

素材布の熱・水分移動特性と運動時 体温調節反応の対応性

大阪信愛女学院 上田博之
短期大学

(共同研究者) 金沢大学 松平光男

The Relationship Between Heat and Moisture Transport Properties of Fabrics and Thermoregulatory Responses during Exercise

by

Hiroyuki Ueda
Osaka Shin-Ai College
Mitsuo Matsudaira
Kanazawa University

ABSTRACT

The purpose of this study was to examine whether or not heat and moisture transport properties of fabrics correspond to thermoregulatory responses during exercise in men wearing suits made of fabrics. Four kinds of fabrics [cotton (C), cotton/polyester (CP), wool (W), rubberized fabric (R)] were chosen and measured their properties. The air permeability, heat conductance and thermal insulation were affected by the moisture content in the fabrics and the extent was different between each fabric.

Experimental suits with similar thermal resistance of clothing were made by using the fabrics mentioned above. Four men wearing each of them ran on a treadmill at 3 different intensities. Significant differences were observed for the local sweating rate and skin temperature ($R > C$ $CP > W$), although the extent was different by the

exercise intensity. Those differences may be the result of the air permeability of the fabrics.

要 旨

本研究では、素材布の熱的性質と発汗をともなう運動時の体温調節反応の対応性について検討するため、まず便宜上選ばれた綿、綿/ポリエステル、ウール、ゴム引きによる素材布の標準状態と含水状態における通気性、熱コンダクタンスおよび保温性を測定した。ついで、これらの素材布を用いて、クロー値が近似するようにトレーニングウェアを作成し、これらを着用させて3種の運動強度条件下で各体温調節反応について調査した。

各素材布の通気抵抗、熱コンダクタンス、保温性は含水量の増加に影響されるが、その程度は素材布間で異なった。運動強度や部位により異なったが、局所発汗量や皮膚温には衣服条件による差異が認められ、これらの差異は主として素材布の通気抵抗の差と対応することが認められた。

1. 目 的

近年、スポーツの専門化・一般化が進む中、さまざまなニーズにあわせた各種スポーツウェアの素材や型の開発・改良が進んでいる。その際、開発・改善された布自体が備える通気性・透湿性・保温性などの熱的性質は、開発の段階で標準状態で詳細に検討されている¹⁻⁴⁾。しかし、たとえば、布の熱的性質の代表的な指標である保温性²⁾をと

りあげてみても、その測定方法・条件が数多く考えられ、どの測定方法・条件がヒトの実際における運動時の体温調節反応によく対応するかについては明らかではない。一方、局所発汗量、皮膚温、皮膚血流量などを指標として、ヒトの運動時体温調節反応は着衣とその熱的性質に基づく衣服内気候に、刻々影響されることが明らかにされつつある^{5,6)}。

そこで、本研究では、人体の放熱機転からみて重要である発汗をともなう運動時の衣服の熱移動特性に着目し、各種条件下で測定した素材布の熱物性値と運動時の体温調節反応の対応性について検討した。すなわち、まず、4種の素材布を便宜的に選び(1)各素材布の熱伝導率、通気性、保温性を標準および含水状態で測定し、ついで(2)これらの素材布を用いてクロー値が近似するように、作成されたトレーニングウェア着用時の体温調節反応を調査し、(1)と(2)の測定値をもとに、布の各物性と運動時の体温調節反応の対応性を定性的に考察した。

2. 方 法

2.1 用いた素材布の熱的性質

本実験において、便宜上4種(綿、綿とポリエステルの混紡、ウール、ゴム引き布)の素材布を選び(表1)、それらについて以下の熱的性質を検

表1 Outlines of fabrics

	Fabrics	Thickness (mm)*	Weight (g/m ²)
C	Cotton 100%	0.740	249
CP	Cotton 50%・Polyester 50%	0.722	277
W	Wool 100%	0.584	202
R	Rubberized fabric	0.159	177

