Repeated Compression-Recovery Properties of Synthetic Fiber and Regenerated Fiber Assemblies under High Humidity Environment

NAKAJIMA Chie^a, YONEDA Morihiro^{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 13 August 2013; accepted for publication 1 October 2013

Abstract

In this study, repeated compression-recovery behavior of fiber assembly for wadding use under high humidity condition is investigated, and its behavior is compared to that of standard condition. Sample used are twelve kinds of synthetic and regenerated fiber assembly. Following results are obtained. (1) Compression energy, WC under high humidity condition is smaller than that of standard condition or almost equal. (2) Recovery energy, WC' under high humidity condition is almost equal to that of standard condition except CU-1 and RPE-4. WC' of CU-1 and RPE-4 under high humidity condition is very small compared to standard condition. (3) Compression-recovery curve at sixth cycle is analyzed using linearizing method. In high humidity condition, n_B/n_F values of polyester fiber assembly are approximately 2, and those of cupra fiber assembly are approximately 3. Large value of n_B/n_F of cupra shows that cupra fiber assembly is less recoverable in compression than polyester under high humidity condition. (4) The result shows that evaluation of compression-recovery process using linearizing method is effective as well as that of energy-based method using WC, RC and LC.

Key Words : Compression-recovery behavior, Synthetic fiber, Regenerated fiber, Fiber assembly, High humidity

高湿環境下における合成繊維・再生繊維集合体の 繰り返し圧縮・回復特性の解析

中島千恵^a, 米田守宏^{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

敷きふとんは長時間にわたって身体の下に敷かれて使用されるため、正しい寝姿勢を維持する身体支持性と、圧縮応力に対する弾力性および回復性が必要である。また、一晩の睡眠中に約 20 回前後の寝返りが行われており、寝返りが打ちやすい、言い換えれば、少ない力で楽に寝返りできることが、寝心地の良さを左右する要因の一つとされている。前報 [1] では、繊維集合体の力学的性質として重要であり、寝心地にかかわる実使用性能の観点からもかわりの深い等速繰り返し圧縮・回復特性について採り上げ、繊維材料の基本的な諸物性を測定する際の標準状態 (20℃ ±2℃, 65±2%RH) にお

いて検討を行った。寝装用中わた部材を構成する繊維として現在市場で流通している繊維の中から、繊維度と繊維長をほぼ等しくした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プラ短繊維の 3 種を実験材料として選別し、これら短繊維集合体について標準状態における繰り返し圧縮・回復試験を行い、標準的な測定条件 (応力および繰り返し回数) を見だし、本条件下での圧縮・回復曲線について線形化法に基づいて解析した。さらに、寝床内気候を想定した条件下での性能を捉えるため、高湿環境下における繊維集合体の圧縮粘弾性特性として、とくに高湿条件下でのキュプラの圧縮応力緩和挙動が線形 4 要素流体モデルで記述できることを見だし、標準状態での結果と比較し、線型粘弾性

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

理論によりその機構を解釈した [3]。また高湿条件下での圧縮クリープ特性が標準条件と同じ表示式で表されることを見いだした [4]。

本研究では、持続的に安定した高湿環境を設定することができる恒温槽を用いて、より実使用時に近い高湿環境下における敷きふとんの繰り返し圧縮・回復試験を行い、その挙動を解析している。敷きふとんわたなどの寝装用製品においては、圧縮回復性の良し悪しが、寝心地の良さを左右する要因であるとされるため、圧縮時の回復過程の特性が重要であるが、回復過程の特性はこれまで研究の対象としてほとんど採り上げられてこなかった。本研究では、圧縮時の回復過程の特性に着目して検討を行う。前報 [1] では、織度と繊維長のほぼ等しい異型断面ポリエステル、丸断面ポリエステルおよびキュプラについて標準状態における繰り返し圧縮・回復特性について検討したが、これら3種以外にも試料範囲を広げて、寝装用中わた部材を構成する短繊維として、織度や繊維長の異なる異型断面ポリエステル、丸断面および中空断面ポリエステル、ポリトリメチレンテレフタレートなどの合成繊維、キュプラおよびリヨセルなどの再生繊維などの計12種の円柱状繊維集合体について、実使用時により即した条件である高湿環境下における繰り返し圧縮・回復挙動を測定する。さらに、高湿環境下における繰り返し圧縮・回復曲線について標準状態と同様に線形化法 [1] に基づいて検討を行う。

