織 維 学 会 誌

昭和 36 年 6 月 第 17 卷 第 6 号 (通巻第 164 号)

報 文

(昭和 35 年 10 月 31 日受理)

織物の圧縮弾性率の測定法

信州大学繊維学部 呉 祐吉・篠原 昭

MEASUREMENT OF COMPRESSIONAL MODULUS OF TEXTILE FABRICS BY MEANS OF ROLLING FRICTION

By Yukichi Go and Akira Shinohara

(Faculty of Textiles, Shinshu University, Ueda City, Japan)

1) A method to obtain a compressional modulus of textile fabrics by means of rolling friction when a solid cylinder rolls on the fabric is devised and practically three methods i.e. rolling, inclined and oscillating methods are used according to the properties of specimen.

2) When a weight of roller of radius (r), and width (b) is W , width of contact between roller and fabric is (a), Poisson's ratio is ν_1 , a compressional modulus of fabrics E_1 may expressed as:

$$E_1 = \frac{2W(1-\nu_1)r}{\pi a^2 b} \approx 0.3184 \times \frac{Wr}{a^2 b} \quad (4)$$

If contact width (a) is obtained experimentally by a method described in 1), E may be obtained.

3) This method depends upon the roller weight and hysteresis of fabric, but good reproducible values are obtained by considering these effects.

4) A compressional modulus is inversely proportional approximately to its bulkiness, and this effect is very remarkable.

(Received October 31, 1960)

1. 緒 論

織物の圧縮性はそのバルキー性の尺度ともなり、毛織物特にパイル織物や毛布²⁾、ジュウタン¹⁾などでは古くから問題にされてきた。一方絹織物や綿布のごとき比較的うすいものでもその風合、味などの官能量の向上という立場から圧縮性、バルキー性が話題にのぼるようになってきている。

従来行なわれてきた圧縮弾性の測定は試料を何枚か重ねて荷重するものであるが、絹布のごとき極度にうすい生地に対しては必ずしも適当でなく、特に一枚についての測定を正確に行なうことははなはだしく困難である。著者はこれらの点を改良し、1枚の試料について測定する目的で布の上を球または円嚢ローラがころがるときのいわゆるころがり摩擦現象を利用して圧縮弾性率を測定する方法を考案した。以下その詳細ならびに測定結果について報告する。

2. 測定原理

一般にシート状物質——ゴム板、フィルム類など——の厚さ方向のヤング率の測定にはヘルツの理論を応用した測定方法がとられている。実際の方法は平面上におか

れた被測定物質の上に、その物質よりはるかに硬い球あるいは円嚢状物質を置き、それを介して被験物に荷重し、そのときの被験物の荷重方向の変位または接触面積と荷重との関係から弾性率すなわちヤング率を測定するものである。特に球の場合には Larrick³⁾ は次式を与えている。

$$Kd^{3/2} = FJ, \quad K = (16R^{1/2}/3) \quad (1)$$

ここに d は変位, R は球の半径, J はコンプライアンス, F は印加荷重である。同様にして半径 r , 長さ b の円嚢の場合には,

$$\frac{2W}{\pi a^2 b} \left\{ \frac{1-\nu_1}{E_1} + \frac{1-\nu_2}{E_2} \right\} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \quad (2)$$

ここに添字 1, 2 はそれぞれ被験物および加圧体 (円嚢) を示す。W は円嚢の重量, a は接触面の幅, b は試料 (ローラと接触している部分) の幅, ν はポアソン比である。したがっている場合は $r_1 = \infty$ であり, また $E_1 \ll E_2$ であるから結局

