

床ずれ発症抑制を目的としたムチンの摩擦特性に関する基礎検討

田中 孝国^{1*}, 矢島 夏海¹, 酒井 洋¹, 高屋 朋彰¹, 大岡 久子²,
桑原 敬司³, 那須 裕規⁴

¹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

²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)

³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)

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

Basic examination of bedsore suppression using mucin

Takakuni TANAKA, Natsumi YAJIMA, Hiroshi SAKAI, Tomoaki KOUYA

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 May 12, 2021; Accepted June 14, 2021)

A pressure ulcer (bedsore) is damage to the skin and underlying tissue, primarily caused by prolonged pressure or friction on the skin. In particular, it has been pointed out that elderly people who tend to have decreased skin elasticity are prone to have pressure ulcers. This is an urgent issue in Japan's aging society; to prevent pressure ulcers, it is considered important to reduce the friction between the skin and sleepwear, maintain environmental moisture, and prevent bacterial infection in the wound. In this study, we focused on mucin, which is known as a glycoprotein, when investigating the effect of friction between clothes and skin. The skin and sleepwear environment was represented by artificial leather and cloth, and a friction test was performed using a surface property tester. The load (vertical force) applied to the shaft of the surface texture-measuring machine was set to 200 [g], the reciprocating speed was 3000 [mm/min], and the jig moving distance was 20 [mm]. One mL of water or solutions of pig stomach mucin with different concentrations was dropped on the cloth pieces, and the same measurement was performed. So far, we have improved the jig of the surface tester, measured and analyzed the static/dynamic friction coefficient to reproduce the pressure ulcer environment, and confirmed mucin's ability to reduce friction.

Key words: Mucin / friction / Pressure ulcer / artificial leather

1. 背景

寝たきりの患者は、床ずれの皮膚障害が発生しやすい。原因として、患者の多くが高齢者であるため栄養状態が悪

い、皮膚や筋肉の衰えで皮膚に弾力がなくシワやたるみがある、薬の副作用で免疫力が低くなっている、身体組織の耐久性低下の条件などにより、皮膚と寝衣との間の摩擦で床ずれが発生すると考えられている[1]。特に高齢者は、血

流障害を起こしやすいことが知られている。血流障害は、皮膚が薄くなるドライスキン状態を生じさせ強い痒みを発生させて爪で無意識に引っ掻く、または寝衣—皮膚の摩擦刺激により、非常に傷つきやすくなる等の特徴が報告されており、これらが床ずれの主な原因であると考えられている。同時に高齢者は、生体防御力が低下しているために、一度生じた床ずれの傷口から細菌感染を非常に起こしやすく、完全な治癒は極めて困難である。そのため、床ずれ防止対策の更なる検討が必要不可欠であることが指摘されている[2]。床ずれの予防において、スキンケアは重要である。特に高齢者の皮膚は弱く、骨の突出した部位は皮膚の摩擦を強く受けやすい状態になっており、予防のためのテープ(ポリウレタンフィルムドレッシング材)やすべり機能つきドレッシング材などが勧められているほか、皮膚が乾燥しないよう保湿クリームなどを塗布する対策が取られている[3]。

この床ずれに対し、臨床の場で有力視されている物質の一つがムチンと呼ばれる糖タンパク質である。ムチンは分子量が非常に大きく(例えば、豚胃粘液ムチン:890万 [4])、高頻度な α -結合型の糖鎖を有する糖タンパク質の総称であり、生体では胃粘膜、腸管粘膜等に広く存在している[5]。ムチンは粘膜の主要構成成分であり、上皮表層を覆う粘膜層を形成し、細胞外からの作用物質に対する細胞保護膜として働き、その糖鎖含量が重量にして50%を超える巨大分子量 (~2MDa) の糖タンパク質である[6]。ムチンは、セリンまたはスレオニン残基のOH基が単糖、または糖鎖の1位OH基と脱水縮合したO型糖鎖が多量かつ密に含まれている、高分子ペプチドと定義される[7]。ムチンは生体内で粘膜の保護や潤滑の役割を有するほか、ゲル形成能、水素イオン浸透遅延性、ペプシン阻害能等の生理活性を有し、胃腸の粘膜保護剤や食品乳化剤に利用される他、保湿因子としての機能も研究され、化粧品や衛生用品の素材としても注目されている[8,9]。

