

織物構造モデルに基づく定常状態における 織物の水分移動抵抗の予測

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7年11月6日受理

Prediction of Water Vapor Transfer Resistance of Woven Fabrics under a Steady State Condition Based on a Weave Structural Model

Masae NAKANISHI and Masako NIWA*

Faculty of Home Economics, Kobe Women's University, Suma-ku, Kobe 654

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

A prediction equation of the steady state water vapor transfer resistance of woven fabrics was obtained based on a simple water vapor transfer model through a simplified fabric structural unit. It was assumed that the volume fraction of air space within fabrics is larger than the fiber volume fraction, and that the water vapor resistance through fibers, even for hygroscopic fibers such as cotton, is much larger than that of air. Therefore, the effects of both the intra-yarn and inter-yarn interstices were taken into consideration, but the effect of the passage through hygroscopic fibers was not included in the transfer model.

As for the fabric structure parameters used for the calculation, the simpler parameters of fabric thickness, weave density, yarn count, and fiber density were selected from the viewpoint of the application of fabric performance design. The validity of the prediction equation was verified by comparing the calculations and the experimental data of water vapor resistances measured for 40 woven fabric samples. This result also suggests that the effect of the air space within fabrics on the water vapor resistance of fabrics under the steady state condition is much larger than that of the passage within hygroscopic fibers.

(Received November 6, 1995)

Keywords: water vapor transfer resistance 水分移動抵抗, thermal comfort 温熱的快適性, evaporative heat transfer 蒸発熱移動, weave structure 織物構造, steady state condition 定常状態, hygroscopicity 吸湿性.

1. 緒 言

人体は発汗および不感蒸泄により, 常に皮膚から水分を発散させている. この水分を皮膚表面から衣服を経て外部環境へ適切に移動させることが, 衣服の着心地や衛生的機能の面から重要である. これまでに布中での定常状態, および過渡状態での水分移動の機構や測定方法に関する研究が多くなされている^{1)~16)}. しかし, 布中の水分の移動は, 糸および繊維間の空隙を通じた移動と繊維自身の吸脱湿によるものとが総合し

た現象で, 繊維が集合した結果としてできる空隙形状も複雑で, 空隙中の移動も複雑である. そのため, 布中の水分の移動を繊維自身の性質と布の繊維集合構造とから詳細に理論的に解析した成果はこれまでに見られない. 本研究では, 布の性能設計の観点から, 既報¹⁷⁾¹⁸⁾の織物の通気抵抗の理論的誘導に用いた織物構造モデルに基づいて, 織物の定常状態での水分移動抵抗の理論を誘導し, 実験によりその妥当性を検証する.

2. 理 論

Fig. 1 の織物の単位構造モデルに従って、本研究では、布中の糸間隙、糸内の繊維間隙、さらに繊維内で生じる実際の複雑な水分の移動を以下のように単純化することにより、実用的で、かつ簡便な理論式を導く。

等温状態下において、布の表裏に水蒸気分圧差 ΔP_m (Pa) がある場合の布の水分移動特性値として水分移動抵抗 W_i ($\text{m}^2 \text{s Pa/g}$) をとりあげる。そして、布の単位構造を以下のように4つに区分し、それぞれ水分移動抵抗を異にする4部分が独立に並列して存在すると仮定して、 W_i を誘導する。すなわち、各部分での水分移動量 (g/s) を次の(1)~(4)のように個別に考える。すなわち、

- (1) M_1 : 糸間隙部分を直方体と仮定し、この部分を通過する水分移動量、

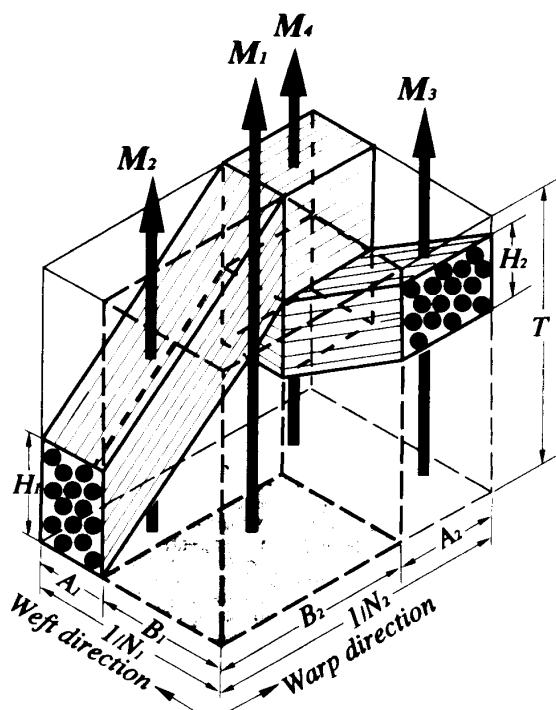


Fig. 1. Unit structural model of plain woven fabric

A_1, A_2 , width of warp or weft yarn (m); H_1, H_2 , width of warp or weft yarn projected from the fabric section (m); T , fabric thickness (m); N_1, N_2 , warp or weft yarn density (m^{-1}); $B_1, B_2 = 1/N_1 - A_1, 1/N_2 - A_2$, length of inter-yarn interstice (m); M_1 , water vapor transmission rate through the inter-yarn interstice (g/s); M_2 , water vapor transmission rate through the warp yarn lying between adjacent weft yarns (g/s); M_3 , water vapor transmission rate through the weft yarn lying between adjacent warp yarns (g/s); M_4 , water vapor transmission rate through the intersection of the weft and warp yarns (g/s).

