてよい。ポリエステル布について、仲ら⁽⁵⁾の測定が見られるが、 γ_e が比較的大きい範囲のみであり、また、竹中⁽¹⁵⁾は ϕ を変えて、多くの材質についての値を与えているが、布地の有効熱伝導率 λ_e の極小値が存在することを主に述べており、 ϕ は小さい範囲にとどまっている。しかしながら、実際の布地は、厚手のもので、 $\phi = 0.52$ 程度まで使用されているので、広い範囲にわたるデータは有益であると思われる。このような立場から、これまでの実験結果と他の研究者の布地および比較のため繊維系物質であるグラスウールの結果も合せ、Fig. 7 に示す。この三者の比較により、同一材質では、 ϕ が増大すれば、 λ_e も増加することが認められ、 ϕ が小さい領域を除くと、繊維の熱伝導率が大きい方が、 λ_e が大きく、また λ_e の増加率も大きいことがわかる。即ち、 ϕ の小さい領域を除けば、 λ_e に対して、材質の影響が存在することが明らかである。

4. 5 従来の推定式との比較

これまで求めた測定値から、無次元熱伝導率 $\lambda_e^* = \lambda_e / \lambda_c$ を求め、3 に示したような既存の推定式と比較した。Fig. 8 に、綿布の例を示す。図において、

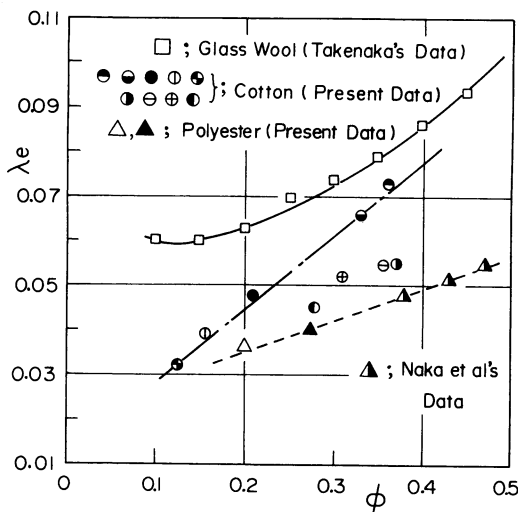


Fig. 7 Relation of λ_e and ϕ on various cloths.

$\phi = 0.30$ 附近の 4 点が、他の点より小さい値を示しているが、これは糸を引き抜いて、みかけ比重を変えた結果、織物の間げきの均質性が乱されたことにひとつの原因があると考えられる。各推定式において、勾配に相違はあるが、同一の定性的傾向を示している。しかしながら、Maxwell の式が最も低い値を示し、不連続相が接触していないと考える分散系混合物の式では、信頼性のある λ_e の評価が困難であることがわかる。竹中の式は、ここでは、 $y = 0.03$ で計算している⁽¹²⁾が、 ϕ が大になれば、繊維相互の接触量は大きくなるので、係数 y を適切に見積れば、実験値との一致は、良好となるように思われる。この図で、結果と最も近い値を示すものは、Schuhmester の式である。これらを合せて考えれば、伝導だけの式でも布地の熱伝導率が充分推定可能のように考えられる。

Fig. 9 に、ポリエステル布の場合を示す。 λ_d^* が綿布より小さいために、各式の差は少ないことが明らかである。本報告と仲らの実験結果は、ほぼ一本の曲線で示され得るが、いずれの推定式よりも、大きい値を示している。これは、ポリエステル系繊維の異方性が著しいためと思われる。従って、今後さらに、異方性を考慮した λ_d の値を用いれば、推定

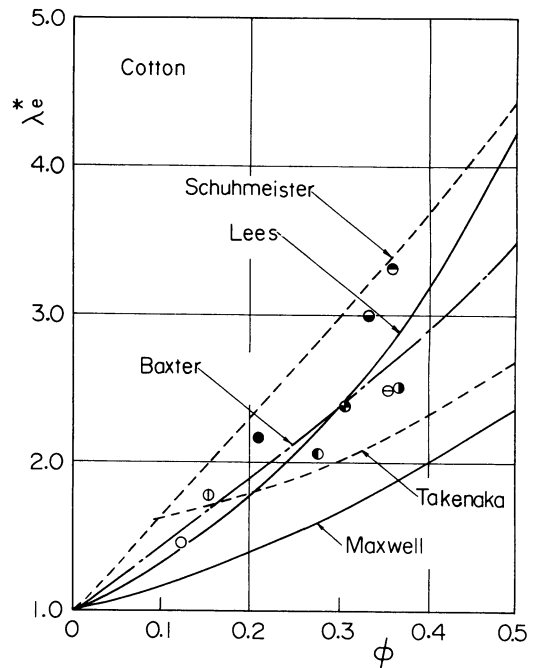


Fig. 8 Comparison of experimental data of cotton cloth with predicting values.