本研究では、床ずれ発症抑制のための材料として、生体内で潤滑作用を示しているムチンに着目した。そしてムチンを介護服へ塗布することで、床ずれの原因の1つとされる介護服と皮膚間の摩擦に対して、どのような作用を及ぼ

すかについて、実験したので報告する。

2. 実験

2-1 摩擦の評価法

摩擦力は静止摩擦力(静摩擦力)と動摩擦力に分けられ、静摩擦力と動摩擦力の式は以下の通りである。

$$\text{静摩擦} : F = \mu \times N \quad (1)$$

$$\text{動摩擦} : F' = \mu' \times N \quad (2)$$

ここでFは静摩擦力、F'は動摩擦力、 μ は静摩擦係数、 μ' は動摩擦係数、Nは垂直抗力である。静摩擦係数と動摩擦係数は接触している物質の組み合わせに依存する。本実験では摩擦係数の値に注目して両摩擦特性の評価を行った。

2-2 ムチン懸濁液の調製

実験に供するムチン懸濁液は、市販の豚の胃ムチン粉末(SIGMA-ALDRICH, M2378-100G, Mucin from porcine stomach Type II)を水に懸濁し作製した。ムチンは溶解度が低いため、懸濁状態の液体を実験に使用した。

表1 人工汗液の組成

試薬名	分量
NaCl	9.870 [g]
Potassium sulfate	0.250 [g]
Urea	1.730 [g]
Ammonia Solution	0.920 [mL]
Uric Acid	0.008 [g]
Creatinine	0.020 [g]
L(+)-Arginine hydrochloride	0.200 [g]
Glucose	0.220 [g]
Lactic acid (75%)	1.426 [mL]

本報告では、ムチン懸濁液の濃度は体積当たりのムチン重量で表しており、懸濁液における濃度単位は以後 [g/L] と表記する。本実験でのムチン懸濁液は 100, 200, 300,

400, 500, 600 [g/L] の 6 種類で準備した。同時に、汗の影響を調査する目的として、人工汗液(表 1)[10] を蒸留水 1 [L] に溶解させて調製し、水の時と同様にムチンを懸濁させ、ムチン人工汗懸濁液を作製した。濃度はムチン懸濁液と同様に 6 種類作製した。

2-3 摩擦試験に使用した素材

床ずれが発生する環境を再現するために、本研究では皮膚の代替として人工皮膚(新東科学株式会社, プロテイン PU), 床ずれ患者の寝衣として介護服(幸和製作所, 綿 100%)を採用した。人工皮膚は直径 40 [mm]に切り出し、表面性測定機専用の人工皮膚専用ホルダー(Φ50, 新東科学株式会社, HEIDON)に取り付けた。続いて、表面性測定機下部の鋼板に介護服の布片 55×70 [mm] を両面テープにより固定した。尚、介護服布片は内側の肌に触れる部分を摩擦試験に使用した。摩擦試験時には、ムチン懸濁液 3.0 [g] を介護服に塗布した。

2-4 乾燥塗布介護服の作製

乾燥状態におけるムチンの摩擦特性を評価するため、介護服にムチン懸濁液を塗布し、乾燥させた塗布乾燥介護服を作製した。2-2 で作製したムチン懸濁液 100, 200, 300, 400, 500, 600 [g/L] をそれぞれ介護服布片に 3.0 [g]量りとして塗布し、室外の風通しが良い日陰で、10~15°Cで 2 時間乾燥させた(以後、塗布乾燥介護服と表記)。

2-5 摩擦試験について

摩擦係数の測定機として、表面性測定機(新東科学株式会社, HEIDON トライボギア TYPE:18)を使用した。静/動摩擦係数の測定・解析を実施し、介護服および人工皮膚間におけるムチンの摩擦低減効果について評価した。表面性測定機の軸にかかる荷重(垂直力)を試験機の初期設定である 200 [g] に設定し、往復運動速度 3,000 [mm/min], 移動距離 20 [mm], 往復回数 100 [回] の条件で 7 回実施した。人工皮膚専用ホルダーに取り付けた人工皮膚を上部に、下部には介護服布片を鋼板に設置した。この摩擦試験中における部屋の室温は 24.7°C±2.8°C, 湿度は 53.2±1.9%であ

