

# Study on the Compressional Properties of Fiber Assemblies

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/2297/16031">http://hdl.handle.net/2297/16031</a>

氏 名	秦 虹
生 年 月 日	
本 籍	中国
学 位 の 種 類	博士 (工学)
学 位 記 番 号	博甲第 188 号
学位授与の日付	平成 8 年 3 月 25 日
学位授与の要件	課程博士 (学位規則第 4 条第 1 項)
学位授与の題目	繊維集合体の圧縮特性に関する研究 (Study on the Compressional Properties of Fiber Assemblies)
論文審査委員	(主査) 松 平 光 男 (副査) 岩 木 信 男, 尾 田 十 八 新 宅 救 徳, 放 生 明 廣

## 学位論文要旨

**Abstract** The compressional and recovering curves of fiber assemblies are considered to consist of three steps, respectively. The first and third steps of the compressional curve and the first step of the recovering curve are approximated by the linear equation ( $y = a + bx$ ). The second step of the compressional and recovering curves are both regressed by the exponential curves  $y = a \cdot \exp(bx) + c$ . The third step of the recovering curve is the region at which instantaneous recovery is impossible. The calculated compressional and recovering curves agreed very well with the experimental curves. The regression constant  $b_1$ , at the first step of the compressional curve, is related to the bending of fibres on the fabric surface and is also related to the yarn structure such as spun or filament. The regression constant  $b_2$ , at the second step of the compressional curve, is concerned with hardness in compression because of the friction between fibers. The regression constant  $b_3$ , at the third step of the compressional curve, is related to the fiber's material and can be used to explain the initial lateral compressional modulus of the fibers. Also, in order to confirm the three step division of fabric compressional process reported previously, contacting surface shapes of weave were observed precisely by microscope and following conclusions were obtained. The number of contacting fiber increased with pressure. As the increase was large at pressure  $P = 1$  to  $50 \text{ gf/cm}^2$  and small at  $P > 50 \text{ gf/cm}^2$ ,  $P = 50 \text{ gf/cm}^2$  could be a boundary of 2nd and 3rd step of compressional process. Contacting surface area of weave increased with pressure, and the tendency of increase agreed well with the three step division of fabric compressional process. The pressure ranges :  $P < 1$ ,  $P = 1$  to  $50$  and  $P > 50 \text{ gf/cm}^2$  are considered to be 1st, 2nd and 3rd step of compressional process, respectively.

### 1. 緒 論

繊維集合体の圧縮特性は繊維製品の品質評価、風合いと密接な関連がある。従来から多くの研究者

たちにより、圧縮変形曲線に関する実験式や理論式が提出されているが<sup>1)</sup>、今までの研究成果では新しい繊維状素材の登場によって、従来の圧縮実験の圧力範囲、圧縮特性値、圧縮特性の評価方法、および理論解析の面で未だに充分ではない。本研究では、これらの問題点を解決すべく繊維集合体の圧縮特性について詳細に検討し、より実用的に説明可能な圧縮理論を見出し、圧縮特性をより厳密に把握するための評価方法、および、圧縮パラメータを提出することを目的とする。さらに、新しく開発された繊維集合体素材への応用を目指している。

## 2. 圧縮過程の理論的モデルと計算式

織物、ニットなどの繊維集合体は、いかなる構造の断面でも繊維と繊維-繊維間の空間とにより構成されている。図1に繊維集合体の圧縮断面のモデル図を示す。繊維集合体を圧縮する過程では繊維-繊維間の間隔が減少する。この間隔は繊維の応力と繊維-繊維間に働く摩擦力により維持されている。繊維集合体が圧力板により圧縮される場合、最初は、圧力板が繊維集合体表面の毛羽や突出繊維などと接触する。この領域(図1のa→b)の応力-歪みの関係は弾性体と近似できる。圧縮力の増加に伴い、繊維の応力がほぼ直線的に増加する。次に糸-糸間、或いは繊維-繊維間に働く力の増加に従い、静摩擦力を越え、すべりを生じる。それゆえ、繊維-繊維間の間隔が減少し、繊維集合体の厚

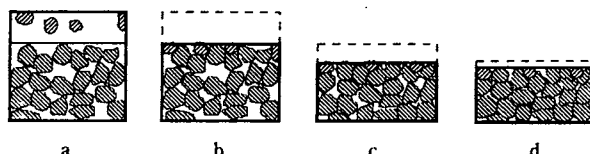


Fig.1 Models for the cross-sections of fabrics compressed to various extent.

