単繊維および糸のねじり特性測定機の試作 および単繊維と糸の各ねじり特性間の関係 についての実験的研究

京 都 大 学 川 端 季 雄 (会 員)

奈良女子大学 丹 羽 雅 子 ()

奈良女子大学 間 宮 尊 子

Torsional Testing Apparatus and its Application to Experimental Investigation on the Relation between Torsional Properties of Yarns and Fibers.

Sueo Kawabata*, Masako Niwa**, and Takako Mamiya,**

* *Department of Polymer Chemistry, Kyoto University, Kyoto.*

** *Department of Clothing Science, Nara Women's University, Nara.*

Abstract

A new torsional testing apparatus has been developed to measure the torsional property of single fibers and yarns with high accuracy and easy operation.

The torsional properties of spun, textured and filament yarns were measured under different yarn tension by this new apparatus, and the torsional property of single fibers, which were sampled from the yarns were also measured in order to investigate the interrelation between the properties of yarns and fibers.

The torque is measured by detecting the twisted angle of a thin steel wire connected with a specimen by means of a linear differential transformer.

When each of the fibers which compose a yarn is twisted without any interaction between fibers, the torsional rigidity of the yarn must be equal to the sum of the rigidity of each of the fibers. Here, α is defined as :

$$\alpha = \frac{\text{Rigidity of yarn}}{\text{Sum of the rigidity of each single fiber}}$$

The α values for some of actual yarns were examined and observed that α depends on yarn tension and yarn structure, and represented by the experimental formula :

$$\alpha = \alpha_0 + \alpha_1 W_t + \alpha_2 W_t^2$$

where, α_0 , α_1 , α_2 are constants and W_t is (yarn tension)/(tex). The results show that although the values of α_0 for polyester and nylon multifilament yarns are almost unity, those of polyester spun yarns and textured yarns are value of 3 or more. On the other hand, α_0 of a worsted yarn, even though it is a spun yarn, is also unity.

Thus α is significantly related to fiber property as well as to yarn structure. Hysteresis in torsional property of these yarns are also examined and discussed in relation to the value of α .

(Received July 10, 1976)

摘 要

目 的 単繊維および糸のねじり特性を高精度かつ簡単な操作で測定できる装置を試作する。この装置により単繊維と糸のねじり特性を測定し、それらによって両者の各ねじり特性間の関係について実験的に解析する。

成 果 1) トルク検出にはトーション ワイヤ法を用い、ねじり角は小型差動トランスを用いた無接触検出方法を取り、 $2 \times 10^{-3} \text{mg} \cdot \text{cm}$ のトルク分解能をもつ装置を試作した。同一装置で1.5dの単繊維のねじりから、紡績糸、フィラメント糸、巻縮加工糸など広範な測定が可能である。2) 糸を構成する各単繊維が繊維相互の影響なしにねじられるとした独立繊維モデルによる糸のねじり剛性は、各繊維のねじり剛性の総和に等しいことから、 $\alpha = (\text{糸のねじり剛性}) / (\text{単繊維のねじり剛性の総和})$ と定義した。実測した α の糸張力の依存性から、 $\alpha = \alpha_0 + \alpha_1 W_t + \alpha_2 W_t^2$ の実験式が導かれ、 α は繊維の性質や糸の構造と密接な関係をもつことがわかった。ここで $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$ は定数で W_t は糸の単位太さ (Tex) 当りの張力である。さらに糸のねじり特性におけるヒステリシスも測定し、 α 値との関連で検討した。

(昭和51年7月10日受理)

1. 緒 言

単繊維や糸のねじり特性は、布の力学的性質に関連する基本特性の一つである。特に編布の引張り、曲げ、せん断の各変形には糸のねじり特性の寄与が大きく、さらに布製造時に生じる布の縮立ち、布目まがり、編目まがりなどには糸のねじり特性が直接関与すると思われる。

このように、引張り特性と同様に重要なねじり特性に関して、旧くは F.T. Peirce¹⁾ によってその測定がなされて以来、数種の測定法によって研究がなされてきているが^{2)~24)}、これまでに簡単な操作で、しかも精度よく測定できる測定機は少なく、このためねじりに関するデータは比較的少ない。これは、太さ1.5dの単繊維のねじり剛性は $3 \times 10^{-3} \text{mg} \cdot \text{cm}^2 / \text{rad}$ 程度で、こうした微小トルクの精密な測定の困難さにその原因があると思われる。この測定の困難さが原因して、引張り特性に比較してねじり特性に関する理論的研究も少なく、W. D. Freeston ら¹⁷⁾によるフィラメント糸と単糸のねじり回復挙動の解析、R. Postle ら^{19, 20), 22)}による各種の糸のねじりヒステリシス挙動の解析が最近になってはじめられたにすぎない。

従来から、繊維や糸のねじりトルクの測定には、基本的には、ねじり振子法^{1)~7)}とトーション ワイヤ法^{8)~28)}の2つの方法が用いられている。ねじり振子法は単純で精度も高いが、ごく微小なひずみに対応するねじり剛性が測定されるにすぎず、大きなねじりひずみを受けた繊維や糸のねじり挙動が測定困難であるうえ、ねじりヒステリシス挙動の測定もできない。

