報 文

洗浄過程における布地組織内液体流動 (第 1 報)

水と *n*-ヘキサンの透過および浸透

前 島 雅 子

川村短期大学 (東京都豊島区目白 2-22-3)

Liquid Flow Behavior in Washing Process of Textile Fabrics. I.

Permeation and Penetration of Water and *n*-Hexane in the Structure of Textile Fabrics

Masako Maejima

Kawamura Junior College (2-22-3, Mejiro, Toshima-ku, Tokyo)

It is necessary to know the details of mechanical action in washing process of textile fabrics for obtaining better effect. Several factors of intricacy in analysis of washing process depend on the peculiar geometrical structure of textile fabrics. Relation between liquid flow behavior and pore structure of twelve sorts of fabrics was examined.

It was confirmed that permeation of water and *n*-hexane in these fabrics is expressed in principle by modified by Poiseuille's law and penetration of both fluids by Washburn's equation. The calculated pore radii by experimental data of permeation and of penetration are balanced with pore radius determined by mercury intrusion method. The cause of mutual little discrepancy in the calculated pore radii and the constant of velocity gradient *m* between these fluids was discussed.

1 緒 言

繊維製品の洗浄は金属やフィルムなどの平滑の洗浄に比べて複雑な要因をもっている。布地洗浄の際に加えられる機械作用の効果は全洗浄効果の内 55% ほどのウェイトを占めるといわれている¹⁾が、その内容は十分に検討されていない。布地洗浄の物理的条件を定めるためには布地の幾何学構造やレオロジー的性質ならびに布地組織内液体流動についての知識が必要である。また繊維は比表面積が大きいので流動に対する繊維と液の化学組成や電気的性質の効果も見のがすことはできない。

布地洗浄機械作用についての考察の手掛りとして布地組織内の水と *n*-ヘキサンの低流速範囲の透過実験と浸透上昇実験を行ない、布地の細孔半径を算出して水銀圧入法で決定した細孔半径と比較した繊維の幅は通常の粉体粒子の大きさに近いので粉体層と比較して布地内液体流動特性を検討した。

1.1 布地組織内液体流動

布地は一種の多孔体である。多孔体内の透過流動についてはこれを粒子のまわりの流れとみなす抗力説²⁾もあるが、比較的低流速の場合は細管内の流れとみなす円管

模型説を用いることができる。粉体透過層などの垂直方向の液体透過には式 (1) (Darcy の法則) が良く適合するとされているが、これは粘性流動が成立する場合にだけ適用される。

$$V = -k \frac{dP}{dx} \quad (1)$$

ここで *V* は透過流速、*dP/dx* は透過層厚みに対する圧力差、*k* は定数である。

布地平面に垂直方向の透過では透過層の厚みが非常に小さい。流速 700 cm/sec 以下の織布空気透過^{2), 3)}では圧力差 *ΔP* と透過流速 *V* について実験式 (2) が適用され、130 cm/sec 以下の水透過^{4), 5)}でも大体同様の関係が認められる。ただし *α*₁, *β*₁ は定数である。

$$\Delta P = \alpha_1 V + \beta_1 V^2 \quad (2)$$

布地中の細孔を直円管とみなすと非圧縮性流体の単一細孔内流動には式 (3) が適用される³⁾。ただし *η* は流体粘度、*ρ* は流体密度、*L* は布厚さ、*m* は速度分布変化係数、*r* は細孔半径である。単位体積の布地中にこのような細孔が *n* 個ある場合、円形透過層断面半径を *R*₀、透過

流速を V , 細孔内流速を v とすると一定時間内の流量は $\pi R_0^2 V = n \pi r^2 v$ である。布地空ゲキ率を ϵ とすると式 (4) の関係が得られ, 式 (3) と式 (4) により式 (2) の内容は式 (5) のように書かれる。

$$\Delta P = \frac{8 \eta L}{r^2} v + m \rho v^2 \quad (3)$$

$$\frac{v}{V} = \frac{\pi R_0^2}{n \pi r^2} = \frac{1}{\epsilon} \quad (4)$$

$$\Delta P = \frac{8 \eta L}{r^2 \epsilon} V + \frac{m \rho}{\epsilon^2} V^2 \quad (5)$$

式 (3), (5) の右辺第 1 項は Poiseuille 項である。第 2 項は粘性流動からのはずれに対する補正項であるが低流速ほどこの項の効果は小さくなるはずである。2~8 cm/sec の流速範囲について式 (5) の適合性を検討した。

1.2 布地の液体浸透速度

直毛細管の液体浸透速度については式 (6) で表わされるが, 固-液間の付着張力 A は便宜的に $r \cos \theta$ で置き換えられ⁷⁾, 垂直浸透上昇の場合は静水圧項が加わるので式 (7) の形になる。ただし l は浸透距離, t は浸透時間, R は毛細管半径, θ は液体, 空気, 基質の間の接触角, γ は液体表面張力を表わす。

$$\frac{dl}{dt} = \frac{RA}{4 \eta l} \quad (6)$$

$$\frac{dl}{dt} = \frac{R}{8 \eta l} (2 \gamma \cos \theta - R \rho g l) \quad (7)$$