$$E_1 = \frac{2W(1-\nu_1)r}{\pi a^2 b} \quad (3)$$

となる。もし $\nu = 0.5$ とすれば

$$E_1 = 0.3184 \times \frac{Wr}{a^2 b} \quad (4)$$

となる。したがって実験的に a を求めればヤング率

が求まることになる。半径 r の球が平面と接触している場合は同様にしてヘルツの公式より

$$E = \frac{3Wr(1-\nu)}{16\pi a^3} \quad (6)$$

となる。これは後述するころがり摩擦係数を用いて a を示せば, Flom らの導いた式と一致する。

a を求めるにはランプスケールによる方法や, 電気抵抗法などがあるが繊維類ではこのいずれも適用できない。著者は円盤が水平固体面上をころがるときのころがり摩擦の測定からこの接触長さ a を間接的に求めることを試みた。ころがり摩擦は両物体の接触面における応力分布の非対称からくる回転にさからう方向に働くモーメントによつて定義されている。すなわちころがり運動のために回転する物体と固体平面との幾何学的な接触中心と応力の中心とが多少偏心し, それによつて運動を妨げる方向にモーメントが働くわけである。最近報告されたころがり摩擦に関する論文^{4,5)}では, この偏心は物質の粘弾性に原因するもので理想弾性体にあつては圧縮力と復元力とがキャンセルするので摩擦は生じないという仮定をおいているが, これは必ずしも粘弾性でなく, わずかな遅れ弾性であつてもよいわけである。

一方ソ連のガーリン⁶⁾はこの問題を弾性論的に厳密に解析しスタンプと弾性体との間に, 摩擦力のある場合にこの偏心を与える式を誘導した。これは元来は滑りの間

Fig. 1. Schematic diagram of the contact between cylinder and elastic bed.

題に与えた式であるが, これをころがりの場合にまで敷えんすることも可能である。すなわち Fig. 1 において

$$\frac{c}{a} = 1 - \frac{1}{\pi} \tan^{-1} \frac{1-2\nu}{\rho(2-2\nu)} \quad (6)$$

の関係がある。 ρ はころがり摩擦係数である。したがつて $\rho=0$ ならば $c=a/2$ となるこれは摩擦のない場合であり, いわば静止状態であるので当然である。(6)式で ρ がわかれば $a/2=l=c$ の関係から a すなわち接触面の長さが求まる。したがつて実験的に ρ が求まると

偏心量 l がわかり, (3)~(5)式によつてその物質のその荷重状態における弾性率を求めることができる。

3. ころがり摩擦の測定法

ころがり摩擦係数の求め方としてはいろいろ考えられるが, 被測定物質の性状によつて次の3つの方法を試みた。

a) 転動法 (Rolling Method)

Fig. 2 のごとく応力中心と接触中心との偏心量を l とし, 回転体の重量を P , 半径を r とするところがり摩擦係数 ρ との間に次の関係がある,

Fig. 2. Representation of the forces acting on a rolling cylinder along an inclined plane.

Fig. 3. Method for evaluating the coefficient of rolling friction by rolling method.

$$\left. \begin{aligned} Ppr &= Pl \\ \rho &= l/r \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Fig. 3 のごとく, ころがり摩擦のない高さ h の斜面と, それに続く試料をおいた水平面を用意し, 初速 0 で高さ h から球または円盤をころがすと試料上ではころがり摩擦のためにエネルギーが消散され, 結局弾性体試料上に距離 λ だけころがって停止したとすると

$$l = hr/\lambda \quad (8)$$

したがつて最初の高さ h と, 回転距離 λ とを測定すれば ρ または l を求めることができる。この方法は試料が大きければ ρ の相当小さなものについても求められるが, 表面の凹凸や, ホコリなどによる影響を小さくしなければならないという技術的な制約をうけることがある。この方法は従来塗装面の塗料の乾燥程度を測定する目安にされてきたもので, すでに 1953 年ころ米国の H. R. Moore Co. で Surface Coating Analyzer⁷⁾ なる

装置を販売しており、さらに解析的には J. R. Jenness, JR[®], の報告がある。

式(7)からわかるごとく、この関係はあたかも静摩擦係数に関するクーロンの式と類似しているが、物質固有のころがり摩擦係数というものはなく、回転体の大きさおよび重さによって異つた値をとる。しかし測定の最初に与える位置エネルギーの大きさには無関係である。これらに

Fig. 4. An apparatus for measuring by rolling method.

