

## 滑り摩擦測定装置を用いた高分子板上における ムチン懸濁液の潤滑特性の評価

田中 孝国<sup>1\*</sup>, 小川 知輝<sup>1</sup>, 酒井 洋<sup>1</sup>, 大岡 久子<sup>2</sup>, 桑原 敬司<sup>3</sup>, 那須 裕規<sup>4</sup>

<sup>1</sup>小山工業高等専門学校 物質工学科 (〒323-0806 小山市中久喜 771)

\*tanakatakuni@oyama-ct.ac.jp

<sup>2</sup>群馬工業高等専門学校 物質工学科 (〒371-8530 群馬県前橋市鳥羽町 580)

<sup>3</sup>長岡技術科学大学 生物機能工学専攻 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

<sup>4</sup>小山工業高等専門学校 機械工学科 (〒323-0806 小山市中久喜 771)

## Evaluation of the lubricating ability of a mucin suspension on a polymer board using a sliding friction-measuring apparatus

Takakuni TANAKA, Tomoki OGAWA, Hiroshi SAKAI, Hisako OOKA,

Takashi KUWAHARA and Yuki NASU

National Institute of Technology, Oyama College

(771 Nakakuki, Oyama City, Tochigi Prefecture 323-0806, JAPAN)

National Institute of Technology, Gunma College

(580 Toriba, Maebashi, Gunma, 371-8530 Japan)

Nagaoka University of Technology, Department of Bioengineering

(1603-1 Kamitomioka, Nagaoka, Niigata 940-2188, JAPAN)

(Received March 29, 2022; Accepted May 9, 2022)

Mucins are glycoproteins present in almost all animals and many microbes as the main component of mucus. Mucins play a role in friction reduction, impact resistance, and defense against the invasion of pathogens into epithelial cells. The sliding friction of rubber-covered nitrile butadiene was measured as an experimental model for evaluating the friction properties of a mucin suspension. Their starting friction coefficients were obtained by using a simple inclination method with an inclined board made of various polymer boards (acrylic, polyethylene board, polystyrene, polyethylene terephthalate, polycarbonate board, polyvinyl alcohol, polypropylene), where the friction coefficient was defined by the angle at which nitrile butadiene rubber began to slide down. The influence of setting polymer board materials on friction property was also evaluated. The obtained data were treated statistically. Marked differences in friction were found depending on the concentration of mucin suspension. By measuring the contact angle, the addition of wet properties to the surface of polymers was shown in the mucin suspension like an example of metals.

Key words: mucin / friction / viscosity / inclination method / polymer board

## 1. 背景

人間は体内で、唾液、関節間液、涙腺液、気道壁粘液、消化管壁粘液などの粘液を多数分泌しており、生体内で摩擦低減を行っている [1]。生体内の粘液に含まれる主要な構成成分として、糖タンパク質ムチンが知られている。本論文では糖タンパク質ムチンの摩擦低減効果について試験研究を実施している。ムチンは、生体内では上皮細胞から分泌されており、上皮細胞の境界面において、摩擦低減効果だけではなく保湿などの役割を果たしていることが知られている [2]。我々のこれまでの研究により、ムチン濃度 10~50 g/L のムチン懸濁液を金属板間に塗布することで、潤滑能の向上に寄与すること、接触角による測定により、ムチンを塗布された金属板は濡れ特性が付与されることが判明した[3]。本報ではムチンの潤滑能を更に評価するために前報同様に、海野の報告[4]を基に作製した簡易実験装置により、静摩擦係数の測定を行うことで、高分子板間で働くムチン懸濁液のおよぼす潤滑能(摩擦低減効果)の評価を試みた。同時に、ムチン懸濁液を滴下した高分子板上の接触角を測定し、ムチン懸濁液の及ぼす濡れ特性の付与についても評価を行った。