*Thickness at 6gf/cm²

討した。

本報告では素材布ごとに通気性、熱コンダクタンス、および保温性について、布が液状水分で飽和した状態から標準状態に至る乾燥過程において、各物性値の測定をおのおの $20 \pm 0.3^\circ\text{C}$ 、 $65 \pm 3\% \text{RH}$ の実験室内で以下の手順で行った。

まず、試料布を十分に浸漬した後、ろ紙で水分を軽く取り除いた。そして、すばやく直示天秤で重量を測定し、各素材布の含水量を求め、その直後に以下の各物性値を測定した。その後、同じ試料の含水量が減少していく過程の中で、同様の測定をくり返し行った。すなわち、異なる含水率において各試料の物性値を測定した。

通気性は通気抵抗を通気度試験機（カトーテック(株)製、KES-F8-AP1)³⁾、有効熱伝導率および保温性を Thermo Labo II²⁾（カトーテック(株)製）を用いておのおの測定した。布の有効熱伝導率から熱伝達に関する量として、熱コンダクタンス (C) を次式の関係により算出した。熱容量を無限大にした定温銅板と温度制御した熱板 (BT-Box と呼ぶ) との間に試料布をはさみ、BT-Box 中の加熱体への供給電力の測定により布への熱流量を求めた。

$$C = k/L$$

$$k = H \cdot L / (A/\Delta T)$$

ただし、 k (J/s/m/k) は布の表面の接触抵抗の影響を含めた見かけの熱伝導率、 L (m) は布の厚み、 H (J/s) は熱流量、 A (m²) は BT-Box の面積、 ΔT は定温熱板と BT-Box との温度差である。本装置では、試料を金属板で両面からはさむために水分の蒸発が遅く、熱板の応答性が早いので、布組織の内部に水分を含む布の熱伝導率の比較も可能である²⁾と考えた。

保温性は、BT-Box 上に試料布を置き、空気と接触させ BT-Box 中からの電力損失を測定することにより求めた。この場合、発汗前後の乾燥した皮膚と湿った皮膚をモデル化した4種の測

定²⁾を行った。

2.2 着用実験

衣服条件：上記4種の素材布（綿、綿/ポリエステル、ウール、ゴム引き布、以降、C、CP、W、Rとする）から作成した長袖、長ズボンの同型トレーニングウェアを各被験者に着用させた。なお、いずれの場合も発汗による皮膚と実験着の密着の程度をできるだけ同一にするために上下肌着 (0.26 clo, 綿 100%)、さらにショーツ、ソックスと運動靴を着用させた。

被験者：身長 170.8 ± 1.5 cm、体重 57.2 ± 5.7 kg の健康な男子大学生4名を対象とした。

環境温湿度条件および運動負荷：夏季（8月）に 20°C 、 $65\% \text{RH}$ に設定した人工気象室内で実験を行った。各被験者に対し、3種の運動強度 (100、130 および 150 m/min) でトレッドミルによる各40分間の走行を実施させた。

実験手順：上下肌着を着用した被験者は、 25°C 、 $65\% \text{RH}$ の前室で椅座安静状態を30分間保持した後、実験室に入室して各種装置を装着および実験着を着用した。その後、10分間の安静状態を保持し、各スピードによる各40分間の走行を実施し、この間に各種測定を行った。各被験者は4種の着衣条件と3種の運動条件の組合せにより、日をかえて12回の実験に参加したが、運動負荷や衣服条件の順序はランダムとした。

測定項目：運動開始から終了まで、胸部、背部、大腿部および上腕部の局所発汗量を、運動強度 100 m/min の場合は10分ごと、130 および 150 m/min の場合は5分ごとに、カプセルろ紙法で測定した。さらに、心拍数、直腸温、局所発汗量測定用カプセルに隣接した部位の皮膚温と、同部位の肌着と実験着の間の衣服内温湿度を5分ごとに測定した。また、実験前後の体重減少量から総汗量を推定した。

