Compressive Stress Relaxation Properties of Polyester and Cupra Fiber Assemblies

NAKAJIMA Chie^a, YONEDA Morihiko^{b,*}, ITOH Yuu^b

^a Graduate School of Human Culture, Nara Women's University, Kitaouya-Nishimachi, Nara 630-8506 Japan

^b Faculty of Human Life and Environment, Nara Women's University, Kitaouya-Nishimachi, Nara 630-8506 Japan

Received 28 July 2009; accepted for publication 11 October 2009

Abstract

In this paper, the compressive stress relaxation properties of cylindrical fiber assembly made of polyester fibers with heteromorphic section, polyester fibers with round section and cupro-ammonium rayon fibers are investigated experimentally with regard to sleeping comfort. The results are obtained as follows.

(1) Experimental curve of S_Y , residual stress ratio is expressed by following empirical equation.

$$S_Y = \sigma/\sigma_0 = K(a_0 - \ln t)$$

where, σ : stress at time t (Pa), σ_0 : initial stress (Pa), t : time(s), K (n.d.) and a_0 (n.d.): constants determined by fiber type and measurement condition. The results indicate that compressive stress relaxation phenomena of synthetic and regenerated fiber assembly show non-linear visco-elastic behaviour.

(2) Residual stress ratio at a certain time t of polyester fibers with w-shaped heteromorphic section and with round section has minimum value at 0.0179 in volume fraction, and that of cupra fiber is minimized at 0.0208 in volume fraction. The results indicate that the above conditions must be avoided in order to prevent large reduction of fiber volume in terms of preservation.

(3) Compression stress relaxation phenomena of cupra staple fiber assembly is expressed by following equation derived from non-linear two element visco-elastic model.

$$S_Y = \sigma/\sigma_0 = K \ln [\coth \{1/2(2e^{-a_0 t} + B)\}]$$

where, K , a_0 and B are constants determined by experiment. In contrast, compression stress relaxation phenomena of polyester staple fiber assemblies with heteromorphic section and round section is not expressed by this equation.

Key Words: Fiber assembly, Compression, Stress relaxation, Visco-elastic model, Cupra fiber, Polyester fiber

ポリエステル繊維・キュプラ繊維集合体の圧縮応力緩和特性

中島千恵^a, 米田守宏^{b,*}, 伊藤 優^b

^a 奈良女子大学大学院人間文化研究科, ^b 奈良女子大学生生活環境学部

1. 緒 言

敷きふとんの寝心地にかかわる要求性能として、保温性および吸放湿性などの快適な寝床内環境を保つための熱・水分移動特性と、良い寝姿勢を保ち、寝返りがしやすいといった身体支持性にかかわる力学的特性が挙げられる。最初に消費者が敷きふとんを購入しようとする際、手触りや圧縮性、弾力性などが購入動機の直接要因であると考えられる。そして

敷きふとんの寝心地にかかわる実用性能および取扱い性などの消費性能においては、長期間の使用に耐久性があることが求められる。良い寝姿勢を保つために背骨をまっすぐに保ち、身体を支える安定性に優れた敷きふとんは、繰り返し圧縮時の回復性に優れている。そして長時間の加圧下において応力低下が小さく、へたりが少ない。しかも長年使っている間に硬く締まって、一般的に言われるセンバイ布団状態になることなく、弾力性および圧縮回復性が初期の性能を保持できる

* 連絡先: 〒 630-8506 奈良市北魚屋西町 奈良女子大学 生活環境学部 米田 守宏
E-mail: yoneda@cc.nara-wu.ac.jp, Tel/Fax: +81-742-20-3463