- (2) M_2 : 経糸のみの部分を通過する水分移動量、
 (3) M_3 : 緯糸のみの部分を通過する水分移動量、
 (4) M_4 : 経糸と緯糸の交差部分を通過する水分移動量。

単位構造中の水分移動量を M_i (g/s) とすると、これは4つの部分での移動量の和で表されるとする。

$$M_i = M_1 + M_2 + M_3 + M_4 \quad (1)$$

各水分移動量 M_1, M_2, M_3, M_4 を以下のように考える。

- (1) 糸間隙を通過する水分移動量 M_1

静止空気の単位厚さあたりの水分移動抵抗を ω_a (m s Pa/g) とし、直方体の高さを布の厚さ T (m) とすると、この部分の水分移動抵抗 W_1 ($\text{m}^2 \text{s Pa/g}$) は、(2) 式で表される。

$$W_1 = T \omega_a \quad (2)$$

糸間隙部分の底面積を s_1 (m^2) とし、布の表裏の水蒸気分圧差 ΔP_m から、糸間隙を通過する水分移動量 M_1 は、

$$M_1 = \Delta P_m s_1 / W_1 \quad (3)$$

ここで、

$$s_1 = B_1 B_2 \quad (4)$$

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)。

- (2) 糸部分を通過する水分移動量 M_2, M_3, M_4

布平面に対して垂直に投影したときの経糸部分の底面積を s_2 とし、この部分の水分移動量 M_2 は、厚み H_1 の経糸の抵抗と厚さ T から H_1 を引いた長さの空気の抵抗とが直列した抵抗と仮定し、この部分での抵抗を W_2 として、(5) 式で表す。

$$M_2 = \Delta P_m s_2 / W_2 \quad (5)$$

ここで、

$$W_2 = (T - H_1) \omega_a + H_1 \omega_{y1} \quad (6)$$

$$s_2 = A_1 B_2 \quad (7)$$

A_1 : 布平面に対して垂直に投影したときの経糸幅 (m), ω_{y1} : 経糸の単位厚さあたりの水分移動抵抗 (m s Pa/g).

緯糸のみの部分の底面積 s_3 の水分移動量 M_3 は、経糸のみの部分と同様に、厚み H_2 の緯糸の抵抗と厚さ T から H_2 を引いた長さの空気の抵抗が直列した抵抗と仮定し、この部分の抵抗を W_3 として、

$$M_3 = \Delta P_m s_3 / W_3 \quad (8)$$

ここで、

$$W_3 = (T - H_2) \omega_a + H_2 \omega_{y2} \quad (9)$$

$$s_3 = A_2 B_1 \quad (10)$$

A_2 : 布平面に対して垂直に投影したときの緯糸幅

織物構造モデルに基づく定常状態における織物の水分移動抵抗の予測

(m), ω_{y2} : 緯糸の単位厚さあたりの水分移動抵抗 (m s Pa/g).

経糸と緯糸が交差する部分の底面積 s_4 の水分移動量 M_4 は, この部分の抵抗を W_4 として (11) 式で表す. この部分の W_4 は, 厚み H_1 の経糸の抵抗と厚み H_2 の緯糸の抵抗と, 布の厚み T と経糸, 緯糸の厚みの和 ($H_1 + H_2$) との差, すなわち, $T - (H_1 + H_2)$ の空気層の抵抗の和と考え, (12) 式で表されるものとする.

$$M_4 = \Delta P_m s_4 / W_4 \quad (11)$$

ここで,

$$W_4 = H_1 \omega_{x1} + H_2 \omega_{y2} + [T - (H_1 + H_2)] \omega_a \quad (12)$$

$$s_4 = A_1 A_2 \quad (13)$$

(3) 織物の水分移動抵抗の予測式

以上の単位構造モデルに基づき 4 部分を通過する水分移動量 M_1, M_2, M_3, M_4 は各々, (3), (5), (8), (11) 式で表され, これらを (1) 式に代入して, 単位構造を通過する移動量 M_i が得られる. したがって, 布面積 a (m²) を通過する移動量 M (g/s) は,

$$M = M_i N_1 N_2 a \quad (14)$$

ここで, N_1, N_2 : 経糸, 緯糸密度 (本/m).

布の水分移動係数 m_f (g/(m² s Pa)), およびその逆数の布の水分移動抵抗 W_f (m² s Pa/g) は (15) 式で定義される.

$$m_f = \frac{1}{W_f} = \frac{M}{\Delta P_m a} \quad (15)$$

(15) 式に (3), (5), (8), (11), (14) 式を代入して, 織布の水分移動係数 m_f は, (16) 式で表される.

$$m_f = N_1 N_2 \left(\frac{s_1}{W_1} + \frac{s_2}{W_2} + \frac{s_3}{W_3} + \frac{s_4}{W_4} \right) \quad (16)$$

(16) 式で, m_f を理論計算するためには, 布の基本構造モデルに基づく構造パラメータと $\omega_a, \omega_{x1}, \omega_{y2}$ を与えられた条件とする. ω_a は, 以下の方法で実験により, ω_{x1}, ω_{y2} は単純化した糸の繊維集合構造モデルにより以下のようにして決定する. また, 糸の厚みや糸幅など布の構造パラメータの決定は, 既報¹⁾に詳述しているが, 本報でも簡単に後述する.

