

単一織布および積層布の通気抵抗の繊維集合構造からの予測

中西正恵, 丹羽雅子

(奈良女子大学人間文化研究科)

平成4年1月31日受理

The Prediction of the Air Resistance of Woven Fabrics and Multilayers of Fabric Based on Fabric Structure

Masae NAKANISHI and Masako NIWA

Graduate School of Human Culture, Nara Women's University, Nara 630

In our previous paper, a theoretical equation predicting the air resistance of woven fabrics using basic fabric structural parameters was obtained based on a simple model of a fabric air flow mechanism in which the effects of both the intra-yarn and inter-yarn interstices were taken into consideration. In this paper, the adequacy of the equation was verified by comparison between the predicted and measured air resistance of various kinds of woven fabrics. In addition, the air resistance of multilayers of fabric was measured simulating actual clothing assemblies and these data were compared with the sum of resistance of each fabric layer. As a result, it was found that the addition law could be applied to the air resistance of multilayers.

(Received January 31, 1992)

Keywords: air resistance 通気抵抗, multilayers of fabric 積層布.

1. 緒言

既報¹⁾で、布の通気性設計の観点から、単純化した織物構造モデルを設定し、織物中の糸間隙と糸内の繊維間隙を考慮した通気性の予測式を誘導し、この予測式を適用して、布の繊維集合構造パラメータが通気性に及ぼす影響を定量的に示した。

本研究では、繊維および構造の異なる織布の通気性を実測し、前報の予測式の精度を確かめ、理論の妥当性について検証する。さらに、実際の着衣状態である重ね着を想定して、積層布の通気性を測定し、肌着から外衣に至る種々の組合せにおける積層布の通気性に単一布の通気抵抗の加算則が成り立つかどうかについても検討する。

2. 通気性予測式の精度検定

(1) 通気性予測式

布の通気性を表す特性値としての通気抵抗 R (Pas/m) と、通気度 F ($\text{m}^3/(\text{m}^2\text{sPa})$) は、単位布面積当たりの通気速度 V ($\text{m}^3/(\text{m}^2\text{s})$) と、その際生じる試料表裏の圧力差 $4P$ (Pa) により (1) 式で表される。

$$R = \frac{1}{F} = \frac{4P}{V} \quad (1)$$

なお、(1) 式の $4P$ と V との比例関係が本研究の測定条件である通気速度 $V=0.04 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{s})$ 以下において成立し、通気抵抗 R が一義的に決められることについては、既報²⁾ですでに明らかにした。

式(1)の F は、前報で誘導した理論に基づいて予測できる。ここで、既報¹⁾の予測式を簡単に述べる。糸の断面形態を長方形とし、経糸、緯糸で構成される糸間隙を直方体とする織物の単位構造モデルに従って、糸間隙の通気性には断面が長方形の管内の流れを表す理論式³⁾を、糸の中の流れには充填層の流れを表す Kozney-Carman 式⁴⁾⁻⁷⁾を用いて、織物の通気性を表す理論式を導いた。理論に導入する布の繊維集合構造パラメータは、糸密度 N_i ($i=1, 2$, ただし $i=1$ は経糸, 2 は緯糸を示す), 糸の tex 番手 d_i , 繊維の比重 ρ_i , 繊維の比表面積相当直径 $d_{r,i}$, 布の厚さ T_{10} (圧縮荷重 10 gf/cm^2) である。織布の通気度 F は、(2) または (2') 式で表され、第1項が糸間隙、第2項が糸内間隙の寄与を示す。

1) $B_1 < B_2$ のとき

$$F = \frac{N_1 N_2}{\mu} \left[\frac{X B_1^3 B_2}{12 T_{10}} + \frac{1}{16 K} \left(\frac{s_2}{Y_1} + \frac{s_3}{Y_2} + \frac{s_4}{(Y_1 + Y_2)} \right) \right] \quad (2)$$