ついては Tabor らがゴムシートなどについて検討しているが、織布について測定した結果でも h による効果が僅少であることがわかった。

装置として Fig. 4 のごとき木製のものを試作した。傾斜部分はガラス板を貼りつけた。また傾斜は蝶紋によつて調節できるようにした。円錐状ローラとしては直径 1, 2, 3 cm 長さ 5 cm の鉄製のものを用意した。 h の最高は 1 cm とし、硝子面を 12 等分して対応する高さをそれぞれ 12 段階に分けた。

式(7)からわかるごとく同一物質上を同一のローラがころがる場合には最初の高さ h には関係なく ρ は一定でなければならない。すなわち h と λ とは比例関係になければならない。Fig. 5 は木綿ブロード地について $h=i/12$, ($i=1\sim 12$ cm) の各々に対するころがり長さ λ を求めたものである。これから明かなごとく h がごく小さな領域を除いては両者の間にきれいな直線関係のあることがわかる。しかしローラ直径 2 cm, 3 cm ではやや下に凸になり、

その程度はローラの大きいほど顕著である。これは後述するように塑性変形のあらわれとみることができる。そのためこの非線型性を考慮して実際には $h=7/12$ (cm) 以上の部分を用いることにした。

完全弾性体ではころがり摩擦があり得ないとすれば、

Fig. 5. The relationship between initial head h (potential) and rolling path λ using 3 kinds of rolling cylinder. Sample used is cotton broads.

Fig. 6. Representation of slight increase of rolling path with the repeat of rolling on the 8-harness warp satin.

Fig. 7 Representation of slight increase of rolling path with repeat of rolling on paper.

ころがり摩擦を示す物質は当然粘弾性体ないしは塑性的性質を有するものになる。したがって同一カ所を何度か連続的にころがすと表面の性質が変わってくる。その結果 l の大きさは次第に小さくなり、 λ が大きくなる。この現象はゴムシートなどではあまり顕著ではないが、あ

る種の織物では非常に著しいことがわかった。Fig. 6 はスフの 5 枚経シュスについての実験結果である。この場合タテの方が λ が大きいのは浮き糸の方向であり、ヨコ方向が凹凸が多いためである。また Fig. 7 は市販の模造紙について行なつたものである、この場合バラツキがやや大きくなっているが、履歴現象があらわれている。

これらの結果からわかることは λ の大きさが数回後にはほぼ一定値を示すという点である。これは緩和機構が構造的な因子に原因することを示すものと解される。

Fig. 5 で $h=7/12$ cm に対する λ の値をその試料の代表値として E を求めてみる、 $\nu=0.5$ とすれば $a=l$ となるから (4) 式を用いて計算すると第 1 表のごとくなる。

第 1 表

$2r$	W	b	$\lambda(h=7/12)$	$l=a$	E
(cm)	(g)	(cm)	(cm)	(cm)	dyne/cm ²
1	32	5	16.5	1.768×10^{-2}	3.1934×10^6
2	123	5	24.5	2.381×10^{-2}	13.5356×10^6
3	286	5	26.0	3.365×10^{-2}	23.6363×10^6

この表からわかるごとく、見掛けの圧縮弾性率は使用したローラの直径したがってその重量によつて異なり、ローラの大きなものほど弾性率は大きくなっている。このことは実用的に不便な場合もあるが、逆に圧縮率-力関係が単純な直線関係を示さないことを意味するものである。

b) 傾斜法 (Inclined Method)

