

衣服材料を通しての定常状態下での 熱・水分移動の解析 (第1報)

発汗を伴わない熱移動モデル

中西正恵, 丹羽雅子*

(神戸女子大学家政学部, *奈良女子大学生活環境学部)

平成5年12月28日受理

The Analysis of the Steady State Heat and Moisture Transfer through Clothing Materials (Part 1)

A Model of Heat Transfer without Perspiration

Masae NAKANISHI and Masako NIWA*

Faculty of Home Economics, Kobe Women's University, Kobe 654

** Faculty of Human Life Environment, Nara Women's University, Nara 630*

The steady state heat and moisture transfer from a dry or wet heated plate is used to simulate the human body's relation to the environment through clothing materials. The heat transfer without perspiration was discussed by a simple model which was constructed from the radiative, conductive and convective resistances for the case of air impermeable clothing materials. The calculated value was accurately corresponded with the measured value under various wind velocities with the temperature of the heated plate set 10°C higher than that of the environment.

In the case of air permeable fabrics, an experimental equation was also derived by the modification of the model cited above using some assumptions. The effects of air resistance, thermal resistance of fabrics, air gap and wind velocity on heat transfer can be estimated by this equation.

Moisture transfer, and simultaneous heat and moisture transfer in a state of perspiration will be discussed in the next paper.

(Received December 28, 1993)

Keywords: sensible heat transfer 顕熱移動, air gap 空気層, wind velocity 風速, air resistance 通気抵抗, thermal resistance 熱抵抗.

1. 緒 言

温熱的に快適な衣服を設計するには、人体と環境との間の熱・水分・空気の移動を衣服が適切にコントロールする機構を明らかにする必要がある。しかし、複雑な形態と発汗などの生理反応を生じる人体から、衣服を介したこれらの移動現象は極めて複雑であり、現在も多くの問題が残されている。

従来より、人体実験やサーマルマネキンによる実験に

よって衣服の性能評価が行われてきたが、これらの方法による衣服を介した移動現象の解析は、複雑さのため、衣服素材の性能設計、高機能性素材の開発や系統的な衣服設計などに応用するのは難しい。そのため、人体形状を円筒や平板など単純な形にモデル化した研究が行われてきた。たとえば、竹内ら^{1)~4)}やFonseca^{5) 6)}らは、発熱円筒を用いて水分移動を伴わない系での熱移動に及ぼす風の浸透の影響を調べた。また、平板モ

デルを用いた例では、Spencer-Smith^{7) 8)}の熱移動および水分移動に関する基礎的研究や、風の浸透のない条件ではあるが、水分移動も同時に生じる系での熱移動量の時間変化を計算したFarnworth⁹⁾の研究が注目される。しかし、条件を単純化しても布が繊維の複雑な集合体であるため、均質な連続体とは異なる扱い（たとえば、布の通気性による風浸透の効果など）を必要とし、加えて実際の着用時のように熱、水分、および空気が同時に移動している系での解析は難しく、今もなお、十分明らかにされていない。

近年、平板型の熱・水分移動測定のための精密な装置(Thermo Labo II)¹⁰⁾が開発され、また、これによる測定条件の厳密化¹¹⁾がなされたことにより、正確な熱・水分移動のデータが得られるようになった。さらに、これらの移動現象を解析する上で重要な材料特性の一つである通気性も、微小な圧力差を検出する新しい通気性試験機¹²⁾が開発され、従来多く用いられてきたフラジール型通気性試験機では測定できなかった範囲の通気性を精度よく測定できるようになった。

本研究では、これらの装置を用いて、実際の着衣系を最も単純化して、人体を平板モデルでおきかえ、これを1層の被服材料(布)で被覆した系での定常熱・水分移動を測定する。これにより、布固有の熱・水分・空気の移動特性と、衣服形態から生まれる布と人体との間の空気層、温度、湿度、風速などの環境条件を種々に与えて、この系での熱・水分同時移動の半理論式を誘導する。すなわち、水分移動を伴わない顕熱移動と顕熱移動を伴わない水分移動現象を説明するための、空気層、被服材料、材料表面と環境間の各熱抵抗、水分移動抵抗からなる直列モデルを設定した。このモデルを基に材料の通気性の効果を考慮して、顕熱および水分移動抵抗式をそれぞれ求める。ただし、熱・水分同時移動は顕熱移動と水分移動に伴う潜熱移動とが、独立に並列して生じると仮定する。

得られた半理論式の妥当性を実証するため、皮膚に近い放射率の黒色平板熱板の条件により、以下の三つの実験を行った。まず、非通気性材料の顕熱移動に關する直列モデルにおいて、熱板の温度を環境空気の温度より高温として、水分の移動を伴わない系での熱移動量を測定する(実験Ⅰ)。そして、得られた結果と計算結果とを比較してモデルの妥当性を検証する。さらに、通気性材料の場合については、非通気性材料のモデルを基にして、風の貫入効果を考慮した顕熱移動の実験式を誘導する。

次に、熱板に発汗を模擬する湿潤ろ紙を置き、熱板温度を環境温度と同温として水分の蒸発を伴う熱移動量を測定し(実験Ⅱ)、実験式を導く。さらに熱と水分とが同時移動する系について考察するために、実験ⅠとⅡとが複合した条件、すなわち、湿潤ろ紙を置いた熱板の温度を環境温度より高温とし、蒸発熱移動も含んだ熱移動量を測定し(実験Ⅲ)、実験ⅠとⅡの式を考慮して半理論式を導く。

