(平成4年9月10日受理)

圧力センサ法による布面に垂直な吸水の測定とその解析

奈良女子大学 家政学部 米田 守宏・丹羽 雅子

Measurement of Water Absorption Perpendicular to Fabric Plane by Pressure Sensor Method and its Analysis

Morihiro Yoneda and Masako Niwa

Faculty of Home Economics, Nara Women's University, Kitauoya-Nishimachi, Nara, 630 Japan

Abstract: A pressure sensor method was developed in order to measure spontaneous water uptake perpendicular to fabric plane. Water absorption was detected by a pressure sensor which was placed at the bottom of a water reservoir. Using this apparatus, water absorption of some types of woven fabrics was measured. Relation between water absorption, $M(t)$ (g/cm^2) and square root of time elapsed, t (s) is well fitted by first order regression equation. From this relation, water absorption rate constant k_v ($\text{g}/\text{cm}^2\sqrt{\text{s}}$) can be obtained and water absorptivity can be evaluated using k_v and M_{max} (g/cm^2), maximum water absorption. Based on the measurement of mean pore diameter by bubble point method, it is shown that water absorption perpendicular to fabric plane does not follow Washburn's law. Water absorption phenomena is explained well by non-linear diffusion equation and the fact that $M(t)$ is regressed well by $\sqrt{t}$ is also explained by this model. If open pore structure between fibers is modelled by lattice space and water flow by capillary action is considered to be random walk within this network, it is understandable that water absorption perpendicular to fabric plane can be explained by diffusion model. The transport mechanism is different between in-plane capillary water flow reported in a previous paper and water absorption perpendicular to fabric plane reported here. Therefore, it is considered that water absorptivity has to be estimated for each direction, i. e. parallel and perpendicular to fabric, respectively.

(Received September 10, 1992)

1. 緒 言

布面に垂直な吸水現象は、発汗時の汗の吸収等、衣服着用時の快適性および衛生面等において、重要な性質である。通常、布は皮膚面に対して平面的に接して着用されるため、水分の吸収が生じる方向は布面に垂直であることから、布面に垂直な吸水の測定は平行な場合に比べ実用上より重要であると考えられる。このため、簡便で精度のよい測定法が吸水性能の適切な評価に必要であるものと考えられるが、本研究は、このような方法の確立を目的としたものである。

従来、布面に垂直な吸水の測定法としては、ラローズ法が用いられてきた[1]。ラローズ法は基本的には水で飽和させた多孔体を用いてシート状試料に吸水を行わせる方法である。吸水量の検出は、初期の頃は水だめに接続したチューブの中のメニスカスの移動を目視により観

察することで行っていた[2-4]。その後、吸水量の検出法としていくつかの工夫がなされている[5,6]。筆者等も布の吸水の測定法について検討を行ってきたが、本報では圧力センサを利用して布面に垂直な過渡的吸水の測定を行う方法（以下、圧力センサ法と呼ぶ）について検討し、その分解能・ S/N 比・操作性等について、特徴を明らかにする。

本報では、この圧力センサ法について、測定装置および原理、データ解析の方法、織布を試料とした測定例等について報告する。さらに、布の細孔径分布の測定に関する知見等を基礎として、布面に垂直な場合の吸水機構に関する主として速度論的な考察を、毛管吸水モデル、平板拡散モデル（線形、非線形）を設定して行い、得られた結果をもとに、布の吸水性の評価法について検討する。

2. 測定装置および原理

図1に測定装置を示す。図2 (a)に装置主要部の断面図、(b)に試料の取り付け方法をそれぞれ示す。装置主要部は、ステンレススチール製の円筒容器であり、円筒上面はテフロン製目皿および濾紙からなる試料装着部で、円筒下面には圧力センサ（共和電業(株)製 PGW-10GB）が取り付けられている。この圧力センサは、後述するように水柱の圧力を測定するためのものである。円筒容器の側面からチューブを介して水だめが接続されている。

測定時には、円筒内に目皿上面までイオン交換水を満

Fig. 1 Measurement system.

Fig. 2 (a) Main part of the measurement system.
(b) Attachment plate for fabric specimen.

たし、目皿上に濾紙を載せ軽く固定する。このようにして、試料に水の吸収を行わせるためのメニスカスを水で飽和した濾紙により形成する。試料は直径6.4 cmの円形とし、金属製の試料取り付け板（図2 (b)）の下面に多孔質ゴム片を介して両面テープで貼り付け、水の浸出している濾紙上に載せる。このとき、試料布の吸水により水柱の圧力が減少するので、この圧力変化を容器下面に設置した圧力センサによって検出する。ここで、試料布と取り付け板との間にゴム片を取り付けるのは、布と試料板の間で密着による水の回り込みが生じるのを防ぎ、吸水量の測定を正確に行うためである。多孔質ゴム片は、布とともに垂直方向の荷重によりそれ自身圧縮変形を受けるため、剛体を用いた場合よりも布の圧縮変形をより軽減でき布の平面性が保たれるため、メニスカスに対する密着性にはほとんど問題がない。

次に、センサによって検出された圧力信号の処理法について述べる。図3に電気信号の処理に関するブロックダイアグラムを示す。圧力センサはストレインゲージアンプにより駆動される。アンプから直接出力される電気信号の概略図を図4の実線（ $P(t)$ 曲線）で示す。測定前には約5 cmの水柱による一定圧力 P_0 が底面に常に加わっている。これに対して、布の吸水による圧力減少分 $\Delta P(t)$ は僅かである。そこで、精度のよい測定を行うため、本方法では、 $P(t)$ に対して大きな負のバイアス電圧（図4の P_1 ）をかけることで $\Delta P(t)$ をとりだし、

Fig. 3 Block diagram for signal processing.