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3種、丸断面ポリエステル3種、中空断面ポリエステル1種、ポリトリメチレンテレフタレート1種、キュプラ3種、リヨセル1種の計12種である。これらの原綿を開繊し、カーディングしたウェブを用い、標準状態 ($20\pm 2^{\circ}\text{C}$, $65\pm 2\%\text{RH}$) 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。

繰り返し圧縮・回復試験における主要な測定条件である実験試料の作製方法は、前報 [1] の方法に準じて行った。初期繊維体積分率は0.0125とし、一定量の短繊維材料を、直径

Table 1 Sample code.

Sample code	Details of sample
WPE-1	Polyester staple fiber with w-shaped heteromorphic section
WPE-2	
WPE-3	
RPE-1	Polyester staple fiber with round section
RPE-2	
RPE-3	
RPE-4	Polyester staple fiber with hollow section
PTT	Polytrimethyleneterephthalate staple fiber
CU-1	Cupra-ammonium (Cupra) staple fiber
CU-2	
CU-3	
LY	Lyocell staple fiber

Table 2 Details of fiber samples for wadding use.

Sample code	Fineness (dtex)	Fiber length (mm)	Fiber diameter (μm)	Specific gravity (n.d.)	Percentage of crimp (%)	Apparent young's modulus (kg/mm^2)	Bending rigidity ($\text{gf}\cdot\text{cm}^2$)
WPE-1	1.4	38	24.22^{*2} 6.27^{*3}	1.38	14.80	318	$5.37\times 10^{-5*4}$ $2.41\times 10^{-7*5}$
WPE-2	1.4	51	24.31^{*2} 6.78^{*3}	1.38	34.71	291	$4.99\times 10^{-5*4}$ $3.01\times 10^{-7*5}$
WPE-3	2.2	B64 ^{*1}	29.06^{*2} 8.71^{*3}	1.38	28.29	297	$1.04\times 10^{-4*4}$ $8.39\times 10^{-7*5}$
RPE-1	1.3	38	12.76	1.38	26.70	412	5.36×10^{-6}
RPE-2	2.2	51	18.15	1.38	27.24	379	2.02×10^{-5}
RPE-3	6.6	51	29.17	1.38	33.33	262	9.31×10^{-5}
RPE-4	6.6	51	29.79	1.38	27.59	252	9.74×10^{-5}
PTT	1.7	51	15.02	1.34	15.43	154	3.85×10^{-6}
CU-1	1.4	38	11.84	1.50	8.79	645	6.22×10^{-6}
CU-2	1.4	51	13.73	1.50	15.06	639	1.11×10^{-5}
CU-3	2.2	76	15.46	1.50	20.51	475	1.33×10^{-5}
LY	7.0	64	33.56	1.50	14.62	359	2.23×10^{-4}

*1: bias cut

*2: major-axis

*3: minor-axis

*4: bending rigidity along major-axis direction

*5: bending rigidity along minor-axis direction

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する。このような円柱状の短繊維集合体を実験試料とする。

2.2 実験装置および実験方法

測定システムを Fig. 1 に示す。恒温槽内に設置した KES-G5 圧縮試験機（カトーテック㈱製）に対して、湿度調整装置により一定湿度の湿り空気を供給して実験を行った。湿度調整装置は湿度発生装置と湿度調整器および恒温槽から構成されている。湿度発生装置はディスク振動子型超音波加湿器で霧化量は300～500ml/HRの範囲で調整できるように設計されており、本実験では300ml/HRで行った。湿度調整器に

Fig.1 Compression tester and the device for humidifying.