多孔体の浸透については多くの研究例があり, ロ紙浸透挙動の細孔径分布関数による検討⁸⁾, 溶剤のロ紙浸透挙動⁹⁾, 不織布, 織布, 合成皮革の浸透挙動¹⁰⁾ などである。

半径 R の曲折毛細管で構成される多孔体の浸透上昇は多孔体の見かけ浸透距離を h , 曲路率を f とした場合, $l = fh$ の関係と式 (7) から次のように書き表わされる。

$$\frac{dh}{dt} = \frac{R \gamma \cos \theta}{4 \eta f^2 h} - \frac{R^2 \rho g}{8 \eta f} \quad (8)$$

布地の液体浸透上昇挙動の式 (8) への適合性を検討し

Table-1 Description of fabric samples.

No.	Fabric type	Thread count/cm		Dry weight (g/100 cm ²)	Thick- ness (cm)	Single fiber diameter (μ)	Porosity
		Warp	Fill.				
1	Cotton weft knitting	15*	12*	1.99	0.100	5~20	0.87
2	Cotton shirting	41	40	0.74	0.019	7.5~17.5	0.75
3	Cotton sheeting	23	22	1.41	0.036	8.8~20	0.75
4	Wool flannel	18	17	2.24	0.084	15~22.5	0.81
5	Wool muslin	27	25	0.91	0.027	17.5~23.8	0.74
6	Rayon plain	34	24	0.66	0.013	22.5	0.67
7	Silk plain	48	37	0.24	0.006	7.5~15	0.69
8	Vinylon plain	25	30	1.00	0.025	22.5	0.68
9	Polyester taffeta	45	33	0.95	0.015	12.5	0.54
10	Polypropylene taffeta	47	34	0.85	0.016	20	0.40
11	Nylon taffeta	59	51	0.56	0.012	20	0.59
12	Saran twill	17	13	2.80	0.043	52.5	0.62

* loops/10 cm

た。

2 実 験

2.1 試 料

Table-1 の 12 種の布地と東洋ロ紙製クロマト用ロ紙 No. 50 を試料として用いた。試液は第一級 n -ヘキサンおよび除鉄フィルターを通したイオン交換水である。

2.2 布地の液体透過

Fig.-1 の円管透過実験装置により布地平面に垂直方向の液体透過を行ない, 透過流速と試料前後の圧力差を測定した。初めに液を静かに試料設置部の下方から上部まで満たし, 試料上下に気ホウのないことを確かめて試料上方から下方への流動を開始する。液ソウ T_2 に満たされた液はコック B_1 の開放により流下し, T_2 の底を貫ぬくガラス管の下端に液面が達するまで流出が行なわ

Fig.-1 Equipment of permeable flow.

れ, 試料上常に 53 cm の液頭が保たれる。布地試料は透過断面の外周をパッキングを用いて装置に固定した。試料設置部は透明なアクリル樹脂管を使用し, 試験中気ホウ混入の有無および試料設置状態を点検した。試料上流の圧力差取出し口は管入口に近い位置に置き, 管内速度分布の影響を除いた。透過流速はコック B_2 で調節し, 浮子式流量計 F でその大きさを測定する。流量計はテーパ管とフロートの組合せで構成され, 実験に先立ってキャリブレーション

た。透過圧力差は図中のマノメータMで試液と空気の界面高さの差を測定して定めた。

水透過実験では布地中に空気が残留しやすいので、Table-2 のような前処理を行なった（揚水ポンプ直結の透過装置による脱気浸液前処理なしの布地の水透過では特に疎水性繊維布地の場合に圧力の経時的増加が著しい⁵⁾）。一定流速に対する圧力差は低流速では流動開始直後はやや経時的にやや不安定であるが、高流速側では比較的早く安定し、流動開始後 7 min 以上にわたる試験ではほぼ一定値が得られた。透過流速約 3 cm/sec 以下で流動開始 2 min 以内に圧力差経時変化のみられる例は綿平織、ビニロン布、サラン布、プロピレン布、絹布の水透過およびポリエステル布のヘキサン透過の場合のわずかの経時的減少と、羊毛布水透過の場合のわずかの経時的増加傾向である。またナイロン水透過の場合には 5 cm/sec 以下の流速でいくぶん圧力差経時的減少傾向がみられた。各試料、流速について圧力差経時変化のない時間帯で測定を行なった。

光学顕微鏡観察では浸液前後の試料繊維の表面状態にとくに変化は認められなかった。繊維の液による膨潤では繊維長の変化は少なく、おもに繊維直径の増大が行なわれるが、水浸試料のモメン、ビニロン、羊毛、レーヨンについては繊維直径にいくらか増加が認められ、とくにレーヨンは浸透初期から約 20% の膨潤(直径増加)が見られる。羊毛も数日以上長期浸せきでは膨潤度を増す。透過実験遂行時には浸水レーヨン以外の試料では膨潤はわずかである。

Table-2 Fabric samples pretreatment.

