

# 生体模擬環境における高含水高分子ハイドロゲルの摩擦の滑り速度依存性

## Study on velocity-dependent frictional behavior of highly hydrated hydrogel in quasi-biological environment

九州大・工（学）\*原 和世 九州大・工（学）新盛 弘法 九州大（正）森田 健敬

九州大・工（正）澤江 義則

Kazuyo Hara\*, Hironori Shinmori\*, Takehiro Morita\*, Yoshinori Sawae\*

\*Kyushu University

### 1. 緒言

生体関節は厳しいトライボロジー条件下において、優れた性能を誇る。歩行時は体重の数倍の荷重を支えながら、摩擦係数 0.001 程度の超低摩擦を示し、なおかつその機能を約 80 年以上維持する耐摩耗を有する。生体関節は関節表面を関節軟骨組織で覆われており、これにより優れた潤滑機能や広い可動域といった種々の特性を実現している。実際に豚の生体軟骨を用いた摩擦試験を行った結果、軟骨組織の構造が摩擦特性に大きく寄与していることが示唆された<sup>(1)</sup>。加えて、関節の周りを満たしている関節液に含まれるタンパク質やヒアルロン酸などの生体高分子も、潤滑に大きな影響を及ぼすことが示されている<sup>(1)</sup>。このように、生体関節の潤滑は、軟骨組織の構造や関節液成分の影響などの複数の因子がかかわっており、非常に複雑である。本研究では、関節潤滑の支配因子を解明することを目的に、軟骨と同じ高含水ソフトマターである高分子ハイドロゲルを軟骨モデルとして使用する。これにより、軟骨組織の持つ含水性と柔軟性によりもたらされる、滑り速度に依存した特徴的な摩擦挙動を再現する<sup>(2)</sup>。また、関節液に含まれる各成分を、潤滑液として用いるリン酸緩衝生理食塩水中に添加し、関節内の生体環境を模擬する。その上で、摩擦係数と滑り速度の関係に焦点を当てながら、それぞれの関節液成分が軟骨モデルの摩擦に及ぼす影響を調査した。

### 2. 試験材料および実験方法

軟骨モデルの柔軟性と含水性の摩擦への影響を評価するために ball-on-plate 型往復摩擦試験を行い、試験溶液中で軟骨モデルとガラスレンズの間の動摩擦係数を測定した。軟骨モデルとして、関節軟骨に近い柔軟性と含水性を持つポリビニルアルコール（Polyvinyl alcohol, PVA）ハイドロゲルを用いた。PVA ハイドロゲルは架橋剤を使用せず、水素結合を利用した物理架橋ゲルであることから、生体適合性にも優れている。PVA ハイドロゲルを 20 mm×50 mm に切り出し、ポリカーボネート板に瞬間接着剤で貼り付けて試験片を作成した。ゲルの厚みは 2 mm のものを用意した。ガラスレンズは曲率半径が 50 mm のものを使用した。レンズの材質はホウケイ酸塩クラウン光学ガラス(BK7)である。試験条件は Table 1 に示す。ハイドロゲル特有の摩擦-速度依存性を確認するために、1~100 mm/s の 3 桁に及ぶ広い範囲で速度を変化させた。

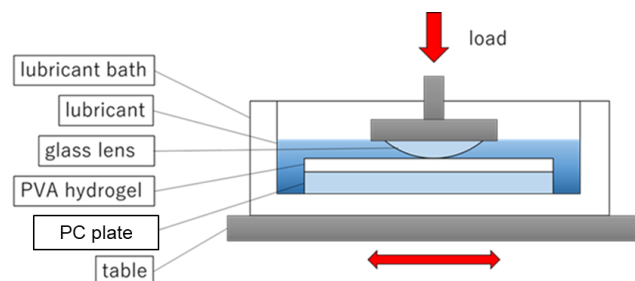


Fig. 2 Schematic of test equipment

Table 1 Test conditions

Load	500 g
Velocity	1,5,10,20,40,60,80,100 mm/s
Cycle	500 回（試験機の性能上 1 mm/s のみ 200 回）
Stroke	25 mm

試験溶液には、PBS（リン酸緩衝生理食塩水）に 2 種類のタンパク質（アルブミン：1.4 wt%， $\gamma$ -グロブリン：0.7 wt%）、ヒアルロン酸(HA, 0.5 wt%)、リン脂質（DPPC, 0.01 wt%）を添加したもの、比較のために精製水を用いた。各試験溶液、各試験条件ごとに、摩擦試験を 4 回実施した。また、摩擦試験後の PVA ハイドロゲルは FT-IR 分析装置で表面の分析を行った。

### 3. 実験結果

往復摩擦試験の結果を Fig. 3, 4 に示す。Figure 3, 4 はサイクル数毎の摩擦挙動の推移であり、各条件の代表値をプロットした。Figure 3 より、低速域（1 mm/s）において、タンパク質溶液中では摩擦係数が徐々に増加し、リン脂質溶液中では徐々に減少した。高速域（80 mm/s）である Figure 4 から、どの溶液においても試験開始直後から定常状態となっていた。