ここで,

$$X = 1 - \frac{192 B_1}{\pi^5 B_2} \tanh \left(\frac{\pi B_2}{2 B_1} \right)$$

2) $B_1 \geq B_2$ のとき

$$F = \frac{N_1 N_2}{\mu} \left[\frac{X B_1 B_2^3}{12 T_{10}} + \frac{1}{16 K} \left(\frac{s_2}{Y_1} + \frac{s_3}{Y_2} + \frac{s_4}{(Y_1 + Y_2)} \right) \right] \quad (2')$$

ここで,

$$X = 1 - \frac{192 B_2}{\pi^5 B_1} \tanh \left(\frac{\pi B_1}{2 B_2} \right)$$

なお,

K : Kozney 定数, $K = 5.5$

μ : 空気の粘性係数 (Pas)

$$s_2 = A_1 B_2, \quad s_3 = A_2 B_1, \quad s_4 = A_1 A_2 \quad (3)$$

$$Y_i = \frac{H_i V_{fi}^2}{d_{ri}^2 (1 - V_{fi})^3} \quad (i=1, 2) \quad (4)$$

A_1, A_2 : 布平面に対して垂直に投影したときの経糸幅, 緯糸幅 (m) で, (5) 式の実験式¹⁾で見積る.

$$A_i = 0.3548 D_i^{0.65} \quad (5)$$

ここで,

$$D_i = \frac{d_i}{\rho_i} \quad (6)$$

ただし, (5) 式による A_i が, $A_i > 1/N_i$ のとき,

$$A_i = \frac{1}{N_i} \quad (7)$$

B_1, B_2 : 糸間隙の緯糸に沿った長さ, 経糸に沿った長さ (m) で, A_i と N_i から (8) 式で導かれる.

$$B_i = \frac{1}{N_i} - A_i \quad (8)$$

H_1, H_2 : 布断面に対して垂直に投影したときの経糸幅, 緯糸幅 (m) で, (9) 式の実験式¹⁾で見積る.

$$H_1 = \frac{T_{10} \sqrt{D_1}}{\sqrt{D_1} + \sqrt{D_2}}, \quad H_2 = \frac{T_{10} \sqrt{D_2}}{\sqrt{D_1} + \sqrt{D_2}} \quad (9)$$

V_{f1}, V_{f2} : 経糸, 緯糸の繊維体積分率で, 糸の断面を H_i, A_i を辺の長さとする長方形として, (10) 式で表される.

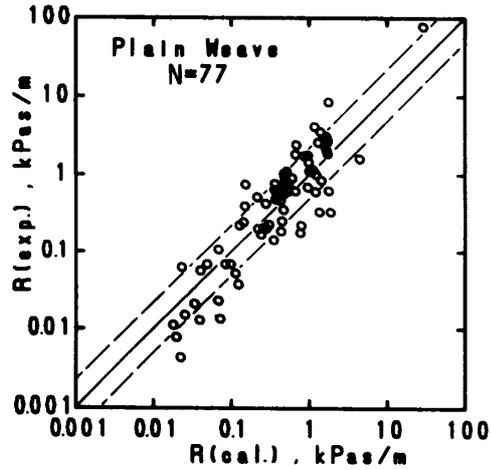


Fig. 1. Inspection of the accuracy of prediction equation (2, 2') for various kinds of plain woven fabrics.

N : number of samples.

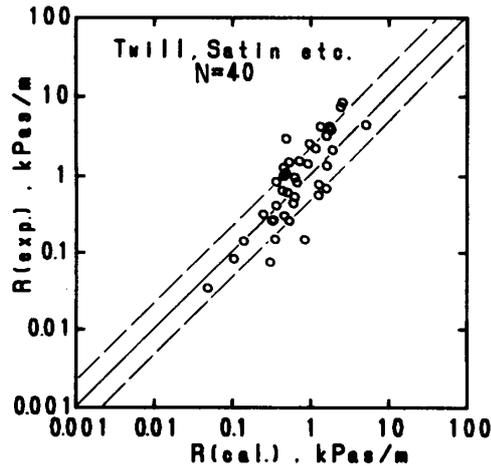


Fig. 2. Inspection of the accuracy of prediction equation (2, 2') for various kinds of twill or satin fabrics.