一方、トーション ワイヤ法ではこの点の問題はないが、ねじり角の検出がむずかしく、従来はそのため光学的方法が採用されている。しかし、この方法は実際には操作の困難さが伴い実験装置の範囲をでない。また、近年2重円筒式流体粘度計を逆に利用し、粘度を既知としてトルク検出用トーション ワイヤを被測定体そのものにおきかえる間接的なトルク測定法も開発されている²⁴⁾が、トルク検出が流体特性に依存している点に問題があ

る。この装置はまた実用機として微小トルクの安定でかつ精密な測定には装置が複雑になる一例を示している。

本研究では、単繊維や糸のねじり挙動を簡単に計測できる実用測定機を試作し、特に試料に張力を任意に与えてねじり特性の張力依存性を測定できるようにした。ついで、この測定機によって単繊維や構造の異なる各種の糸のねじり特性を測定し、単繊維と糸のねじり特性の関係を実験的に解析した結果を報告する。

2. 測定原理と測定機の構造

試作した装置の原理は、トーション ワイヤ方式で、ねじり角は無接触で小型の差動トランスにより電気的に検出する方法をとった。これにより微小角の検出が容易となり、トルク検出用スチールワイヤを太くでき、測定機が機械的に安定になるとともに感度も大幅に変化できるため、単繊維から糸に至る広範囲のトルク測定が精度よく検出できる。また、糸のように繊維集合構造体の

図1 ねじり測定機の原理図

図1 ねじり測定機の原理図

ねじり特性は、張力によって変るが、このため試料に任意の張力を与えた状態で ねじり試験を行えるように設計がなされている。

図1は測定機の原理図である。試料は両端を補強してフック状のチャックにとりつける。下部チャックは横棒に固定されており、この棒を図のように回転リングの上に設けた溝にはめて試料をねじり駆動する。さらに横棒から下方に静荷動を吊して試料に張力をつける。下部の回転リングはモータに連結され、その回転速度は可変である。

回転に伴う静荷重の慣性トルクは回転リングの溝で上部検出部への伝達が阻止されている。試料の両端の補強は 5×6 mmの軽いフィルムを接着しているが、これはまた前述のようにフックへ吊すのにも役立っている。試料のトルクはアームを介してピアノ線の ねじり角に変換され、これを差動トランスで検出する。

ねじり角は回転リングに接続された回転ポテンシオメータより電圧出力としてとり出し、ねじりモーメント—

図2 測定機の振動特性

ねじり角の関係が、たとえばXYレコーダにより記録できる。トルク検出系の振動はオイルダンパにより吸収するが、ダンパを装着し、試料を装着しない状態での系の減衰振動特性を図2に示す。

下部チャックと上部チャックを図1(b)のように直交させて試料を図のようにクランプすると、織物のせん断変形特性を決定する性質である²⁵⁾交差系の交差角変化に対する抵抗トルク特性も測定できる。なお、応用測定として ねじりモーメントの緩和挙動の測定もできる。装置の外観と糸の ねじり測定中の写真を図3に、また交差系の交差角変化に対する抵抗トルク測定の写真を図4にそれぞれ示す。

図3 単繊維および糸のねじり特性測定機
(糸のねじり特性の測定)

図4 交差系の交差変化による抵抗トルク特性の測定

図5 測定機のトルク測定感度

測定機の測定範囲は図5に示すように、フルスケール出力電圧10Vで、10mg・cmから150mg・cmであるが、変換系の高安定度や小雑音のため、記録紙上では0.1mg・cmフルスケールまで安定に測定できる。

本装置に用いた差動トランスには約7KHz, P-P 1Vのキャリア交流電圧を印加しており、コア吸引力は最高感度においても無視できる程度の大きさである。さらに差動トランスのコアの中心位置を常にゼロ位置として計測することにより吸引力はまったく問題にならないことを確認した。

図6 絹単繊維のトルク—ねじり角曲線

図6は本測定機の最高感度で測定した1.24dの絹単繊維のトルク—ねじり角曲線で、この場合のトルクの分解能は 2×10^{-8} mg・cmである。

3. 繊維と糸のねじり理論

単繊維はその長さ方向に分子が配向している場合が多く、いわゆる一軸対称の力学的性質をもつと考えられる。すなわち、応力テンソル σ_{ij} ($i, j=1, 2, 3$)、ひずみテンソルを ϵ_{ij} とし、 $\sigma_{11}=\sigma_1$, $\sigma_{22}=\sigma_2$, $\sigma_{33}=\sigma_3$, $\sigma_{23}=\sigma_4$, $\sigma_{13}=\sigma_5$, $\sigma_{12}=\sigma_6$, $\epsilon_{11}=\epsilon_1$, $\epsilon_{22}=\epsilon_2$, $\epsilon_{33}=\epsilon_3$,

