

シリコンシート凹凸表面の触り心地と摩擦力の関係

Relationship Between Surface Texture and Frictional Properties of Silicone Sheets

長野高専（正）*柳澤 憲史 長野高専（非）矢島 満衣

Kenji Yanagisawa*, Mai Yajima*

*National Institute of Technology, Nagano College

1. はじめに

プラスチック成形品は、医療機器からおもちゃまで、生活のさまざまな場面で重要な役割を担い、その軽量性と加工の容易さから、自動車や家電、スマートフォンなど、工業製品においても広く利用されており、産業全体の効率向上とコスト削減に寄与している。これらの製品では、プラスチック成形品が表面の構成部材として使用されているため、使用者が直接視覚や触覚で接する機会が多く、デザインや手触りにおいても重要な役割を果たす。そのため、製品に必要な機能だけでなく、見た目や触り心地も消費者にとって重要な価値となる。

見た目のような視覚的な質感付与のために、コンピュータアルゴリズムによるデジタルでの意匠設計が行われている¹⁾。一方、手触りのような触感的な質感付与は難易度が高く、摩擦特性・表面粗さ・圧縮特性などと触感の関係性は評価されてきたが、いまだ触感の意匠設計が可能となっていない^{2,3)}。表面粗さは手触りに顕著に影響を与えることが知られており、指先によるアルミ板上の溝幅の知覚が評価され、指先の力や振動周波数との関係が報告されている⁴⁾。マイクロ切削加工を用い数 μm ～数百 μm オーダーのテクスチャを付与したポリプロピレン表面に対して官能評価を行った結果、テクスチャのピッチが減少すると「滑らかな」感が大きくなり 10～40 μm で「滑らかな」感が最大となるが、テクスチャのない表面は「滑らかな」感が小さく「引っかかる」感が大きくなると報告されている⁵⁾。指で算術平均粗さ R_a が異なる様々な素材をこすったとき、概ね R_a が数十 μm よりも大きいときは指紋の突起と凸面のかみ合いが支配的で、 R_a の増加とともに摩擦係数が増加し、sub- μm よりも小さい時は凝着が支配的になり R_a の減少とともに摩擦係数が増加し、凝着が支配的な領域と、かみ合いが支配的な領域の間に、摩擦係数が最も小さい領域が存在することが知られている³⁾。

熱硬化性樹脂のポリウレタン樹脂は、合成皮革の表皮層に用いられる。合成皮革の触感を設計するために、表面粗さや摩擦特性などの物理特性と触感の関係を調査し、触感-物理量モデルの構築を目指している取り組みもある⁶⁾。しかし、熱硬化性樹脂のシリコンゴムは、加工が容易で工業製品として広く使用されているにも関わらず、触感設計のゴールの1つである「触り心地がよい」を表現する触感-物理量モデルは構築されていない。加えて、「触り心地がよい」に影響を与える触感は明らかとなっていない。

本研究では、凹凸構造を有したシリコンゴム触感の定量化に先立ち、「触り心地がよい」を評価項目に含めた官能検査と、複数の物理量の測定を行う。そして、それらの結果の関係を考察することで、「触り心地がよい」と関係のある触感及び物理量を明らかにする。

2. 実験方法

2.1 物理量の計測

材料にはシリコンゴム(KE-17; 信越シリコン)を用いる。離型紙(DN-TP; 大日本印刷株式会社)に、硬化剤を混ぜて攪拌、脱泡したシリコンゴムをバーコーター(4 面式フィルムアプリーケーター; オールグッド株式会社)を用いて膜厚約 1000 μm で塗布したのち、加熱して乾燥する。そして、硬化したシリコンゴムから離型紙を剥離することで、表面に凹凸構造を有したシリコン試料を得る(図 1)。

離型紙とは、合成皮革表面の凹凸構造の反転形状が形成された型紙である。この離型紙の種類により、様々な表面の凹凸構造を形成できる。離型紙は、触感が異なる市販品の 12 種類を用いた。

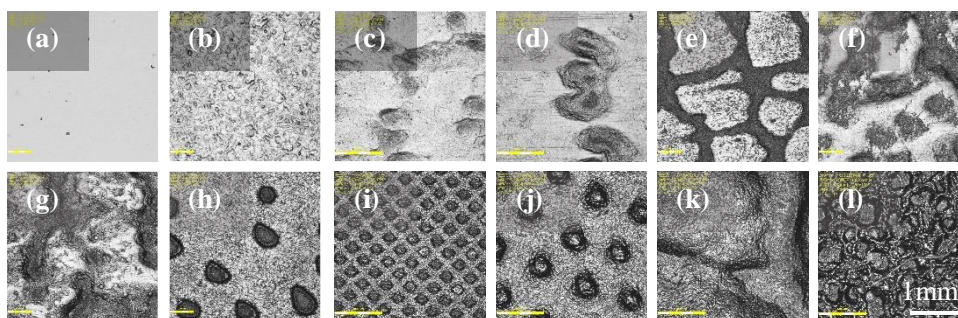


Fig. 1 Surface observation image of a silicone rubber captured by laser microscopy, (a) 1:Enamel, (b) Cordovan, (c) Lamb A, (d) 2:Lamb B, (e) 6:Elk A, (f) 7:Cow, (g) 8:Elk B, (h) 3:Sheep B, (i) 9:Smooth, (j) 10:Fine Grain, (k) 4:Textile, (l) 5:Nubuck.

