

# ハイドロゲル軟骨モデルの摩擦特性に対する生体模擬環境の影響の解明

## Elucidation of the Effect of Biological Simulated Environment on the Frictional Properties of Hydrogel Cartilage Model

九州大・工（学）\*新盛 弘法，九州大・工（学）柿谷 有香，九州大（正）森田 健敬，九州大（正）澤江 義則

Hironori SHINMORI\*, Yuka Kakitani\*, Takehiro MORITA\* and Yoshinori SAWAE\*

\* Kyushu University

### 1. 緒言

生物の機能・特性に着目したバイオミメティクスにおいて、生体の関節組織は潤滑性、耐久性の面で広く研究されている。動きの滑らかさとして、その摩擦係数は0.001-0.03程度でありながら、歩行時等には体重の3倍以上の荷重を支える支持能力も有する<sup>(1)</sup>。そしてこれらの機能を、健康な状態であれば、メンテナンスフリーで80年以上も維持する。この驚くべき特性は、表面を覆っている関節軟骨の潤滑性能と関節内を満たしている関節液に由来する。現在、この生体関節の特性を人工材料で再現する試みが盛んにおこなわれている。既に超高分子量ポリエチレンと耐食性金属合金またはセラミックスの組み合わせを用いた人工関節が、重度の関節疾患の治療法として実用化されている。しかしながら、関節液内の生体高分子がトリガーとなるポリエチレンの摩耗および物性の違いに起因する可動域の制限が課題として残っており、実際に使用する患者の運動機能回復のためには、更なる改良が求められている。人工関節と生体関節の大きな違いとして、軟骨組織の有無が挙げられる。そこで、生体の軟骨組織と近い物性・特性を有する高含水高分子ハイドロゲルが、人工軟骨材料の候補として研究されている。通常の機械材料と異なり、ハイドロゲルは特徴的な摩擦・速度依存性を示すことが報告されている<sup>(2)</sup>。これはハイドロゲル表面の分子鎖の脱吸着作用に由来する。また、ハイドロゲルの1種であるポリビニルアルコール（polyvinyl alcohol, PVA）ハイドロゲルを用いて、生体模擬環境での摩擦特性の評価も行われており、生体高分子が摩擦挙動に大きく寄与することが報告されている<sup>(3)</sup>。上記のように様々な特性を示すハイドロゲルであるが、生体高分子による速度依存性を持ったハイドロゲルの摩擦への影響を包括的に評価した研究は未だ少ない。そこで本研究では、軟骨組織をハイドロゲルでモデル化し、ハイドロゲル特有の速度依存性を考慮した上で、潤滑液に含まれる成分が摩擦挙動に及ぼす影響を調査した。

### 2. 実験方法

本研究では回転式レオメータ（MCR 302 WESP, T-PTD 200, Anton Paar）を用いて、ボール・オン・プレート形式にて摩擦測定を行った。本装置は、シャフト先端に取り付けられたボールに対し、3枚のプレートが回転軸に対して45°方向から接触・荷重支持する構造となっている（Fig.1）。これにより、レオメータ本来の広い回転速度域を活かしつつ、点接触での摩擦測定が可能となる。試験条件は、プレートにかかる垂直荷重を1, 5, 10 N、温度を25°Cとした。滑り速度は10<sup>-5</sup> ~ 1000 mm/sの範囲で段階的に増加させ、速度変化による摩擦挙動の変化を測定した。試験片にはプレート側にPVAハイドロゲル（12\*6\*2 mm）を、ボール側にガラス球（φ12.7 mm）を用いた。ハイドロゲルは外力に応じて内部の水の移動が発生するが、接触点が移動しないため、一定時間経過で定常状態になると考えられる。そのため、摩擦試験前に1時間の予負荷を与え、内部の水による摩擦への影響を可能な限り排除した。潤滑液には、リン酸緩衝生理食塩水（PBS）に2種類のタンパク質（アルブミン：1.4 wt%，γ-グロブリン：0.7 wt%），ヒアルロン酸（HA, 0.5 wt%）をそれぞれ溶解させたものを用いた。