は恒湿槽内の結露を防止し、湿度条件が相対湿度 96%RH 以上になるようプラスチック容器 (W300×H500×D290mm) およびパッファとしてポリエチレン製バッグ (約 65L) を使用した。プラスチック容器にはエア循環ファンを取り付け、回転速度 1000rpm、流量 180L/min にて空気を循環させる。恒湿槽 (W200×H150×D140mm) は KES-G5 の加圧板用シャフトと温湿度センサーを差し込む穴が開いている以外は、湿度が一定に保たれるよう気密性の高い透明アクリル樹脂を使用した。これら一連の高湿度調整装置はフレキシブルホース (直径 30mm) で連結されており、湿り空気が停止または滞留することはない。試料を充填するアクリル樹脂製円柱セルは、試料内部への湿り空気の移動が可能な形状に改良を加えた。直径 5mm の多数の孔を等間隔に開けた円柱セルを作製し、この円柱セル中にできるだけ均一になるように試料を充填した後、相対湿度 96%RH 以上のプラスチック容器の中で 3 時間調湿した。

本研究では、吸湿性の高い再生繊維と吸湿性の極めて低い合成繊維の、吸湿による圧縮・回復特性の違いを明確にする目的で、測定条件として、最も高い湿度条件 (吸湿率がほぼ平衡状態まで到達した時の水分率条件) を設定して繰り返し圧縮・回復試験を行った。所定重量の試料を相対

湿度が約 96%RH 以上のプラスチック容器の中で 3 時間調湿すると、各素材の水分率は、キュブラが 19.9%、リヨセルが 19.0%、ポリエステルが 0.4%、PTT が 0.5% になる。以上の条件にて調製された試料を高湿試料と呼ぶことにし、標準状態 ($20\pm 2^{\circ}\text{C}$, $65\pm 2\%\text{RH}$) の環境条件下で 24 時間以上調湿した試料を標準試料と呼ぶことにする。

繰り返し圧縮・回復試験の測定には KES-G5 圧縮試験機 (カトーテック (株) 製) を用いた。加圧板面積 20cm^2 、圧縮速度は 1mm/sec とし、力計に接続した加圧板の下降および上昇運動を行わせることによって円柱セル中の短繊維集合体に圧縮および圧縮回復作用を行い、その場合の圧縮応力 $P_c(\text{Pa})$ と圧縮変位量 $T(\text{cm})$ を 200m 秒間隔で経時的に測定する。圧縮応力の出力電圧は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。この測定結果から、圧縮加重過程の圧縮エネルギー $WC(\text{J/m}^2)$ 、除重過程の圧縮回復エネルギー $WC'(\text{J/m}^2)$ を求めた [5]。

測定条件は前報 [1] で得られた結果に基づき、最大圧縮応力を 1176Pa として、繰り返し圧縮・回復試験を 31 回行った。さらに繰り返し圧縮 6 回目の圧縮・回復曲線の形状について、線形化法に基づいて解析した。

Fig. 2 The results of compression energy WC in repeated compression test under the condition that volume fraction is 0.0125 and maximum compression stress is 1176 Pa .

3. 結果および考察

3.1 繰り返し圧縮・回復過程における圧縮・回復エネルギーの変化挙動

上述の実験方法にしたがって、12 試料の繰り返し圧縮・回復試験を標準状態および高湿状態のもとで行った。Fig. 2(a)～(d)に標準状態と高湿状態の圧縮エネルギー WC を比較したものを示す。ここでは試料 12 点の中から、素材および断面形状の違いによる特徴を捉えるため、(a)WPE-1, (b)RPE-1, (c)RPE-4, (d)CU-1 について図示した。縦軸は圧縮加重過程の WC (J/m^2)、横軸は繰り返し圧縮回数を示す。Fig. 3(a)～(d)に標準状態と高湿状態の回復エネルギー WC' を比較したものを示す。(a)は WPE-1, (b)は RPE-1, (c)は RPE-4, (d)は CU-1 である。縦軸は圧縮除重過程の WC' (J/m^2)、横軸は繰り返し圧縮回数を示す。(ただし、圧縮 1 回目は無視し、2 回目以降の結果を実験値とした [1].)