$2\epsilon_{23}=\epsilon_4$, $2\epsilon_{13}=\epsilon_5$, $2\epsilon_{12}=\epsilon_6$ と略記すると、微小変形を仮定し、かつフック則を仮定すると、

$$\epsilon_i = \sum_j S_{ij} \sigma_j \quad (i, j=1, 2, \dots, 6) \quad (1)$$

図7 単繊維軸の座標系

いま、図7のように座標軸をとると、

$$S_{ij} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{11} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{13} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(S_{11}-S_{12}) \end{pmatrix} \quad (2)$$

となり、繊維軸方向の引張り弾性率は $E_3 = \frac{1}{S_{33}}$ 、繊維軸を軸とするねじりに関与するせん断弾性率は $G_4 = \frac{1}{S_{44}}$ となる。この2つの値は一軸対称異方性体では互いに独立の定数であり、たとえばクリンプした繊維の引張りの性質は E_3/G_4 の比がその性質を決めるパラメータとなり、これが G_4 の測定が重要となる理由である。

いま、 T_f ：繊維軸を軸とするねじりトルク、 l ：試料長、 I_p ：断面極モーメント、 θ ：ねじり角とすると、円形断面では

$$I_p = \frac{\pi d^4}{32} \quad (3)$$

として、

$$G_4 = \frac{T_f l}{I_p \theta} = \frac{32 T_f l}{\pi d^4 \theta} \quad (4)$$

となる。 θ と T_f との計測から G_4 が(4)式で求まる。ここで、

$$T_f = \varphi \frac{\theta}{l} \quad (5)$$

とし、 φ をねじり剛性と定義する。

次に糸のねじり剛性を Φ とし、糸の長さ L 、ねじり角 θ とすると糸のねじりトルク T_y は次式となる。

$$T_y = \Phi \frac{\theta}{L} \quad (6)$$

Φ を単繊維の φ から誘導するための最も簡単なモデルとして糸断面の各単繊維のねじりトルクの加算が糸のねじりトルクに等しいとするモデル——独立繊維モデルとする——がある。

ここで紡績糸の場合、ある有限長をもつ多くの短い単繊維の集合体であるから、糸長 L 内に繊維端をおく繊維も当然存在するが、もう一つの仮定として、糸長 L はこれら繊維先端の存在を無視できる程度小さいものとする。すなわち、繊維はすべて糸長 L 軸にそって貫通しているものとする。

上記の仮定の下で、糸長 L の糸を構成する i 番目の単繊維の i かけのねじり剛性を $\tilde{\varphi}_i$ とする。 i は N を断面繊維本数とすると、 $1, \dots, N$ をとる。したがって独立繊維モデルでは、次式で糸のねじり剛性が与えられ、こうして求まる Φ を Φ_0 と定義する。

$$\Phi = \sum_{i=1}^N \tilde{\varphi}_i \equiv \Phi_0 \quad (7)$$

いま、各繊維のねじり剛性がすべて等しく $\tilde{\varphi}$ とすると

$$\Phi_0 = N\tilde{\varphi} \quad (8)$$

となる。

実際の糸では張力などに伴う繊維間干渉のため、内部摩擦が存在するはずであるし、また繊維間接触が独立繊維モデルを阻害しているはずである。ここで干渉効果係数 α を次式で定義する。 Φ を実際の糸のねじり剛性として

$$\alpha = \frac{\Phi}{\Phi_0} \quad (9)$$

本報では実験的に α を糸の構造や張力との関係から調べる。ここで Φ_0 の決定に $\tilde{\varphi}$ の測定値が必要であるが、本報では次のように計算による $\tilde{\varphi}$ を用いてデータを整理している。

ここで繊維はクリンプや糸の捻りのため糸中で必ずしも直線形態をとっているわけではないので、繊維のねじり剛性 φ と $\tilde{\varphi}$ とは必ずしも等しくない。

いま、繊維の形態としてヘリカルコイルモデルでよくと、 L の糸内での繊維長 l として、ヘリカル角 β は

$$\beta = \sin^{-1} \frac{L}{l} \quad (10)$$

となり

$$\tilde{\varphi} = \frac{L}{l} \varphi \left(\frac{1}{\sin^2 \beta + \frac{2G}{E} \cos^2 \beta} \right) \quad (11)$$

となる²⁹⁾。また、真直ぐな長さ l の繊維を θ だけねじ

るときの剛性を用いると

$$\tilde{\varphi} = \frac{L}{l} \varphi \quad (12)$$

となる。

本報では糸の構成繊維のねじり剛性がすべて等しく、かつ L/l 値も等しいと仮定して(12)式により $\tilde{\varphi}$ を求めた。この仮定の下では、 l は

$$l = \frac{1}{N} \frac{\rho_y L}{\rho_f} \quad (13)$$

として求まる。ここで N ；糸の断面繊維本数、 ρ_y ；糸の線密度、 ρ_f ；繊維の線密度。さらにデニール単位を用いると、

$$l = \frac{1}{N} \frac{D_y L}{D_f} \quad (14)$$

ただし、 D_y ；糸のデニール、 D_f ；単繊維のデニール。この l を(12)式に代入して $\tilde{\varphi}$ が求まり、さらにこれを(8)式に代入して

$$\Phi_0 = N\varphi \frac{D_f N}{D_y} \quad (15)$$

第2のモデルとして、糸のねじりに際して繊維間ずりを認めないモデルを考える。すなわち、繊維が互いに固着しているようなモデルでは、図8のような断面が中心軸のまわりにねじられるときの I_p を決定し、近似的に $G I_p = \Phi$ としてねじり剛性を求めた。これはおそらくねじり剛性の最高値を与えるモデルであろう。

