

バイオミメティック触覚センシングシステムによる化粧料の使用感評価

山形大学大学院理工学研究科

野々村 美宗

Nonlinear phenomena on the soft material surface are one of the most exciting topics of chemical physics. However, only a few reports exist on the friction phenomena under accelerated movement, because friction between two solid surfaces is considered a linear phenomenon in many cases. We aim to investigate how nonlinear accelerated motion affects friction on solid surfaces. In the present study, we evaluate the frictional forces between two polytetrafluoroethylene (PTFE) resins using an advanced friction evaluation system. On PTFE surfaces, the normalized delay time δ , which is the time lag in the response of the friction force to the accelerated movement, is observed in the pre-sliding friction process. Under high-velocity conditions, kinetic friction increases with velocity. Based on these experimental results, we propose a two-phase nonlinear model including a pre-sliding process (from the beginning of sliding of a contact probe to the establishment of static friction) and a kinetic friction process. The present model consists of several factors including velocity, acceleration, stiffness, viscosity, and vertical force. The findings reflecting the viscoelastic properties of soft material is useful for various fields such as in the fabrication of clothes, cosmetics, automotive materials, and virtual reality systems as well as for understanding friction phenomena on soft material surfaces.

1. 緒言

触覚による物質認知や感情喚起のプロセスは、ヒトとのコミュニケーションが求められるロボットや情報端末、バーチャルリアリティーの開発に欠くことができないが、これまでは、皮膚に加わる力学・熱刺激を摩擦計や熱量計を用いて解析するに止まっていた。しかし、これらの方法では、「なめらか感」「しっとり感」などの繊細で多様な感覚が生まれるメカニズムを説明することはできなかった。

われわれは、ヒトが持つ触覚増強の仕組みを模倣しきれなかったことがその一因と考える。第1の仕組みは皮膚の階層構造である。指先の皮膚表面は、指紋のような数百 μm スケールの凸凹の中に数十 μm スケールの角質細胞が存在、汗や皮脂も介在して皮膚に加わる振動刺激を増強する。第2の仕組みは触行動の非線形性である。ヒトが触れた瞬間から、運動速度や垂直力が緩やかに増大、ある極大を経て減少する、正弦波で近似できるダイナミックな刺激が皮膚に加わり続けることで、短時間に多様な力学情報の収集が可能になっている。

そこで、これらのヒトの感覚増強の仕組みを取り入れた『バイオミメティック触覚センシングシステム』を開発、触覚という心理現象を物理的観点から理解したうえで、化粧品およびその関連材料を評価、化粧品の塗り心地を定量

化する。本研究では、まず、触行動の非線形性を模倣するために、正弦運動を行う往復摩擦評価装置を用いて、2枚のポリテトラフルオロエチレン (PTFE) 樹脂間で起こる摩擦を系統的に評価し、非線形運動が固体表面における摩擦現象に及ぼす影響を考察した。これらの検討によって正弦運動における速度や垂直力が摩擦力に及ぼす影響を系統的に解析し、ソフトマテリアル表面における摩擦現象の基本モデルを提案することができた。次に、ファンデーションを肌に塗る際に用いられる化粧用スポンジに着目し、市販の化粧用スポンジでウレタン製人工皮膚を擦った時の摩擦特性を評価した。また、市販の化粧用スポンジで前腕を擦った時の触感と好感度を官能評価によって明らかにし、スポンジの摩擦特性と触感の関係を明らかにした。

2. 方法

正弦運動を行う往復摩擦評価装置を用いて摩擦力を評価した。Fig. 1に装置の写真及び概要を示す。正弦運動は、偏芯した円板を回転させてヨークを往復運動させる機構により実現した。さらに、接触子の内部に小型3軸加速度センサが装着されており、接触子に加わる接線方向及び法線方向の加速度を評価できる。下側に加わる力学刺激は、2個のロードセルにより接線方向及び法線方向の応力をセンシングする。2枚のポリテトラフルオロエチレンテープ(以後PTFE)間の摩擦力を評価した。正弦運動時の速度 V は、振幅 A 、角速度 ω 、時間 T を用いて以下の(1)式で表される。

$$V=A\omega\cos\omega T \quad (1)$$

A は14.5 mm、 ω は0.01、0.1、1.0、2.1 rad s^{-1} 、垂直荷重 W は0.98、1.47、1.96、2.45 Nとした。

一方、ファンデーションの塗布プロセスの再現するために、5種類の化粧用スポンジを用いてウレタン製人工皮膚



Tactile evaluation of cosmetic products using biomimetic tactile evaluation system