N : number of samples.

$$V_{fi} = \frac{d_i}{10^3 \rho_i H_i A_i} \quad (10)$$

(2) 織物の通気抵抗の理論式の検証

通気性予測式 (2) または (2') 式の検証のため, スーツ地, ドレスシャツ地, ドレス地などを含む羊毛, 綿, 絹, ポリエステルなど各種平織布 77 種を試料とし, それらの通気抵抗 R を通気性試験機 KESF-8AP²⁾ により, この装置の標準条件 (試料面積 $2\pi \text{ cm}^2$, 通気速度 $V = 0.04 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{s})$) で測定し, 他方, 布の構造パラメータから予測式により計算値を求めた. 両者の関係を Fig. 1 に両対数グラフで示す. この場合の実測値と計算値の差の 2 乗

単一繊維および積層布の通気抵抗の繊維集合構造からの予測

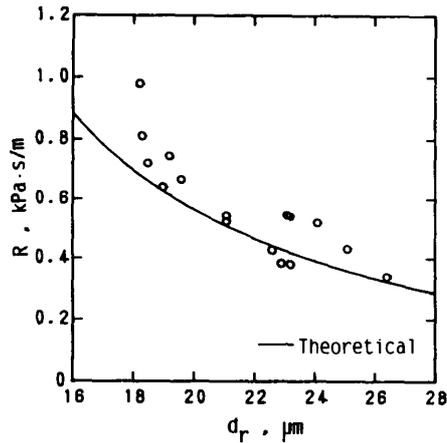


Fig. 3. The effect of fiber diameter on air resistance of fabrics

Circles (O) show experimental data of 16 twill fabrics whose structural parameters are almost the same except for the wool fiber diameter. The line shows the calculation by Equation (2, 2') using the following fabric parameters. $N_1=2900$, $N_2=2260 \text{ m}^{-1}$, $d_1=48$, $d_2=50 \text{ tex}$, $T_{10}=7.1 \times 10^{-4} \text{ m}$, $\rho=1.31 \times 10^6 \text{ g/m}^3$.

平均の平方根 (RMS) は 0.34 であるが、約 4.5 decade にわたる R の実測値を簡単な構造パラメータで計算できることを考慮すれば、かなりの一致と考えられる。

平織布以外の布 40 種にも適用した結果を Fig. 2 に示すが、平織布と同程度の精度で予測できることが確認さ

れた。ただし、予備実験に用いた試料の中に、1 例ではあるが、 R の実測値 $0.495 \text{ kPa}\cdot\text{s/m}$ に対して、計算値 $0.028 \text{ kPa}\cdot\text{s/m}$ となる一致度の悪い絹の綾織布があった。この布は無撚糸であり、主として紡績糸のデータをもとにして導いた糸幅の予測式(5)により見積られる糸幅 A は、観測値の 0.6 倍程度と小さくなるためである。この場合、観測した糸幅を用いて R の計算をすると $0.390 \text{ kPa}\cdot\text{s/m}$ となり、 R の実測値に近い。このことから、無撚糸の布の場合も精度よく織物の通気抵抗を予測するには、糸の撚りの効果を導入して、糸幅を予測する(5)式の修正が必要で、このことについては今後、研究を続行する予定である。

Fig. 3 は、羊毛繊維の平均直径を異にする同一製織条件で作成された綾織布⁹⁾ 16 種について、 R の実測値と繊維直径 d_r との関係をプロットしたもので、実線はこれらの布の中から、繊維直径が大きい布、中間程度の布、小さい布を 3 種選び、これらの布の構造パラメータの平均値を用いて予測計算される R を示している。繊維が太くなるにつれ R が減少する傾向が認められ、また、予測計算値も繊維の太さの影響を忠実に予測していることがわかる。

