容器を用いない繊維塊の圧縮試験*

(第2報) 圧縮特性式について

(昭和36年12月19日受理) 会 員 若 山 一 夫**

服 部 達 吉

→ 摘 要 ←

目 的

繊維塊の圧縮試験について、第1報で示したような方法をとったときの試料の高さと圧との理論関係を求め、これから試料についての特性値と考えられる量を解析する。また多くの実験を行なって上の方法で得られたものが意味ある値であることを検討する。

成 果

1) 第1報で得られためずらしい実験的事実、およびさきに筆者が得ている一般の繊維塊の薄層で成立する法則を用いて、圧と高さ t との間の関係として

$$t = l + \frac{l\lambda}{F} \log_e \left(1 + \frac{F}{W + \omega} \right)$$

を得た。ここに l は繊維塊の実体厚み、 λ は充てん弾性率、 ω は潜在荷重、 W は試料受台のうちピストン直下の部分が受けもつ圧、および F はその残りの部分の圧である。

2) t 、 F 、 W の一連の測定値から上の式の中の l 、 λ 、 ω を比較的簡単に求める方法を述べ、この方法によって多くの測定例を挙げた。

3) 試験の再現性、試料の厚さおよびピストン径を変えた場合など組織的に検討を進め、その間上式の妥当性を裏付ける多くの事実を知見した。

4) その一つとして木綿とナイロン綿との測定から、両者の繊維のヤング率の比について妥当と考えられる値をだすこともできた。

5) 種々のことから繊維塊の圧縮試験については、圧縮ピストンの径を試料の種類に応じて統一されたものにするのが望ましいことを述べた。しかし実験の限りでは ω 、 λ の圧縮面積による商が定値になることをみた。

1. 緒 言

実験の都合からどうしても避けられない測定時間の効果は、研究の段階としていまのところこれらを誤差の中を含め、一応圧縮弾性として全般を眺める態度をとる。

第1報では繊維塊を容器なしで圧縮試験したとき、横ふくらみの効果がどうしても避けられないことをみた。そこで逆にこの効果を強調するような試験方法を取り、めずらしい結果を得た。そしてピストン圧と試料の厚みとの2量の測定値だけで繊維塊の特性値を導く従来の行き方に疑問をもった。

本報では上に述べた前報の結果によって、この圧縮試験方法をとった場合の圧縮特性式、すなわち圧と高さとの関係の理論式を導く。そして種々の方面から検証を加えながら各種の試料についての測定値を挙げる。この際

2. 圧と高さとの理論式

ここで問題にしようとする圧縮試験は第1図のような原理に従うもので、その実際の装置についての説明などは前報で行なったので、以下には議論に必要なことだけを述べる。試料の面積は圧縮ピストンの面積より大きくとり、試料受台はピストン真下の部分(A)をピストン面と同じ面積だけ他の部分(B)から分離させ、その部分が受持つ圧 W をピストン圧 P と同時に測定する。そし

* Non-Walled Compression Test on Fibrous Mass. Part 2: Characteristic Relation between Compression Force and Thickness. この報文の内容の一部は昭和32年5月の繊維連合講演会で発表した

** K. Wakayama, Member. T. Hattori, 京都工芸繊維大学繊維学部

(第1図) 圧縮試験の原理

てそれら両者の差の力 F をもって試料の横効果とみなす。試料のみかけの厚み t としてはピストンと試料受台との距離を測る。

議論の基礎になるものは前報で得た F と W との関係

$$F = \alpha \cdot l \cdot W^\beta \quad \dots\dots\dots (1)$$

である。ここに α , β は試料および繊維塊の集合形態によって定まる量で、 l は繊維塊の実体の厚みと称して筆者が一連の研究で有用に利用してきた概念である。上式からみて $\log F$ と $\log W$ との曲線が試料のはじめの厚さに関係なく一定のこう配 β であり、また試料の厚みによって比例的にその直線が平行移動するという設定は非常に大切である。これらは前報で実験事実として多くの例を示したのであるが、以後に示す実験の例でも常に検証される。

つぎに筆者が以前に得た²⁾ところの、圧縮される繊維塊の中の薄層で一般に成立する法則も用いねばならぬ。それは繊維自身の圧縮が関与しない、すなわち繊維間に存在する空間の減少のみが与かり、繊維と繊維の接触に変化のないような軽度の圧縮程度で成り立つもので、

$$\frac{dl}{dt - dl} = \frac{1}{\lambda_0} (p + w_0) \quad \dots\dots\dots (2)$$

として表わされた。ここに l は (1) 式に現われたと同じ意義のものであり、 t はみかけの厚みでそれぞれ考えている薄層に関するものという意味で記号 l を付けた。 p はその薄層にかかる圧力で、無負荷の場合でもその薄層があるみかけの厚みを保つことを補償するため、潜在荷重 w_0 が補正される。また λ_0 はこの圧力のもとに $dl/dt - dl$ の充てん率を示すための充てん弾性率と名づけていた。これら2つは当然試料の材種および繊維の集合形態によって定まる定数である。³⁾ (2) 式の関係は円筒中の圧縮の場合でもその理論的解明に役立った。

さて以上の2つのことがらをを用いるのに第1図で示した圧縮試験の途中の任意のある段階を注目し、圧縮される試料が多くの要素的な薄層の積み重ねからなると考え

(第2図) 理論式誘導の原理

る。そして第2図でその一つを示した薄層は、ほんとうはピストン直下に当る部分ではわん曲をもつのであろうが、平均の意味でみかけの厚さ $\Delta t'$ をもった平板と考える。

それとともにこの薄層に (2) 式を用いるのに、ピストンと同じ径の仮想円筒 (破線で示す) 内にある部分は一樣な圧力を受け、(2) 式が成立する試料の条件を満足していると考えてよいであろう。すなわちこの部分は無限大平面上で圧縮される試料の一部分とする。そこで (2) 式を

$$\frac{\Delta l'}{\Delta t' - \Delta l'} = \frac{1}{\lambda} (P' + w) \quad \dots\dots\dots (3)$$