Yoshimune Nonomura
Yamagata University

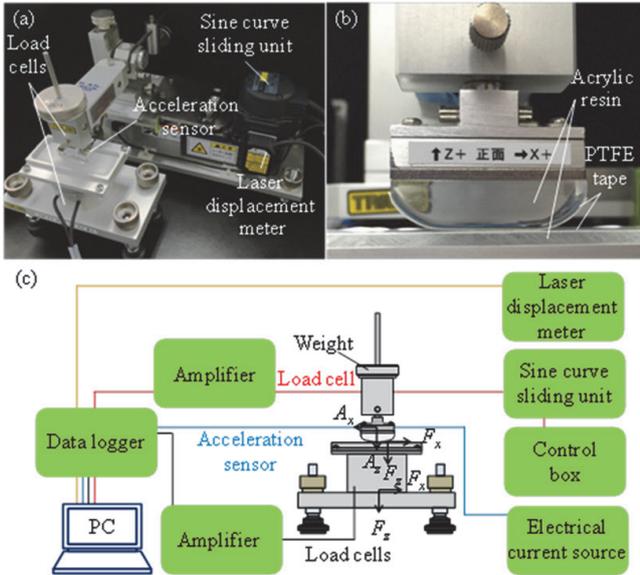


Fig. 1 Sinusoidal-movement sliding system. (a) Overall view, (b) contact probe of acrylic resin covered with PTFE tape, (c) conceptual diagram.

を擦った。5種類のスポンジのうち、**a**、**b**、**d**はポリウレタン製、**c**はニトリルブタジエンゴム製、**e**はスチレンブタジエンゴム製である。

3. 結果と考察

3.1. 摩擦プロファイル

Fig. 2に正弦運動摩擦評価装置で2枚のPTFEテープを擦った時の典型的な摩擦パターンを示す。ここで T は時間、 T_0 は接触子の往復にかかる時間である。試料を角速度 0.1 rad s^{-1} 、垂直荷重 0.98 N で擦った時、摩擦力は運動開始直後から急激に上昇し、 $T/T_0 = 0.02$ で 0.10 N の静摩擦力のピークを示した後、一定の動摩擦力 (0.07 N) を示した。Fig. 3に摩擦係数と速度の関係を示す。角速度 $0.01 \sim 2.1 \text{ rad s}^{-1}$ のすべての条件において、接触子が滑り出し直後に速度の上昇とともに一気に摩擦力が上昇するすべり前摩擦過程を経て静摩擦力に達した後、緩やかに速度依存性の小さい動摩擦過程に移行した。往復運動を行うと、逆方向に同程度の摩擦力が発生し、閉じたループが描かれた。この滑り前摩擦過程においては、往路と復路の間でずれが生じるヒステリシスが観察された。このヒステリシスはテフロン表面では接触子の運動に対して摩擦力が遅れて応答することを意味している。動摩擦過程のプロファイルは、角速度が 0.01 、 0.1 rad s^{-1} の時、摩擦係数は速度に依存せず一定だったが (Fig. 3(a), (b))、角速度が 1.0 、 2.1 rad s^{-1} の時、摩擦係数は速度に依存し、大きくなった (Fig. 3(c), (d))。すなわち、 2.1 rad s^{-1} の時、静摩擦直後 $V = 5.78 \text{ mm s}^{-1}$ で 0.10 N の動摩擦力が観察された後、速度の最大値 (30.3 mm s^{-1}) で 0.12 N まで上昇し、その

後 $V = 0 \text{ mm s}^{-1}$ で 0.04 N まで減少した。つまり、速度の速い条件では、動摩擦係数が速度に伴って増加する依存性が観察された。