ことが必要と考えられる。

第一報では、ポリエステル繊維・キュブラ繊維集合体の繰り返し圧縮・回復挙動について報告した [1]。寝装用中わた部材を構成する繊維として現在流通している合成繊維や再生繊維の中から、素材と繊維断面形状の違いによる短繊維集合体の特徴を明確にするために、繊度と繊維長をほぼ等しくし、素材と断面形状の異なる短繊維として、異型断面ポリエステル短繊維、丸断面ポリエステル短繊維およびキュブラ短繊維の3種を選別し、試料の作成方法および圧縮試験条件を見極めた。そして、これら3種の円柱状繊維集合体について、繰り返し圧縮・回復過程における圧縮変形および圧縮・回復エネルギー変化の挙動について検討した結果、体積率 0.0125、最大圧縮応力 1176Pa の条件下における、繰り返し圧縮 6 回目の圧縮・回復特性に各試料の特徴が現れることを明らかにした。この 6 回目の圧縮・回復曲線の形状について、リニアライジング法を適用し解析した結果、圧縮応力と圧縮変形量の関係は両対数グラフ上において直線関係を示し、 $P_c = AT^n$ の表示式を導いた。寝心地の良さを左右すると考えられる圧縮の回復過程における各試料の n 値を求め、本研究の実験条件下では、異型断面ポリエステルと丸断面ポリエステルは 2 より大きい値を示し、キュブラは 2 より小さい値を示すことを報告している。

圧縮・回復特性の機構をより深く理解するためには、繊維集合体の圧縮にかかわる粘弾性特性を知ることが基礎的に必要である。これまで、繊維集合体の圧縮に関連する研究は数多いが [2-9]、圧縮にかかわる粘弾性的性質、たとえば応力緩和やクリープ現象などについての研究は少ない。わずかに野飼、鳴海による綿繊維塊の圧縮応力緩和に関する実験 [10] および綿繊維塊の圧縮クリープ挙動についての研究 [11]、松尾、Lei Lu による融着繊維塊の圧縮挙動 [12] が挙げられるにすぎない。

さらに敷きふとんの寝心地にかかわる実用性能の観点から、身体支持の安定感を得るためには、臥床時の弾性反発力が低下せず、弾力保持性に優れ、へたりにくいことが重要で

ある。この特性は、繊維集合体の圧縮応力緩和特性と関連が深い。

そこで本研究では圧縮応力緩和特性を取り上げ、寝装用中わた部材を構成する合成繊維や再生繊維の中から、素材と繊維断面形状の違いによる短繊維集合体の特徴を明確にするために、繊度と繊維長をほぼ等しくし、素材と断面形状の異なる短繊維として、異型断面ポリエステル短繊維、丸断面ポリエステル短繊維およびキュブラ短繊維の3種を選別し、これら3種の円柱状繊維集合体についてその挙動を実験的に検討する。

2. 実験

2.1 試料

実験に使用した短繊維材料は異型断面ポリエステル短繊維、丸断面ポリエステル短繊維およびキュブラ短繊維の3種を原綿を開繊し、カーディングしたウェブを用い、標準状態 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、 $65 \pm 2\%\text{RH}$ 中の環境条件中で 24 時間以上調湿した後に実験に供した。これら試料の記号を Table 1 に、その性状を Table 2 に示す。繊度、繊維長、けん縮数、けん縮率、見掛けヤング率の測定は、JIS L 1015 に準じて実測した。曲げ剛性 B ($\text{gf} \cdot \text{cm}^2$) の算出は以下で行った。短繊維断面写真をデジタイズしてコンピューターに取り込み、画像処理ソフト (Win ROOF) を用いて、断面 2 次モーメント I (μm^4) を求める。曲げ剛性 B ($\text{gf} \cdot \text{cm}^2$) は、先に求めた見掛けヤング率 E (kgf/mm^2) と断面 2 次モーメント I (μm^4) の積、すなわち、 $B = E \times I$ で表せる。試料の断面形状を Fig. 1 に示す。

圧縮応力緩和試験における主要な測定条件として、繊維体積率があるがこれは以下のように見積もった。市販敷ふとんの標準寸法を縦 200 cm × 横 100 cm × 厚み 8cm、中わた重量を 4kg として、 $0.025\text{g}/\text{cm}^3$ を標準密度とした。ここで素材毎の繊維体積率をほぼ等しくし、繊維の分布が一様になるよ

Table 1 Sample code.