った。摩擦試験中は表面温度を測定し、常にムチンの失活温度とされる 40°C以下であることを確認した。摩擦試験中はポータブル型非接触温度計(オプテックス株式会社, PT-S80/U80)により表面温度を測定し、常に 40°C以下であることを確認した。尚、ムチン懸濁液の摩擦係数測定の前に、参考データとして、未塗布・水のみ・人工汗液のみ・潤滑油(KURE556)・切削油(AZ 水溶性切削オイルスプレー AZ009)の摩擦試験を実施した。

3. 結果

3-1 介護服の摩擦特性

人工皮膚—介護服間に液体を塗布させない場合(以後、未塗布介護服と表記)と塗布させた場合の静・動摩擦係数を図 1 に示した。静摩擦係数では、液体塗布無しの 0.378[-] に対し、塗布した場合は水 0.404[-], 人工汗液 0.41[-], 潤滑油 0.294[-], 切削油 0.359[-]であった。介護服に潤滑油を塗布した場合、未塗布介護服の静摩擦係数と比較し、22%の静摩擦係数減少が確認された。また、未塗布介護服の動摩擦係数 0.332[-]に対し、塗布した場合は水 0.344[-], 人工汗液 0.32[-], 潤滑油 0.215[-], 切削油 0.262[-]であった。介護服に潤滑油を塗布した場合、未塗布介護服の動摩擦係数と比較し、35%の動摩擦係数減少が確認された。

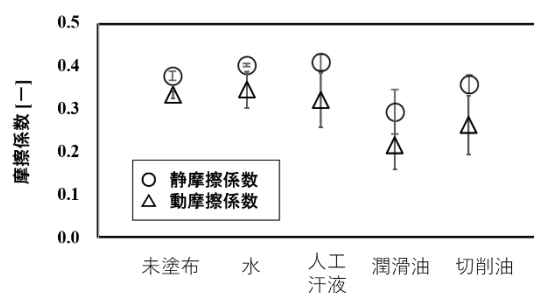


図 1 様々なサンプルの静/動摩擦係数

3-2 ムチン懸濁液塗布後の摩擦特性

図 2 は介護服にムチン懸濁液を塗布した際の静・動摩擦係数である。静摩擦係数は、ムチンの濃度 0~200[g/L] 間で増大し、300~500[g/L] 間の濃度で低減、600 [g/L] で再

び増大する傾向にあった。ムチン懸濁液は濃度 500 [g/L] において最小静摩擦係数 0.232 [-] を示し、未塗布介護服の静摩擦係数と比較し、39%の静摩擦係数減少が確認された。更に、図 1 の潤滑油 0.294 [-] や切削油 0.359 [-] よりも低くなることが判明した。動摩擦係数では、ムチンの濃度 0-300 [g/L] 間で減少し、300~500 [g/L] 間の濃度で横ばいに推移した。600 [g/L] で再びわずかに増大する傾向にあった。ムチン懸濁液は濃度 300 [g/L] において最小静摩擦係数 0.173 [-] を示し、未塗布介護服の動摩擦係数と比較し、48%の動摩擦係数減少が確認された。静摩擦係数と同様に、図 1 の潤滑油 0.215 [-]、切削油 0.262 [-] よりも低くなることが判明した。

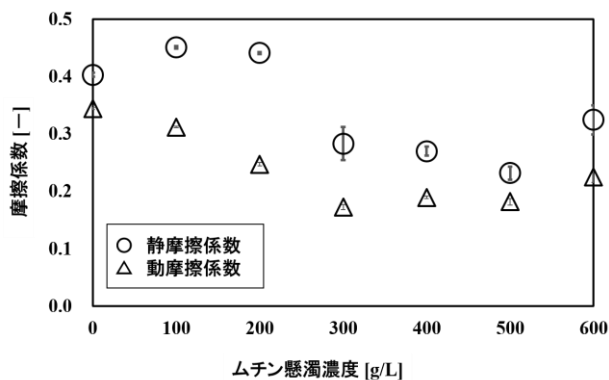


図 2 ムチン懸濁液(水)の静/動摩擦係数

各濃度の静摩擦係数は図 2 と同様の傾向を示し、ムチン濃度が 400 [g/L] が最も低い摩擦係数を示した。摩擦係数の低ピーク値が異なっていたものの、摩擦係数の減少傾向が類似していたことから、本研究では、人工汗液の成分は静摩擦係数に影響を与えないと考えた。また、動摩擦係数についても図 2 と同様の傾向を示したことから、人工汗液の成分は動摩擦係数にも影響を与えないことが判明した。