1	Detergency (0.01% aq. of nonionic detergent, 40°C, 15 min, rinsing, petroleum ether, room temperature, 15 min)
2	Drying (105°C, 2 hr, except No. 12).
3*	Reducing the pressure (2 mmHg, 15 min), subsequent immersion in water

* Only before water permeation test

2.3 液体浸透速度

ガラス製ペーパークロマト展開容器を用い、2 cm 幅の布地とクロマト紙に 5 mm ごとに鉛筆で目盛を入れ、試液の垂直浸透距離を 0.5~80 min の各時間ごとに肉眼測定した。試料は 105°C で 2 hr 乾燥後デシケーター中に保存したものを用いた。

2.4 水銀圧入法による細孔径分布

Fig-2 は低圧ポロシメーター用ディラトメーター略図である。乾燥試料をディラトメーターに入れ、外筒容器中で十分に減圧脱気した後、管部の適当な高さまで水銀を満たす。この後順次加圧により試料中に水銀を圧入し、この圧入量をディラトメーター管部内壁に張られた細い白金線の抵抗値変化で調べる。大気圧まで加圧した後さらに窒素ガスで加圧し、同様の測定を行なう。大気圧以下の圧力測定は外筒容器に連結した水銀マノメーターにより行ない、大気圧以上の圧力測定は圧力計によ

Fig-2-1 Low pressure porosimeter.

Fig-2-2 Dilatometer.

る。圧力 P と細孔半径 r の間には次の関係がある。減圧域で約 $6\sim 80 \mu$, 加圧 120 kg/cm^2 までの範囲で約 0.06μ 以上の径の細孔の占める容積を知ることができる。

$$P = - \frac{2\gamma \cos \theta}{r} \quad (9)$$

3 結 果

3.1 布地組織内液体透過

Fig-3 は透過流速 $V(\text{cm/sec})$ に対する透過圧力差 $\Delta P(\text{dyne/cm}^2)$ である。流速増加により圧力差が増し、同一流速で比較するとヘキサンの透過圧力差は水より小さい。Fig-4 はこの結果を V に対する $\Delta P/V$ の関係に直したもので、多数の試料で大体直線関係が得られる。Table-2 は $\Delta P/V-V$ 図の直線性についての回帰分析結果である。24 組中 19 組の結果は 1% 水準で有意となり、実験式 (2) への適合性が認められる。

No. 1 (綿メリヤス) は水、ヘキサン両液で有意性がなく、No. 3 (綿平織) と No. 8 (ビニロンカナキン) は水の場合に有意性がない。No. 4 (羊毛ネル) は水の場合 5% 水準で有意となった。メリヤスは流速増加による組織の変形が非常に大きく(紡績糸織物も液流による幾何学構造変化(毛羽の動きなど)が起こると考えることができる。No. 6 (レーヨン平織) は水による膨潤が著しく布の空ゲキがふさがれるため水透過圧力差が極度に大

Fig. 3-1 Pressure difference of *n*-hexane permeation. (ca. 20°C)

Fig. 4-1 Variation in pressure difference of *n*-hexane permeation. (ca. 20°C)

Fig. 4-2 Variation in pressure difference of water permeation. (ca. 20°C)

Fig. 3-2 Pressure difference of water permeation. (ca. 20°C)

Fig. 4-3 Variation in pressure difference of *n*-hexane permeation for multiple layers. (Saran twill, 20°C)

きくなる。No. 11 (ナイロンタフタ) は水透過の場合実験流速範囲で $\Delta P/V$ - V 直線が負

のコー配を示すことになる。これについて再度実験を繰り返した結果も同様であった。No. 11 は No. 9 (ポリエステルタフタ) および No. 10 (ポリプロピレンタフタ) に比べて糸密度は大きい細かい糸が用いられており、ナイロン繊維は伸率大、曲げ弾性小という特性をもつ。流動圧による糸の伸長が行なわれると、透過流動への寄与の大きい糸間空気を増し、流路拡大により流速増加に対する圧力差増加の減少が起こる。

重ね合わせた布地についても $\Delta P/V$ - V 図

で概略直線関係が得られ、重ね合わせ枚数増加により、直線の $\Delta P/V$ 軸切点、コー配ともに増加する。

3.2 液体浸透上昇速度

浸透時間 t (sec) に対する浸透上昇距離 h (cm) を表わしたものが Fig. 5 である。この結果をさらに $1/h$ に対する $\Delta h/\Delta t$ に直した図が Fig. 6 になる。浸セキ操作による初期乱流の影響の含まれる浸透直後 (30 sec) のデータを除いて $\Delta h/\Delta t$ - $1/h$ 図の直線性を回帰分析した結果が Table-5 である。No. 1 は水の場合有意性がなく、ヘキサンの場合 5% 水準が有意であ