Figure 5 は、各潤滑液中での摩擦係数と、滑り速度の関係を示す。摩擦係数が定常となった後半 100 cycle(1 mm/s のみ 50 cycle)の平均値を各試験での実験値とし、4 回の平均値をプロットした。エラーバーは 4 回の標準偏差である。絶対値に差はあるものの、どの潤滑液でもハイドロゲル特有の摩擦挙動が確認された。

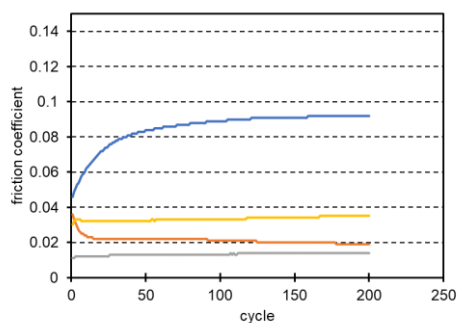


Fig. 3 The transition of friction coefficient (1 mm/s)

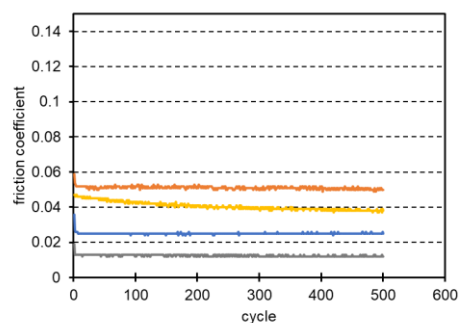


Fig. 4 The transition of friction coefficient (80 mm/s)

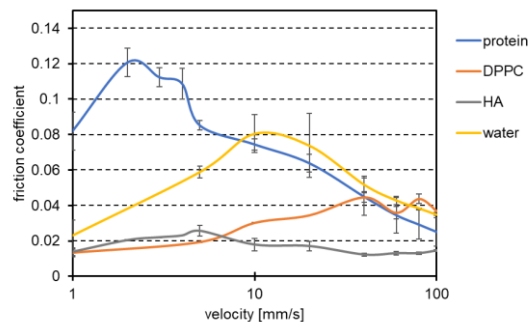


Fig. 5 The comparison of the average value of friction coefficient

## 4. 考察

### 4.1 ヒアルロン酸の影響

HA は、溶液中で増粘剤として作用することが確認されている。ハイドロゲル特有の摩擦挙動における摩擦係数が極大値をとる速度（遷移速度）は、溶液の粘度とハイドロゲルの弾性率に依存すると言われている<sup>(1)</sup>。また、HA はゲル表面と相手面との間に入り込み、HA を介しての接触割合が増加することによって、摩擦を低減させる効果もある<sup>(3)</sup>。以上より、HA を添加することにより、実験結果のような摩擦の低減および遷移速度のシフトが発現したと考える。

### 4.2 タンパク質の影響

タンパク質溶液中では精製水中と比較して、低速度域において摩擦が大きく増大する傾向がみられた。Figure 3 から、低速度域でのタンパク質溶液中の試験において、摩擦係数は試験時間が進むとともに摩擦係数が上昇していることがわかる。また、FT-IR 分析結果からタンパク質が摩擦を受けて PVA ハイドロゲルの表面に吸着していることが確認された。一方で、高速度域においては、摩擦係数は試験開始直後から定常であった (Figure. 4)。以上のことから、遷移速度を境に、低速側ではゲル表面へタンパク質が吸着することで摩擦が増大し、高速側では速度増加とともにタンパク質の効果が限定的になったと推定される。

### 4.3 リン脂質の影響

リン脂質溶液中では、精製水中と比較して、特に低速域において摩擦係数が低減していた。Figure 3 から、リン脂質溶液中での試験においては、摩擦係数は試験時間が進むとともに徐々に摩擦係数が下降していることがわかる。このことから、リン脂質が徐々に摩擦界面に吸着膜を形成しているということが推測される。そして、リン脂質は両親媒性であることから、最表層においては親水基が露出していると考えられ、親水基による水和層が摩擦を低減させたと考えられる。

## 5. 結言

含水性と柔軟性を有する軟骨組織の生体環境下における摩擦に対する、関節液成分の影響を調べるため、PVA ハイドロゲルを軟骨モデルとして関節液成分を含む溶液中で ball-on-plate 型往復摩擦試験を行った。その結果、高含水ソフトマター特有の速度に依存した摩擦挙動が観測され、各速度域において各関節液成分の働きが異なることが明らかとなった。

## 文献

- (1) T. Murakami et al., Friction 1(2), (2013), pp.150-162
- (2) J.P.Gong, Soft Matter, 2 (2006), pp. 544-552
- (3) Y. Nakano et al., Macromolecules 44(22), pp. 8908-8915