

濡れたテキスタイルの摩擦に及ぼす糸構造の影響に関する研究

A Study on the Influence of String Structure on the Friction of Wet Textiles

東北大（正）*西 駿明 （学）小林 祥真 福島県ハイテクプラザ（非）中島 孝明 （非）遠藤 悠都
東北大（正）山口 健

Toshiaki Nishi*, Shoma Kobayashi *, Takaaki Nakajima**, Yuto Endo**, Takeshi Yamaguchi*

*Tohoku University, **Industrial Technology Institute Fukushima Prefectural Government

1. 緒言

衣類を構成するテキスタイルは肌と接触・摩擦を伴い、衣類の機能に影響を与える。特に発汗時には、高タック性・高摩擦が発現し、快適性を損なうことが懸念される。一方、スポーツ用タイツなどでは、着用者の運動を制御するため、高摩擦が要求される場合がある。しかしながら、現状として特に汗などで濡れたテキスタイルの摩擦を制御するための設計指針は確立されていない。本研究では、テキスタイルの摩擦設計指針として、糸を構成するフィラメント数に着目し、濡れたテキスタイルの摩擦挙動に及ぼすフィラメント数の影響を明らかにすることを目的とした。また、摩擦挙動に及ぼすテキスタイル内の水分分布の影響を考察するため、摩擦試験時の動的な水分分布を可視光にて定量化し、静的な水分分布をX線CTスキャンにて可視化した。

2. 実験方法

2.1 テキスタイル試験片

Table 1 に本研究で用いたテキスタイル試験片の構成ならびに走査型電子顕微鏡像を示す。糸の材料はポリアミド、編み構造はスムース (interlock) 固定とし、フィラメント数 F_c を3水準 ($F_c = 1, 60, 120$) とした。

2.2 摩擦試験

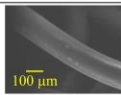
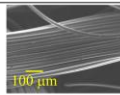
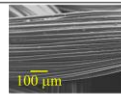
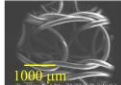
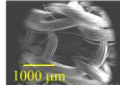
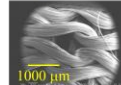
Figure 1 に摩擦試験装置の概略図を示す。10.0 mm 四方に裁断した各テキスタイル試験片をアルミ製ジグに固定したのちにガラス板と垂直荷重 0.49 N にてガラス板に接触させ、すべり速度 $v = 50.0$ mm/s すべり距離 $d = 50.0$ mm にて直動すべりを与え、摩擦力を測定した。本研究では定常すべりに相当する $d = 30.0 - 40.0$ mm での摩擦係数の平均値を動摩擦係数 μ_d と定義した。無潤滑下条件にて同一のテキスタイル試験片で5回摩擦試験を行ったのち、部分的な潤滑下条件として 500 ppm のフルオロセインナトリウム水溶液をテキスタイル試験片に滴下し摩擦試験を実施した。摩擦試験完了後フルオロセインナトリウム水溶液をさらに滴下し、含水量 a が異なる摩擦試験を5回実施することを2サイクル実施した。本研究では、摩擦時の水分分布を可視化するため、470 nm を吸収ピークとする蛍光物質であるフルオロセインナトリウム (F0096, 東京化学工業株式会社) を水に添加することで、Fig. 1 に示すように、波長 480 nm 以上を遮断する

光学フィルター（青フィルター(B)B370, HOYA 株式会社）とテレセントリックレンズ（SE-110VT03-5M, シーシーエス株式会社）を介して、青色 LED 光源（波長の中央値 465 nm, HLV3-22BL-4S, シーシーエス株式会社）から青色光を接触面に入射し、発生した緑色の蛍光をカメラ（AP-3200T-10GE, 株式会社ジェイエアイコーポレーション）を用いて 100 fps で観察した。また同時に、赤色 LED 光源（TLSB165×25-22RD-4, アイテックコーポレーション）からの赤色光をガラス内で全反射する角度にて入射した。先行研究¹⁾に基づき、撮影された画像における緑色光と赤色光それぞれの有無から、テキスタイル中における水滴の有無とその水滴がガラスに接触しているか否かの判別を行った。

