

## デニム生地の摩擦ダイナミクスと触感

### Friction dynamics and tactile sensation of denim fabric

山形大・工（学）\*川上 凜太朗 山形大・工（非）酒田 由佳 山形大・工（非）宮田 剣

山形大・工（非）小林 修士 山形大・工（正）野々村 美宗

Rintaro Kawakami, Yuuka Sakata, Ken Miyata, Syuji Kobayashi, Yoshimune Nonomura

Yamagata University

#### 1. 結言

デニムとは、経糸をインディゴによって染色し、緯糸を未晒し糸で綾織にした綿を素材として用いた厚地の織布で、裏地側に白い緯糸が多く出るのが特徴である<sup>1)</sup>。これまでに、デニムを洗浄処理すると柔らかさ、しなやかさ、滑らかさが高まり、履き心地が快適になることが明らかにされている<sup>2)</sup>。しかし、デニムの洗浄処理と生地の状態、物性、触感を俯瞰的に解析した例はほとんどなく、このことが、科学的な根拠に基づいた設計・開発を難しくしている。そこで本研究では、市販のリジッドデニム **R**、洗浄処理したワンウォッシュデニム **O**、洗浄処理に加えて軽石等で表面を研磨したストーンウォッシュデニム **S** の力学・摩擦特性および触感を評価した。また、デニム生地の状態・物性・触感の関係を明らかにした。

#### 2. 実験方法

本研究では、綿製のデニム生地 **R**、**O** および **S** を評価した。デニム生地の表面および内部構造は卓上顕微鏡、マイクロフォーカス X 線 CT 装置を用いて観察した。また、3D レーザー顕微鏡を用いて算術平均高さ  $S_a$  を算出した。デニム生地のヤング率は圧縮弾性計測器を用いて測定した。実験条件は下記の通り：荷重 = 1.0 N、圧縮子 = 直径 20 mm、圧縮速度 = 10 mm/s。正弦運動摩擦評価装置を用いて、指モデルとデニム生地間の摩擦特性を評価した<sup>3)</sup>。Fig. 1 に装置の写真を示す。測定条件は以下の通りだった：移動幅 =  $\pm 15$  mm、往復回数 = 11 回、垂直荷重  $W$  = 0.98 N、摩擦速度  $\omega$  = 2.1 rad/s、サンプリング速度 = 1 ms。デニム生地の触感を明らかにするために、5 名（男性 2 名、女性 3 名）の被験者を対象に官能評価を行った。A4 サイズに切り取ったデニム生地を手のひらで擦ってもらい、「サンプルに魅力を感じたか」と、Soft, Hard, Warm, Cold, Rough, Smooth, Sticky, Slippery, Moist, Dry 感の 10 項目を評価した。

#### 3. 結果

##### 3.1 デニム生地の構造と物理特性

Figure 2 にデニム生地の表面および内部構造を示す。全てのデニム生地の表面は経糸、緯糸が一定の間隔で現れており、見た目に差はなかったが、**R**、**O**、**S** の  $S_a$  はそれぞれ  $67.1 \pm 11.7 \mu\text{m}$ 、 $93.9 \pm 6.3 \mu\text{m}$ 、 $71.5 \pm 5.6 \mu\text{m}$  で、毛羽立ちの影響が確認された。デニムの内部では繊維が綾織状に配列されており、洗浄処理の影響はみられなかった。一方で、ヤング率には洗浄・研磨処理の影響が現れた。**R** のヤング率は  $36.6 \pm 3.8 \text{ kPa}$  だったのに対して、**O** は  $16.1 \pm 0.3 \text{ kPa}$  で、洗浄処理によって生地が柔らかくなかった。さらに、**S** は  $8.3 \pm 1.0 \text{ kPa}$  で研磨処理によってさらに生地が柔らかくなることが確認された。

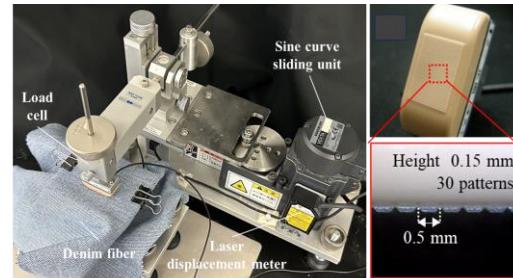


Fig. 1 Sinusoidal friction evaluation system.