3-4 ムチン懸濁液塗布後に乾燥した場合の摩擦特性

図 4 は介護服にムチン懸濁液を塗布後、乾燥させた後に摩擦試験を実施した場合の静・動摩擦係数である。

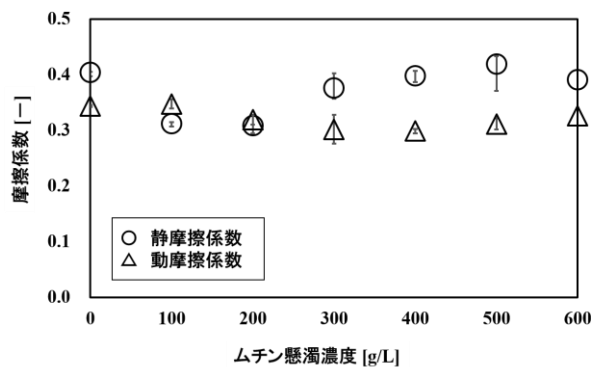


図 4 塗布乾燥介護服の静/動摩擦係数

3-3 人工汗液の影響

図 3 は介護服にムチン人工汗懸濁液を塗布した際の静・動摩擦係数である。

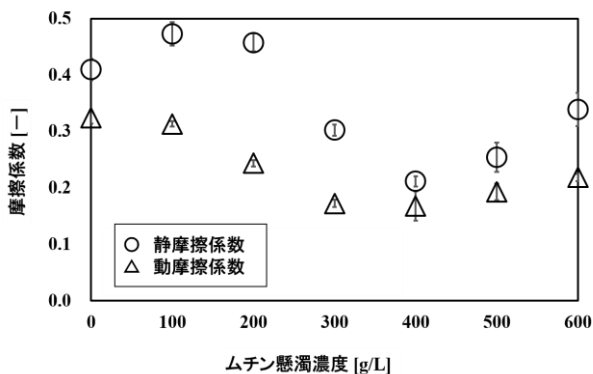


図 3 ムチン懸濁液(人工汗液)の静/動摩擦係数

100~200[g/L] 間で静摩擦係数は減少傾向を示し、濃度 200[g/L]において静摩擦係数は 0.31[-]で最小値を示した。未塗布介護服の静摩擦係数と比較すると、18%の静摩擦係数減少が確認された。また、300~600[g/L]で静摩擦係数は増加し、未塗布の人工皮膚—介護服の静摩擦係数と同様の値を示した。続いて、動摩擦係数である。各濃度において未塗布の動摩擦係数と同様の値を示した。これらの結果から、ムチンは水溶液(人工汗液)中に懸濁している状態もしくは、水分が周囲に存在する状態で、摩擦係数の減少に寄与することが明らかとなった。

4. 考察

4-1 ムチン懸濁液における静・動摩擦係数への影

響

床ずれは、皮膚と寝衣との間の摩擦で発生する[1]。特に、長期間寝たきりなどの状態で静止して圧迫された骨突出部位で生じるとされている[11]。従って、床ずれ予防には、静摩擦係数の減少に着目することが重要であると考えた。本研究で得られた静摩擦係数の結果では、湿潤状態では減少が見られたものの、乾燥状態では変化が見られなかった。従って、濃度 400~500 [g/L] のムチン懸濁液を骨突出部分に塗布しておくこと、床ずれ予防につながることを示唆された。ムチン懸濁液がこのような摩擦係数減少を示す理由については 4-2, 4-3 で考察した。