と書きかえて斜線部分にかかる全圧に関するものとする。このような薄層が積み重なって受台Aからピストン面までの試料の高さ t になるはずである。

ここで P' は試料が破線の仮想円筒だけである場合の圧と、それ以外の試料部分からくる影響を圧に換算したものととの和である。そしてこの P' の表式は、第2図のような状態を作る別の方法をとってみることにより見いだすことができる。すなわちさきに考えたような層を一つずつ実際に積み重ねて現状にまでもってくる。ただしそのおのおのの積み重ねにおいて、下部受台Aの圧が常にいまの W の値であるようにピストンで押さえながら行なう。このような操作は実際にはむづかしいことであるが考えの上では成立する。

この積み重ねの途中でそれが第2図に示す層の順番にまできたとき、ピストンの当たる平面はこの層の図に示す平均の高さ t' と同じと考えて大差ないであろう。そしてこのときのピストン圧が (3) 式的全圧 P' に近似的に等しいとみられる。したがって $P' = F' + W$ であり、

(1) 式を高さ l' の試料について適用して

$$P' = F' + W = \alpha \cdot l' \cdot W^\beta + W$$

となる。したがって (3) 式は

$$\frac{\Delta l'}{\Delta t' - \Delta l'} = \frac{1}{\lambda} (\alpha \cdot l' \cdot W^\beta + W + w) \quad \dots\dots\dots (4)$$

のように表わされる。

これを t' ; $0 \rightarrow t$, l' ; $0 \rightarrow l$ の区間で, W をパラメータとして積分すると

$$\frac{\lambda}{\alpha \cdot W^\beta} \ln^* \left(\frac{\alpha \cdot l \cdot W^\beta + W + \omega}{W + \omega} \right) = t - l$$

ここで $F = \alpha \cdot l \cdot W^\beta$ を使って

$$t = l + \frac{l \cdot \lambda}{F} \ln \left(1 + \frac{F}{W + \omega} \right) \quad \dots\dots\dots (5)$$

のように整理する. この結果で l をパラメータにとり t と W , F を変数と考えると, われわれが問題としているこの圧縮試験方法における圧と高さとの理論式が得られたことになる.

3. 理論式の意義

上に得た理論式の中で実際に測定される量は t , F および W の3つである. 他はそれぞれ物理的意義の明らかな試料についての定値である. しかし F と W との間には (1) 式の関係があるから, 実質的には従来の研究のように厚みと圧との2量で圧縮特性が示されたことになる. 媒介変数の意味で F という今日まで測られたことのない測定値を使うと, 実験によく合う理論式が得られるのではないかという予想は第1報から立てていたのである. そして都合のよいことには (1) 式で出てくる α , β のような余分な定数値が最終式では陽に現われてこなかった.

つぎに t , W , F の一連の測定値が実際に上の理論式を満足することを確かめ, 同時に式中の定数をできるだけ簡単に求める方法を考えねばならない. その前にこの表式が定性的にでも実際に成立し得る可能性があるかどうかを調べておく.

一般に t と $1/F$ との間には第3図のような双曲線的な関係がある. そして (5) 式では l , λ が一つの試料について定数と考えているから, $1/F$ に $\ln \left(1 + \frac{F}{W + \omega} \right)$ を乗じたその積が, t との間に図の破線で示すような直線関係になるというのである. そこで上の乗数が圧縮と

(第3図) 理論式の成立性を示す曲線 (t_0 は圧縮前の試料の高さ)

(第4図) $F \propto lW^\beta$ の曲線 ($F/W + \omega$ の意義を示す)

ともどのような変化をするかを考察してみる.

圧縮にともなう F と W との変化が一般に第4図の曲線で示されることは (1) 式でわかる. 図では試料の厚みの大小に応じて2つの場合が示してある. W 軸の負方向に ω をとり, この点 S と $F \sim W$ 曲線上の任意の点 R とを結ぶと, この線分のこう配が $F/W + \omega$ の値を与える.

圧縮が進むと R 点は原点から曲線上を右に進むから, $\overline{SR}$ 線分のこう配 ($F/W + \omega$ の値) は $0 \rightarrow \text{大} \rightarrow \text{小}$ の経過をたどる. したがって $\ln \left(1 + \frac{F}{W + \omega} \right)$ の値も同じ変化を示しその程度は ω の大小で異なる. このとき ω を適当にえらぶことにより $0 \rightarrow \text{大} \rightarrow \text{小}$ と変化する $\ln \left(1 + \frac{F}{W + \omega} \right)$ の値を, 第3図実線の変化を示す $1/F$ に乗じてそのグラフが直線 (破線で示すもの) になるようにすることは可能にみえる.

つぎに上の積と t とが直線関係になるような ω の値が定められたとする. (5) 式右辺の中の $F/W + \omega$ の値は第4図からわかるように, 圧縮の過程のうちで1より小さくなるのがかならず起る. いま図中の (1) のような薄い試料で, その測定の全域にわたって $F/W + \omega$ が1より相当小さく

$$\frac{1}{F} \ln \left(1 + \frac{F}{W + \omega} \right) \cong \frac{1}{W + \omega} \quad \dots\dots\dots (6)$$

の近似が成立するような場合を考える. このとき (5) 式は

$$t = l + \frac{l \cdot \lambda}{W + \omega} \quad \dots\dots\dots (7)$$

で近似され, 第1報でも考察した関係式と一致したものになる.