る。No. 4 (羊毛ネル) はヘキサンの場合 5% 水準で有意となった。これ以外の試料と液の組合せでは 1% 水準で有意となったが、No. 4, No. 5 (羊毛モスリン), No. 10, No. 11, No. 12 では水の浸透上昇が起こらない。口紙および布地の液体浸透上昇については概略実験式 (10) が適用される。

$$\frac{dh}{dt} = \frac{\alpha_2}{h} - \beta_2 \quad (10)$$

Fig.-5 Distance of *n*-hexane penetration. (27°C)

Fig.-6 Velocity of *n*-hexane penetration. (27°C)

Table-3 Results of regression analysis on $\Delta P/V = \alpha_1 + \beta_1 V$

No.	Fluid	α_1	β_1	S_r	S_e	F	
1	Water	1,466	2.84	0.90	1,565.10	0.003	—
2		2,262	134.5	2,080.32	877.90	16.588	**
3		3,058	57.1	398.55	1,348.37	2.069	—
4		2,652	107.5	2,086.94	2,283.94	5.483	*
5		1,840	213	3,983.00	471.00	59.195	**
6		12,552	1,590	—	—	—	—
7		555	145	2,404.90	159.10	105.811	**
8		4,341	70.3	214.37	675.51	1.904	—
9		2,458	239	6,492.20	579.80	67.184	**
10		2,010	253	6,291.83	607.73	72.472	**
11		5,120	-184	3,874.02	894.21	30.326	**
12		3,200	259	7,698.94	2,002.95	26.907	**
1	<i>n</i> -Hexane	330	0.73	0.06	34.81	0.011	—
2		368	32.25	121.86	22.14	33.031	**
3		259	87.8	930.84	88.04	74.011	**
4		384	34.25	141.25	44.25	19.155	**
5		228	19.22	46.37	13.63	23.804	**
6		87	93.4	1,060.35	35.65	208.223	**
7		113	13.75	22.81	9.42	16.952	**
8		274	94.0	1,032.33	115.67	53.549	**
9		5.5	206	5,212.20	201.80	180.796	**
10		51	266.2	7,389.93	543.57	81.571	**
11		197	98.3	1,005.35	30.53	197.581	**
12		94	210	5,465.25	144.30	265.113	**

S_r : Variation by regression * : 5% level significance

S_e : Variation of residual ** : 1% level significance

F : Variance ratio

3.3 布地細孔径分布

水銀圧入法による布地細孔径分布測定結果を Fig.-7, Table-6 に示す。測定温度は約 20°C で、水銀の表面張力を 480 dyne/cm, 接触角を 140° とし計算したものである。すでに報告されている織布, ロ材の水銀圧入法による細孔径分布^{11)~13)}に匹敵する範囲の結果が得られた。ロ紙が狭い細孔径範囲に集中した径分布をもつに対し, 布地は広範囲の径分布をもち, しかも複数の極大をもつ傾向がある。Grace¹¹⁾ は布地細孔径分布の 2 カ所の極大は糸間空ゲキと繊維間空ゲキに概当すると説明している。

3.4 布地細孔半径の算出

3.4.1 透過平均細孔半径 $\bar{r}$ と速度分布変化係数 m 式 (5) の r は透過平均細孔半径に概当するので $\bar{r}$ で表わすと, 式 (2) の α_1, β_1 は次のようになる。回帰分析で得られた α_1, β_1 の値から透過平均細孔半径 $\bar{r}$, 速度分布変化係数 m の算出を行なった。

$$\alpha_1 = \frac{8\eta L}{r^2\epsilon} \quad (11)$$

$$\beta_1 = \frac{m\rho}{\epsilon^2} \quad (12)$$

3.4.2 透過平均細孔半径 $\bar{r}_c$

修正 Kozeny-Carman 式¹¹⁾ による透過平均細孔半径 $\bar{r}_c$ の算出を式 (13), (14), (15) により行なった。ただし R_m は透過抵抗係数, S_0 は試料の比表面積, K は Kozeny 定数である。繊維充テン層の Kozeny 定数について McGregor¹⁴⁾ は $\epsilon < 0.8$ の範囲では $K=5.5$, $\epsilon > 0.8$ では $K=5.5 + 0.48\epsilon^2/(1-\epsilon)$ の適合性が良いとしている。2.0 cm/sec の ΔP と McGregor による K の値を用いた。

$$R_m = \frac{\Delta P}{\eta V} \quad (13)$$

$$S_0^2 = \frac{\epsilon^3}{K(1-\epsilon)^2} \cdot \frac{R_m}{L} \quad (14)$$

$$\bar{r}_c = \frac{2\epsilon}{(1-\epsilon)S_0} \quad (15)$$

3.4.3 浸透細孔半径 R

式 (8) と式 (10) から式 (16), (17) が得

Table-4 α_1 and β_1 of permeable flow of n -hexane in layers of fabrics.