み方向の変形を生じる(図1のb→c)。その後、この繊維-繊維の間隔がある程度まで減少すると、圧縮変形量の増加に従って、繊維材料自体が横の圧縮変形を生じる(図1のc→d)。この領域は繊維自体の横方向

の初期弾性域である。

この圧縮断面モデルにより、繊維集合体の圧縮と回復過程はそれぞれ三つの段階、すなわち、毛羽などの弾性域、糸や繊維の間の摩擦域、および繊維自体の横圧縮弾性域の三段階に分けられる。回復の第3段階は圧縮された糸や繊維の変形が瞬間回復できない部分である。圧縮の第1、3段階と回復の第1段階の曲線は直線で近似できる。圧縮の第2段階と回復の第2段階の曲線は指数曲線で近似できる。回復の第3段階は瞬間回復できない領域である。これらの五つの式を次に示す。

式中、

$$y_1 = a_1 + b_1 x \quad (1)$$

$$y_2 = a_2 e^{b_2 x} + c_2 \quad (2)$$

$$y_3 = a_3 + b_3 x \quad (3)$$

$$y_4 = a_4 + b_4 x \quad (4)$$

$$y_5 = a_5 e^{b_5 x} + c_5 \quad (5)$$

$y_{1-3}$  : 圧縮力の回帰値 (gf/cm<sup>2</sup>)

$y_{4-5}$  : 回復力の回帰値 (gf/cm<sup>2</sup>)

$x$  : 圧縮変位 (mm)

$a_{1-5}, b_{1-5}$  : 各段階の回帰定数

$c_2, c_5$  : 補助係数 (gf/cm<sup>2</sup>)

## 3. 圧縮過程の接触モデルと指数計算式

松尾の圧縮理論での繊維エレメント<sup>2)</sup>に基づき、図2(a)に示すように、単位面積あたりに $N$ 個の圧力を支える「道」(Loading path)が存在し<sup>2)</sup>、それぞれの「道」は $m$ 個の等間隔(=  $h$ )の変形プロセスがあるものとする。1つの「道」が支えている力を $p$ とするならば、単位面積の集中力 $P$ は $P = pN \dots (6)$ 。ここで、一つの「道」の圧縮変形過程を図2(b, c)に示す接触点モデルで仮定する。最初、圧縮板は最上面の繊維と接触して、力は接触点でこの繊維に伝わる。この繊維の下には必ずこれを支えている二点以上の繊維間の接触点が存在している(図中の○と●の間に繊維間の接触点を表示する)。上からの力によって下の繊維間接触点で働く力が静摩擦力を越えると、滑りが生じて、上の繊維は下の繊維の間に移動する(図中の●)。これを圧縮変形の第1プロセス( $m=0$ )と仮定する。これらの接触点

の増加が指数関数で変化することは次のような誘導で明らかになった。

繊維集合体を圧縮する過程では繊維-繊維間の間隔が減少する。この間隔は繊維の応力と繊維-繊維間の摩擦力により維持されている。圧縮力の増加に伴い、繊維-繊維間に働く力が静摩擦力を越えると、滑りが生じる。ここで1つの繊維-繊維間の静摩擦力を越えて働く力を $f$ とするならば、 $p$ は圧縮板との接触点数 $R_{(m)}$ と $f$ との積で表される。すなわち： $p=f \cdot R_{(m)} \dots (7)$ 。図2(b, c)により、第 $m$ プロセスでの圧縮板と繊維との接触点数 $R_{(m)}$ は一つ前の第 $(m-1)$ プロセスでの圧縮板と繊維との接触点数 $R_{(m-1)}$ に摩擦接触点数を乗ずることによって与えられる。そこで、次式が得られる。すなわち： $R_{(m)}=n \cdot R_{(m-1)}+r \dots (8)$ 。(8)式等号の両側で変換すると、 $R_{(m)}=\mu n^m + \lambda = \mu \exp(m \cdot \ln n) + \lambda \dots (9)$ 。ここで $\mu=(n-1+r)/(n-1)$ ;  $\lambda=r(n-1)$ ;  $\mu=1+\lambda/n$ 。(6), (7), (9)式を整理すると、 $P=\mu f N \exp(m \cdot \ln n) + \lambda f N = a \exp(bx) + c \dots (10)$ 。ここで、 $a=\mu f N$ (gf/cm<sup>2</sup>),  $b=\ln n/2h$ (1/mm),  $c=\lambda f N$ (gf/cm<sup>2</sup>)。この式は圧縮の第2段階の圧縮-変形関係式である。即ち、圧縮変位 $x$ と圧縮力 $P$ との