この結果は (6) 式でわかるとおり, ω が大きくて圧縮試験の範囲内で F がこれに対して充分小さいとき, または W に対して F が充分小さい場合にも起るはずである. 具体的には織物のようなものの圧縮で荷重が小さいとき, あるいはいわゆる“わた”状のものでも薄いものときは上の条件に当てはまる. そしてこの場合その条件の適合の度合がより充分になれば $W \cong P$ と考えてよ

* 自然対数 $\log_e$ と常対数 $\log_{10}$ とをそれぞれ $\ln$ および $\lg$ と略記することがある

く、したがって W の代りに普通の意味の力 P で置き換えることにより、(7)式はさらに

$$t = l + \frac{l \cdot \lambda}{P + \omega} \quad \dots\dots\dots (8)$$

で近似される。

しかしこれでは筆者の得た(5)式からはほど遠く、その不適当な場合が普通であることは第1報でも見たところである。そこで筆者は圧縮試験でいう圧縮力のことを一般に W を意味するようになることを提案したい。これは第1報の測定原理 α で、唯一に測定する圧にそのまま当てはまって好都合でもある。

つぎに(5)式の理論式に対して近似式(7)を参考にすると、筆者の得たものの意義がなお明らかになる。それには t に対する $1/W + \omega$ と $\frac{1}{F} \ln \left(1 + \frac{F}{W + \omega} \right)$ との2つの曲線の差をとってみる。 $F/W + \omega$ は常に正であるから

$$\frac{1}{W + \omega} - \frac{1}{F} \ln \left(1 + \frac{F}{W + \omega} \right) = \frac{1}{F} \left[\frac{F}{W + \omega} - \ln \left(1 + \frac{F}{W + \omega} \right) \right] > 0 \quad \dots\dots\dots (9)$$

が成立し、この差が圧縮の進むとともにどのように変化するかが問題である。

第5図は $F/W + \omega$ と $\ln \left(1 + \frac{F}{W + \omega} \right)$ との間のグラフである。 $F/W + \omega$ の値が圧縮の増すにつれて前述のように(第4図)変化するから、第5図の曲線上で圧縮状態を示す点は原点を出発してはじめ右に進み、 $F/W + \omega$ の最大点から折り返し逆に左方に移動する。

(第5図) $F/W + \omega$ と $\ln \left(1 + \frac{F}{W + \omega} \right)$ との差の変化を示す曲線

(9)式右辺 $[\]$ の中の値は第5図の45°の線と曲線との間の縦距離であるから、圧縮の増加とともにこの値は $0 \rightarrow \text{大} \rightarrow \text{小}$ の変化をする。その間 F は一方向的に増すだけであるから、(9)式の値の変化は上と同様であるが、減少しはじめは $F/W + \omega$ のものよりはやくその減少の度は急激である。このような(9)式の値の変化を、試料の高さ t に対して曲線でその傾向を示すと第6

(第6図) t と $1/W + \omega$ および $\frac{1}{F} \ln \left(1 + \frac{F}{W + \omega} \right)$ の曲線の差異

図のようになる。ただしこの図では前にも前提したとおり t と $\frac{1}{F} \ln \left(1 + \frac{F}{W + \omega} \right)$ とのグラフが直線になるものとして画いてある。

ここで第6図の実線の曲線は特性式を双曲線で近似する一般的な形(第1報)である。この逆S字形を直線とみなす強引さが従来の研究であるが、筆者の得た理論式はこの実線の曲線に対応する破線(直線)の関係を予想するものである。

(5)式で $W \rightarrow 0$ 、したがって $F \rightarrow 0$ の極限をとる。このとき当然 t は圧縮前の厚み t_0 を意味する値になる。

$$t_0 = l + l \lambda \lim_{FW \rightarrow 0} \frac{1}{F} \ln \left(1 + \frac{F}{W + \omega} \right) = l + \frac{l \lambda}{\omega} \quad \dots\dots\dots (10)$$

ゆえに第6図で横軸上の $1/\omega$ における曲線の高さが t_0 である。図の中の2つの曲線(1),(2)は前の図のものに対応するもので ω 、 λ はともに試料が同一種であるから同値とみられ、直線のこう配は試料の実質の厚み l に比例するはずである。

4. 測定値の処理法

(5)式はいままでの研究者が提案した実験式のあるものを近似式として含むので非常に好都合である。しかし式に含まれる定数を一連の t 、 W 、 P の測定値から決定する段になるとまだ不満が残る。これらの定数は単独で求める方法はなく、原理的には一連の測点のおおのについての(5)式の方程式を連立させて解く形で決定する以外にない。

この意味で本研究の圧縮試験はまだ実用的とはいえない。しかし物理的に明確な意義をもつ量を得るためにはやむをえないと思われる。下に多くの測定例を示すが、それらから定数を決定するための具体的な処理法を述べる。

まず P , W の測定値から $F (= P - W)$ を求め、 W と F との間に (1) 式が満足されることを確かめる。これが不充分のときはピストンと下部受台 A が同心でない、試料の置き方の不都合で受台 A に載る部分が浮き上っていた、あるいはピストンの試料面への片当りなどが原因するとみてその測定は廃棄する。直線性は示すがこう配がやや異常である場合は、次章以下の例でもみられるように一般にはその測定がそのまま採用できるようであった。それはこう配の値が関係式の中に陽に現われないからであろう。

つぎに前章で示した式の意義を逆用し、 t と $1/W + \omega$ との曲線が第 6 図 実線のような形になる ω を適当に選ぶ。これは逆数表を使用して 2 度ぐらいの試行で見当がつく。そして一連の測定点のうちの初めの 4 点ぐらいについて $\frac{1}{F} \lg \left(1 + \frac{F}{W + \omega} \right)$ の値を計算する。これも想像するほど手数のかかるものではない、この値と t とを曲線にしてこれが直線になるように 2, 3 度の試みで最終的の ω の値を決定する。その上で全測点についての計算を行う。

このようにして得られる t と $\frac{1}{F} \lg \left(1 + \frac{F}{W + \omega} \right)$ との曲線は一般に第 7 図に示すようなものになる。この図

(第 7 図) 実験値を用いた理論的特性
曲線の一般の形

(第 1 表) 計 算 例: 木 綿 No. 7 ウ エ ブ 4 枚

t (mm)	P (g)	W (g)	F (g)	$1/W + 11$	$F/W + 11$	$\lg \left(1 + \frac{F}{W + \omega} \right)$	$\lg \left(1 + \frac{F}{W + \omega} \right) F$
28.0	8.5	2.0	6.5	0.0769	0.5	0.1761	0.0271
22.0	24.2	8.0	16.2	0.0526	0.858	0.2691	0.0165
20.0	36	13.6	22.4	0.0407	0.910	0.2810	0.0125
18.5	48.8	19.9	28.9	0.0324	0.936	0.2868	0.0099
17.5	59.8	26.0	33.8	0.0270	0.908	0.2808	0.0094
16.5	74.2	34.3	39.9	0.0221	0.883	0.2747	0.0069
16.0	83.7	39.7	44.0	0.0197	0.870	0.2718	0.0062
15.5	93.2	45.5	47.7	0.0177	0.847	0.2666	0.0056
15.0	105.8	53.1	52.7	0.0156	0.830	0.2625	0.0050
14.5	117.4	60.5	56.9	0.0140	0.794	0.2538	0.0045

