糸の摩擦特性に関する研究

京 都 大 学 工 学 部 川 端 季 雄 (会員)

奈 良 女 子 大 学 家 政 学 部 諸 岡 英 雄 (")

Frictional Characteristics of Yarns.

Sueo Kawabata* and Hideo Morooka**,

*Department of Polymer Chemistry, Kyoto University, Kyoto.

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

Abstract

Frictional properties of yarns are related not only with the frictional property of fibers but also with the structure of the yarn. This paper aims to divide experimentally the apparent value of frictional coefficients into those two factors. For this purpose the frictional coefficient between a yarn and a steel rod is measured. The steel rod of 0.5mm thick crossing at right angles to the yarn axis moves on the yarn surface at a constant speed.

The assumption was made that :

$$\mu = \mu_A + \mu_B$$

where,

μ : the frictional coefficient,

μ_A : the component related only with the surface contact between the steel and the fiber, that is, the frictional coefficient between the rod and the fiber.

μ_B : the component related with the other effects including the effect of yarn deformation during the displacement of the rod.

μ_A is measured directly by the friction measurement between the rod and the fiber. A new apparatus is used to determine μ_B . A steel rod rotates on the yarn surface without slippage to pick up the component of the force which induces the μ_B component. It is confirmed that the sum of the μ_A and the μ_B which are separately measured agrees well with the apparent value of μ . And the result shows that the μ_B occupies more than 60% of μ , and this percentage becomes greater when the yarn is deformable against the lateral compression.

(Received February 25, 1978)

摘 要

目 的 糸の摩擦特性は繊維の摩擦特性だけでなく糸構造にも関係している。本報はこれら2因子を観測によって分離することを目的とする。

結 果 解析を容易にするため、糸と鋼製丸棒との摩擦を測定する。鋼製丸棒の直径は 0.5mm で糸軸に対し直角におかれ一定速度で糸表面上を移動する。次の関係式を仮定する。

$$\mu = \mu_A + \mu_B$$

μ は摩擦係数、 μ_A は鋼と繊維との表面接触にのみ関係する成分、すなわち丸棒と繊維との摩擦係数である。 μ_B は丸棒の移動中、糸の変形による効果を含む他の諸効果から生ずる成分である。 μ_A は直接に丸棒と繊維との摩擦測定から得られる。 μ_B の測定については、 μ_B 成分を導きだす力の成分を引出すために糸表面を滑ることなしに回転する鋼製丸棒を用いる。 μ_A と μ_B の和は観測値 μ と合致することを確認した。その結果から μ_B が μ に占める比率は60%以上にもなることが明らかとなり、またその比率は糸が横圧縮を受けて変形しやすいときほど大であることが確かめられている。

(昭和53年2月25日受理)

1. 緒言

糸が他の物体と接触する時の摩擦特性についてはこれまで多くの測定がなされてきた。測定法に関するものや油剤の影響をみるもの¹⁻⁵⁾、温湿度、摩擦速度、摩擦面の表面状態などとの関連をみるもの等⁶⁻⁷⁾の報告によって多くのデータが集められている。しかし摩擦力の発生機構についての研究はまだほとんど進んでいないと思われる。本報では糸の摩擦特性が糸を構成する繊維の摩擦特性および糸の構造といかに関係しているかについて、換言すれば糸の摩擦特性に繊維の集合効果がおよぼす影響を調査するのが目的である。

糸との摩擦をみる接触物体として円筒形の鋼の剛体を用いるがこれは解析を単純化するためである。これによって糸の繊維集合体効果を明らかにすることに重点をおいている。

2. 理論

2.1 μ_A と μ_B について

図1 糸と鋼丸棒との摩擦測定の実理図

図1が糸と鋼丸棒の摩擦子との接触方法を示す図である。摩擦子は直径 0.5mm のピアノ線で図のように静荷重を加えて接触面に垂直方向の力 W を与える。そして糸軸方向に糸に対して一定速度 V_0 で回転せずに移動し、糸を圧縮しながら摩擦する時の摩擦力を F とする。摩擦係数を次式で定義する。

$$\mu = \frac{F}{W} \quad (1)$$

F : 摩擦力

W : 接触面を加圧する法線力

摩擦力 F には繊維表面と摩擦子表面との滑り摩擦に基づく摩擦力のほかに、糸を部分的に圧縮変形させながら摩擦子が移動する際に生じる糸を変形させるための仕事の効果に基づく力も加わるはずである。すなわち

