布の熱・水分移動特性測定装置の試作とその応用

京都大学 工学部 川 端 季 雄 (会員)

Development of a Device for Measuring Heat-Moisture Transfer Properties of Apparel Fabrics.

Sueo Kawabata,

Department of Polymer Chemistry, Kyoto University, Kyoto.

Abstract

A new device has been developed to measure the heat transfer properties of apparel fabrics and is reported in this paper with some examples of an application of this device. The basic functions of this device are as follows :

- (1) Detection of the heat absorption by a fabric ; This absorption starts just after the touching of a thin copper plate containing an amount of heat on the surface of fabric. The signal of the heat flow associated with this absorption passes a low pass filter, then the peak value of the heat flow which is defined as q_{max} appears at about 0.2 sec. after the touching and recorded to evaluate the fabric properties relating with warm/cool feeling of fabric touch. The thermal conductivity and diffusivity of fabric are also measured by this transient method.
- (2) Quick measurement of the fabric thermal conductivity by a steady method ; A thin aluminium heat plate is used as one of two plates of the parallel plates method. The plate temperature is controlled precisely with the high-speed response. The plate temperature follows within 10 sec. with a stepwise command of 2°C. This quick response enables the measurement of the thermal conductivity without making any disturbance on the state of fabric such as fabric moisture-regain change during measurement.
- (3) Thermal insulation measurement by various modes ; The heat loss through fabric into the air is measured and recorded continuously. The ordinary method of the fabric thermal-insulation testing, referred to "dry method" in this paper, is completed within a few minutes by this new device. As one of the testing variation, the skin method is presented. A paper containing a lot of water is placed on the heat plate to simulate human skin and a fabric sample is put on this paper or with a moderate space of gap between a fabric and the paper.

The heat loss measurement of this system provides much information about heat-moisture transfer behavior of fabrics. For example, it is clearly shown that wool summer suitings are much cooler than polyester summer suitings. Some of these results are described in detail.

(Received April 12, 1984)

摘 要

衣料用布地の熱水分伝達特性を測定する新しい装置を開発したので、いくつかの応用を含めて報告する。この装置の基本的な機能はつぎのとおりである。

- 1) 布の熱吸収特性の測定 ; この吸収は薄い 1 枚の銅板に熱を貯え、これを布の表面に接触させることによって開始する。この吸収に伴う熱流信号をローパスフィルタに通すと熱流量にはピーク値が約 0.2 sec 後に現われる。このピーク値を q_{max} と定義し布の温冷感触感に関係する量として記録する。この過渡法を用いて布の熱伝導率、熱拡散率も測定できる。
- 2) 定常法による布の熱伝導率の高速測定 ; 平行板方式の測定を行うが、平行板の 1 枚は薄いアルミニウム板でその温度を精密に制御し、かつ高速応答性を持たせている。2°C の設定温度差を階段状に加えたときの応答は 10 sec である。この高速性は布の状態に乱れを与えることなしに熱伝導率を測定することができる。例えば布のリゲインを変化させない。
- 3) 布の保温性の各種様式による測定 ; 布からの空中への熱放散、すなわち保温性の測定において、熱損失を連続的に測定することができる。通常の保温性の測定——ここではドライ法と呼んでいる——は 2, 3 min 以内に完了できる。応用測定の一つとして、皮膚法を紹介する。水を多量に含んだ紙を熱板上に置き、模擬皮膚とする。この上に布を直接、またはいくらかのすき間を作っておき、測定する。この方法での熱損失測定から布の熱・水分伝達特性についての多くの情報を得ることができる。例えば羊毛の夏スーツ地はポリエステル地より涼しいなど明瞭に示される。このようないくつかの結果を報告する。

(昭和59年4月12日受理)

1. 緒 言

布地の熱・水分伝達特性について定常特性のみならず過渡特性も含めて測定できる測定装置を試作り、布物性に関する新しいデータを得たので報告する。筆者らはかつて布の水分移動特性を求めるために発汗シミュレータを試作²⁾し模擬皮膚から布を通しての水分の移動を観測したが、この種の方法は着衣時の皮膚から布への水分移動現象の模擬試験はできるが、精密な熱収支の観測が困難であったため、基礎的な熱・水分移動特性の研究には不向きであることもわかっていった。しかし、この種の研究は多く、代表的には Behmann の研究³⁾ほか⁴⁻⁷⁾があり、この方法は上記のように水分移動を中心に各種測定ができる利点がある⁴⁻⁷⁾。その後、布の風合いの研究の一部として布の手触り時の冷温感に関わる熱物性を測定した⁸⁾。すなわち、一定の熱量をもつ銅板の片面を布地に接触させ、その直後の短時間内に生じる銅板からの布地への熱移動を測定し、熱流量ピーク値 $q_{\max}$ を測定する計測装置を開発し⁹⁾、また $q_{\max}$ が皮膚の冷温感に関係する物理量であることの理論的解析を行っている¹⁰⁻¹⁴⁾。