2. 熱移動のモデル計算

(1) 非通気性材料の顕熱移動モデル

温度 T_b (K)の熱板から空気層および非通気性材料を通して、温度 T_a (K)の外部環境空気への水分移動を伴わない場合の熱流束(以後、熱移動量と呼ぶ) Q_d (W/m²)は、この系の総括熱伝達率 h_t (W/(m² K))、またはその逆数の全熱抵抗 R_t (m² K/W)を用いて、通常(1)式で表される。

$$Q_d = h_t(T_b - T_a) \\ = (T_b - T_a)/R_t \quad (1)$$

$$R_t = 1/h_t \quad (2)$$

空気層を設けて1層の材料で熱板をおおった場合の伝導、対流、ふく射による顕熱移動のモデルとして、Fig.1のような単純な抵抗モデルを考える。このモデルでは、熱板から材料を通して環境へいたる全熱抵抗 R_t は、環境と材料外表面間の熱抵抗 R_s 、材料の熱抵抗 R_i 、および空気層の熱抵抗 R_g の直列モデル、すなわち(3)式で表されたとする。

$$R_t = R_s + R_i + R_g \quad (3)$$

R_s は、ふく射熱抵抗 R_{rs} と対流熱抵抗 R_{cs} の並列とし、また、 R_g もふく射熱抵抗 R_{ri} と空気の伝導熱抵抗 R_{cl} の並列とすれば、

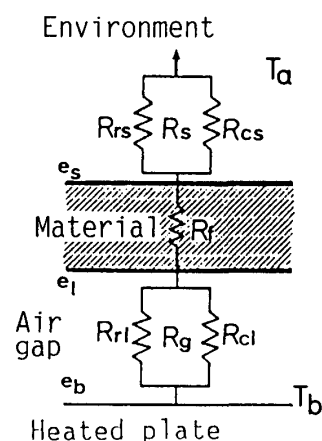


Fig.1. The model of dry heat transfer

衣服材料を通しての定常状態下での熱・水分移動の解析 (第1報)

$$\frac{1}{R_s} = \frac{1}{R_{rs}} + \frac{1}{R_{cs}} \quad (4)$$

$$\frac{1}{R_g} = \frac{1}{R_{r1}} + \frac{1}{R_{c1}} \quad (5)$$

全熱抵抗 R_t は(6)式となる。

$$R_t = \frac{R_{rs} \cdot R_{cs}}{R_{rs} + R_{cs}} + R_f + \frac{R_{r1} \cdot R_{c1}}{R_{r1} + R_{c1}} \quad (6)$$

それぞれ表面温度 T_1 , T_2 (K) の物体間のふく射熱移動量 Q_{rad} (W/m^2) は, ステファン-ボルツマンの法則により絶対温度の4乗の差に比例する。しかし, 本研究の実験では温度差が10 K以内と小さいので, ふく射熱移動量 Q_{rad} は, (7)式のように近似できる。

$$Q_{rad} = f_{12} \sigma (T_1^4 - T_2^4) \\ \approx C f_{12} (T_1 - T_2) \quad (7)$$

ここで, f_{12} は物体面の幾何学的形態と放射率に依存する定数, σ はステファン-ボルツマン定数で, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 K^4)$ である。Cは比例係数で, 本実験の温度域293~303 Kでは, $C = 6.0 W/(m^2 K)$ である。

(7)式から, ふく射熱抵抗 R_{rad} は, (8)式となる。

$$R_{rad} = \frac{T_1 - T_2}{Q_{rad}} = \frac{1}{C f_{12}} \quad (8)$$

材料下面と熱板が平行な場合, その間のふく射熱移動を考えれば, f_{12} は(9)式で表され¹³⁾, R_{r1} は(10)式で与えられる。

$$f_{12} = \frac{1}{1/e_1 + 1/e_b - 1} \quad (9)$$

$$R_{r1} = \frac{1/e_1 + 1/e_b - 1}{C} \quad (10)$$

ここで, e_1 , e_b は材料の下面, および熱板の放射率である。

また, 材料外表面から環境壁面へのふく射熱移動は, 比較的小さい面積の灰色面(材料表面)が, 他の大きい灰色面(環境壁面)に取り囲まれている場合のふく射熱移動とすると, この場合の f_{12} は材料の外表面の放射率 e_s となり, R_{rs} は(12)式で与えられる。

$$f_{12} = e_s \quad (11)$$

$$R_{rs} = \frac{1}{C e_s} \quad (12)$$

対流熱抵抗 R_{cs} は風の状態だけでなく材料の表面状態にも依存するが, ここでは, 実験的に得られる滑らかな熱板の R_{cs} が材料の種類に依存しないとすれば, R_{cs} は風速 V (m/s) のみの関数 f_d となる。すなわち,

$$R_{cs} = f_d(V) \quad (13)$$

空気層の伝導熱抵抗 R_{c1} は, 空気層の厚さを L (m),

空気熱伝導率を k_a ($W/(m K)$) とすると, (14)式で与えられる。

$$R_{c1} = L/k_a \quad (14)$$

また, 材料の熱伝導抵抗 R_f は, 実測によって求める。

なお, 本実験では下面加熱であるため空気層内での自然対流の可能性があるが, 閉じた空間で温度差が小さく(10 K以内), 後述のように空気層の厚さも小さい(8.2 mm以内)ため, レイリー数も530以内になり, 対流は生じないと考えられる。また, 空気層 $L=0$ の場合の試料-熱板間の接触熱抵抗については無視している。

(2) 通気性材料の顕熱移動モデル

通気性材料としての布は, 繊維と空気との複合体で複雑な表面と空隙構造をもつため風の浸透による熱伝達があったメカニズムとして加わる。さらに, 布表面と環境または熱板との間のふく射や対流による熱移動も非通気性材料の場合と異なってくる。本研究では, できる限り少ないパラメータで布を介しての熱移動を簡単に計算できる実験式を Fig. 1 の顕熱移動モデルに修正を加えることにより導出することとする。