図8 糸断面内繊維の最密充填時の固着モデル

いま、すべての繊維を円形断面として、その直径 d を等しいとする。中心の繊維をかこむ層数を j ($j=1, 2, \dots$) として j 層目内の1本の繊維の I_p への寄与、 $[\tilde{I}_p]_j$ は

$$[\tilde{I}_p]_j = \frac{\pi d^4}{32} + (jd)^2 \frac{\pi d^2}{4} \quad (16)$$

いま糸の I_p は中心の繊維を0層とし、かつ j 層目の

繊維数を n とすると

$$I_p = \sum_{j=0} [n \tilde{I}_p]_j \quad (17)$$

ただし j 層の n はその層が完全に充填されているときは

$$n = 6j \quad (j \geq 1) \quad (18)$$

で与えられる。また、最外層の j_m は断面繊維本数を N として

$$N = 3j_m^2 + 3j_m + 1 \quad (19)$$

を j_m について解き、 j_m の根が整数でない場合はその根よりも大きく、かつそれに最も近い正の整数となる。

この糸の ϕ は、したがって

$$\phi = G_4 \sum_{j=0} [n \tilde{I}_p]_j \quad (20)$$

おそらく、実際の糸はこの第2のモデルで計算した ϕ と(7)式で求まる ϕ_0 との間の剛性をもつものと予想される。そこで(20)式の ϕ を ϕ_{max} とおき、この場合の α を α_{max} とおく。すなわち

$$\alpha_{max} = \frac{\phi_{max}}{\phi_0} \quad (21)$$

実際の糸の α 値は上述の予想により $1 < \alpha < \alpha_{max}$ となる。

α は単繊維の性質、糸の張力や構造などに依存するであろうと思われる。さらに、糸のねじり変形においては繊維間ずりの伴うことから、次式のトルク-ねじり角関係

$$T_y = \alpha \phi_0 \frac{\theta}{l} \pm HG \quad (22)$$

を示すことが考えられる。 HG はねじりヒステリシス幅で、 HG も α と同様糸の張力や構造、単繊維の性質などに依存するであろうと考えられるので、次に示すようにこれらを実験によって確かめた。

4. 測定結果

4.1 各種単繊維のねじり特性

単繊維試料の両端に $5\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ 、厚み 0.05 mm のフィルムまたは紙を接着して補強し、これを装置のチャックにさし込むことによって容易に試料装着ができる。試料有効長を 1.5 mm とし、張力としては下部チャックと補強フィルムの重量を利用し、 0.18 g を基準にした。

ねじり速度は1回転 20 sec で与えて、ねじり降伏が生じる角度(たとえば表2の4.8 dのポリエステルPET-3ではねじり角 $\pm \pi/0.15\text{ cm}$)以下のねじり角で回転を反転するが、この変形で得られる $T_y-\theta$ 曲線からねじり剛性を求めるとともにヒステリシス特性も同時に求めた。

測定条件は $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、 $65 \pm 2\% \text{ RH}$ の標準状態である。

表2に示す単繊維試料は、いずれも表1に示したそれぞれ糸試料を構成する単繊維である。それらの $T_y-(\theta/l)$ 曲線を図9~11に示す。これらのデータはあとで対応する糸のねじり剛性と対比される。

表1 糸試料

Symbol of Yarn	Structure of Yarn	Fiber	Yarn Counts (denier) : (tex)	Average Number of Fibers in Cross-Section N	Yarn Twist (turns/m)
SP 1	Spun Yarn	Wool	221(1/36s) 24.6	42	565.0 (Z)
SP 2		Polyester	177(30s/1) 19.7	66	566.7 (Z)
MF 1	Filament Yarn	Polyester	150 16.7	48	21.2 (S)
MF 2		Polyester	145 16.1	30	16.8 (S)
MF 3		Nylon	140 15.6	48	16.6 (S)
TT 1	Textured Yarn		150 16.7	48	115.5 (S)

図9 各単繊維のトルク—ねじり角曲線

図10 ポリエステル単繊維のトルク—ねじり角曲線

図11. 羊毛単繊維のトルク—ねじり角曲線

これらの結果をみるとトルクについて次式が近似される。

$$T_y = \varphi \frac{\theta}{l} \pm h_\theta \dots \dots \dots (23)$$

ここで φ は(5)式で定義した単繊維のねじり剛性、 $2h_\theta$ はヒステリシス幅である。

上記単繊維はいずれも円形断面で近似されるため、単繊維の直径 d を観測し、(4)式に実測値を代入して G_0 を算出した。また、(5)式により φ を求めた。各試料に