$\omega = 11.8$

で圧縮の強いところで直線から大きく曲るのは理論の条件が破れるところであると解釈される。それは (3) 式が成立する圧縮初期の段階が終ること、および横ふくらみが利いて λ を定値とみる条件が外れることなどによると思われる。ただしこの曲線部が現われる段階でもまだ $\log F \sim \log W$ の直線性はくずれないのが普通であった。

第 7 図の直線部を延長して縦軸と交る点の高さが l である。さらに横軸の目盛りで $1/\omega \cdot \log_e 10^*$ に相当する曲線の高さが t_0 である。これは前章で述べたように試料の圧縮前の高さを意味するが、精確な実測はほとんど不可能な量で比較できないから、定義づけられた量と考えてよいだろう。この点に関しては後の測定でも説明する。

最後に (10) 式から

$$\lambda = \frac{t_0 - l}{l} \cdot \omega \quad \dots\dots\dots (11)$$

を求める。

第 8 図は上の処理法によった例で、第 1 報にあげた木綿の試験番号 No. 7 につき、 ω を二、三変えたときの曲線が示してある。一般に ω が小さすぎると曲線は上凸に、 ω が大きすぎると逆 S 字形の傾向をみせる。このようなことを知って ω の選定をはやくすることができる。

第 1 表は計算の例を示す。この表によって $F/W + \omega$ および $\frac{1}{F} \lg \left(1 + \frac{F}{W + \omega} \right)$ の値がともに増減する経過がよくわかる。

$$\begin{aligned} * \lim_{F, W \rightarrow 0} \frac{1}{F} \ln \left(1 + \frac{F}{W + \omega} \right) \\ = \lg_e 10 \left[\lim_{F, W \rightarrow 0} \frac{1}{F} \log_{10} \left(1 + \frac{F}{W} \right) \right] = \frac{1}{\omega} \end{aligned}$$

(第8図) 測定値を用いて解析した曲線の例
(第6図に相当する実例であるが、ここでは常用対数を用いたから $1/W+\omega$ の曲線の計算には $(1/W+\omega) \cdot (1/\ln 10)$ を用いている)

5. 二、三のテスト

筆者の試験の確実さを試みる種々のテストを行なう。
測定値の処理はすべて前章の方法にしたがっている。

5.1 試料の横の大きさの影響

この研究ではことわりのない限りピストンおよび受台Aの径は38mmのものを使用した。試料ははじめ大体的見当からその径15cmの円板状のものにしていた。これは試料の表面状態、およびピストンの圧入による試料外周部の変形などを観察して判断した。いまここで試料の横広がり測定にどんな影響を与えるかを実験する。

木綿の“ふとんわた”から得られる9, 15, 19cmの

(第9図) 試料の径を変えたときの $\lg F \sim \lg W$ 曲線

外径の試料を測定にかけた。これらの $\log F \sim \log W$ 曲線は第9図できれいな曲線を示し、試料の大きさによってこの配が少し変化するだけである。また試料の外形が円筒と、正方形のものとの比較も行なったがほとんど差が現われなかった。これらの直線のこの配は使用する(5)式の中にでてこないから、今後の試料はすべて15cm角のものを使うことにする。

5.2 再現性の問題

一般に繊維試験の結果はバラッキを示すことが多く再現性が問題になる。まったく同一の試料を作ることが困難であり、またいまの圧縮試験におけるような、ある関係式を予想してその中の定数を問題とする間接測定ではなお一層再現性は難しくなる。本章で示す実験は、木綿について時間々隔をおかず同じ試料を何回も繰り返し圧縮した試験である。

第10図はこの試験の $\log F$ と $\log W$ との曲線で、それぞれの曲線に圧縮回数が入っている。第1回と第2

(第10図) 連続繰り返し圧縮試験の $\lg F \sim \lg W$ 曲線

回との間には5日間の期間があるが、あとは時間をおかず連続して圧縮した。したがって2度目以後は試料のピストンが当る部分に明瞭な凹形の跡が見えていた。

平行な直線群をみせている第10図で $W=1g$ の線との交点の横軸上の読みは、(それぞれの曲線の下方の短い縦線は $F=10g$ の線) (1)式によるとこれが $\alpha \cdot l$ の値に相当し、その値がどの回数のものもほとんど一致している。これは後にも示す l についての考察と対照して良好な結果である。

つぎに前節による処理法によって、 t と $\frac{1}{F} \lg \left(1 + \frac{F}{W+\omega} \right)$ との曲線で圧縮の初期部分が直線になるような ω の値を選んだのが第11図である。この曲線で読み取れる種々の値は第2表にあげた。 ω はすべて同値となっているが、グラフが直線となるように ω の値を定めたのであるから、もちろんこの値は相当の誤差を含むと思わ

(第11図) 連続繰り返し圧縮試験の $t \sim$

$\frac{1}{F} \lg \left(1 + \frac{F}{W+11} \right)$ 曲線

(第2表) 繰り返し圧縮試験 木綿 (17°C, 70%RH)

回数	ω (g)	l (cm)	t_0 (cm)	λ (c.g.s.)
1	11	1.87	5.77	22.9
2	11	1.87	5.64	22.1
7	11	1.9	5.31	18.7
16	11	1.91	5.08	18.3
26	11	1.93	4.99	17.4
41	11	2.0	5.02	16.6
51	11	1.88	4.92	17.7