Sample code	Detail of sample
WP	Polyester staple fiber with w-shaped heteromorphic section
RP	Polyester staple fiber with round section
Cu	Cupra-ammonium (Cupra) staple fiber

Table 2 Details of fiber samples for wadding use.

Sample code	Fineness (dtex)	Fiber length (mm)	Specific gravity (—)	Number of crimp (unit/25mm)	Percentage of crimp (%)	Apparent young's modulus (kgf/mm^2)	Bending rigidity B_X *1 ($\text{gf} \cdot \text{cm}^2$)	Bending rigidity B_Y *2 ($\text{gf} \cdot \text{cm}^2$)
WP	1.4	34.85	1.38	15.47	10.84	347.3	1.61×10^{-5}	1.98×10^{-6}
RP	1.3	35.68	1.38	13.87	12.07	459.8	6.34×10^{-6}	5.87×10^{-6}
Cu	1.4	34.24	1.50	9.44	8.94	770.8	8.04×10^{-6}	7.75×10^{-6}

*1 B_X : bending rigidity along the X-axis direction.

*2 B_Y : bending rigidity along the Y-axis direction.

うに、素材によって必要な試料重量をあらかじめ設定するために、目標とする体積率を定義した。この目標とする体積率は繊維集合体の見掛けの体積に対する繊維の実体積の割合であり、以下のようにして求めた。本研究においては円柱状試料を使用したため、試料重量を W (g)、繊維の比重を ρ 、直径を d (cm)、高さを h (cm) とすると、体積率 λ は、

$$\lambda = (W/\rho) / (1/4) \pi d^2 h \div 1.27 \times W / \rho d^2 h \quad (1)$$

で表される。この一定量の短繊維材料を、直径 54mm、高さ 100mm の円柱セルの中にできるだけ均一になるように、ガラス棒とピンセットを使用して円柱セル内に充填した後、その上に直径 50mm、厚み 4mm、重さ 10g のプラスチック製円板を静置し、円柱状の短繊維集合体を実験試料とした。この方法では、圧縮作用による試料の横ふくらみや短繊維の飛散がなく試料作製が容易である。ただし、円柱セルの壁面と繊維との摩擦の影響が若干懸念されるが、本研究では摩擦要因をできるだけ小さくするよう表面形状に凹凸が少ないアクリル樹脂製円柱セルを用いた。なお、本研究では体積率の小さい繊維集合体を対象としているため、硬わたは対象外とした。

Fig.1 A cross-sectional view of fiber by SEM.
 (a) polyester staple fiber with w-shaped super-flat heteromorphic section.
 (b) polyester staple fiber with round section.
 (c) cupra-ammonium (cupra) staple fiber.

2.2 実験装置および実験方法

実験装置は第1報で使用したハンディ圧縮試験機（カトーテック㈱製 KES-G5）を用いた。実験試料の高さが 10cm になるように面積 20cm² の円形の加圧板を調整し、その時点における記録計の目盛を 0 に合わせる。すなわち、高さ 10cm の状態を負荷 0 と見なす。次に加圧板を 5mm/sec の速度で下降させ、加圧板が所定の変位量 (1, 2, 3, 4, 5cm) になったとき、加圧板を停止させ、その瞬間を時刻 0sec とする。その後力計に接続した加圧板を停止（変位量が一定に固定される）したまま、試料の圧縮応力変化を 10⁴sec まで 1 秒間隔で経時的に測定する。データの解析方法は、圧縮応力の出力電圧をデータロガーに取り込み、パソコンにてデータ処理を行った。なお目標とする体積率は第1報で報告したように、体積率 0.0125、最大圧縮応力 1176Pa の条件下において、繰り返し圧縮 6 回目の圧縮・回復曲線に各試料の特徴が現れるという結果を考慮して、体積率 0.0125 に設定した。

