

繊維集合体の圧縮特性

(第1報) 布の圧縮曲線のパラメータによる特徴付け

金沢大学自然科学研究科 松 平 光 男 (会員)
金沢大学自然科学研究科 秦 虹

Compressional Properties of Fiber Assemblies

Part 1 : Parametric Representation of the Compressional Curves of Fabrics

Mitsuo Matsudaira and Qin Hong

Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University, Kakuma-machi, Kanazawa

Abstract

As the first step in a series of studies on the compressibility of fiber assemblies, here were sought a small number of parameters which can represent reasonably the compression and decompression (recovery) curves of fabrics. The followings were obtained : the compression has three characteristic stages, in the first and third of which linear approximations are valid, and in the second of which exponential ones valid ; in the recovery, the stress decays first linearly and then exponentially to arrive finally at zero leaving a strain which does not vanish instantaneously ; the increasing rate of stress in the second stage of compression may be related to fabric structure, friction between fibers and/or yarns ; the decreasing rate in the second region of recovery may be related to ability with which fibers and yarns can regain their original states against the mutual frictional restraint ; these two rates play dominant roles in the whole process. An analysis of principal component, which was done on the parameters characterizing these stages for various sample fabrics, suggests that the two principal components are representative of almost all information on the compressibility, and that first of them may be related to the compressive compliance and softness, and the second to the compressive rigidity and recoverability.

(Received March 10, 1993)

(Accepted for Publication September 9, 1993)

摘 要

目的 布の圧縮特性についてより詳細で正確な情報を得るため、圧縮曲線の形状に関する特性値を見出す。

成果 (1) 布の圧縮曲線と回復曲線はおおの三つの段階に分けられることが判明した。圧縮の第1、第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。

(2) 圧縮の第2段階の近似曲線の回帰定数は布の構造、繊維、糸の摩擦特性と関連している。回復過程の第2段階の近似曲線の回帰定数は布中の糸や繊維が互いの摩擦抵抗を克服する回復性と関連している。この二つの回帰定数は圧縮実験曲線の形状と最も強く関連している圧縮特性値である。

(3) 圧縮特性値の主成分分析の結果によると、第1、第2主成分は圧縮特性の大部分の情報を含んでいる。第1主成分は布の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主成分は布の圧縮弾性率や回復性と関連している。

(平成5年3月10日受理)

(平成5年9月6日審査終了)

1. 緒言

布の圧縮特性は布の基本的な力学特性の中でも重要な特性の一つであり、布の風合いと密接な関連がある。布の圧縮特性は布の厚みを表すことだけでなく、布の柔らかさ、ふくらみと密接に結びついている。さらに、表面のぬめり感や滑らかさなどとも関連している。また、布の圧縮特性は布の構造、糸や繊維の表面特性および繊維自体の圧縮特性などとも関連している。

従来の研究結果によれば^{1,2)}、布の風合いと関連する圧縮特性の特性値は LC (圧縮の線形性)、 WC (圧縮エネルギー)、 RC (圧縮のレジリエンス)、 T_0 (圧力 0.5gf/cm^2 における厚み)、 T_m (圧力 50gf/cm^2 における厚み) などで表される。しかし、 LC 、 WC 、 RC の値は布の圧縮曲線の積分値から得られる値であるので、異なった形の圧縮曲線でも同じ積分値を得る場合がある。また、 T_0 と T_m は圧縮変形量のパラメータであるので、圧縮曲線の形状を表すことができない。そのため、 LC 、 WC 、 RC 、 T_0 および T_m のみによって、圧縮特性のすべての情報が含まれるといえない。本研究では、布の圧縮特性について、より詳細で正確な情報を得るため、布の圧縮曲線の形状と関連する新しい圧縮特性値を提案し、布の圧縮特性値と圧縮特性の関係を検討する。

2. 理論的モデル

2.1 布の圧縮断面モデル

布の圧縮変形過程としては、以下に説明するモデルを仮定する。

布は糸あるいは繊維の集合体である。そのため、いかなる構造の布の断面も繊維と繊維-繊維間の空間とにより構成されている。図1に布の圧縮断面のモデル図を示す。布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。布が圧力板により圧縮される場合、最初は、圧力板が布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-糸間あるいは繊維-繊維間に働く力の増加に従い、静摩擦力を越え、滑りを生じる。それゆえ、繊維-繊維間の間隔が減少し、布の厚み方向の変形を生じる(図1の b→c)。その後、こ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初期弾性域である。

