

2種の蛋白質からなる吸着膜の摩擦と脱吸着挙動の評価

Evaluation of friction and adsorption/desorption behavior of adsorbed film composed of 2 types of protein

東洋大（学生）鐘 方成 東洋大（正）中嶋 和弘

Fangcheng Zhong, Kazuhiro Nakashima

Toyo University, Toyo University

1. 背景と目的

人工関節の寿命を延長するために、これまで超高分子量ポリエチレン(UHMWPE)の強化が検討されている。しかし、しうう動によってポリエチレンの摩耗が発生し、未だUHMWPEの摩耗の問題は解決されていない。これまでに、人体に含まれる蛋白質を利用してことで、摩擦界面に適合した蛋白質膜を形成させ、二つの摩擦面が直接接触することを防ぎ、摩耗低減の効果が期待できることが報告されている^{1,2)}。吸着膜は、境界層として摩擦・摩耗特性に重要な役割を果たしている。本研究では、蛋白質吸着膜の摩擦・摩耗の低減に注目している。

本研究では、摩擦環境における蛋白質の脱吸着挙動や摩擦、摩擦係数を測定することにより、蛋白質吸着膜の摩擦特性について検討する。これらの結果と蛋白質膜の摩擦のメカニズムとの関係を解明することによって、人工関節の寿命を延ばすことを最終的な研究目的としている。

2. 実験方法

実験では、Figure 1に示す往復動トライボメーターを使い、蛋白質溶液中の人工関節材料の摩擦を測定した。上部試験編としてGUR1050グレードのUHMWPEピン、下部試験片としてCoCrMo合金平板(ASTMF 75グレード)の組み合わせで摩擦試験を行った。蛋白質としてアルブミン(bovine serum albumin, BSA, 和光純薬工業製)、と γ -グロブリン(bovine γ -globulin, BGG, MPBiomedicals製)を用いた。また、蛋白質の脱吸着挙動を測定するために電気化学アナライザーを用いた。参照電極を蛋白質溶液、試験片と繋ぎ、試験片と蛋白質溶液の間のポテンシャルを測定した。摩擦中、界面にある蛋白質が脱落する場合、一部の電子も表面から失い、ポテンシャルが減少する。溶液中の蛋白質が表面に吸着する場合、表面が電子を得て、ポテンシャルが増加する。以上のことにより、ポテンシャルを測定することで蛋白質の脱吸着挙動をリアルタイムで評価できる。摩擦終了時と開始時のポテンシャルの差を Δ ポテンシャルとし、蛋白質の脱吸着の指標とした。正の Δ ポテンシャルは蛋白質の吸着を、負は脱落を表す。

蛋白質の影響を評価するため、溶液に添加する蛋白質の濃度を変化させた。Table 1に蛋白質溶液の濃度と組成を示す。BSAとBGGの比をAG ratioとした。

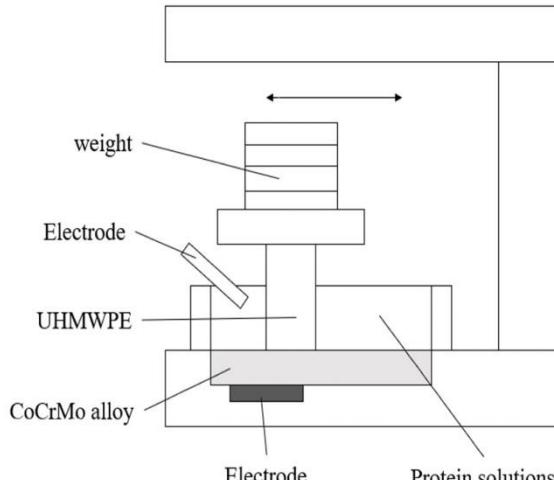


Fig.1 Reciprocating tribometer with electrochemical cell

Table 1 Composition of the protein solution

solution type	BSA (mass%)	BGG (mass%)	AG ratio
A	0.7	0	-
B	0	0.7	-
C	0.7	1.4	1/2
D	1, 4	1.4	1/1
E	1.4	0.7	2/1

3. 結果と考察

Figure 2 に Δ ポテンシャルと摩擦開始直後の摩擦係数について示す。滑り距離の増加による摩擦係数の変化は小さく、蛋白質膜の摩擦抵抗は安定していることが観察されたため、摩擦開始時の摩擦係数を用いて摩擦係数を評価した。単一の蛋白質からなる溶液 A、溶液 B と AG 比 1/2 の溶液 C での摩擦係数は溶液 D、E と比べて低く、摩耗を減少させる効果が認められた。それに対して溶液 D、溶液 E では、摩擦係数が高く、摩擦低減に対する効果が小さいことが示された。以上のことにより、蛋白質の種類、濃度、BSA と BGG の比により形成した蛋白質膜の特性が異なることが認められた。