統計処理：得られた結果は平均値±標準偏差で表示し、衣服条件の差異を各運動強度ごとに分散

分析により検定した。なお、有意水準は $P < 0.05$ で設定した。

3. 結果

3.1 熱物性値の測定

3.1.1 通気抵抗

ゴム引き (R) の通気抵抗は極端に大きく、本実験に用いた試験機の許容範囲外で測定することができなかったため、ここでは、他の3種の通気抵抗を示す。標準状態では、綿 (C)、綿/ポリエステル (CP)、ウール (W) の平均値はおおの 0.218, 0.155, 0.108 ($\text{kPa} \cdot \text{s}/\text{m}^2$) となり、C, CP, W の順に大きかった ($P < 0.01$)。乾燥過程において測定した含水率と通気抵抗との関係 (図1) から、いずれの素材も含水量が標準状態より増加すると通気抵抗は減少し、さらに含水量が増加して C で $40 \text{ mg}/\text{cm}^2$ 、CP や W で $30 \text{ mg}/\text{cm}^2$ 程度以上になると通気抵抗は増加することがわかれた。通気抵抗は、含水量 $0 \sim 45 \text{ mg}/\text{cm}^2$ の範囲では C, CP, W の順に大きく、それ以上の含水量の場合、CP と W の差異はきわめて小さくなった。

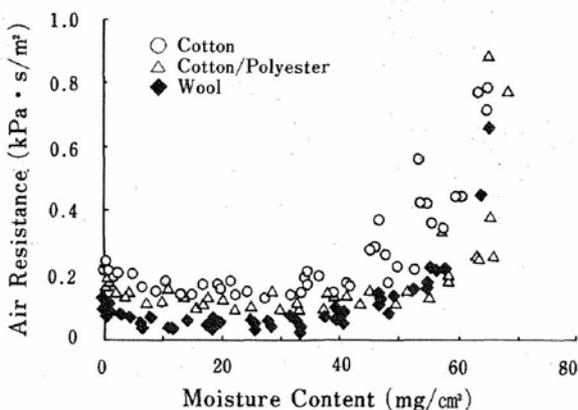


図1 Relationship between air Resistance and moisture content of fabrics made from cotton, cotton/polyester, and wool

3.1.2 熱コンダクタンス

標準状態における熱コンダクタンスは C, CP, W, R がおおの 88.35, 88.31, 64.42, 396.02 ($\text{J}/\text{s}/\text{m}^2/\text{K}$) であり、R が他より高く ($P < 0.01$),

W が他より小さかった ($P < 0.01$)。乾燥過程における含水量と熱移動量から求めた熱コンダクタンスとの関係をみれば、R の場合には測定中の水分量変化の誤差が大きく、再現性に欠くと考えられたため、測定から除外した。再現性を欠く原因としては、R の場合には液状水分が布の表面に付着し、それが熱板に付着するためであると考えられる。C, CP, W における水分量と熱コンダクタンスの関係を図2に示す。含水量が $0 \sim 25 \text{ mg}/\text{cm}^2$ の範囲では W の熱コンダクタンスが CP および C より小さく、 $25 \sim 50 \text{ mg}/\text{cm}^2$ では W および C が CP より小さくなり、さらに含水量が増えた場合には $\text{CP} > \text{W} > \text{C}$ となった。

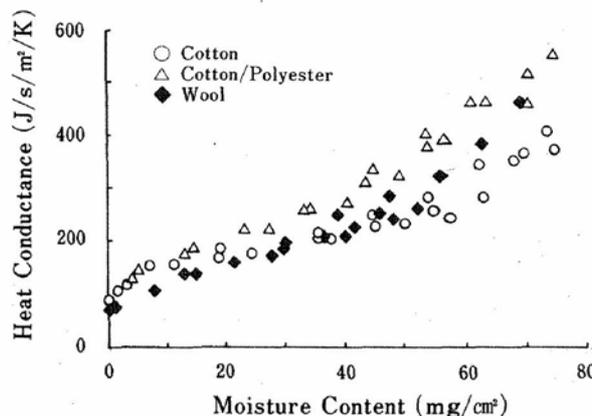


図2 Relationship between heat conductance and moisture content of fabrics made from cotton, cotton/polyester, and wool

