

ハイドロゲルの階層化が摩擦特性に与える影響 Influence of Layered Structure on Friction Properties of Hydrogels

九大・工（学）*吉田 弘一郎 九大・工（非）和田 晴翔 九大・工（正）新盛 弘法

九大・工（正）鎗光 清道 九大・工（正）澤江 義則

Koichiro Yoshida, Haruto Wada, Hironori Shinmori, Seido Yarimitsu, Yoshinori Sawae

Kyushu University

1. 緒言

生体関節は歩行時に体重の数倍程度の大きな荷重がかかり、さらに比較的低速であるという過酷な条件下で滑らかに動作する。この潤滑メカニズムについて様々なアプローチから研究が行われている。滑膜関節において関節包内部で接触する骨端部は軟骨で覆われており、この軟骨はコラーゲン線維の配向やプロテオグリカン濃度が深さや部位によって異なるため、一般に表層、中間層、深層の3層に識別される¹⁾。本研究では、軟骨の階層構造が摩擦特性に与える影響に着目するが、軟骨は複雑な組成および構造をもつことや動物由来軟骨の個体差、採取後の組織の変質等が障害となりうる。そこで、軟骨と類似した物性を有するポリビニルアルコール(Poly(vinyl alcohol):PVA)ハイドロゲルを用いて階層構造を有するハイドロゲルを作製し、階層構造と摩擦特性との関連を検討した。

本研究で用いたキャストドライ法により作製したPVAハイドロゲル(CDゲル)は、軟骨と同等の含水性、透水性を持たせることが可能であり²⁾、作製時の乾燥工程において温度や湿度を変化させることで様々な物性を有するゲルを作製することができる³⁾。本研究では軟骨の潤滑メカニズムに階層構造が果たす役割の解明のため、上層側の弾性率が低いという軟骨の特徴に着目して⁴⁾、軟骨と同様に上層側の弾性率が低い階層構造ハイドロゲルを作製し、その上層の厚さを複数設定して、このような階層構造の有無および上層の厚さの違いが摩擦特性に及ぼす影響について検討した。

2. 実験方法

2.1 試験片作成

本研究では平均重合度 1,700、けん化度 98.0~99.0mol%のPVA(28-98、株式会社クラレ)を原料粉末として用い、15 mass%のPVA水溶液を作製した。これを直径 90 mmのポリスチレン製シャーレに30 gキャストし、60℃、80%RHの環境下で1日乾燥させ階層ゲルの下層を作製した。この下層の上にPVA水溶液を7.5, 15, 30, 45 gキャストし、8℃、50%RHの環境下で乾燥させた後に純粋中で膨潤させることで階層ゲルを作製した。乾燥処理は乾燥フィルム中の残存含水量が12~13 mass%になった時点で終了した。また、本研究では比較対照として、階層ゲルにおいて上層および下層にあたるゲルを単層ゲルとして別途作製した。以下では、階層ゲルの試料名はTL-○(△:□)(○:サンプルの番号、△:下層用の溶液仕込み重量(g)、□:上層用の溶液仕込み重量(g))と表記する。また、単層ゲルについては下層にあたるものをSL-L、上層にあたるものをSL-Uと表記する。

2.2 往復動摩擦試験

10×30 mmの階層および単層ゲルシートを、アクリル板にシアノアクリレート系瞬間接着剤(アロンアルファ、コニシ株式会社)で接着した。往復動摩擦試験に摩擦摩耗試験機(トライボギア Type38、新東科学株式会社)を用いた。ゲルの摩擦相手材には、直径 10 mmのBK7製ガラス球を用い、荷重は2.94 Nとした。摩擦速度は10 mm/s、往復動ストロークは15 mm、総摩擦距離は6.0 mで潤滑液には純水を用いた。試験は全て室温環境下でサンプルごとに5回ずつ行った(Fig. 1)。

2.3 応力緩和試験

応力緩和試験には卓上形精密万能試験機(AGX-X、島津製作所)を用いた。10×20 mmの単層ゲルシートを純水中に設置し、直径 30 mmのアルミニウム合金製円柱圧子を、圧縮ひずみが0.3に達するまで降下し、6時間保持した(Fig. 2(a))。こうして得られた応力緩和曲線をもとに、緩和時の弾性率を時刻の関数で表現した緩和関数の各パラメータを最小二乗法によるフィッティングにより求め、SL-L、SL-Uの透水性を推定した⁵⁾。

