

被服材料の冷感に関する研究

仲 三郎*

Studies on the Cold Feel of Textile Materials

Saburo Naka

〔内容抄録〕 被服材料の冷感は、皮膚に接触したときの皮膚温の降下速度により決まると仮定して、冷感を決定する材料の物性値が熱浸透率であることを明らかにし、その測定法について述べ、さらに皮膚の代りに熱物性値既知のピアレックスガラスを用いて、それが低温の織物に接触したときの温度分布を解析的に検討するとともに、既に熱物性値の知られている数種の織物について熱浸透率を求め、被服材料の冷感に影響すると思われる要因を明らかにした。

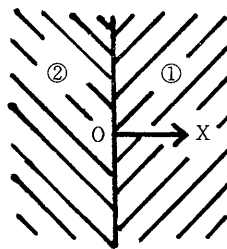
1 緒 言

身体が被服に接触したときの冷感、皮膚に存在する温度受容細胞の温度変化によって生じ、その刺激興奮の伝導速度は 12~30 m/s であるから、接触直後の皮膚温の降下速度の大きいほど冷感が強いと考えられる。

本研究では主として伝熱論の立場から、被服材料の冷感を決定する物性値とその測定法、及び冷感に影響する要因を検討する。

2 冷感を決定する物性値

図1に示すように一様な温度 V_1, V_2 ($V_1 < V_2$) の2個の半無限物体① ($x > 0$) と② ($x < 0$) を接触させた場合、接触後のそれらの温度をそれぞれ v_1, v_2 とし、接触直



後に両物体の接触面の温度が等しくなると仮定してそれを v_m とすると、

v_1, v_2 は次の式で表わされる¹⁾。

$$v_1 = v_m + (V_1 - v_m) \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{\kappa_1 t}} \quad (1)$$

$$v_2 = v_m + (V_2 - v_m) \operatorname{erf} \frac{|x|}{2\sqrt{\kappa_2 t}} \quad (2)$$

$$v_m = \frac{b_1 V_1 + b_2 V_2}{b_1 + b_2} \quad (3)$$

$$b_1 = \sqrt{K_1 \rho_1 c_1}, \quad b_2 = \sqrt{K_2 \rho_2 c_2} \quad (4)$$

ただし、 κ_1, κ_2 はそれぞれ物体①、②の温度伝導率、 K_1, K_2 は熱伝導率、 ρ_1, ρ_2 は密度、 c_1, c_2 は比熱、 b_1, b_2 は熱浸透率である。

(3)式から次の式

$$\frac{V_2 - v_m}{v_m - V_1} = \frac{b_1}{b_2} \quad (5)$$

が得られ、これを図2に示す。すなわち、 $V_2 > V_1$ の場合、接触面における高温物体の降下温度 $V_2 - v_m$ と低温物体の上昇温度 $v_m - V_1$ との比は、低温物体と高温物体の熱浸透率の比となる。したがって物体①を被服、物体②を身体と考えると、被服の熱浸透率 b_1 が大きいほど v_m が小さくなり、冷感が強い。すなわち被服

