

メッシュ材被覆による液体潤滑下でのハイドロゲル高摩擦化現象に関する研究

Study on High Friction Phenomena for Hydrogel

Covered by Mesh Sheet under Liquid Lubrication

東北大（正）*伊藤 真 東北大（正）西 駿明 東北大（非）鶴岡 典子

東北大（非）芳賀 洋一 東北大（正）山口 健

Shin Ito, Toshiaki Nishi, Noriko Tsuruoka, Yoichi Haga, Takeshi Yamaguchi

Tohoku University

1. 緒言

大腸内で行う軟性内視鏡手技の安全性の向上および手技難易度の簡便化を可能とするマイクロロボット群の開発が進められている¹⁾(Fig.1)。大腸内では腸液による潤滑により、マイクロロボットの足場となるシリコーンゴムバルーンが、腸壁に対してすべることで固定されないことが問題であった。棚田らは、シリコーンゴムをガーゼで被覆することにより、高摩擦が発現することを見出している¹⁾。しかしながら、ガーゼの被覆による高摩擦効果の発現条件や発現機構は未解明である。

そこで、本研究では網目状織布（メッシュ材）被覆による高摩擦効果の発現条件とそのメカニズムの解明を目指し、腸壁を模したハイドロゲルとシリコーンゴムの摩擦に及ぼす網目状織布の被覆有無、垂直荷重 W 、すべり速度 v 、潤滑剤粘度 η 、メッシュ材の潤滑剤に対する濡れ性の影響を明らかにすることを目的とする。

2. 実験方法

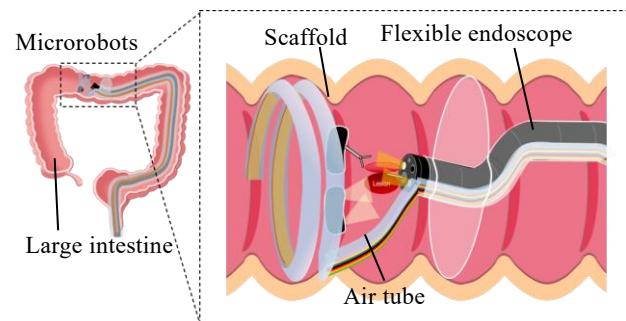
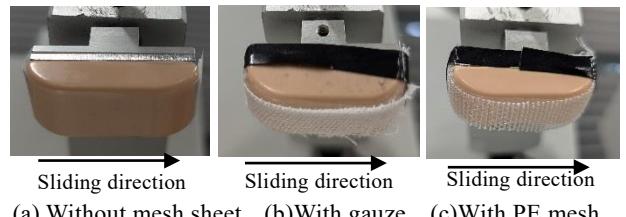
腸壁を模したハイドロゲル平板として、ポリビニルアルコール（PVA）を使用した。PVA（富士フイルム和光純薬（株）、165-17915）10%水溶液 60 g に 2-プロパノールで 2 倍に希釈した硬化剤（マツモトファインケミカル（株）、ORGATIX TC-400）8.5 g を配合したものをスチロールケースに注ぎ、室温大気中にて 48 時間静置することで、表面が平滑な PVA ハイドロゲルブロック試験片（30 mm × 60 mm × 15 mm）を作製した。

Figure 2(a)に示すように、シリコーンゴムバルーンを模した試験片として、人工皮膚片（（株）トリニティーラボ、触覚接触子：指モデル）の底面に幅 15 mm のシリコーンゴムシート（（株）扶桑ゴム産業、シリウス・極薄シリコーン樹脂ゴム（透明）硬さ 20）を固定した試験片を作製した。加えて、この試験片にガーゼ（白十字（株）、F C ガーゼ タイプ I）(Fig. 2(b)) もしくはポリエチレン（PE）メッシュ（アズワン（株），PE92-#30）(Fig. 2(c)) で被覆した試験片を作製した。

Figure 3 に、本研究で用いた直動型摩擦試験装置（（株）トリニティーラボ、μv1000）の概略図を示す。ハイドロゲルブロック試験片を固定したスチロールケースをステージ上に固定し、Fig. 2 に示す試験片と接触させたうえで、一方向にすべらせ、摩擦力を計測した。垂直荷重 W は、0.098, 0.294, 0.490 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。潤滑剤として精製水、90wt%グリセリン水溶液を用いた。各条件での測定回数は 3 回とし、本研究では $d = 10\text{--}20$ mm における摩擦係数 μ_d の平均値を動摩擦係数 μ_d と定義した。