3. 実験方法

熱・水分移動に関する実験は, 293~294 K, 60~65 % RHの恒温恒湿内でサーモラボⅡ型¹⁰⁾により行った。実験装置の模式図を Fig. 2 に示す。熱板から環境への熱移動量は, 熱板を皮膚温程度の303~304 Kの一定温度を維持するために必要な供給電力量により得られる。皮膚を模擬して黒色アルマイト処理を施した放射率0.94程度の10 cm角の熱板を, 風洞内気流に垂直に設置する。本実験では $V = 0.3 \sim 1.4$ m/s の風速条件の範囲で行い, 試料を熱板から0~8.2 mmの距離に置き

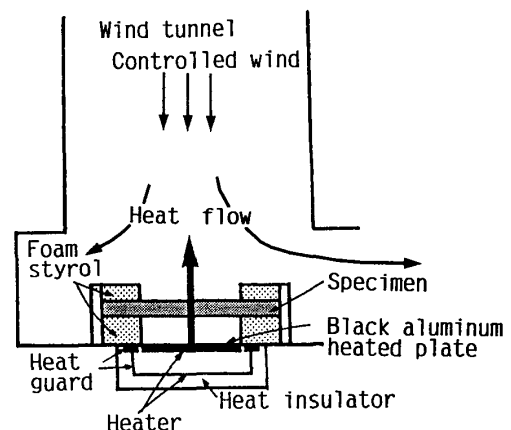


Fig. 2. The measuring method of heat transfer using Thermo Labo II¹⁰⁾

Table 1. Details of impermeable materials

Material	Thickness (mm)	R_t ($m^2 K/W$)	Sheet structure*
R1	0.445	0.00221	Rub
R2	0.470	0.00236	Rub/Al**
R3	0.520	0.00268	Al/Rub/Al**

* Rub, silicone rubber sheet (density $1.17 \times 10^6 \text{ g/m}^3$); Al, commercial aluminum foil. ** Bonded sheet consisting of a rubber sheet, R1 and Al(s).

て測定するほか、(13)式の R_{cs} の関数 f_d を得るため、試料で被覆しない状態でも熱移動量 Q_d を測定する。試料は、支持枠にたるみのないように両面テープで取り付け、これをスペーサー上に両面テープで密着させてセットする。なお、支持枠とスペーサーには、試料の自重や、湿潤ろ紙を置く実験ⅡとⅢで吸湿などによる布の伸縮、すなわち、布の寸法変化による垂れ下がりや膨らみを防止するために、2 cm 間隔にナイロンモノフィラメント糸（支持枠用は太さ $128 \mu\text{m}$ 、スペー

Table 2. Details of fabrics

Sample No.	Weight (g/m^2)	Thickness* ¹ (mm)	R^* ² (Pa s/m)	R_t^* ³ ($m^2 K/W$)	Fiber* ⁴ type	Weave structure
1	82	0.348	13	0.0083	PS	plain
2	92	0.238	63	0.0069	PF	plain
3	96	0.590	21	0.0171	PS	plain
4	96	0.218	329	0.0057	PF	plain
5	106	0.145	77,100	0.0045	PF	plain
6	110	0.438	360	0.0119	PS	plain
7	126	0.331	2,403	0.0082	PF	plain
8	188	0.820	631	0.0189	PS	plain
9	208	0.576	4,560	0.0098	PTF	satin
10	249	0.805	1,443	0.0177	PS	2/2 twill
11	272	0.395	3,664	0.0067	PF	triaxial
12	79	0.411	7	0.0101	C	plain
13	103	0.418	1,617	0.0121	C	plain
14	105	0.533	156	0.0124	C	plain
15	122	0.605	57	0.0145	C	plain
16	147	0.482	4,080	0.0117	C	plain
17	285	0.995	3,963	0.0213	C	3/1 twill
18	391	1.350	7,404	0.0240	C	3/1 twill
19	115	0.456	106	0.0107	W	plain
20	117	0.491	13	0.0120	W	plain
21	171	0.570	198	0.0125	W	plain
22	179	0.418	872	0.0099	W	plain
23	184	0.663	1,045	0.0161	W	plain
24	197	0.630	1,800	0.0123	W	plain
25	251	0.910	1,203	0.0203	W	2/2 twill
26	310	2.120	88	0.0499	W	2/2 twill
27	374	1.383	2,734	0.0284	W	2/2 twill
28	63	0.288	16	0.0086	S	plain
29	81	0.209	642	0.0056	S	plain
30	190	0.741	936	0.0177	W50/PS50	plain

*¹ Thickness at pressure 49 N/m^2 . *² Air resistance. *³ Thermal resistance at pressure 49 N/m^2 . *⁴ PS, polyester spun; PF, polyester filament; PTF, polyester textured filament; C, cotton; W, wool; S, silk.

衣服材料を通しての定常状態下での熱・水分移動の解析 (第1報)

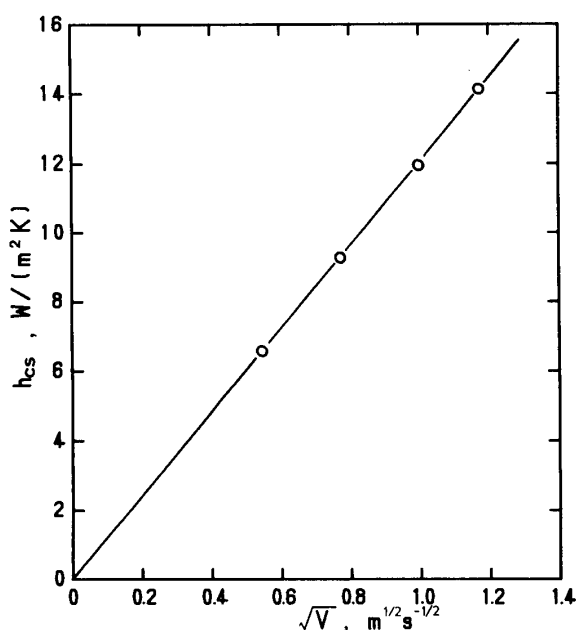


Fig. 3. The relation between convective heat transfer coefficient h_{cs} and wind velocity V