これは原理的には rolling method の変法でパイル織物のような圧縮性の大きなバルキーなものに適用すべく考案したものである。まず水平台上に試料をおき、その上にローラをのせ、静かに傾斜させ、ころがり落ちる角度を読む、この場合ローラは少しずつ動き出すが、完全にくらがり始めたときの角度を求めた。この装置は静摩擦係数の測定に用いるものをそのまま借用することができる。Fig. 2 のごとくローラの重量を P 、半径を r 、傾角を α とすれば

$$\left. \begin{aligned} P \cos \alpha \cdot l &= P \sin \alpha \cdot r \\ l &= r \tan \alpha \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

となり、偏心量 l が容易に求まる。この方法では λ が小さくて求めにくいような試料にも応用できるが、 λ が大きなものでは $l \ll r$ となり、 $\alpha \approx 0$ になるため測定できない。

c) ころがり振動法 (Cylindrical profil rocker method)

Fig. 8 のごときいわゆるころがり振子を考える。この振子が被測定試料の上をころがり振動する場合を考え、

その振動挙動の観測から圧縮弾性率を求めることができる。塗膜の硬度を調べる振棒硬度計⁹⁾はこの種のものである。E. V. Gaylard¹⁰⁾ はこれの一般振動方程式を論じている。

Fig. 8. Cylindrical profil rocker on a horizontal plane.

いま Fig. 8 のようなロッカーの重心回りの慣性モーメントを I_G 、質量を m 、曲率半径を r 、曲率の中心から重心までの距離を h とすると、ふれが少ない場合には振動方程式は近似的に

$$\left[I_G + m \{ (r-h)^2 + rh\theta^2 \} \right] \frac{d^2\theta}{dt^2} + mgh \sin \theta \pm mgl = 0 \quad (10)$$

で示される。ここで $(\pm mgl)$ 項はころがり摩擦を示し、 l が振幅に関係なく一定と仮定した。この方式では減衰曲線の記録が技術的にむずかしくなるので、円筒に振子をつけた。いわゆるころがり振子を用いた方が便利である。この場合も同様な取扱いからふれの小さなところでは次のごとくなる。いま円筒の中心と振子系の重心までの距離を H 、円筒の半径を r とし $H-r \equiv P$ とする。また振子系全体の質量を M とすると

$$\left[I_G + M(H^2 + r^2 - 2Hr \cos \theta) \right] \frac{d^2\theta}{dt^2} + Mg(H - r \cos \theta) \sin \theta \pm Mgl = 0 \quad (11)$$

θ が小さいことから $\cos \theta \approx 1 - \theta^2/2$ 、 $\sin \theta \approx \theta$ の関係を用いると

$$\left(I_G + MP^2 + MHR\theta^2 \right) \frac{d^2\theta}{dt^2} + Mg \left(P + \frac{r}{2} \theta^2 \right) \theta \pm Mgl = 0 \quad (12)$$

$\theta \ll 1$ であるから θ^2 以上の高次項を無視すると

$$(I_G + MP^2) \ddot{\theta} + MGP\theta \pm Mgl = 0 \quad (13)$$

$I_G + MP^2 \equiv I$ は支点回りの慣性エネルギーである。したがって上式はすでに知られている固体摩擦を伴う単振動系

の問題と等価になる。すなわち

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{MgP}{I} \left(\theta \pm \frac{l}{P} \right) = 0 \quad (14)$$

$\theta \pm l/P \equiv x$ とおくと

$$\ddot{x} + \frac{Mg}{I} Px = 0 \quad (15)$$

となるから、減衰曲線を実験的に求めれば l すなわちころがり摩擦を求めることができる。

Fig. 9. Principle of rolling pendulum.