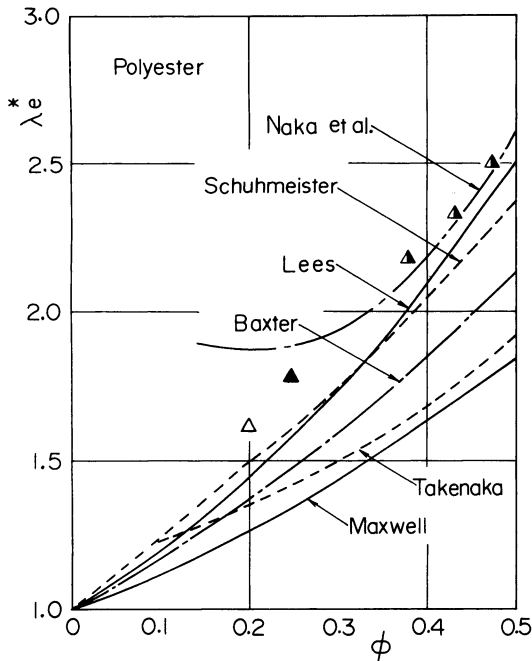


Fig. 9 Comparison of experimental data of polyester cloth with predicting values.

式による値は、実験値により近づくであろう。仲らの式は、 γ_e の比較的大きい領域で、実験値とほぼ一致しているが、 ϕ の小さい領域では相違が大きくなる。

5. 結 論

布地は、材質、織物組織などの組み合わせから、多数の種類があるが、その中から、できるだけ基礎的な測定を行うために、広く使用される布地を選び、定常比較法によって、通常用いられる温度範囲で、熱伝導率を測定することにより、以下のような結論をえた。

- (1) 綿布、ポリエステル布、混紡等の試料においては、温度依存性が小さく、空気のとほぼ同じであることが認められた。

- (2) 布地の熱伝導率 λ_e と相対湿度 ϕ との関係では、綿布、ポリエステル布で、 $\phi = 30 \sim 90\%$ の範囲で、ほとんど変化が認められなかった。

- (3) 同一材質では、繊維の容積比 ϕ が増大すれば、 λ_e も増加することが認められ、 ϕ が小さい領域を除けば、繊維の熱伝導率 λ_d が大きい方が、 λ_e が大きく、また、 λ_e の増加率も大きいことがわかった。

- (4) これまで提案された推定式との比較では、熱伝導のみを考えた推定式で、布地の熱伝導率の評価が可能である。

終りに、湿り空気の文献を御教示下さった慶応義塾大学長島教授並びに試料の一部を提供頂いたカネボウ合繊株式会社に感謝申し上げます。

文 献

- (1) Pratt, A.W, Thermal Conductivity (Tye, R. P. Ed.), 304, Academic Press.
- (2) 高橋はる子 (1954) : 日本家政学雑誌, 5—4, 432.
- (3) 竹中はる子 (1963) : 日本家政学雑誌, 14—2, 9.
- (4) 仲三郎・鎌田佳伸 (1976) : 繊維機械学会誌, 29—7, 55.
- (5) 仲三郎・鎌田佳伸 (1974) : 繊維学会誌, 30—2, 25.
- (6) 仲三郎・鎌田佳伸 (1973) : 繊維工学, 26—3, 1.
- (7) 鈴木淳・ほか (1972) : 繊維学会誌, 28—12, 481.
- (8) 竹内正顕・ほか (1981) : 第18回日本伝熱シンポジウム講演論文集, 493.
- (9) JIS A 1412.
- (10) JIS L1079
- (11) 棚沢泰 (1932) : 日本機械学会誌, 35—180, 325.
- (12) 竹中はる子 (1963) : 日本家政学雑誌, 14—2, 9.
- (13) Maxwell, J.C. (1963) : A Treatise on Electricity & Magnetism, 435, Oxford Uni. Press.
- (14) Pelanne, C. M. (1982), 真空理工ジョーナル, 11—1, 69.
- (15) 竹中はる子 (1961) : 光分子, 10, 925.
- (16) 矢木栄・国井大蔵 (1954) : 化学工学, 18—12, 578.
- (17) Dijkema, K.M. (1972) : Wärme- u Stoffübertrag. 5—1, 47.