上述の各報告において指摘してきたように、この装置は単に $q_{\max}$ 測定にとどまらず、高速応答性のゆえに保温性、熱伝導率などの高速測定に有用なことがわかり⁹⁾、ここ数年来改良を加え、改めて総合的な熱物性測定装置に完成した¹⁾。測定の原理は $q_{\max}$ の測定を除けば普通の熱物性測定原理に従っている。ただし前述した速応性は熱・水分同時移動、水を含む布の熱伝導率、熱拡散率、水を含む布の保温性能など、実際の衣服用布地として重要な各種の熱的性能を測定できる。以下に示すように新しい測定法を含む広い応用が可能になった。

2. 測定量と装置

2.1 測定される量

本測定装置における測定量としては基本的には下記の4つである。

- 1) 冷温感に関する測定値 $q_{\max}$ の測定
- 2) 熱伝導率 k の測定
 - (a) 定常熱移動法、(b) 過渡熱移動法
- 3) 熱拡散率 κ の測定
- 4) 保温性

前述したように、測定原理は $q_{\max}$ の測定を除けば基本的な物理測定法に忠実に添わせるようにし、速応性の向上を重点にして例えば水を含んだような実

際的な状態での布の熱物性の測定を可能にした。

2.2 測定装置

測定には図1、図4、図5に示す3つの要素を使い分ける。図1は“T-Box”と呼んでいる要素で、

Fig. 1 T-Box used for $q_{\max}$ measurement and the other thermal properties related with transient heat flow.

Fig. 2 Transient response of the pt. temperature sensor to measure the copper plate temperature of T-Box at the back side of the plate.

図中に示すように断熱材上に装着された 3×3 cm 寸法、質量 9.79 g (熱容量が単位面積あたり $4.186 \times 10^3 \text{ JK}^{-1}\text{m}^{-2}$) の銅板に熱を貯えてこれを試料表面と接触させ、熱の試料への流出に伴う銅板の温度変化を裏面で検出し、流出熱量に換算する。温度センサには線径が約 20μ の白金細線からなる温度ゲージ (寸法は図2、共和電業製) を用いた。銅板温度を測定する応答性を計算してみると図2のように約 0.02 sec の時定数を持つ1次要素応答に近似できる。銅板表面と裏面の測定差が生じたときの均一化時間も前報⁹⁾のように 0.05 sec のオーダーである。こ

の速応性は主に $q_{\max}$ の測定に必要となる。この要素は $q_{\max}$ 測定のほか過渡法による熱伝導率、熱拡散率の測定にも用いる。主に短時間測定なので断熱材を通しての熱のもれ に対するガードは設けていない。銅板表面は白色つや消しクロム メッキ処理をした。

T-Box による $q_{\max}$ 測定の原理についてはすでに報告^{8,10,11)}しているなのでそれぞれを要約すると、温度 T_1 に制御した後述する BT-Box の熱板上に、T-Box 銅板をのせて熱を吸収させたあと、温度 T_2 ($T_2 < T_1$, $T_1 - T_2 = \Delta T$) の試料の表面に接触させる。その直後から生じる T-Box 銅板から試料への熱移動量 q (単位, W, 以下熱流量と呼ぶ) を銅板温度 T を微分して時間の関数として測定する。この T の信号を皮膚表層部での熱伝導遅れ時間を模擬した時定数 0.2 sec の一次比例要素ローパスフィルタに通過させると q は図 3 のようにピーク値を明瞭に生じ、ピーク値を $q_{\max}$ と定義して冷温感に関係する測度とする。試料の裏面は $q_{\max}$ のみの測定に関しては定温に保つよりも断熱 (例えば発泡スチロール板上に試料を置く) にするほうが冷温感との対応が良い。このフィルタの時定数は皮膚の内部へ熱が流入し神経末端に達するまでの時間遅れにほぼ相似させた値である¹¹⁾ (Appendix A 参照)。また $q(t)$ を対数にプロットするとほぼ直線的な降下曲線が保たれるが Appendix B に示すようにこの傾斜からも過渡法による熱伝導率が測定でき、また熱拡散率も測定できる¹⁰⁾。

図 4 は “BT-Box” と呼ぶ温度を制御した熱板を持つ要素で熱板は薄いプリント加熱体を裏面に密着させた 5×5 cm 面積で厚み 1 mm のアルミニウム板で、その温度は 0.1°C 以下の誤差で制御されており、断熱材をはさんで熱ガードで囲まれている。断熱材を通しての熱の漏れは、空気と熱板との温度差 10°C においてガード板温度を熱板のそれより 0.2°C 高めた温度差を設けることにより誤差範囲内で無視できる。この設定温度差は空気-熱板温度差と比例する。この要素は定常熱伝導測定に用いるが、前述のように $q_{\max}$ 測定時に T-Box に供給する熱源としても用いる。アルミ熱板の表面は つや消しの黒色アルマイト加工処理をしている。

図 5 は “Water Box” と呼ぶ定温銅板で、内部に定温 (室温を使う) の水を流して熱容量を無限大にしてある。定常熱伝導試験では試料をこの Water Box 上に置き、BT-Box の熱板を試料の上面に接触させ、BT-Box から試料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、または積分回路

Fig. 3 Examples of $q_{\max}$ measurement using several fabrics. The peak value of $q(t)$ appears after the $q(t)$ passes a first order low pass filter. $q(t)$ is measured by differentiating the temperature of the copper plate. The higher $q_{\max}$ value corresponds the cool feeling and the lower warm feeling.