## 2. 実験

### 2-1 手動静摩擦係数測定装置について

前報より、斜面上の物体が滑り始める際の斜面角度  $\alpha$  の測定を行い、静摩擦係数を算出する手法により、ムチンの潤滑能の把握が可能であることが判明している [3]。本実験でも前報で作製した手動静摩擦係数測定装置を使用した[3]。この装置は、取り付けられた滑車 b によってワイヤーを手動で巻き取り、平板を傾斜させていくことで、傾斜板上に設置したニトリルゴム a の滑り始めの角度をデジタル角度計 c により測定することで、斜面角度  $\alpha$  を測定し、前報と同様に静摩擦係数を求めた [3]。

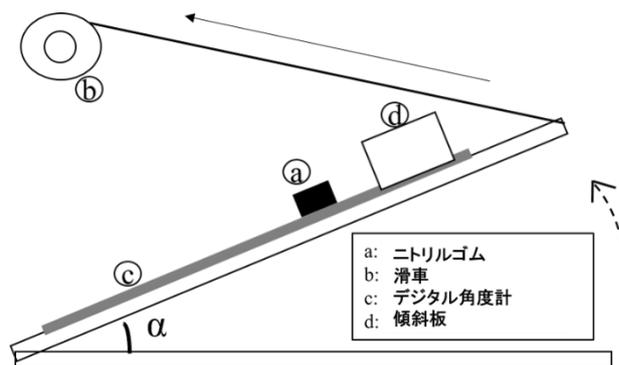


図1 手動静摩擦係数測定装置 [3]

### 2-2 物体間の静摩擦係数測定

傾斜板は銅板、アクリル板、ポリエチレン板(PE)、ポリスチレン板(PS)、ポリエチレンテレフタレート板(PET)、ポリカーボネート板(PC)、ポリビニルアルコール板(PVC)、ポリプロピレン板(PP)を使用した。銅板は金属板であるが、前報と同様に実験が行われるか確認するために実施した。また、これらの板は実験装置上に設置するために、縦 150~170[mm]、横 140~160[mm]の大きさに調節した。使用した傾斜板は、実験前に銅板はアセトンで脱脂処理、それ以外の傾斜板はエタノールで表面を拭いた。尚、本研究で用いた各高分子板は市販された状態のまま用いており、表面粗さなどについては調整していない。それぞれの傾斜板上を滑らせるモデルとして、前報同様に、100[mm]×7[mm]×4[mm]のサイズのニトリルゴムを用いた[3]。ニトリルゴムと傾斜板の間には空気、水、ムチン懸濁液(10,50,100g/L)を塗布し、各条件の傾斜角  $\alpha$  を 100 回測定した。実験開始時、ニトリルゴムの縦 100[mm]、横 7[mm]の面を懸濁液に付着させた。付着後は一度ニトリルゴムを垂直にして、余分に付着した液体を除去した。実験装置上の傾斜板に付着させたニトリルゴムを置き、斜面を傾斜させることで滑り始めの傾斜角  $\alpha$  を測定した。ムチンはムチン豚胃由来 (Sigma-aldrich M2378, Mucin from porcine stomach type II)を使用した。その後、大きく外れた値を除き階級値ごとに分け、その平均角度から静摩擦係数を算出した。前報同様に、実験室温は 25±2 [°C]、相対湿度は 50±10 [%]で行った[3]。

### 2-4 高分子板上に滴下した水滴の接触角測定

接触角の測定は傾斜板として使用した銅板, アクリル板, PE板, PS板, PET板, PC板, PVC板, PP板に水及び各濃度のムチン懸濁液を 2 [μL] 滴下し, それぞれ測定を行った。接触角の測定は, 接触角計 (アイリス株式会社製) を使用した。表面粗さは表面粗さ測定機 (株式会社東京精密製) を用い, まず開封時に粗さの測定を実施した。その結果を表 1 にまとめた。PE板のみ高い値を示した。尚, 銅板は前報[3]と同時購入した同規格の別製品であるため, 値が異なっている。