サー用は $230\mu\text{m}$)を格子状に渡している。

試料は、非通気性材料として Table 1 に示すシリコンゴムシートを用いた。また、放射率の影響を調べるため、市販のアルミ箔をシリコングリースでシリコンゴムシートの片面あるいは両面にアルミ箔の光沢面が表面になるようにはりつけたものも試料とする。なお、計算に用いる放射率は、アルミ箔に対し $0.11^{14)}$ 、また、シリコンゴムシートに対しては $6\sim 12\mu\text{m}$ の波長領域の非接触赤外表面温度計の設定放射率から推定した値 0.96 とする。

布試料は、Table 2 に示すように、一般に被服材料として使用されるポリエステル、綿、毛、絹および混紡布を含む30種を選んでいる。

Table 2 の通気抵抗 R は、KESF-8AP¹²⁾により、一定流束 $u (=0.04\text{ m/s})$ 条件下での試料表裏の圧力差 $\Delta P(\text{Pa})$ の測定から、(15)式により求めている。

$$R = \Delta P / u \quad (15)$$

なお、 u がこの値以内であれば、 ΔP と u との比例関係が成立することは確認している^{12) 15)}。

布は圧縮性があるために、熱抵抗 R_t は測定時の圧力に依存するが、本実験の風圧条件下ではこの圧縮変形がない状態での測定値が妥当と考えられる。そこで、Thermo Labo II 付属の 5 cm 角の熱板をハンディ圧縮試験機¹⁶⁾の加圧板に取り付け、布の厚さ測定の基準とされる¹⁷⁾圧縮荷重 49 N/m^2 下での熱抵抗 R_t の測定を行い、Table 2 に示した。

4. 結果と考察

(1) 対流熱抵抗 R_{cs}

各風速条件下において試料を置かない状態での熱板(温度 T_b)から環境(温度 T_a)への対流熱伝達率 h_{cs} は、(16)式で求められる。

$$h_{cs} = \frac{Q_d - Q_{rad}}{T_b - T_a} \quad (16)$$

ここで、 Q_{rad} は、(7)、(11)式から(17)式で与えられる。

$$Q_{rad} = \sigma e_s (T_b^4 - T_a^4) \quad (17)$$

Fig. 3は h_{cs} と風速 V の平方根との関係を示し、ほぼ原点を通る直線関係が認められる。この実験を日時を変えて5回測定した場合の各風速ごとの h_{cs} の変動率は $1.1\sim 2.2\%$ である。Fig. 3から h_{cs} の逆数である R_{cs} は、 $0.3\sim 1.4\text{ m/s}$ までの風速 V について、実験式として(18)式で与えられる。

$$R_{cs} = \frac{1}{h_{cs}} = \frac{1}{12.0\sqrt{V}} \quad (18)$$

(18)、(12)式を(4)式に代入し、材料外表面の熱抵抗 R_s は、(19)式で表される。

$$R_s = \frac{1}{12.0\sqrt{V} + Ce_s} \quad (19)$$

(10)、(12)、(14)、(18)式を(6)式に代入すると、非通気性材料の場合の全熱抵抗 R_t 、あるいは、その逆数である総括熱伝達率 h_t は、(20)式で表される。すなわち、 R_t は空気層の大きさ L 、材料の熱抵抗 R_t 、材料外表面と材料下面の放射率 e_t 、 e_s 、および風速 V の関数となっている。

$$\begin{aligned} R_t &= \frac{1}{h_t} \\ &= \frac{1}{12.0\sqrt{V} + Ce_s} + R_t \\ &\quad + \frac{1}{\frac{C}{1/e_t + 1/e_s - 1} + \frac{k_a}{L}} \end{aligned} \quad (20)$$

(2) 顕熱移動モデルの検証

Fig. 4は、Table 1のシリコンゴムシート試料(R1)の場合(Case 1)、片面にアルミ箔を貼った試料(R2)をアルミ面を環境側に向けた場合(Case 2)、熱板側に向けた場合(Case 3)、アルミ箔を両面に貼った試料(R3)の場合(Case 4)で、各風速条件下の結果を示している(Fig. 4aは $V=0.3\text{ m/s}$ 、Fig. 4bは 1.4 m/s)。図中の曲線は、熱板の放射率 $e_b=0.94$ 、空気熱伝導率 $k_a=0.026\text{ W/(m K)}$ ¹⁸⁾として(20)式により求めた計算曲線であり、測定値との一致が認められる。片面