表2 単繊維試料

Symbol of Fiber	Fiber	Fiber Linear Density		Mean Diameter of Fiber		Remarks
		(denier)	(tex)	(cm)	$\frac{\bar{d}}{cv}$	
W — 1	Wool	5.27	0.586	$\times 10^{-4}$ 25.1	0.187	sampled from SP 1
PET— 1	Polyester, spun	2.68	0.298	16.1	0.067	sampled from SP 2
PET— 2	Polyester, fil	3.13	0.348	18.0	0.017	sampled from MF 1
PET— 3	Polyester, fil.	4.83	0.537	23.1	0.010	sampled from MF 2
PET— 4	Polyester, text.	3.13	0.348	19.0	0.081	sampled from TT 1
N— 1	Nylon, fil.	2.92	0.324	19.2	0.026	sampled from MF 3

つき15回の測定結果より求めた G_4 , ϕ , d の平均値とそれらの変動率を表2, 表3に示した。

表3 単繊維試料のねじり特性の測定結果

Symbol of Fiber	Torsional Rigidity ϕ		Shear Modulus G_4	
	($g \cdot cm^2$)	cv	(g/cm^2)	cv
W - 1	38.27×10^{-6}	0.671	7.96×10^6	0.359
PET-1	3.72	0.154	5.77	0.189
PET-2	5.22	0.153	5.08	0.140
PET-3	17.98	0.100	6.45	0.098
PET-4	6.50	0.217	5.41	0.389
N - 1	3.59	0.153	2.69	0.158

表4 単繊維試料の引張り特性およびせん断弾性率と引張り弾性率との比

Symbol of Fiber	Young's Modulus E_3		Bending Rigidity $E_3 I^*$		$\frac{E_3}{G_4}$
	(g/cm^2)	cv	($g \cdot cm^2$)	cv	
W - 1	38.2×10^6	0.184	71.1×10^{-6}	0.451	4.8
PET-1	54.1	0.248	17.8	0.116	9.4
PET-2	113.8	0.045	76.9	0.151	22.4
PET-3	139.4	0.061	176.5	0.027	21.6
PET-4	67.0	0.391	37.9	0.115	12.4
N - 1	21.5	0.148	15.6	0.016	8.0

* I は断面2次モーメントで, $I = \pi d^4/64$

単繊維試料の G_4 と引張り弾性率 E_3 との関係を示したのが表4である。 E_3 は試料長2cmにし、ひずみ速度を0.005/secとして定速引張試験で得た値で、本ねじり測定における繊維外皮部のせん断ひずみ ($r = \theta d/2l$) 速度は直径 d cmの単繊維では $[1.047 \times d]/\text{sec}$ となる。

G_4 の変動率と E_3 の変動率は羊毛を除いて大体同じ傾向をもつことがわかる。 E_3/G_4 は同じポリエステル繊維でも試料PET1~PET4において異なり、その分子配向度によって異なることが予想されるが、さらに天然繊維と合成繊維とでも差異がある。

単繊維のねじり角 θ を増加させると $T_y - \theta/l$ 曲線には図12 (試料PET3), 図13 (試料W-1) のように降伏現象が現われる。このようなねじり降伏ひずみと引張り降伏ひずみを比較すると、繊維を円柱と仮定して、ねじり角 θ を与えたときの外皮部の最大主引張ひずみ ϵ は

$$\epsilon = \frac{\theta d}{4l} \quad (24)$$

となるが、図中に記入したように引張り特性から観測される降伏ひずみと大体一致している。

図12 ポリエステル単繊維のトルク—ねじり角曲線と引張り荷重—伸びひずみ曲線
 F_f は単繊維の引張り荷重, ϵ は伸びひずみである。

図13 羊毛単繊維のトルク—ねじり角曲線と引張り荷重—伸びひずみ曲線
 F_f は単繊維の引張り荷重, ϵ は伸びひずみである。

4.2 各種糸のねじり特性

表1に示した構造の異なる糸, すなわち紡績糸, フィラメント糸, 巻縮加工糸を試料とし, ねじり剛性 ϕ および

図14 試料糸の引張り特性

F_y は糸の引張り荷重, λ_y は糸の伸長比,

λ_{ye} はTT1の境界伸長比²⁰⁾である。

びねじりヒステリシス幅 $2HG$ の張力依存性を測定した。まず各試料糸の引張り特性を図14に示す。

この場合単繊維の場合と同様の補強材を試料の両端に接着するが, 0.1mm厚さの板を2枚重ねて糸端をはさみ接着して補強し, 有効試料長は2cmとした。下部チャックの重量は0.5gで, これに1g~70gの重錘を吊下して試料の張力を変化させた。

ねじり速度1回転/20secで, 変形前の単位長さ当りのねじり角 $\theta/l = \pm 2\pi$ rad/cmまで変形させてねじりヒステリシス特性を測定した。測定条件はすべて前述と同様, 標準状態 20°C , 65%RHである。

