

分子膜被覆ガラスにおける指先のすべりに起因する皮膚変形の計測

Measurement of Skin Deformation Caused by Fingertip

Sliding on Molecular-Layer-Coated Glass

Science Tokyo・院（学）*砂本 祐輔 Science Tokyo（正）青木 オ子

Yusuke Sunamoto*, Saiko Aoki

Institute of Science Tokyo

1. 緒言

物体に対して指をすべらせたとき、触対象の表面状態により発生する摩擦、振動に伴い、ざらざら・つるつるなどの触感覚が変化する。したがって、リアルな触感覚の再現による人間性に配慮したものづくりの実現のためには、物体の表面状態が指のすべり摩擦特性に与える影響を詳細に解明することが必要となる。物体の表面状態を変化させる手法として凹凸や機械的振動の付与などが多く採用されている中で、本研究では表面への分子膜被覆による化学特性の変化が与える影響に着目した。筆者らの研究グループでは表面分子膜として自己組織化単分子膜（SAM, Self-assembled monolayer）を用いて、指のすべり摩擦特性に及ぼす表面分子膜の影響について研究を行ってきた。アルキル鎖長や末端極性基など SAM の分子構造の差異は指のすべり摩擦係数に変化をもたらし、中でもアルキル鎖長の増加に伴い界面せん断強さが減少することを明らかにした。すなわち、表面分子膜は指の摩擦特性を左右する因子の一つであると言える。しかし、SAM の分子構造に起因した表面状態の変化が指のすべり摩擦挙動に与える影響やそのメカニズムは明らかになっていない。そこで、ハイスピードカメラを用いて指のすべり摩擦挙動における接触面の推移を *in situ* で観察することにより、接触界面における摩擦現象を可視化することを試みた。本研究では、分子構造が異なる種々の SAM を被覆したガラス基板を用いて指先の摩擦特性を評価するとともに、接触面の様子をハイスピードカメラで観察することで、接触面における指の皮膚変形が摩擦特性に与える影響について考察した。

2. 実験方法

2.1 試験片

本研究では、分子構造の異なる数種類の SAM をそれぞれ被覆した試験片を作製した。試験片の基板材料には市販の無アルカリガラス板（イーグル XG®, 40×120×0.7 mm）を使用した。Table 1 に本研究で使用したシランカップリング剤（東京化成工業）を示す。ガラス基板をアセトンおよび純水中で超音波洗浄した後、UV オゾン洗浄を行い、表面の有機物を除去するとともに SAM の被膜に必要な酸化膜を形成させた。洗浄したガラス基板を、シランカップリング剤を所定の濃度で溶解させたトルエン溶液に浸漬することで分子膜を形成した。完全成膜させるために、OTS、DTS、HTS については基板を 24 時間浸漬したが、PTS については多層膜の形成を防ぐため、3 時間の浸漬時間とした。SAM を被覆した試験片に対して、分光エリプソメータによる膜厚測定および純水の接触角測定を実施した。Table 1 より、アルキル鎖が長くなるほど接触角が大きくなり、撥水性が向上していることを確認した。

Table 1 Silane precursors

Silane coupling agent	Molecular formula	Molecular weight	Film thickness, nm	Contact angle, deg
Octadecyltrichlorosilane (OTS)	$C_{18}H_{37}Cl_3Si$	387.93	3.53	90.2
Decyltrichlorosilane (DTS)	$C_{10}H_{21}Cl_3Si$	275.71	2.02	85.3
Hexyltrichlorosilane (HTS)	$C_6H_{13}Cl_3Si$	219.60	1.53	84.4
Trichloro (propyl) silane (PTS)	$C_3H_7Cl_3Si$	177.52	1.36	79.4

2.2 指先の摩擦試験

指のすべり動作における摩擦測定と接触面観察には、市販の触覚フォースプレート（TF-2020, Tec Gihan）とハイスピードカメラ（Q2m, nac Image Technology）を組み込んだ自作の装置を用いた。装置の外観を Fig. 1 に示す。触覚フォースプレートの上部平板中央にある長方形の貫通穴を覆うように試験片を設置し、指をすべらせた際の指の接触面はガラス試験片を介して貫通穴から観察することができる。右手人差し指を試験片に対して約 30° の角度で押し付け、メトロノームのリズムに合わせてすべり速度が約 1 cm/s になるよう調整しながら、左から右へすべらせた際の 3 成分の力 F_x , F_y , F_z を測定し、摩擦力と垂直荷重を算出した。なお、垂直荷重は、0.5 N, 1.0 N, 2.0 N のそれぞれ範囲に収まるように調整した。指先から分泌される皮脂や汗の影響を小さくするため、試験前に石鹸で指を洗浄し、消毒用エタノール（健栄製薬株式会社、エタノール含有率 76.9 ~ 81.4 vol%）を染み込ませたキムワイブで拭きとり、圧縮空気により表面の水分を飛ばし乾燥させた。摩擦試験は室温 20 ~ 22°C、湿度 50 ~ 55 RH% の環境下で実施した。