装置は Fig. 9 のごとく支点になる鉄製円筒とその両側に溶接した2本の振り子になるもので荷重は下端に付加するようにした。この装置により記録された減衰曲線は上式の仮定のもとでは次の条件が満たされねばならない。

- (1) 減衰曲線の包絡線が直線である。
- (2) 振動周期が試料の有無に関係なく一定である。

この2つの条件はこの振動系には振幅に比例した復元力は働かず、また粘性摩擦も存在しないことを意味するものである。

実際の織物についてこの点を調べるとほぼ満足な結果が得られる。またゴムシートについての減衰曲線と、振り子みでの曲線とを比較すると、周期変化がほとんど認められず、また包絡線もほとんど直線的である。

以上の3つの方法はそれぞれの特徴と適用範囲を有しているため、1つの試料について各方法を比較することは不可能である。転動法は他の方法では測定不可能とおもわれる薄地の測定に便利であり、傾斜法や振動法はパイルのような厚地の軟かいものに適している。また後2者では試料の大きさが小さくてすむ長所があるが、硬いものや薄いものに対しては全く無効力である。したがってこれらの方法で求めた値は同種試料に対する比較値としての価値のみを有し異種織物についての値を比較する

ことには意味がない。

4. 織物の性質と圧縮性

織物の圧縮性は原糸の性質と織物の構造および表面の加工によって決まるものであり、織物触感特に硬軟性を支配する最大の要因である。したがって織物の圧縮性は糸あるいは織物のバルキネスとも深い関係を有し、毛織物では縮充程度、起毛程度などの尺度として用いることができる。以下これらについて実験例を示す。

a) バルキネスと圧縮性

紡毛織物を pH 11 の石ケン液に3分間浸せきし、手もみを行なつて種々の程度に縮充した織幅について傾斜法を用いてその圧縮弾性率を求めると Fig. 10 のごとくな

Fig. 10. Changes of compressional elasticity and apparent fabric thickness with milling (shrinkage) process of wool fabric by hand.

る。図の横軸は織物の長さの変化率である。同図にバルキネスの目安としての厚さ変化も示した。圧縮弾性率はこの程度の縮充範囲ではほぼ収縮率と逆比例することがわかる。一方厚さの変化は直線的ではなく、放物線的に大きくなっている。これらは縮充によってフィラメントの捲縮が大きくなり、表面の起毛量が増大するために触感が向上し、ふつくらとした風合になることを示している。したがってここで求めた圧縮弾性率は未縮充のものと縮充の進んだものとでその機構が異なることはいうまでもない。しかも表面に起毛量の少ないものでは測定値のバラツキが大きく、また傾斜角が極度に小さい欠点もある。この例は捲縮の比較的大きな紡毛布の場合であるが、捲縮が極く僅かでも圧縮弾性率に差のあることがわかった。試料としては先練綾網ネクタイ地を用い、転動法によって測定した。第2表は官能的にバルキーである

といわれているグループとそれと反対の判定を受けているものについての測定例である。これからもわかるごとく厚さの差も非常に小さいのであるが、 λ には明瞭な違いがみうけられる。このような小さな差は他の方法によつては検出できない。なお毛布やポーのようなものについては傾斜法あるいは振動法で容易に測定できる。

b) パイル織物と圧縮性

布表面に毛羽のあるものでは毛羽自体の見掛けの圧縮弾性率が求まることになる。しかし毛羽あるいはパイルの種類によつてその圧縮の機構が異なることはいうまでもない。毛羽として考えられるものはいくつかあるが、その第1は起毛長さが長く、しかも毛並みが一方にそろつて伏しているもの、例えばカンミヤはその代表であるが、市販の婦人トッパー地やオーパー地はこの中に入る。これらは地の上に平行状に並ん

Fig. 11. Plot of λ vs. repeating number of rolling on velvetten.

Fig. 12. Plot of λ vs. repeating number of rolling on mohair.