2.2 圧縮曲線の特徴と回帰曲線

上記で仮定した布の圧縮断面モデルによると、布の圧縮過程は三つの段階に分けることができる。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3段階である。これに対応する圧縮曲線を考えてみると、図2のよう

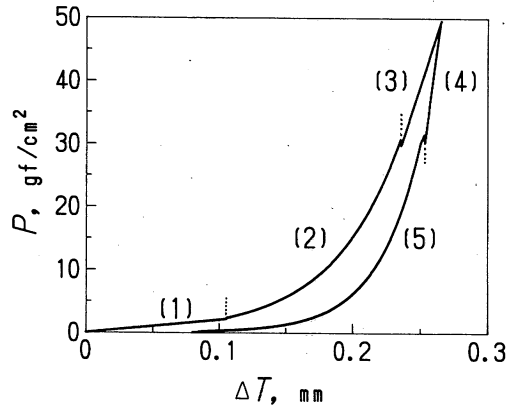


Fig. 2 Calculated curves obtained from equations (1) to (5)

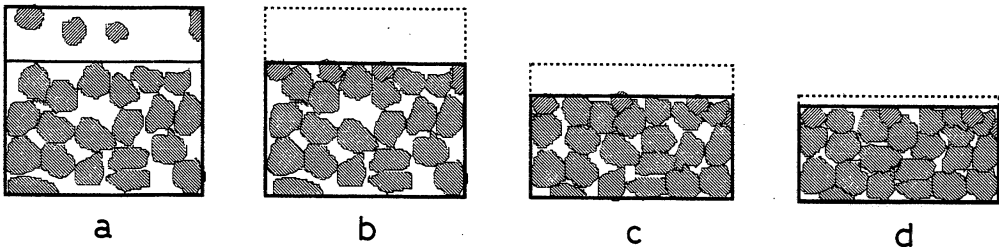


Fig. 1 Models for the cross-sections of fabrics compressed to various extent

に、最初の段階はほとんど直線となる。直線の傾きが弾性体の圧縮弾性率と等しい。この領域に対しては下に示す(1)式の回帰式が仮定できる。第2段階の圧縮曲線は指数曲線と近似する^{3,4)}。回帰式は(2)式で表される。第3段階の圧縮曲線は直線と近似できる。回帰式は(3)式が仮定できる。回復の第1段階は繊維自体の弾性回復域であるため、直線と近似できる。回帰式は(4)式が仮定できる。回復の第2段階は繊維自体の残存応力により、一部分の糸や繊維の間に摩擦を生じた回復域である。回帰式は(5)式が仮定できる。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。

$$y = a_1 + b_1 x \quad \dots(1)$$

$$y = a_2 e^{b_2 x} \quad \dots(2)$$

$$y = a_3 + b_3 x \quad \dots(3)$$

$$y' = a_4 + b_4 x \quad \dots(4)$$

$$y' = a_5 e^{b_5 x} \quad \dots(5)$$

ただし、 y -圧縮力 (gf/cm²)

y' -回復力 (gf/cm²)

x -変形力 (mm)

$a_1, b_1, a_2, b_2, a_3, b_3, a_4, b_4, a_5, b_5$ -各段階の回帰定数

2.3 圧縮曲線の形状を表す特性値

圧縮曲線は布の圧縮変形と応力(圧力)との関係を表すグラフである。圧縮曲線により、布の圧縮特性を直観的に把握することは可能であるが、客観的なデータの比較や解析は容易でない。いま、上記で示した回帰式(1)~(5)の回帰係数 a, b を用いた場合に圧縮曲線の作成をすることができるため、回帰係数 a, b は圧縮曲線の特徴を含んでいると考えられる。特に、回帰係数 b は変形量と大きく関連しているため、重要な特性値と認められる。 b_1 の値は布の表面層の毛羽や突出繊維等の影響を受けるので、布表面の圧縮弾性率と関連している。 b_2 の値は圧縮曲線の第2段階の曲率半径と関連している。 b_2 の値が小さくなると、曲率半径が大きくなり、糸-糸間、あるいは繊維-繊維間の滑り量が大きく、布が柔らかい。逆の場合、 b_2 の値が大きくなると、曲率半径が小さくなり、糸-糸間あるいは繊維-繊維間の滑りが生じにくく、布がかたい。 b_3 の値は繊維自体の横方向の初期圧縮弾性率と認められる。回復過程の特性値 b_4 は繊維自体の横方向の弾性回復率と認められる。 b_5 は布の中の糸-糸間や、繊維-繊維間の摩擦抵抗を克服する回復性と関連している。