この滑り前摩擦過程で接触子の動きに対して摩擦力が遅れる位相差 δ をFig. 4に示す。 δ は摩擦速度に依存し、速度が速い時に小さくなった。すなわち、速度 $V = 0.01 \sim 1.0 \text{ rad s}^{-1}$ の時、 $\delta = 0.012 \sim 0.016$ だったのに対し、 $V = 2.1 \text{ rad s}^{-1}$ の時、 $0.008 \sim 0.011$ だった。さらに、 δ は垂直荷重にも依存した。 $V = 0.1 \text{ rad s}^{-1}$ 、 $W = 0.98 \text{ N}$ の時 $\delta = 0.012$ だったが、 2.45 N では $\delta = 0.016$ だった。

3.2. ストライベック曲線

運動条件が摩擦力に及ぼす影響を俯瞰的に解析するために、摩擦係数とゾンマーフェルト数 ($S = \eta \times V/W$, η = 粘度、 V = 速度、 W = 垂直荷重) の関係をストライベック曲線に示す (Fig. 5)。この時、粘度は空気 (25°C) の粘度 $\eta = 18.2 \times 10^{-6} \text{ Pa s}$ とした。速度・垂直荷重によって、動摩擦過程に変化が現れた。 $S = 1.0 \times 10^{-11} \sim 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ の時、動摩擦係数は約 0.07 で一定だったが、 S が $1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ 以上になると S の増加と共に動摩擦係数も大きくなり、 $S = 2.2 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ では 0.14 に達した。すなわち、速度の遅い条件では、動摩擦の過程で摩擦係数はほとんど変化しないが、速度の速い条件では、流体潤滑のような速度に依存した摩擦係数の増加が観察された。

3.3. ソフトマテリアル表面における摩擦現象の粘弾性モデル

本研究で行った正弦運動下における摩擦評価によって、粘弾性を持つソフトマテリアルに特徴的な2つの現象が観察された。1つ目は、接触子の動きに対して摩擦力が遅れて現れる位相差 δ の発生、2つ目はゾンマーフェルト数 S の増加にともなう動摩擦係数の増加である。金属や金属酸化物のような弾性的なハードマテリアル表面では接触子が滑り出すと同時に摩擦力が発生するが、PTFEのような粘弾性のソフトマテリアルは、滑り出す時に変形するため、摩擦力が運動に対して遅れて発生する。また、粘弾性体のずり応力のうち粘性抵抗の因子はずり速度に比例して増加することが、 S の増加にともなう動摩擦係数の増加に対応している。

これらの特性に基づいて粘弾性体表面における摩擦のモデルを構築した (Fig. 6)。ここでは、質量 M の物体を垂直荷重 N を加えながら速度 $V = dx/dt$ (x = 位置、 t = 時間) で動かした時に発生する摩擦力を F_f 、 z をひずみ距離とする。従来のモデルでは、基盤は弾性率 k_s のばねによって固定されており、基盤上の物体が運動すると k_s に対応した摩擦力が発生するものと考えられてきた¹⁸⁾。本研究では、さ

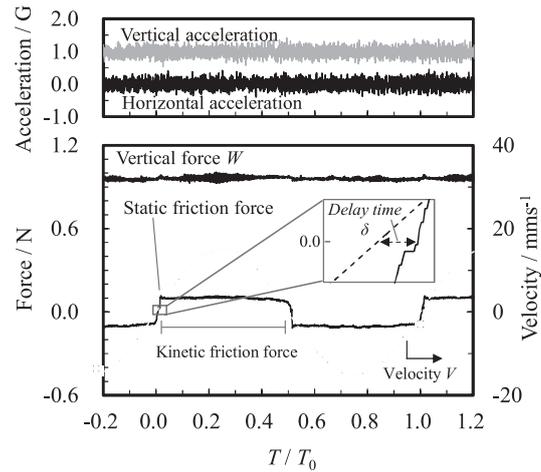


Fig. 2 Temporal change in the friction force, the velocity, the vertical force and the acceleration at an angular velocity $\omega = 0.1 \text{ rad s}^{-1}$, and the vertical force $W = 0.98 \text{ N}$.