れる。しかし 10 % の変動でこの値を定めることはそう困難なことではない。

l の値がいずれもほぼ一定値を示したことも、(第11図の下方の短い縦線は横軸の0線) その物理的意義から当然予期され満足すべき結果である。そしてさきに $\alpha \cdot l$ も定値を示したことから、 α も試料の特性値であることがわかるがここでは問題にしない。

さらに第11図の曲線とその上方にある短い縦線との交点が圧縮前の試料の理論的厚み t_0 を示す。いまの場合大体の実測値を曲線の上に横線で示したが、 t_0 に近い値であるとみて充分であろう。これも筆者の理論式が非常に都合のよい例といえる。 t_0 と λ との値が圧縮回数とともに減少するのは明らかにレオロジ現象であると考えられる。

以上の測定および解析は再現性という点ですべてが都

(第3表) 再現性の実験結果

試料の種類	テスト番号	ω	l (mm)	t_0 (mm)	λ (c.g.s.)	備考
羊毛カードウェブ	No. 204	4	6.8	51.9	26.5	1日 18°C, 73% RH
		4	6.8	48.2	24.4	
木綿ふとん綿	106	8.5	7.1	37	36	1週間 18°C 1日 73% RH
		9	7	39.5	41.7	
		9	7.2	37.5	38.2	

合のよい結果と判断される。しかし得られた測定値に関し、違った関数関係を予定したときどのようになるかをみておくのは有意義である。ここでその関係としては t と $1/W + \omega$ との直線関係がもっとも問題で、第12図がその処理を行なったグラフである。

(第12図) 連続繰り返し圧縮試験の $t \sim 1/W + \omega$ 曲線

この図では $W \rightarrow \infty$ のときの厚み l に相当する値がかなりのちらばりを示し、直線範囲も第11図より狭い。また t_0 の値がすべて実測より小さくでているのも不都合である。

さきの実験は時間をおかず繰り返し圧縮したときのもので、試料の性能について変動のないもの、または少しずつ変動するものなどがあって物理的意義と大体よく一致していることがみられた。つぎには試料の回復性がどの程度のものであり、一度使用したものが同一試料として再利用できるものかどうかという点で再現性を調べる。その結果は第3表で示すとおりであるが、前章の実験の第1回と第2回圧縮についても同じ意味のテストであることはすでに述べた。得られた解析値の変動はバラツキのうちに入れてよい程度と思われる。

6. 羊毛の試験

系統的な研究の方法として以下2、3の章は試料の種類を変えて、それぞれについて試料の厚みが相当大きく異なる場合の実験を示す。

本章で述べる羊毛については、カード機から出たばかりのウェブを新聞紙上にひろげ、15 cm 角に切り抜いたもの多数を作る。これを4～10枚重ねたものに1回調整圧を加え、1週間放置して圧縮試験にかけた。この測定結果の $\log F \sim \log W$ 曲線はすでに第1報に載せた。そこでここには処理を行なった結果を第4表に示す。こ

(第4表) 羊毛の圧縮試験

No.	枚数	ω (g)	l (mm)	t_0 (mm)	λ (c.g.s.)	αl
111	4	2.5	3.6	23.2	13.6	11
112	5	2.5	3.1	19	12.8	7.8
113	6	3	5.1	25.8	12.3	18
114	7	3.5	4.2	21.1	14.1	17.5
116	9	4	7.9	32.2	12.3	21.5
117	10	4	8.7	36.1	12.6	27.5

の表の $\alpha \cdot l$ はさきの第10図で述べた方法によって求めたものである。

この結果について注目されるのは、 ω の値が試料の厚さとともに変化することである。第2, 3章の議論ではこれが試料（厚みによらない）についての定数であることを予定していたのであるが、この結果をみてさきの議論に反省が必要になる。

もともと重さのない繊維の、集合密度が一定であるものを一つの種類の試料であると考えていた。しかしこれをもとにして実際に圧縮される個々の円板試料を作ると、繊維の集合密度が等しくならないことがわかる。これは圧縮前の試料の高さの大体の実測値、または表の t_0 を見てもわかる。集合密度が同じであれば、ウェブ枚数に比例して試料のはじめの高さが増すはずである。しかし一般にそれは成立しない。

これは一応繊維の自重に原因を求めるのが自然であろう。このとき第2章の議論で積分の元になる式に、この自重を組み入れなければならないことになる。しかしこの操作はあまり複雑で、この際自重の効果を ω の中に含ませ、一つの試験試料の中で平均された ω の値が上の解析値として求められると考えたい。

この見解のもとにウェブの枚数、それよりも l に対して ω の曲線を画いたのが第13図である。同時に $\alpha \cdot l$ の曲線も画いてある。

この実験は初期のものであるため測定はややバラツキを示しているが、いずれも l に対して一次の関係が認められる。ことに $\alpha \cdot l$ の値は原点を通る直線上にあるとみてよく、(1) 式の立式が実験によっても間違いのないらしいことがわかる。なおウェブの枚数と l との大小

(第13図) ω , l , $\alpha \cdot l$ の関係 (羊毛)

が一致しないのは用いたウェブが薄く、カード上りで厚みが一様でないことを考えると当然ありうることであろう。ここに述べたことがらは次章以下の慎重に行なわれた実験で一層明瞭になる。

7. 木綿の試験

1年間ボール箱の中にねかせておいた木綿のいわゆる“ふとんわた”を取り出し、普通に分離できるウェブ状のもの（相当厚い）から15 cm 角のものを切り取り、これを1～4枚積み重ねたものを実験の試料にする。調整圧を加えることは以後の実験でもすべて同様である。この測定値についての $\log F \sim \log W$ 曲線も第1報に例示した。そこでは平行な直線群がウェブ枚数の順に応じてみごとに平行移動していた。この曲線で $W=1g$ に対する F の値を読み取ったのが $\alpha \cdot l$ に相当し、第4章の方法による解析値とともに第5表にした。