3. 実験

3.1 実験装置および条件

布の圧縮特性は、KES圧縮試験機を用い⁵⁾、圧縮曲線を精密に分析するため、A/D変換モジュールを取り付けて、測定をする。この装置は次の特徴を持っている：圧力が0.01gf/cm²を越えると、データを読み込む；50個のデータを読み込み、その平均値を1個のデータとしてディスクに保存する；回復曲線は連続した2個データの変化量が-0.01gf/cm²以上になった点より開始する。圧縮曲線の形状と圧縮特性値はスクリーンで表示できる。

測定環境は20±0.3°C, 65±3%RHである。

3.2 試料

広範囲の布の圧縮特性について検討するため、各種の繊維材料(合成繊維, 天然繊維), 用途(紳士用スーツ地, 婦人用薄手布, スポーツ用, 産業用など), 構造(織物, 編物)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として選別した布12点を表1に示す。

3.3 実験曲線の回帰

回帰曲線と実験曲線との誤差を最小限にするため、各段階の回帰曲線上の各点と、それに対応する実験曲線上の各点との間の相関係数が最大値を示す時点によって、各段階の境界とする。今回実験した布の場合、第1段階の圧力範囲は0から0.5~5gf/cm²までであり、第3段階は30~40gf/cm²か P_{max} までである。

4. 結果および考察

4.1 圧縮曲線の特徴

圧縮特性についての実験曲線と回帰曲線との結果の例を図3に示す。ここで、サンプル1は布地が厚く、最も圧縮柔らかい布であり、サンプル2は布地が厚く、最も圧縮かたい布である。かつ、両者は圧縮変形量がほぼ同程度である。サンプル3とサンプル4は布地が薄く、圧縮変形量が同程度である。両者の圧縮特性には微妙な差がある。

また、これら4点の回帰定数および圧縮特性値の結果を表2に示す。

圧縮曲線の第1段階は、図3に示したように直線で回帰できるが、その範囲はサンプルによって異なる。

Table 1 Details of Sample Fabrics

Sample No.	Texture	Fiber material	yarn count (tex)	End-uses
1	Ponte-de-roma	Wool (100%)	Both:25 (1/40)	Ladies' suits
2	Plain weave	Aramide (55%) +Polyester (45%)	Both:14.8 (40/1)	Outdoor sports
3	Tricot	Nylon (80%) +Polyurethane(20%)	Both:Nylon;5.6 (50d/17f)×Polyurethane ; 4.4 (40d)	Swimming suits
4	Plain weave	Polyester (100%)	Both:10 (90 d)	Ladies' Dresses
5	Satin weave	Polyester (100%)	Both:15 (135 d)	Ladies' suits
6	Plain weave	Polyester (100%)	Both:23.3 (210 d)	Ladies' suits
7	Twill weave	Wool (100%)	Both:20.8 (2/48)	Men' suits
8	Satin weave	Silk (100%)	Both:2.3 (21 d)	Ladies' dresses
9	Twill weave	Cupra (55%) +Acetate (45%)	Both:Cu;9.8 (60/1) ×Ac;8.3 (75 d)	Jackets
10	Tubular	Cotton (100%)	Both:9.8 (60/2)	Sports wears
11	Plain weave	Rayon (100%)	Warp:13.3 (120 d) Weft:19.7 (30/1)	Ladies' dresses
12	Plain weave	Cupra (100%)	Warp:8.3 (75 d) Weft:13.3 (120 d)	Blouses

