

水中におけるハイドロゲルとテキスタイル被覆ゴムの摩擦挙動に及ぼす テキスタイル構造の影響

Influence of Textile Properties on the Friction Behavior Between Hydrogel and Textile-Covered Rubber in Water

東北大 (正) *伊藤 真 (正) 西 駿明 福島県ハイテクプラザ (非) 中島 孝明 (非) 遠藤 悠都

東北大 (非) 坂口 優斗 (非) 鶴岡 典子 (非) 芳賀 洋一 (正) 山口 健

Shin Ito*, Toshiaki Nishi*, Takaaki Nakajima**, Yuto Endo**, Yuto Sakaguchi*,

Noriko Tsuruoka*, Yoichi Haga*, Takeshi Yamaguchi*

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

1. 緒言

大腸内で行う軟性内視鏡手技における病変見逃しや手技による不安定性に対処するため、撮像素子や牽引器具を備えたマイクロロボット群の開発が進められている¹⁾。しかしながら、マイクロロボットの足場となるシリコンゴム製バルーンは腸内壁に対して低摩擦を示し、牽引力に対し固定できないことが問題であった。Tanada²⁾らはシリコンゴムをガーゼで被覆することにより、腸内壁を模したハイドロゲルとの摩擦を高めることに成功している。しかしながら、ガーゼのようなテキスタイルによって高摩擦が発現するメカニズムは不明である。また、テキスタイルを構成するフィラメント形状、本数、編み構造など様々な要素が摩擦に影響すると考えられるが、それらの影響についても未解明の点が多い。そこで本研究では、フィラメント数が異なるポリアミド製テキスタイルで被覆したシリコンゴムとハイドロゲルの水中での摩擦試験および X 線 CT スキャンを行い、テキスタイル被覆による高摩擦効果に及ぼすテキスタイル構造の影響を明らかにすることを目的とする。

2. 実験方法

腸内壁を模したハイドロゲルブロック試験片を作製するにあたり、平均重合度 900-1100、けん化度 96 mol%以上のポリビニルアルコール (PVA, ポリビニルアルコール 1,000, 完全けん化型, 富士フィルム和光純薬 (株)) 15 wt% 水溶液を調製した。PVA 水溶液を、スチロールケースに注入し、蓋を高さ 8 mm に固定した状態で -20°C (8 h 凍結) / 8°C (10 h 融解) のサイクルを 4 回繰り返してゲル化し、精製水中で 72 時間膨潤させることで、 $85 \times 50 \times 8$ mm の平滑な PVA ハイドロゲルブロック試験片を作製した。

シリコンゴムバルーンを模した試験片として、ウレタンブロック (触覚接触子: 指モデル, (株) トリニティーラボ) の底面に幅 15 mm のシリコンゴムシート ((株) 扶桑ゴム産業製, シリウス・極薄シリコン樹脂ゴム (透明) 硬さ 20) を固定した試験片を作製した。加えて、この試験片を異なるフィラメント数 $F_c = 1, 2, 60, 120$ の糸で編成された 4 種類のテキスタイル (Fc1, Fc2, Fc60, Fc120) (Fig. 1) で被覆した。

Figure 2 に示す直動型摩擦試験装置 ($\mu\text{v}1000$, (株) トリニティーラボ) を用いて、精製水で浸した PVA ハイドロゲルとテキスタイル被覆/非被覆シリコンゴム試験片を接触させたのち、一方向にすべらせ、摩擦力を計測した。垂直荷重 W は、0.0981, 0.294, 0.491 N, すべり速度 v は 1.0, 10, 50, 100 mm/s, すべり距離 d は 30.0 mm とした。摩擦力のサンプリング周波数は 1000 Hz とし、各条件の繰返し数は 3 回とした。 $d = 10\text{--}20$ mm における摩擦係数の平均値を動摩擦係数 μ_d と定義した。

Figure 3 に X 線 CT スキャン装置の模式図を示す。直径 18 mm、高さ 5 mm の円柱状 PVA ハイドロゲルと摩擦試験と同様の 5 種類のシリコンゴム試験片を荷重 0.0981 N で接触させた。X 線 CT スキャナー (TXS-34500FDHS, 東芝 IT コントロールシステム(株)) を用いて接触面に X 線 (100 kV, 50 μA) を照射し、ステージを 0.025 rpm で 180° 回転させながら 2400 枚の X 線投影像を取得した。ピクセルサイズ $9.75 \times 9.75 \times$