(4) 理論に導入する空気および糸の水分移動抵抗

$$\omega_a, \omega_{x1}, \omega_{y2}$$

1) 空気の水分移動抵抗 ω_a

空気の単位厚さあたりの水分移動抵抗 ω_a (m s Pa/g) は, サーモラボ II¹⁹⁾ を用いた以下の実験により決定する. Fig. 2 のように, 風速をコントロールできる風洞内に, 濡れた濾紙 (水分率約 300%) を平板熱

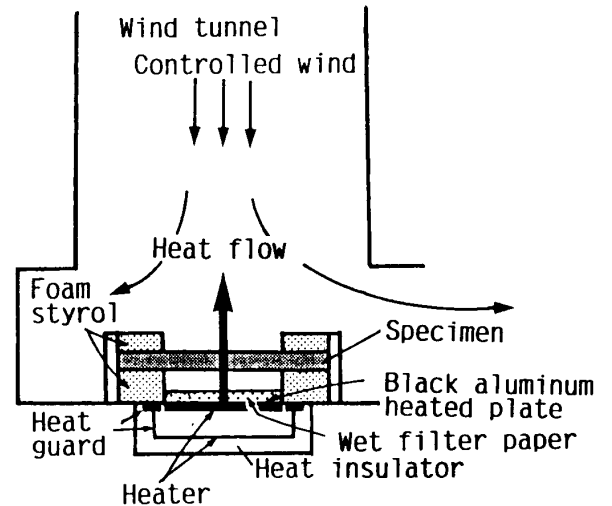


Fig. 2. Measurement method of evaporative heat transfer using Thermo Labo II¹⁹⁾

Electric power supply to keep the heated plate temperature constant at the same value as the environmental air temperature is measured as the evaporative heat loss from a wet sheet of filter paper on the plate. Moisture transfer rate is estimated from the measured evaporative heat loss and latent heat of evaporation of water.

板 (10 cm × 10 cm) に密着させて置き, 熱板と布との間隙すなわち, 空気層の厚さ L (m) を設けて熱板を布 (以後“基準布”と称す) で覆い, 環境空気温度と同温に熱板温度を維持するのに必要な供給電力を測定する. これをこの系での水の蒸発による潜熱移動量 Q_e (W/m²) と考え, 熱板温度における飽和水蒸気圧 P_b (Pa) と環境空気中の水蒸気分圧 P_a (Pa) との差と, 水の蒸発潜熱 E (J/g) を用いて, この系の水分移動抵抗 W_i (m² s Pa/g) を (17) 式により求める.

$$W_i = \frac{E(P_b - P_a)}{Q_e} \quad (17)$$

いま, 空気層の厚さ L を変化させて W_i を測定し, 空気層が ΔL 増加することによる W_i の増分 ΔW_i が, ΔL の空気層の水分移動抵抗に相当すると考えると, 単位空気層厚さあたりの空気の水分移動抵抗 ω_a は, (18) 式で表される.

$$\omega_a = \frac{\Delta W_i}{\Delta L} \quad (18)$$

ここで, ω_a は静止空気層の単位厚さあたりの水分移動抵抗で, 上述の Q_e の測定時に空気層内への風の浸透の影響があつてはならない. このことを考慮して, 基準布と風速条件を選ぶ必要があり, これについては

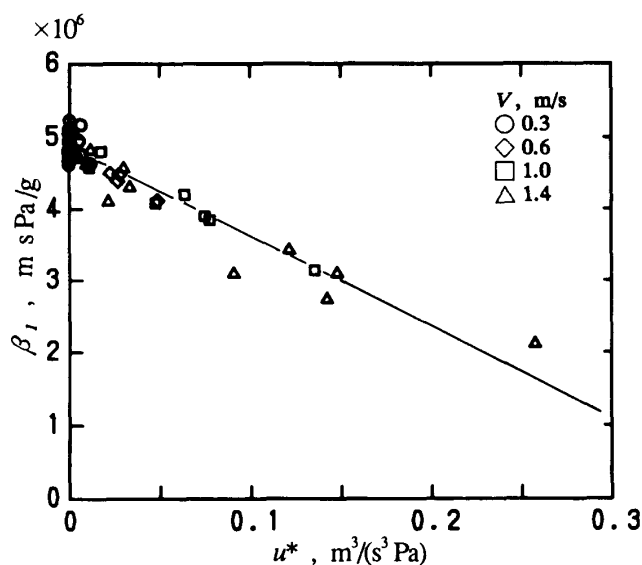


Fig. 3. Relation between a wind penetration parameter $u^*(=V^2/R; V$, wind velocity; R , air resistance of a fabric) and the slope β_1 in the linear relation between air gap L and water vapor resistance W_i obtained by the measurement of evaporative heat transfer, as shown in Fig. 2

This figure³⁰⁾ was obtained from the results of 30 kinds of woven fabric samples measured under different wind velocity conditions ranging from 0.3 to 1.4 (m/s), and with different air gap ranging from 3 to 8 (mm).

既報²⁰⁾で詳述しているが、30種類の織物について上述の実験を空気層 3, 5, 8 mm の 3 条件で行い、風速 V (m/s) をパラメータとした W_i と L との関係を $W_i = \beta_0 + \beta_1 L$ と直線近似した場合の勾配 β_1 (m s Pa/g) が、Fig. 3 のように V と布の通気抵抗 R (Pa s/m) で表される風の貫入パラメータ $u^* = V^2/R$ の影響をうけるため、風の浸透の影響が無視できる u^* が 0 に近い値をとるような、通気抵抗の布と風速条件を選ぶ必要がある。

2) 糸の水分移動抵抗 ω_{y1} , ω_{y2} の誘導

糸の断面構造を Fig. 4 のように、円形断面の繊維が正三角形の頂点に規則正しく配列し、図内の影で示した部分を繊維間隙の水蒸気の流れに有効な通路と仮定する。ここでは糸は平行繊維束の糸と仮定し、糸の厚み H_i ($i=1, 2$. 添字はたて・よこ糸を示す) の決定については後述する。

いま、Fig. 4 を拡大した Fig. 5 で、繊維の半径を r とし、繊維の中心間の距離を $2z$ とする。隣接する繊維の断面の円の中心を O 点、 C 点とし、半径 $(r+z)/$