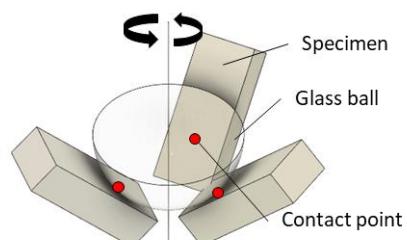


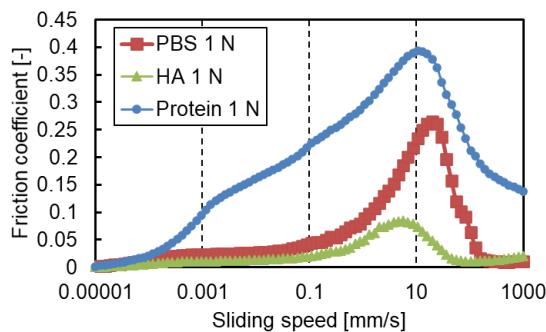
Fig.1 schematic of contact geometry

### 3. 結果

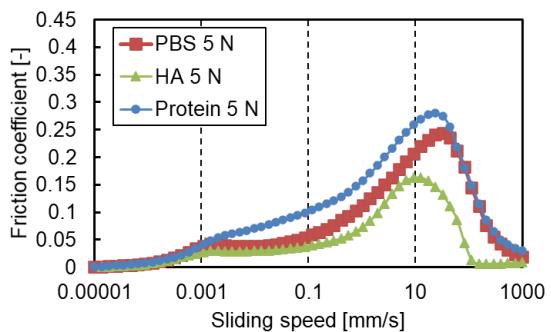
実験結果をFig.2に示す。結果は横軸を速度（対数表示）、縦軸に摩擦係数をプロットしている。まず、どの条件においても、ある速度（遷移速度）において摩擦係数の極大値が確認された。PBSを基準に比較すると、Proteinは摩擦係数の上昇が確認された。特に遷移速度より低速側で明らかな摩擦挙動の違いを示した。一方で、HAは逆にどの速度域でも低い摩擦係数を示した。他の潤滑液と比べ、HAは遷移速度がより低速側で観察された。また、高速度域において、HAとPBSの摩擦挙動が一致する領域も確認された。荷重に着目すると、1Nでは溶液ごとの摩擦挙動に明

確な差が見られた。しかしながら、荷重が増加するごとに PBS に近い挙動を他の溶液も示すようになった。

a)



b)



c)

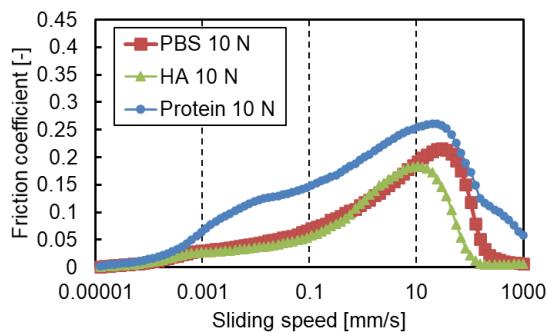


Fig. 2 Transition of friction coefficient function by sliding speed. a) 1 N, b) 5 N and c) 10 N.

#### 4. 考察

まず摩擦のピークに関して考察する。Gong らにより、ハイドロゲルは極大値を示す遷移速度を有することが報告されている<sup>(2)</sup>。この遷移速度は、ハイドロゲルの弾性率と溶媒の粘度で定義することが可能である。本実験では、用いたハイドロゲル自体は同じである。このことより、遷移速度はハイドロゲルだけでなく、潤滑液の影響も受けることは明らかである。そして、PBS に比べ HA の遷移速度が低速側にシフトしたことは、遷移速度の定義式より、溶液の粘度増加に由来していると言える。

一方で、Protein は遷移速度のシフトはヒアルロン酸よりも顕著ではなかったが、遷移速度より低い領域で高い摩擦係数を示した。この領域では、ハイドロゲルの摩擦は最表面の高分子鎖が相手面へ脱吸着する際のエネルギー消散に由来する<sup>(2)</sup>。人工関節に使われている UHMWPE は、タンパク質が表面に凝着することにより摩擦・摩耗が増加することが報告されている<sup>(4)</sup>。そのため、タンパク質がハイドロゲル表面に凝着することで、結果的にハイドロゲルとガラスの吸着を促進し、摩擦の増加につながったと言える。

遷移速度を超えた高速度域において、遷移領域を経た後、再び線形に摩擦係数が上昇する傾向が確認された。この領域は、速度増加とともに摩擦係数が増加することから、流体潤滑域であると考えられる。流体潤滑域では、表面の影響はほとんどなく、潤滑液の粘性抵抗に摩擦は依存する。そのため、潤滑液の成分に依存せずに、近しい摩擦挙動を示したと考える。また、成分による違いは、流体潤滑に移行する速度として現れたと言える。実際に、粘度が最も高い HA は低速側で流体潤滑に移行していることが観測できた。

#### 5. 結言

本研究では、回転式レオメータを用いて、広い速度域でのハイドロゲルの摩擦挙動に対する生体高分子の影響を調査した。結果として、遷移速度を境に、低速側では生体高分子の影響が顕著に観察された。これはハイドロゲルと相手面であるガラス間の吸着挙動を生体高分子が変化させたからだと考えられる。一方で、高速側では成分によらず、ほぼ近しい挙動を確認できた。

#### 文献

- 1) J.P.Paul, Vol. 192, No.1107(1976), pp.163-72.
- 2) J.P.Gong, Soft Matter, Vol. 2, No.7(2006), pp.544-552.
- 3) K.Nakashima et al., Tribology International, 40(2007), pp.1423-1427.
- 4) H. Shinmori et al., Tribology Online, 15. 4 (2020) 283-292