3. 実験結果及び考察

Figure 4 に異なる垂直荷重、すべり速度における各潤滑条件での μ_d を示す。同図(a)より、高荷重、低すべり速度条件では水潤滑下において PE メッシュ被覆試験片がシリコーンゴム試験片に比べて 3.5 倍の高い μ_d を示す。一方、同図(b)より低荷重、高すべり速度条件では、グリセリン水溶液潤滑下においてガーゼ被覆試験片がシリコーンゴム試験片に比べて 2.5 倍高い μ_d の値を示す。このように、荷重、すべり速度、潤滑剤によって、高摩擦を示す被覆材料が異なることが分かる。

Fig. 1 Schematic of micro robot group and soft endoscope¹⁾

(a) Without mesh sheet (b) With gauze (c) With PE mesh

Fig. 2 Test specimen

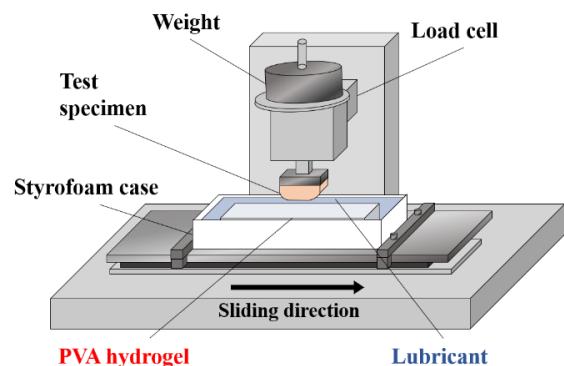
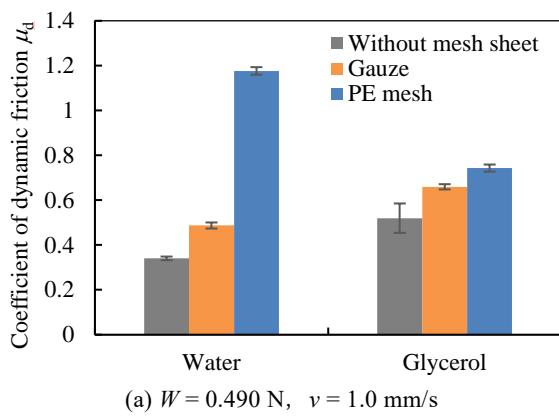
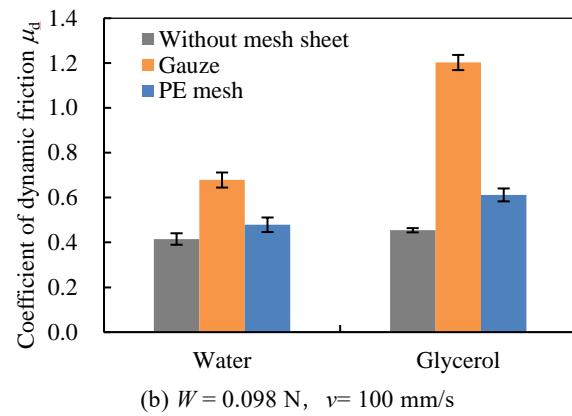


Fig. 3 Schematic of experimental apparatus



(a) $W = 0.490 \text{ N}$, $v = 1.0 \text{ mm/s}$



(b) $W = 0.098 \text{ N}$, $v = 100 \text{ mm/s}$

Fig. 4 Effect of gauze and PE mesh covering on friction coefficient under different lubrication conditions

Figure 5 にシリコーンゴム試験片、ガーゼ被覆・PE メッシュ被覆試験片それぞれにおけるストライベック線図を示す。同図より、シリコーンゴム試験片では、全ての条件で 0.5 あるいはそれ以下の低い μ_d を示すが、PE メッシュ被覆試験片では軸受特性数 $\eta v/W$ が小さい条件で 1.0 以上の高い μ_d を示し、 $\eta v/W$ の増加に対して μ_d は減少する傾向を示す。これは、 $\eta v/W$ 増加に伴い、流体潤滑効果により真実接触面積が減少することで μ_d が減少したためと考えられる。一方、ガーゼ被覆試験片の場合、 $\eta v/W < 10 \text{ m}^{-1}$ において μ_d は 0.5 程度の一定値を示し、 $10 \text{ m}^{-1} < \eta v/W$ では $\eta v/W$ の増加に対して μ_d は増加する傾向を示した。これは $\eta v/W$ の増加に伴う流体潤滑膜の粘性抵抗の増加に起因すると考えられる。