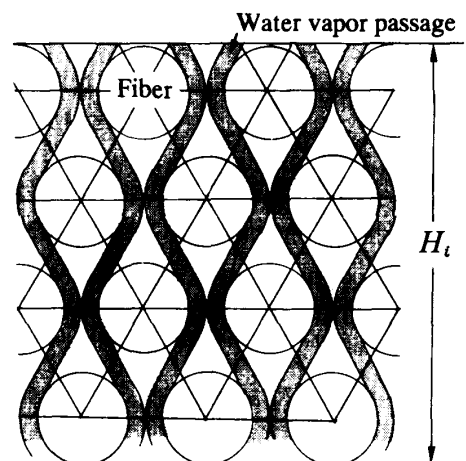


Fig. 4. Water vapor passage model through a yarn

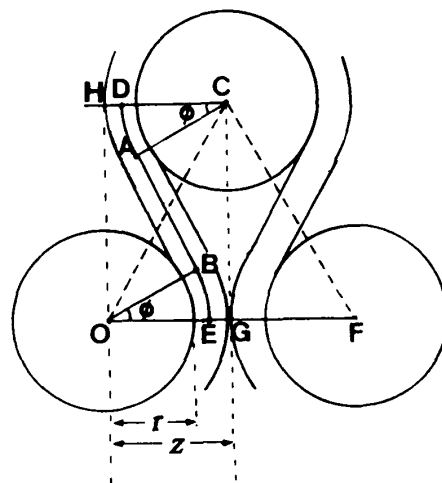


Fig. 5. Magnification of Fig. 4

2 の二つの円に接する直線の接点 A, B を $\angle BOE = \angle ACD = \phi$ (degree) の条件下で求めると、直線 AB 間の距離と ϕ , 円弧 $\widehat{AD}$, $\widehat{BE}$ の長さは、それぞれ (19) ~ (21) 式で求められる。

$$AB = \sqrt{(3z^2 - 2zr - r^2)} \quad (19)$$

$$\phi = \left[\sin^{-1} \left(\frac{r+z}{2z} \right) \right] - 30 \quad (20)$$

$$\widehat{AD} = \widehat{BE} = \frac{(r+z) \pi \phi}{360} \quad (21)$$

糸の単位厚さあたりの水分移動抵抗 ω_y は、Fig. 5 の糸の構成単位 HOGC の水分移動抵抗を W_y ($m^2 s$ Pa/g) とすると次式となる。

$$\omega_y = W_y / \overline{CG} \quad (22)$$

先述の仮定より水蒸気の通路を幅 $z-r$, 長さ $\overline{AB} + \widehat{AD} + \widehat{BE}$ の屈曲通路とし、曲路率 τ を、次式で定義する。

織物構造モデルに基づく定常状態における織物の水分移動抵抗の予測

$$\tau = (\overline{AB} + \overline{AD} + \overline{BE}) / \overline{CG} \quad (23)$$

ここで、 W_y は Fig. 5 のモデルの屈曲した通路を幅 $z-r$ で、長さが $\overline{CG}$ の τ 倍長くなった直線通路の空気的水分移動抵抗と考える。すなわち、 W_y はこの有効通路（空隙率 $\varepsilon = (z-r)/z$ 、長さ $\tau \cdot \overline{CG}$ ）の抵抗と繊維を含む他の部分の抵抗との並列と考えられるが、本研究では、後者の水分移動抵抗が空気的水分移動抵抗よりはるかに大きく、この部分の水分移動量は、ここではゼロと仮定するため、 W_y は次式で記述される。

$$W_y = \tau \cdot \overline{CG} \cdot \omega_a / \varepsilon \quad (24)$$

ゆえに、糸の単位厚さあたりの水分移動抵抗は、次式で表されると仮定する。

$$\omega_y = \frac{\tau \cdot \omega_a}{\varepsilon} \quad (25)$$

一方、 z および r と、繊維体積分率 V_f との関係は、糸の構成単位中に繊維は断面積が $1/2$ 円分存在することから、(27) 式で定義する ξ を用いて、(26) 式で表される。

$$r = \xi z \quad (26)$$

ここで、

$$\xi = \left(\frac{2\sqrt{3}}{\pi} V_f \right)^{1/2} \doteq 1.05\sqrt{V_f} \quad (27)$$

(26)、(27) 式の関係を用いることにより、 τ も ε も (28)、(29) 式のような ξ の関数、すなわち V_f の関数となる。

$$\tau = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\sqrt{3 - 2\xi - \xi^2} + \frac{2\pi(1+\xi)\phi}{360} \right) \quad (28)$$

$$\varepsilon = 1 - \xi \quad (29)$$

ここで、

$$\phi = \left[\sin^{-1} \left(\frac{1+\xi}{2} \right) \right] - 30 \quad (30)$$

Fig. 6 は、(28)、(29) 式を (23) 式に代入して計算される τ/ε と V_f との関係を示すが、 V_f が大きくなるにつれ、 τ/ε の増大が加速される。

以上より、経糸、緯糸の単位厚さあたりの水分移動抵抗 ω_{yi} ($i=1, 2$) は、糸の繊維体積分率 V_{fi} の関数として、(31) 式で得られる。

$$\omega_{yi} = \tau_i \omega_a / \varepsilon_i \quad (31)$$

ここで、

$$\tau_i = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\sqrt{3 - 2\xi_i - \xi_i^2} + \frac{2\pi(1+\xi_i)\phi_i}{360} \right) \quad (32)$$

$$\xi_i = 1.05\sqrt{V_{fi}} \quad (33)$$

$$\phi_i = \left[\sin^{-1} \left(\frac{1+\xi_i}{2} \right) \right] - 30 \quad (34)$$