3.1.3 保温性

標準状態において、乾いた皮膚と布とが密着した場合を想定した DRY CONTACT 法、乾いた皮膚と布の間に空気層の存在を想定した DRY SPACE 法、発汗した皮膚と布とが密着した場合を想定した WET CONTACT 法、および発汗した皮膚と布の間に空気層の存在を想定した WET SPACE 法での測定による熱損失から算出した保温性を表2に示す。したがって、含水状態での保温性の測定は WET CONTACT および WET SPACE 法で測定した。

標準状態における保温性をみれば、DRY CON-

表2 Mean value for thermal insulation(%) of the fabrics in standard state

	C	CP	W	R
Dry contact	28.7	21.3	16.3	10.6
Dry space	54.5	51.2	50.0	54.5
Wet contact	36.5	37.5	30.8	77.3
Wet space	62.5	60.9	61.5	82.3

C : Cotton CP : Cotton/Polyester W : Wool
R : Rubberized fabric

TACT 法では, C>CP>W>R の傾向であったが, DRY SPACE 法では4種の間には顕著な差は認められなかった. WET SPACE 法ではC, CP, W に差はほとんどみられず, R がこれらより高い保温性を示し, WET CONTACT 法では他の3種に比べてR が著しく高く, W は低い傾向を示した.

R の含水状態での保温性は, 上記3.1.2と同様に再現性がないと考えられるため, 測定から除外した. WET CONTACT および WET SPACE 法のいずれの方法で測定した場合にも, 含水量の増加にともない各素材の熱損失量は増加したが, その程度は測定法で異なった. 含水量に関係なく, WET SPACE 法では, 3種の素材間で保温性における差はきわめて小さかった. また, WET CONTACT 法では, 含水量が増えるとW の熱損失が, C および CP より小さい傾向を示した(図3).

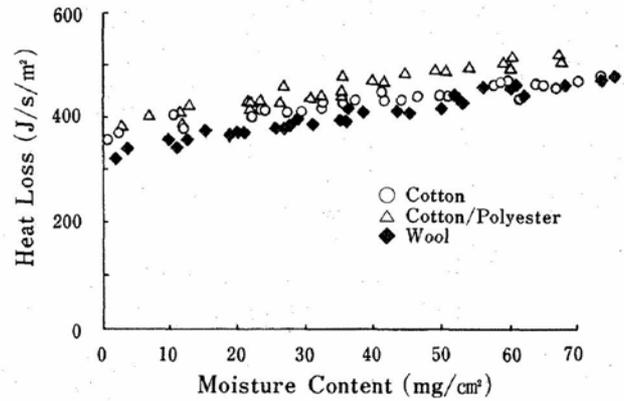


図3 Relationship between thermal insulation and moisture content of fabrics made from cotton, cotton/polyester, and wool

3.2 着用実験

100, 130 および 150 m/min の3種の運動強度を設定したが, 130 m/min の場合に測定項目のいくつかにおいて, 衣服条件間に差異が認められ, 他の強度の場合にはほとんど認められなかった. そのため, 130 m/min の場合についての結果を以下に示した.

表3に運動中の平均心拍数, 運動終了時の直腸温と総汗量をおのおの平均値と標準偏差で示した. 平均心拍数や直腸温は, いずれの衣服条件下においても, 運動強度の増大につれて有意に増加した(P<0.05)が, それらの増加には, 衣服条件間で有意な差は認められなかった. 総汗量も同様に, 運動強度の増加にともない多くなった(P<0.05)が, 100 および 150 m/min の運動条件で

表3 Mean heart rate, rectal temperature and total sweat rate during exercise (130m/min)

	C	CP	W	R
Heart rate (bt/min)	132±11	123±11	127±6	131±13
Rectal temperature (°C)	37.6±0.5	37.6±0.6	37.5±0.5	37.6±0.4
Total sweat rate (g/m²/h)	709±274	573±126*	516±173*	712±394

C : Cotton CP : Cotton/Polyester W : Wool R : Rubberized fabric ; Values are mean ±S.D.

