



感性トライボロジー

しっとり・さらさら・なめらか感の物理的起源とコントロール

野々村美宗 Yoshimune NONOMURA

ヒトがモノに触れた瞬間に、皮膚の表面では何が起こっているのだろうか？そしてそのとき、我々の身体に加わった物理的な刺激がどんな感覚や感情に結び付くのだろうか？本稿では、皮膚の表面で起こる摩擦現象をモデリングするバイオミメティック触覚センシングシステムと、ヒトの運動と力学的な刺激を直接評価するその場観察型触覚センシングシステムを開発し、多様で繊細な触覚の物理的な起源を解析した取り組みを紹介する。

多様で繊細な触覚の世界

しっとり・さらさら・べたべた・ぬるぬる……。ヒトは、モノに触れたときに、様々な触感を感じ取る。日本語には、流行り言葉や方言、業界用語を除いても31の触覚に関する言葉が存在しており、触覚の世界が、多様で繊細なカラフルなものであることがわかる¹⁾。

この「カラフルさ」は当たり前のものではない。皮膚の内部には、マイスナー小体、メルケル盤、ルフィニ終末、パチニ小体という4種類の力覚受容器に加えて、神経線維の末端が特別な構造を持たずに広がった自由神経終末が存在し、数～数百Hzにわたる力学刺激と、温さ・冷たさに関わる熱刺激、痛みをセンシングすることができる。微生物や昆虫などの動物は1種類の触覚受容器しか持っておらず、いわばモノクロの世界で生きていることを考えると、我々が感じているカラフルな世界の素晴らしさを思わずにはいられない。

一方で、触覚の研究を本格的に開始した20年ほど前、ある疑問が頭をよぎった。触感の多様さと繊細さを受容器の種類の多さだけで説明してよいのだろう

のむら・よしむね
山形大学学術研究院化学・バイオ工学分野 教授
〔経歴〕1996年慶應義塾大学大学院後期博士課程修了、博士（工学）。花王株式会社において化粧品・身体洗浄料の商品開発に従事した後、2007年に山形大学に赴任。〔専門〕物理化学、界面化学、化粧品学。〔趣味〕酒蔵巡り。
E-mail: nonoy@yz.yamagata-u.ac.jp



か？ 我々の身体に供えられているセンサーは数種類であるのに対して触感に関する言葉は数十種類。しかも瞬時にその程度を定量評価することができる。そこには何か、さらなる仕組みがあるのではなかろうか？

柔らかい指でモノに触れた瞬間を再現したい！

そんなことを考えているときに浮かんだのが皮膚の「柔らかさ」だった。ヒト皮膚は表皮・真皮・皮下組織からなる層状の器官で、最表面は角層と呼ばれる薄くて固い薄膜で覆われており、内部に行くほど柔らかい。このような複雑なソフトマテリアルの表面では、条件によって様々な摩擦現象が起こり、その摩擦パターンの多様性がカラフルな触覚の世界を形作っているのではないかと推察された。

そこで、触覚センシングに特化した摩擦評価装置を開発することにした。まず、指モデルを開発した。このウレタン樹脂製の接触子は硬さがヒトの指と同程度であるだけでなく、表面に指紋を模した凸凹が刻まれている（図1）²⁾。指紋の存在によってモノを擦ったときに高周波の振動が起こりやすくなり、触覚の感度が高まることが報告されている³⁾。

さらに、ヒトの自然でなめらかな動きを模倣した摩擦評価装置を開発した⁴⁾。ヒトがモノに触れたときの動きを高速カメラで観察し、一定速度で触れるることはほとんどなく、「だんだん速くなつて、だんだん遅くなつて、止まる」という常に加速度が伴つた運動が繰り返される場合が多いことが確認された⁵⁾。そこで、スコッチヨーク機構という仕組みを導入し、正弦運動で