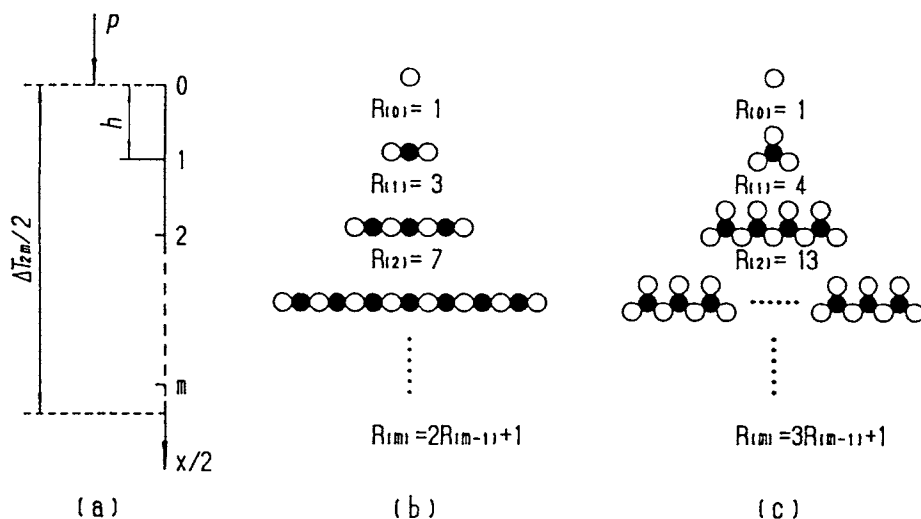


Fig. 2 The model of the compressional process (a) and contacting point models (b),(c) of fibrous assemblies.

関係は指数関数である。以上の式を誘導した結果：回帰定数 $b_2$ は繊維集合体内部の接触点間の距離、あるいは圧縮変形プロセス間の距離( $h$ )と強く関連し、 $c_2$ は圧縮変形に従って、圧縮板と繊維との接触点数変化率の変化、あるいは圧縮変形の線

形性と関連していることを明らかにできた。実際に繊維集合体の圧縮実験を行い、圧縮-変形曲線が計算式に極めて近似することを確認できた。

さらに、圧縮の第2段階のパラメータ $b_2$ ,  $c_2$ と従来の圧縮特性値 $WC$ ,  $LC$ との関係を誘導した。すなわち、

$$WC = \int_{x_1}^{x_{11}} P(x) dx = \int_{x_1}^{x_{11}} y(x) dx = \int_{x_1}^{x_{11}} a_2 e^{b_2 x} dx$$

$$= \frac{a_2 (e^{b_2 x_{11}} - e^{b_2 x_1})}{10 \cdot b_2} = \frac{y_{11} - y_1}{10 \cdot b_2} \quad (\text{gf} \cdot \text{cm} / \text{cm}^2) \quad (11)$$

式中、 $p(x)$ : 圧縮応力 (gf/cm<sup>2</sup>)  
 $y(x)$ : 圧縮応力  $p(x)$  の予測値 (gf/cm<sup>2</sup>)  
 $x_1, x_{11}$ : 圧力  $p_1, p_{11}$  の場合の圧縮変位 (mm)。  
 式中、 $c_2$ : 補助係数 (gf/cm<sup>2</sup>)。

$$b_2 = \frac{\ln(y_{11} - c_2) - \ln(y_1 - c_2)}{x_{11} - x_1} \quad (1/\text{mm}) \quad (12)$$

$$LC = \frac{2}{P_m} \cdot \frac{y_{11} - y_1}{\ln(y_{11} - c_2) - \ln(y_1 - c_2)} + \frac{2c_2}{P_m} \quad (13)$$

ここで、 $P_m = 50 \text{gf/cm}^2$ ;  $y_{11} = P_m$ ;  
 $y_1 = P_0 = 0.5 \text{gf/cm}^2$ 。

これらの関係式による関係曲線は実験値とかなり近づいていることが得られた。

#### 4. 圧縮過程における織物表面の接触状態の変化

繊維集合体の圧縮特性をより正確に測定するため、また、既に提案した圧縮過程三段階分割方法の正当性を証明するため、各圧力下での接触表面形態の変化を観測し、接触表面積と接触表面応力がいかに変化するかを検討する。