4-2 ムチン懸濁液が摩擦係数減少を示した理由

ムチン懸濁液の濃度変化による摩擦係数の変化は、懸濁液中ムチンの有する複雑な立体構造と凝集作用が関与していると考えられた[12]。濃度が 0~200 [g/L] の間で摩擦が増大した理由として、分子相互作用の一つである架橋フロキュレーション(橋かけ凝集)により、凝集したことが考えられた。高分子の密度が低い時に発生する凝集として知られ、高分子が結合剤として微粒子に働きかける現象である。この現象は、合成高分子に限らず生体高分子においても報告されている[13]。本実験では、摩擦試験中にムチン懸濁液中に存在した何らかの微粒子(介護服の綿繊維など)に対してムチンが凝結材として働き、架橋が起こったと考えられた。摩擦力が最小となった 300~500 [g/L] においては、分子の立体安定化による分散安定化が成立したと考えられる。浸透圧斥力理論によれば、2つの粒子が接近し吸着層が重なり合うようになると、重なり合った容積中のセグメント密度が増大し浸透圧が増大する。この時の浸透圧増加分が粒子間に斥力として働き、分散系に安定化をもたらすことが知られている。濃度の増加に伴い、微粒子に対してムチンの吸着が起こり、吸着ムチンの分子鎖同士の重なり合う容積が増大したために分散安定化がもたらされたと考えられる。また、500~600 [g/L] 間では枯渇効果により再び凝集状態に引き戻されたと考えられた。枯渇効果は、高分子の分子量が大きく濃度が高い状態で引き起こされる凝

集である[12,13]。高分子と微粒子が接する表面間において、溶存高分子が間隙から排除され高分子の枯渇した領域が発生し、二粒子間の内外で高分子濃度差によって浸透圧が発生する。更に、この浸透圧が引力として働き、凝集を促進する枯渇効果が起こる。本実験では非常に高濃度なムチン懸濁液を用いたことでムチン粉末が互いに密着し、枯渇効果が作用したことで凝集性が向上したと考えられた。

4-3 摩擦係数とストライベック線図

ムチン懸濁液の潤滑状態を考察する上、ストライベック線図(図 5)[14]から本実験の摩擦係数について考察した。尚、4-3 において使用する摩擦係数とは、静摩擦係数と動摩擦係数のどちらも包括している。まず、潤滑剤の特性である粘性や摩擦条件(加重, 速度)によって、潤滑状態を主に三領域に分けることができる。潤滑状態の変化は、ストライベック線図を用いて示され、図 5 の通り、縦軸は摩擦係数、横軸は軸受特性数(粘度×速度/荷重)である。潤滑状態の領域は潤滑膜が二面間を完全に分離する流体潤滑領域($h > R$)、わずかな潤滑膜で流体潤滑と境界潤滑が混在する混合潤滑領域($h \approx R$)、潤滑膜がほぼ単分子膜程度になる境界潤滑膜領域($h \approx 0$)の三領域に分けられる[14]。

本実験において表面性試験機を使用した際に、速度と荷重は一定の値(往復運動速度 3,000 [mm/min], 荷重 200 [g])を設定し、摩擦試験を行った。このことからストライベック線図の横軸である速度 v と荷重 P は定数とみなすことができ、本実験における摩擦係数 μ の変化は、粘度による影響が大きいことが示唆された。前報において粘度はムチンの濃度に比例することが判明しており[15]、横軸の軸受特性数中、粘度のみが変数となることから、摩擦係数の変化は、懸濁液中のムチン濃度に依存している。この考えを基に考察を行う。

ムチン懸濁液は特定の濃度以上(300, 400[g/L])で摩擦低減性を示した。これは、摩擦低減を有意に示したこの濃度範囲が、境界潤滑から混合潤滑へと潤滑状態が変化したことで摩擦係数が低減したと考えられた。一方で、ムチン懸

濁液は高濃度(600[g/L])で摩擦係数がわずかに増加したが、これは油膜厚さ h が大きくなったために流体潤滑状態となり、摩擦係数が増加したと考えられた。油膜厚さが大きくなった理由としては、懸濁液の液内でムチンの凝集作用、または懸濁液—固体(人工皮膚、介護服)間で凝着などの物理的な作用が発生したことが考えられた。