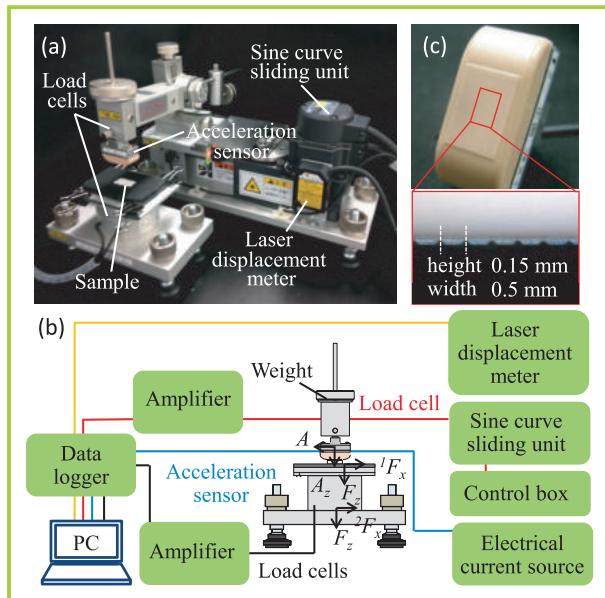


図1 バイオミメティック触覚センシングシステム
(a) 全体像、(b) 模式図および(c) 指モデル接触子。参考文献7)から許可を得て引用。

接触子をしゅう動することを可能にし、バイオミメティック触覚センシングシステムが完成したのだった。

濡れてないのにしっとり? 化粧用パウダーの触感

ヒトがモノに触る過程をモデリングする触覚センシングシステムが完成し、さて何をしよう、と考えたとき、真っ先に浮かんだのが「しっとり」という言葉だった。「しっとり」は筆者が取り組んできた化粧品の業界では大切な概念で、皮膚や毛髪のケア製品だけでなく、ファンデーション用パウダーの触感もこの言葉で表現される。辞書によるとこの言葉の意味は「適度に水分を含み、うるおいのあるさま」なのだが、ほとんど水分を含んでいないはずの毛髪やパウダーでもこの言葉が現れること、日本語を母語としないヒトにはその意味がピンとこない様子であることなど、この言葉の周りにはいろいろと不思議なことが散見された。

そこで、しっとり感の高い化粧用パウダーや皮革の手触りを官能評価、バイオミメティック触覚センシングシステムを用いて物性を評価することにした^{6,7)}。図2に最もしっとり感の強い化粧用パウダーであるトリエトキシカプリリルシラン(OTS)処理セリサイトの摩擦プロファイルを示す。これらの評価の結果、しっ

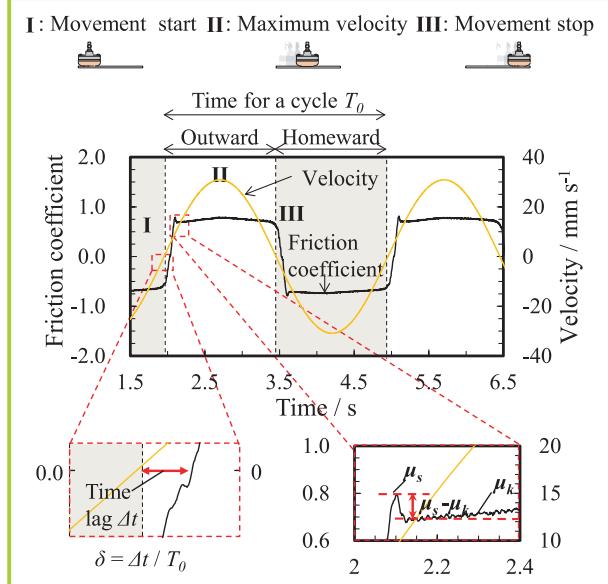


図2 OTS処理セリサイトの摩擦プロファイル
静摩擦係数 μ_s 、動摩擦係数 μ_k 、遅れ時間 δ などの摩擦パラメータと「しっとり」、「さらさら」、「つるつる」などの触感との関係が明らかになった。I~IIIは接触子の位置を示す。参考文献7)から許可を得て引用。

とり感は最も基本的な触感である触覚次元のうちなめらか感と湿り感の組み合わせであること、なめらか感は接触子がしゅう動する動摩擦過程における摩擦係数(動摩擦係数) μ_k が低く、その変動が小さいときに起こることが確認された。一方で、湿り感の物理的な起源はなかなか明らかにならなかった。定義と関係の深い水分量や温冷感との関係が予想される熱物性との関係を解析したが、官能評価との間に有意な関係は見いだされなかった。試行錯誤の結果、湿り感との間に関係が見いだされたのはやはり摩擦パラメータだった。接触子の動き始めの極大値(静摩擦係数) μ_s が大きく、 μ_k とのギャップ $\mu_s - \mu_k$ が顕著なとき、湿り感のスコアが高かった。これらの結果は触った瞬間に一瞬皮膚に抵抗力が加わり、その後、一気になめらかに動くようになると、しっとりという言葉が連想されることを示唆している。

魅力的な髪のなめらか感はどうやって生まれる? 手ぐしプロセスのその場観察

筆者らは、しっとり感に続いてさらさら・つるつる・ぬくもり感の物理的起源を解析することに成功した^{8,9)}。 μ_s 、 μ_k に加えて接触子の運動に対する摩擦力の応答の遅れ Δt を一往復に必要な時間 T_0 で割った遅れ