第 2 表

織 物	A	B	C	a	b	c
厚さ (mm)	0.258	0.264	0.246	0.256	0.238	0.230
λ (cm)	44.22	39.76	45.43	49.77	47.42	47.35
$l \times 10^2$ (cm)	2.261	2.515	2.201	2.009	2.109	2.112
$E \times 10^{-7}$ dyne/cm ²	1.502	1.210	1.584	1.901	1.725	1.713
	パルキー・グループ			非パルキー・グループ		

だ繊維を圧縮するものであるから概して軟かく、特に毛の長いものほど柔軟であるが、剛毛やスフの太いものでは圧縮弾性率も大きくなり、触感も悪くなる。起毛状態が布面にほぼ垂直に出ているピロードやコール天、別珍のようなものでは Fig. 11 のごとく圧縮弾性率が非常に大きな値を示している。しかし触感は必ずしも軟かでない。これはローラの重量が小さい場合に特に顕著であるところからローラがころがるときにローラの下側に折り曲げられた繊維が動きやすいためにローラの空転が起こるためと考えられる。したがつてこの種の織物では圧縮弾性率は求まらない。Fig. 11 に示した綿ピロードについて圧縮弾性率を求めると $r=1$ cm, $h=1$ cm で $l=0.41$ cm となり非常に小さな値を示し、これより E を算出すると $E=3.81 \times 10^5$ dyne/cm² とかなり小さな値となる。真直ぐに起毛されているピロードやモケット類ではその圧縮が短かいパイルの圧縮挫屈様の現象とみることができ。したがつてパイルが剛いもので且起毛密度が

相当大きなもの特に椅子張り用ブラッシュ、テレンプ類では挫屈荷重がかなり大きいために普通の布用のローラ荷重では挫屈さえ起こらない。

他方製織フェルトや縮充(起毛)したメルトンやフランドのように地の糸が表面に現われず、細かい毛羽で表面が覆われているものでは理想的な圧縮弾性率が得られる。Fig. 12 は薄地のモヘアーで表面に短く起毛したものについての測定結果である。直径 2 cm では $E=3.07 \times 10^6$ dyne/cm² となる。

9. 総 括

1) 織物の表面圧縮弾性率をローラのころがり摩擦現象を応用して測定する方法を考案し、その具体的方法として転動法、傾斜法および振動法の3つを用いた。

2) ローラの荷重を W 、半径を r 、長さを b 、接触幅を a 、ポアソン比を ν_1 とすると圧縮弾性率 E_1 は

$$E_1 = \frac{2W(1-\nu_1)r}{\pi a^2 b} \approx 0.3184 \times \frac{Wr}{a^2 b} \quad (4)$$

で表わせる。したがつて a を 1) の方法で実験的に求めれば圧縮弾性率を求めることができる。

3) この方法で問題になるローラの荷重の影響、履歴現象その他の測定法に特有の効果を検討し十分信憑性のある値が得られることを確認した。またこれらの方法により求まる測定値間に本質的な差違のないことおよび他の方法により求めたものとの間にも差のないことを明かにした。

4) 布のパルキネスと圧縮弾性率との間にはほぼ逆比

例の関係がある。またバルキネスのごくわずが存在する
ようなものでも圧縮性に大きく影響することを絹織物を用いて検討した。

付記 本研究に協力された間宮広康氏（現在吉田工業
株式会社）に感謝の意を表する。なお本研究の一部は昭
和 34 年度繊維学会秋季研究発表会（名古屋）で報告し
た。

文 献

- 1) W. Stockhausen ; *Mell. Textilber.*, 40, 308
(1959)

- 2) 松島正信, 松尾達樹 ; 織学誌, 16, 105 (1960)
 - 3) L. Larrick ; *Phys. Rev.*, 57, 358 (1940)
 - 4) W. D. May, E. L. Morris & D. Atack ; *J. Appl. Phys.*, 30, 1725 (1959)
 - 5) D. G. Flom, A. M. Bueche ; *ibid.*, 30, 1725 (1959),
31, 306 (1960)
 - 6) ガーリン, 弾性接触論 (佐藤常三訳), pp. 60~61
(1958)
 - 7) H. R. Moore ; *Instruments*, 26, 1499 (1953)
 - 8) J. R. Jenness Jr., ; *J. Appl. Phys.*, 27, 1371
(1956)
 - 9) 井上幸彦他 ; 高化, 11, 414 (1954)
 - 10) E. W. Gaylord ; *J. Appl. Mech.*, 26, 149 (1955)
-