

表面分子膜の化学構造に起因する指の摩擦と触覚感度の変化

Changes in Finger Friction and Tactile Sensitivity Caused by the Chemical Structure of Surface Molecular Films

東工大・院（学）*太田 拓也 東工大（正）青木 才子

Takuya Ota*, Saiko Aoki,

Tokyo Institute of Technology

1. 緒言

触覚は人間が周囲環境の情報を得るための主要な役割を担っている。特に人間の指先には四つの機械受容体が存在しており、物体表面に触れることで、その微細な情報まで読み取ることができる。従って、指先を介した触覚の研究には指と物体の接触、つまり、それらの相対運動が重要となるため、トライボロジー的な側面からの研究は不可欠である。また近年、触覚再現技術であるハプティクスの需要が高まっている。例えば、操作感の良いスマートフォンの開発や VR 世界における触感生成など、多様な分野での応用が期待されている。これらのハプティクスデバイスでは、対象に凹凸や振動を与えるなど、物理的な手法が用いられることが多い。一方、より豊かな触覚インターフェースの実現には物体表面の化学的な特性も重要である。既往研究により、物体の表面エネルギーや表面分子膜の構成原子の違いが人間の触知覚に影響を与えることが報告されている^{1,2)}が、このような化学的なアプローチによる研究には限りがある。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）に着目し、指のトライボロジー特性に与える表面分子膜の影響について研究を行ってきた。SAMの成膜状態により分子膜厚に差異が現れ、その膜厚の増大に伴い指の界面せん断強さが減少することが明らかになっており³⁾、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ことが伺える。しかし、既往研究では一種類の SAM の成膜状態のみに言及し、分子構造が異なる複数の SAM における指の摩擦特性についてデータに限りがあり、さらには、表面分子膜が人間の触知覚に及ぼす影響についても明らかになっていない。そこで本研究では、分子鎖長や官能基など分子構造が異なる種々の SAM を被覆した Si 基板を用いて複数の研究対象者により指の摩擦特性と触知覚の評価を行い、表面分子膜が指の摩擦特性や触覚感度に与える影響を考察した。

2. 実験方法

2.1 試験片の作製

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 Si ウェハを使用した。Table 1 に本研究で使用したシランカップリング剤を示す。約 2×4 cm に切断した Si 基板をアセトンおよび純水中で超音波洗浄した後、UV/O₃ 洗浄を行うことによって、表面の有機物を除去するとともに SAM の被覆に必要な洗浄酸化膜を形成させた。洗浄した Si 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 についてはウェハを 24 時間浸漬したが、FDTS については多層膜の形成を防ぐため、6 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、接触角はいずれの試験片でも大凡 100°程度であり、Si 基板上に SAM が密に成膜したことを確認した。

Table 1 Silane precursors

Silane coupling agent	Molecular formula	Molecular weight	Film Thickness, nm	Contact angle, deg.
Octadecyltrichlorosilane (OTS)	C ₁₈ H ₃₇ Cl ₃ Si	387.93	3.08	97.0
Decyltrichlorosilane (DTS)	C ₁₀ H ₂₁ Cl ₃ Si	275.71	2.35	101.5
Hexyltrichlorosilane (HTS)	C ₆ H ₁₃ Cl ₃ Si	219.6	1.56	96.4
1H,1H,2H,2H,perfluorodecyltrichlorosilane (FDTS)	C ₁₀ H ₄ Cl ₃ F ₁₇ Si	581.6	1.58	97.5

2.2 指先の摩擦試験

分子構造が異なる各種 SAM をそれぞれ被覆した試験片を用いて、指のすべり動作における荷重と摩擦力を測定した。Figure 1 は圧電型 3 分力センサを中心に設置した平板型摩擦測定装置である。試験片を平板上に設置し、右手人差し指を試験片に対して約 30°の角度で左端に置き、試験片の右端まですべらせた。このとき、メトロノームのリズムに合わせることで、すべり速さを約 2 cm/s になるように調整した。各試験片につき 30 回のすべり動作を行った。指先から分泌される皮脂や汗の影響を少なくするために、摩擦試験の前に石鹸で手を洗浄し、10 回のすべり動作ごとにエタノールを染み込ませたキムワイブで指先を拭き取った。なお、試験片についても試験前に超音波洗浄（アセトン 5 分間、純水

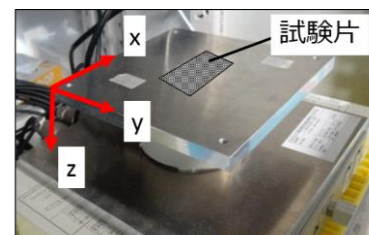


Fig. 1 Measuring device

5 分間)を行い、表面の汚れを除去した。試験中の周囲環境は室温 24 ± 3 °C、湿度 35 ± 10 %である。研究対象者は 20 代の男性 2 名とした。

2.3 指の接触面積測定

指のすべり動作における摩擦力と接触面積の関係を評価するために、ink-stamping 法により指の接触面積を測定した。Hertz の弾性接触理論に基づき、式(1)に示す接触面積 A と荷重 W との相関関係を求めた。さらに、摩擦試験で得られた摩擦力 F と式(1)を用いて、接触面積と摩擦力の関係を求め、式(2)から界面せん断強さ τ を算出した。