この表で l がやはり枚数に比例している。ただし同じウェブ枚数の試料でも厚さに不同があり l の異なるのは

(第5表) 木綿の圧縮試験

ウェブ枚数	No.	ω (g)	l (cm)	t_0 (cm)	λ (c.g.s.)	m (g)	αl
1	1	6	0.36	2.74	38.6	0.800	2.5
	2	6	0.37	2.75	38.5	0.73	3.0
	3	7	0.45	2.76	36	0.92	3.8
2	13	7	0.84	5	28.5	1.16	5
	11	7	0.75	5.7	32.7	1.27	5.7
	12	7	0.83	6.2	33.7	1.28	6.2
3	21	9	1.1	5.71	37.7	1.72	9
	23	9	1.12	6.43	42.6	1.93	10
	22	9	1.34	6.9	37.3	2.04	11
4	32	11	1.71	7.61	37.9	2.77	13.3
	33	11	1.81	7.59	35.1	2.77	15
	31	12	1.9	7.47	35.2	2.91	16.7

当然である。 l の意義をいま一つくわしくみる方法として試料の質量と比較することを考えてみた。 もちろん繊維塊の体積を厳密に限定することも不可能であるから正確な議論とはいえないが、実体の厚み l をウェブ枚数に比較するよりは数等優れた次善の策と思われる。

方法としては圧縮試験の後試料のピストンが当たった部分を $6 \times 6 \text{ cm}^2$ の厚紙ではさみ、裁断缺で注意してその周囲を切り取り計量する。 この記録が第5表の m である。 l に対する m と $\alpha \cdot l$ との曲線を第14図に示してある。 両者の原点を通る比例関係は充分であろう。 この結果は筆者の理論について重要な論拠を与えるものである。

(第14図) l と $\alpha \cdot l$; m , ω との関係 (綿)

λ の値のバラツキは、 ω をより一層詳しく定めることができればその変動の一部が ω へ配分されると思われるが、繊維試験の通例としてこの程度でまなができる。 ω の値については前章の考えで l との曲線を第14図の中に入れた。

このグラフで ω の値が試料の量に対して一次関係をもつと断定できる。 一つの試料の中で繊維集合に分布が存在し、その平均が上に得られているとさきに推定したが、その値が試料の厚みを代表する量 m に対して一次関係をもつ理由まではこの際問題にできない。 大体 ω の測定があまりにも直接測定から程遠く、誤差に覆われてその理由づけを実験で検討する余地はないとみられる。

8. ナイロンの試験

$2d \times 1\frac{1}{2} \text{ in}$ のナイロンわたについて前章同様な方法で試料を作って圧縮試験を行なった。(23°C, 60%RH) $\log F \sim \log W$ 曲線の代表のものを第15図に、また全試料の解析値を第6表に示す。 m も前章とまったく同じ方法で求めた。 第14図に相当するものは第16図であって、この図により木綿の場合に得た結論が再び確認さ

(第15図) ナイロンの圧縮試験
($\log F \sim \log W$ 曲線)

(第6表) ナイロンの圧縮試験

	No.	ω (g)	l (cm)	t_0 (cm)	λ (c.g.s.)	$\alpha \cdot l$	m (g)
ウエブ 1枚	2	5.5	0.4	1.89	20.4	1.05	0.36
	1	6	0.54	2.23	19	1.52	0.47
	3	7	0.55	2.23	20.6	1.4	0.49
ウエブ 2枚	14	7	0.61	2.48	21.4	2.1	0.58
	13	7.5	0.73	3.03	23.6	2	0.62
	12	7	0.78	3.22	21.0	2.1	0.68
	11	8	0.86	2.89	18.8	2	0.72
ウエブ 3枚	22	9	1.38	4.76	22.1	4.5	1.14
	23	9	1.54	4.99	20.1	4.6	1.2
	21	9	1.56	4.77	18.6	5	1.18
ウエブ 4枚	33	9	1.48	5.0	21.4	4.5	1.38
	31	9	1.48	5.1	22.0	5	1.25
	32	9	1.65	5.81	22.7	7.8	1.51
ウエブ 4枚	42	10	2.01	6.52	22.5	7.5	1.61
	43	11	2.05	6.45	23.6	7.5	1.69
	41	11	2.25	6.64	23.6	8.5	1.73

(第16図) l と m , αl , ω との関係 (ナイロン)

れる。

ここで木綿とナイロンの λ の測定値を使って繊維のヤング率に関する計算を行なうことができる。 λ の意義を筆者の以前の研究²⁾にかえて再記してみると

$$\lambda \propto Y \left(\frac{m}{t_0} \right)^2 \frac{1}{\rho^2} \dots\dots\dots(12)$$

の関係があると述べている。ここに Y 、 ρ は繊維自身のヤング率および密度であり、この式の m は試料面 1 cm^2 の中にある繊維塊の質量で、さきに測定した m の値と同値ではないが比例の関係がある。さらに t_0 は試料の最初の厚みであるが、自重のない様な繊維塊の試料について考えた量であったから、 ω に関する第6章の議論を考慮してここには l を当てはめるのが適当であるといえる。そこで (12) 式の代りに

$$\lambda \propto Y \left(\frac{m}{l} \right)^2 \frac{1}{\rho^2} \dots\dots\dots(13)$$

と考えると、第5、6表の測定値を代入して綿とナイロンとのヤング率 Y の比が求められることがわかる。

ただし (13) 式の比例定数は両者で同じと考えることにする。これに関する van Wyk の考え方⁵⁾では、この比例定数に相当するものが繊維の太さ、長さ、巻縮などで変わるとした。しかし筆者の場合太さはすでに理論に組み入れ済みであるから長さ、巻縮などの影響のみが残るだけとなり、上の取扱いの無理は大きく軽減されているはずである。

けっきょく

(第17図) t と $\frac{1}{F} \lg \left(1 + \frac{F}{W + \omega} \right)$ との曲線 (ナイロン)

$$\frac{Y_N}{Y_C} = \frac{\lambda_N (m/l)_C^2 \rho_N^2}{\lambda_C (m/l)_N^2 \rho_C^2} \dots\dots\dots(14)$$