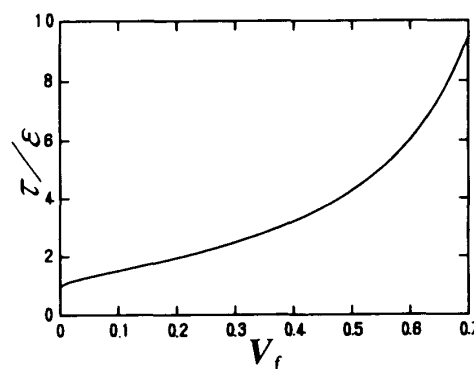


Fig. 6. The effect of the fiber volume fraction V_f on τ/ε

τ , tortuosity; ε , effective porosity.

$$\varepsilon_i = 1 - \xi_i \quad (35)$$

ここでは、繊維内部の水分移動の経路を無視したが、この効果については、糸の体積の半分以上は空隙が占めること、後述のセロハンフィルムの実験結果によるとそのセロハンの水分移動抵抗は、空気的水分移動抵抗の約 66 倍で、おそらく固体（繊維）実質部の水分移動抵抗は空気的水分移動抵抗に比べればはるかに大きいことにより、繊維内部の水分移動の経路は、日常着用される衣服布地については無視できる程度に小さいと考えられる。

以上のようにして、 ω_a 、 ω_{yi} を決定すると、(2) 式で W_1 、(6) 式で W_2 、(9) 式で W_3 、(12) 式で W_4 が求められ、これらを (16) 式に代入して (15) 式の関係より、布の水分移動抵抗 W_f を計算することができる。

(5) 計算に必要な織物の繊維集合構造パラメータ

糸幅 A_i や糸の厚み H_i を直接測定する煩雑さと不確かさを避け、また、織物の性能設計への応用の点からの実用性も考慮して、既報¹⁷⁾に基づき、これらを糸の tex 番手 d_i 、繊維比重 ρ_i 、圧縮荷重 10 gf/cm^2 下での布の厚さ T_{10} により次の実験式で求める。また、これ以外の構造パラメータ T には圧縮荷重 0.5 gf/cm^2 下での織物の厚さ、および経糸、緯糸の織り密度 N_1 、 N_2 の実測値を用いる。

糸幅 A_i ($i=1, 2$, 添字はたて・よこ糸を示す) は

$$A_i = 0.3548 D_i^{0.65} \quad (36)$$

$$D_i = d_i / \rho_i \quad (i=1, 2) \quad (37)$$

ただし、(36) 式の計算で糸幅が糸密度の逆数よりも大きくなる場合は、糸幅は、糸密度の逆数とする。すなわち、

$$A_i > 1/N_i \text{ のとき, } A_i = 1/N_i \quad (38)$$

糸の厚み H_i は,

$$H_1 = \frac{T_{10} \sqrt{D_1}}{\sqrt{D_1} + \sqrt{D_2}}, \quad H_2 = \frac{T_{10} \sqrt{D_2}}{\sqrt{D_1} + \sqrt{D_2}} \quad (39)$$

糸の繊維体積分率 V_{f1} , V_{f2} は, Fig. 1 のモデルに従い, 糸の断面を長方形とすることで, (40) 式で計算される.

$$V_{fi} = \frac{d_i}{10^3 \times \rho_i H_i A_i} \quad (40)$$

3. 織物の水分移動抵抗の予測式の検証

(1) 空気の水分移動抵抗係数の測定

本論文の 2-(4) の項で述べた測定法では風の空気層内への貫入が無視できる基準布の通気抵抗と風速条件を選ぶ必要がある. さらに, この実験では環境空気と同温度の湿潤ろ紙を置いた熱板からの水分蒸発に伴う熱移動量を測定するため, 蒸発熱移動量を大きくしたほうが実験の精度を高めることができるため, 基準布には水分移動抵抗の小さい薄手のポリエステルフィラメント織布 (Table 1 の試料 No. 4) を選び, 風速は 1 m/s とした. この時の風の貫入パラメータの値は $u^* = 3.04 \times 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{s}^3 \text{ Pa})$ であり Fig. 3 から風の貫入の影響はほぼ無視できると考えられる.

空気の水分移動抵抗 ω_a の測定は, 20~21℃, 60~65% RH の恒温恒湿室内で行い, 空気層の厚さ $L = 0.18 \sim 2.20 \text{ cm}$ の各条件での基準布のみで熱板を覆った場合の Q_e の測定により W_i を得て, Fig. 7 の L と W_i との関係から (18) 式を用いて, 空気層の単位厚さあたりの水分移動抵抗 ω_a (m s Pa/g) が, (41) 式のように求められる. 以下の織物の水分移動抵抗の予測計算には, この値を ω_a として用いることとする.

$$\omega_a = 4.91 \times 10^6 \quad (41)$$

(2) 布の水分移動抵抗の測定

Fig. 2 の実験条件で測定される平面状試料 (布やシート) の水分移動抵抗 W_i は, 熱板と試料との間の空気層, 試料, 試料表面の空気の水分移動抵抗が含まれる. そこで, 試料固有の水分移動抵抗を得るために, 既報で述べた次の測定方法を採用する.