**実験装置および方法** 実験では透明アクリル樹脂板の光学特性を利用し、Ward<sup>4)</sup>の実験原理を参考にして、図3のような実験装置を試作した。上加圧板(3)はアクリル樹脂板で作成したものである。上加圧板の上にある三つの調節ネジ(7)で、板とサンプルとの初期距離を調節することができる。下加圧板(6)は円形(表面積は2 cm<sup>2</sup>)であり、接触面内で均一な応力を得るため、ボールジョイント方式で加圧板を支えた。観測用アクリル樹脂板(上加圧板)の面に平行に光源(8)から光を入射した場合、光線は上加圧板の表面に平行な方向しか透過できないため、暗室内で、上から板に垂直に設置した顕微鏡(5)で観測すると、上加圧板と接触したサンプル(2)の繊維の部分のみが見える。天秤(1)の一端で分銅を乗せると、他の一端の下加圧板は下方からサンプルを加圧する。それ故、上加圧板の下部表面とサンプルの繊維との接触数、及び接触面積などを観測することができる。

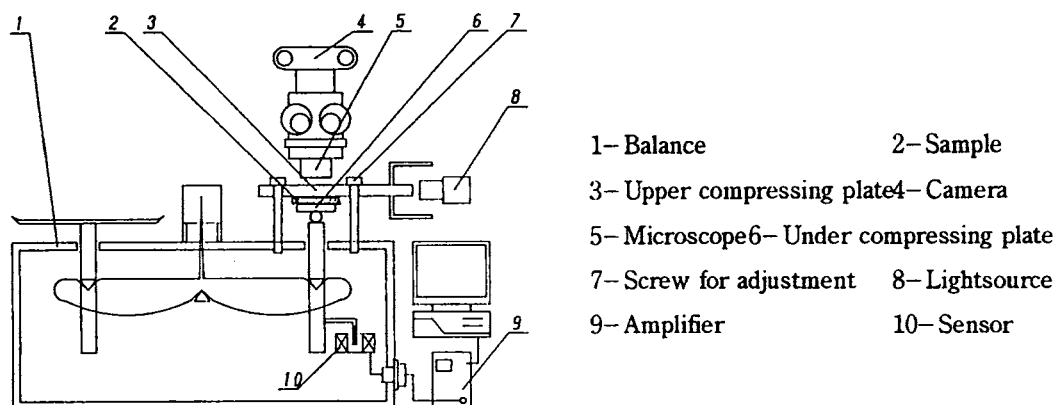


Fig. 3 Schematic diagram of compression experiment.

実験には織り密度の比較的粗い、反射率の高い白い四種類のサンプルを選んだ。

観測した結果：圧力 $P$ の増加に従って、接触した繊維の本数は増加するが、 $P=0\sim 50\text{gf/cm}^2$ の場合に増加の勾配が大きく、 $P>50\text{gf/cm}^2$ の場合に増加の勾配が小さくなることから、 $P=50\text{gf/cm}^2$ を圧縮の第2、3段階の境界として設定することができる。布を圧縮する場合、布と加圧板との接触面積は圧力 $P$ の増加に伴い、増加の傾向は三つの段階で異なるが、単調に増加する。これは布圧縮過程の三段階分割方法に極めてよく対応している。圧力 $P<1$ 、 $P=1\sim 50$ 、 $P>50\text{gf/cm}^2$ の三つの圧力範囲を各々圧縮の第1、第2、第3段階と考えられる。接触表面の応力は圧力 $P$ より極めて大きい。この応力の値はサンプルによって異なっている。

## 5. 圧縮特性分析の実例

**主成分分析法による圧縮特性の判断** 試料としては各種の繊維材料、用途、構造の布146点を採取した。この中から手触り感で圧縮の柔らかさが大きく異なる代表的な布を選別した。

圧縮曲線の形状の特徴を最も持っていると考えられるパラメータ  $b_2$  と、回復曲線の特徴を最も持っていると考えられるパラメータ  $b_5$  および従来からの特性値  $LC$ ,  $WC$ ,  $RC$ ,  $T_0-T_m$  を含み、六つの特性値を選ぶ。試料として選別した12点の試料のすべての実験結果に基づいて、主成分分析をした。第1主成分に対する固有値は4.57である、寄与率は76.2%である。すなわち、データの4分の3以上がこの第1主成分で説明されている。第2主成分の固有値は1.18で、寄与率は19.8%である。第1、第2主成分を合わせた累積寄与率は96%であり、二つの主成分で上記の特性値の大部分の情報が含まれている。

$$\text{第1主成分: } Z_1 = 0.438x_1 + 0.437x_2 + 0.292x_3 - 0.438x_4 + 0.357x_5 - 0.461x_6 \quad (14)$$