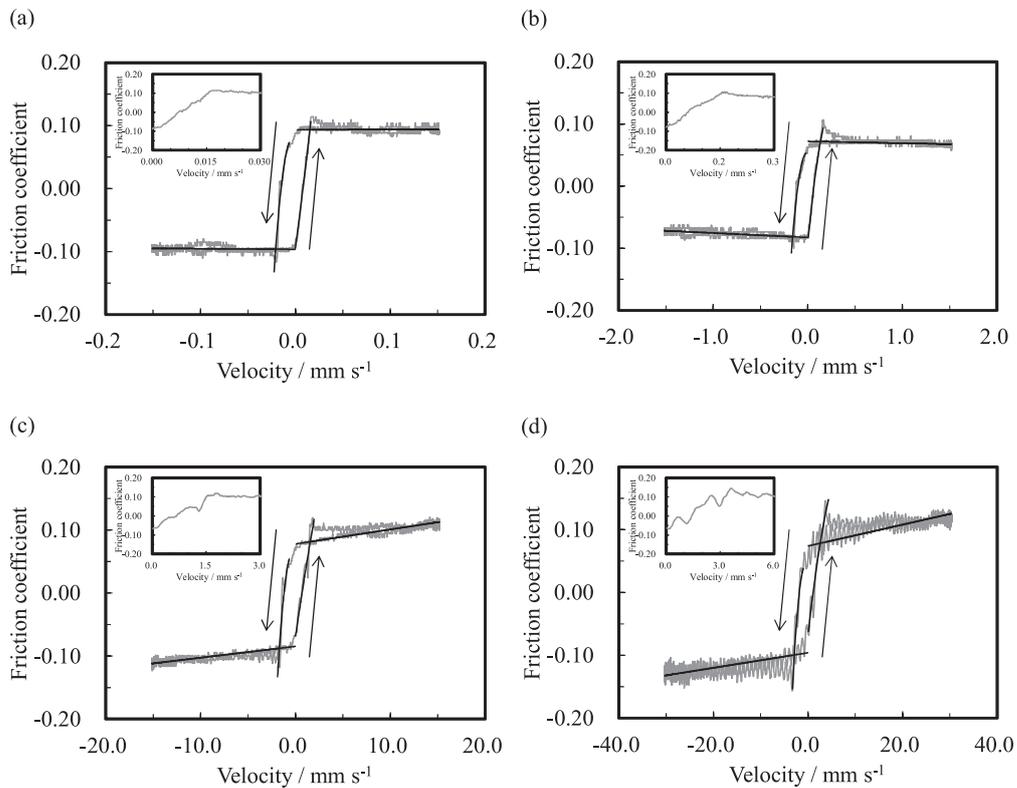


Fig. 3 The relation between the friction coefficient and the velocity based on typical experimental results (gray line) and the proposed model (black line) : (a) $\omega = 0.01 \text{ rad s}^{-1}$, $W = 0.98 \text{ N}$, (b) $\omega = 0.1 \text{ rad s}^{-1}$, $W = 0.98 \text{ N}$. (c) $\omega = 1.0 \text{ rad s}^{-1}$, $W = 0.98 \text{ N}$, (d) $\omega = 2.1 \text{ rad s}^{-1}$, $W = 0.98 \text{ N}$.

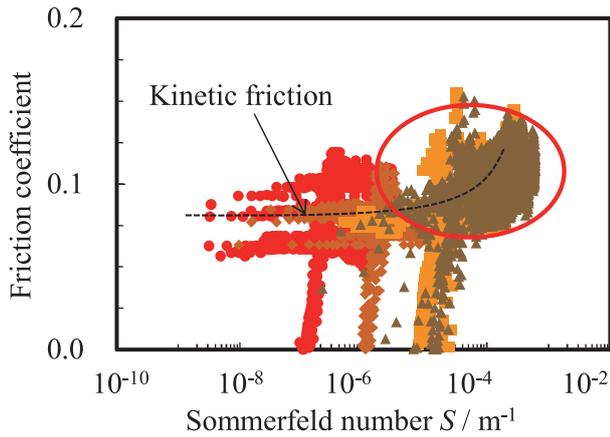


Fig. 5 Dependence of the friction coefficient on the Sommerfeld number S . $\omega=0.01 \text{ rad s}^{-1}$ (●), 0.1 rad^{-1} (◆), 1.0 rad s^{-1} (■), 2.1 rad s^{-1} (▲).