3. 結果および考察

上述の実験方法にしたがって 3 試料の応力緩和を、変位量を 5 段階に変えて測定した。得られた結果の例を Fig. 2 ~ Fig. 3 に示す。Fig. 2 は加圧板の変位量が 5cm、Fig. 3 は 2cm の場合で、いずれにおいても縦軸は応力残留率 S_Y を普通目盛で、横軸は時間 t (s) を対数目盛で示している。

ここで応力残留率は次式で定義される。

$$S_Y = \sigma / \sigma_0 \quad (2)$$

σ : 任意時間における応力 (Pa)

σ_0 : 初期応力（時間 $t = 0$ における応力）(Pa)

上述の測定結果より明らかなように、応力残留率曲線は約 10²sec 以後では片対数グラフ上で直線に近似できる。したがって応力残留率曲線は次式で表すことができる。

$$S_Y = K (a_0 - \ln t) \quad (3)$$

ここで t は時間 (s)、 K （無次元）および a_0 （無次元）は試料種別および測定条件によって決まる定数である。測定結果に対して最小 2 乗法を適用し、各試料について上式の各定数を求めた。結果を Table 3 に示す。

Fig. 2, 3 からわかるようにキュブラ短繊維の緩和速度は他のポリエステル短繊維よりも明らかに速い。このことは、Table 3 の各変位条件における K 値の大小に現れている。すなわち、いかなる変位条件においてもキュブラの K 値は異型断面ポリエステルおよび丸断面ポリエステルの約 2 倍以上である。また、異型断面ポリエステルと丸断面ポリエステルの K 値を比べると、異型断面ポリエステルの K 値の方が丸断面ポリエステルの K 値に比べて小さい。 K 値が小さいほど圧縮による応力緩和速度が緩やかである。すなわち弾力保持性が高

Fig.2 The compression stress relaxation curve when compression displacement is 5cm.

Sample is compressed from 0.0125 to 0.025 in volume fraction.

Straight line : Polyester staple fiber with w-shaped heteromorphic section.

Dotted line : Polyester staple fiber with round section.

Dots and dashes line : Cupra staple fiber.

Fig.3 The compression stress relaxation curve when compression displacement is 2cm.

Sample is compressed from 0.0125 to 0.0156 in volume fraction.

Straight line : Polyester staple fiber with w-shaped heteromorphic section.

Dotted line : Polyester staple fiber with round section.

Dots and dashes line : Cupra staple fiber.

Table 3 The results of initial stress, σ_0 and the calculated values of coefficients, K and a_0 based on experimental curves.

Compression displacement	1cm			2cm			3cm			4cm			5cm		
Volume fraction	0.0139			0.0156			0.0179			0.0208			0.025		
Sample code	σ_0 (Pa)	K	a_0	σ_0 (Pa)	K	a_0	σ_0 (Pa)	K	a_0	σ_0 (Pa)	K	a_0	σ_0 (Pa)	K	a_0
WP	336.14	0.0175	59.16	628.18	0.0174	59.02	796.74	0.0110	78.02	1205.89	0.0128	68.57	1557.22	0.0142	64.42
RP	653.66	0.0221	47.55	1219.12	0.0204	49.69	1483.72	0.0195	49.13	1719.41	0.0198	48.47	2100.14	0.0214	45.00
Cu	605.15	0.0412	26.09	971.67	0.0381	26.53	1149.54	0.0402	25.58	1614.55	0.0357	24.65	1913.45	0.0438	23.19

く、へたりにくいといえる。これまでの研究においても、綿などのセルロース系繊維はへたりやすいことが報告されている [3, 4]。敷きふとんの寝心地にかかわる実用性能の観点から K 値は重要である。K 値の大小を左右する物性としては、けん縮数やけん縮率、見掛けヤング率などの構造パラメータ、および繊維の断面形状の違いによる曲げ剛性や繊維間の滑り、繊維そのものの粘弾性的性質などが考えられる。