No.	No. of layers	α_1	β_1	β_1/α_1
3	1	259.5	87.8	0.34
	2	246	163.5	0.66
	3	302	314	1.04
	5	395	453	1.15
	10	640	1,162	1.82
4	1	383.4	34.3	0.09
	2	327	129.7	0.40
	3	446	184	0.41
	5	591	316	0.53
	10	1,035	655	0.63
9	1	5.5	206	37.45
	2	81.8	256	3.13
	3	122.7	344	2.80
	5	155.2	681	4.39
	10	218	1,800	8.26
12	1	9.4	210	22.34
	2	10.9	500	45.87
	3	23.2	700	30.17
	5	46.4	1,025	22.09
	10	98	1,500	15.31

Table-5 Results of regression analysis on $\Delta h/\Delta t = \alpha_2/h + \beta_2$

No.	Fluid	α_2	β_2	S_r	S_e	F	
1	Water	0.603×10^{-2}	-0.242×10^{-1}	0.839×10^{-8}	0.482×10^{-2}	1.57	—
2		0.128	-0.538×10^{-2}	0.845×10^{-8}	0.751×10^{-4}	101.22	**
3		0.165	-0.100×10^{-1}	0.937×10^{-8}	0.736×10^{-4}	101.95	**
6		0.758×10^{-1}	-0.763×10^{-2}	0.670×10^{-8}	0.175×10^{-8}	34.43	**
7		0.375×10^{-1}	-0.242×10^{-2}	0.361×10^{-8}	0.180×10^{-4}	160.14	**
8		0.329×10^{-1}	-0.414×10^{-2}	0.179×10^{-8}	0.318×10^{-4}	45.05	**
9		0.150×10^{-1}	-0.328×10^{-8}	0.676×10^{-4}	0.681×10^{-5}	79.43	**
(50)		0.450×10^{-1}	-0.276×10^{-8}	0.301×10^{-2}	0.233×10^{-4}	103.09	**
1	n -Hexane	0.921	-0.416×10^{-1}	0.190×10^{-2}	0.239×10^{-8}	19.48	**
2		0.476	-0.228×10^{-1}	0.209×10^{-2}	0.571×10^{-4}	293.38	**
3		0.525	-0.166×10^{-1}	0.325×10^{-2}	0.116×10^{-8}	251.89	**
4		1.797	-0.946×10^{-1}	0.264×10^{-2}	0.418×10^{-8}	17.68	**
5		0.849	-0.292×10^{-1}	0.430×10^{-2}	0.240×10^{-8}	161.36	**
6		0.385	-0.186×10^{-1}	0.148×10^{-2}	0.708×10^{-4}	125.45	**
7		0.230	-0.200×10^{-1}	0.113×10^{-2}	0.377×10^{-4}	239.09	**
8		0.395	-0.210×10^{-1}	0.181×10^{-2}	0.102×10^{-8}	141.29	**
9		0.200	-0.162×10^{-1}	0.981×10^{-8}	0.455×10^{-4}	172.76	**
10		0.259	-0.211×10^{-1}	0.112×10^{-2}	0.146×10^{-4}	537.62	**
11		0.317	-0.318×10^{-1}	0.679×10^{-8}	0.254×10^{-4}	80.11	**
12		0.592	-0.338×10^{-1}	0.158×10^{-2}	0.190×10^{-8}	33.36	**
(50)		0.676×10^{-1}	-0.129×10^{-2}	0.894×10^{-8}	0.445×10^{-4}	180.52	**

(50) is the filter paper No. 50.

られ、これを解いて浸透細孔半径 R 、曲率率 f を算出した。 α_2 、 β_2 は回帰分析値を接触角 θ はヘキサンについては 0、水については文献値^{15), 16)}を用いた。

$$\alpha_2 = \frac{R \gamma \cos \theta}{4 \eta f^2} \quad (16)$$

$$\beta_2 = \frac{R^2 \rho g}{8 \eta f} \quad (17)$$

$\bar{r}$, $\bar{r}_e$, R , f の算出値を **Table-7** に、 m の算出値を **Table-8** に示す。**Table-9** は算出細孔半径と m の液による比である。

4 考 察

4.1 一枚の布地内の液体流動

単一の液体の布地平面に垂直方向の透過には式 (5) が、布地平面内のぬれ浸透による空気との置換流動には式 (8) が大部分の試料について適用される。これらの式による算出細孔半径は水銀圧入法による細孔径と比較することのできる範囲にあることがわかった。しかし算出細孔半径の間には決定方法による差と液による差が認められるのでこの点を検討する。

4.1.1 決定方法による細孔径差

○細孔形態補正

細孔径算出式はすべて直毛細管管内の流動を表わす Poiseuille 式をもとに導かれているが、布地内の実際の細孔形態は不規則でまた非等方性である。布地平面内の一

定方向には大径細孔（糸間空ゲキ）が不連続であり、浸透距離も相当長いので細孔形態についての補正が必要で

Fig.-7 Pore size distribution of fabrics.**Table-6** Pore volume and radius by mercury intrusion method.