* 被服材料研究室

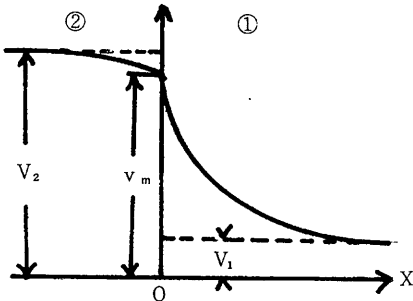


図2 接触後の温度分布

図2 接触後の温度分布

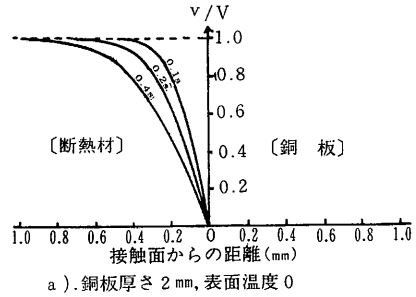
の冷感を決定する熱物性値は熱浸透率である。

3 熱浸透率の測定法

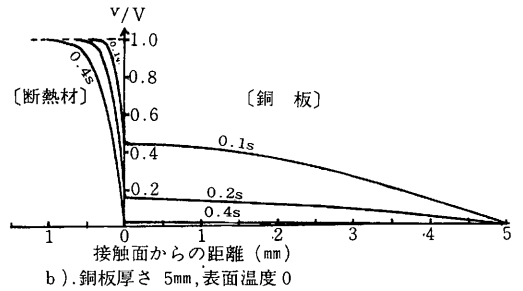
今までに報告された布の冷感に関する研究の多くは^{2)~5)}、試料よりも高温に加熱された金属板が試料に接触したときの温度変化を測定する方法を採用しているが、この方法では、熱伝導率の大きい金属板を低温空気にさらしたときの温度変化が急激であるため、恒温状態から試料に接するまでの時間や金属板を保持する断熱材等の影響が大きく、測定法に問題がある。

たとえば充分厚い断熱材（熱伝導率 $0.025 \text{ kcal/m} \cdot \text{h} \cdot \text{C}$ 、温度伝導率 $5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{h}$ ）に接着した銅板を下側にして急速に温度零の空气中で移動した場合の $0.1 \sim 0.4 \text{ s}$ 後のそれらの温度分布を求めると図3 a), b) のようになる。銅板が薄い(2mm)ときは、移動直後にその接する空気と同温度になる。また移動速度がごく遅い場合(自然対流の場合)は 同図c) のようになる。ただしこれらの温度分布は、a) と b) においては銅板表面の熱伝達率を無限大、すなわち空気に接する銅板表面が空気と同温度になると仮定し、c) においては、銅板の初期温度と空気との差が 20C 、銅板の大きさ $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ と仮定して得られる自然対流熱伝達率⁶⁾ $\alpha = 0.821 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C}$ を用い、数値解により求めたものである。

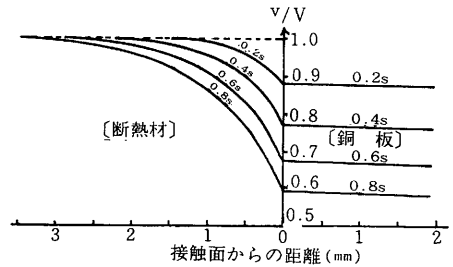
以上のことから、被服材料の冷感は、それに接触する金属板の降下温度を測定して評価する



a). 銅板厚さ 2mm, 表面温度 0



b). 銅板厚さ 5mm, 表面温度 0



c). 銅板厚さ 2mm, 熱伝達率 $0.821 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C}$

図3 断熱材と銅板の温度分布
(初期温度 V)

方法よりも、材料の物性値である熱浸透率を測定してそれにより評価するのが望ましいことが分かる。

熱浸透率の測定には、図4に示すように、厚さ l の試料①を熱物性値既知の半無限標準試料②と薄い金属板③で挟み、それら全体を一樣な温度に保ち、時刻 $t=0$ において平板③をステップ状に加熱して一定温度 V だけ上昇させると、試料との接触面における標準試料の上昇温度 $v_2(0, t)$ が次の式⁷⁾で表わされることを利用する。

$$\frac{v_2(0, t)}{V} = \frac{2}{1 + \sigma} \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n \operatorname{erfc}(2n+1)p \quad (6)$$