巻縮加工糸の試料長は, 巻縮のため表示が困難であるから, 川端, 笹井らの方法を用い, 境界伸長状態²⁰⁾における長さをとった。すなわち, 本実験に用いたTT1では, 図14の引張特性における境界伸長比 $\lambda_{ye} = 1.28$ における引張り荷重26gでの長さを基準とした。

表5 試料糸のねじり特性の測定結果

Symbol of Yarn	$W = 1\text{ g}$			$W = 50\text{ g}$		
	Torsional Rigidity ϕ_{ZZ} ($\text{g}\cdot\text{cm}^2$)	ϕ_{ZS}	Hysteresis $2HG$ ($\text{g}\cdot\text{cm}$)	Torsional Rigidity ϕ_{ZZ} ($\text{g}\cdot\text{cm}^2$)	ϕ_{ZS}	Hysteresis $2HG$ ($\text{g}\cdot\text{cm}$)
	$\times 10^{-3}$		$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$		$\times 10^{-3}$
SP 1	1.82	1.38	1.29	4.02	2.80	4.60
SP 2	0.80	0.49	0.88	2.86	1.64	5.70
MF 1	0.44	0.44	0.55	2.05	1.96	0.95
MF 2	0.76	0.76	0.35	2.35	2.32	0.55
MF 3	0.32	0.32	0.37	1.94	1.94	0.83
TT 1	1.49	0.92	3.30	2.48	2.95	6.99

図15 紡績糸SP2のトルク-ねじり角曲線に与える張力の影響

図16 フィラメント糸MF1のトルク-ねじり角曲線に与える張力の影響

図17 巻縮加工糸TT1のトルク-ねじり角曲線に与える張力の影響

糸張力 $W=1\text{g}$ および $W=50\text{g}$ における糸のねじり特性の測定結果を表5に示す。糸のねじり特性の張力依存性を図15, 16, 17に示す。これらは Tex 番手が近似した紡績糸SP2, フィラメント糸MF1, 巻縮加工糸TT1の $T_y-(\theta/l)$ 曲線で、糸張力 $W=0.5\text{g}, 10\text{g}, 30\text{g}$ における測定結果を示している。

一般に撚りのある糸のねじり特性は、その撚りの加撚方向と解撚方向のねじりに対して $T_y-(\theta/l)$ 曲線が異なる。このためZ撚りの糸の加撚方向のねじりに対応するねじり剛性をその $T_y-(\theta/l)$ 曲線から求め ϕ_{ZZ} とし、解撚側を ϕ_{ZZ} とした。またねじり角 $\theta/l=0$ におけるヒステリシスループの幅を $2HG$ とする。

図15の紡績糸SP2では ϕ_{ZZ} と ϕ_{ZZ} に差がみられ、図16のフィラメント糸MF1に比べて $2HG$ が大きいこと、また低張力の範囲で張力の増加とともに急増する傾向が認められる。これに比してMF1では ϕ_{SZ} , ϕ_{SS} の差は小さく $2HG$ の小さいことなどがわかる。図17の巻縮加工糸TT1では $W=0.5\text{g}, 10\text{g}$ の比較的張力レベルの低いときは大きい $2HG$ をもつこと、また加工糸製造時の残留トルクの存在が $T_y-(\theta/l)$ 曲線に認められ、無撚に近い糸ではあるが ϕ_{SZ} と ϕ_{SS} との差が認められる。

各試料糸の張力を $W=0.5\text{g} \sim 70\text{g}$ に変化させて ϕ_{ZZ} , ϕ_{ZZ} , または ϕ_{SZ} , ϕ_{SS} , $2HG$ を求め、それらの張力依存性を図18 (SP2), 図19 (MF1) に示す。いずれも7回測定した平均曲線である。紡績糸SP2ではフィラメント糸MF1に比べると ϕ_{ZZ} , ϕ_{ZZ} , $2HG$ ともに大きい、張力の増大につれて傾斜はフィラメント糸のそれに近づく。またフィラメント糸は張力の全レベルにわたってほぼ直線的であることが特徴であり、かつほとんど撚りがないため $\phi_{SZ} \approx \phi_{SS}$ である。

図18 紡績糸SP2のねじり特性の張力依存性

図19 フィラメント糸MF1のねじり特性の張力依存性

5. 考察

5.1 単繊維と糸の各ねじり特性の関係について

実測した糸の ϕ と、その糸を構成する単繊維の ϕ を独立繊維モデルに基づいた(15)式に代入して ϕ_0 を求め、両者から α 値 ($=\phi/\phi_0$) を算出した。

α 値も糸の張力の増加に伴って大きな値をとるが、図20に加撚側の α 値、すなわち $\alpha_{ZZ} = \phi_{ZZ}/\phi_0$ または

図20 試料糸の α_{ZZ} と W との関係 (加撚側のねじり特性)

図21 試料糸の α_{zs} と W との関係
(解熱側のねじり特性)