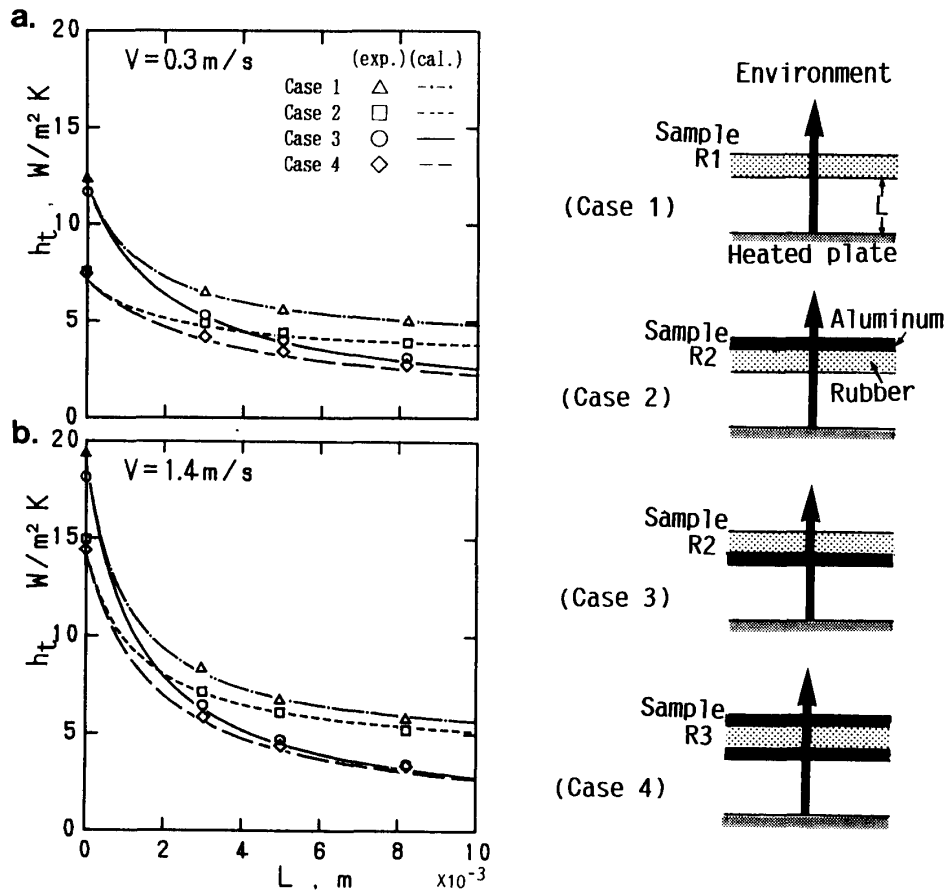


Fig.4. The relation between total heat transfer coefficient h_t and air gap L for impermeable materials as shown in Table 1

Left: plots ($\triangle$, $\square$, $\circ$, $\diamond$) show the experimental data, and the lines are calculated by Eq. (20). a: $V=0.3$ m/s, b: $V=1.4$ m/s. Right: measurement condition.

にアルミ箔を貼った試料 R2 では、材料の熱抵抗 R_t は同じであるが、アルミ箔の向きにより h_t は異なり、材料の放射率の影響がみられる。すなわち、低風速下で空気層が小さい場合には、環境側に低放射率面を置いた Case 2 の方が h_t が小さいが、高い風速条件下や空気層が大きい場合には、熱板側に低放射率面をおいた Case 3 の方が断熱性が大きくなる。非通気性材料に対するこのような放射率の影響も Fig.1 を基にモデル計算から推定できることが示された。

(3) 通気性材料への熱移動式(20)式の適用

通気性材料(布)に(20)式を適用する場合、布の放射率は、ふつう 0.90~0.98 の範囲内と考えられ^{7) 19)}、本研究ではアルミ蒸着などの加工が施された特殊な布を用いていないため、すべての布について $\epsilon_i = \epsilon_s = 0.94$ とした。

まず、空気層を設けない $L=0$ の場合の h_t の計算値と実測値との比較を Fig.5 に示している。 h_t の実測の

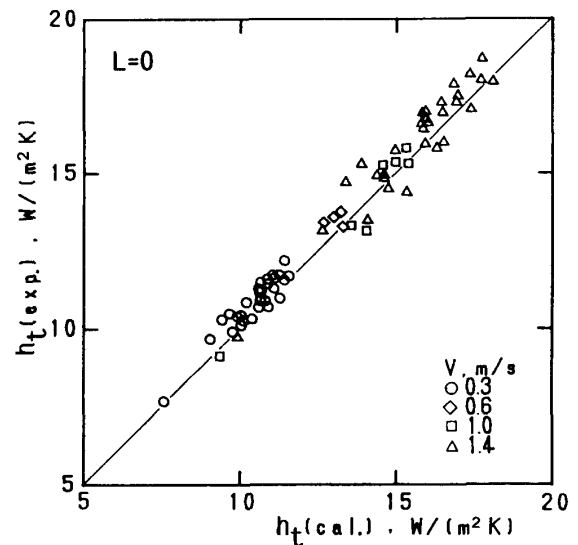


Fig.5. The relation between h_t calculated by Eq. (20) and measured h_t

The heated plate was covered with fabrics without an air gap

衣服材料を通しての定常状態下での熱・水分移動の解析 (第1報)

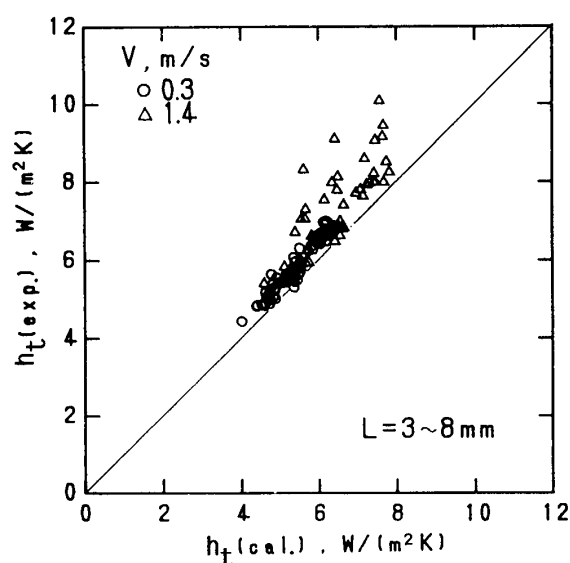


Fig. 6. The relation between h_t calculated by Eq. (20) and measured h_t .

The heated plate was covered with fabrics with an air gap of $L=3\sim 8$ mm.