Fig. 4 Schematic diagram of water pressure change in the water absorption measurement.

レコーダに出力し、高感度なレンジでチャート上に拡大し記録する。分解能はチャート1 mm あたり $P = 1 \text{ mg/cm}^2$ 程度である。以後、この $\Delta P(t)$ を吸水量 $M(t)$ とみなし、解析を行う。

3. 測定例および解析法

図5に本方法による布面に垂直な吸水の測定例を示す。吸水初期から飽和に至る過渡的变化がとらえられている。比較的高感度の測定条件にもかかわらず、測定を行った環境の機械的振動による影響が小さい。これは、水を介して圧力変化を測定しているため、水自体の粘性による制振効果ははたらいっているためと考えられる。このように、振動の影響を防ぎ、よい S/N 比を実現しているという点では上皿天秤を用いた重量法よりも有利であると思われる。また、機械的な可動部がほとんどないため、操作ならびに維持が容易である。

布の単位面積あたりの吸水量 $M(t) \text{ (g/cm}^2\text{)}$ を、横軸を $\sqrt{t}$ としてプロットしてみる。図6に示すように、ほとんどすべての試料について $M(t)$ と $\sqrt{t}$ はよい精度で直線近似できるので、この傾きから吸水速度定数 $k_v \text{ (g/cm}^2\sqrt{s}\text{)}$ を求め (V は布面に垂直なことを表す添

Fig. 5 An example of the transient water absorption measurement.

Fig. 6 Plot of M vs $\sqrt{t}$ for obtaining k_v and $M_{\max}$ for evaluating water absorptivity of fabrics.

字である)、この k_v および飽和吸水量 $M_{\max} \text{ (g/cm}^2\text{)}$ を用いて、布面に垂直な場合の吸水性を評価する。

なお、本測定では、定常流れの測定から k_v を求めている。初期濡れによる遅延時間は、羊毛・絹などに若干認められたが、これらについては、定常部分を外挿することで時間の原点を求めた。これは、吸水は、本来、時間的には初期濡れに引き続いて定常流れが生じる現象であるが、初期濡れと定常流れがその機構において異なり統一的方法で扱いにくいこと、初期濡れ現象が試料と吸水部の接触のさせかたによって測定におけるばらつきが大きく定量化しにくいこと、および初期濡れ部の吸水量が全吸収量に対して占める割合が少ない等の理由から、今回は定常部分の解析に焦点をしばったためである。

4. 試料および測定条件

圧力センサ法を用いて各種織布の吸水性の測定を行った。試料は、各種繊維素材からなる平織布、糸密度を系統的に変えた木綿およびポリエステルフィラメントからなる平織布である。布試料は一種につき同じ布の異なる場所から5枚切り出し、吸水性パラメータの測定を行い、その平均値をその試料の代表値とした。試料は、事前に水性洗浄およびエーテル抽出をそれぞれ一度ずつ行った。実験は、 20°C 、 $65\% \text{ RH}$ の恒温恒湿室で行った。

用いた試料は前報[9]と同じで、各種繊維素材からなる平織布14種(グループ1)、糸密度を系統的に変えた木綿6種(C)およびポリエステルフィラメント5種(PF)からなる平織布(グループ2, 3)である。試料の詳細は文献[9]に示している。

本研究では吸水と貫通細孔構造との関連を検討するため、バブルポイント法[8]を用いて布の細孔径分布および平均細孔径 $\overline{D}_{BP}$ を測定し解析に用いた。

本測定法は布に加わる圧力および使用する濾紙によって測定値が影響されるため、濾紙に関しては同一種の濾紙(TOYO No. 514)を用いることで条件を統一した。

5. 吸水速度定数および飽和吸水量の測定結果

吸水速度定数 $k_v \text{ (g/cm}^2\sqrt{s}\text{)}$ および飽和吸水量 $M_{\max} \text{ (g/cm}^2\text{)}$ の測定結果を表1、表2に示す。表1は各種繊維素材(含混紡)からなる平織布グループ、表2は糸密度を系統的に変えた木綿(C)およびポリエステルフィラメント(PF)からなる平織布グループの結果である。各試料とも k_v 、 $M_{\max}$ は5枚の平均値を示し、変動係数 $C.V.(\%)$ を併記した。

各種繊維素材からなる試料グループ(表1)における

Table 1 Results of the Measurement of k_v and $M_{\max}$ for Plain Weave Fabrics Made from Various Types of Fibers

Sample No. code		k_v		$M_{\max}$	
		Mean ($\times 10^{-2} \text{g/cm}^2 \sqrt{s}$) (%)	C. V. (%)	Mean ($\times 10^{-2} \text{g/cm}^2$) (%)	C. V. (%)
1	C	1.54	1.7	2.84	4.5
2	R	1.06	3.5	1.71	6.4
3	S	0.50	8.5	2.30	6.0
4	W	0.48	14.8	2.59	11.4
5	RY	1.14	10.4	2.91	3.5
6	CU	1.62	2.4	3.10	1.8
7	AC	0.44	5.5	1.84	12.2
8	T	0.46	13.3	1.70	13.2
9	P	0.25	29.8	0.44	7.8
10	A	1.44	9.0	4.12	2.6
11	V	1.61	3.7	2.69	8.3
12	C/P	1.34	7.6	1.87	3.0
13	C/R	0.71	16.5	2.56	2.6
14	W/A	1.45	11.2	7.62	1.2