$\alpha_{ss} = \theta_{ss}/\theta_0$ と張力 W との関係、図21に解熱側の α 値、すなわち $\alpha_{zs} = \theta_{zs}/\theta_0$ または $\alpha_{sz} = \theta_{sz}/\theta_0$ と張力 W との関係を各試料糸について示している。以後、加熱側の α 値を α_{zz} 、解熱側を α_{zs} として示す。

$W=0$ における α 値はチャック重量の関係で測定できないが、外挿により容易に求められる。 $W=0$ における α 値を α_0 とすると、MF1, MF2, MF3のフィラメント糸では $\alpha_0 \approx 1.5$ である。これはほぼ独立繊維モデルの成立することを示している。しかし同じポリエステル繊維糸SP2, 巻縮加工糸TT1ではそれぞれ $\alpha_0 \approx 3$, $\alpha_0 \approx 5$ となり、繊維間の干渉の存在を示している。ただし、梳毛糸SP1は紡績糸であるが $\alpha_0 \approx 1$ で、これは同じ紡績糸構造でも繊維によって α 値の異なる場合のあることを示している。

α の張力依存性については、張力を糸の太さ(Tex)で除した $W/\text{Tex} = W_t$ を用い、実験に用いた試料について

$$\alpha = \alpha_0 + \alpha_1 W_t + \alpha_2 W_t^2 \dots \dots \dots (25)$$

によって近似できる。

ここで α_0 , α_1 , α_2 は定数で各糸のそれぞれの値を表6に示している。これらの定数は、糸がねじり変形するとき、糸を構成する単繊維がねじられると同時に、繊維間ずりや糸断面内での繊維の移動が生じるので、繊維の性質や糸構造が関与する定数と考えられる。

いま、単繊維相互間のずりを認めないモデルに基づく(21)式で算出した α_{max} を表6に示しているが、ほぼ $\alpha_{max} = 40 \sim 80$ の値をとる。高張力下で糸に側圧が大きく作用した状態ではこのような固着モデルに近づくと考えられる。

図22は2HGの張力依存性を示すもので、紡績糸、フィラメント糸、巻縮加工糸の糸構造の相違が糸のねじりヒステリシスにおよぼす影響の大きいことがわかる。

図22 試料糸のねじりヒステリシス2HG
の張力依存性

表6 試料糸の α の張力依存性を表す定数 α_0 , α_1 , α_2 と α_{max}

Symbol of Yarn	α_0		α_1		α_2		α_{max}
	z	s	z	s	z	s	
SP 1	1.14	1.00	1.20	0.60	-0.191	-0.033	47.5
SP 1	3.15	1.86	6.06	3.03	-0.947	-0.376	86.6
MF 1	1.64	1.65	2.88	2.60	-0.205	-0.159	66.2
MF 2	1.40	1.40	1.52	1.47	-0.082	-0.077	41.8
MF 3	1.77	1.77	3.53	3.53	-0.160	-0.160	66.1
TT 1	5.13	2.94	0.54	2.51	0.162	-0.058	63.8

z, s はそれぞれ z 方向 s 方向へのねじりに対する定数である。

表 7 試料糸の曲げ特性および糸のねじり特性と曲げ特性との関係

Symbol of Yarn	Bending		α_B	$\frac{B}{\phi}$	$\frac{HB}{HG}$	$\frac{2HB}{B}$	$\frac{2HG}{\phi}$
	Rigidity B ($g \cdot cm^2$)	Hysteresis $2HB$ ($g \cdot cm$)					
SP 1	$\times 10^{-3}$ 2.40	$\times 10^{-3}$ 0.73	0.84	1.50	0.56	0.30	0.81
SP 2	1.31	0.88	1.00	2.03	1.00	0.67	1.36
MF 1	2.92	1.05	0.79	6.35	1.91	0.36	1.20
MF 2	4.16	1.18	0.79	5.47	3.37	0.28	0.46
MF 3	0.75	0.43	1.01	2.34	1.15	0.57	1.16
TT 1	1.76	1.46	1.01	1.46	0.44	0.83	2.74

ϕ ($= (\phi_{ZZ} + \phi_{ZS})/2$) および $2HG$ は糸張力 $W=1g$ における値を用いている。

図23 試料糸の α と $2HG$ との関係

図23は $2HG$ と前述の α_{ZZ} , α_{ZS} 値との関係を示している。ここでは同じ紡績糸でも羊毛とポリエステル繊維の相違や糸構造の違いによる差が顕著に認められる。