以上のように、織物の通気抵抗を布の簡単な繊維集合構造パラメータから予測する(2), (2')式の妥当性が、実測値との比較から示された。

Table 1. Details of samples

Sample No.	$R^{\#1}$ (kPa·s/m)	$T^{\#2}$ (mm)	Weight (g/m ²)	Fiber type ^{#3}	Fabric construction	End-uses
A	0.121	0.835	151	C	rib stitch	underwear
B	0.011	0.324	95	P	plain stitch	lingerie
C	0.070	0.348	165	P/C	plain weave	summer dress shirt
D	1.588	0.405	104	C	plain weave	winter dress shirt
E	0.016	0.365	62	S	plain weave	blouse, one-piece
F	0.485	0.137	44	S	plain weave	blouse, one-piece
G	0.043	0.142	72	Cu	plain weave	lining
H	0.486	0.103	69	Cu	twill weave	lining
I	0.188	0.505	179	W	plain weave	summer suit
J	1.065	0.783	284	W	twill weave	winter suit
K	0.126	0.155	327	W	interlock stitch	suit, one-piece
L	0.589	2.238	353	W	twill weave	overcoat
M	1.454	0.509	159	C	twill weave	overcoat
N	0.110	2.550	215	W	plain stitch	vest, sweater
O	0.208	0.348	165	W/P	plain weave	summer suit
P	0.054	0.901	227	W	mock-leno	summer jacket

*1 Air resistance, *2 Thickness at pressure 0.5 gf/cm^2 , *3 C: cotton, P: polyester, S: silk, Cu: cupra, W: wool.

3. 積層布の通気抵抗

(1) 積層布のモデル

積層布の通気抵抗に対して、各布の通気抵抗が直列に並んだ単純化モデルを適用すると、(11)式で示される。

$$R_{at} = R_{a1} + R_{a2} + \dots \quad (11)$$

ここで、

R_{at} : 積層布の通気抵抗 (Pas/m)

R_{a1}, R_{a2}, \dots : 各単一布の通気抵抗 (Pas/m)

ここでは、(11)式で表される単一布の通気抵抗の和である R_{at} と、積層順や布間の空気層を変化させた条件下で測定した積層布の実測値 R とを比較し、(11)式の抵抗の加算則について検討する。なお、(1)式の通気速度 V と圧力差 ΔP との比例関係が積層布においても成立することを確認している。

(2) 実験

積層布の通気抵抗 R の測定は、通気性試験機 KESF-8AP に、積層布用のアタッチメントを用い、布間の空気層を設けるために、有効試料の大きさと同じ円形の穴をあけたスペーサーを用いる。これにより、空気層の厚さ $L_g = 0.5 \text{ mm} \sim 15 \text{ mm}$ まで任意に変化させることができる。なお、測定は KESF-8AP の標準条件で行う。

試料として、各種衣服用途の代表的な織布、編布 16 種を選び、それらの詳細を Table 1 に示す。なお、同一試料布を重ねる実験には、通気抵抗の大きい密な布とし

Table 2. The air resistance of each specimen of samples D and P

Specimen	R (kPas/m)	Specimen	R (kPas/m)
D ₁	1.588	P ₁	0.054
D ₂	1.650	P ₂	0.047
D ₃	1.463	P ₃	0.044
D ₄	1.577	P ₄	0.054
D ₅	1.604	P ₅	0.052
R_m^{*1}	1.576	R_m	0.050
C.V.*2	4.4%	C.V.	9.0%

*1 Mean value of 5 specimens, *2 Coefficient of variance.

て綿ブロード(試料D)と、通気抵抗が小さい糸間隙の大きいモックレノ織りの布(試料P)を選び、各5枚の試験片を用意した。Table 2は、各試験片5枚の通気抵抗とその平均値および変動率を示す。異種の布からなる積層布の積層順と空気層の影響を調べる実験には、試料D、Pと、通気抵抗の大きい冬用スーツ地(J)、中程度の布として夏用のスーツ地(O)、小さい布として夏用のドレスシャツ地(C)の5種類を用いた。また、実際の着用状態を想定し、Table 1から適宜、試料の組合せを季節、性別などを考慮して選び、積層布の通気抵抗を測定

Table 3. The ratio of the air resistance R of multilayers of fabric to the sum of resistance of each specimen, R_{at} , when the same kinds of fabrics (sample D and P) are assembled together with varying air gap lengths (0-15mm) between the specimens