*Significantly lower than C and R(P<0.05)

Rectal temperature were measured at the end of exercise

は、衣服条件間に差は認められなかった。しかし、130 m/min 時に CP および W の総汗量が、C および R に比して少なかった ($P < 0.05$)。

局所発汗量の経時的变化をみれば、運動開始から 20 分頃まで一般に急激に増加し、その後の変化は小さかった。そのため、本研究では便宜上、

表 4 Physiological responses during exercise (130m/min)

	C	CP	W	R
Local sweat rate (mg/cm ² /min)				
Chest (fh)	0.33±0.06	0.28±0.06	0.25±0.11	0.31±0.14
(lh)	0.75±0.09	0.70±0.13	0.52±0.13*	0.75±0.15
Back (fh)	0.44±0.17	0.33±0.07	0.34±0.13	0.35±0.18
(lh)	0.90±0.16	0.79±0.12	0.71±0.18	0.92±0.22
Thigh (fh)	0.13±0.03	0.10±0.04	0.13±0.06	0.09±0.05
(lh)	0.28±0.07	0.28±0.09	0.26±0.09	0.26±0.09
Arm (fh)	0.25±0.12	0.14±0.04	0.16±0.07	0.19±0.11
(lh)	0.54±0.43	0.43±0.06	0.37±0.07**	0.55±0.22
Skin temperature (°C)				
Chest (fh)	34.0±1.0	33.8±1.2	34.0±1.3	34.4±0.8
(lh)	34.2±1.2	34.0±1.5	34.4±1.0	34.8±0.7
Back (fh)	34.1±0.6	33.6±0.5	33.6±0.2	33.6±0.3
(lh)	34.4±1.0	33.9±0.8	33.9±0.2	34.6±0.6
Thigh (fh)	33.0±0.9	33.1±0.6	32.9±1.2	32.5±0.7
(lh)	34.3±0.9	34.2±0.8	34.3±1.1	34.3±0.7
Arm (fh)	34.1±1.2	33.5±1.2	33.0±1.3	33.3±1.6
(lh)	35.0±0.8	35.0±0.6	34.1±0.7*	35.1±0.6
Temperature of clothing microclimate (°C)				
Chest (fh)	28.2±0.3	28.3±0.9	27.2±0.4***	29.0±0.8
(lh)	28.3±0.7	28.7±1.4	27.4±0.8***	30.1±0.9
Back (fh)	27.8±0.4	27.8±0.7	27.8±1.3	28.6±0.5
(lh)	27.6±0.6***	28.4±0.8***	28.7±1.3	30.3±0.8
Thigh (fh)	27.1±1.7	27.6±1.2	28.0±1.6	27.9±1.2
(lh)	27.9±2.0***	28.1±0.9***	29.0±2.0	30.1±1.1
Arm (fh)	28.8±1.4	28.1±1.8	27.9±1.1	29.1±1.4
(lh)	29.5±1.7	28.8±1.0	28.5±1.3***	30.9±1.6
Absolute humidity of clothing microclimate (g/m ³)				
Chest (fh)	15.2±1.4***	15.1±1.4***	13.8±1.7***	20.1±2.9
(lh)	20.3±1.8***	18.3±4.4***	17.9±1.5***	27.1±1.7
Back (fh)	14.1±1.5***	13.6±1.0***	14.4±2.4***	19.1±3.4
(lh)	18.7±2.2***	16.7±4.5***	19.0±3.4***	27.4±1.9
Thigh (fh)	10.3±0.8***	10.1±0.6***	10.4±1.6***	16.9±3.4
(lh)	14.3±0.9***	13.5±4.3***	14.3±3.0***	26.6±2.8
Arm (fh)	14.2±1.5***	13.7±1.9***	13.0±1.8***	20.0±3.7
(lh)	20.6±2.0***	16.9±4.0***	17.6±1.5***	27.3±2.5