2.3 X線CTスキャン

20 mm×20 mm に裁断した各テキスタイル試験片を大型 X 線 CT 装置（TXS-34500FD HS, 東芝 IT コントロールシステム株式会社）の回転ステージに固定した。造影剤としてヨウ化カリウム（32351-30, 関東化学株式会社）の 50% 水溶液をマイクロピペッター（ピペットガイ PG-2-2, アズワン株式会社）にて 5.0 mL 滴下し、回転ステージを 360 度回転させながら露光時間 499 ms にて 2400 枚の X 線透過像を取得した。X 線強度は 100kV, 0.050 mA とした。同装置付属ソフトにより、得られた X 線透過像から CT スキャン像を構築し、CT スキャン像に対して大津の 2 値化処理²⁾を

Table 1 Properties and images among textile specimens

Material	Polyamide(PA)		
Fiber type	Monofilament	Multifilament	
Number of fiber	1	60	120
Fiber diameter, mm	176.9	24.9	
SEM image (Unit of fiber)			
SEM image (Textile structure)			

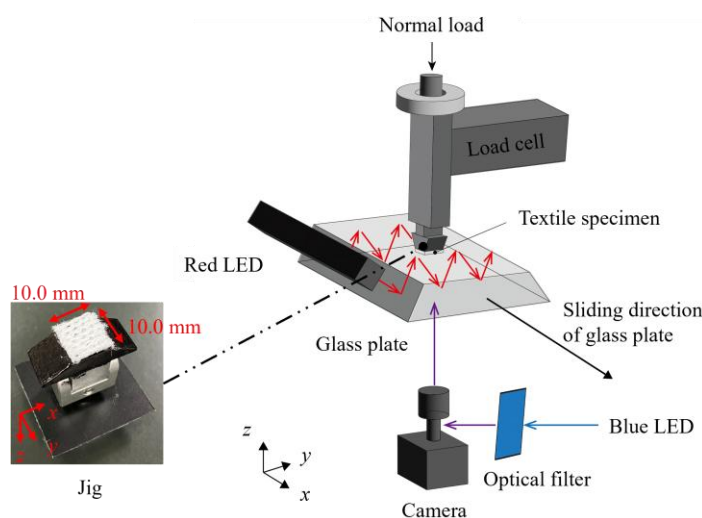


Fig. 1 Schematic view of friction test

施すことで、テキスタイルの糸と水の分布を判別した。

3. 実験結果

Figure 2 に各テキスタイル試験片における動摩擦係数 μ_d と含水量 a の関係を示す。モノフィラメントである $F_c = 1$ の場合、 a の増加に伴い μ_d は緩やかな減少傾向を示した一方、マルチフィラメントである $F_c = 60, 120$ の場合では、 a の増加に伴い μ_d は急激に増加したのちに減少し、乾燥時($a = 0.0$ mg)よりも μ_d は小さい結果となった。また、水分布に着目すると、 $F_c = 1$ の場合、 a の値に関わらず水はテキスタイル試験片底面の中央部に局在化し、 a の増加に伴い拡大したことが確認できる。一方、 $F_c = 60, 120$ の場合では、 $a < 5.0$ mg であっても水は非局在化し、テキスタイル試験片の底面全体に広がったことがわかる。

Table 2 に各テキスタイル試験における CT スキャン像の 2 値化結果を示す。 $F_c = 1$ の場合、テキスタイル試験片に滴下した水は局在化し、滴下した箇所に留まったことがわかる。一方、 $F_c = 60, 120$ の場合では、滴下した水は 3 次元的に非局在化し、テキスタイル試験片全体に分布した。