範囲 $7.7 < h_t < 17.3$ W/(m² K) に対して、両者の値の差、すなわち推定誤差の2乗平均の平方根 rms は0.61と小さく、(20)式をそのまま用いても比較的精度よく h_t を計算できることが明らかである。

つぎに、Fig. 6 には空気層がある場合 ($L=3\sim 8$ mm) の h_t の測定値と (20) 式からの計算値とを比較した。ここでは、2種類の風速 ($V=0.3$ と 1.4 m/s) での結果を示している。Fig. 6 から高風速下では、実測値の方が計算値よりも大きくなっている。

これらの結果から、空気層のない場合 ($L=0$) では、半理論式 (20) 式がそのまま布を通過する熱移動現象に適用できるが、空気層がある場合 ($L \neq 0$) は、(20) 式を通気性をもつ布の場合の熱移動にそのまま適用することはできない。そこで、次節ではこのような布の場合の簡単な実験式を導く。

(4) 布の顕熱移動の実験式の導出

前節で、空気層がない場合 ($L=0$)、布に対する全熱抵抗 R_t は、圧縮荷重 49 N/m² 下での布材料の熱抵抗 R_f と (19) 式から得られる布外表面の熱抵抗 R_s との和として表現できたことから、空気層のある場合 ($L \neq 0$) についても、ここでは、布の抵抗 R_f と布表面の抵抗 R_s は変化しないものと仮定し、空気層の抵抗 R_g に通気性の効果を考えてみる。Fig. 6 で h_t の実測値が計算値よりも大きくなるのは、特に通気抵抗 R が小さい布で高い風速下の場合であるが、これは風の貫

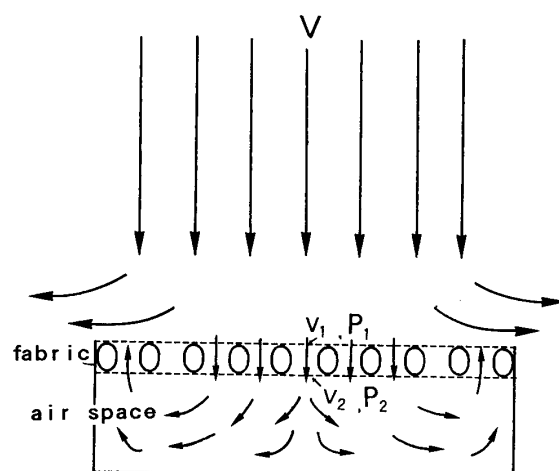


Fig. 7. Putative wind penetration through a fabric

入による影響が無視できないからと考えられる。本実験条件での布とその背面(裏面)の空気層間の空気の流れは、極めて複雑であるが、風の貫入の程度は布の通気抵抗、布背面の空気層厚さ、および風洞気流の流速とが関わると思われる。これらの関係を明らかにするために、以下ではこの空気の流れを Fig. 7 のように考えて、風の浸透の指標となるパラメータ u^* により検討してみた。

布の中心でおもて面に風が浸透しようとする速度を v_1 とし、その動圧が $\rho_1 v_1^2 / 2$ (ρ_1 は空気密度 (kg/m³)) と静圧 P_1 の和は、同じく裏面での密度 ρ_2 、速度 v_2 、静圧 P_2 および風の通過に伴い生じる圧力損失を $\Delta P'$ とすると、次のように表される。

$$\frac{\rho_1 v_1^2}{2} + P_1 = \frac{\rho_2 v_2^2}{2} + P_2 + \Delta P' \quad (21)$$

$\rho_1 \approx \rho_2$ 、および $v_1 \approx v_2$ と仮定し、布への風の貫入速度 u' を (22) 式で定義する。

$$v_1 \approx v_2 \approx u' \quad (22)$$

さらに、(21) 式から、

$$P_1 - P_2 = \Delta P' \quad (23)$$

また、低レイノルズ数流れを仮定すれば、 $\Delta P'$ は通気抵抗 R と次式で関係づけられる。

$$\Delta P' = R u' \quad (24)$$

通気性測定では布を通過する流速 u と布前後の圧力差 ΔP を測定して、(15) 式で R を求めたが、本研究の熱移動実験では、圧力差 $\Delta P'$ は直接測定することはできない。また、布試料は風洞内に気流 (V) に直交して設置されているが、Fig. 7 のように気流は布中央部から貫入し、周辺部で流出すると考えられることから、 $\Delta P'$ は布の中心部と周辺部では、大きさ、符

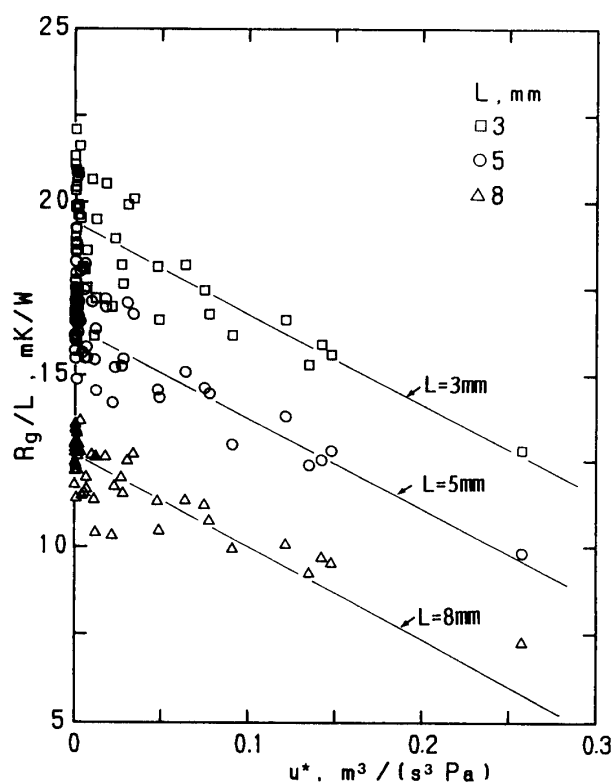


Fig. 8. The relation between u^* as a wind penetration parameter and the heat transfer resistance of an air gap per unit length R_g/L