表 1 金属板の表面粗さ (開封時)

|       | 表面粗さ<br>(算術的平均粗さ Ra [μm]) |
|-------|---------------------------|
| 銅板    | 0.06                      |
| アクリル板 | 0.05                      |
| PE板   | 2.80                      |
| PS板   | 0.22                      |
| PET板  | 0.15                      |
| PC板   | 0.03                      |
| PVC板  | 0.10                      |
| PP板   | 0.34                      |

## 3. 実験結果および考察

### 3-1 静摩擦係数の評価

図 2 は滑らせモデルと傾斜板間に空気, 水, ムチン懸濁液(10g/L) を塗布した場合における静摩擦係数を各傾斜板の種類ごとに比較したグラフである。このグラフより, 静摩擦係数が全般的に低い値を示すのは空気の条件であることが判明した。この理由は, Cohen らのナイロン板を用いた研究により報告されている現象であることが考えられた。水が表面内部に浸透したことで, 空気条件よりも接触している面積が増え, 静摩擦係数の上昇を示したことが考えられた。Cohen らによれば, 水を挟むと静摩擦係数が 1.5 倍になったとしている[5]。表面粗さの違いにおける差は見られなかったが, この現象は前報のニトリルゴムとチ

タン板でも見られたが, 今回はニトリルゴムと板の両方が高分子素材であったことから, この現象が顕著に示されたと考えられた。ムチン懸濁液と水を比較すると, 全ての板でムチン懸濁液の静摩擦係数低減効果が確認できた。その理由としては, 金属板の時と同様に, 境界潤滑状態が付与されたことが示唆される。境界潤滑状態は, 物体同士が一部接触しているが, 官能基を持つ流体分子が表面に吸着あるいは反応, 塗布されることで膜が形成されているため, 摩擦係数の大幅な低減効果が望める[6]。本研究で使用したムチンはヒドロキシ基(OH 基)を持つため, 高分子板表面とのファンデルワールス力による物理吸着膜が生成し, 結果として境界潤滑を示したことが考えられた。

尚, 図 2 で銅はムチン(10g/L)の値の方が 0.1 程度低い値を示していたが, 銅は前報告も同様の現象を示しており, ムチン懸濁液の静摩擦係数減少効果が示されたことが考えられた。アクリル板については不明である。

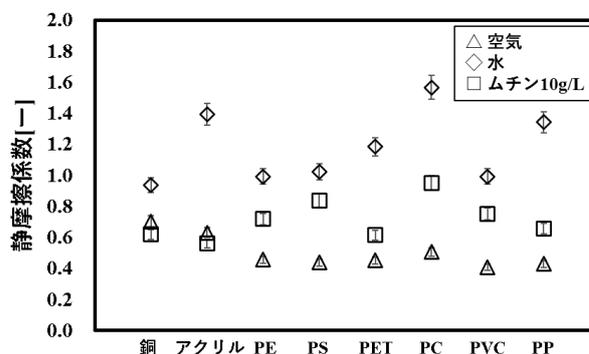


図 2 各傾斜板の静摩擦係数 (Sample 数=100)

続いて, ムチン懸濁液 10,50,100 [g/L]について, ニトリルゴムと高分子板間におけるムチン懸濁液の潤滑能への影響を調査した。図 3 より, ムチン懸濁液濃度を上昇させるにつれて静摩擦係数の減少傾向が見られた。ムチン濃度 100 [g/L]の静摩擦係数は 0.4-0.5 を示し, 図 2 の空気とほぼ同等の値となることが判明した。金属板の時に見られた懸濁液中のムチンの凝集作用による境界潤滑状態から流体潤滑状態へ変化(ムチンの濃度が上昇すると静摩擦係数の変化量が少なくなる)は見られなかったことから, 高分