Figure 6 に、水平に固定されたガーゼを構成するコットン繊維、PE メッシュを構成する単繊維に、精製水、90wt% のグリセリン水溶液 1 μL を滴下 5 秒後に水平方向から撮影した画像を示す。液体の種類を問わず、コットン繊維では、繊維の上側と下側両方に弧を描く輪郭の水滴が形成された一方、PE 単繊維では、下側のみに水滴が形成された。水滴は重力により、繊維下側へ移動するのに対して、繊維が液体に対して濡れやすい場合、水滴は繊維との接触面積を最大化するため、水平方向へと移動する²⁾。つまり、精製水、グリセリン水溶液に対して、コットン繊維は濡れやすく、PE 単繊維は濡れにくい性状を有すると判断できる。そのため、ガーゼ被覆試験片と比較して、PE メッシュ被覆試験片の場合、流体潤滑効果が少ない $\eta v/W < 0.1 \text{ m}^{-1}$ の低 $\eta v/W$ 条件においては単繊維表面が水に濡れにくいため、ハイドロゲルとの直接接触部形成が促進され、高摩擦を示したと考えられる。一方、ガーゼ被覆試験片は、低 $\eta v/W$ 条件においてコットン繊維が水に対して濡れやすいため境界膜を形成しやすく PE メッシュ被覆試験片よりも低摩擦を示したと考えられる。シリコーンゴム試験片と比較して高摩擦を示した。これは、PE メッシュ繊維とは異なりガーゼ繊維表面の表面粗さによる流体の粘性抵抗の増加や濡れ性の増加による液体と繊維間の摩擦の増加が関係していると考えられる。

4. 結言

ハイドロゲルとガーゼあるいは PE メッシュを被覆したシリコーンゴムの精製水、グリセリン水溶液中における摩擦特性を明らかにした。以下に得られた知見を示す。

- (1) 精製水やグリセリン水溶液に濡れにくい PE メッシュの被覆により低軸受特性数条件において高摩擦が発現する。
- (2) 精製水やグリセリン水溶液に濡れやすいガーゼの被覆により高軸受特性数条件において高摩擦が発現する。

謝辞

本研究は、JST 【ムーンショット型研究開発事業】 グラント番号【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 Microrobots Working Together in the Intestine," The 46th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC 2024), Orlando (2024, July).
- 2) ドゥジエンヌ, ブロシャール - ヴィアール, ケレ共著 ; 奥村剛訳, 表面張力の物理学, 吉岡出版 (2003).

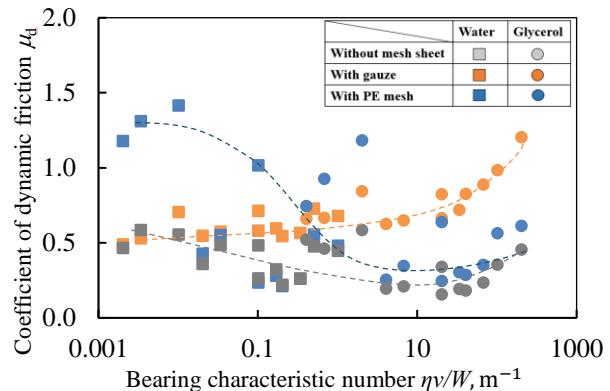
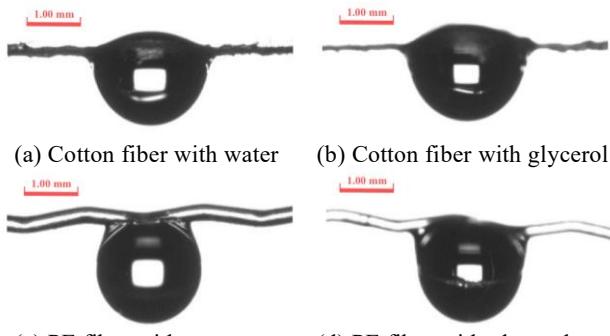


Fig. 5 Striebeck curve



(a) Cotton fiber with water (b) Cotton fiber with glycerol

(c) PE fiber with water (d) PE fiber with glycerol

Fig. 6 Wettability of cotton and PE fiber