号も異なる。いま、布中心部における圧力差 $\Delta P'$ の平均値は、動圧($\rho V^2/2$)により支配されると仮定すれば、動圧が大きくなると $\Delta P'$ は大きくなる。そこで、第1次近似として、

$$\Delta P' \propto \rho V^2/2 \quad (25)$$

と仮定すると、布への風の貫入速度 u' は、(24)式から

$$u' \propto \frac{\rho V^2}{2R} \quad (26)$$

が得られる。この場合、実際上 ρ の変化は小さいものとして、次式で定義される u^* ($\text{m}^3/(\text{s}^3 \text{Pa})$)を風の貫入の度合を表すパラメータとして、実験データを整理してみる。

$$u^* = V^2/R \quad (27)$$

Fig. 1のモデルに従って、全熱抵抗 R_t から R_s と R_f を引いた値を空気層の抵抗 R_g と考え、実測の $R_{t(\text{exp})}$ を用いて、(28)式により R_g を計算する。

$$R_g = R_{t(\text{exp})} - R_s - R_f \quad (28)$$

風の貫入パラメータ u^* と単位厚さあたりの空気層の抵抗 R_g/L との関係を空気層厚さ別に示すFig. 8が

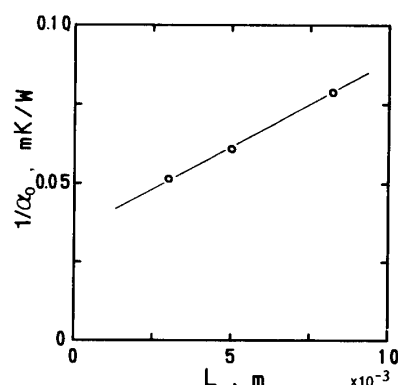


Fig. 9. The relation between the intercept a_0 in Fig. 8 and air gap length L

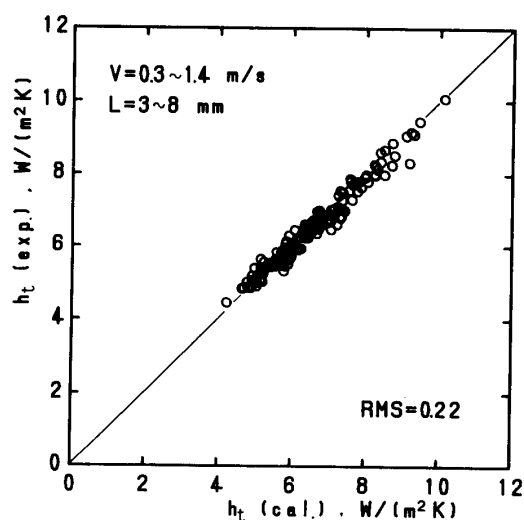


Fig. 10. The relation between h_t calculated by Eq. (32) and measured h_t

The heated plate was covered with fabrics with an air gap of $L=3-8$ mm.

ら、 u^* と R_g/L の関係は、(29)式のように1次式で近似される。傾き a_1 はいずれの空気層でもほぼ等しく、また切片から求めた a_0 は、Fig. 9の $1/a_0$ と L のプロットから、(31)式が得られる。

$$R_g/L = a_0 - a_1 u^* \quad (29)$$

$$a_1 = 26.7 \quad (30)$$

$$a_0 = \frac{1}{0.0354 + 5.26L} \quad (31)$$

(30)、(31)式を(29)式に代入して得られる R_g 、および布の放射率 e_s を0.94とする場合の(19)式を(3)式に代入して、結局、通気性材料としての布の水分移動を伴わない場合の熱移動の実験式として、(32)式が得

衣服材料を通しての定常状態下での熱・水分移動の解析 (第1報)

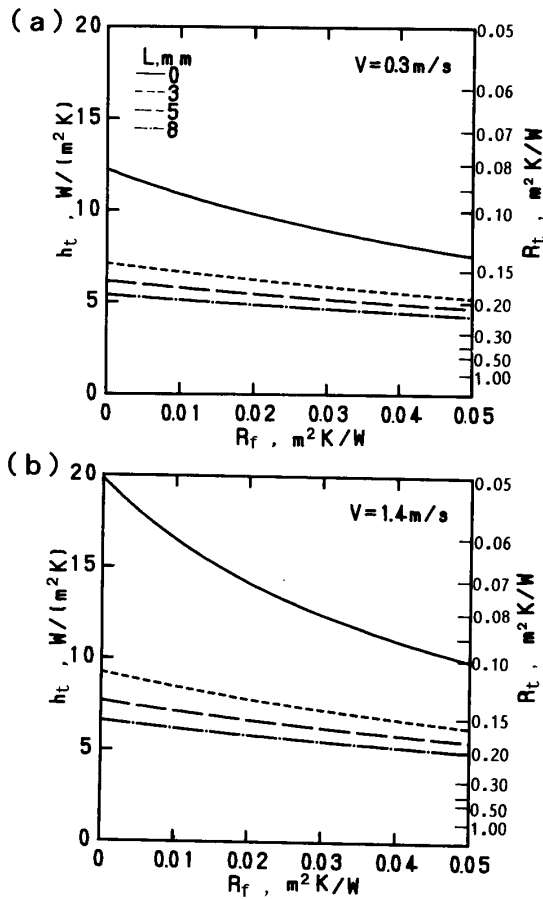


Fig. 11. The effect of thermal resistance R_f on total heat transfer coefficient h_t

A fabric (air resistance $R=200$ Pa s/m) covered the heated plate with varying air gaps of $L=0, 3, 5$, and 8 mm. (a) $V=0.3$ m/s, (b) $V=1.4$ m/s.