加重過程の圧縮エネルギーの変化の様子について標準状態の WC と高湿状態の WC を比較すると、WPE-1, RPE-1, RPE-4, CU-1 はいずれも高湿状態の WC は標準状態の WC に比べて小さい。なかでも RPE-4 と CU-1 については、高湿

状態の WC は標準状態の WC に比べてかなり小さい。とくに CU-1 は顕著な差がある。除重過程の回復エネルギーの変化の様子について標準状態の WC' と高湿状態の WC' を比較すると、RPE-1 は標準状態の WC' と高湿状態の WC' はほとんど差がない。WPE-1 についても顕著な差は見られない。それに対して CU-1 および RPE-4 は高湿状態の WC' は標準状態の WC' に比べてかなり小さい。また、高湿試料の CU-1 は圧縮エネルギーおよび回復エネルギーのレベルが、WPE-1, RPE-1, RPE-4 に比べるとかなり低い。

以上の結果から、湿度条件の違いによる各試料の圧縮・回復エネルギーの挙動の違いは次のように考えられる。加重過程の圧縮エネルギーについては、WPE-1 と RPE-1 は繊維-繊維接触点における凝縮水により繊維同士の滑りやすさが増大したことによると推測される。CU-1 は繊維内部の非晶領域に吸湿された水分子の作用により分子鎖の流動性が増大し、結果として曲げ剛性の低下として現れ、圧縮エネルギーが大きく低下したものと考えられる [3,4]。RPE-4 は中空部分に存在していると思われる水分により流動性が促進されたものと推測される。除重過程の回復エネルギーについては、WPE-1 と RPE-1 は吸湿性の低さから繊維自体の水分の作用による力学特性の変化はほとんどない。したがって、標準試

Fig. 3 The results of compression recovery energy WC' in repeated compression test under the condition that volume fraction is 0.0125 and maximum compression stress is 1176 Pa.

Table 3 WC, WC', RC, LC in compression-recovery curve at sixth cycle.

Sample code	WC		WC'		RC		LC	
	Standard	High Humidity	Standard	High Humidity	Standard	High Humidity	Standard	High Humidity
WPE-1	8.66	5.08	1.89	1.50	21.9	29.5	0.85	0.93
WPE-2	9.88	6.53	2.36	2.10	23.9	32.1	1.00	0.92
WPE-3	5.69	5.28	1.44	1.52	25.3	28.8	0.90	0.89
RPE-1	6.42	4.69	1.74	1.72	27.2	36.6	0.85	0.95
RPE-2	7.45	5.64	2.09	1.75	28.1	31.0	0.87	0.89
RPE-3	6.94	4.14	2.35	1.49	33.8	35.9	0.79	0.85
RPE-4	6.80	3.23	2.03	1.19	29.8	36.9	0.82	0.9
PTT	4.33	5.32	1.40	1.60	32.3	30.0	0.68	0.92
CU-1	7.26	3.79	2.31	1.01	31.8	26.7	0.79	1.13
CU-2	6.00	3.77	1.64	0.93	27.4	24.8	0.94	1.03
CU-3	7.12	3.65	2.03	0.85	28.6	23.2	0.93	1.05
LY	11.50	8.51	3.13	3.06	27.2	36.0	0.74	0.8

料と高湿試料で回復性において大きな差は見られないと考えられる。RPE-4は繊維の中空部分に存在すると思われる液状水分の作用、CU-1は繊維内部の非晶領域に存在する水分の作用による分子鎖の流動性の増加であると推測される。