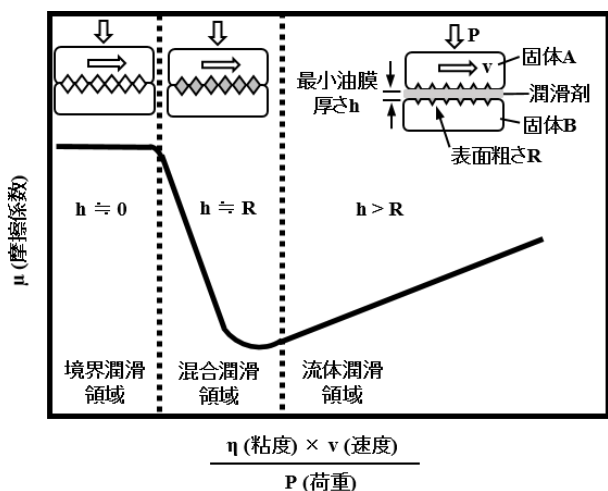


図5 ストライベック線図 [14]

5. まとめ

本研究ではムチンを用いた床ずれ発症抑制の基礎実験の1つとしてムチン懸濁液の及ぼす介護服—人工皮膚間の摩擦特性について調査した。ムチン懸濁液の濃度範囲を0~600 [g/L]と設定して摩擦特性を調査した結果、摩擦低減に寄与する濃度範囲が400~500 [g/L]であることが明らかとなった。更に、最小の静/動摩擦係数は潤滑油より優れた摩擦低減能を示した。また、ムチン懸濁液の濃度変化による静/動摩擦係数の変化は、ムチンの凝集性が関与していることが示唆された。

謝辞

本研究は科研費 JSPS20K04250 および R2 年度 高専—

長岡技大共同研究助成金の助成を受けて実施されました。

参考文献

- [1] G.-M. Rotaru et al. : Friction between human skin and medical textiles for decubitus prevention , Tribology International, 65, pp.91-96 (2013)
- [2] 小坂正明：高齢者褥瘡手術における成績向上の工夫, 日本外科系連合学会誌, Vol.38, No.1, pp.36-44 (2013)
- [3] 日本褥瘡学会 学術教育委員会 ガイドライン改訂委員会：褥瘡予防・管理ガイドライン(第3版), 褥瘡学会誌, Vol.14, No. 2, pp.165-175 (2012)
- [4] 渡邊康, 猪子洋二：「粘液糖蛋白質の溶液物性評価」, 食総研報(Rep. Nat'l. Food Res. Inst), No. 72, pp. 31-36(2008)
- [5] Garraway,K.L., Fregien,N. : Mucin Structure and Function : Insights from Molecular Biology, Trends in Glycoscience and Glycotechnology, Vol.7, No.33, pp.31-44 (1995)
- [6] Kameyama, Akihiko and Matsuno, Yu-ki : Recent Advances in Electrophoresis of Mucins, Trends in Glycoscience and Glycotechnology, Vol.24, No.138, pp.137-151 (2012)
- [7] 丑田公規：クラゲの有効活用の限界とムチンの化学, Vol.65, No.5, pp.228-231 (2017)
- [8] 特開平7-126292 ムチンの精製方法
- [9] 特開平6-199900 ムチンの製法
- [10] 和田哉子：汗による被服材料の性能変化に関する研究(第1報), 家政学雑誌, Vol.13, No.5, pp.353-359 (1962)
- [11] 上原ます子他：家庭でできる床ずれ(褥瘡)ケア, 日本看護科学会誌, Vol.27, No.1, pp.78-80(2007)
- [12] Gleb E. Yakubov, et al. : Aqueous lubrication by fractionated salivary proteins: Synergistic interaction of mucin polymer brush with low molecular weight macromolecules , Tribology International, Vol. 89, pp. 34-45 (2015)
- [13] Gleb E. Yakubov, et al. : Viscous Boundary Lubrication of Hydrophobic Surfaces by Mucin, 26 Langmuir, Vol. 25, No. 4, pp. 2313-2321 (2009)
- [14] 長谷亜蘭：トライボロジーの基礎, 精密工学会誌, Vol.81, No.7, pp.643-647 (2015)
- [15] 田中孝国 他：ムチン(糖タンパク質)による摩擦力低減効果の基礎検討およびムチン濃度推定法の試み, 技術・教育研究論文誌, Vol.27, No.1, pp.15-19 (2020.06)