Table 2 Results of the Measurement of k_v and $M_{\max}$ for Plain Weave Fabrics of Which Weave Density Varies Systematically

Sample No. code		k_v		$M_{\max}$	
		Mean ($\times 10^{-2} \text{g/cm}^2 \sqrt{s}$) (%)	C. V. (%)	Mean ($\times 10^{-2} \text{g/cm}^2$) (%)	C. V. (%)
15	C 1	1.10	5.3	4.22	2.6
16	C 2	1.10	3.9	4.56	2.2
17	C 3	1.14	0.6	4.48	1.2
18	C 4	1.30	2.7	4.74	4.3
19	C 5	1.25	6.3	4.47	1.6
20	C 6	1.19	5.0	4.74	3.7
21	PF 1	0.59	4.2	1.63	8.5
22	PF 2	0.47	6.8	1.39	5.3
23	PF 3	0.57	9.2	1.50	6.2
24	PF 4	0.45	3.9	1.09	5.2
25	PF 5	0.53	3.8	1.53	16.8

C: cotton, PF: polyester filament.

k_v および $M_{\max}$ と布の構造定数との関係は次の通りである。 k_v は布厚さ d の増加とともに増加傾向にあり、単

位面積あたりの布重さ w の増加とともに増加傾向にあるが、いずれも相関係数はさほど高くない。 $(k_v$ 対 d で相関係数 $r=0.640$, k_v 対 w で $r=0.582$) $M_{\max}$ は d の増加とともに増加傾向にあり、また w の増加とともに増加傾向にある。いずれも相関はかなり高く ($M_{\max}$ 対 d で $r=0.883$, $M_{\max}$ 対 w で $r=0.784$)、とくに $M_{\max}$ と布厚さの相関の高いことが注目されるが、これは水を含み得るスペースの大きさの増加が、厚さの増加と直接関係しているためであろうと考えられる。ただし、水が繊維および空隙にそれぞれどのような割合で分配されて含まれているのかについては、現在のところ検知する方法が見出せないためわからないが、この分配の割合はおそらく各種繊維素材によって異なっているものと予想される(おのおの水に対する性質が異なる)。

表2の試料はそれぞれ繊維密度を系統的に変えた布のグループであるが、C, PFのいずれのグループとも k_v および $M_{\max}$ とも系統的变化は認められない。また d および w に対する相関も認められない。

6. 吸水機構の解析

6.1 毛管吸水モデル

布面に垂直な吸水現象における吸水機構を明らかにするため、毛管吸水モデルを設け、その妥当性について検討する〔9〕。布面に垂直な吸水の場合、布面を垂直に貫く毛細管の寄与が考えられるため、前述したようにバブルポイント法を用いて試料布の細孔径分布および平均細孔径 $\bar{D}_{BP}$ (mean pore diameter)の測定を行った〔8〕。細孔径分布の結果の詳細については別に報告するとして、ここでは、平均細孔径の測定から得られる知見をもとに考察する。

はじめに、本測定で得られた結果がWashburn則〔7〕に従うかどうかを検討してみる。吸水の測定結果より、

Fig. 7 The plot of observed value of k_v against mean pore diameter $\bar{D}_{BP}$ measured by bubble point method. Symbol (●) denotes cellulosic fibers ($\theta_a = 0$).

吸水量 $M(t)$ (g/cm^2) を時間 t (s) の平方根 $\sqrt{t}$ でプロットすると、飽和近傍を除きよい精度で直線近似できる。

$$M(t) = k_v \sqrt{t} \quad (1)$$

ここで、 k_v は $M(t)$ に関する吸水速度定数である。 K_v を Washburn 則における進入長 $x(t)$ に関する吸水速度定数とする[9]。 k_v と K_v の関係は自明ではないので、両者の関係を次式のように仮定する。

$$k_v = \rho_w \phi_p K_v \quad (2)$$

$$K_v = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{D_p \sigma \cos \theta_a}{\mu}} \quad (3)$$

ただし、 ρ_w : 水の密度、 ϕ_p : 空隙率、 σ : 水の表面張力、 μ : 水の粘性率、 D_p : 細孔直径および θ_a : 水と繊維の接触角である。ここで、パブルポイント法によって測定された平均細孔径の $\overline{D}_{BP}$ と式3における細孔直径 D_p を等価であるとみなし、吸水速度定数 k_v を $\overline{D}_{BP}$ に対してプロットしたものを図7に示す。図より、 k_v と $\overline{D}_{BP}$ は無相関であることがわかる。羊毛、絹、ポリエステル等については、接触角 θ_a の影響が考えられるため、図7中に黒丸で示している濡れ性のよいセルロース系繊維 ($\theta_a \approx 0$ とみなせる) のみに注目しても、依然として相関は認められない。吸水が貫通細孔によって推進されているとすれば、Washburn 則により $K_v \propto \sqrt{\overline{D}_{BP}}$ の成