Fig. 4 BT-Box. The temperature of the heat plate is precisely controlled by thin “print” heaters put on the back side of the aluminum plate of 1 mm thickness.

Fig. 5 Water Box which acts as an infinite heat-capacity plate to keep a constant temperature.

により平均電力を測定することにより計測する。熱板と Water Box 温度差を $\Delta T(^{\circ}\text{C})$ 、熱流量を $q(W)$ として熱板の面積 $A(\text{m}^2)$ 、試料厚み $H(\text{m})$ とすると熱伝導率 k (ただし布表面の接触熱抵抗効果も含めた見掛けの値) は

$$k = \frac{qH}{A\Delta T} (\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}) \dots\dots\dots (1)$$

測定時の試料加圧力は可変にできるが、標準には 6 g/cm^2 を用いている。図 6(a)に定常法による熱伝導率測定法を示す。

この BT-Box と同形で熱板面積の異なるもの、すなわち、 $10 \times 10\text{ cm}$ から $33.3 \times 33.3\text{ cm}$ ($=1\,000\text{ cm}^2$) まで数種を試作した。ただしこれらの熱板の表面は標準的な放熱器用黒色アルマイト処理をし、表面放射率は0.9以上とされている。図 6(b)に示す

Fig. 6 (a) Measurement of k (thermal conductivity) and (b) thermal insulation of fabric. The BT-Box is placed in a wind tunnel and wind is controlled by a fan with a speed controlled servomotor.

ように $10 \times 10\text{ cm}$ を標準要素としてこれら大型の BT-Box は布の保温性測定に用いる。標準要素で毛布までのすべての厚みの布についての計測ができるが、防寒布のようなさらに厚手のものには大型寸法の要素を用いる。

保温性測定は図 6(b)のように試料を BT-Box 熱板上に置き、空気と接触させ、熱板からの電力損失を測定することにより行う。回転速度を精密に制御したファン モータにより試料にあたる風速を制御し、各種の条件下での測定を可能にしている。

BT-Box はいずれの型も熱板温度の応答性はほぼ同じでいずれも早く、階段状の温度設定変更に対する熱板温度の追従特性を図 7 に示す。 1°C の変化に対して約 10 sec 以内に追従する。この高速性は測定を迅速化させるのみならず、後述するように応用測定のパラメータを定める。図 8 は図 6(a)の方法による

Fig. 7 Transient response at stepwise temperature command changes of the heat plate of BT-Box.

Fig. 8 Heat flow through fabric sample after the heat plate of BT-Box is placed on a fabric specimen for k measurement. The k can be measured within 15 sec .

熱伝導率の測定における応答の早さを2種の布地（用いた試料は表3参照）について示しているが約10 secで平衡に達している。保温性測定において、被測定試料の寸法を測定有効面積より大きくとって試料の周囲部分をガード上に載せているJIS法やASTM法と異なり、この方法では試料面積はBT-Boxの熱板面積と等しくし、同一寸法をとっている。そして試料端は熱板面より少し盛上がついている周囲の断熱材に囲まれ熱の端面よりのもれを防いでいる。これは速応性を保つためのほか、例えば温度の階段状変化に対する応答などの動的測定をしやすいためである。なお、上記三者のデータの比較は後述する。

図9に全体のシステムをブロック図によって示している。BT-Boxの消費電力は電流と電圧の瞬時値をアナログ掛算機で乗算して電力を求め、瞬時値を連続的に記録できるようにしているので動的な観測がしやすい。“Integrator”は1 min または3 min間の平均値を与える。数時間の測定中の掛算回路のドリフトは有効数字4桁の読取値に影響しない。掛算の精度は有効数字3桁である。

3. 実験

3.1 実験1. 高速応答性能を利用した定常法による熱伝導率測定

Appendix B に示したように T-Box を用いての過渡法による熱伝導率測定は迅速熱伝導率測定に用

い約10～15 secで測定できるので（熱拡散率も計測できる）応用が広い。しかしこの過渡法による熱伝導率の測定はデータ処理がやや複雑で、このため精度の点でBT-Boxを用いる定常法には及ばない。現状では過渡法では有効数字2桁の信頼性とどまるが、定常法では3桁の精度が得られる。