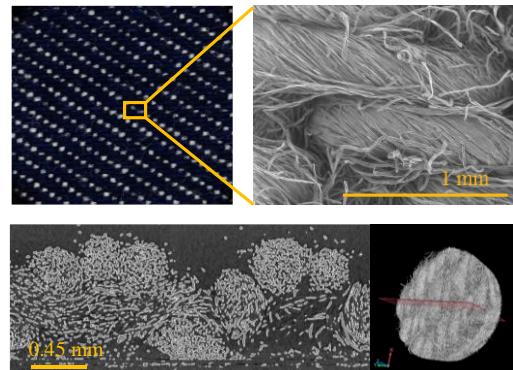


Fig. 2 SEM images and X-ray CT of **R**.

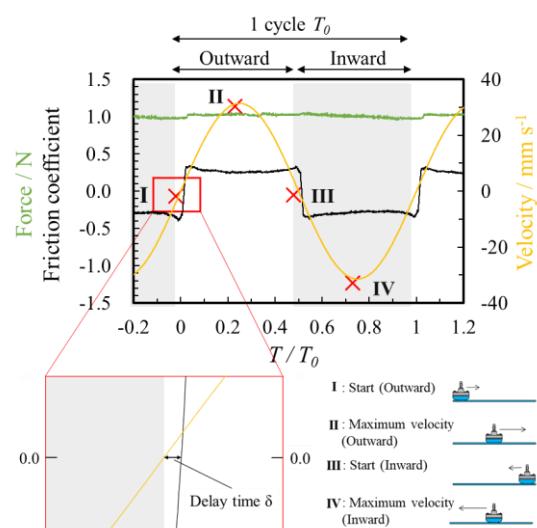


Fig. 3 Temporal profile of the friction coefficient (black line), velocity (yellow line), and normal force (green line) of **R** at  $\omega = 2.1 \text{ rad/s}$  and  $W = 0.98 \text{ N}$ .

### 3.2 デニム生地の力学特性と触感

Figure 3 に **R** の摩擦プロファイルを示す。摩擦係数は  $T/T_0 = 0.04$  のときに静摩擦係数  $\mu_s$  である 0.48 に達した後に減少した。動摩擦係数は 0.33 だった。接触子の動きに対して摩擦力が応答するまでの時間差を規格化したパラメータである遅れ時間  $\delta$  は、往路・復路ともに 0.015 だった。

Figure 4 に垂直荷重  $W = 0.98$  N における各デニム生地の摩擦パラメータを示す。**R** はそれぞれ  $0.34 \pm 0.02$ ,  $0.28 \pm 0.01$ , だったが、洗浄処理により **O** はそれぞれ  $0.37 \pm 0.02$ ,  $0.30 \pm 0.01$ , 洗浄および研磨処理により、**S** ではそれぞれ  $0.45 \pm 0.03$ ,  $0.33 \pm 0.01$  となった。この変化とともに  $\mu_s - \mu_k$  は  $0.05 \pm 0.02$ ,  $0.06 \pm 0.01$  から  $0.12 \pm 0.03$  に、遅れ時間  $\delta$  は  $0.012 \pm 0.002$ ,  $0.013 \pm 0.000$  から  $0.015 \pm 0.000$  に増加したが、摩擦係数の速度依存性を示す粘性係数  $C$  は  $-0.002 \pm 0.001$  で各デニム生地ともほぼ一定だった。

洗浄および研磨処理はデニム生地の触感、特に Soft および Smooth 感に影響を与えた。Soft および Smooth 感のスコアは **R** では  $4.3 \pm 2.1$  および  $4.5 \pm 2.0$  だったが、**O** では  $4.9 \pm 3.0$  および  $4.5 \pm 2.2$ , **S** では  $6.6 \pm 2.3$  および  $6.6 \pm 2.3$  だった。洗浄処理は Soft 感、研磨処理は Soft および Smooth 感に影響を与えることが明らかになった。

### 4. 考察

デニム生地の洗浄および研磨処理によって、弾性率が低下するとともに、摩擦係数が増加した。Fig. 5 に摩擦係数とヤング率の関係を示す。デニム生地に用いられる経糸には多くの場合ポリビニルアルコールなどの糊剤が塗布されているが、水による洗浄によってこれらが除去されたことで、弾性率が低くなったものと推察される。また、軽石等を加えた機械的な処理はデニム生地を柔軟化し、接触子とデニム生地の間の真実接触面積を増加させたものと予想される。一般に、摩擦力は固体表面間における単位面積当たりのせん断強さと真実接触面積の間の積によって示されるが、柔軟化によって面積の増加が起こったものと考えられる<sup>4)</sup>。