立が期待されるが(式3)、図7の結果はこれを否定している。式2、式3を用いて計算した k_v 値と、 k_v の実測値の比較を表3諸示す。これより、 k_v の実測値は計算値より2桁程度小さく、この違いは空隙率、さらには飽和度を考慮にいれても合理的な説明はできない。以上より、貫通細孔による毛管吸水モデルでは、布面に垂直な吸水現象がよく解釈できないことがわかる。

6.2 平板拡散モデル

次に、布を連続体(平板)とみなしこれに対して水が式4に示す拡散方程式の解[10]にしたがって拡散していくというモデルで現象を記述することを検討してみる。この場合、繊維集合体を連続体とみなすことにより、拡散の物理的な実体が不明になるが、このような拡散の基礎課程に関する考察は、吸水現象が拡散モデルで形式的に表わせるかどうかを検討したあとで行うことにする。以下これを平板拡散モデルと呼ぶ。

第一近似として、拡散係数 D が一定の場合を考える。時間 t における吸収量 $M(t)$ は次式で表わせる。

$$\frac{M(t)}{M_{\max}} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\exp \left[-D(2m+1)^2 \pi^2 t / \ell^2 \right]}{(2m+1)^2} \quad (m=0, 1, 2, \dots) \quad (4)$$

ここで、 ℓ は試料厚さである。拡散係数 D は次式で推定される[10]。

$$D = 0.049 \ell^2 / t_{50} \quad (5)$$

t_{50} は吸水曲線において、 $M(t)/M_{\max} = 1/2$ となる時間で、以下このような D の推定法をハーフタイム法と呼ぶことにする。実測の吸水曲線に式5を適用して D を推定し、この D および ℓ の測定値を用いて式4により理論吸水曲線を計算した結果の一例を図8の一点鎖線に示している。図より、計算値は実測値より大きく下回ってい

Table 3 Comparison of Observed with Calculated Values of k_v Based on Washburn's Law under Some Assumptions

Sample No. code	ϕ_p (%)	$\overline{D}_{BP}$ (μm)	k_v (cal) ($\text{g}/\text{cm}^2\sqrt{\text{s}}$)	k_v (obs) ($\text{g}/\text{cm}^2\sqrt{\text{s}}$)
1 C	80.4	30.7	1.90	0.0154
3 S	83.8	27.6	1.88	0.0050
4 W	79.1	33.4	1.95	0.0048
5 RY	68.4	20.2	1.31	0.0114
6 CU	82.9	52.4	2.56	0.0162
7 AC	77.6	58.5	2.53	0.0044
8 T	64.4	32.2	1.56	0.0046
9 P	53.7	32.2	1.30	0.0025
11 V	82.4	80.2	3.14	0.0161
15 C1	80.6	33.7	1.99	0.0110
16 C2	85.8	36.8	2.22	0.0110
17 C3	86.3	46.8	2.52	0.0114
18 C4	87.7	75.4	3.24	0.0130
19 C5	87.6	65.3	3.06	0.0125
20 C6	89.9	88.6	3.61	0.0119

Fig. 8 Comparison of observed with theoretical values of water absorption. Ordinate: $M(t) / M_{\max}$. Abscissa: dimension-less time. Solid line: observed value. Broken line: calculated by non-linear diffusion model. Dot/dash line: calculated by linear diffusion model. Sample: Ramie.

る。実測値と計算値の一致度は、少数の比較的一致度のよいものを除けば、他の試料も一般に図8の麻同様よくない。図8の吸水量および時間とも規格化されたものであり、もし現象が D が一定の場合の線形平板拡散モデルに従って生じるならば両者は一致しなければならないが、実際にはそうではない。これより、布面に垂直な吸水現象は線形平板拡散モデルでは説明できないことがわかる。

6.3 非線形平板拡散モデル

次に式7に示すような形で拡散係数 D に濃度依存性を仮定した非線形拡散方程式を考える。

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ D(u) \frac{\partial u}{\partial z} \right\} \quad (6)$$

$$D(u) = D_0 (1 + \sigma u) \quad (7)$$

ここで、 u , z , τ はそれぞれ無次元化濃度、位置および時間、 D_0 は初期拡散係数、 σ は非線形度パラメータである。拡散方程式(式6)は、濃度 u に関して非線形のため、通常の方法つまり直接積分あるいは変数分離法やラプラス変換法等によって解くことができない。そこで、重み付き残差法[12]の一種であるモーメント法[13]を用いて近似解を求めた。解法の詳細は付録に示している。この場合、ハーフタイム法により実測曲線から求まる拡散係数は平均値 $\bar{D}$ であると考えられる。式7を考慮すると、平均拡散係数 $\bar{D}$ は次のようになる[10]。

$$\bar{D} = \int_0^1 D(u) du = D_0 (1 + \sigma / 2) \quad (8)$$

図9に非線形拡散モデルの計算結果を示す。非線形度パラメータ σ の値が大きくなるほど吸水曲線の初期の立上がり方が早くなることがわかる。図8にこの非線形モデルによる計算値と実測値の比較例を示す。試料は麻で、 σ は後述する方法により最も適合する値を推定したものである。これより、計算値と実測値の一致はよいこと

Fig. 9 Results of calculation of non-linearity σ dependence of non-linear diffusion model. Ordinate: $M(t) / M_{\max}$. Abscissa: dimensionless time.

Fig. 10 The procedure for estimating σ from experiment. τ_{80} is the time when $M(t) / M_{\max} = 0.8$. From τ_{80} , σ can be obtained using equation 8.