Fig. 8 のように熱板から L_1 の距離の位置に試料布を置き, その布から L_2 の距離に基準布でこれを覆い, 水分の蒸発に伴う熱移動量を測定し, この 2 枚重ねの水分移動抵抗 W_{ia} を得る. また, 試料布を除き, 熱板から $L_1 + L_2$ の空気層を設けて基準布で熱板を覆った時の水分移動抵抗 W_{ic} を測定する. 両者の抵抗の差が

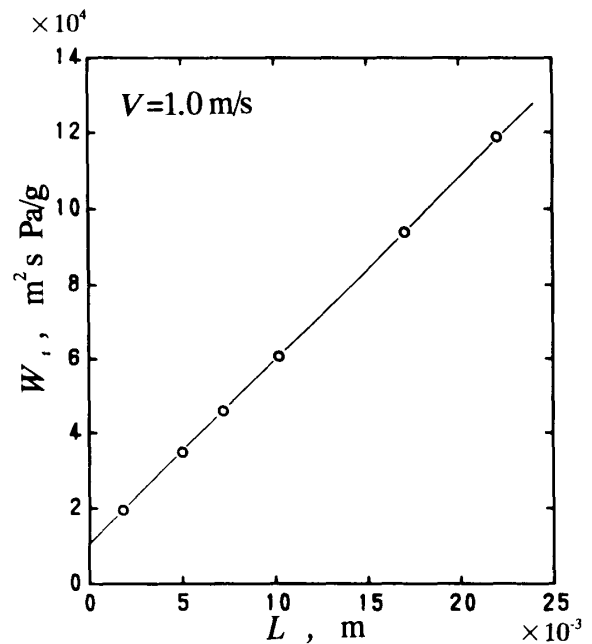


Fig. 7. Relation between air gap L and water vapor resistance, W_i , for sample No. 4, which is also used as the top fabric of the two layer assembly shown in Fig. 8

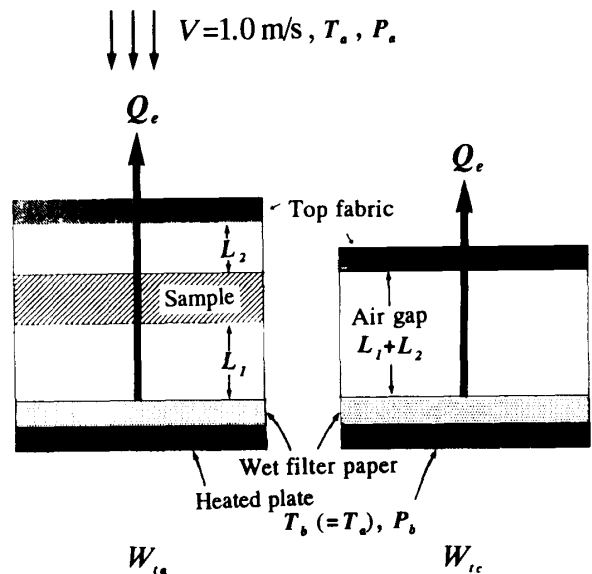


Fig. 8. The measurement method of water vapor resistance of fabrics W_i obtained by comparing W_{ia} to W_{ic}

Left: measurement of water vapor resistance of double layer system W_{ia} . Right: measurement of water vapor resistance removing the test sample W_{ic} . Air gap length: $L_1 = 3 \text{ mm}$, $L_2 = 2 \text{ mm}$; top fabric: sample No. 4 in Table 1. T_a , P_a , temperature and water vapor pressure of environmental air; T_b , P_b , temperature and water vapor pressure at the surface of the wet filter paper; Q_e , evaporative heat loss.

ら、空気層と布の表面の空気の抵抗が抹消されて、布固有の抵抗 W_f を得ることができる。すなわち、

$$W_f = W_a - W_{ac} \quad (42)$$

このとき、基準布の下は静止空気層である必要があり、先述したが、空気層内への風の浸透の影響を考慮し、さらに、本実験では環境空気と同温の湿潤濾紙を置いた熱板からの水分の蒸発熱移動量を測定するため、蒸発熱移動量を大きくしたほうが実験の精度を高めることができる。そこで、水分移動抵抗が小さい薄手ポリエステルフィラメント織布を基準布として選び、風速は 1 m/s とし、空気層は $L_1 = 3 \text{ mm}$, $L_2 = 2 \text{ mm}$ とした。

実験は、 $20 \sim 21^\circ\text{C}$, $60 \sim 65\% \text{ RH}$ の恒温恒湿室内で行い、試料は、Table 1 に示すポリエステル、綿、羊毛、絹を含む 40 種類を選定した。

(3) 織物の水分移動抵抗予測式の検証

Fig. 9 は、織物の水分移動抵抗 W_f の計算値と実測値との関係を素材別にプロットしている。Fig. 9 から、布を構成する繊維素材の影響は顕著には認められない。 W_f の実測値と計算値との差の 2 乗平均の平方根 (RMS) は、実測した値の範囲、 $2,200 < W_f < 14,600 \text{ (m}^2 \text{ s Pa/g)}$ に対し $1,230 \text{ (m}^2 \text{ s Pa/g)}$ で簡単なモデルと布構造パラメータを用いたことを考えると、素材に関わらず、比較的良好一致が認められ、予測式の妥

当性が認められる。

4. 考 察

(1) 繊維の吸湿性の影響

Fig. 9 では糸中の空隙だけを水分移動の経路と仮定して計算した値をプロットしているが、吸湿性の綿やウールでは、繊維内部を通る経路も考えられる。この効果を調べるために、非吸湿性のポリエステルシート (厚さ $92 \mu\text{m}$) と、吸湿性のセロハンフィルム ($20 \mu\text{m}$) の試料について水分移動抵抗を測定した。単位厚さあたりの水分移動抵抗は、ポリエステルシートで、 $45.97 \times 10^8 \text{ (m s Pa/g)}$ 以上、セロハンで $3.23 \times 10^8 \text{ (m s Pa/g)}$ であり、吸湿性のセロハンポリエステルに比較すると、単位厚さあたりの水分移動抵抗はるかに小さいといえる。しかし、本研究の実験方法で求めた空気の単位厚さあたりの水分移動抵抗 $\omega_a = 4.91 \times 10^8 \text{ m s Pa/g}$ と比較すると、非吸湿性のポリエステルで 940 倍以上、吸湿性のセロハンでも空気の約 66 倍であり、空気に比べるとかなり大きい。また、これまでに繊維実質部を通しての水分の移動を直接測定した数少ない文献として、Fourt ら¹⁾ は、スライバまたは糸束を樹脂で固め、両端の断面を異なる相対湿度の空気に曝して、繊維軸方向で生じる水分移動を測定したが、綿でも空気の水分移動抵抗の 19 倍、羊毛で 64 倍、ポリエステルで 357 倍とやはり、空気に比べると 1 桁大きい結果が報告されている。さらに、布の場合、糸の繊維体積分率が、0.5 をこえることは少なく、糸の体積の半分以上が空気で占められるため、繊維内部を通過する量は小さいと考えられる。布を通しての定常状態での水分移動は、繊維内部よりも繊維間隙、糸間隙の効果すなわち、素材の親水性、疎水性の違いの影響よりも、布の空隙の効果のほうが大きいことを示唆している。