C : Cotton CP : Cotton/Polyester W : Wool R : Rubberized fabric Values are Mean ± S.D. in the first half(fh) or the latter half(lh) of the exercise. *Significantly lower than C, CP and R value ; **Significantly lower than C and R value ; ***Significantly lower than R value($P < 0.05$)

運動開始から 20 分後までと 20 分以降に区分し、衣服条件の影響を検討した (表 4)。100 および 150 m/min 時の局所発汗量には、運動前半および後半、また、いずれの部位においても衣服条件による有意差はみられなかった。しかし、130 m/min の場合、前半では差を認め難かったが、後半では、胸部で W が他の 3 種より有意に少なく、上腕部では W が C や R に比べて低値を示した ($P < 0.05$)。

130 m/min 時の皮膚温は、後半において、上腕部で W が他の 3 種より低値を示した ($P < 0.05$)。130 m/min 時の衣服内温度は、前半において、胸部で R が W より高値を、後半において、胸部と上腕部で R が W より高値を、背部と大腿部で R が C、CP より高値をそれぞれ示した ($P < 0.05$)。130 m/min 時の衣服内湿度は、前・後半いずれの場合にも、R が他の 3 種より有意に高かった ($P < 0.05$)。

4. 考 察

本実験で用いた R は、間隙がきわめて少なく、通気抵抗が極端に大きかったと考えられる。W、C、CP のいずれも標準状態から含水量が増加するに従って、通気抵抗がいったん減少したことは、水分による糸の表面状態の変化などによる気孔率の減少によると推察される。そして、さらに含水量が増加すると、通気抵抗は指数関数的に増加した。しかし、C や CP では、W に比して厚くて密度が大きいために、標準状態では通気抵抗が大きく、含水量が増加すると、綿の膨潤も相まって直通気孔が小さくなったために、通気抵抗は $C > CP > W$ の順となったと考えられる。

一般に、熱伝導率は含気量に大きく影響され、含水率が大きくなると熱伝導率が大きくなる⁷⁾ために、熱コンダクタンスも大きくなる。本実験で含気率は測定しなかったが、密度の小さい W が、C や CP に比して含気率が高いために、標準状態

では W の熱コンダクタンスが小さかったと推察される。いずれの素材も含水量の増加により、熱コンダクタンスは大きくなったが、その程度は、C で W や CP に比して小さかった。これらの差異の原因としては、表面がはっ水性である W や、疎水性のポリエステルを混用する CP では、含水量の増大が主として繊維間における液状水分の蓄積であったために、熱伝導率がより高くなったことが推察される。

WET SPACE 法では極端に透湿性、通気性が低く、蒸発による放熱を極端に抑制する R が、標準状態において高い保温性のあることを認めることにとどまり、含水状態では素材間の差を認め得なかった。これらは、布と熱板間に存在する空気層の対流効果が大きかったためと推定される。CONTACT 法の場合に、含水量の増加にともなう熱損失量の増加の程度が、W で小さくなったことは、厚さ、密度および表面状態が素材間で異なり、W で蒸発による放熱に不利であったためと推測される。

一方、上記のように 130 m/min 時でさえも、着衣実験では心拍数や直腸温からみた生体負担度には、衣服条件による影響が認められなかったが、発汗量や皮膚温には衣服条件間に差が認められた。これら衣服条件による発汗量にみられる影響は、部位や運動強度により異なったが、発汗量は W で最も小さく、R で大きい傾向がみられた。また、これらの差異は、発汗量がほぼ定常状態に至る運動開始 20 分以降に顕著に認められる傾向であった。このような運動前半より後半において差異が一般に顕著であることは、衣服素材が液状水分を含んだ場合の熱的物性の差が影響したものと推察される。