$$F = F_A + F_B \quad (2)$$

とおく。ここで F_A は繊維表面と摩擦子との間の摩擦力、 F_B は糸を変形させるための仕事に基づく摩擦力である。また(2)式を(1)式により摩擦係数で表わして

$$\mu = \mu_A + \mu_B \quad (3)$$

ただし、 $\mu = F/W$, $\mu_A = F_A/W$, $\mu_B = F_B/W$ となる。

まず μ_A について考えると糸は低圧縮力でも容易に図2に示すように変形し糸断面は扁平になる。いま摩擦面

図2 糸と鋼丸棒との摩擦測定時の糸の変形

の幅を図のように D とする。断面はここで矩形断面と仮定して摩擦子に接触する繊維本数 m は繊維の直径を d とすれば

$$m = \frac{D}{d} \quad (4)$$

となる。繊維1本当りにかかる法線力すなわち接触力 w gf/fiber は(4)式を用いて

$$w = \frac{W}{m} = \frac{dW}{D} \quad (5)$$

となる。繊維表面と摩擦子との間に摩擦係数 μ_A は、繊維束の圧縮変形効果のない状態で測定されねばならない。また一般に μ_A は定数でなく接触力 w によって変わるので、 μ_A は繊維1本当りの接触力が(5)式で計算される w のときの値を用いる。

次に μ_B について、図2のように摩擦子が位置1から位置2へ Δx だけ移動するとき糸を変形させることに要した、糸の単位長当りの平均仕事を E_0 とすると、これは摩擦子を F_B に抗して単位長さの距離を移動させるのに要する仕事と等しいので F_B も Δx だけ移動する間の平均値をとるとき、次式の関係が得られる。

$$F_B \cdot \Delta x = E_0 \cdot \Delta x \quad (6)$$

すなわち

$$F_B = E_0 \quad (7)$$

となり(1)式の定義より

$$\mu_B = \frac{F_B}{W} = \frac{E_0}{W} \quad (8)$$

となる。すなわち変形に伴う繊維集合体のエネルギー損失が μ_B を生み、摩擦子と糸との摩擦係数が繊維とのそれより大きくなる原因となる。 μ_B を糸構造から導くことの理論的誘導はまだ現段階では困難で本研究では実験的に μ_B を μ から分離して求める方法を検討し、これにより μ_B を実測した。

3. 実験

3.1 測定法

(a) 糸の摩擦係数 μ の測定法

KES-F 4⁸⁾ 摩擦試験機を使用し、摩擦子の移動速度 $V_0=1\text{mm/sec}$ とした。図3が滑り摩擦子で接触部は直径 0.5mm の市販ピアノ線を用いている。糸は2本を約 2mm 離して平行に張り、その上面を摩擦子を移動させて測定する。

図3 糸の滑り摩擦測定に用いた方法(a).
(b)は接触子の寸法

(b) 糸の変形に伴うエネルギー損失項 μ_B の測定法

円筒形の摩擦子をその軸のまわりに滑らかに回転させて糸の上を移動させる、つまり糸表面上を回転接触させるとこれにより成分 F_A は除去される。すなわちこの時の抵抗力を F_R 、また摩擦子の回転軸受の摩擦による抵抗力を F_{RF} として

$$F_B = F_R - F_{RF} \dots\dots\dots (9)$$

となり F_B が求まる。ただし F_{RF} はあらかじめ測定しておく。

図4がその回転摩擦子でこの場合は糸は10本を 0.1 mm の間隔で平行に並べて測定した。糸と糸の間は分離している。回転摩擦子には真直ぐなピアノ線を図4 (a)のようにミニチュアベアリングに支持した。ベアリングの回転摩擦は F_{RF} は振子法⁹⁾により測定した結果、摩擦係数は 0.001 以下となり無視できる。図5に滑り摩擦子と回転摩擦子の外観を示す。

測定は 20°C, 65% RH の恒温恒湿条件で行った。

(c) 繊維の表面摩擦係数 μ_A の測定法

μ_B に μ_A を加えれば μ に等しくなることの検証のため、単繊維の表面摩擦係数を同じ摩擦子で測定した。単繊維10本を張力 0.3gf/fiber、長さ 2.5cm で平行に張り、摩擦速度 $V_0=1\text{mm/sec}$ のときの摩擦力を測定する。測定原理は前述の KES-F 4 によるものと同じであるが摩擦力検出には高感度の変換器を特別に使用した。