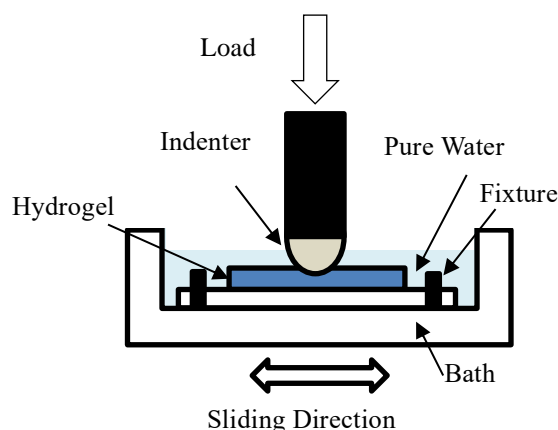


Fig. 1 Schematic image of friction test

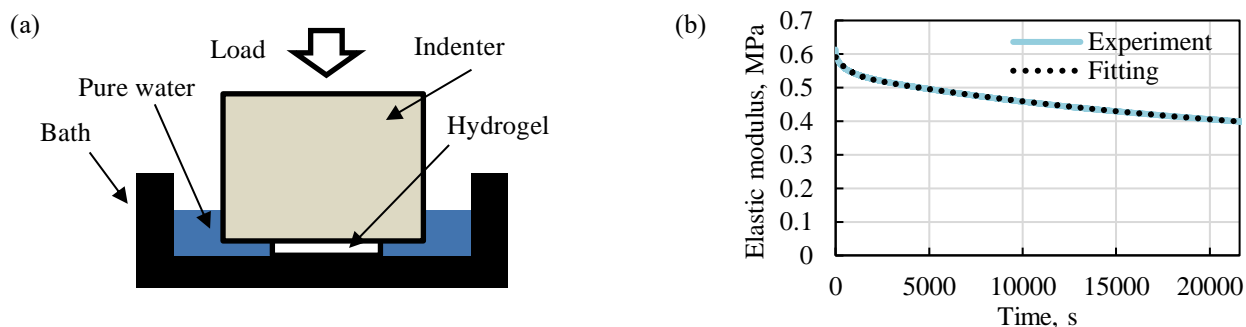


Fig. 2 Estimation of permeability of hydrogels; (a) Schematic image of stress relaxation test, (b) Fitting of experimental and theoretical curve

3. 実験結果

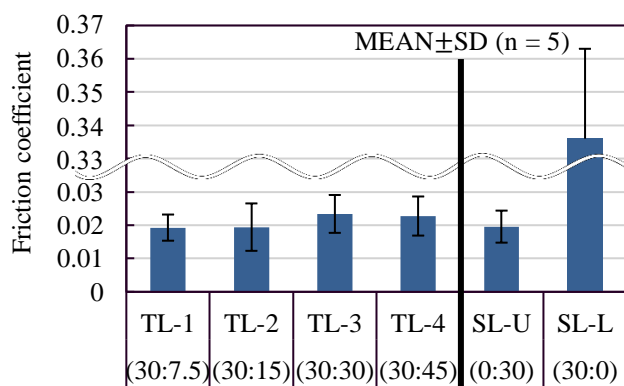


Fig. 3 Friction coefficient of hydrogels

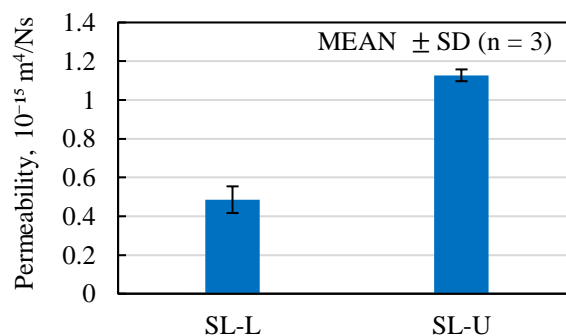


Fig. 4 Permeability of SL-L and SL-U

上層の薄い TL-1 と TL-2, 上層の厚い TL-3 と TL-4 の動摩擦係数はそれぞれ同等の値となり, 上層の薄い 2 つのサンプルの動摩擦係数の方がやや小さくなった. また, SL-U の動摩擦係数は TL-1, TL-2 と同等の値を示した.

応力緩和試験の結果から推定した SL-L, SL-U の透水率は, 軟質の上層である SL-L のほうが 2 倍程度大きかった.

4. 考察

上層の薄い 2 つのサンプルの動摩擦係数は, 上層の厚い他の 2 つのサンプルよりも低い摩擦係数を示した. 階層構造ゲルの剛性は上層が薄いほど大きくなることが示されており⁶⁾, 上層の薄いサンプルにおいて, 圧子から受ける力による側方へ伸長するような変形が制限され接触点付近の水分が移動しづらくなり, 水分による荷重支持割合が高くなるためであると考えられる. また, 上層が薄い場合は透水率の低い下層の影響を大きく受け, 接触点の水分が移動しづらくなることも, この傾向を示す要因となった可能性がある. TL-2 の上層と SL-U の厚さはほとんど同じであるが, SL-U の動摩擦係数が平均で約 16% 低くなった. SL-U において下層のゲルよりもはるかに高弾性率, 低透水性であるアクリル板の存在によって水分の流出が抑制され, 上層の薄いサンプルが低摩擦を示したことと同様の理由でこのような結果となったと考えられる.

5. 結言

本研究では軟骨の高度な潤滑メカニズムにおいて, 軟骨が階層構造を有することの役割を解明するため, 実際の軟骨の構造を参照し上層側の弾性率が低い階層構造ハイドロゲルを作製して, 上層の厚さの変化が摩擦特性に及ぼす影響について検討した. その結果, 低弾性率の上層の厚みの違いや階層構造の有無によってゲルの剛性が変化することや, 各層の透水性の違いによってハイドロゲルの階層化が摩擦挙動に影響を及ぼす可能性があることが示された.

文献

- 1) A. D. Pearle et al. : Basic Science of Articular Cartilage and Osteoarthritis, Clinics in Sports Medicine, 24, 1 (2005) 1.
- 2) S. Yarimitsu. et al. : Influence of Dehydration by Pre-loading on Tribological Property of Hydrogel Artificial Cartilage and Articular Cartilage, Proc. 6th World Tribology Congress (2017).
- 3) E. Otsuka et al. : Effects of Preparation Temperature on Swelling and Mechanical Properties of PVA Cast Gels, Soft Matter, 8 (2012) 8129.
- 4) T. Murakami et al. : Depth-Dependent Compressive Behaviors of Articular Cartilage and Chondrocytes, Biomechanics at Micro-and Nanoscale Levels, IV (2007) 36.
- 5) T. Yamaguchi, R. Sato and Y. Sawae: Propagation of Fatigue Cracks in Friction of Brittle Hydrogels, Gels, 4, 2 (2018) 53.
- 6) 吉田・鎗光・澤江:ハイドロゲルの階層化が摩擦特性に及ぼす影響, 日本機械学会 2023 年度年次大会予稿集 (2023).