摩擦係数を決める直接的な要因は接触圧力ではなく、蛋白質吸着膜の特性であることが指摘されている¹⁻³⁾。

本実験では、 Δ ポテンシャルの負の領域で Δ ポテンシャルと摩擦係数との間に 2 種類の関連性が見られた(Fig. 2)。負の領域の Δ ポテンシャルの減少量は CoCrMo 合金平板表面からの蛋白質分子の脱落量に比例する。Figure 2 の赤枠で示した部分は緑枠部分と比べて蛋白質分子の脱落量が多いが摩擦係数は低くなっている。このことから赤枠では蛋白質分子が摩擦刺激により容易に表面から脱落する状態であることがわかる。言い換えると、赤枠の領域では蛋白質分子の滑りが発生し摩擦を低くする効果が発現していることがわかる。この効果は蛋白質が単体又は AG 比が 1/2 の潤滑易条件で発現している。このことはこれまでに報告されている BSA と BGG がラメラ構造を呈した場合に摩擦摩耗が低減するという結果^{1, 2)}に一致する。一方、緑枠の領域では蛋白質の脱落量が赤枠の領域に比べて少ないが、摩擦が高いことを示した。この領域では蛋白質の脱落が発生しにくく、蛋白質吸着膜の滑りが発生しにくいため摩擦が大きいと考えられる。これまでに報告されているヘテロ構造を呈した吸着膜¹⁾が形成されたと考えられる。本実験結果から AG 比が 1 以上の潤滑液条件ではヘテロ構造が掲載されやすいと考えられる。しかし、AG 比が 1 未満の条件においても蛋白質吸着膜の滑りが発生しにくい場合があることから、蛋白質吸着膜の構造を決定する要因は AG 比だけではないと考えられる。

4. 結論

本研究は CoCrMo 合金と UHMWPE ピンの間で行った摩擦試験において、形成した蛋白質膜の摩擦係数に対して蛋白質の濃度/種類、 Δ ポテンシャルの影響を調べた。さらに、摩擦により合金平板の表面に吸着した蛋白質膜の構造を評価した。その結果で以下の結論を得た。

- ・形成した蛋白質膜の摩擦係数は溶液に含まれる蛋白質の添加比(AG 比)に依存する。また、摩擦を低減する支配的な要素は蛋白質分子の滑りであることが示された。
- ・BSA と BGG を両方添加し、形成された蛋白質膜が層状の場合、摩擦低減の効果があることが示された。

文献

- 1) K. Nakashima, Y. Sawae, T. Murakami, Study on Wear Reduction Mechanisms of Artificial Cartilage by Synergistic Protein Boundary Film Formation, JSME International Journal, Vol. 48, No. 4, (2005), pp. 555-561.
- 2) 中嶋和弘, 人工関節への応用を想定した人工軟骨材料の生体関節液成分による摩擦低減策について, 帝京大学福岡医療技術学部紀要, 第 15 号, (2020), pp. 1-13.
- 3) D. Nečas、Y. Sawae, et. al., The Influence of Proteins and Speed on Friction and Adsorption of Metal/UHMWPE Contact Pair, Biotribology, Vol. 11, (2017), pp. 51-59 .

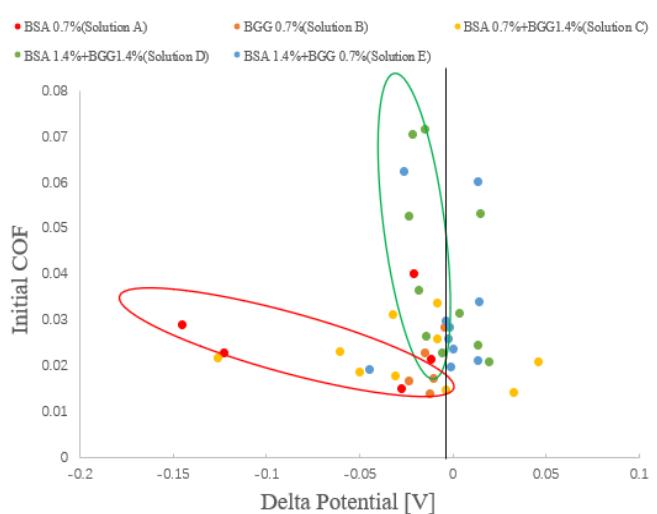


Fig. 2 - Δ potential and friction coefficient