がわかる。他の試料についても σ の最適値を選ぶことにより、同程度の一致度が得られている。以上より、布面に垂直な吸水現象が非線形拡散モデルにより現象論的に説明できるといえる。

図10に、実測の吸水曲線から σ を推定する考え方を示す。飽和吸水量 $M_{\max}$ の80%に到達する時間を τ_{80} とすると、図9に示されるような形で τ_{80} は σ に依存する。このような σ 対 τ_{80} の関係を、付録に示した計算法により、 σ をパラメータとして変化させた理論曲線について数値的に求めておき、次のような4次の回帰式で近似する。

$$\sigma = a_0 + \sum_{i=1}^4 a_i \tau_{80} \quad (9)$$

$$a_0 = 13.26, \quad a_1 = 104.2, \quad a_2 = 350.6$$

$$a_3 = 562.3, \quad a_4 = 345.0.$$

式9を用いることにより、実測曲線の τ_{80} から σ の推定が可能となる。さらに、式5を用いて実測曲線のハーフタイム τ_{50} より平均拡散係数 $\bar{D}$ を求めておき、この $\bar{D}$ と σ から式8の関係を用いて、初期拡散係数 D_0 が求められる。

このような方法によって求めた平均拡散係数 $\bar{D}$ 、初期拡散係数 D_0 、および非線形度パラメータの計算結果を表4に示す。拡散係数は $\bar{D}$ 、 D_0 とも 10^{-4} (cm^2/s)程度のオーダーであることがわかる。布面に沿った吸水における吸水速度定数 K_H ($\text{cm}/\sqrt{\text{s}}$) [9]を、次元のみを考えて D に換算すると、 $10^{-1} \sim 10^{-2}$ (cm^2/s)となる。つまり、布面に垂直な吸水は平行な場合に比べて、速度論的に遅い過程であるといえる。非線形度パラメータ σ は試料により様々な値をとるが、一般に天然繊維が2以上の大きな値をもつのに対し、再生繊維、半合成繊維

Table 4 Results of Calculation by Non-Linear Diffusion Model

Sample No. code	$\bar{D}$ ($\times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{s}$)	D_0 ($\times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{s}$)	σ (—)
1 C	2.75	1.33	2.3
2 R	2.94	1.43	2.2
3 S	0.13	0.06	2.6
4 W	0.21	0.10	2.3
5 RY	0.23	0.20	0.3
6 CU	2.05	0.61	2.3
7 AC	0.56	0.37	0.6
8 T	0.24	0.22	0.7
9 P	0.13	0.08	0.9
10 A	1.05	0.43	2.8
11 V	3.82	2.08	1.7
12 C/P	2.78	1.19	2.7
13 C/R	0.95	0.82	0.2
14 W/A	2.15	1.26	1.6

$\bar{D}$: Average diffusion coefficient, D_0 : Initial diffusion coefficient, σ : Non-linearity parameter.

維、合成繊維ではキュブラ (CU)、アクリル (A) が 2 以上であるのを除けば、おおむね小さな値をもつことが注目される。 $\bar{D}$ 、 D_0 および σ は布を構成する繊維素材、空隙構造を決定する繊維集合構造および繊維表面の界面化学的特性等によって影響されることが予想されるが、両者の関係を議論するためには、まえもって吸水機構に関する詳細な考察が必要であると考えられる。したがって、これらのパラメータに関する検討は今後の課題としたい。

7. 考 察

ここで、平板拡散モデルと吸水速度定数 k_v との関係は以下のように整理される。6.1節では、吸水量 M は時間の平方根 $\sqrt{t}$ に対してプロットすることでよく直線近似できるが、Washburn 則に従うのではないことを示した。Finlayson は、拡散係数が濃度の増加関数であるような非線形拡散方程式の近似解を、選点法、モーメント法等、重み付き残差法に含まれる各手法を用いて求めている [13]。それによると、第一近似は $M = K\sqrt{t}$ の形で得られることが示されている (K は定数)。つまり、吸水量が式 1 の形で近似できるのは、非線形拡散方程式のこのような性質によるものである。事実、付録に示した筆者らの計算法によっても $M(t)/M_{\max} = 0.8$ 程度まで

$K\sqrt{t}$ とよく一致した。計算結果を図 11 に示す。 σ が大きいほど厳密解と第一近似との一致の程度が大きくなっている。これは、本実験結果つまり図 6 に示した傾向ともよく適合する。

布面に垂直な吸水に関して二つの異なる数式モデルが得られたことになるが、ここで両者の特徴を考えると、拡散モデルは吸水現象のセミミクロな機構の理解に有用であるのに対し、布の吸水性の簡易な評価のためには、

Fig. 11 Comparison of strict solution with first approximate solution by method of moment for various σ .

(a)

(b)

Fig. 12 (a) Relationship between fiber axis and direction of water penetration.

(b) A network topologically equivalent with pore space within fiber assembly.