初期応力と繊維集合体の圧縮状態との関係をグラフで示すと、Fig. 4 が得られる。ここで縦軸は初期応力 σ_0 (Pa) を、横軸は体積率 λ をとり、各試料について示している。初期応力 σ_0 (Pa) は試料種別にかかわらず、体積率の増加と共に大きくなる。試料間の大小関係については、丸断面ポリエステルが最も大きく、次いで、キュブラ、異型断面ポリエステルの順で小さくなる。ただし体積率が 0.0139 では、丸断面ポリエステルとキュブラに顕著な有意差は見られなかった。

3.1 応力残留率についての考察

応力残留率と繊維集合体の圧縮状態との関係を検討するために、加圧板が所定の変位量に到達し、1000sec 経過後の応力残留率を各試料について調べた。縦軸に応力残留率 S_y を、

横軸に体積率 λ をとると Fig. 5 が得られる。1000sec 経過後の円柱セル内の試料は、繊維一本一本が受ける応力はほぼ均一に負荷された状態となり、概ね安定域に入っていると考えられる。

Fig. 5 から明らかなように、応力残留率は体積率の増加とともに低下し、異型断面ポリエステルおよび丸断面ポリエステルでは、体積率が 0.0179 付近において極小となる。キュブラは体積率が 0.0208 付近において極小となる。さらに体積率が大きくなると、異型断面ポリエステルとキュブラは、上述とは逆に応力残留率は上昇する傾向を示すのに対し、丸断面ポリエステルでは応力残留率の変化はほとんど見られない。

上述のように、繊維集合体の応力残留率は固有の条件（本研究の測定条件の下では、異型断面ポリエステルおよび丸断面ポリエステルは $\lambda = 0.0179$ 付近、キュブラは $\lambda = 0.0208$ 付近）において極小、すなわち応力緩和が極大になる傾向であることがわかる。したがって繊維集合体が負荷された状態で長時間放置されるような使用条件の場合には、体積率はかなり重要な要素になるものと考えられる。たとえば初めに与えられた圧縮抵抗、すなわち弾力を保持すべき使用条件の下では、前述の条件、すなわち異型断面ポリエステルおよび丸断面ポリエステルでは体積率 0.018 近傍およびキュブラでは

体積率 0.021 近傍という条件を避けなければならない。特に異型断面ポリエステルおよびキュプラについてはこの現象が顕著であるといえる。

3.2 応力緩和表示式の検討

測定された応力緩和曲線に (3) 式を適用して求めた Table 2 の結果を、縦軸に K および a_0 、横軸に体積率をとってプロットしたのが Fig. 6 および Fig. 7 である。

Fig. 6 より明らかなように、 K 値は体積率の増加とともに低下するが、試料によって極小値が異なる。異型断面ポリエステルおよび丸断面ポリエステルは、体積率 0.0179 付近で極小値を持つ下に凸なる曲線を描く。キュプラは体積率 0.0208 付近で極小値を持ち、体積率 0.0208 付近を越えると急激に高くなっている。3.1 で述べたように、 K 値からも緩和が極大となる体積率の存在が示される。

Fig. 7 より a_0 は、異型断面ポリエステルについては体積率 0.0179 付近で極大値を持ち、3.1 で述べた応力残留率が極小となる体積率とほぼ一致している。また a_0 の体積率に対す

る傾向は K 値と反対の、極大値を有する上に凸な曲線を描く。ただし丸断面ポリエステルとキュプラについては体積率 0.0156 付近で最大値を持つが、体積率の変化による変動は極めて小さい。

上述のように、応力緩和の実験式 (3) の定数は、特定の短繊維からなる 3 次元繊維集合体の応力緩和の特性をよく表しており、実験式 (3) がポリエステル繊維・キュプラ繊維集合体の応力緩和特性を表す式として適切であることが明らかとなった。

一般に応力緩和を表す力学モデルとして、単純フォークトモデル、単純フォークトモデルと弾性ばねが直列に結合された 3 要素モデルおよび Eyring 非線形 3 要素モデルが考えられている。そこで本研究においては前述の実験式 (3) を説明する力学モデルとして、Eyring の反応速度論に基づく非ニュートンダッシュポットを含む 3 要素モデルを考える。このモデルの応力緩和式は、

$$\sigma = \sigma_{\infty} + (1/\alpha) \ln [\coth \{ 1/2 (At + B) \}] \quad (4)$$

Fig. 4 Relationship between initial stress σ_0 and volume fraction.
● : Polyester staple fiber with w-shaped heteromorphic section.
■ : Polyester staple fiber with round section.
△ : Cupra staple fiber.