No.	$\Sigma \Delta V_p$ (ml/g)	$\Sigma \Delta V_c$ (ml/ml)	$r_{1/2}$ (μ)	r_{max1} (μ)	r_{max2} (μ)
2	1.300	0.508	7.5	3.9	29
3	1.510	0.592	8	3.9	29
4	1.340	0.353	17.5	14.5	30, 58
5	1.240	0.425	12.5	9.8	29, 58
8	1.270	0.520	17.5	3.9	39
9	0.587	0.372	8.5	3.9	39
12	0.246	0.160	15	10	—
(50)	1.300	0.653	3.8	3.4	24

$\Sigma \Delta V_p$: Total intrusion volume per sample weight

$\Sigma \Delta V_c = \Sigma \Delta V_p / v$, V (ml/g): Sample virtual volume

$r_{1/2}$: Radius of $\Sigma \Delta V_p/2$ intrusion

Table-7 Calculated pore radii and tortuosity factor.

No.	Fluid	$\bar{r}_e$ (μ)	$\bar{r}$ (μ)	R (μ)	f
1	Water	60.3	26.9	—	—
2		16.2	10.2	6.5	2.6
3		19.7	12.0	8.6	2.7
4		36.9	18.9	—	—
5		20.7	13.6	—	—
6		5.7	3.8	7.9	3.9
7		15.7	11.6	3.4	3.2
8		14.3	8.7	—	—
9		15.8	10.4	1.5	3.0
10		19.8	13.5	—	—
11		10.3	5.9	—	—
12		21.5	14.1	—	—
(50)		—	—	1.4	2.1
1	n-Hexane	68.0	22.9	12.7	1.4
2		20.6	13.3	9.3	1.7
3		28.4	21.8	9.5	1.6
4		55.6	26.3	19.2	1.2
5		30.6	20.2	10.5	1.4
6		22.1	23.9	8.3	1.8
7		20.4	14.0	8.8	2.4
8		23.8	18.5	9.0	1.8
9		21.5	114.0	7.8	2.4
10		22.0	45.0	9.1	2.2
11		18.9	16.2	11.1	2.3
12		31.4	43.5	11.5	1.7
(50)		—	—	2.2	2.2

(50) : Filter paper No. 50

あるが、布地平面に垂直方向に大径細孔が貫通しており、透過距離も短いので形態補正の必要性は比較的少ない。浸透細孔半径 R とともに算出した f は流路の大きさの変化と形状変化をも含めた曲路率である。厚みのある透過層（粉体充テン層など）に適用される Kozeny Carman 式は形状補正係数 K を用いるが、式 (5) にはこれが含まれない。各算出細孔径には形状補正係数の寄与が含まれる。

○細孔径分布と流速の影響

布地内空ゲキは大きさの分布をもつ。透過流速が小さくなるにしたがって小径細孔中をほとんど流動させずにおもに大径細孔中を流動する「偏流」が行なわれ、小径細孔の占める容積比率が大きい場合はこの効果が大きくなる。このため低流速データによる $\bar{r}$ はやや大きくなる可能性があり、低流速データによって細孔形状補正係数の推定を行なうことはできない。また高流速透過では流動圧による布地空ゲキ構造変化の懸念がある。

○浸透上昇の条件

径分布をもつ毛細管束の液体浸透上昇速度は構成毛細管半径と浸透距離に依存する。一定以下の浸透距離では管径が大きいかほど浸透上昇速度が大きいが、平衡浸透距

Table-8 Constant of variation in velocity gradient.

No.	Fluid	m	$m\bar{r}^2$
1	Water	2.15	1.56×10^{-5}
2		75.6	7.95×10^{-5}
3		32.1	4.60×10^{-5}
4		70.6	2.52×10^{-4}
5		116.8	2.17×10^{-4}
6		714.0	1.01×10^{-4}
7		69.0	9.34×10^{-5}
8		32.5	2.44×10^{-5}
9		69.8	7.57×10^{-5}
10		40.5	7.35×10^{-5}
11		-64.1	—
12		100.5	1.98×10^{-4}
1	n-Hexane	0.84	7.50×10^{-6}
2		27.7	4.87×10^{-5}
3		74.9	3.55×10^{-4}
4		34.1	2.36×10^{-4}
5		15.9	6.49×10^{-5}
6		63.5	3.62×10^{-4}
7		9.9	1.94×10^{-5}
8		65.8	2.26×10^{-4}
9		91.2	1.18×10^{-2}
10		64.5	1.31×10^{-3}
11		51.9	1.37×10^{-4}
12		123.5	2.34×10^{-3}

Table-9 Ratio of calculated pore radii and m between fluids.