Fabric assembly	Gap length (mm)							R_{at} kPas/m
	0	0.5	1.0	3.5	5.0	8.0	15.0	
D ₂ +D ₅	1.023	1.017	1.017	1.019	1.016	1.017	1.017	3.254
D ₄ +D ₃	1.033	1.028	1.026	1.023	—	—	—	3.040
D ₂ +D ₅ +D ₁	1.019	1.011	1.012	1.012	1.010	1.006	—	4.842
D ₁ +D ₄ +D ₃	1.029	1.022	1.019	1.017	—	—	—	4.628
D ₂ +D ₅ +D ₁ +D ₄	1.030	1.018	1.019	1.019	1.019	—	—	6.419
D ₅ +D ₁ +D ₄ +D ₃	1.030	1.023	1.019	1.019	—	—	—	6.232
D ₂ +D ₅ +D ₁ +D ₄ +D ₃	1.029	1.021	1.017	1.016	—	—	—	7.882
P ₁ +P ₄	1.028	1.009	0.991	1.000	0.991	0.991	1.019	0.108
P ₂ +P ₃	1.022	1.022	1.011	1.033	—	—	—	0.091
P ₁ +P ₄ +P ₅	1.088	1.025	1.006	1.006	1.006	1.006	—	0.160
P ₅ +P ₂ +P ₃	1.063	1.049	1.021	1.028	—	—	—	0.143
P ₁ +P ₄ +P ₅ +P ₃	1.174	1.082	1.014	1.010	1.005	—	—	0.207
P ₁ +P ₅ +P ₂ +P ₃	1.152	1.051	1.020	1.010	—	—	—	0.197
P ₁ +P ₄ +P ₅ +P ₂ +P ₃	1.235	1.092	1.024	1.016	—	—	—	0.251

単一織布および積層布の通気抵抗の繊維集合構造からの予測

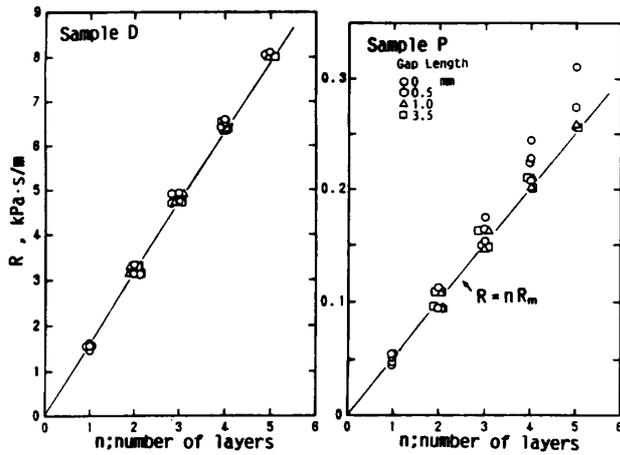


Fig. 4. The relation between the number of layers, n and air resistance of multilayers of fabric, R for the samples D (left: Fig. 4a) and P (right: Fig. 4b) in Table 1. The lines are the calculations by Equation (12) using the mean value of 5 specimens in Table 2.

する。

(3) 結果と考察

Table 3 は同一種類の布 (試料DとP) を $L_g=0\sim 15$ mm の空気層条件で 2~5 枚まで重ねた場合について、(11) 式による計算値 R_{at} に対する通気抵抗の実測値 R との比 R/R_{at} を示している。また、Fig. 4 は、積層枚数 n と、積層布の通気抵抗 R との関係を示している。

料D, Fig. 4b は試料Pについて、空気層別に示している。なお、Table 2 で示したように、同一種類の布であっても試験片の通気抵抗の変動が見られるため、5枚の中から2, 3, 4枚を選んで積層布の通気抵抗を測定する際には、単一布の通気抵抗の和が最大になる試験片の組合せと最小になる組合せについて行った。(11)式中の各単一布の通気抵抗 R_{a1}, R_{a2}, \dots を5枚の試験片の通気抵抗の平均値 R_m とすると、 n 枚重ねた布の通気抵抗は、(11)式を仮定すると(12)式で表される。Fig. 4中の直線は(12)式を示している。

$$R_{at} = nR_m \tag{12}$$

密な布Dでは、空気層 $L_g=0$ 、すなわち密着して積層した場合の R が、空気層を設けて測定した R よりも常に大きい。しかし、 $L_g=0$ も含め空気層の大きさに関わらず、 R_{at} に対し R は 0.3~3.3% 大きいに過ぎず、すべての値が、Fig. 4a で(12)式の直線近似が可能で、(11)式が成立することがわかる。