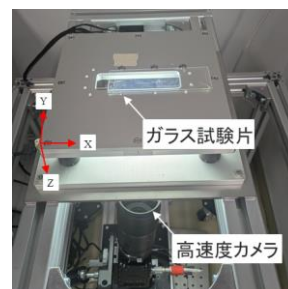


Fig. 1 Measuring device

2.3 皮膚変形の計測

指先の摩擦測定と同時に、指とガラス試験片の接触面の観察を実施した。触覚フォースプレートの下部から試験片を介してLED光を照射すると、試験片表面と接触している部分では光が吸収され、接触していない部分では光が反射されるため、接触している部分のみが黒い画像を得ることができる。Figure 2は取得した画像の一例であり、このような画像を用いて皮膚変形の推移を観察した。接触面画像の解析にはMatlabを使用した。モルフォロジー演算によって背景の照明ムラを無くし、ウェーブレット変換によって指紋の隆起部分と谷部分のコントラストを強調した。その画像を閾値によって二値化処理し、特徴点を抽出することでKanade-Lucas-Tomasi特徴追跡アルゴリズムを用いた接触面の追跡を行った。また、特徴点を使用してデレンー三角形分割を行い、それぞれの三角形についてグリーン・ラグランジェひずみを算出することで皮膚変形を計測した。

3. 結果および考察

3.1 SAM試験片が指の摩擦特性に与える影響

Figure 3は4種類の試験片における指先の摩擦試験の結果であり、荷重に対して摩擦係数をプロットしたものである。Figure 3より、荷重の増加とともに摩擦係数が減少し、SAMのアルキル鎖が長いほど指のすべり摩擦係数が減少することがわかった。

表面と指の間で発生する摩擦力 F は凝着摩擦 F_{ad} と変形摩擦 F_{def} の和で表すことができる。

$$F = F_{ad} + F_{def}$$

ここで、凝着摩擦 F_{ad} はヘルツの弾性接触理論に基づき、以下の式で表される。

$$F_{ad} = \tau A = \pi \tau \left(\frac{3R}{4E^*} \right)^{\frac{2}{3}} W^{\frac{2}{3}} \propto W^{\frac{2}{3}}$$

ここで、 τ はせん断強さ、 A は真実接触面積、 R は等価曲率半径、 E^* は等価ヤング率、 W は垂直荷重である。

変形摩擦 F_{def} については損失弾性率 β を用いて以下の式で表される。

$$F_{def} = \frac{3\beta R^{\frac{2}{3}}}{16} \left(\frac{3}{4E^*} \right)^{\frac{1}{3}} W^{\frac{4}{3}} \propto W^{\frac{4}{3}}$$

したがって、摩擦力を垂直荷重で除して算出した摩擦係数 μ は

$$\mu = \frac{F}{W} = k_1 W^{-\frac{1}{3}} + k_2 W^{\frac{1}{3}}$$

と表せる。実験によって得られた摩擦データをこの式にフィッティングすることで k_1 、 k_2 の値を算出し、凝着成分と変形成分の寄与について調べた。フィッティング結果をFig. 4に示す。アルキル鎖が短いほど k_1 の値が大きくなり、凝着摩擦がより支配的であることがわかる。この傾向は表面の撥水性、膜厚、被覆率の差異に起因するものと考えられる。

3.2 皮膚変形の定量化

Figure 5は垂直荷重2.0N条件におけるすべり方向のひずみをヒートマップで表示したものであり、Table 2は特定のひずみが生じる領域を面積分率で示したものである。Table 2より、アルキル鎖が短くなるほど圧縮されている領域（ ϵ_{xx} が負の値）の割合が増加する傾向が見られた。また、Fig. 5より、圧縮された領域はすべり方向に対して後方（接触面画像の右側）で多く存在していることがわかった。Figure 4より、アルキル鎖が短いSAMほど凝着摩擦が支配的であるため、すべり方向前方では表面と凝着した領域が多く存在することで、後方部分では圧縮されやすくなったと考えられる。

4. 結言

分子構造が異なるSAM試験片上を指ですべらせた際、アルキル鎖長の増加に伴い摩擦係数および荷重依存性が低下した。すべり状態の接触面の皮膚変形を観察したところ、アルキル鎖が短いほど圧縮される領域が増えることが分かった。表面分子膜の分子構造の差異が指との凝着性に影響し、それに伴い摩擦特性が変化する可能性が示唆された。

謝辞 本研究はJSPS 科研費JP25K01144の助成を受けたものです。



Fig.2 Image of fingerprint

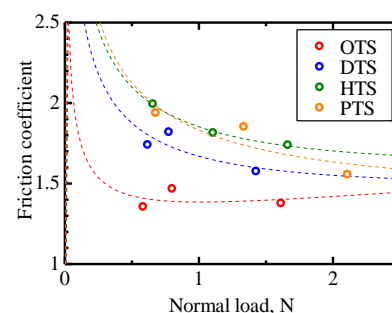


Fig. 3 Friction coefficient vs. normal load

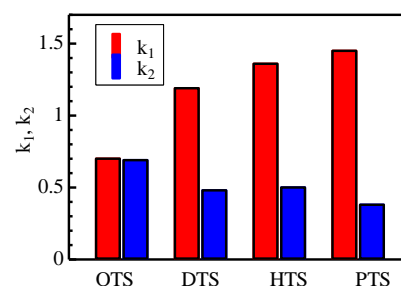


Fig. 4 Curve fitting results

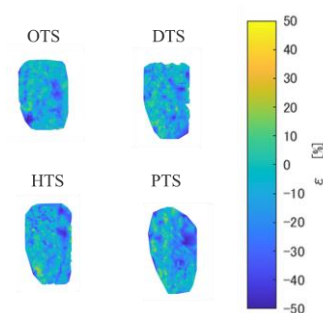


Fig. 5 Strain heatmap

Table 2 Frequency distribution of strain

ϵ_{xx} (%)	OTS	DTS	HTS	PTS
-50~-25	0.29	0.32	0.34	0.40
-25~0	0.16	0.15	0.22	0.25
0~25	0.51	0.48	0.40	0.29
25~50	0.04	0.05	0.05	0.06