No.	$\bar{r}_{\text{hexane}}/\bar{r}_{\text{water}}$	$R_{\text{hexane}}/R_{\text{water}}$	$m_{\text{water}}/m_{\text{hexane}}$
1	1.11	1.43	2.55
2	1.30	1.08	2.73
3	1.82	—	0.43
4	1.39	—	2.07
5	1.49	—	7.35
6	6.30	1.05	11.24
7	1.21	2.59	6.95
8	2.13	—	0.49
9	11.0	5.20	0.72
10	3.34	—	0.63
11	2.73	—	—
12	3.09	—	0.81
(50)	—	1.57	—

(50) : Filter paper No. 50

離に近づくにしたがって浸透上昇速度は減少する。平衡浸透距離は管径が大きいかほど小さいので特定の浸透距離以下では管径と浸透速度の関係は逆転する。実験範囲では約 10μ 以下の管半径はこの影響が少ない。浸透細孔半径 R は水

銀圧入径 r_{max1} に比較的近い値となったが、糸間そのほかの大径細孔による液上昇が平衡に達したあと、おもに小径側の分布極大径細孔による液上昇が観察されると考えることができる。 R にはこのほか浸透過程での試液の蒸気吸着の影響や湿潤熱による局所的な温度変化の効果も含まれる。

○算出式の前提条件

透過実験結果は式 (15) に適合し、粘性流動を前提とする修正 Kozeny Carman 式 (式 (13)~(15)) には本来適合しない。しかしごく低流速域では式 (5) 第 2 項の重要性が小さくなり、近似的に式 (13)~(15) に適合する可能性がある。最低実験流速 (2 cm/sec) のデータによる $\bar{r}_e$ 算出値はなお $\bar{r}$ より大きい。 $\bar{r}_e$ のかたよりにはまた前述の形態補正係数の寄与も含まれ、繊維充テン層に適する K の値が布地透過の場合はやや大きく過ぎると解釈することもできる。

液体の透過および浸透上昇によって定めた布地細孔半径には以上のような問題点があるが、試料間の比較または試液間の比較には支障ないと考えられる。

4.1.2 液による細孔径差

透過細孔半径、浸透細孔半径とも水およびヘキサンによる径の間に差が認められ、同一試料でヘキサンによる細孔径が大きく、とくに合成繊維布で著しい。

○液による繊維の膨潤

式(5),(8),(13)~(15)には液による繊維膨潤の効果は考察されていない。繊維の膨潤は布地厚さと空ゲキ率の変化をもたらし、算出透過細孔半径に影響を与える。レーヨン布水透過では繊維膨潤が著しく、圧力差上昇が大きいので下が極端に小さくなる。綿、ビニロン羊毛布の水透過データによる算出細孔径にも浸水膨潤の効果がいくらか含まれるとみられる、また液浸透に先立つ蒸気吸着による繊維膨潤がある場合は浸透後期の流動挙動にはこの効果を考慮すべきであるが、浸透後期は流速がごく小さいので重大な影響はない。

○液中の繊維凝集効果

水と溶剤の透過度差は粉体透過層でも見いだされ、固定透過層に比較して非固定透過層で液による差が大きい。Johansen¹⁸⁾は非固定透過層(石英砂充テン層)の透過度が水と比べてイソオクタンの場合に大きいことを認め、液体による透過層粒子の凝集効果の差が主因であると説明している。布地試料は透過断面の外周を装置に固定しているが完全な固定透過層ではないので液による凝集効果の差が加わる可能性がある。

○液のぬれ性

液のぬれ性は各算出細孔半径に対し本来は関与しないはずである。しかし、固定透過層(焼成アルミナ)の場合にも水とイソオクタン、アセトンの間に微小の透過度差が見いだされている¹⁹⁾。透過層に小さいインクピン型細孔が存在する場合、液体はこの細孔底まで完全に侵入しにくい、ぬれ性の液は比較的飽和度(空ゲキ容積を満たす率)が大きく、非ぬれ性の液はこれが小さい。このため液のぬれ性により流路の容積が異なると説明されている。布地中の微細な空ゲキについても同様に考えることができ、前処理(エーテル洗浄後の加熱乾燥)による繊維表面のいくらかの疎水化傾向も推察できる。

○固-液界面付近の流動

管壁表面に形成される限界層内の摩擦応力や液粘度、密度に対する固-液界面特性の寄与があればとくに細管内流動の場合は流量に影響が現われる。上条ら¹⁷⁾は金属平行平板間の流動実験により正規液体は 0.1μ 以上の平板間距離でPoiseuille流動が成立するが、水は 0.5μ 以下ではこれが成立せず、予想流量を下回ることを示し、イオン性流体と固体の界面に生じる電気二重層の流動抵抗が原因であると説明している。

布地による実験には前述の要因の効果も含まれ、水と n -ヘキサンによる細孔径差が μ オーダーとなる。固-液界面付近の流動の基本的な性質を繊維質の単純な表面形態について確かめ、実際の系を検討すべきである。

4.1.3 速度分布変化係数

速度分布変化係数 m の値は親水性繊維布ではヘキサンに比べ水の場合にいくらか大きい、合成繊維布では反対にヘキサンによる値が大きい。 m の大きさは透過試

料の代表的細孔断面積と密接な関係をもつと考えられる。 $a=m\bar{r}^2$ の値は多くの試料で $10^{-4}\sim 10^{-5}$ 程度であるが、No. 1(綿メリヤス)ではこれより小さく、合成繊維布のヘキサン透過ではこれより大きい。