BT-Boxを用いた定常法による熱伝導率 k の測定においてもBT-Boxの熱板の応答が早いので普通約30 sec以内に測定が完了する。したがって、この場合も例えば布が水を含んだ状態で熱伝導率が計測できる。この方式ではさらに試料を金属板で両面をすべてはさむため水分の蒸発が遅く、水分を含む布の熱伝導率の測定には高い精度を持つ。表1に異なる湿度条件下に調湿した布地を $\Delta T=10^\circ\text{C}$ の条件で定常状態での熱流量 q とそれから(1)式で求めた熱伝導率 k を示している。測定中の約10～20 sec内の布地の水分率変化は少なく水分率(リゲイン)の測定誤差範囲内であった。同一条件での繰返し測定では有効数字3桁目が ± 2 程度変化するが、これは通常の室内での測定であるため、調湿試料の取扱い中のリゲイン変化など同一測定条件を作る困難さに原因するものと思われる。

布の熱伝導率 k は測定時の布に与える圧力 6 g/cm^2 の下での布厚みを用いた。測定時の接触圧力によって厚みも変化するし、さらにその厚みでの布の熱抵抗も変化するので一般に k は接触圧力の関数となる。本装置では上述の圧力を標準としているがもちろん可変にできる。

Fig. 9 Block diagram of electronics system and data processing of Thermolabo II which is the name of the device reported in this paper.

Table 1 Thermal Conductivity of a Cotton Fabric* as Function of Regain

Conditioning	Regain (%)	q, obs. (W/m ² K)	q, cal. (W/m ² K)	Thick. (mm)	k, obs. (W/m.K)	k, cal. (W/m.K)
Wet	64.8	2.51×10^2	2.56×10^2	0.435	10.9×10^{-2}	11.13×10^{-2}
90%RH	9.82	1.49	1.33	0.415	6.18	5.52
50	6.22	1.21	1.25	0.401	4.86	5.03
10	1.51	1.13	1.14	0.451	5.09	5.14
0	0	1.11 (estimated)				

k (Water) : 60.4×10^{-2} W/m.K, ρ_{FIBER} : 1.54g/cm³ * Sample #4
k (Fiber) : 46.1×10^{-2}

水分を含む布の熱抵抗に関して確かな理論がなく、結果の分析はむずかしいが次式によって実験と比較した。布が含む水は繊維または繊維の表面に含まれるものとし、遊離水分は考えてない。また熱の伝導にかかわる繊維集合構造は布が水を含むことによって変らないものとする。いま布の k_f は繊維の熱伝導率 k_f と布の構造との関数であり、ここで次式のように k_f と布構造による関数 f との分離形を仮定する。

$$k = k_f \cdot f(\text{structure parameters}) \dots \dots \dots (2)$$

繊維が水を含むことによって繊維の熱伝導率は乾燥状態の値 $k_{f\text{dry}}$ に水の熱伝導率 k_w がリゲイン R (%) に伴う水の体積分率の重みで加算されるものと仮定すると、 ρ_f , ρ_w をそれぞれ乾燥繊維と水の密度として

$$k_f = k_{f\text{dry}} + k_w \frac{\rho_f}{\rho_w} \cdot \frac{R}{100} \dots \dots \dots (3)$$

結局、水を含む布の単位時間、単位面積、単位温度差あたりの熱流量 $q^{(2)}$ は(2), (3)式より

$$q = q_{\text{dry}} \left(1 + \frac{\rho_f}{\rho_w} \cdot \frac{k_w}{k_{f\text{dry}}} \cdot \frac{R}{100} \right),$$

$$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1} \dots \dots \dots (4)$$

ここで q_{dry} は乾燥状態での布の q 値である。リゲイン R を変化させた綿布について表1に示すように実験値 q_{obs} と計算値 q_{cal} はほぼ一致した結果が得られている。

3.2 実験2. 皮膚モデルを用いた保温性

基本的には図6(b)に示した方法によるが 10×10 cm型またはそれ以上の寸法の BT-Box を用いてつぎの方式により保温性を調べることができる。図10に示すように、1) 熱板上に試料を置き、空气中で放熱(ドライ法)、2) 試料布と熱板に間隙を設け、熱板上には模擬皮膚として水を多量に含んだ汚紙を置き人体皮膚の代用をさせる(皮膚間隙法)^{1,15)}、3) 同じく水を含んだ汚紙の上に直接試料布を置く(皮膚法)、4) 熱板の上に浅い銅板製の水槽を置き水

Fig.10 Four methods of heat insulation measurement 1) dry method 2) skin/space method where a filter paper containing enough water is placed on a heat plate to simulate human skin. A sample is placed on the paper with 7 mm space. 3) skin method. A sample is placed on the paper containing water directly. 4) water/space method.