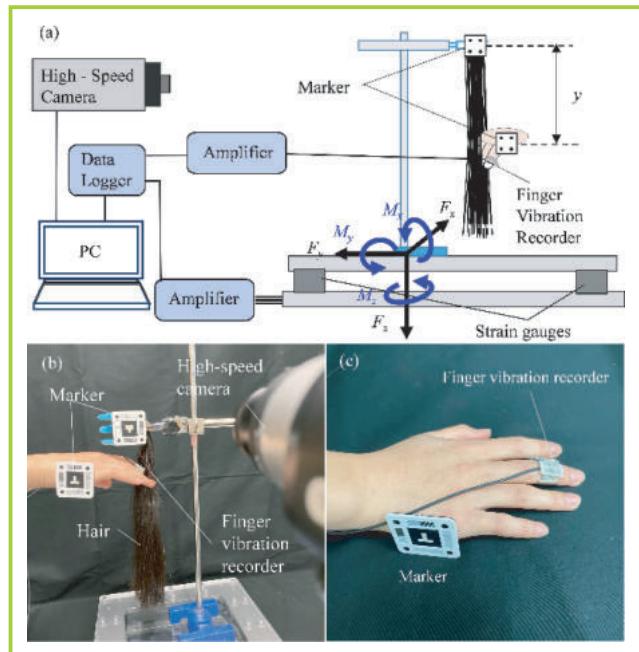


図3 その場観察型触覚センシングシステム

(a) 模式図、(b) 毛髪を手櫛している様子および(c) 加速度センサーとマーカーを装着した手。参考文献10)から引用。CC BY-NC-ND 4.0。

時間 δ を利用すると、様々な物質の触覚の特徴を物理的に説明することができた。一方で、単純化されたモデル実験で得られたパラメータだけで、複雑で階層性の高い感覚の世界を理解することの限界を感じていた。

そこで開発したのがその場観察型触覚センシングシステムである(図3)。このシステムはヒトの動きを観察する高速カメラに加えて、プレートに加わった垂直力・摩擦力・モーメントを検出できるフォースプレートによって構成されており、被験者が触感を評価したり、何らかのタスクに取り組んでいる瞬間の物理データを獲得することができるのだ。ヒトを被験者とする官能評価は、データのばらつきが大きく、普遍的な法則を見いだすのが難しいが、このシステムによって、どのような状況でどのような触れ方をしていたかが明らかになれば、一人一人がなぜそのような触感を感じたのか、理解することができる。

この取り組みの一例として、手ぐしプロセスを観察した例を紹介する。ヒトは、毛髪の手触りを確かめるときに、いろいろな触わり方をするが、ヒトが毛髪の束に指を差し込み、流れに沿って整えるいわゆる手ぐ

しによって毛髪のちょっとした違いを検知することが可能になることが見いだされた。この結果は筆者にとってはまさに目から鱗だった。手触りの評価試験と言えば表面を撫でるような動きという固定観念があつたためである。

そこで、手ぐしのプロセスでどんな力学的な刺激が皮膚に加わるのか、何が起こっているのか、その場観察型触覚センシングシステムで確認することとした¹⁰⁾。毛束をフォースプレート上の台につるして被験者が手ぐしをしたところ、真っすぐなストレートヘアの場合は指のすべり速度が速く、摩擦抵抗が小さかつたが、細かく波打っているウェービーへアの場合は摩擦抵抗が大きかった。さらに、毛先のみがくるっと丸まっているカーリーへアの場合は、指が毛先を通り抜ける瞬間に明白なモーメントが観察されたのだった。この成果は、ヒトの動きを直接観察することの重要性を示唆している。

感性トライボロジーの展望

ヒトが感じるカラフルな触感の物理的な起源を探る本格的な取り組みが始まって数十年がたち、様々なセンシングシステムが開発されるとともに、得られた知見が化粧品・繊維からロボット・バーチャルリアリティまで、様々な分野に展開されるようになった。我々の研究室でも触覚センシングシステムによって得られた物理的パラメータを食品のテクスチャーの定量化や皮膚・毛髪の状態分析に利用する取り組みを始めている^{11~13)}。ヒトが日々感じている感覚や感情の発現のプロセスを明らかにし、一つ一つの商品やシステムの設計に生かしていきたい。

- 1) T. Ikejima, K. Mizukoshi, Y. Nonomura, *J. Sens. Stud.* **2024**, 39, e12956.
- 2) K. Kuramitsu et al., *Chem. Lett.* **2013**, 42, 284.
- 3) J. Scheibert et al., *Science* **2009**, 323, 1503.
- 4) Y. Aita et al., *AIP Adv.* **2017**, 7, 045005.
- 5) Y. Nonomura et al., *J. R. Soc. Interface* **2012**, 9, 1216.
- 6) K. Kikegawa et al., *R. Soc. Open Sci.* **2019**, 6, 190039.
- 7) R. Tsuchiya et al., *Bull. Chem. Soc. Jpn.* **2020**, 93, 399.
- 8) Y. Kato et al., *J. Oleo Sci.* **2021**, 70, 195.
- 9) 熊谷太州ほか, *J. Jpn. Soc. Colour Mater.* **2020**, 93, 2.
- 10) S. Konno et al., *Sci. Rep.* **2025**, 15, 24036.
- 11) R. Sekine et al., *J. Am. Oil Chem. Soc.* **2024**, 101, 539.
- 12) Y. Sakata et al., *Int. J. Cosmet. Sci.* **2022**, 44, 20.
- 13) M. Sano et al., *J. Surfact. Deterg.* **2023**, 26, 185.