吸水速度定数 k_v および飽和吸水量 $M_{\max}$ が適しているものと思われる。

次に、布面に垂直な吸水が拡散モデルで記述できる理由について検討する。布面に垂直な吸水における繊維と水の進行方向との関係を図12 (a) に示す。繊維回りに形成された空隙中において、水が毛管作用により繊維周囲を回り込むように進行しているものと考えられる。このような複雑な形状をもつオープンボア構造中の水の進行を解析するための考え方のひとつとして、空隙構造に対して適当にサイトおよびボンドを割り当て、格子空間を形成し、毛管作用による水の進行を格子上のランダムウォークとしてモデル化するという方法がある。(図12 (b))。このような格子空間上のランダムウォークないしパーコレーションが拡散的になりうることは、固体中の電子の拡散の物理的描像として、2次元の正方および三角格子上でパーコレーションが用いられている例もあることより明かである[14]。このように考えれば、布面に垂直な吸水が拡散モデルで記述できることが理解できる。筆者らも、ネットワークに対して布の吸水のシミュレーションを行い、いくつかの知見を得ているが、別報で報告する予定である。

8. 布の吸水性評価法

前報では、布面に沿った水分移動は、水が繊維間隙を Washburn 則に従って繊維軸方向に移動していく現象であることを示した[9]。これに対し、本報では、布面に垂直な吸水の場合は、繊維間隙に形成された屈曲した繊維間隙の集合体である水路網中を、水が繊維の周囲をまわりこむような形で進行していくという機構を推定した。その結果、布面に垂直な場合は、平行は場合に比べて速度論的に遅い過程であることが判明した。このように、毛管作用による布中の水分移動には、その機構ならびに速度において著しい異方性が認められる。そしてこれは、布中における繊維配向の異方性、つまり、一般に繊維軸が布面に沿って配向している程度が強いことに起因していると考えられる。

以上のような布の吸水における異方性は、吸水性評価法の適切な選択において重要な意義を持つものと思われる。従来、広く使われてきたバイレック法は、布面に沿った吸水性を測定する方法であるが、布の吸水の異方性を考慮すると、この値のみによって吸水性を評価することは、適切とは考えられない。図13にその一例を示しているが、 $\bar{K}_H$ は結露センサアレイ法[9] (バイレック法の改良と考えられる) によって測定された布面に沿った方向の吸水速度定数で、 k_v は同じ布について圧力センサ法によって測定された吸水速度定数であり、 $\bar{K}_H$ と

Fig. 13 Comparison of measurement method of water absorption of fabrics. Ordinate: $\bar{K}_H$, water absorption rate constant by dew sensor array method (mean of warp and weft directions) Abscissa: k_v , water absorption rate constant by presssensr method. Symbol (●) denotes cellulosic fibers ($\theta_a = 0$).

k_v との間には相関が認められない。このように、布面に垂直な方向と平行な方向の吸水性は互いに関連がないため、布の吸水性は方向に応じてそれぞれ独立して測定する必要がある。衣料用布は布面と皮膚面が接するような形で使用されることから、実用性能の評価という観点からは、ここで述べた布面に垂直な吸水の評価が必要であるものと考えられる。

9. 結 論

布面に垂直な吸水の新しい測定法として、圧力センサ法を開発した。この方法により、布の吸水性を簡便にかつ精度よく測定することができることが確認された。この方法を用いて各種布試料の測定を行い、吸水速度定数 k_v および飽和吸水量 $M_{\max}$ により布の吸水性を評価し、布厚さ、布の平面重量等の布構造定数との関係を検討した。さらに、吸水機構の解析を行い、布面に垂直な吸水現象は非線形平板拡散モデルにより説明されることを見出した。吸水量 M が $M = K\sqrt{t}$ (t は時間、 K は定数) の形に記述されることが、このモデルを用いることにより説明された。以上の結果をもとに、布の吸水性の評価法に関する考察を行い、吸水時における繊維軸の配向方向と水の侵入方向との位置関係を考えることにより、繊維間隙の構造をトポロジカルに同等なネットワークに置き換え、水の進行をこのネットワーク上のランダムウォークと考えることで、吸水現象が拡散的になり得ることが示唆された。

付 記

本研究の遂行に際し、森戸裕子氏（当時学生、現愛知県立宝陵高校）、水野祐子氏（当時学生、現(株)豊田中央研究所）の援助を得た。ここに記して謝意を表します。

本研究の内容は、第5回および第6回感覚と計測に関するシンポジウム（1991年6月27日・1992年6月18日・東京・国立教育会館）における発表をまとめたものである。

文 献

1. P. Larose; *Am. Dyest. Rept.*, **31**, 105 (1942).
2. J. H. Kettering; *Am. Dyest. Rept.*, **37**, 73 (1948).
3. E. C. Jackson and E. R. Roper; *Am. Dyest. Rept.*, **38**, 397 (1949).
4. E. M. Buras Jr., C. F. Goldthwait and R. M. Kramer; *Text. Res. J.*, **21**, 39 (1950).
5. B. Miller and I. Tyomkin; *Text. Res. J.*, **56**, 706 (1986).
6. 塩見昭, 阿部久美子, 前田直美; 繊維誌, **31**, 202 (1990).
7. E. W. Washburn; *Phys. Rev.*, **17**, 273 (1921).
8. ASTM F-316-86; 米田守宏, 川部元祥, 佐藤和仁, 繊維学会第6回感覚と計測に関するシンポジウム予稿集, D-97 (1992).
9. 米田守宏, 丹羽雅子; 繊維誌, **48**, 288 (1992).
10. J. Crank; *"Mathematics of Diffusion (2nd ed)"*, Clarendon Press, Oxford (1975).
11. B. A. フィンレイソン; “重み付き残差法と変分原理”, 鷲津久一郎, 山本善之, 川井忠彦訳, 培風館 (1974).
12. H. Fujita; *Mem. Coll. Agr. Kyoto Imp. Univ.*, **59**, 31 (1951).
13. B. A. Finlayson; *Brit. Chem. Eng.*, **14**, 53 (1969).
14. B. Sapoval, M. Rosso, and J. F. Gouyet; *J. Physique Lett.*, **46**, L149 (1985).
15. 市田浩三, 吉本富士市; “スプライン関数とその応用”, 教育出版 (1979).