を入れたあとその上に間隙を設けて布を置く(水/間隙法)。特に2), 3), 4)の方法は水分と熱の同時移動に関係する現象を観測することができる。3)と4)は類似の結果を与えるが3)の方が使いやすい。4)は長時間測定用に向く。これらは現実の衣服着用時の衣服性能の研究に重要である。図11は水分を含めた汚紙(乾燥時 9 mg/cm^2 、水を含むと 28 mg/cm^2)を熱板上に置き、無風の空中への熱放散をみたもので約30分平衡状態を保つ。この期間中、含水汚紙が皮膚代用となり上記2), 3)の方法による測定を実施できる。

実験例を図12に示す。夏スーツ地で重量がほぼ等しいポリエステル織布(PE)、羊毛織布(WOOL)、両者混紡糸織布(W/PE)を用い(表2参照)、上記1)~3)の方法による布を通しての熱通過量、

Fig.11 The paper containing water gives 30 min equilibrium evaporation process and then starts drying out. During this 30 min, the methods 2) and 3) of Fig. 10 are carried out. No wind condition.

Fig.12 Wool (TA), W/PE blend (TC) and PE (TE) summer suitings are tested their heat insulation properties under no-wind (2 cm/sec air vel. of vertical flow) and wind (16 cm/sec air vel. of vertical flow) conditions. A significant result is that Wool is cool by method (2) but warm by (3).

すなわち熱流量 q を、無風状態と風速 16 cm/sec の垂直降下微風吹付け時のそれぞれについて示している。わかった事実は、無風、微風下いずれにおいても 3 種の織布の結果はドライ法 1) ではほとんど差なく、皮膚/間隙法 2) では羊毛織布が熱放散が大きい。しかし、皮膚密着法 3) では羊毛織布が断熱性を示す。いくつかの布について 3 種の比較をして

Fig.13 Comparison of heat insulation between C ; cotton fabric (#4) and W; wool fabric (TA). See Table 3 for details of the fabrics.

みても、同様の傾向が認められた。この結果をみると羊毛布地は夏服としての涼しさとともに強い発汗時で汗が布に直接触れる場合には断熱性を示すことがわかる。登山服などに用いられる理由の一つにこの性能が関係しているように思われる。

湿度の高い空気中での測定でも、ドライ法はほとんど影響なく、2), 3) 法では水の蒸発にともなう熱移動が低下するので q 値は下がる。しかし傾向は図12と同じであった。ポリエステル織布は羊毛に

Table 2 Samples

Symbol	Fibre	Structure	Weight (g/m ²)	Thickness* (mm)	Colour	Use
TA	Wool	Plain	183.3	0.410	White	Summer Suiting
TC	W/PE	Plain	186.4	0.375	White	Summer Suiting
TE	PET	Plain	189.9	0.395	White	Summer Suiting
#23	Wool	2/2 Twill	301.4	1.543	Black	Jacket
#4	Cotton	2/1 Twill	187.5	0.510	White	Working Wear
A	PET	Plain	84.1	0.159	Blue	Blouse
B	Silk	Plain	79.1	0.333	White	Blouse
C	Polyester	Knitted	108.4	0.452	Gray	Blouse
D	Wool	Twill	147.0	1.050	Dark Blue	Winter Suiting
E	Wool	Twill	148.3	1.240	Gray	Winter Suiting
SA	Wool	2/2 Twill	243.8	0.591	White	Winter Suiting
SE	PET	2/2 Twill	252.7	0.466	White	Winter Suiting

*Thickness at 6g/cm² pressure. The thickness of samples A~E are the values at the pressure of 0.5g/cm².

比較するとやはり暑いという経験的事実を証明している。図13は綿織布(C)と羊毛織布(W)の比較で、風速下では方法3)で綿布は強い放熱性を示す。図14は各種の重量の異なる布について布重量に対する q を1), 2)の両者について比較している。方法2)における羊毛織布の涼しさは明瞭にわかる。この傾斜からみてポリエステル織布は同じ“涼しさ”を持たせるために布重量で羊毛織布より120 g/m²の重量分だけ軽くせざるを得ない(重量で1/2~2/3)ことがわかる。

Fig.14 Relation between thermal insulation properties of different fabric weight. Note that dry method does not give any significant difference between these fabrics but method 2) gives “Wool is cool” result summer suit.

Fig.15 Relative humidity (dotted line) in the space between fabric and simulated skin of method 2) where the space of 10 mm is taken in this testing. Note the % RH in the case of PE is high. On the other hand, wool gives dry climate.

図15は図13に用いた羊毛織布とポリエステル布のそれぞれについて方法2)における布と含水汚紙間の空間の湿度と q を同時記録したもので、ポリエステル織布の場合の湿度は無風時70~80% RHに達する。微風時でも顕著には下がらない。

3.3 実験3. 風速の影響

図16は試料布に垂直に吹き付ける風速が1)~3)の方法で熱流量 q に及ぼす影響を示す。図のように影響は大きく、たとえ微風でもこの種の実験での空気状態の制御の大切さを示している。

空中への定常放熱において放熱流量 q をつぎのよ

Fig.16 The heat loss from the heat plate of BT-Box (10×10 cm) as function of vertical wind velocity. The velocity is measured at 17 cm distance upper from fabric surface.