Fig. 5 Relationship between residual stress ratio S_r and volume fraction at $t=1000s$.
● : Polyester staple fiber with w-shaped heteromorphic section.
■ : Polyester staple fiber with round section.
△ : Cupra staple fiber.

Fig. 6 Relationship between K and volume fraction in equation(3).
● : Polyester staple fiber with w-shaped heteromorphic section.
■ : Polyester staple fiber with round section.
△ : Cupra staple fiber.

Fig. 7 Relationship between a_0 and volume fraction in equation(3).
● : Polyester staple fiber with w-shaped heteromorphic section.
■ : Polyester staple fiber with round section.
△ : Cupra staple fiber.

で表わされる。ここで、 σ_{∞} : $t = \infty$ における応力 (Pa), α , A , B : 定数。応力 σ (Pa) が $(2/\alpha + \alpha_{\infty}) < \sigma < (\sigma_0 - 7/\alpha)$ の範囲内では、(4) 式の近似式として

$$\sigma = \sigma_{\infty} + (1/\alpha) \{ \ln (2/A) - \ln t \} \quad (5)$$

が得られることが示されている [13].

(5) 式を本報の実験式 (3) と比較すると、 $\sigma_{\infty} = 0$ とすれば時間 t (s) に関して全く同じ式表示となる (ただし、 $\sigma_{\infty} = 0$ とすれば 2 要素モデルとなる)。したがって実験式 (3) で表わされる本報の実験データが近似式 (5) に対する厳密式 (4) を満足するためには、前述の 2 つの近似条件を満たさなければならない。これについてはすでに野飼と鳴海ら [10] によって、上記条件を満足することが確認されている。すなわち実験式 (3) は厳密式 (4) の近似式としての条件を満足すると考えられる。

したがって、ポリエステル繊維・キュブラ繊維集合体の圧縮応力緩和現象は、Fig. 8 に示すような非ニュートン粘性ダッシュポットを含む 2 要素モデルで表され、その応力緩和は次式で表せる。

$$S_y = K \ln [\coth \{ 1/2 (2e^{-\alpha_0} t + B) \}] \quad (6)$$

ここで実験式 (3) 式は上記 (6) 式に近似式として含まれるものであり、(6) 式は短時間領域においても実験曲線をほぼ忠実に表している厳密な解 (以下、厳密式) であると考えられる。そこで本研究で得られた応力緩和曲線が (6) 式を満足するかどうか 3 種の繊維試料について検討した。Table 3 の数値を代入した一例として、キュブラの体積率 0.0139 の場合を示すと、

$$S_y = 4.12 \times 10^{-2} \times \ln \coth \{ (4.68t + 57.5) \times 10^{-12} \} \quad (7)$$

Fig.8 Two element visco-elastic model including non-linear viscous element(dash pot).

となる。ここで B の値は $t = 0$, $\sigma = \sigma_0$ を (6) 式に代入することによって求めた。(7) 式によって計算された各時間における応力残留率 S_y 曲線を、実験曲線とともに Fig. 9 に示した。ここで縦軸は応力残留率を普通目盛で、横軸は時間 t (s) を対数目盛で示している。

Fig. 9 より明らかなように、(6) 式に基づく計算曲線 (7) 式は短時間領域においても実験曲線とほとんど一致した。このような計算曲線と実験曲線の良好な一致は、キュブラにおいてはいずれの条件の場合についても同じように見られた。その例を Fig. 10 および Fig. 11 に示す。Fig. 10 は体積率 0.0156 の場合において、(6) 式を用いて計算した結果を実測曲線とともに示している。Fig. 11 は体積率 0.025 の場合において、(6) 式を用いて計算した結果を実測曲線とともに示している。キュブラ繊維は野飼と鳴海が研究対象として取り上げた綿繊維と同じくセルロース系繊維であり、応力緩和の程度が大きいという力学特性における共通点をもつため、(6) 式によりその挙動を表すことができるものと考えられる。