第2主成分： $Z_2 = -0.270x_1 - 0.305x_2 + 0.685x_3 + 0.280x_4 + 0.534x_5 + 0.035x_6$  (15)

主成分分析の結果によると、第1、第2主成分は圧縮曲線形状の特徴の大部分の情報を含んでいる。第1主成分 $Z_1$ は布が圧縮される領域の変形量や布の柔らかさと関連している。第2主成分 $Z_2$ は布の圧縮弾性率や回復性と関連している。

**クラスタ分析法による織物の分類** 繊維集合体の代表として、布(織物、ニット)88点(ウール、ポリエステル、シルク、コットン各22点)の圧縮特性を測定した。

糸構造別に分類をするときには、パラメータ $b_1, b_2, LC$ を変数として選んだときに最も良く2群を分類することができた。繊維素材別を分類するときには、パラメータ $b_2, b_3, RC$ を変数として、サンプル間の距離により、階層を作った場合に最も良く分類できた。スパンとフィラメントの糸構造別を分類する場合には $b_1, b_2, LC$ が最も適切である。ウール、シルク、ポリエステルとコットンの材料別の布を分類する場合には $b_2, b_3, RC$ が最も適切である。

**判別分析法で「新合織」ポリエステルの分類** 「新合織」ポリエステル試料を風合い別に大ざっぱに分類すると、ニューシルキー調、ピーチフェイス調、レーヨン調、および、ニュー梳毛調の4種類がある。この4種類試料の圧縮実験データから求めた圧縮特性値を用い、判別分析法で表面圧縮特性における技術区分、および繊維素材の圧縮特性における技術区分の分類を行った。新合織ポリエステル織物の製造技術は布の表面特性と関連して、大きく分けると布加工(表面起毛)タイプ、糸加工タイプ(仮撚加工など)と繊維加工タイプ(異形化断面、極細、異収縮混織など)の三つに大別できる。繊維素材の圧縮特性と関連して、大きく分けると、異収縮繊維タイプ、異形化断面繊維タイプ、極細繊維タイプの3タイプに分ける。

## 6. 結 論

本研究で提案した方法により、繊維集合体の圧縮特性より詳細かつ効果的に検討することができるため、繊維、糸、布の構造と繊維集合体の圧縮特性との関係を明確化することが可能である。また、布の圧縮特性は布の風合いに直接影響を及ぼしているため、本研究の成果は新しい風合いを持つ素材の創造に応用されることが期待される。

## 参考文献

- 1) C. M. van Wyk; J. Text. Inst., 37, T285 (1946).
- 2) 松尾達樹; 東京工業大学工学博士学位論文 (1968).
- 3) T. Matuo, D. R. Lee; Proceedings 2nd Asian Textile Congress in Seoul (1993).
- 4) I. M. Ward ; "Mechanical Properties of Solid Polymers 2nd ed.", p.262, John Wiley & Sons, New York, USA, (1983).

## 学位論文の審査結果の要旨

当該学位論文に関し、平成8年1月26日、第1回学位論文審査委員会を開催し、提出された学位論文及び関連資料について詳細に検討した。平成8年2月5日の口頭発表後、第2回審査委員会を開催し、慎重に協議の結果、以下の通り判定した。

本論文では、繊維集合体の圧縮特性について詳細に検討し、より実用的な圧縮理論を見出し、圧縮特性をより厳密に把握可能な新しい圧縮パラメータを提出した。始めに、圧縮及び回復過程が各々三段階に分割されるという仮定を提案し、本仮定の正当性について、実験的及び理論的に証明した。即ち、圧縮の第一段階は表面突出繊維の曲げ弾性域、第二段階は糸や繊維間の摩擦域、第三段階は繊維自体の横圧縮弾性域、回復の第一段階は繊維自体の横圧縮弾性回復域、第二段階は糸や繊維間の摩擦

回復域，第三段階は瞬間回復できない領域であることを明らかにした。圧縮の第二段階については，圧縮変形に伴い，圧縮板と繊維との接触本数が増加するという基本モデルを基に，圧力と変位との間の指数関係式を誘導した。これら第一，二，三段階の圧縮パラメータとして， $b_1$ ， $b_2$ ， $b_3$ を提出し，これに既存の圧縮パラメータを組み合わせて用いることにより，ポリエステル新合繊維布を的確に分類出来た。以上のように本論文は独創性に富み，得られた成果は新しい布開発へと応用され，その工学的価値は高いと評価出来る。

以上より，本論文は博士(工学)論文に値すると判定する。