うに加算してみる。

$$q = q_{\text{conv}} + q_{\text{eva}} + q_{\text{rad}} \dots\dots\dots (5)$$

q_{conv} ; 空気対流による対流伝熱, (ニュートン冷却則)

q_{eva} ; 布に含まれる水分の気化に伴う放熱

q_{rad} ; 輻射伝熱

ここで q_{rad} は、輻射率係数; F_E , 形状ファクタ; F_G , ステファン・ボルツマン定数 σ ($=5.669 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$), 周囲物体温度 T_2 , 輻射にかかる布の表面付近温度 T_1 として単位面積あたり¹⁵⁾

$$q_{\text{rad}} = F_G F_E \sigma (T_1^4 - T_2^4) \text{ W m}^{-2}$$

ドライ方法では無風時、布の q は $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ においてほぼ 100 W m^{-2} である。このうち輻射伝熱を T_1 = 布の下面温度 35°C , T_2 = 周囲温度 25°C として計算すると 63 W m^{-2} , q の約1/2を占めるが、 T_1 として表面付近の温度をとるべきであろうから、 q_{rad} はこの値よりかなり低下すると思われる。

q_{eva} について、布から気化する水の質量を m , 水の気化熱を C_e とすれば、

$$q_{\text{eva}} = C_e \frac{dm}{dt} \dots\dots\dots (6)$$

で求まるが、 m は温度など空気条件によって決まり、かつ(5)式の3つの伝達機構が相互に影響しあう。こうした機構の研究にも皮膚/間隙方法や皮膚方法の風速を変化させて行う実験が有用である。

Fig.17 The heat loss from the fabric containing water consists of the heat transfer by convection radiation and water evaporation. Δ symbol is the $q(t)$ calculated from the drying rate of fabric (cotton #4) by the sum of q_0 and q_{eva} .

図17は高湿度下で調湿した布からの放熱を無風下で方法1)により測定した例で、時刻 t とともに平衡値 q_0 に減少していく。点線は布の含有水分質量の減少分でこれより q_{eva} を計算して、これを q_0 に加えると、ほぼ観測される q と一致する。この事実は比較的単純な重ね合わせで q_{eva} が算定されることを示しているが、同時に水分移動のような min オードの過渡現象も q 測定における本装置の応答性からみて過渡現象の測定も可能になる例を示している。風速を変えて乾燥速度の測定を行いつつ q の測定を行うことにより、(5)式の内容の検討を行うことが可能である。

3.4 実験4. q_{max} と冷温感

T-Box を用いて行う過渡現象測定によって得られる q_{max} と皮膚内部での熱移動現象との関係についてはすでに報告している¹¹⁾。ここでは測定例および q_{max} と人間の冷温感識別能力との関係を実験した結果を示すにとどめる。表3に q_{max} と冷温感識別の関係を示す。

標準状態 20°C , 65% RH の室内で行った実験で、DC は13人の学生(女子大学生)が一对の、例えばAとBの布地に手に触れAがBより冷感が強いと判別した人数の%を示している。 q_{max} の測定における繰返し測定での再現性は有効数字2桁が合致、3桁目がばらつくが、判別力に比して、十分な精度であることを示している。

表2に以上の実験で用いた主な布試料をまとめて示している。

4. 考 察

Table 4 Rate of Heat Loss Through Fabric Reduced to $\Delta T=1^\circ\text{C}$, $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$

System	ASTM	JIS	THERMOLABO II *	
Wind Cond.	—	—	No Wind**	Light Wind***
Blank Test	10.13	18.21	9.6	16.5
	10.13	18.05	9.7	
	9.87			
Wool Blanket	4.60	6.73	5.8	7.2
	4.53	5.82	5.6	
Wool Suiting	7.67	14.03	8.9	12.9
	7.73	14.29	8.6	
	7.73			
Georgette, PET	8.60	16.12	8.7	13.9
	8.73	16.79	8.7	
	8.60			
Averaging	2hr	30min	1min	
Sample Size (Effective)	30cm SQ. (15cmSQ)	50cmSQ (25cmSQ)	10cmSQ (10cmSQ)	
ΔT	15°C	$11-14^\circ\text{C}$	10°C	
Room Temp.	$20-24^\circ\text{C}$	$21-22^\circ\text{C}$	26°C	
	—	65-67%	65%	

*The System Presented Here. **Air Vel.: 2cm/sec, ***10cm/sec

保温性試験に関してすでに JIS 法, ASTM 法などの方法があり本装置のドライ法¹⁾もこれらと原理的には変わらないが, 表 4 に同じ布を用いてこれらの方法と比較した結果を示す. ASTM 法はクラレ, JIS 法は化繊検査協会において測定していただいたデータである. 本装置の結果と ASTM 法はほぼ一致している. JIS 法は本装置の微風時のデータと一致し無風時とは差があるが, JIS 法での測定時の空気状態による差ではないかと想像される.すでに指摘したように空気の流れはこの種の測定には大きな影響を与えるので試験環境の厳密さ, 特に風速の管理が重要であろう.