$$A = aW^b \quad (1)$$

$$F = \tau A \quad (2)$$

3 結果および考察

Figure 2 および 3 は 4 種類の SAM 試験片における指先の摩擦試験の結果であり、研究対象者 1 名の結果を代表例として示す。Figure 2 は荷重に対する摩擦係数をプロットした結果であり、Fig. 3 は指の接触面積と摩擦力の関係を示す。Fig. 2 より、炭化水素で構成される OTS、DTS、HTS の各種 SAM の場合、荷重の増大に伴い摩擦係数は低減し、フッ化炭素からなる FDTS では荷重の増減による摩擦係数の変化はわずかであった。これは、フッ素原子は水素原子に比べてファンデルワールス半径が大きいため、フッ素原子が密である剛直な分子鎖となった結果、FDTS では荷重による SAM の変形が起きにくく、摩擦係数の荷重依存性が小さいことが考えられる。また、摩擦係数は OTS、DTS、HTS の順で高くなっている。これは分子鎖長が長いほど指と基板同士の直接接触が妨げられるためだと考えられる。特に、OTS や DTS に比べて HTS の摩擦係数が顕著に高く、分子鎖を構成する炭素数が 10 より少ない場合、指と基板の接触が十分に妨げられないことが示唆された。

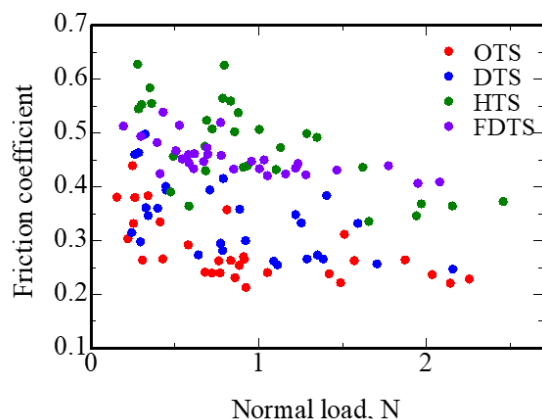


Fig. 2 Friction coefficient vs. normal load

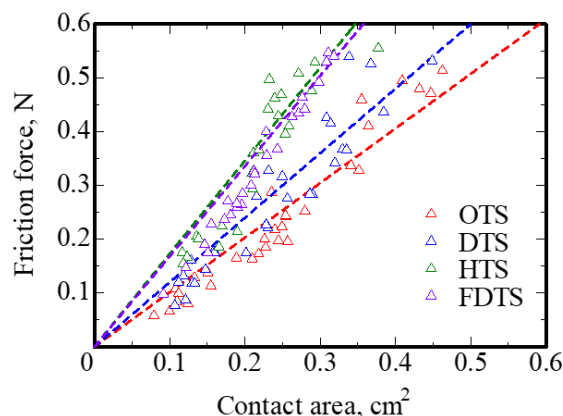


Fig. 3 Friction force vs. contact area

Figure 4 には、Fig. 2(b)の近似直線の傾きから求めたせん断強さを示す。せん断強さは、HTS > FDTS > DTS > OTS の順で大きくなり、これは膜厚の大きさの順序と一致する結果となった。既往研究³⁾より、分子膜厚の増大に伴い指との界面せん断強さが減少することが明らかになっているが、本研究では十分に成膜した SAM についても分子鎖長に基づく膜厚の差異によりせん断強さが変化することがわかった。また、触感感度に関する予備試験において、研究対象者から、低摩擦を示した OTS や DTS では「つるつる感」を感じやすいが程度の差は小さい一方で、HTS や FDTS では「つるつる感」は感じにくいという結果であった。

4. 結言

アルキル分子鎖長の増大に伴い指の界面せん断強さが低減した。また、フッ化アルキル分子鎖の場合、アルキル分子鎖よりも荷重の影響が小さいことが分かった。表面分子膜の分子構造の差異は指の摩擦特性に影響し、それに伴い触覚感度も変化する可能性が示唆された。

文献

- 1) C. W. Carpenter, C. Dhong, N. B. Root, D. Rodriguez, E. E. Abdo, K. Skelil, M. A. Alkhadra, J. Ramirez, V. S. Ramachandran and D. J. Lipomi, *Mater. Horiz.*, 2018, 5, 70-77
- 2) A. Nolin, A. Licht, K. Pierson, C.-Y. Y. Lo, L. V. Kayser and C. Dhong, *Soft Matter*, 2021, 17, 5050-5060
- 3) Yanagisawa R., Aoki S., Masuko M., Friction, *Tribology Online*, 2016, 5, 396-402

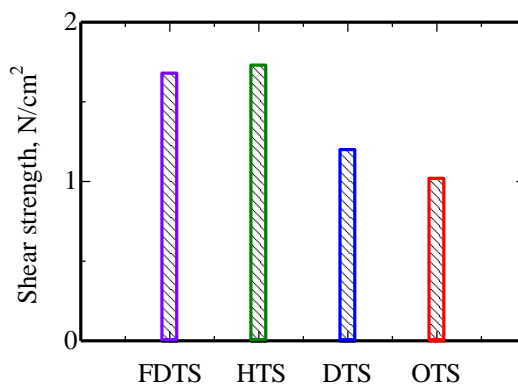


Fig. 4 Shear strength between finger and Si specimen coated with each SAM