次に、体積分率 0.0125、最大圧縮応力 1176Pa の条件下における、繰り返し圧縮・回復 6 回目における圧縮エネルギー WC、回復エネルギー WC'、回復レジリエンス RC(=WC'/WC)、圧縮荷重・圧縮ひずみ曲線の直線性 LC を調べた。結果を Table 3 に示す。ここで一般に、回復性の指標とされている RC について述べる。WPE、RPE および LY では標準状態の RC に比べて高湿状態の RC の方が大きい。CU および PTT では標準状態の RC の方が高湿状態の RC に比べて大きい。キュブラ繊維集合体は、吸湿の作用により繊維自体の曲げ剛性が低下し、RC の低下を引き起こしたものと推測される。ただし、再生繊維の LY は CU と異なる振る舞いをした。この結果に対して、今回の実験で用いた 1 点のみで考察することは難しいが、織度および繊維長などの繊維性状、非線形粘弾性挙動の違い、および試料調整段階 ($t < 0$) での変形の履歴が影響していると推測される。RC の結果から、高湿条件におけるキュブラ繊維集合体とポリエステル繊維集合体の圧縮・回復挙動の違いは、繊維集合体に対する水分の作用のしかたが異なっていることに起因することが捉えられている。このような事実は、これまでの高湿条件下における応力緩和特性およびクリープ特性の研究 [3,4] からでも得られている。

3.2 圧縮・回復曲線の線形化法による解析

高湿環境下における圧縮・回復曲線の挙動について、前報 [1] におけるのと同様に線形化法に基づいて解析を行うことにする。

各試料の圧縮加重過程および圧縮除重過程の変曲点における各領域での $\log Pc - \log T$ の直線関係を式表示すると、次式のような関係が成立する。

$$\log Pc = \log A + n \log T \quad (1)$$

ここで、A、n は圧縮応力 $Pc(\text{Pa})$ - 圧縮変位量 $T(\text{cm})$ の両対数グラフにおける切片および傾きであり、試料の物性や測定条件、圧縮域などによって決まる定数である。

圧縮応力 $Pc(\text{Pa})$ と圧縮変位量 $T(\text{cm})$ の関係は (1) 式より、

$$Pc = AT^n \quad (2)$$

で表される。

ここでパラメータ n の物理的意味について説明する。圧縮加重過程の n_F は圧縮剛さを表すパラメータ、圧縮除重過程の n_B は回復挙動を表すパラメータであると考えられる。 n_F と n_B の比 n_B/n_F は弾性的挙動からのずれを表すパラメータであり、圧縮回復しやすさの指標であると考えられる。 n_B/n_F の値は 1 に近いほど、弾性的な振る舞いを示し、圧縮回復性に優れている。値が大きくなるほど、圧縮回復性に劣ると考えられる。敷きふとんわたの圧縮回復性の良し悪しは、寝心地の良さを左右する大きな要因の一つであるため、除重過程における n_B が、実使用上、特に重要なパラメータであると予想される [1]。

前報 [1] で述べたとおり、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となるが、圧縮加重過程では 150Pa 以下、圧縮除重過程では 70Pa 以下の範囲において直線の傾きが変化しており、低い圧縮応力の範囲を低圧縮域、高い圧縮応力の範囲を高圧縮域とした。ただし、低圧縮域は圧縮応力が繊維密度を均一化するのにはたらく領域であり、繊維そのものの圧縮特性にほとんど影響するものではないと考えられるため、検討の対象としないことにする。

各試料種別、圧縮加重過程および圧縮除重過程の高圧縮域

Table 4 The slopes(n) and intercepts(A) of the straight line for the range of compression stress where $\log Pc - \log T$ shows linear relationship

Sample code	n			
	n_F		n_B	
	Compression process		Recovery process	
	Standard	High Humidity	Standard	High Humidity
WPE-1	1.10	1.17	2.49	2.22
WPE-2	0.99	1.20	2.42	2.01
WPE-3	1.20	1.37	2.74	2.88
RPE-1	1.15	1.10	2.21	2.17
RPE-2	1.29	1.49	2.47	2.71
RPE-3	1.57	1.42	2.72	2.35
RPE-4	1.06	1.23	2.35	2.19
PTT	1.80	1.16	2.69	2.66
CU-1	1.06	0.86	1.86	2.65
CU-2	1.02	1.05	2.14	2.99
CU-3	1.24	0.96	2.35	2.86
LY	1.26	1.25	3.08	2.80