一方、異型断面ポリエステルおよび丸断面ポリエステルの合成繊維では応力緩和挙動が厳密式 (6) で表すことができなかった。これは実験式 (3) の K 値の大きさが、キュブラとポリエステルで異なるためである。本研究で用いた実験装置および測定条件の下では、異型断面ポリエステルの K 値は 0.0110 ~ 0.0175、丸断面ポリエステルは 0.0195 ~ 0.0221 の範囲にあるのに対し、キュブラの K 値は 0.0357 ~ 0.0438 の範囲である。すなわち異型断面ポリエステルおよび丸断面ポリエステルの合成繊維の K 値はキュブラの K 値に比べるとかなり小さい。この場合、他のパラメータ B は求められなくなる。ここで測定に供したポリエステル繊維は応力緩和の速度が小さく、キュブラ繊維とは緩和機構が異なると推測されるため、(6) 式が適用できないものと考えられる。

以上の結果から、キュブラ繊維集合体の圧縮応力緩和現象は、本研究で用いた測定条件の範囲内で、弾性項と非線形粘性項 (Eyring 粘性項) を直列に接続した非線形 2 要素モデルにより記述できる。キュブラ繊維集合体の圧縮応力緩和現象における緩和は、キュブラ繊維における非線形粘性要素によるものであり、測定時間中に構成要素間に多少の滑りが生じる程度の比較的弱い結合 (二次結合) が支配的であるものと推測される。そして、その機構は、野飼らが研究で取り扱った綿繊維塊の圧縮応力緩和の場合と共通しているものと考えられる [10].

一方、ポリエステル繊維集合体の場合、ポリエステル繊維自体は一次結合に基づく強固な分子網目構造をもつため、応力が加わっても滑りを生じない。このためポリエステル繊維集合体の応力緩和機構は緩和時間が極めて長く、通常の測定時間では完全な弾性変形をするものと推定される。したがって、異型断面ポリエステルおよび丸断面ポリエステル繊維集合体における応力緩和挙動は実験式 (3) の形でのみ求めることができた。ポリエステル繊維集合体の応力緩和挙動およびその表示式に関する検討は、今後の課題としたい。

Fig.9 The comparison between experimental value and calculated value by equation(7) based on non-linear two element visco-elastic model for cupra staple fiber assembly. Sample is compressed from 0.0125 to 0.0139 in volume fraction. Straight line : calculated. Dotted line : experimental.

Fig.10 The comparison between experimental value and calculated value by equation(6) based on non-linear two element visco-elastic model for cupra staple fiber assembly. Sample is compressed from 0.0125 to 0.0156 in volume fraction. Straight line : calculated. Dotted line : experimental.

Fig.11 The comparison between experimental value and calculated value by equation(6) based on non-linear two element visco-elastic model for cupra staple fiber assembly. Sample is compressed from 0.0125 to 0.025 in volume fraction. Straight line : calculated. Dotted line : experimental.

4. 結 言

本研究においては、異型断面ポリエステル短繊維、丸断面ポリエステル短繊維およびキュブラ短繊維の3種の円柱状繊維集合体の圧縮応力緩和特性について実験的に検討し、以下の結果を得た。

(1) ある時刻における応力と初期応力の比を応力残留率と定義すれば、応力残留率曲線は次のような実験式で表すことができる。

$$S_{\gamma} = \sigma / \sigma_0 = K (a_0 - \ln t)$$

ここで σ (Pa) は任意時間における応力、 σ_0 (Pa) は初期応力 (時間 $t = 0$ における応力)、 t (s) は時間、 K および a_0 は試料種別および測定条件によって決まる定数である。