を計算してみる。(下つきの記号は N 、 C それぞれナイロンと木綿とを意味する) いま λ の値として表の平均値を用い、 m/l の値には第14、16図のこう配をとり、 ρ は化繊便覧の値を使うと

$$\frac{Y_N}{Y_C} = 1.14 \begin{cases} \lambda_N = 21.3, & (m/l)_N = 0.87 \\ \lambda_C = 36.2, & (m/l)_C = 1.6 \\ \rho_N/\rho_C = 0.74 \end{cases}$$

(第18図) t と $1/W + \omega$ との曲線 (ナイロン)

(第19図) t と $1/P + \omega$ との曲線 (ナイロン)

となって大体常識的な値となっている。

終りに t と $\frac{1}{F} \lg \left(1 + \frac{F}{W + \omega} \right)$ との曲線を、第15図に示した例について第17図に画いておく。別に t と $1/W + \omega$ (第18図), または $1/P + \omega$ (第19図) との同様な曲線を画いてみると、前者では ω はほぼ一致するが直線が交錯し、後者ではその上に ω の値も変動が乱れたりして統一した解釈の解析値が得られないことがわかる。

9. パイル織物の試験

パイル織物がある意味で繊維塊とみなして前と同じ圧縮試験を行なった。試料の作成も同じ方法をとったが、とくにこの場合は試料の片当りの効果が大きく、また圧縮量に対する圧縮力の増大が急であることを考慮して、2 cm 径のピストンおよび受台 A を選んだ。このことについては後章で説明する。

測定値から得た解析値を第7表に示したが、 l と枚数との関係は第20図でみられるように非常にきれいな比例性(原点を通る)をみせている。(織物の場合枚数は相当正確に試料の厚みを代表するものとみられるから、質量 m を求めることはしなかった) これに対して $\alpha \cdot l$ は図で非常な乱れをみせている。これはパイル織物のようなものでは心になる組織部分と、毛羽ともいふべき柔軟部との区別が判然としており、この組織部分の影響が

(第7表) パイル織物の圧縮試験

No.	枚数	ω (g)	l (mm)	t_0 (mm)	λ (c.g.s.)	$\alpha \cdot l$
501	5	13	8.9	12.8	5.7	1.9
502	7	13	12.7	17.57	5.0	2.7
503	9	13	16.35	22	4.5	3.9
504	11	14	20.04	26.59	4.6	5.6
505	13	15	23.05	30.9	5.06	7.0
510	7	13	12.65	17.15	4.62	3
511	9	13	16.05	21.84	4.7	6
512	13	15	23.08	30.5	4.82	8.5

(第20図) l と枚数, αl との曲線 (パイル織物)

図のように現われたと思われる。

このことは第21図の $\log F \sim \log W$ 曲線でもよく現われているのであって、直線部の上に曲線部が見えている。普通の“わた”が圧縮の強いところで上に曲る傾向をもつと異なり、逆の曲り方を示す点は織物(毛布も)の場合の特長であるがその原因は不明である。

さらに第22図に示す $t \sim P$, W 曲線において、同時に示す $t \sim \frac{1}{F} \lg \left(1 + \frac{F}{W + \omega} \right)$ 曲線の直線から外れるような圧縮域では、 t と P との関係がフック則らしいものを見せている。これもパイル織物の心部に圧縮がおよ

(第21図) $\log F \sim \log W$ 曲線 (パイル織物)

(第22図) パイル織物の圧縮試験の特性曲線

んでいる証拠とみられる。

そこで $\alpha \cdot l$ についてのさきの乱れに関してつぎのような判断も下せる。織物などはステープルとちがって、圧縮ピストン直下のところとそれ以外のところとで曲げ抵抗が働く度合が強く、このとき織物の曲りぐせなどによって曲げの支点が一樣にならないようなことが起るのではないか。

以上のようにしてこの研究が織物に適用されるのは圧縮のごく小さい範囲に限られるが、パイル織物などのように組織部以外に柔軟部の多いものについては充分測定にかかることがわかった。少し感度を上げると毛布についても測定できる。

10. ピストン径の異なる場合

前章までのいわゆる“わた”については 38 mm 径のピストンを用い、織物については 20 mm 径のものを用いてきた。この径の選定については直感による適宜の判断によったのであるが、議論を完全なものにするためにはピストン径の変ったときのことも考えておかねばならない。

(2) 式を (3) 式の形にして用いたところで、すでに面積を機械的に圧力に乗じて全圧の法則にしてしまっていた。詳細には考える薄層がピストン直下のところではわん曲し、圧力にある分布が存在すると思われる。これを厚み $4t'$ のような平板状のものと考えるとき、第 2 章の積分操作が実際のみかけの試料の高さ t 、あるいは試料の実体厚み l になるかどうか、またこのときの偏差などにつき詳しい考察がほんとうは必要になるであろう。

しかし実際にはさきの簡単な仮定で実験を重ね、その結果が相当の真実性を示すことを前節までにみてきた。そこでいまの場合もこの簡単な考えで予想を立て、実験の結果でその当否を問題にすることにする。すなわち違ったピストン径の場合にも、そのピストン面積 (A) の全圧について (3) 式と同様な法則が成立するとし、それから得られる筆者の理論式が実験にあえば

$$\lambda \propto A, \omega \propto A \quad \dots\dots\dots (15)$$

が成立することになる。もちろんこの考えはピストン径が実際に実験を行なった範囲からひどく違えば成立しないかもしれない。

10.1 ナイロン スフ (5 d × 2 in)

この試料についてピストン径を 52, 38, 20 mm にして行なった実験の $\log F \sim \log W$ 曲線が第 23 図であ

(第 23 図) $\log F \sim \log W$ 曲線 (ナイロン 5 d × 2 in)

る。第 9 章のパイル織物で述べた曲線の曲りに関し、この場合は小ピストンのとき上方の曲りになって現われている。小径ピストンでは全圧が等しいとき、大径の場合より圧縮量そのものは大きいはずで、一般に圧縮量が大きくなると上の傾向をみせる。

試料面の大きさはすべて同じ 20 cm 角であったが、同一面積の試料に対するこの程度のピストン径の変化では、第 23 図の直線のこう配 β に変動が起らないことがわかる。(5.1 参照) また (1) 式 $F \propto l \cdot W^\beta$ の比例係数は、ピストン径が大きくなるとともに小さくなるがいま問題としない。