130 m/min 時の総発汗量は、衣服条件によって 500 ~ 700 g/m²/h であり、これらの量が全身皮膚面から同速度で発汗されたと仮定すれば、50 ~ 70 mg/cm²/h となる。しかし、本実験では実

験着の下に吸水性の高い綿の肌着を着用したため、実験着への液状水分の移動は、発汗量の部位差をみこんでもこれらより少ないと推定し、標準状態から含水量が 45 mg/cm^2 以下の熱物性値を用いて、上記発汗量における結果についてさらに考察を試みた。

標準状態における通気抵抗および熱コンダクタンスは R で最も大きく、W で最も小さく、保温性は DRY SPACE 法の場合にはほとんど差異は認められなかった。また、 45 mg/cm^2 以下の含水状態における通気抵抗は $C > CP > W$ 、熱コンダクタンスおよび保温性は、W で最も小さいことが認められた。すなわち、標準状態から含水量が増加するに従って、熱放散が W で促進されるという点で一致したのは通気性であった。2枚の重ね着の水分伝達実験⁹⁾では、内側の布からの気化が、皮膚からの熱損失を大きくすることが推測されている。この推定にたてば、通気抵抗の小さい W では透湿性が大きくなると考えられるため、肌着での気化を主とした熱放散が、他の素材の場合よりも促進されたと推定される。

これらのことは、発汗量が W で少ない部位の衣服内温度は W で低く、R で高いこと、また衣服内湿度が発汗開始当初より R で高いことなどからも裏付けられると考えられる。しかし、熱伝達に関する量である熱コンダクタンスや保温性についての結果が着用実験の結果と相反することからすれば、着用実験の結果には通気性が大きく関与したと推定される。すなわち、運動時の体温調節反応には、素材布のもつ通気性が熱コンダクタンスや保温性に比べてより影響することが示唆された。

以上のように、本実験で取り上げた素材布で

は、生体反応への影響と通気性間に定性的な一致がみられた。しかし、素材開発においては、運動時の生体反応への影響からみた定量的総合指標が必要であると考えられ、今後、素材の水分移動も含めた熱移動量の容易な測定方法・条件の構築、および運動強度や生体反応の部位的特性などを考慮したうえで、生体反応に影響を及ぼす素材の熱的物性の関連について、検討を重ねなければならないと考えられる。

5. 結 語

保温性が近似するように製作したスポーツウェアの素材布の熱物性値測定と着用試験を行い、それらの対応性を考察した。衣服の諸性能の影響が運動時の発汗量などに認められ、体温調節反応には、素材布の保温性や熱コンダクタンスに比べて通気性がより影響することが推察された。

文 献

- 1) 米田守宏ほか；過渡的熱伝導の解析とその応用，繊維機械学会論文集，34，T 183 (1981)
- 2) 川端季雄；布の熱・水分移動特性測定装置の試作とその応用，繊維機械学会論文集，37，T 130 (1984)
- 3) 川端季雄；通気性測定装置の開発とその応用，繊維機械学会論文集，40，T 59 (1987)
- 4) 松平光男；絹織物の伝熱特性と保温性，家政誌，29，987-994 (1988)
- 5) 松下健二ほか；スポーツ時の衣服条件が体温調節に及ぼす影響に関する基礎的研究，デサントスポーツ科学，3，249-254 (1982)
- 6) 荒木 勉ほか；運動への適応に及ぼす着衣の影響，日本衣服学会誌，28，29-35 (1985)
- 7) 妹尾順子ほか；被服材料の熱伝導特性に関する基礎的研究(第2報)，家政誌，36，251-260 (1985)
- 8) 鈴木 淳；親・疎水性からなる重ね布の水分伝達に関する2，3の測定，織学誌，46，216-221 (1990)