図4 回転摩擦子を用いた F_B の測定方法(a).
(b)は接触子の寸法

図5 摩擦子の外観
(a) 滑り摩擦子
(b) 回転摩擦子

表1 試料糸(紡績糸)

項目 試料糸No.	繊維組成	番手 (tex)	糸直径 (mm)	撚数 (turn/cm)	断面繊維 本数	平均繊維 直径 (mm)	繊維間静 摩擦係数 μ_{ff}	備考
1	ポリエステル 100%	1/20	0.20	7.7	97	0.0133	0.34	紡績糸
2	羊毛 100%	1/11	0.17	6.2	47	0.0181	0.33	紡績糸
3	綿 100%	1/20	0.22	7.7	97	0.0113	0.27	紡績糸

(d) 繊維間摩擦係数 μ_{ff} の測定法

μ_B は糸の変形時の繊維間摩擦などの内部損失に関係すると思われるのでこの検討のために糸を構成する繊維の繊維間摩擦も測定した。真直ぐな1本の繊維に別の1本の繊維をループ状にして吊り、真直な繊維を傾斜させてループを滑らせる方法¹⁰⁾を用いた。吊した繊維の張力は0.025 gfである。

(e) 圧縮下での糸幅Dの測定法

摩擦子と同径の透明なガラス棒で糸を圧縮し実体顕微鏡で測定した。また図6のように繊維が規則正しく配列して接触していることが認められ、(5)式で接触する繊維本数 m を算出するのに D を繊維直径 d で単に除していることが妥当であることを証明している。

3.2 試料

試料としてポリエステル、羊毛、綿の3種の繊維それぞれ100%の紡績糸を用い、表1にその詳細を示す。

4. 結果

4.1 μ_A と μ_B の測定結果および μ との比較

表2に試料 No. 1 について糸の撚数 n 、法線力 W をパラメータとして μ , μ_A , μ_B の測定値を示す。また表中に $\mu - \mu_B$ として求めた $\tilde{\mu}_A$ と μ_A とを比較しているが両者はよく合致しているので、(3)式は妥当であろう。表3に試料 No. 2 (羊毛), No. 3 (綿) についての同様の測定結果を示す。表2によれば糸幅 D は W の増加とともに増加し一定値に飽和する傾向があり撚数 n が少ないほど大きい値を示す。したがって(5)式より計算した繊維1本当りに加わる法線力 w gf/fiber は撚数が少ない糸ほど小さい。表2, 3はいずれも糸張力が30gf/yarnの場合の結果であるが、糸張力を変えた場合でも、 $\tilde{\mu}_A = \mu - \mu_B$ と μ_A とは良い一致を示すことが認められた。これから糸の摩擦に占める集合体効果の割合 ($(\mu_B/\mu) \times 100\%$) は表中にも記入したように60%から70%の間をとることが明らかとなった。

4.2 T, n, W を変化させた時の μ と μ_B の関係

表1の試料 No. 1 (ポリエステル紡績糸) について μ と μ_B を図7に示す。ただしこれらの値は法線力 W gf

図6 摩擦部の糸の状態

/yarn と糸の撚数 n とに関係するのでそれらをパラメータにとって示している。図のように W の増加にしたがい μ は増加し飽和傾向を有する。ただし μ_B は低法線力では測定が困難で信頼あるデータが得られず測定点がないので傾向はよくわからない。図8は測定時の糸の張力

図7 W と μ , μ_B との関係
試料糸 No. 1 (ポリエステル) $T=30$ gf/yarn

T gf/yarn の影響を調べたもので T が大きくなると μ は小さくなる傾向を有している。図7と図8の結果をあわせて考えると糸が変形しやすい状態では μ は大きくなる傾向がある。そしてこの傾向は図8の点線で示した $\mu - \mu_B = \tilde{\mu}_A$ には T の影響がみられないことから考えると μ_B が主に糸の柔らかさに影響されていることがわかる。