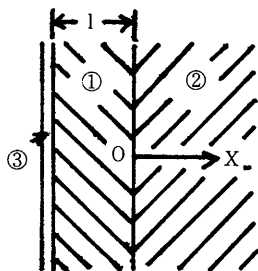


図4 熱浸透率測定時の試料配置
①試料 ②標準試料 ③ 金属板

$$\alpha = \frac{\sigma - 1}{\sigma + 1}, \quad \sigma = \frac{b_2}{b_1}, \quad p = \frac{l}{2\sqrt{\kappa_1 t}} \quad (7)$$

b_1, b_2 はそれぞれ①及び②の熱浸透率である。

試料の温度伝導率 κ_1 が知られている場合は、 $v_2(0, t)$ を測定することにより (6)式から試料の熱浸透率 b_1 を求めることができる。

試料の厚さが薄くて p が小さいときは次の近似式を利用できる。

$$\frac{v_2(0, t)}{V} = 1 - e^{\beta^2} \operatorname{erfc} \beta \quad (8)$$

$$\beta = \frac{b_1}{b_2} \frac{1}{2p} \quad (9)$$

また試料の温度伝導率は、一様な温度の厚さ $2l$ の試料を挟んだ2枚の金属板を、 $t=0$ においてステップ状に加熱して一定温度 V_1, V_2 だけ上昇させた場合の試料中央の上昇温度 $v(l, t)$ が次の式⁹⁾で表わされることを利用して求めることができる。

$$\frac{v(l, t)}{V_1 + V_2} = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \operatorname{erfc} (2n+1)p \quad (10)$$

これらの方法は筆者ら⁹⁾が布の熱伝導率の測定に利用した方法である。

温度伝導率は $\kappa = K/\rho c$ であるから、(4)式から熱浸透率は

$$b = \sqrt{K\rho c} = \frac{K}{\sqrt{\kappa}}$$

で表わされる。したがって熱伝導率と温度伝導率を測定すれば熱浸透率が得られるが、被服材料のように幾何学的に不安定な多孔性材料の熱伝導率は測定法により異なる値を示すのが普通であるから、冷感を評価する場合は平板で挟ん

で迅速に測定できる上の方法が最も適していると思われる。

筆者ら⁹⁾が、 $\kappa_2 = 22.7 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{h}$, $b_2 = 19.4 \text{ kcal/m}^2\text{h}^{1/2}\text{C}$ のパイレックスガラスを標準試料として、ポリエステル・フィラメント糸 50 d/24 f で織られたたて糸密度 40.8/cm, よこ糸密度 36.6/cm, 厚さ 0.079 mm のタフタについて実験して得たデータから、

$\kappa_1 = 2.84 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{h}$, $b_1 = 2.28 \text{ kcal/m}^2\text{h}^{1/2}\text{C}$ を得た。

4 考 察

被服材料の冷感を決定する物性値は熱浸透率であるから、熱浸透率に影響する要因は当然冷感にも影響するが、さらに材料の厚さ、接触の状態等材料の物性値以外にも冷感に影響する要因は多い。

1) 材料の密度と冷感

被服材料の密度が増すと熱伝導率は大きくなるが、温度伝導率は一般に小さくなるため、熱浸透率が大きくなって冷感は強くなる。織物の比重量と熱浸透率との関係を図5に示した。この熱浸透率は、表1に示す試料について線熱源法¹⁰⁾で測定して得た熱伝導率と温度伝導率¹¹⁾から計算した。比重量は多数重ねた織物を圧縮して変化させ、測定は 20°C, 65% R. H. の恒温室で行った。図は明らかに比重量(密度)が大きくなると熱浸透率も大きくなることを示している。フィラメント糸のベンベルグはフラノに比し密度が大きいため冷感が強く、ポリエステル・タフタはフィラメント糸ではあるが吸水性がほとんどないため、同じ密度においてもベン