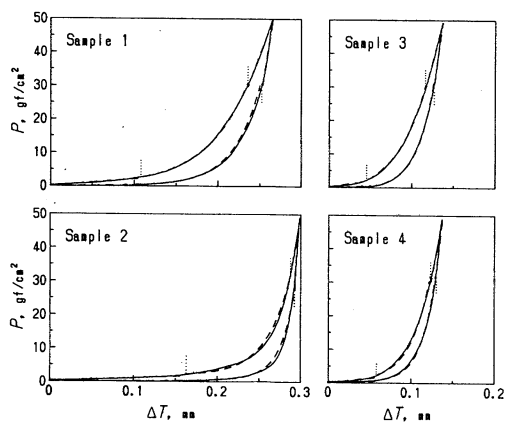


Fig. 3 Compression between the experimental (solid line, by KES) and calculated (dashed line) compressional curves of some sample fabrics

っている。サンプル2はサンプル1より第一段階の変形量が大きく、傾きが小さく、表面圧縮弾性率が小さい。サンプル3とサンプル4の比較では、第一段階の変形量は大体同じであるが、サンプル3の方の傾きが大きく、布表面の圧縮弾性率が大きい。

第2段階の圧縮曲線は指数曲線とよく一致してい

る。サンプル1は曲線の曲率半径が大きく(表2の b_2 参照)、変形量が大きい。これは圧縮による糸や繊維の互いの滑り量が大きいことに起因している。サンプル2は曲線の曲率半径が小さく、変形量が小さい。これはサンプル2の布の構造が緊密で、糸や繊維の互いの間隔が小さく、圧縮による滑り量が小さ

Table 2 Results of regression constants and characteristic compressional properties for four representative samples

Parameter	Unit	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4
b_1	—	14.18	10.58	38.90	29.24
b_2	—	24.12	34.80	28.06	42.21
b_3	—	760.3	1540	979.6	1363
b_4	—	1707	3116	1897	2468
b_5	—	31.25	55.79	48.06	57.07
LC	—	0.666	0.488	0.753	0.697
WC	gf cm/cm ²	0.234	0.152	0.166	0.127
RC	%	60.35	51.78	63.37	69.67
T_0	mm	1.2182	0.761	0.439	0.390
$T_0 - T_m$	mm	0.242	0.250	0.120	0.112

いことに起因している。サンプル3はサンプル4と比べると、サンプル3の曲線の曲率半径がサンプル4より大きく、圧縮弾性が良く柔らかいことを示している。

第3段階の圧縮曲線は直線で回帰できる。その傾きについてはサンプル1がサンプル2より小さいので、サンプル2のアラミドとポリエステル繊維よりサンプル1の羊毛繊維の横方向の圧縮特性が柔らかいことを示している。サンプル3の傾きはサンプル4より小さい。これはサンプル3のナイロン(80%)とポリウレタン(20%)繊維自体の横方向の圧縮特性がサンプル4のポリエステルより柔らかいことを示している。これらの結果は、最近、川端によって測定された、各種の繊維自体の横方向の圧縮特性と一致している⁹⁾。

回復の第1段階の曲線は直線で回帰できる。サンプル1の圧縮曲線の第3段階と回復曲線の第1段階の傾きの差が大きい、すなわち、サンプル1の圧縮-回復のヒステリシス幅が大きい。サンプル2, 3, 4の圧縮-回復のヒステリシス幅はほぼ同様である。

回復の第2段階曲線は指数曲線と一致している。サンプル1の曲率半径はサンプル2より大きく、回復時の変形量大きい。これはサンプル1の布が圧縮回復しやすいことを示している。サンプル3はサンプル4と比べると、曲率半径が大きく(表2の b_5 参照)、サンプル3の回復弾性がサンプル4より良いことを示している。

例示しない他のサンプル8点についても実験曲線と回帰曲線は極めて一致しており、今回提案した理論的モデルの正当性が明らかに示された。今後より広範囲な布でその正当性を検討したい。

4.2 主成分分析法による特性値の分析

布の圧縮特性は総合的な特性であるため、単に一つの力学特性値だけで表すことは難しい。そのため、数種類の特性値が必要となる。しかしながら、特性値は互いに関連しているため、圧縮特性の特徴を見出すため、主成分分析法は有効な方法である。