Sample code	A			
	A_F		A_B	
	Compression process		Recovery process	
	Standard	High Humidity	Standard	High Humidity
WPE-1	865	1294	182	559
WPE-2	692	923	120	303
WPE-3	1059	1242	379	496
RPE-1	984	1388	272	770
RPE-2	721	1151	188	432
RPE-3	615	1582	171	853
RPE-4	929	2158	342	1632
PTT	1142	1178	355	547
CU-1	740	1988	160	2543
CU-2	982	1997	365	2100
CU-3	856	1996	234	2213
LY	364	484	32	114

における n 値および A 値を Table 4 に示す。本研究の測定条件下では、加重高圧縮域における n_F 値は、いずれの試料についても 2 より小さい値を示している。標準試料は 0.99 ~ 1.80、高湿試料は 0.86 ~ 1.49 である。各試料について標準試料と高湿試料の n_F を比較すると、PTT のみ標準試料と高湿試料の n_F 値の差は大きい（標準試料：1.80、高湿試料：1.16）、他の試料については顕著な差は見られない。

(2) 式における n_F の値についてはこれまでに多くの研究者によってそれぞれ異なった値が報告されている。たとえば、C.M.van Wyk[6] は 3、鳴海 [7,8] は 2、岡島ら [9] は 3、前島ら [10] は 3 の近傍、野飼ら [11] は 3 の値であると報告している。本研究における n_F 値との相違は、試料側面の境界条件に影響を受けているのではないかと推測される。本研究では、一定量の短繊維材料を円柱セル内に充填した円柱状の短繊維集合体を実験試料としているため、試料側面が拘束されているので圧縮作用による試料の横ふくらみが生じない。一方、C.M.van Wyk 他[6-11]では、試料側面は自由である。また、採用した実験試料の量、圧縮荷重の大きさなどの測定条件にも影響を受けているのではないかと推測される。

次に、除重過程における n_B 値について検討する。 n_B 値は、CU-1 のみ 2 より小さい値 (1.86) を示しているが、他の試料はいずれも 2 ~ 3 の範囲の値 (2.01 ~ 3.08) を示す。標準試料は 2.14 ~ 3.08 (CU-1 を除く)、高湿試料は 2.01 ~ 2.99 である。各試料について標準試料と高湿試料の n_B を比較すると、CU-1、CU-2、CU-3 は標準試料に比べて高湿試料の方がかなり大きい（標準試料：1.86 ~ 2.35、高湿試料：2.65 ~ 2.99）、他の試料 (WPE, RPE, PTT, LY) については著しい差がないという傾向が認められた。

加重過程の n_F と除重過程の n_B の比、 n_B/n_F 値を Fig. 4 に示す。前述したとおり、 n_B/n_F は弾性的挙動からのずれを表すパラメータであり、圧縮回復しやすさの指標である。 n_B/n_F の値は 1 に近いほど、弾性的な振る舞いを示し、圧縮回復性に優れ、値が大きいほど、圧縮回復性に劣ると考えられる。Fig. 4 に示したとおり、 n_B/n_F 値に各試料群の傾向が認められた。

まず、各試料について標準試料と高湿試料の n_B/n_F 値を比較する。WPE, RPE, LY は、標準試料の n_B/n_F 値は高湿試料の n_B/n_F 値に比べてやや大きい、あるいはほぼ等しい。したがって、弾性的挙動はほとんど変わらないと推測される。一

方、CU と PTT については、高湿試料の n_B/n_F 値は標準試料の n_B/n_F 値に比べてかなり大きい。とくに CU-1 と CU-3 については 1 以上の差がある。これは水分の影響によりキュプラ試料の圧縮回復性が悪くなっていることを示している。