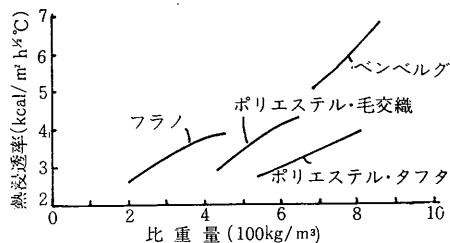


図5 織物の比重量と熱浸透率

表1 密度と冷感の関係評価のための試料

試料	たて糸			よこ糸		
	繊維	太さ	糸数/cm	繊維	太さ	糸数/cm
フ ラ ノ	毛 92%	11 s	14	毛 92%	11 s	14
	ナイロン 8%			ナイロン 8%		
ベ ン ベ ル グ	キュプラ	110 d	44	キュプラ	110 d	30
ポリエステル・毛交織	ポリエステル	2/40 d	104	毛	2/30 s	22.4
ポリエステルタフタ	ポリエステル	50 d	40.8	ポリエステル	50 d	36.6

ベルグより熱浸透率が小さく冷感が弱いと考えられる。

2) 材料の水分率と冷感

被服材料は吸水すると熱伝導率は大きくなるが、同時に密度が大きくなるため温度伝導率の増加は少ないかまたは減少する。そのため水分率が大きくなるほど熱浸透率が大きくなり、冷感が強くなる。図6に示す熱浸透率は、表2に示す試料について測定した熱伝導率と温度伝導率¹²⁾から計算したものである。 k_i は繊維間の空隙部に占める水の容積比率で、 $k_i=0$ は繊維が丁度水で飽和した状態、 $k_i=1$ は空隙が水で満たされた状態を示す。

図の水分と熱浸透率の関係から、疎水性のポリエステルは他の親水性繊維に比し冷感が弱いこと、水分の少ないときは繊維の容積比率の小さいフラノの冷感が弱く、容積比率の大きいベンベルグは強いこと、空隙が完全に水で満たされると、ポリエステル以外はほとんど同じ熱浸

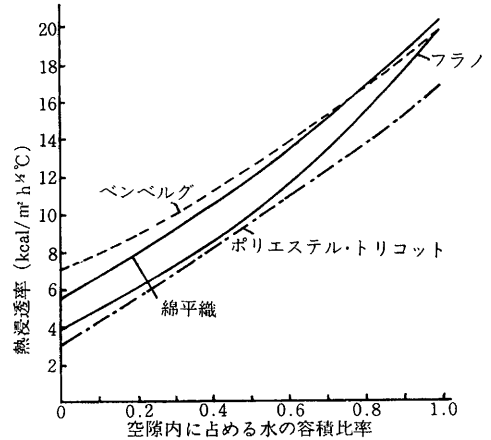


図6 織物の水分と熱浸透率

透率を示し、水の熱浸透率 22.6 kcal/m²h¹/²°C に近付くこと、すなわち被服は完全に水に濡れた場合でも水よりは冷感が弱いことなどが分かる。

3) 材料の厚さと冷感

表2 水分率と冷感の関係評価のための試料

試料	たて糸			よこ糸			膨潤繊維の容積比率
	繊維	太さ	糸数/cm	繊維	太さ	糸数/cm	
フ ラ ノ	表1に同じ			表1に同じ			0.207
ベ ン ベ ル グ	表1に同じ			表1に同じ			0.539
綿 平 織	綿	22 s	22	綿	20 s	24.4	0.308
ト リ コ ッ ト	糸 ウェール数/cm		コース数/cm	フロント	バック		0.347
	ポリエステル	50 d	12.2	13.0	1×1	3×1	

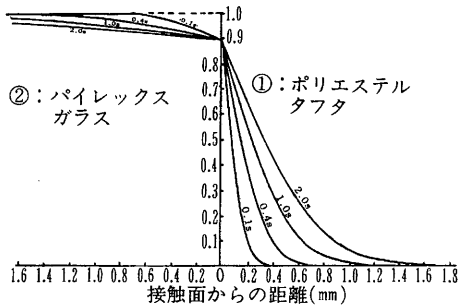


図7 半無限物体の接触後の温度分布

図7は図1の半無限物体①をポリエステル・タフタ ($\kappa_1=2.84 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{h}$, $b_1=2.28 \text{ kcal}/\text{m}^2\text{h}^{1/2}\text{C}$), ②をパイレックスガラス ($\kappa_2=22.7 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{h}$, $b_2=19.4 \text{ kcal}/\text{m}^2\text{h}^{1/2}\text{C}$) と仮定し, $V_1=0$, $V_2=1$ として, (1)及び(2)式を用いて接触後の温度分布を求めたものである。接触面の温度は(3)式を用い $v_m=0.895$ となる。