られる。

$$R_t = 1/h_t$$

$$= \frac{1}{12.0\sqrt{V} + 5.64} + R_f$$

$$+ \left(\frac{1}{0.0354 + 5.26L} - 26.7u^* \right) L \quad (32)$$

種々の V と L に対し、(32)式により求めた h_t の計算値と実測値との関係を Fig. 10 に示す。計算精度は $\text{rms} = 0.22 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ で、風速 $0.3 \sim 1.4$ m/s、および空気層の厚さが 8 mm 以下の本実験の風速の範囲内で高い精度で布の総括熱伝達率 h_t が計算できることがわかる。

ただし、風の貫入の程度は実験装置と密接に結び付いているので、(32)式は、本実験方法の範囲内で有効と考えられる。

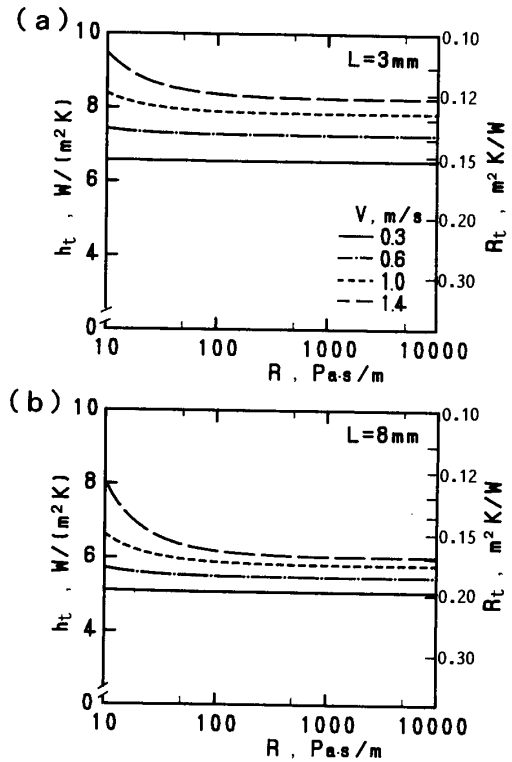


Fig. 12. The effect of air resistance R on total heat transfer coefficient h_t

A fabric ($R_f=0.012 \text{ m}^2 \text{ K/W}$) covered the heated plate with an air gap of $L=3$ mm (a) or $L=8$ mm (b) for different wind velocities $V=0.3\text{--}1.4$ m/s.

(5) 総括熱伝達率 h_t の計算例

(32)式を用いて布材料の熱抵抗 R_f が総括熱伝達率 h_t (あるいは全熱抵抗 R_t) に及ぼす影響の計算例を Fig. 11 に示している。ここで、通気抵抗 R を 200 Pa s/m とし、Fig. 11(a)では風速 0.3 m/s、Fig. 11(b)では風速 1.4 m/s の場合でそれぞれ空気層 L をパラメータとしている。空気層が存在する場合 ($L \neq 0$) には、空気層の熱抵抗が支配的であり、布材料の熱抵抗 R_f が総括熱伝達率 h_t (あるいは全熱抵抗 R_t) に及ぼす影響が小さいことが示されている。

Fig. 12 は、通気抵抗 R が、総括熱伝達率 h_t (あるいは全熱抵抗 R_t) に及ぼす影響の計算例を、布の熱抵抗 $R_f = 0.012 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ とし、空気層 $L=3$ と 8 mm の場合について、風速 V をパラメータとして図示している。通気抵抗 R の小さい布材料では、風速 V が増すにつれ、通気性の影響が大きくなること、また、 R が大きくなると風の貫入が抑制されて R の影響がなくなることがわかる。

4. 結 語

人体の乾いた皮膚を平板熱板でモデル化して、これを1層の被服材料で覆った場合の水分移動を伴わない顕熱移動を、非通気性材料と通気性をもつ布の場合について議論した。まず、非通気性材料についてふく射、伝導、対流熱抵抗からなる単純な抵抗モデルをもとに熱移動の理論式を誘導し、実験値との比較により、その妥当性を示した。ついで通気性材料については、上述の理論式に通気性による空気層内への風の浸透の影響を加えることによって実験式を導き、通気抵抗、熱抵抗、風速、空気層が水分移動を伴わない熱移動に及ぼす影響を実験的に明らかにした。

次報では、水分移動および、熱・水分同時移動について報告する。

引 用 文 献

- 1) 竹内正顕, 一色尚次, 石橋 靖: 機論 (B編), **48**, 97~104 (1982)
- 2) 竹内正顕, 石橋 靖, 長坂 晶, 一色尚次: 機論 (B編), **48**, 2518~2526 (1982)
- 3) 竹内正顕, 鈴木 学, 黒崎晏夫, 一色尚次: 機論 (B編), **49**, 1493~1502 (1983)
- 4) 竹内正顕: 繊維誌, **39**, T95~T110 (1983)
- 5) Fonceca, G. F. and Breckenridge, J. R.: *Text. Res. J.*, **35**, 95~103 (1965)
- 6) Fonceca, G. F. and Breckenridge, J. R.: *Text. Res. J.*, **35**, 221~227 (1965)
- 7) Spencer Smith, J. L.: *Clothing Res. J.*, **5**, 3~17 (1977)
- 8) Spencer Smith, J. L.: *Clothing Res. J.*, **5**, 82~100 (1977)
- 9) Farnworth, B.: *Text. Res. J.*, **56**, 653~665 (1986)
- 10) 川端季雄: 繊維誌, **37**, T130~T141 (1984)
- 11) 丹羽雅子, 中西正恵, 川端季雄: 第19回繊維工学研究討論会要旨集, 日本繊維機械学会, 72~77 (1990)
- 12) 川端季雄: 繊維誌, **40**, 59~67 (1987)
- 13) 北山直方: 伝熱工学の学び方, オーム社, 東京, 204 (1988)
- 14) 渡辺常正: 保温保冷工学, 朝倉書店, 東京, 12 (1964)
- 15) 中西正恵, 丹羽雅子: 家政誌, **40**, 797~804 (1989)
- 16) 川端季雄: 昭和61・62年度科学研究費補助金 (総合研究 A) 研究報告書, 156~161 (1988)
- 17) 川端季雄: 風合い評価の標準化と解析 (第2版), 日本繊維機械学会風合い計量と規格化研究委員会, 大阪, 33~34 (1980)
- 18) 日本熱物性学会 (編): 熱物性ハンドブック, 養賢堂, 東京, 59 (1990)
- 19) 化学工学協会 (編): 化学工学便覧改訂4版, 丸善, 東京, 330 (1978)