液の流動によって繊維表面には静電気を生じ、高流速ほどその帯電量は大きくなる。極性液体の場合は静電気が漏洩するが非極性のヘキサンではこれが蓄積され²⁰⁾、誘電効率の大きい疎水性合成繊維の場合は帯電量がより大きくなると考えることができる。布地は一種の非固定透過層であるので、このような流動帯電の結果繊維同志が反発し、繊維間距離拡大の程度が大きいと糸間空ゲキの縮小を招き、流動阻害効果が現われる。高流速部の ΔP が大きくなると限られた範囲の実験値については $\Delta P/V-V$ 図の直線の $\Delta P/V$ 軸切点の小さい方へ片寄るので $\bar{r}$ が極端に大きくなり、 m も増加する。

4.2 重ね合せ布地層の透過挙動

布地の重ね合せ層は布地組織とは異なる布間空ゲキ層の加わった特殊な構造である。4種の布地の10枚までの重ね合せ層透過で、式(2)の第1項に対する第2項の比率 β_1/α_1 の動向はTable-3にみられるように、No. 3とNo. 4は枚数増加に対しわずかに β_1/α_1 が増加する傾向であるが、No. 9とNo. 12では一定しない。重ね合せ布地の織糸方向はランダムである。布間空ゲキの大きさや形状は布地表面の状態やサンプル外周の締結強さなどの影響を受ける。布間空ゲキは布地内細孔と比較してかなり大きいので重ね合せによって透過全体の厚みを増しても液体流路の形状は円管から大きくはずれ、流路の拡大収縮に伴う流動エネルギー損失が大きいと考えることができる。比較的均一な空ゲキ構造をもつ粉体透過層とは異なり、10枚までの重ね合せ布地層では式(2)第2項の重要性は小さくならない。

布地洗浄に関連して単純な空ゲキ構造モデルによって低流速範囲の液体透過および浸透挙動を検討した。なお調査不足であるかも知れないが、たとえば液中の繊維物性やその界面特性などの基本的問題の現実利用できるデータは不十分であり、一層の詳細な追求が必要である。さらに、界面活性剤そのほかの物質を含み、布地への接触の仕方もさまざまな実際の洗浄液についてできるだけ定量的な追求を行いたいと考える。

本研究は昭和46年度文部省科学研究費助成による総合研究(ドライクリーニングに関する研究)の一部として行なわれた。細孔径分布測定その他について御指導を仰いだ東京大学生産技術研究所川添邦太郎教授、ならびに終始にわたり御熱心な鞭達を賜わったお茶の水女子大学矢部章彦教授に厚く感謝申し上げます。

(昭和48年2月22日受理)

文 献

- 1) 柏, 平林, 角田, 大場, 油化学, **20** (5), 304-309 (1971)
- 2) L.W. Rainard, *Text. Res. J.*, **17**, 167-170 (1947)

- 3) A.C. Gooding, *Text. Res. J.*, **34**, 713-724 (1964)
 - 4) 前島, 川村短大紀要, **7**, 1-19 (1970)
 - 5) 前島, 家政誌, **22** (7), 432-437 (1970)
 - 6) 伊藤, 化学工学, **26** (10), 1109-1115 (1962)
 - 7) E.D.W. Washburn, *Phys. Rev.*, **17**, 273-285 (1921)
 - 8) P.L. Peek, Jr., D.A. McLean, *Ind. Eng. Chem. Anal. Ed.*, **6** (2), 85-90 (1934)
 - 9) M. Nakagaki, K. Osagawa, *Bull. Chem. Soc. Japan*, **32** (4), 344-348 (1959)
 - 10) A.N. Braslavskii, *Zh. Prikl. Khim.* (Leningrad), **36**, 2648-2653 (1963)
 - 11) H.P. Grace, *A. I. Ch. E. Journal*, **2** (3), 306-315 (1956)
 - 12) 清水, 垣添, 白戸, 化学工学, **31** (1), 61-66 (1967)
 - 13) H. Wakeham, N. Spicer, *Text. Res. J.*, **19**, 703(1949)
 - 14) R. McGregor, *J. Soc. Dyer. Col.*, **81**, 429-438 (1965)
 - 15) 根本, 寺田, 名古屋市工業研究所報告, **45**, 1-5 (1971)
 - 16) J.C. Stewart, C.S. Whewell, *Text. Res. J.*, **30**, 903 (1960)
 - 17) 上条, 草間, 笹田, 潤滑, **14** (6), 287-295, 296-301 (1969)
 - 18) R.T. Johansen *et al.*, *J. Phys. Chem.*, **57**, 40-45 (1953)
 - 19) R.T. Johansen *et al.*, *J. Colloid Sci.*, **12**, 68-79(1957)
 - 20) 大滝, 桜井, 玉井編“応用界面化学” p. 285-306 (1967) 朝倉書店
-