一方、粗な布Pにおいては、空気層が1mm以上の場合は R_{at} に対し R は、 $-1\sim +2.5\%$ 変化するに過ぎず、(11)式が成立し、また L_g の影響もみられないことがわかる。しかし、空気層が $L_g=0$ と 0.5 mm の場合は、重ね枚数が増すとともに、実測した R が R_{at} よりも大きくなる傾向がみられ、 $L_g=0$ の時、最大 23.5%、 $L_g=0.5$ mm の時 9.2% の増大がみられる。これは、布を積層する際に、織り周期を完全に揃えて重ねることは不可能なため、試料Pのような糸間隙の大きい構造の布で

Table 4. The ratio of the air resistance R of multilayers of fabric to the sum of resistance of each specimen, R_{at} , when different kinds of fabrics are assembled together, changing the gap length between fabrics and the combination of the fabric assembly

Fabric assembly	Gap length (mm)							R_{at} kPas/m
	0	0.5	1.0	3.5	5.0	8.0	15.0	
D+O	1.006	1.002	0.997	0.998	0.994	0.997	0.997	1.796
D+C	1.003	0.999	0.994	0.996	0.995	0.996	0.996	1.658
C+O	1.029	1.007	1.004	1.004	1.007	1.007	1.000	0.278
D+O+C	1.014	1.004	1.001	0.998	—	0.997	—	1.866
D+C+O	1.010	1.004	1.001	0.997	—	0.998	—	1.866
C+D+O	1.021	1.002	0.999	0.999	—	0.998	—	1.866
D+O+C+J	1.016	1.012	1.010	1.008	1.010	—	—	2.931
C+D+J+O	1.037	1.013	—	—	1.010	—	—	2.931
O+D+C+J	1.030	1.013	—	—	1.006	—	—	2.931
D+O+C+J+P	1.023	1.018	1.012	1.010	—	—	—	2.985
O+P+D+C+J	1.040	1.015	—	1.007	—	—	—	2.985
C+P+D+J+O	1.065	1.015	—	1.008	—	—	—	2.985

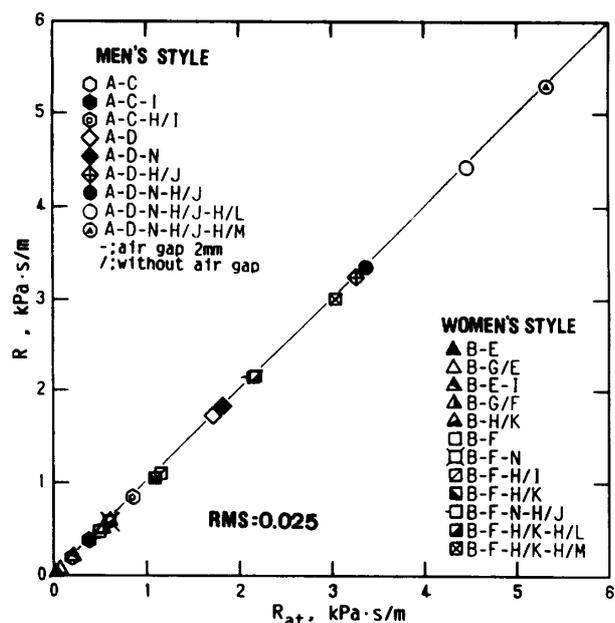


Fig. 5. The relation between measured resistance, R of multilayers of fabric simulating actual clothing system and calculated resistance, R_{at} by Equation (11).