図から試料の厚さが 1.8 mm 以上あれば, 接触後 2 s 以内は接触面の温度 v_m が一定であることが分かる。このことは, パイレックスガラスを人体と仮定すると, 冷感を知覚する時間が 2 s 以内ならば, 試料の厚さが 1.8 mm 以上あれば冷感厚さに無関係となるが, 厚さがそれより薄ときは接触面温度が変化して冷感が変わることを意味している。その場合の接触面の温度変化は, 接触面と反対側の試料表面の条件により異なる。いまその面を裏面と呼ぶことにする。

a. 裏面の温度が一定の場合

これは試料が恒温平板上に置かれている場合で, そのときの接触面温度を解析的に求めてみる。

試料の厚さを l とすると, この場合の熱伝導の基本式, 初期条件及び境界条件はつぎのように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 v_1}{\partial x^2} - \frac{1}{\kappa_1} \frac{\partial v_1}{\partial t} &= 0, \quad 0 < x < l \\ \frac{\partial^2 v_2}{\partial x^2} - \frac{1}{\kappa_2} \frac{\partial v_2}{\partial t} &= 0, \quad x < 0 \end{aligned} \right\} (1)$$

$$t=0; v_1=0, v_2=1 \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} t > 0, \quad x=0; v_1=v_2, \\ K_1 \frac{\partial v_1}{\partial x} &= K_2 \frac{\partial v_2}{\partial x} \\ x=l; v_1=0 \\ x=-\infty; v_2=1 \end{aligned} \right\} (3)$$

(1), (3)式の条件で(1)式を解くことにより温度分布が求められ, それから接触面の温度が次のように与えられる。

$$v_m = \frac{b_2}{b_1+b_2} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{b_2-b_1}{b_2+b_1} \right)^n \left\{ \operatorname{erf} \frac{(n+1)l}{\sqrt{\kappa_1 t}} - \operatorname{erf} \frac{nl}{\sqrt{\kappa_1 t}} \right\} \quad (4)$$

b. 裏面が半無限物体に接している場合

これは試料がそれと同温度の充分厚い平板上に置かれている場合である。その平板を半無限物体③とし, その温度及び物性値を v_3, κ_3, K_3, b_3 とすると次の基本式と条件式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 v_1}{\partial x^2} - \frac{1}{\kappa_1} \frac{\partial v_1}{\partial t} &= 0, \quad 0 < x < l \\ \frac{\partial^2 v_2}{\partial x^2} - \frac{1}{\kappa_2} \frac{\partial v_2}{\partial t} &= 0, \quad x < 0 \\ \frac{\partial^2 v_3}{\partial x^2} - \frac{1}{\kappa_3} \frac{\partial v_3}{\partial t} &= 0, \quad x > l \end{aligned} \right\} (5)$$

$$t=0; v_1=0, v_2=1, v_3=0 \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} t > 0, \quad x=0: v_1=v_2, \\ K_1 \frac{\partial v_1}{\partial x} &= K_2 \frac{\partial v_2}{\partial x} \\ x=l; v_1=v_3, \\ K_1 \frac{\partial v_1}{\partial x} &= K_3 \frac{\partial v_3}{\partial x} \\ x=-\infty; v_2=1 \\ x=\infty; v_3=0 \end{aligned} \right\} (7)$$