次に、合成繊維集合体と再生繊維集合体について n_B/n_F 値を比較する。標準試料では合成繊維集合体と再生繊維集合体で n_B/n_F 値に顕著な差はなく、2 前後の値 (1.5~2.4) を示している。一方、高湿試料については、ポリエステル繊維集合体とキュプラ繊維集合体で n_B/n_F 値は大きく異なっている。WPE と RPE は 2 の近傍の値 (1.7~2.1) であるのに対して、CU は標準試料に比べて高湿試料の方がかなり大きく、3 の近傍の値 (2.9~3.1) である。

3.3 圧縮・回復挙動の指数 n による評価について

ここで、圧縮・回復挙動の指数 n による評価についてまとめておく。川端以前における圧縮研究においては、圧縮挙動の記述にはべき関数が用いられ、その指数 n によって繊維集合体の圧縮挙動が評価されることが多かった [6-12]。しかし、このような過去の研究においては、技術的な理由もあり圧縮過程のみの測定が行われており、回復過程に注意が払われることはほとんどなかった。したがって、回復過程の記述にべき関数の指数 n が用いられることはなかった。

川端らによる KES-FB 圧縮試験機 [5] においては、回復過程の測定も可能になるよう設計が行われている。しかし、圧縮挙動の特性値の評価は、エネルギーの概念をもとにした方法が採用されており、これから WC, RC, LC といったパラメータが圧縮特性の評価に用いられている。しかし、べき関数の指数 n は圧縮特性の評価に際して、採用されていない。本研究では、標準状態の試料に対する KES-FB3 および G5 による圧縮および回復過程の評価に際して、べき関数の指数 n を用いる方法を採用している。エネルギーに基づく方法ではなく n を用いることの利点としては、圧縮剛さが n の大小によって直感的に捉えやすいたことが考えられる。さらに、回復過程の記述にも指数 n_B を用いることにより、圧縮の回復性が直感的に把握しやすくなることが期待されるためである。高湿条件では吸湿により圧縮の回復性に影響が出ることが予想されるため、指数 n_B を用いて回復性の変化を捉えることが重要となる。

3.2 の結果より、標準試料に比較して高湿状態での CU が圧縮回復性に劣ることが、 n_B/n_F の数値の大小で捉えられた。キュプラ繊維集合体とポリエステル繊維集合体の n_B/n_F 値はおおよそ 1 違う。両試料の n_B/n_F 値の差異は、平衡吸湿時の水分の作用による繊維の力学特性の違いが、親水性繊維と疎水性繊維で異なることに由来するものと考えられる。このような高湿環境下におけるキュプラ繊維集合体の回復挙動に対しては、以下に示すように、前報 [3,4] で報告した高湿環境下における圧縮応力緩和機構および圧縮クリープ機構と同様に説明できると考えられる。キュプラ繊維集合体の場合は、水分の作用として、一つは繊維内に吸湿された水分子による分子鎖の流動性の増大、および結果としての曲げ剛

Fig.4 n_B/n_F value in compression-recovery curve at sixth cycle.

性の低下が考えられ、もう一つの作用として、繊維-繊維接点における凝縮水により繊維同士の滑りやすさが増大することが考えられる。両方の効果により、圧縮回復性が低下したものと推測される。一方、ポリエステル繊維集合体の場合は、吸湿による曲げ剛性の低下は考えられないため、繰り返し圧縮・回復挙動に対する水分の影響は繊維間の滑りに限定されるものと思われる。以上のように、高温条件におけるキュブラ繊維集合体とポリエステル繊維集合体の繰り返し圧縮・回復挙動の違いは、繊維集合体に対する水分の作用のしかたの相違に起因する。このような変化が、指数 n_B および比 n_B/n_F を用いることにより、明瞭に捉えられているといえる。

ここで、エネルギーに基づくパラメータ (WC, RC, LC) およびべき関数の指数 n 値との関係について検討するために単回帰分析を行った。その結果、 n_B/n_F 値は RC および LC などのパラメータと相関があることがわかった。標準条件および高温条件の RC とは負の相関 ($R = -0.77$) があり、高温条件における LC と正の相関 ($R = 0.79$) があることが捉えられた。