表2 試料 No. 1 (ポリエステル100%紡績糸) の測定結果

法 線 力 (gf/yarn)	項目 燃数 (t/cm)			μ			μ_B			D (mm)			w (gf/fiber)			μ_A			$\bar{\mu}_A = \mu - \mu_B$ として求めた μ_A の値			$\frac{\mu_B}{\mu} \times 100$ (%)		
	3.7	7.7	11.7	3.7	7.7	11.7	3.7	7.7	11.7	3.7	7.7	11.7	3.7	7.7	11.7	3.7	7.7	11.7	3.7	7.7	11.7	3.7	7.7	11.7
2	0.205	0.185	0.157							0.317	0.255	0.220	0.083	0.104	0.120									
4	0.252	0.232	0.210							0.365	0.280	0.225	0.145	0.190	0.236									
6	0.271	0.248	0.228	0.185	0.162	0.145	0.384	0.285	0.225	0.207	0.280	0.354	0.079	0.085	0.090	0.086	0.086	0.083	68.2	65.3	63.5			
7	0.276	0.251	0.234	0.180	0.157	0.142	0.390	0.290	0.225	0.238	0.321	0.413	0.082	0.088	0.094	0.096	0.092	0.092	65.2	63.3	60.0			
8	0.280	0.255	0.237	0.176	0.156	0.140	0.395	0.290	0.225	0.269	0.366	0.472	0.084	0.091	0.097	0.104	0.099	0.097	62.8	61.1	59.0			
9	0.283	0.257	0.240	0.173	0.154	0.138	0.400	0.290	0.225	0.299	0.412	0.532	0.086	0.094	0.100	0.110	0.103	0.102	61.1	59.9	57.5			

 $T = 30 \text{ gf/yarn}$

表3 試料 No. 2 (羊毛100%紡績糸) と No. 3 (綿100%紡績糸) の測定結果

法 線 力 (gf/fiber)	項目 試料糸No.		μ		μ_B		D (mm)		w (gf/fiber)		μ_A		$\bar{\mu}_A = \mu - \mu_B$ として求めた μ_A の値		$\frac{\mu_B}{\mu} \times 100$ (%)	
	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3
2	0.215	0.214					0.203	0.267	0.178	0.084						
4	0.247	0.245					0.230	0.297	0.314	0.152						
6	0.251	0.258	0.173	0.176	0.247	0.325	0.439	0.208	0.093	0.083	0.078	0.082	68.9	68.2		
7	0.254	0.261	0.163	0.171	0.250	0.332	0.506	0.238	0.098	0.087	0.087	0.090	65.7	65.5		
8	0.256	0.263	0.162	0.168	0.250	0.340	0.579	0.265	0.102	0.092	0.094	0.095	63.2	63.8		
9	0.257	0.265	0.158	0.165	0.250	0.348	0.651	0.292	0.106	0.096	0.099	0.100	61.4	62.2		

 $T = 30 \text{ gf/yarn}$

5. 考 察

F_B の要因についてまず検討すると、 F_B は糸の変形と回復によって消費されるエネルギーから換算される力で

図8 T と μ , μ_B との関係
試料糸 No. 1 (ポリエステル) $W=6.75$ gf/yarn

図9 F_B と圧縮仕事 W_c 、圧縮回復損失仕事 W_L およびねじりに要する仕事 TE との関係
試料糸 No. 1 (ポリエステル) $n=7.7$ turn/cm
 $T=30$ gf/yarn

あるとした。観察の結果、圧縮変形時に糸が円形断面から扁平な断面になるのでその部分で見かけの撚数が変化し、言わば糸に見かけのねじり変形も伴う複雑な変形をしている。図9において、いま平行板間で糸を圧縮することにより測定した圧縮と回復過程の1サイクルでの損失エネルギー W_L を(7)式の E_0 の代りに代入し、求まる F_B と実測の F_B と比較したが、実測した F_B の約20%程度にしかならなかった。また摩擦測定に用いた摩擦子による圧縮、回復エネルギー損失を測定して単位長当りに近似的に換算しても $W=7$ gf/yarn のとき約18%程度であった。弾性変形も含め圧縮過程での全仕事量 W_c を用いても約35%である。また圧縮時に生じるとされる糸のねじり変形を考慮しその全仕事量を TE とすると、 TE は約0.3%でほとんど無視できる。いずれもまだ F_B を説明できない。おそらく E_0 には内部の繊維間摩擦が関与すると思われるが、多種の摩擦係数の異なる繊維を用いての実験がこの機構の解明には必要であろう。また加圧された繊維束の変形状態は F_B の解明が必要であるが図6のように透明なガラス棒で接触状態を写真観測すると繊維が規則正しく配列して接触していることが認められる。このことは F_B の要因を検討するうえにも大切な事実である。