これらの式から物体①と②の接触面の温度 v_m が次のように得られる。

$$v_m = 1 + \frac{b_1}{b_1+b_2} \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{(b_1-b_2)(b_1-b_3)}{(b_1+b_2)(b_1+b_3)} \right]^n \times \left\{ \frac{b_1-b_3}{b_1+b_3} \operatorname{erfc} \frac{(n+1)l}{\sqrt{\kappa_1 t}} - \operatorname{erfc} \frac{nl}{\sqrt{\kappa_1 t}} \right\} \quad (8)$$

図8は(4)及び(8)式で求めた接触面温度の時間的変化で, 試料の裏面に接する半無限物体, 銅,

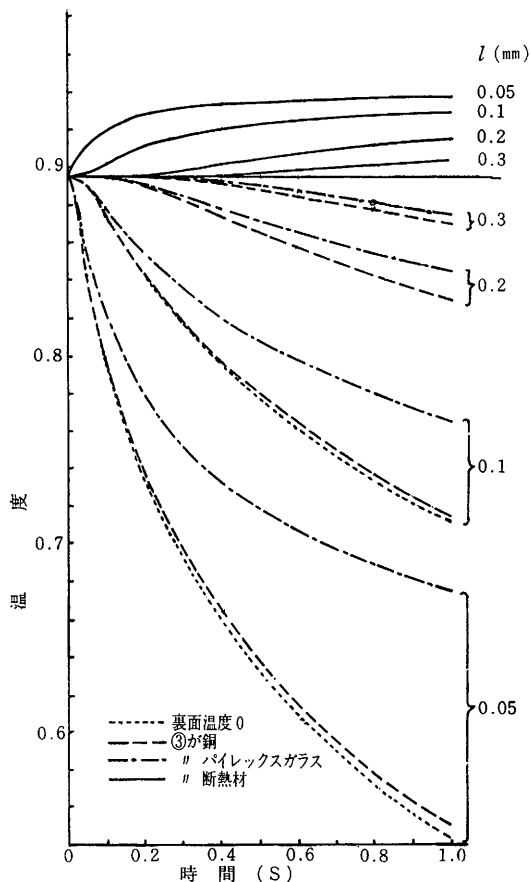


図8 試料の厚さと接触面温度の変化
(初期温度 $v_1=0, v_2=1$)

パイレックスガラス及び断熱材の熱浸透率 b_3 はそれぞれ 515, 19.4, 1.1 kcal/m²h^{1/2}°C である。接触直後の接触面温度は試料①と物体②の熱浸透率で決まるから図7と同じく 0.895 であるが、試料の厚さが薄いときは時間とともに変化し、その変化は厚さが薄いほど急激である。また厚さが同じときは、裏面温度が一定に保たれる場合に温度変化最も急激で、半無限物体に接しているときは、その熱浸透率 b_3 が試料のそれより大きいときは温度が降下し、小さいときは反対に上昇する。そして b_3 が大きいほど変化は急速である。以上のことから被服材料の冷感、それが置かれている台の熱浸透率の影響を非常に受けることが分かる。

4) 接触状態と冷感

これまでは二つの物体が接触した場合、接触直後に両接触面の温度が等しくなると仮定したが、接触抵抗が存在すると同温度にはならない。いま接触面における熱流束が両面の温度差に比例するものとし、その比例係数(伝熱係数)を α とすると、半無限物体 ① ($x>0$) 及び ② ($x<0$) の初期温度がそれぞれ 0 及び 1 の場合、それらの接触面温度 $v_{1,0}$ 及び $v_{2,0}$ は次の式で表わされる¹³⁾。

$$\left. \begin{aligned} v_{1,0} &= \frac{b_2}{b_1+b_2} (1 - e^{m^2 t} \operatorname{erfc} m\sqrt{t}) \\ v_{2,0} &= 1 - \frac{b_1}{b_1+b_2} (1 - e^{m^2 t} \operatorname{erfc} m\sqrt{t}) \end{aligned} \right\} (19)$$