は、布の重なりによって貫通した糸間隙気孔を狭め、抵抗の増大を導くのではないかと考えられる。

Table 4 は、異種の布を積層した場合の結果を示す。空気層 $L_0=0.5\sim 15\text{ mm}$ の範囲では、 R_{at} に対し R は、 $-1\sim +2\%$ のわずかな差違にしか過ぎず、この範囲の空気層では、空気層の大きさ、さらに積層順に関わらず、(11)式が成立することがわかる。 $L_0=0$ の場合の R についても、5枚重ねの場合に最高 R_{at} よりも 6.5% 大きい程度にとどまり、積層順の影響も、実測値 R の最大値と最小値とを比較しても最高 4.1% の違いにすぎない。

Table 3, 4 から、空気層が 1 mm 以上あれば、布の種類を問わず、積層順や、空気層の大きさに関わらず、積層布の通気抵抗に対して(11)式が成り立ち、すなわち、単一布の通気抵抗の和で表されることが明らかである。

Fig. 5 は、肌着から外衣まで各種衣服の実際の着用時の組合せを想定して、積層布の通気抵抗 R を測定した結果と(11)式により計算した R_{at} との関係を示す。ここで、布間の空気層の条件は、1着の衣服の裏地と表地とは密着重ね、すなわち $L_0=0$ とし、別々の衣服間には、空気層が 1 mm 以上では空気層の影響が見られないという上述の結果が得られたため、すべて衣服間隙を $L_0=2\text{ mm}$ として測定している。Fig. 5 のように実際の着衣系を想定した積層布の R は、(11)式で十分な精度で予測

できることが示されている。

衣服の着衣構成を考えた場合、試料 P のような目の粗い布どうしを 4枚 5枚と密着して重ねる場合はほとんどなく、また、Table 4 で各種の布を密着して重ねた場合でも、加算則を適用して積層布の通気抵抗を予測した場合の予測誤差は、5枚重ねの時に最高 6.5% にとどまった。さらに、Table 2 で示したように、同一種類の布でも、布の測定場所により通気抵抗は異なり、その変動が大きい布もあり、例えば試料 0 の夏用スーツ地では、17箇所測定した場合の変動係数は 13% であった。以上のことを考慮すると、實際上、積層布の通気抵抗 R は、空気層が 0 あるいは 0.5 mm の場合も含め、空気層の大きさ、重ね順に関わらず、単一布の通気抵抗の和としての R_{at} に等しいとみなされる。すなわち、加算則を表す(11)式が、空気層、重ね順に関わらず、成立するとみなすことができる。

4. 結 語

既報で、織物中の糸間隙と糸内の繊維間隙を考慮して、簡単な織物構造及びその構造を決定する客観的に得られる織物構造パラメータに基づいて、布の通気抵抗を予測する理論式を導いた。この予測式の精度を確かめるために、本報では布の通気抵抗の予測値と実測値とを比較し、予測理論式の妥当性を検証した。また、実際の着衣状態を想定した積層布の通気抵抗は、単一布の通気抵抗の加算則が成立することを明らかにした。

引 用 文 献

- 1) 中西正恵, 丹羽雅子: 家政誌, 43, 293 (1992)
- 2) 中西正恵, 丹羽雅子: 家政誌, 40, 797 (1989)
- 3) 日本機械学会 (編): 機械工学便覧, A5-76 (1987年度版)
- 4) Kozney, J.: *Wasserkraft u. Wasserwirtschaft*, 22, 67, 86 (1927)
- 5) Carman, P. C.: *Trans. Inst. Chem. Eng.*, 15, 150 (1937)
- 6) Carman, P. C.: *Trans. Inst. Chem. Eng.*, 16, 168 (1938)
- 7) McGregor, R.: *J. Soc. Dyers and Colourists*, 81, 429 (1965)
- 8) 川端季雄: 織機誌, 40, 59 (1987)
- 9) Hunter, L., Kawabata, S., Gee, E. and Niwa, M.: Objective specification of fabric quality, mechanical properties and performance (Ed. by Postle, R., Kawabata, S. and Niwa, M.), *The Textile Machinery Society of Japan*, 167 (1982)