これらの測定値について、第 24 図で示すような $t \sim \frac{1}{F} \log \left(1 + \frac{F}{W + \omega} \right)$ 曲線を描くと、図からの解析値として第 8 表が得られる。この表からの $l \sim m$ 、ピストン面積 $A \sim \omega$ 、 $A \sim \lambda$ などの曲線は第 25, 26 図である。

第 24 図 (a) のような曲線を描く (ω の値の選択) 奇妙さは、第 26 図がさきに予想した (15) 式を満足する結果になっていることから肯定されると考える。とくに第 25 図ではピストン径に無関係に l が試料の厚さ (m で代表している) に比例し、比例直線は正しく原点を通過してその物理意義にまったくの狂いがない。

第 24 図 (a) の小ピストンの場合についてはピストン圧の測圧感度の不足が考えられる。ピストン面積が小さいため圧縮量の小さいところでは圧測定感度にかからず、直線部の下方にだけしか測点がでなかった。その結果圧縮の大きいところが理論範囲外にまでおよび、第 23 図の上方に曲線部が現われたのはそのためと思われる。

これとは逆に第 24 図 (b) の径 52 mm ピストンの場合は、圧縮初期での測点が直線にのっていない。これはピストン面積が大であるから同じ測圧感度では極小の圧縮

行程でも測定にかかり、結局ピストン面の試料への片当りなどが影響することが大きいと思われる。同様な現象および結果はつぎのパイル織物でも得られる。

(第24図) ピストン径を変えた圧縮試験の特性曲線 (ナイロン 5 d×2 in)

(第8表) ピストン径を変えたときの
ナイロン (5 d×2 in) の圧縮試験

ピストン 径 (mm)	No.	ω (g)	l (mm)	λ (c.g.s.)	m (g)
20	31	1.8	6.1	5.9	0.55
	32	2	9	6.1	0.81
	30	2	12.7	6.15	0.95
38	3	5	3.5	23.4	0.305
	1	6	5	25.9	0.476
	4	7	10	24.4	0.87
52	20	12	5.6	45.4	0.5
	21	12	8.4	55.3	0.71

(第25図) ピストン径を変えた圧縮試験の m と l との曲線 (ナイロン 5 d×2 in)

(第26図) ピストン面積と ω , λ との曲線 (ナイロン 5 d×2 in)

10.2 パイル織物

第9章の径 20 mm ピストンでの実験につづいて 38, 52 mm 径のものについての実験も行なった。試料はすべて10枚を積み重ねたものである。第27図の $\log F \sim \log W$ 曲線の中で一つだけ直線のこう配 β が大きく異なっている。またピストン径による平行移動は、そ

(第27図) ピストン径を変えたときのパイル織物の試験

の向きは 10.1 のナイロンの場合と同じであるがその変化が順調でない。これらは一応第 9 章で述べたことに帰せられると思う。10.1 の第 24, 26 図および第 8 表に相当するものは第 9 表および第 28, 29 図であって、まったく同じことがいえる。ただ 52 mm 径ピストンの場合はその度が一ははだしく、測点が理論的試料の厚み t_0 より上に出ている。このような場合ピストン面への試料の片当りが利いていることは確実と思われる。第 9 表の l の値がほとんどすべて一致し、また第 9 章の結果にも

(第 9 表) ピストン径を変えてのパイル織物の圧縮試験

ピストン径 (mm)	枚 数	ω (g)	l (mm)	t_0 (mm)	λ (c.g.s.)
20	10	13.5	18	24.2	5
38	10	45	17.5	23.8	16.2
52	10	90	18	24.1	30.5
52	10	90	17.6	24.6	35.5

(第 28 図) ピストン径を変えたときの圧縮特性曲線 (パイル織物)

(第 29 図) ピストン面積と ω , λ との曲線 (パイル織物)

つながっていることからこの測定および解析の結果は信じられる。

11. 結 論

筆者は第 1 報で述べたような測定装置によってステープル ファイバについては 38 mm 径、またパイル織物については 20 mm 径のピストンを用いて種々の実験を行なってきた。そして多くの点からみて理論式を満足するような結果を得ることができた。

この場合の圧縮試験方法はやや特殊で、測定もはん雑な点があるから一般の実用には少し困難がある。また測定値の解析方法が一義的な解を得るようなものでなく、数度試行を繰り返すといった点で不満はある。しかし少し経験を積むだけで習熟が可能であり、だれが行なっても 10% 以内の変動で値が定まることを上に見てきた。物理的に明確な意義をもった量を求めようとするとき、これらのことはしかたのないことのように思われる。

筆者はこれまでおよび今回の研究における種々の考察などから、従来行なわれてきたような方法では一義的な意味のある測定値を求めることは、不可能ではないかという悲観的な見方をもつものである。このままではいつまでもたっても研究者の間の不一致は解けず、他の繊維試験の分野に比べての立ち遅れは取り戻せないだろう。

終りにピストン径が異なったときの現象について、第 10 章でみたような不都合が生じることがある。すなわち不適当なピストン径または測圧感度などで単一の試験が行なわれたとき、まったく違った解析値がでる可能性がある。しかしこれも種々の点を考え合わせてその不適当なことが判定できる問題である。しかしそれよりもこの際もっとも安全で望ましいのは、ピストン径を試料の種類に応じて統一したある値のものにすることを提案したい。この取り決めについては研究者の間で大体一致した線が得られると考える。

終りに本研究は文部省試験研究費の一部によって行なわれたことを付記する。また自念英一君の助力を感謝する。

文 献

- 1) 若山, 服部; 本誌, 11, 262 (1962-4)
- 2) 若山, 服部; 本誌, 11, 167 (1958-3)
- 3) 若山, 服部; 本誌, 9, 683 (1956-10)
- 4) H. Bogaty; Text. Res. J., 23, 108 (1953)
- P. Larose; Text. Res. J., 23, 730 (1953)
- 5) C. M. van Wyk; J. Text. Inst., 37, T 285 (1946)