5.2 糸のねじり特性と曲げ特性

糸のねじり特性と曲げ特性はいずれも繊維間ずりに大きく依存している点では共通の傾向のあることが予想されるが、これを調べるために純曲げ試験機²⁷⁾(KES-F2)を用いて糸の曲げ変形特性を測定した。その曲げモーメント-曲率曲線は、ねじりトルク-ねじり角曲線と同様の形状をとり、ねじりと同様、その勾配から曲げ剛性 B , またヒステリシス幅 $2HB$ を求めた。さらに、やはり曲げの場合にも独立モデルで計算した曲げ剛性を B_0 とし、すなわち

$$B_0 = N \cdot E_3 I (D_f N / D_f) \dots\dots\dots (26)$$

$B/B_0 = \alpha_B$ として表7に曲げ特性の測定結果とともに示した。

また、表6の糸張力 $W=1g$ におけるねじり剛性 ϕ_{ZZ} , ϕ_{ZS} を $\phi = (\phi_{ZZ} + \phi_{ZS})/2$ として、 B/ϕ および $2HB/2HG$ のそれぞれの比、さらに $2HB/B$, $2HG/\phi$ も表7に付加して示している。

本実験試料のすべては $\alpha_B \approx 1$ でねじり特性における α_0 のような差異の認められないこと、 B/ϕ が約1.5以上の値をとり、繊維の性質や糸の構造によって B/ϕ , HB/HG の異なることなどがわかる。

6. 結 語

単繊維および糸のねじり特性を、同一機で精度よく測定できる装置として、トーションワイヤ方式の装置を試作し、トーションワイヤのねじり角を小型差動トランスによる無接触検出方式を採用して $2 \times 10^{-3} mg \cdot cm$ のトルク分解能をもつ装置を開発した。

この装置により、単繊維および糸のねじり特性を測定し、両者の各ねじり特性間について実験的に解析した。その結果、糸のねじり剛性 ϕ は単繊維のねじり剛性 ϕ の総和と等しいか、または大きな値を示す。両者の比を α とすると α はまた張力 W_i の関数でもある。無張力下での α を α_0 として α は

$$\alpha = \alpha_0 + \alpha_1 W_i + \alpha_2 W_i^2$$

で近似できることがわかった。ただし α_0 , α_1 , α_2 は繊維固有の性質や糸の構造に關係する定数であろうと思われる。さらに、糸のねじりヒステリシス特性の張力依存性にも繊維の性質や糸の構造が大きく関与することなどがわかった。

文 献

- 1) F. T. Peirce ; J. Text. Inst., 14, T1 (1923)
- 2) R. Meredith ; J. Text. Inst., 38, T17 (1947)
- 3) R. Meredith ; J. Text. Inst., 45, T489 (1954)
- 4) J. C. Guthrie, D. H. Morton, P. H. Oliver ;
J. Text. Inst., 45, T912 (1954)
- 5) M. Kärrholm, G. Nordhammar, O. Friderg ;
Text. Res. J., 25, 922 (1955)
- 6) J. H. Wakelin, E. T. L. Voong, D. J. Montgomery ; J. Appl. Phys., 26, 786 (1955)
- 7) A. C. Goodings ; Text. Res. J., 38, 123 (1968)
- 8) F. T. Peirce ; J. Text. Inst., 14, T390 (1923)
- 9) R. L. Steinberger ; Text. Res. J., 7, 83 (1936-37)
- 10) W. E. Morton, F. Permanyer ; J. Text. Inst., 38,
T54 (1947)
- 11) W. E. Morton, F. Permanyer ; J. Text. Inst. ; 40,
T371 (1949)
- 12) W. G. Hammerle, D. J. Montgomery ; Text. Res.
J., 23, 595 (1953)
- 13) J. J. Mertens ; J. Text. Inst., 50, T70 (1959)
- 14) T. W. Mitchell, M. Feughelman ; Text. Res. J.,
30, 662 (1960)
- 15) R. Postle, P. Burton, M. Chaikin ; J. Text. Inst.,
55, T448 (1964)
- 16) J. Skelton ; J. Text. Inst., 56, T443 (1965)
- 17) W. D. Freeston, M. M. Platt, G. A. M. Butterworth
; Text. Res. J., 36, 12 (1966)
- 18) L. D. Armstrong, T. W. Mitchell ; J. Soc. Instrum.
Series 2, 2, 375 (1969)
- 19) R. C. Dhingra, R. Postle ; J. Text. Inst., 65, 126
(1974)
- 20) R. C. Dhingra, R. Postle ; J. Text. Inst., 65, 171
(1974)
- 21) M. Feughelman ; J. D. Collins ; Text. Res. J. ;
44, 627 (1974)
- 22) R. C. Dhingra, R. Postle ; J. Text. Inst., 66, 407
(1975)
- 23) W. E. Morton, J. W. S. Hearle ; "Physical
Properties of Textile Fibres", The Text Inst.
Butterworths, Manchester & London, p383
(1962)
- 24) 東レエンジニアリング ; 特公昭46-23582, 登録
番号633338 (1966), 特公昭49-552, 登録番号
741664 (1969)
- 25) 丹羽, 川端, 河合 ; 織学誌, 26, 461 (1990)
- 26) 川端, 笹井 ; 織機誌, 28, T157 (1975)
- 27) 川端季雄 ; 織機誌, 26, 721 (1973)
- 28) 川端季雄 ; 第5回 繊維工学研究討論会 講演 要旨
集, p. 5, 日本繊維機械学会 (1976)