$$m = \frac{b_1+b_2}{b_1 b_2} \cdot \alpha \quad (20)$$

①をポリエステルタフタ、②をパイレックスガラスと仮定して(19)式で求めた接触面温度の時間的変化を図9に示した。

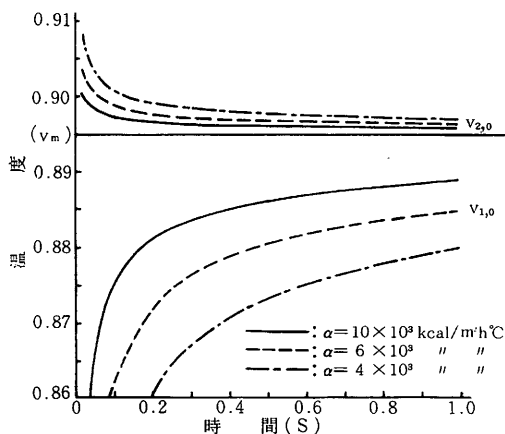


図9 接触抵抗のあるときの両接触面の温度変化

図9 接触抵抗のあるときの両接触面の温度変化
この図から両接触面温度は接触直後急に接近し、 $t=\infty$ で v_m に等しくなること、また伝熱係数 α が大きいほど急激に接近することが分かる。織物のような多孔性材料と平板との接触抵抗は、圧力が大きいほど小さくなるから伝熱係数が大きくなり、さらに圧力を増すと織物の密度と熱伝導率が大きくなってその熱浸透率が大きくなるから、織物の冷感、それは圧力が大きくなると強くなると思われる。

5 結 語

被服材料の冷感を伝熱論の立場から検討し、次の結論を得た。

1) 被服材料の冷感を決定する物性値は熱浸透率である。

2) 被服材料の熱浸透率の測定には恒温平板を使用する非定常法が最も適している。

3) 被服材料の冷感、密度が増すほど、また水分率が多くなるほど強くなること、その熱浸透率から予想できる。

4) 被服材料の厚さの薄いときは、その裏面に接する物体の熱浸透率が大きいほど冷感が強くなる。

5) 接触圧の大きいほど冷感は強い。

本研究においては、被服材料の温度が皮膚温より低い場合のみを考慮したが、反対に高い場合は温感であって、それを決定する物性値が熱浸透率であることは明らかである。

また本研究では皮膚温の降下速度の大きいほど冷感が強いと仮定して、被服材料の冷感を伝熱論の立場から検討したが、感覚としての冷感には生理学的に究明すべき多くの問題があり、

その立場からの被服材料の冷感については今後の研究課題としたい。

なお本研究の一部は繊維学会52年度年次大会研究発表会で報告した。

文 献

- 1) H. S. Carslaw, J. G. Jaeger ; "Conduction of Heat in Solids", Oxford University Press, 1959, pp. 88
- 2) W. H. Rees ; J. Text. Inst., 32, T149 (1941)
- 3) N. R. S. Hollies, H. Bogaty, J. C. Hintermaier, M. Harris ; Text. Res. J., 23, 763 (1953)
- 4) 内田 ; 繊維工業学会誌, 3, 459 (1957)
- 5) 川端, 赤木 ; 繊維誌, 30, T13 (1977)
- 6) W. H. McAdams ; "Heat Transmission", McGRAW-Hill Book COMPANY INC., 1954, pp. 180
- 7) Carslaw and Jaeger ; op. cit. pp. 320
- 8) ibid. pp. 309
- 9) 仲, 鎌田 ; 繊維誌, 30, T48 (1977)
- 10) 仲, 本村, 鎌田 ; 繊維誌, 26, T34 (1973)
- 11) 仲, 鎌田 ; 繊維誌, 30, T43 (1974)
- 12) 仲, 鎌田 ; 繊維誌, 29, T100 (1976)
- 13) Carslaw and Jaeger ; op. cit., pp. 89