子板では境界潤滑のままであることが示唆された。以上の結果から、ムチン懸濁液の潤滑能は、濃度上昇に伴い向上することが示された。尚、この実験結果からも表面粗さの違いによる差は見られなかった。

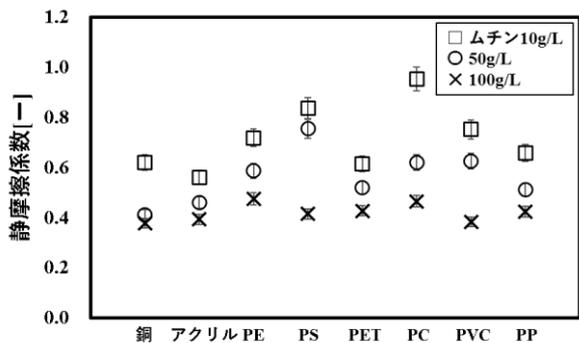


図3 濃度変化時の各傾斜板の静摩擦係数 (Sample 数=100)

### 3-2 接触角の評価

図4は、水およびムチン懸濁液を滴下した時の接触角をプロットしたグラフである。傾斜板にムチン懸濁液を滴下した際の接触角は、ムチン濃度が上昇すると接触角も上昇傾向を示し、水を滴下した際に比べて 9~38[°] 減少した。このことからムチン懸濁液は傾斜板への吸着が行われ、水よりも強い濡れ特性を高分子板に付与することが示唆された。本結果においても、表面粗さの違いにおける差は見られなかった

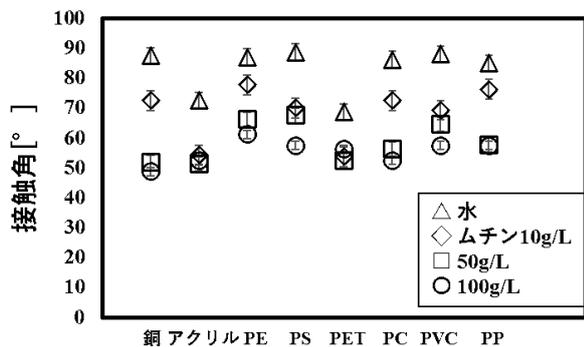


図4 高分子板に滴下した水滴の接触角 (Sample 数=4)

## 4. まとめ

本研究では、ムチン懸濁液がニトリルゴムと高分子板の間におよぼす潤滑効果について評価を実施した。その結果、ムチン懸濁液は水よりも潤滑能を示すことと、高分子板へ濡れ特性を付与することが判明した。

## 謝辞

本研究は、JSPS 科研費 20K04250 の助成を受けて実施されています。

## 参考文献

- [1] 長谷耕二, 大野博司: 粘膜免疫系の最前線における上皮細胞の生体防御機構, 日本臨床免疫学会誌, Vol. 29, No. 1, pp.16-26 (2006)
- [2] Shi,Lei : Biomimetic Surfaces of Biomaterials Using Mucin-Type Glycoproteins, Trends in Glycotechnology, Vol.12, No. 66, pp. 229-239 (2000)
- [3] 田中孝国 他: 滑り摩擦測定装置によるムチン懸濁液の潤滑能評価, 技術・教育研究論文誌, Vol.28, No.1, pp. 37-42 (2021.06)
- [4] 海野都久子: どじょう生体面の滑り摩擦測定-粘液層を伴う柔らかい生体面のモデルとして-, トライボロジスト, Vol. 46, No. 2, pp.155-161 (2001)
- [5] S. C. Cohen and David Tabor : The friction and lubrication of polymers, Proceedings of the Royal Society of London, A 291, pp.186-207 (1966)
- [6] 長谷重蘭: トライボロジーの基礎, 精密工学会誌, Vol.81, No.7, pp. 643-647 (2015)
- [7] 村木正芳: トライボロジー, 日刊工業新聞社, pp. 18-21 (2012)