付録 非線形拡散方程式の解法

本文式6の解法を以下に要約する。拡散方程式, 境界条件および初期条件は, 次の通りである。

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \tilde{D}(u) \frac{\partial u}{\partial z} \right\} \quad (6)$$

$$\tilde{D}(u) = 1 + \sigma u \quad (7)$$

$$\frac{\partial u}{\partial z} = 0 \quad (z = 0, \tau > 0) \quad (A-1)$$

$$u = 1 \quad (z = 1, \tau > 0) \quad (A-2)$$

$$u = 0 \quad (0 \leq z \leq 1, \tau = 0) \quad (A-3)$$

ここで, u , z , τ は, それぞれ次の形に無次元化された濃度, 位置, 時間である。

$$u = c/c_0 \quad (A-4)$$

$$z = x/\ell \quad (A-5)$$

$$\tau = D_0 t / \ell^2 \quad (A-6)$$

c , x , t はそれぞれ通常の濃度, 位置, 時間, c_0 は初期濃度, ℓ は厚さを示す。式6は拡散係数が式7の形で濃度依存性をもつような非線形拡散方程式であり, 近似解法としては, Finlayson が述べる通り[13], 重み付き残差法が適している。重み付き残差法には, 選点法, ガラーキン法, モーメント法等, 試行関数の選択により, いくつかの手法があるが, 近似の次数を上げると, 手法の別によらず精度のよい解が得られることが知られている。これまでに, 藤田がモーメント法を用いて, 式A-1からA-3と同様の条件下で非線形熱伝導(拡散)方程式を解いた例がある[12]。本論文では, 文献[12]の解法を, Crank による補足[10]および筆者らによる若干の改良を加えて利用した。それらを含めて, 以下にその計算法を要約する。

モーメント法の考えかたは次の通りである。

$$\frac{\partial u_n}{\partial \tau} - \frac{\partial}{\partial z} \left\{ D(u_n) \frac{\partial u_n}{\partial z} \right\} = \epsilon_n \quad (A-7)$$

$$\int_0^1 \epsilon_n z^n dz = 0 \quad (n = 0, 1) \quad (A-8)$$

式A-7の ϵ_n は, 式6の両辺の差をとった残差であり, モーメント法では, 式A-8のようなモーメント式を作り, これを区間(0, 1)にわたって平均的な意味で0

Fig. A-1 Concentration distribution when $\tau < \tau^*$. ζ is penetration distance.

になるように u の関数形を決定する。

この方法の適用にあたり、時間領域に関して 2 つの部分に分けて解を求めることにする。すなわち、 τ^* を物体の外 ($z=1$) の濃度が物体の中心 ($z=0$) に影響を及ぼし始める時間とし、領域 $\tau < \tau^*$ と $\tau > \tau^*$ に分割することにより、それぞれの領域において異なる媒介変数を定義し、関数形を決定する。このように、時間領域によって解法を分けるのは、 $\tau > \tau^*$ における解が有限領域でのふるまいを示すのに対し、 $\tau < \tau^*$ における解が半無限固体としてのふるまいを示すためである。

1) 領域 $\tau < \tau^*$

この場合は、浸透長さをパラメータとし、次の形に解を求める。(図 A-1)。

$$u = 0 \quad (0 \leq \xi \leq z) \quad (A-9)$$

$$u = A_1(\tau) + B_1(\tau)(z - \xi)^2 + E_1(\tau)(z - \xi)^3 \quad (\xi \leq z \leq 1) \quad (A-10)$$

$A_1(\tau)$, $B_1(\tau)$, $E_1(\tau)$ は未定係数であり、式 A-10 の形に仮定した解をモーメント式 A-8 に代入し、適当な条件を入れて計算し、決定する。解は次の通りである。

$$u = \left(\alpha \tau^* - \frac{3}{2} \right) \left(\frac{\tau^*}{\tau} \right) (z - 1 + \sqrt{\frac{\tau^*}{\tau}})^2 - \left(\alpha \tau^* - \frac{5}{2} \right) \left(\frac{\tau^*}{\tau} \right)^{3/2} (z - 1 + \sqrt{\frac{\tau^*}{\tau}})^3 \quad (A-11)$$

ここで、 $\alpha = 30(1 + \sigma/2)$ (A-12)
 τ^* は β に関する次の 2 次方程式の大きい方の正根 $\beta = \tau^*$ である。

$$24\alpha \left(\frac{\alpha}{15} - 1 \right) \beta^2 + (108 - \frac{31}{5}\alpha) \beta + \frac{3}{2} = 0 \quad (A-13)$$

吸水量 $M(t)$ は次のようになる [10]。

$$M(t) = \ell C_0 \left(\frac{1}{8\sqrt{\tau^*}} + \frac{\alpha\sqrt{\tau^*}}{12} \right) \sqrt{\tau} \quad (A-14)$$