4. 結 言

本研究では、実使用時を考慮した高温状態のもとで寝装用繊維集合体の繰り返し圧縮・回復挙動について検討し、その結果を標準状態での結果と比較した。使用した試料は、寝装用中わた部材を構成する繊維材料として現在流通している、異型断面ポリエステル、丸断面ポリエステル、中空断面ポリエステルおよびポリトリメチレンテレフタレートなどの合成繊維、キュブラおよびリヨセルなどの再生繊維、計 12 種の短繊維集合体である。以下の結果を得た。

- (1) 圧縮エネルギー WC の変化について標準状態と高温状態を比較した。WPE-1, RPE-1, RPE-4, CU-1 はいずれも高温状態の WC は標準状態に比べて小さく、他の試料については同程度である。
- (2) 回復エネルギー WC' の変化について標準状態と高温状態を比較した。ポリエステル繊維では標準状態と高温状態で WC' にほとんど差はないが、キュブラ繊維および RPE-4 については高温状態の WC' は標準状態に比べてかなり小さい。
- (3) 繰り返し圧縮 6 回目の圧縮・回復曲線の形状について、線形化法に基づいて解析し、 n_B/n_F 値を用いて検討を行った。標準状態では再生繊維集合体と合成繊維集合体で n_B/n_F 値は 2 前後と同程度の値をとる。一方、高温状態ではポリエステル繊維集合体が 2 程度の値をとるのに対し、キュブラ繊維集合体では 3 程度の値をとる。キュブ

ラ繊維集合体の大きな n_B/n_F 値は、ポリエステル繊維集合体に比べて圧縮回復性に劣ることを示している。

本研究では、高温環境下において合成繊維集合体および再生繊維集合体の繰り返し圧縮・回復試験を行い、通常用いられるエネルギーに基づいた解析法に加えて、圧縮・回復曲線の挙動に線形化法に基づいて解析を行うことの有効性が認められた。また、本研究で得られた特性パラメータ n_B 値および n_B/n_F 値は、寝装用中わた部材の圧縮回復性を評価するさ

いの指標として有効であることが示唆された。繊維集合体に対する圧縮の効果は端的に“へた”として現れる。そして、へたりの度合いは本報告で検討したような動的効果、および、前報 [2,4] で報告したような静的効果（圧縮クリープ試験で検出される）の複合的な影響によって決定されるものと考えられる。しかし、繊維集合体の圧縮試験においては動的効果と静的効果の同時測定、および、寄与の分離は難しいため、今後の課題としたい。

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旧ソロテックス株式会社、湿度調整装置の作製にご協力頂きましたカトーテック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] Nakajima C, Yoneda M, Nishioka S, Miyazaki A (2010) J Text Eng, **56**, 195-202
- [3] Yoneda M, Nakajima C, Yanagihara A (2012) J Text Eng, **58**, 77-88
- [4] Nakajima C, Yoneda M (2012) J Text Eng, **58**, 89-97
- [5] Kawabata S(Editor) (1980) 'HESC Standard of Hand Evaluation' 2nd Ed, The Textile Machinery Society of Japan, Osaka
- [6] C M van Wyk (1946) J Text Inst, **37**, 285-292
- [7] Narumi Y (1965) J Text Mach Soc Japan (predecessor journal of J Text Eng), **18**, 572-578
- [8] Narumi Y (1966) J Text Mach Soc Japan (predecessor journal of J Text Eng), **19**, 183-191
- [9] Okajima S, Ikeda S (1956) Sen'i Gakkaishi, **12**, 720-726
- [10] Maejima R, Takizawa T, Kinoshita S (1963) Sen'i Gakkaishi, **19**, 618-622
- [11] Nogai T, Narumi Y (1972) J Text Mach Soc Japan (predecessor journal of J Text Eng), **25**, 180-188
- [12] Matsuo T (1968) Dr. Thesis of Tokyo Institute of Technology