本装置による保温性測定は迅速であり, 通常のスーツ用布地では約 1 min で平衡に達し, 2 min 程度以内で測定できるが, 積分方式を用いても 1 ~ 3 min で完了する. ただし平衡に達する時間の長い場合はその平衡時間まで待たねばならないが, 過程は

q のアナログ出力を記録すればよく, 逆にこの過程を利用して図 17 で示したような放湿または吸湿過程の研究も可能になる.

また模擬皮膚の上にア ندا ウェア布地を置くことによって着用時の条件に相似させることができる. この方法の利点は常に熱収支が正確に測定されるところにあり, かつて筆者らが行った強制的に水を布地に供給する模擬皮膚による発汗シミュレーション方法ではこの正確さの実現には困難がともなった. 本装置はこの点で単純さと正確さが特徴である.

熱伝導率の測定では布の厚みは接触圧によって変化するので測定には接触圧力が変化できるよう特別な装置を加えた. しかし, BT-Box の自重による圧力 6 gf/cm^2 が恐らく最低荷重として適切のように思われる.

5. 結 論

布の冷温感の検出のために開発した測定装置を改良し, 熱伝導率測定, 保温性測定などの測定を各種条件下で正確かつ迅速に行えるようにした. また, 装置の熱的応答性の速さを生かして各種の応用測定が可能であることを示した. この装置は衣服材料としての布地の熱物性を, それも布が含む水分との関係の下で測定できるので今後の衣服の熱・水分移動特性に伴う快適性の研究に有力な手段を与えるものと思う.

以上の研究は第 33 回日本繊維機械学会年次大会

Table 3 Relation Between $q_{\max}$ and Warm/Cool Feeling

Sample	$q_{\max}$ ($\times 10^3\text{ W/m}^2$)	$\log q_{\max}$	D.C. (%)
A	2.72	3.435	92.3
B	2.05	3.312	92.3
C	1.63	3.213	92.3
D	1.21	3.084	92.3
E	0.96	2.983	76.9

D.C.: Percentage of Significant Discrimination of 13 Judges.

(昭和55年6月)および第12回同学会繊維工学討論会(昭和58年8月)において発表し、また一部は布の品質客観評価に関する第2回目豪シンポジウム(昭和58年10月、於メルボルン)において発表した¹⁶⁾。

謝 辞

本研究は長い期間にわたり多くの方々の援助を受けた。まず実験を手伝っていただき、討論をいただいた奈良女子大学丹羽雅子教授ならびに同研究室の方々、特に、日開晶子氏、坂口晴子氏には直接の実験の援助をいただき、坂口氏には原稿の整理も手伝っていただいた。装置の開発には加藤鉄工株式会社(京都)の援助をいただき、装置の製作をしていただいた。また保温性試験の比較試験にはクラレ山口氏ならびに日本化学繊維検査協会にお世話になった。これらの方々に深甚な謝意を表したい。

注

本論文では q は熱流量として一般に用いており、この q はT-Boxにおける q とは関係がない。

文 献

- 1) 川端;第12回繊維工学討論会論文集,日本繊維機械学会(1983)
- 2) 川端,丹羽;繊維学会秋期研究発表会(1967)
- 3) Behmann. F. W.; J. Text. Inst., **51**, T1494 (1960)
- 4) Galbraith, R. L., Werden. J. E., Fahnestock. M. K., Prioe. B; Text. Res. J., **32**, 236 (1962)
- 5) Werden. J. E., Fahnestock. M. K., Galbraith. R. L., Text. Res. J., **29**, 640 (1959)
- 6) Goldmann. R. F.; Text. Res. J., **33**, 764 (1963)
- 7) Mecheels. J. H., Demeler. R. M., Kachel. E., Text. Res. J., **36**, 375 (1966)
- 8) 川端,赤木;繊維機械学会論文集, **30**, T13 (1977)
- 9) 川端;第33回繊維機械学会年次大会講演要旨集(1980)
- 10) 米田,川端;繊維機械学会論文集, **34**, T183 (1981)
- 11) 米田,川端;繊維機械学会論文集, **34**, T199 (1981)
- 12) 米田,川端;繊維機械学会論文集, **34**, T249 (1981)
- 13) S. Kawabata and M. Yoneda; The 2nd Japan Symposium on Thermophysical Properties, p. 155 (1981)
- 14) M. Yoneda and S. Kawabata; Objective Specification of Fabric Quality, Mechanical Properties and Performance, Edited by S. Kawabata et al., p. 393, The Textile Machinery Society of Japan (1982)
- 15) J. P. Holman "Heat Transfer" McGraw Hill Kogakusha, Tokyo, 1976
- 16) S. Kawabata; "Objective Evaluation of Apparel fabric" Edit. Postle et al, p. 15, The Text. Mach. Soc. Japan (1984).