式 A-14 に A-6 を代入し、整理すると、本文式 1 における吸水速度定数 k_v は次のように表わせる。

$$k_v = C_0 \sqrt{D_0} \left(\frac{1}{8\sqrt{\tau^*}} + \frac{\alpha\sqrt{\tau^*}}{12} \right) \quad (A-15)$$

式 A-12, A-13 が τ^* の非線形度 σ への依存性を表わすことから、式 A-15 より k_v が拡散係数 D および σ に影響されることがわかる。式 A-14 は、解法上は $\tau < \tau^*$ に制限を受けるが、 $\tau > \tau^*$ に延長しても、 $M(t)/M_{\max} = 0.8 \sim 0.9$ 程度までは、次に示す $\tau > \tau^*$ の解に一致することが数値計算により確認されている (本文図 11 にその計算例を示す)。

2) 領域 $\tau > \tau^*$

$z=0$ での濃度変化を u_0 とし、パラメータ ψ を次のよ

Fig. A-2 Concentration distribution when $\tau > \tau^*$. u_0 is concentration at the center of the body.

うに導入する (図 A-2)。

$$\psi = 1 - u_0 \quad (A-16)$$

濃度分布を次のように仮定する。

$$u = A_2(\tau) + B_2(\tau)z^2 + E_2(\tau)z^3 \quad (A-17)$$

1) と同様に、未定係数 $A_2(\tau)$, $B_2(\tau)$, $E_2(\tau)$ をモーメント法を用いて決定する。この場合、若干の計算の後、 τ と ψ の関係が次のように求まる。

$$\tau - \tau^* = \frac{1}{C_1} \left\{ \log \frac{1}{\psi} + \gamma_1(1 - \psi) + \frac{1}{2}(\gamma_1^2 - \gamma_2)(1 - \psi^2) - \frac{1}{3}(\gamma_3 + 2\gamma_1\gamma_2 + \gamma_1^3)(1 - \psi^3) + \dots \right\} \quad (A-18)$$

各係数の決定法は次のとおりである。 C_1 は次の 2 次方程式の 2 根のうち小さい方の根をとる。

$$\frac{1}{80}C_1^2 - \frac{13}{30}(1 + \sigma)C_1 + (1 + \sigma^2) = 0 \quad (A-19)$$

C_2 , C_3 , $C_4 \dots$ および γ_1 , γ_2 , $\gamma_3 \dots$ は次の関係式を用いて決定される。

$$C_2 = \left\{ \frac{\sigma}{12}C_1 - \frac{\sigma}{2}(1 + \sigma) \right\} / \left\{ \frac{13}{30}(1 + \sigma) - \frac{3}{160}C_1 \right\} \quad (A-20)$$

$$C_3 = \left\{ \frac{\sigma}{12}C_2 + \frac{1}{80}C_2^2 \right\} / \left\{ \frac{13}{30}(1 + \sigma) - \frac{1}{40}C_1 \right\} \quad (A-21)$$

$$C_4 = \left\{ \frac{\sigma}{12}C_3 + \frac{1}{32}C_2C_3 \right\} / \left\{ \frac{13}{30}(1 + \sigma) - \frac{1}{32}C_1 \right\} \quad (A-22)$$

etc.

$$\gamma_1 = C_2/C_1, \gamma_2 = C_3/C_1, \dots, \gamma_i = C_{i+1}/C_1 \quad (A-23)$$

Crank による補足 [10] においては、以下、連立微分方程

式系を各種条件のもとで数値積分することにより解を求めているが、複雑なため、本論文では次の方法をとった。

τ と ψ の関係を式 A-18 で計算しておき、B-スプライン関数を用いて次のように表わしておく [15]。

$$\tau(\psi) = F(\psi) = \sum_{i=1}^n a_i B_{i,k}(\psi) \quad (A-24)$$

ここで、 $B_{i,k}$ は $k-1$ 次 of B-スプライン、 a_i は係数である。解の表現には、 $\psi(\tau)$ およびその一次微分が含まれるので、式 A-24 の逆関数を求め、 ψ に関して陽な形で次のように表わしておく。

$$\psi(\tau) = F^{-1}(\tau) \quad (A-25)$$

スプライン関数で表現しておけば、逆関数を求めるのは容易であり、同時に一次微分も求めておくことができるという利点がある。式 A-18 の関係を、このようなスプライン関数の形に表わすことにより、未定係数 $A_2(\tau)$ 、

$B_2(\tau)$ 、 $E_2(\tau)$ は次のように決定され、式 A-17 に $B_2(\tau)$ 、 $E_2(\tau)$ は次のように決定され、式 A-17 により濃度分布が求まる。

$$A_2(\tau) = 1 - \psi(\tau) \quad (A-26)$$

$$B_2(\tau) = -\frac{3}{8} \frac{1}{(1+\sigma)} \frac{d\psi(\tau)}{d\tau} + \frac{\psi(\tau)}{2} + \frac{5}{4} \frac{\sigma}{(1+\sigma)} \psi^2(\tau) \quad (A-27)$$

$$E_2(\tau) = \psi(\tau) - B_2(\tau) \quad (A-28)$$

以上より、吸水量は次のようになる。

$$M(\tau) = \ell C_0 \left\{ 1 - \frac{1}{32} \frac{1}{(1+\sigma)} \frac{d\psi(\tau)}{d\tau} - \frac{17}{24} \psi(\tau) + \frac{5}{48} \frac{\sigma}{(1+\sigma)} \psi^2(\tau) \right\} \quad (A-29)$$