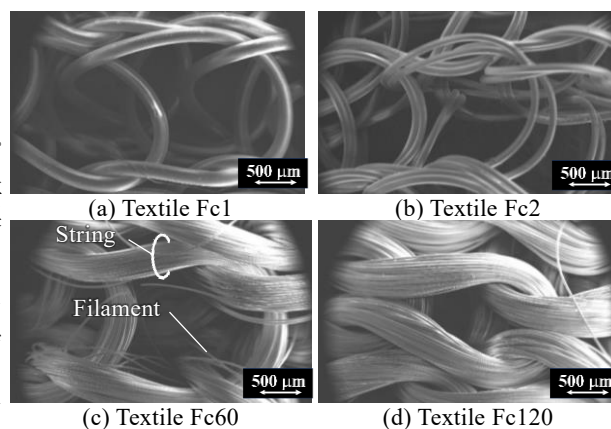


Fig. 1 SEM images of the four textiles.

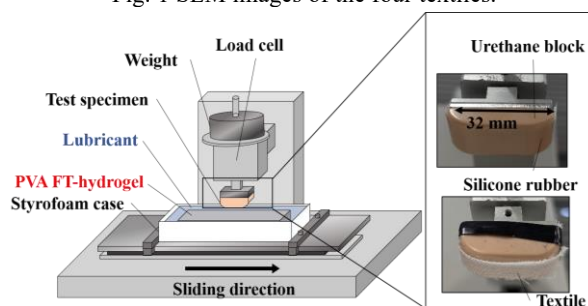


Fig. 2 Schematic of friction tester and test specimens

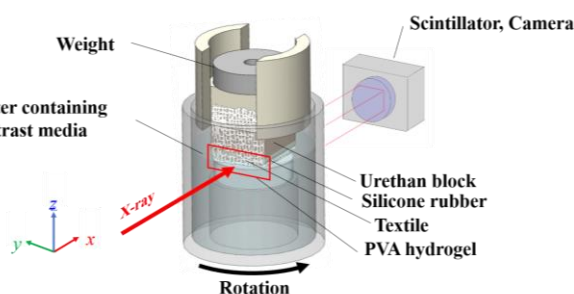


Fig. 3 Schematic of X-ray CT scanning.

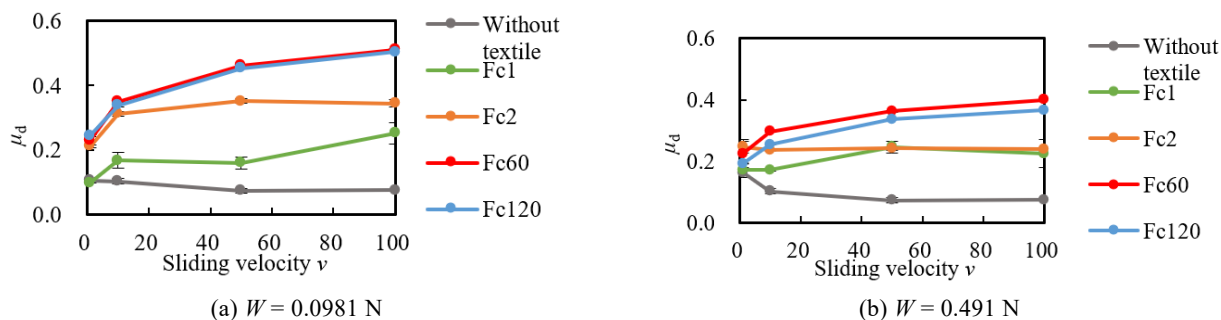


Fig. 4 Dynamic friction coefficient μ_d as a function of sliding velocity. (a) $W = 0.0981$ N and (b) $W = 0.491$ N
 $16.0 \mu\text{m}$ にてCT像を再構成したのち、 x - y / x - z / y - z 平面の断面像を作成した。

3. 実験結果

Figure 4に各 W 条件における各試験片における v と μ_d の関係を示す。同図(a)より、非被覆シリコーンゴム試験片では、全ての v と W の条件で μ_d が 0.11 以下となった。一方、テキスタイル被覆シリコーンゴム試験片では F_c や v によらず非被覆シリコーンゴム試験片より高い μ_d を示した。また、 F_c と v の増加に伴って μ_d が上昇し、 $v = 100 \text{ mm/s}$ における Fc60 において $\mu_d = 0.51$ となり全条件での最大の μ_d を示した。同図(b)より $W = 0.491$ N においても μ_d と v および F_c の関係に大きな変化は見られなかった。一方、すべての試験片において W の増加に伴って、 μ_d は減少する傾向を示した。