Appendix A. $q_{\max}$ と布の熱物性の関係¹⁰⁾

単位面積あたりのT-Box熱板の熱容量(装置定

数)を $4.186 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \text{ m}^{-2}$, フィルタ時定数0.2 sec, 熱板と試料との温度差 $\Delta T = 10^\circ \text{C}$ のとき, 近似的に

$$q_{\max} \doteq A\lambda$$

$$A \doteq 4.81 \times 10^4 (\text{J m}^{-2} \text{sec}^{-1/2})$$

ここで λ は試料の熱伝導に関与する熱特性値とつぎの関係を持つ。

$$\lambda = \sqrt{\rho C k} / \alpha_0 (\text{sec}^{-1/2})$$

$$\rho ; \text{密度} (\text{kg m}^{-3})$$

$$C ; \text{比熱} (\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1})$$

$$k ; \text{熱伝導率} (\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1})$$

$$\alpha_0 ; \text{装置定数. T-Box の熱源板の単位面積あたりの熱容量} (\text{J K}^{-1} \text{m}^{-2}) \text{ で本装置では} 4.186 \times 10^3 (\text{J K}^{-1} \text{m}^{-2}) \text{ をとっている。}$$

しかし, 上式の関係はあくまで均質体での関係で, 布のように表面形状の複雑な場合にはこの式は無力になるので $q_{\max}$ の計測が必要になる。しかし $q_{\max}$ の物理的性格を上式が示している。

T-Boxを用いての過渡法による熱伝導率・熱拡散率の測定法についてはAppendix Bを参照。

Appendix B. T-Box による熱拡散率, 熱伝導率の求め方

1. 断熱測定

温度 T_2 の試料を断熱板上にのせ, 表面に温度 T_1 ($T_1 - T_2 = \Delta T$) のT-Box銅板を接触させると, 長時間後(約5~10 sec)の銅板温度 T_c はほぼ平衡値 T_c に達する。この T_c は

$$T_c = T_2 + \frac{a\Delta T}{a+1} \dots\dots\dots (A-1)$$

ただし, a ; 銅板と試料の熱容量比で, 銅板, 試料の比熱をおのおの C_0, C , 密度を ρ_0, ρ , 厚さを d_0, d とすると,

$$a = \frac{C_0 \rho_0 d_0}{C \rho d} \dots\dots\dots (A-2)$$

本装置では銅板の単位面積あたりの熱容量 $\alpha_0 = C_0 \rho_0 d_0 = 0.418 \text{ J m}^{-2} \text{K}^{-1}$ 。したがってこの実験から試料の熱容量 $C \rho d$ が求まる。厚み d , 比重 ρ を別に計測すると比熱 C が求まる。

2. 定温測定

温度 T_2 の試料を一定温度 T_2 の台上(Water Boxを用いる)にのせ, 上面に温度 T_1 ($T_1 - T_2 = \Delta T$) のT-Box銅板を接触させる。銅板から試料への熱流量 $q(t)$ は, 理論解の第1次近似をとると

$$q(t) = Q_0 \frac{C_0}{\tau} e^{-t/\tau} \dots\dots\dots (A-3)$$

Q_0 ; T-Box 銅板の初期熱量

$$C_0 ; = \frac{2}{\beta \cot \beta + (1+a^{-1})} \dots\dots (A-4)$$

β ; a の関数で, $\cot \beta = a\beta$ の解の正根列
の第 1 番目の解. 表 A-1 を参照.

Table A-1

a	$\frac{1}{\beta^2}$	a	$\frac{1}{\beta^2}$
0.5	0.862	6	6.337
1	1.351	7	7.336
2	2.343	8	8.336
3	3.340	9	9.336
4	4.339	10	10.336
5	5.338	>10	$a+0.336$

$$\tau ; = \frac{1}{l\beta^2} \dots\dots\dots (A-5)$$

試料の熱拡散率 (Thermal diffusivity) を κ とすると

$$\kappa = l^2 \dots\dots\dots (A-6)$$

(A-3)式からわかるように $\log q(t)$ は時刻 t 対

し直線となり, その傾斜が τ を与える. 一方, 実験的に図 3(b)のように $\log q(t)-t$ 曲線の傾斜より τ を求めることができる. a はすでに求まっているので表 A-1 よりその a に対応する β^2 を求める. (A-5)式よりこれら τ と β^2 より l が決まる. したがって (A-6)式より κ が求まる. さらに試料の比熱 C は断熱実験から求まっており, 密度 ρ , 厚さ d もわかっているので熱伝導率 k も

$$k = \kappa \rho C \dots\dots\dots (A-7)$$

により求まる.

断熱測定において T_0 が断熱板のリーク熱流のため求めにくい場合は一般に時間に対して一定のリーク熱量を打消す工夫か, もしくはリーク除去を記録図上で工夫しなければならない. なお, 定温実験で, 簡易的に熱伝導率 k は銅板の単位面積あたりの熱容量 α_0 を用いて,

$$k = \frac{\alpha_0 d}{\tau} \dots\dots\dots (A-8)$$

から求まるが, 測定値に数%の誤差が予想される.