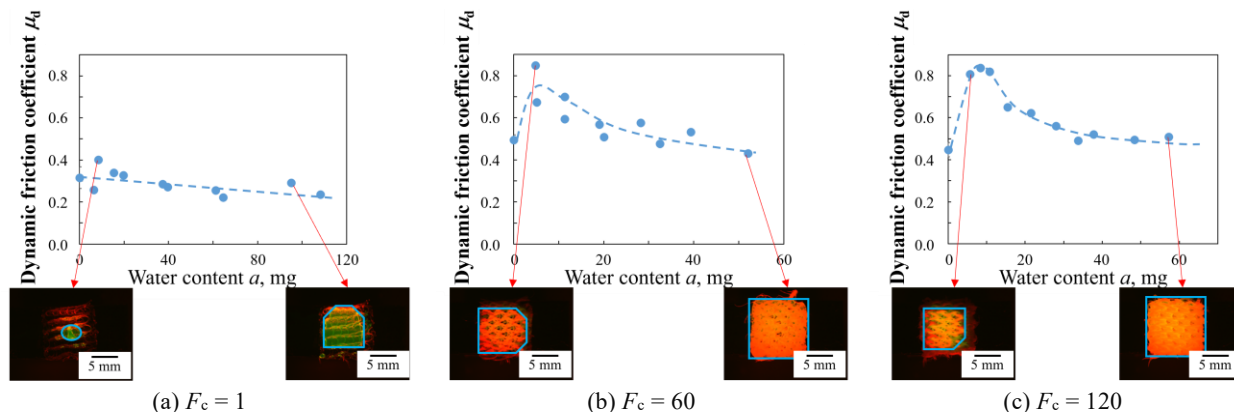


Fig. 2 Relationship between dynamic friction coefficient and water content among textile specimens

Table 2 Binarized CT scan images of textile specimens containing 5.0 mL of potassium iodide solution

Textile specimen	Mono filament	Multi filament	
	$F_c = 1$	$F_c = 60$	$F_c = 120$
CT image ($a = 5.0$ mg)			

4. 考察

Figure 3 に示すように、紙など内部に水が含侵しうる材料が床材に接触した場合、材料中の水滴のメニスカスにより負圧が発生することで、水滴中に形成された真実接触部が拡大し、凝着項が増加すること、そしてある一定以上の水が接触界面に介在すると潤滑膜の形成により真実接触面積が減少し凝着項が減少することが報告されている¹⁾。微量の水滴による高摩擦効果はメニスカスでの負圧と相関し、その絶対値はメニスカスの曲率半径の逆数に比例する。モノフィラメントとマルチフィラメントの場合、メニスカスの曲率半径はそれぞれ糸間とフィラメント間の距離に相当するため、マルチフィラメントではモノフィラメントよりも大きい負圧が発生し、より大きな高摩擦効果が発生したと考えられる。さらに、マルチフィラメントの場合では、水が非局在化したことで、接触界面のより広い領域において高摩擦効果が発生したと考えられる。また、 $a > 10$ mg の場合では、潤滑膜形成によって真実接触面積が減少し、凝着項が減少したと考えられる。

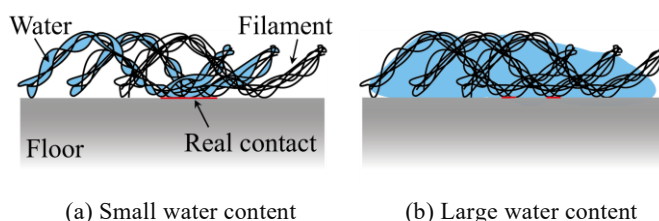


Fig. 3 Schematic view of water distribution

5. 結言

テキスタイルを構成する糸のフィラメント数 $F_c = 1$ の場合、含水量の増加に伴い摩擦が低下し、テキスタイル中において水滴が局在化した。一方、 $F_c > 1$ の場合では、ある一定量の含水量において乾燥時よりも高摩擦を示し、テキスタイル中の水は非局在化することが明らかとなった。

参考文献

- 1) T. Nishi & T. Yamaguchi, Influence of Surface Free Energy of Liquids and Liquid Distributions on the Friction of Paper Wipers, Friction, 13 (2025) 9440970.
- 2) N. Otsu, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, IEEE, 9 (1979) pp. 62.