まず、項目を選ぶ。表2の中から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点の試料すべての実験結果に基づいて、主成分分析をしたところの固有値と寄与率を表3に示す。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1.19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。

各主成分の固有ベクトルを表4に示す。これより第1, 第2主成分は次式に表される。

第1主成分:

$$Z_1 = 0.438x_1 + 0.437x_2 + 0.292x_3 - 0.438x_4 + 0.357x_5 - 0.461x_6 \quad (6)$$

第2主成分:

$$Z_2 = 0.270x_1 - 0.305x_2 + 0.685x_3 + 0.280x_4 + 0.534x_5 + 0.035x_6 \quad (7)$$

第1主成分は(6)式のように、 x_6, x_4, x_1, x_2 の係数が大きいので、この四つのデータの変化は Z_1 へ

Table 3 Eigen Values and proportions estimated by the principal component analysis

No.	Eigen Value	Proportion(%)	Accumulated(%)
1	4.5731	76.2	76.2
2	1.1867	19.8	96.0
3	0.1430	2.4	98.0
4	0.0955	1.6	100.0
5	0.0016	0.0	100.0

Table 4 Eigen vectors estimated by the principal component analysis

Parameter	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5
$b_2 (X_1)$	0.4383	-0.2698	-0.1703	-0.5667	-0.5275
$b_5 (X_2)$	0.4369	-0.3049	0.1369	0.3745	0.6159
LC (X_3)	0.2917	0.6850	0.5951	0.1874	0.0457
WC (X_4)	-0.4382	0.2803	-0.0247	0.5445	-0.2825
RC (X_5)	0.3567	0.5341	-0.7445	-0.0554	0.1428
$T_0 - T_m (X_6)$	-0.4611	0.0348	-0.2081	0.4518	0.4901

の影響が大きい。 x_6, x_4 が小さくなり、 x_1, x_2 が大きくなれば、 Z_1 も大きくなる。圧縮曲線との関連で考えれば、 x_6, x_4 が小さくなると、布の圧縮される領域が小さくなり、曲線下の面積が小さくなり、 x_1, x_2 が大きくなると、圧縮および回復曲線の曲率半径が小さく、布の応力が圧縮変形に従って急激に増加する。このような布は圧縮かたい。サンプル2はこれに対応している。逆の場合には布は圧縮柔らかい。サンプル1はこれに対応している。第2主成分は(7)式のように、 x_3, x_5 の係数が大きいので、この二つのデータの変化は Z_2 への影響が大きい。 x_3, x_5 が大きくなれば、 Z_2 も大きくなる。 x_3, x_5 が大きくなると、布の圧縮直線性が良く、布の回復曲線と圧縮曲線とのヒステリシス幅が小さくなる。このような布は弾力性や回復性に優れている。サンプル3はこれに対応している。

5. 結論

布の圧縮特性の特徴を明確し、より厳密な圧縮特性値を提案するべく検討した結果、以下の結論が得られた。

(1) 布の圧縮曲線と回復曲線はおのおの三つの段階に分けられることが判明した。圧縮の第1、第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。提案した回帰式で作られた理論曲線は実験曲線と良く一致した。

(2) 新しい圧縮特性値は圧縮特性曲線の形状の特徴と強く結びついており、布の圧縮特性と密接に関連している。特に、圧縮の第2段階の特性値 b_2 は布の構造、糸-糸間、あるいは繊維-繊維間の摩擦特性と関連している。回復過程の第2段階の特性値 b_3 は布中の糸や繊維が受ける互いの摩擦抵抗を克服する回復性と関連している。

(3) 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。

文献

- 1) 川端季雄;「風合い評価の標準化と解析」第2版, 日本繊維機械学会, 大阪, (1980).
- 2) S. de Jong, W. Snaith, and N. A. Michie; Text. Res. J., 56, 759 (1986).
- 3) 川端季雄, 丹羽雅子, 河合芳子; 織機誌, 31, T74 (1978).
- 4) 川端季雄, 丹羽雅子; 織機誌, 31, T88 (1978).
- 5) 川端季雄, 織機誌, 26, P721 (1973).
- 6) S. Kawabata; J. Text. Inst., 81, 432 (1990)