定数 K 、 a_0 と変位量の関係から、ポリエステル繊維・キュブラ繊維集合体の圧縮応力緩和現象が、非線形粘弾性挙動を示すことが示唆される。

(2) キュブラ短繊維の緩和速度は他のポリエステル短繊維よりも明らかに速い。これは K 値の大小に現れている。キュブラの K 値は異型断面ポリエステルおよび丸断面ポリエステルの約2倍以上である。また、異型断面ポリエステルと丸断面ポリエステルの K 値を比べると、異型断面ポリエステルの K 値の方が丸断面ポリエステルの K 値に比べて小さい。 K 値が小さいほど圧縮による応力緩和速度が緩やかである。すなわち弾力保持性が高く、へたりにくいといえる。敷きふとんの寝心地にかかわる実用性能の観点から K 値は重要である。 K 値の大小を左右する物性としては、けん縮率やけん縮率、見掛けヤング率などの構造パラメータ、および繊維の断面形状の違いによる曲げ剛性や繊維間の滑り、繊維そのものの粘弾性の性質などが考えられる。

(3) 一定時間における異型断面ポリエステルおよび丸断面ポリエステルの応力残留率は体積率 0.0179 付近、キュブラの応力残留率は体積率 0.0208 付近において極小となる。したがって、繊維集合体の保存という実用的な面で体積の減少を避けたい場合には、上述の条件を避けなければならない。

(4) キュブラ短繊維集合体の圧縮応力緩和現象は、Eyring 粘性要素を含む非線形2要素モデルによって表示され、本研究の測定条件下では以下の厳密式で表される。

$$S_{\gamma} = \sigma / \sigma_0 = K \ln [\coth \{ 1/2 (2e^{-a_0} t + B) \}]$$

ここで S_{γ} は応力残留率、 σ (Pa) は応力、 σ_0 (Pa) は初期応力 (時間 $t = 0$ における応力)、 t (s) は時間、 K 、 a_0 および B は試料種別および測定条件によって決まる定数である。

異型断面ポリエステルおよび丸断面ポリエステル繊維においては、キュブラの場合と異なり、上記実験式に対する厳密式が成立しなかった。これは、ポリエステル繊維とキュブラ繊維との分子集合構造の違いによる粘弾性挙動の違いによるものと考えられる。ポリエステル繊維集合体の応力緩和挙動およびその表示式に関する検討は今後の課題である。また、

本研究で考察した繊維集合体の圧縮応力緩和特性は、圧縮・回復曲線に対して Boltzmann の履歴積分を適用し、そのヒステリシス機構を解析する際の基礎的知見となる。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、貴重な試料をご提供して頂きました旭化成せんい株式会社およびソロテックス株式会社の関係各位に深謝します。

References

- [1] Nakajima C, Yoneda M, Itoh Y, (2010) J Text Eng, **56**, 29-38
- [2] Tamura T, Simane U, Takeda S (1989) Sen'i-Gakkaishi, **45**, 229-237
- [3] Nishide S, Sekiguchi N (1994) Jpn Res Assn Text End-Uses, **35**, 480-486
- [4] Yokura H, Sukigara S, Niwa M (1995) Jpn Res Assn Text End-Uses, **36**, 594-601
- [5] Yokura H, Sukigara S, Niwa M (1996) Jpn Res Assn Text End-Uses, **37**, 535-543
- [6] Komori T, Itoh M (1991) Text Res J, **61**, 420-484
- [7] G.A.Carnaby, N.Pan (1989) Text Res J, **59**, 275-284
- [8] Itoh M, Komori T (1997) Senki Ronbunshu, **50**, 165-176
- [9] Nogai T, Narumi Y (1972) Senki Ronbunshu , **25**, 180-188
- [10] Nogai T, Narumi Y, Tanaka K (1974) Senki Ronbunshu, **27**, 177-182
- [11] Nogai T, Narumi Y, Tanaka K (1975) Senki Ronbunshu, **28**, 77-82
- [12] Matsuo T, Lei Lu (1996) Proc.25th Text Res Sympo, 70-76
- [13] “Sen'i ButsurigaKu”, pp397-403, Sen'i-Gakkai, Maruzen, Tokyo