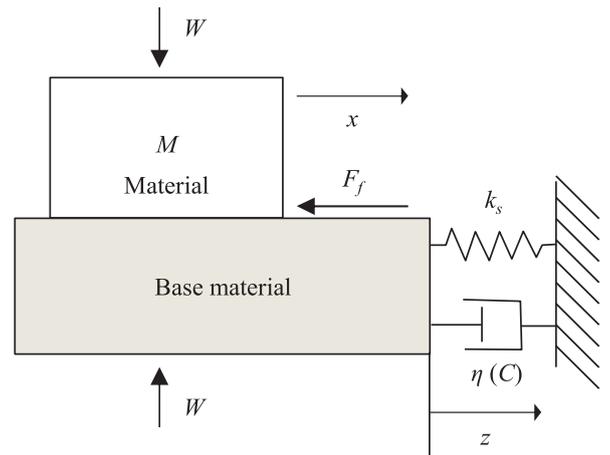


Fig. 6 Friction model of a soft material.

らに粘性率 η (粘性摩擦係数 C) のダッシュポットを加えることで、位相差 δ の発生などの粘性的応答を考慮することを可能にした。

本研究で得られた摩擦パラメーターの幾つかの特徴的な挙動は、この粘性的なダッシュポットの存在によって説明できる。ソフトマテリアル表面で現れた位相差 δ は、摩擦速度が速いと小さく、垂直荷重が大きいと大きくなった。この速度依存性は、接触面における凝着の切れ方が速度によって変化するために起こる¹⁶⁾。すなわち、速度が速い時は弾性的に振る舞い、力の応答が素早く、速度が遅い時は粘性的に振る舞い、力の応答が遅くなる。また、垂直荷重が大きくなると真実接触面積はそれに比例して大きくなる。接触面積が大きくなるにつれ、粘弾性体の粘性の影響が強くなるため、摩擦力の応答が遅くなったと思われる。ストライバック曲線において、速度の速い範囲で摩擦係数が増加したのも、粘性に起因し速度に依存して粘性摩擦力が生じる¹⁷⁾。従って、速度の速い範囲では、粘性摩擦が顕著に現れたため、動摩擦係数が速度に依存して増加したと思われる。

3.4. ファンデーション塗布過程における触感と摩擦

5種類の化粧用スポンジ **a**~**e** について、女性20名を被験者として好感度と触感に関する官能評価を行った。各スポンジの好感度に有意な差は見られなかったが、触感に関してクラスター分析をしたところ幾つかのグループに分類できた。全てのスポンジはMoist感が強く、しっとりしていた。**a**の特徴的な触感 Soft 感、Slippery 感で、発現率

はそれぞれ85%、70%だった。**e**の特徴的な触感 Rough 感、Dry 感で、発現率はそれぞれ20%、40%だった。この結果に基づいて、「すべすべ」、「ふわふわ」する Soft-Slippery group (**a**, **d**)、「ざらざら」、「ぱさぱさ」する Rough-Dry group (**c**, **e**)、突出した特徴がみられない group の3グループに分類した。これらのグループごとの触感の違いは、セル壁の厚さと表面張力、摩擦変化量によって説明できた。セル壁が厚く、表面張力・摩擦変化量が大きい時、Slippery 感が弱く、Rough 感が強く感じることを示された。また Rough 感が強い時は Soft 感が弱くなった。Dry 感の強いスポンジに触れた時は多くの場合「滑らかでない」という Rough 感と関係の深い言葉が選ばれたことから、Rough 感の強さが Dry 感を強めたものと考えられる。

4. 総括

我々は、ソフトマテリアルの動的運動下における摩擦現象を理解するために、PTFE間の非線形運動下における摩擦実験を行い、すべり前摩擦過程では速度と摩擦力の応答の差 δ を、動摩擦過程では粘性抵抗由来の摩擦係数の増加を見出した。これらの特性は摩擦の基盤がばねとダッシュポットで固定された粘弾性摩擦モデルを用いて定性的に説明することができた。さらに、この評価システムを化粧料スポンジの触感の評価に応用展開した。本研究で提案されたソフトマテリアルの動的摩擦現象のモデルは皮膚表面におけるヒトや動物の触覚認知・歩行プロセスから活断層における地震の発生プロセスまで様々な摩擦現象を理解するうえで有用である。