Figure 5 に X 線 CT 像より算出した各テキスタイル被覆試験片のシリコーンゴム直下 0.6 mm の位置における x - y 平面の断面図を示す。同図(a), (b)より Fc1, Fc2 ではテキスタイル内部が水で満たされたことがわかる。一方、同図(c), (d)より Fc60 と Fc120 では内部に無数の気泡が存在し、特に Fc120 では気泡が大きく、その数と大きさが多かった。

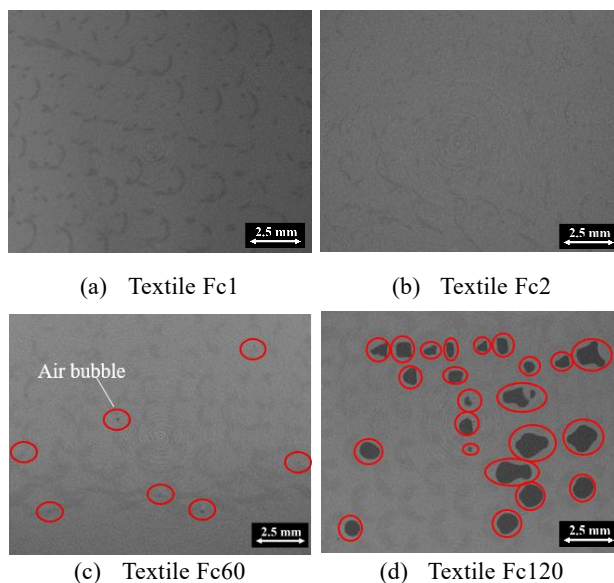


Fig. 5 Cross-sectional views of x - y plane 0.6 mm below the bottom surface of the silicone rubber

4. 考察

フィラメントとハイドロゲルの接触を円筒と平面の接触とすると、ヘルツ接触理論より接触面積は $W^{0.5}$ に比例する。したがって、 W の増加に伴い凝着項は減少するため、 μ_d は減少傾向を示したと考えられる。続いて X 線 CT 像より、 F_c が大きいテキスタイルでは繊維の表面積が高いことからピン止め効果により気泡がテキスタイル内部に固定されやすく、シリコーンゴムとハイドロゲルの間において空気と水が同時に介在する不均一な 3 次元濡れを形成していることが示唆された。不均一な 3 次元濡れでは、メニスカスで生じる負圧により接触界面の真実接触部の拡大を促進することが報告されている²⁾。したがって、Fc60 と Fc120 では、気泡の存在により凝着項が増加したことによって、高摩擦を示したと考えられる。また、 F_c の増加に伴い、テキスタイル表面はより高周波数の粗さを有するため、 F_c の増加に伴いヒステリシス項が増加したと考えられる。本考察は、テキスタイル被覆シリコーンゴム試験片において v の増加に伴い μ_d が増加した結果より肯定される。以上の考察より、フィラメント数 60 以上のテキスタイルにてマイクロボットの足場を被覆することにより、腸内壁に対する高摩擦が確保できると考えられる。

5. 結言

水中におけるハイドロゲルとテキスタイル被覆シリコーンゴムの摩擦に及ぼすテキスタイルのフィラメント数の影響を明らかにした。その結果、テキスタイル被覆により摩擦係数が増加し、フィラメント数が多いほど増加することが分かった。そして、そのメカニズムとして、フィラメント数が多いテキスタイルの内部には気泡が存在し、三次元不均一濡れを形成することにより、ハイドロゲルとの真実接触を促進すること、すべり速度およびフィラメント数の増加に伴ってハイドロゲルの変形によるヒステリシス摩擦が増加することが示唆された。

謝辞

本研究は、JST【ムーンショット型研究開発事業】 Grant 番号【JPMJMS2214-03】の支援を受けたものです。

参考文献

- 1) T. Tanada, et al. Air-driven spiral scaffold mechanism for a group of mini-robots working together in the intestine. Sens. Actuators A-Phys 390 (2025) 116557.
- 2) T. Nishi, et al., Friction behavior of silicone rubber hemisphere under non-uniform wetting states: With water droplets in air or air bubbles in water. Tribol. Int. 155 (2021) 106769.