なお 0.5mm 径の円筒で糸を圧縮したときの糸の幅 D および内部摩擦に原因すると思われる F_B について、関連すると思われる諸量との関係を示す実験式としての回帰式を次に示す。

$$D = -0.191 - 0.00179n - 0.00535T - 0.0479\mu_{ff} + 0.0104W + 1.413D_0 \dots\dots\dots(10)$$

$$F_B = 0.252 - 0.0276n - 0.00262T + 0.0327\mu_{ff} + 0.159W \dots\dots\dots(11)$$

n : 撚数 (turn/cm), T : 張力 (gf/yarn)

W : 法線力 (gf/yarn)

D_0 : 糸の初期見かけ直径 (mm)

表4 μ_B の予測値と実測値の比較

法線力 W (gf/yarn)	1 (ポリエステル 100%紡績糸) $n=7.7$		2 (羊毛100%紡績糸)		3 (綿100%紡績糸)	
	測定値	予測値	測定値	予測値	測定値	予測値
2	0.185	0.213	0.215	0.228	0.214	0.216
4	0.232	0.231	0.247	0.245	0.245	0.232
6	0.248	0.240	0.251	0.258	0.258	0.243
7	0.251	0.243	0.254	0.263	0.261	0.247
8	0.255	0.246	0.256	0.267	0.263	0.251
9	0.257	0.248	0.257	0.271	0.265	0.254

$T=30$ gf/yarn

μ_{ff} : 単繊維間の摩擦係数 (張力 0.025gf/fiber のとき)

(5), (3)式と回帰式から W における摩擦係数 μ が予測される。予測値と実測値を表4に示す。(11)式からもわかるように F_B は T , n が大きいくほど小さくなり, これは糸がかたくしめるほど μ_B が減少することを示し, 今後の解析への手掛りになる。

6. まとめ

鋼製丸棒 (直径 0.5mm) の摩擦子と糸 (単糸紡績糸) との摩擦力 F gf/yarn を糸を構成している繊維との表面摩擦力 F_A および繊維集合体効果に基づく見かけの摩擦力 F_B とにわけてそれぞれ別個に分離して観測し, F は F_A と F_B の和となることを確かめた。すなわち

$$F = F_A + F_B$$

または $\mu = \mu_A + \mu_B$

ただし, $\mu_A = F_A/W$, $\mu_B = F_B/W$ で W gf/yarn は摩擦子を糸に押しつける法線力である。 μ_A は繊維と摩擦子との間の摩擦係数で一般に接触圧依存性をもつが糸を

矩形断面として, D を圧縮時の糸幅, d を繊維直径, $m = D/d$ として $w = W/m$ における値とする。

F_B の直接測定は回転摩擦法によった。単糸紡績糸の場合, 摩擦力 F に占める繊維集合体効果成分 F_B の割合は60%から70%の間をとる。ただし F_B の要因についてはまだ不明で今後の問題点として残されている。

なおこの研究は第6回繊維工学研究討論会において発表した。

文 献

- 1) H. G. Howell; J. Text. Inst., **44**, T359 (1953)
- 2) 竹松; 織機誌, **6**, P738 (1953)
- 3) Röder; J. Text. Inst., **46**, P84 (1955).
- 4) 中尾; 織機誌, **17**, P293 (1964)
- 5) C. Rubenstein; J. Text. Inst., **49**, T13 (1958a)
- 6) M. E. Baird and K. W. Mieszkis; J. Text. Inst., **42**, T521 (1951)
- 7) C. Rubenstein; J. Text. Inst., **49**, T181 (1958b)
- 8) 川端; 織機誌, **26**, P721 (1973)
- 9) N. O. Myklestad, 小堀訳; “機械振動解析” プレイン図書, p. 155 (1973)
- 10) 稲垣, 矢部, 田中, 松川, 熨斗; “被服材料学実験” 産業図書, p. 78 (1975)

正 誤 表

○本誌, Vol. 31, No. 3 (1978) T51~T58 のうち, 下記諸点訂正いたします。

- ・ T51 英文摘要 ↓ 6行目 leasi → least
- ・ T56 右欄 ↑ 13行目 最適回選数 → 最適回転数
- ・ T58 図1左中 右肩の「12」削除
- ・ T58 図1右中 $||R_i - R_{i-1}| < 5 \text{ rpm}$
→ $|R_i - R_{i-1}| < 5 \text{ rpm}$