これらの力学特性の変化は Soft 感と Smooth 感を向上させた。これまでに弾性係数と Soft 感の間に高い相関があることや、Smooth 感は動摩擦係数が小さいほど強まることが報告されている<sup>5,6)</sup>。今回、 $\mu_s - \mu_k$  が最も大きい **S** の Smooth 感が強かったのは、触り初めに一瞬、指が生地に引っかかり、その後、摩擦抵抗が弱まるダイナミックな変化が Smooth 感につながったためと推察される。

### 5. 結言

洗浄・研磨処理によってデニム生地が柔らかくなり、このことが Soft 感だけでなく、特徴的な摩擦パターンと Smooth 感も引き起こすことが明らかになった。これらの知見は、デニム生地のテクスチャーをコントロールし、高付加価値化をする上で、これらの処理が有用であることを示している。

### 文献

- 1) S. G. Annapoorni: Sustainability in Denim 2, Woodhead Publishing (2017) 1.
- 2) A. G. Hassabo, B. M. Hegazy, H. M. Elmorsy, N. Gamal, A. Sedik, F. Saad & H. A. Othman: Denim Manufacturing and Washing as a Fashioned Garments, J. Text. Color. Polym. Sci., 20, 2 (2023) 203.
- 3) Y. Aita, N. Asanuma, A. Takahashi, H. Mayama & Y. Nonomura: Nonlinear friction dynamics on polymer surface under accelerated movement, AIP adv, 7, 4 (2017) 1.
- 4) 松川宏：摩擦の物理 第1版，岩波書店 (2012) 7.
- 5) 谷・佐久間・篠宮：球圧子の押込試験による軟材料の厚さと Young 率の計測，日本機械学会論文集 A 編, 75, 755 (2009) 901.
- 6) R. Tsuchiya, R. Kuhara, K. Kikegawa, N. Nagatani & Y. Nonomura: Tactile and Physical Properties of Cosmetic Powders with a Shittori Feel, Bull. Chem. Soc. Jpn., 93, 3 (2020) 399.

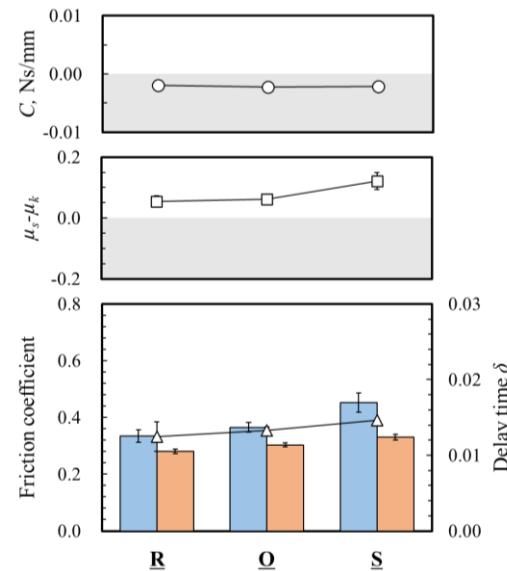


Fig. 4 Static friction coefficient  $\mu_s$  (blue color), Kinetic friction coefficient  $\mu_k$  (orange color), delay time  $\delta$  ( $\Delta$ ), viscosity coefficient  $C$  ( $\bigcirc$ ), and  $\mu_s - \mu_k$  ( $\square$ ) of (**R**), (**O**) and (**S**) at  $\omega = 2.1$  rad/s and  $W = 0.98$  N.

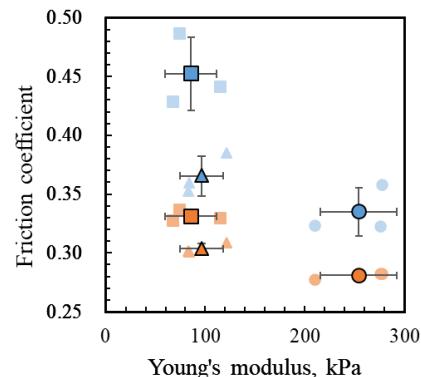


Fig. 5 Relationship between friction coefficient and Young's modulus: Static friction coefficient  $\mu_s$  (blue color), kinetic friction coefficient  $\mu_k$  (orange color). Circle, triangle, and square symbols denote **R**, **O**, and **S**, respectively.