(2) 織物構造が水分移動抵抗に及ぼす影響

Fig. 10, 11 は、緯糸密度 N_2 をパラメータとし、経糸密度と水分移動抵抗 W_f との関係の計算例を示している。Fig. 10 は、羊毛スーツ地を想定して経、緯糸とも 40 tex , 0.5 gf/cm^2 での厚さ T を $5 \times 10^{-4} \text{ m}$, 10 gf/cm^2 での厚さ T_{10} を $4 \times 10^{-4} \text{ m}$ とし、緯糸密度 N_2 を $1,500, 2,000, 2,500 \text{ m}^{-1}$, 経糸密度 N_1 を $1,500 \sim 3,500 \text{ m}^{-1}$ に変化させた場合の計算例を示している。同様に、Fig. 11 は綿のドレスシャツ地を想定して、 12 tex の糸で布の厚さ $T = 4 \times 10^{-4} \text{ m}$, $T_{10} = 2.5 \times 10^{-4} \text{ m}$, 緯糸密度 N_2 を $2,000, 3,000, 4,000 \text{ m}^{-1}$ と

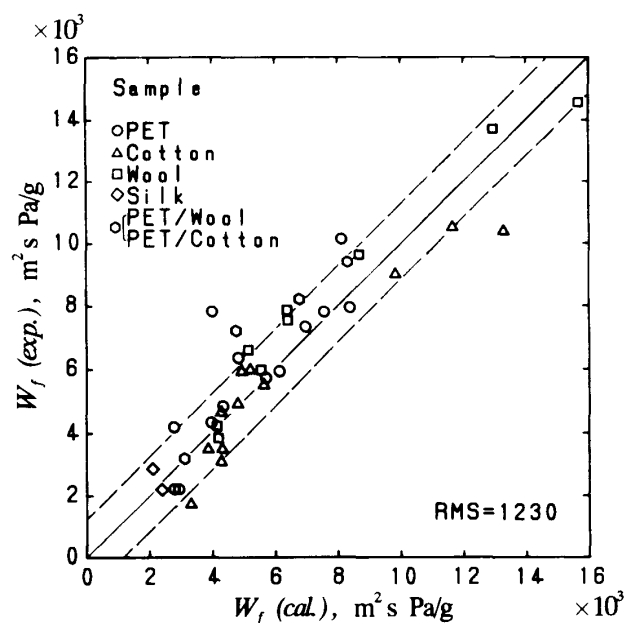


Fig. 9. Relation between the predicted fabric water vapor resistance, W_f and measured W_f , for various kinds of woven fabrics in Table 1

Table 1. Details of fabrics

Sample No.	Weight (g/m ²)	T^{*1} (nm)	R^{*2} (Pa s/m)	W_f^{*3} (m ² s Pa/g)	Fiber ^{*4} type	Weave structure
1	82	0.348	13	2,220	PS	plain
2	92	0.238	63	4,210	PF	plain
3	96	0.590	21	4,860	PS	plain
4	96	0.218	329	2,220	PF	plain
5	106	0.145	77,100	7,950	PF	plain
6	110	0.438	360	4,350	PS	plain
7	110	0.650	52	6,360	PS	plain
8	126	0.331	2,403	7,830	PF	plain
9	133	0.675	219	5,750	PS	plain
10	188	0.820	631	7,350	PS	plain
11	208	0.576	4,560	5,950	PTF	sateen
12	229	0.838	661	7,818	PTF	2/2 twill
13	249	0.805	1,443	10,160	PS	2/2 twill
14	79	0.411	7	1,730	C	plain
15	100	0.553	260	3,500	C	3/1 twill
16	103	0.418	1,617	3,480	C	plain
17	105	0.533	156	3,100	C	plain
18	122	0.605	57	4,670	C	plain
19	147	0.482	4,080	4,930	C	plain
20	166	0.623	225	5,930	C	plain
21	167	0.545	1,315	5,515	C	2/1 twill
22	189	0.594	615	5,970	C	plain
23	285	0.995	3,963	9,010	C	3/1 twill
24	368	1.200	2,165	10,510	C	3/1 twill
25	391	1.350	7,404	10,390	C	3/1 twill
26	115	0.456	106	4,250	W	plain
27	117	0.491	13	3,860	W	plain
28	171	0.570	198	5,980	W	plain
29	179	0.418	872	6,610	W	plain
30	184	0.663	1,045	7,870	W	plain
31	197	0.630	1,800	7,540	W	plain
32	251	0.910	1,203	9,640	W	2/2 twill
33	310	2.120	88	14,570	W	2/2 twill
34	374	1.383	2,734	13,720	W	2/2 twill
35	63	0.288	16	2,200	S	plain
36	81	0.209	642	2,880	S	plain
37	100	0.376	23	3,200	C50/P50	plain
38	165	0.469	199	7,210	W50/P50	plain
39	190	0.741	936	8,210	W50/P50	plain
40	252	0.808	1,437	9,400	W50/P50	2/2 twill

*¹ Thickness at pressure 0.5 gf/cm². *² Air resistance. *³ Water vapor resistance. *⁴ PS, polyester spun; PF, polyester filament; PTF, polyester textured filament; C, cotton; W, wool; S, silk.

織物構造モデルに基づく定常状態における織物の水分移動抵抗の予測

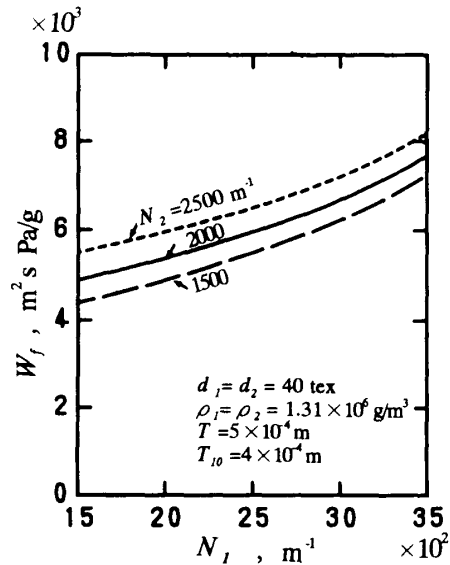


Fig. 10. The effect of warp yarn density, N_1 , on water vapor resistance, W_f , of wool suiting fabrics with different weft yarn density, N_2

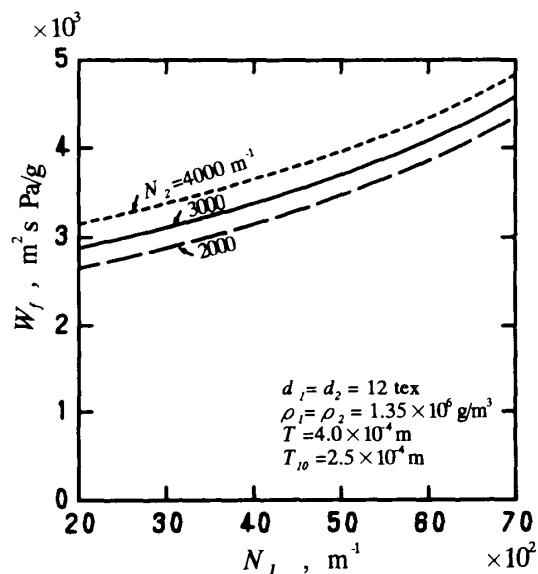


Fig. 11. The effect of warp yarn density, N_1 , on water vapor resistance, W_f , of fabrics used for dress shirts with different weft yarn density, N_2

した場合の計算例を示している。糸密度の上昇とともに水分移動抵抗が大きくなることがわかるように、織物の繊維集合構造パラメータが水分移動抵抗に及ぼす影響を簡単に計算することができる。

5. 結 語

単純な織物の水分移動モデルを仮定し、実際の性能

設計に応用する立場から、織物の簡単な繊維集合構造パラメータ、すなわち、織物の厚さ、糸密度、糸の番手、繊維比重を用いた織物の定常状態における水分移動抵抗の予測式を誘導し、その予測式の妥当性を実験値との比較により確認した。水分の定常移動現象において、本実験の範囲では、繊維の吸湿性が織物の水分移動抵抗に及ぼす影響の小さいことがわかった。そして、織物の糸密度や糸の太さなどの織物の構造パラメータが水分移動抵抗に及ぼす影響についての計算例を示した。

引 用 文 献

- 1) Black, C.P. and Matt Hew, J.A.: *J. Text. Inst.*, **25**, T 255~T 240 (1934)
- 2) Fourt, L. and Harris, M.: *Text. Res. J.*, **17**, 256~263 (1947)
- 3) Whelan, M.E., Mac Hattie, L.E., Goodings, A.C. and Turl, L.H.: *Text. Res. J.*, **25**, 197~223 (1955)
- 4) Fourt, L. Craig, R.A. and Rutherford, M.B.: *Text. Res. J.*, **27**, 362~368 (1957)
- 5) 丹羽雅子：奈良女大家政学研究, **8** (2), 113~118 (1961)
- 6) 丹羽雅子：奈良女大家政学研究, **10** (1), 10~15 (1963)
- 7) 丹羽雅子：奈良女大家政学研究, **10** (2), 12~20 (1963)
- 8) 丹羽雅子：奈良女大家政学研究, **11** (1・2), 33~42 (1964)
- 9) 丹羽雅子：奈良女大家政学研究, **11** (1・2), 43~49 (1964)
- 10) 丹羽雅子：今井律子, 高力紀子：奈良女大家政学研究, **12** (1), 16~23 (1965)
- 11) Watkins, D.A. and Slater, K.: *J. Text. Inst.*, **72**, 11~18 (1981)
- 12) van Beest, C.A. and Wittgen, P.P.M.M.: *Text. Res. J.*, **56**, 566~568 (1986)
- 13) Day, M. and Sturgeon, P.Z.: *Text. Res. J.*, **56**, 157~161 (1986)
- 14) Wehner, J.A., Miller, B. and Rebenfeld, L.: *Text. Res. J.*, **58**, 581~592 (1988)
- 15) Hong, K., Hollies, N.R. S. and Spivak, S.M.: *Text. Res. J.*, **58**, 697~706 (1988)
- 16) Farnworth, B., Lotens, W.A. and Wittgen, P.P.M.M.: *Text. Res. J.*, **40**, 50~53 (1990)
- 17) 中西正恵, 丹羽雅子：家政誌, **43**, 293~301 (1992)
- 18) 中西正恵, 丹羽雅子：家政誌, **43**, 1217~1222 (1992)
- 19) 川端季雄：織機誌, **37**, T 130~T 141 (1984)
- 20) 中西正恵, 丹羽雅子：家政誌, **46**, 567~575 (1995)