物理量は、従来の手触り感評価や先行論文(1) に用いられた、粗さとうねりに分離した算術平均面粗さ、平均摩擦係数、接触角、接触角ヒステリシスを測定した。

算術平均面粗さは、レーザー顕微鏡(LEXT OLS4100; オリンパス株式会社)を用いて測定した。カットオフ値を $800\mu\text{m}$ に設定し、粗さ Sa とうねり Wa を測定した。連続した 9 画像を計測して平均値を求めた。

平均摩擦係数 MIU は、表面摩擦測定器(NT-01; カトーテック株式会社)を用いて、計測長さ間の摩擦係数の平均値を測定した。計測長さと移動速度は、それぞれ 100mm 、 10mm/s とした。3 回測定して平均値を求めた。

接触角 θ と接触角ヒステリシス CAH は、接触角計 (FTA1000; First Ten Angstroms) を用いて測定した。接触角の測定には、液適法を用い、液適量を $2.0\mu\text{l}$ として、3 回測定して平均値を求めた。接触角ヒステリシスの測定には、拡張収縮法を用い、液適量を約 $30\mu\text{l}$ とし、3 回測定して平均値を求めた。いずれの計測とも、液滴には精製水を用いた。

2.2 官能検査

被験者には成人した女子学生 20 名を用いた。女性の方が男性よりも触感を鋭敏に評価することでできるといわれているため、実験パネルは女性に限定した⁷⁾。評価に先立ち、官能検査のプロトコルは「長野工業高等専門学校研究倫理委員会」の承認を受けた。被験者には、検査の趣旨を口頭と書面の双方で十分に説明し、書面で同意を得た。評価対象のシリコン試料は、シリコンゴム製のスマートフォンケースの外表面に両面テープで貼り付けた。スマートフォンケースには、携帯電話と同等サイズのアلم板をセットした。

触感評価の形容語には、先行研究に対応した、「ざらざらした」、「やわらかい」、「しっとりした」、「すべりやすい」、「触り心地がよい」の 5 つの形容語を用いた⁹⁾。

触感の定量化には、一対比較法の中屋の変法を用いた。被験者には、5 種類のシリコン試料から 2 種類ずつランダムに組み合わせて 1 対にしたシリコン試料対を提示し、1 対のシリコン試料対に対して各 1 回、触感の差異を -2 ~ +2 の 5 段階尺度で判定させた。

官能検査の結果は、平均嗜好度を算出して定量化したのち、平均嗜好度に対する主効果、組み合わせ効果を算出した。主効果および組み合わせ効果は分散分析によって検定した。

主効果は、シリコン試料間の特性の差が触感の判断に与えた影響を判定するために、組み合わせ効果は、特定のシリコン試料対の組み合わせで生じた効果を求めるために、それぞれ算出した。

官能検査に先立ち、被験者に座位をとらせ、アイマスクで目隠しした。そして、被験者に机の上に置かれたシリコン試料対を、利き手の人差し指で 500 円硬貨サイズの円を描くように触らせた。官能検査は、異なる 5 種類のシリコン試料の組み合わせで 2 回実施した。

最後に、物理量と触感の関係を解析するために相関分析とクラスター分析を行った。クラスター分析では、物理量の計測結果を用いてシリコン試料の分類を行った。

3. 実験結果と考察

3.1 物理量の計測

図 2 に、シリコン試料 12 種類の粗さとうねりを計測した結果を示した。粗さは $0.3\mu\text{m}$ ~ $24.3\mu\text{m}$ 、うねりは $0.3\mu\text{m}$ ~ $25.0\mu\text{m}$ の範囲に分布した。

粗さの計測結果をもとに、粗さが異なる組み合わせになるように、2 回の官能検査に用いる試料をそれぞれ選定した。1 回目の官能検査には粗さの範囲が広がるように、粗さが最小 $0.3\mu\text{m}$ と最大 $24.3\mu\text{m}$ の試料を含めた Enamel, Lamb B, Sheep B, Textile, Nubuck を、2 回目の官能検査には粗さの範囲が狭くなるように、粗さが $5.1\mu\text{m}$ ~ $12.5\mu\text{m}$ の Elk A, Cow, Elk B, Smooth, Fine Grain をそれぞれ用いた。

3.2 官能検査

図 3 には、2 回の官能検査において触感の主効果が有意であり、組み合わせ効果が認められなかった触感「触り心地がよい」と「すべりやすい」との関係を示した。「触り心地がよい」に対して、「すべりやすい」の相関係数は 1 回目の官能検査で 0.85 ($p = 0.07$)、2 回目の官能検査で 0.99 ($p = 0.001$) と、2 回の官能検査において正の相関を示した。

2 回目の官能検査では Smooth と Fine Grain が、図 2 の第 1 象限に分布し「すべりやすく、触り心地がよい」試料であった。しかし、1 回目の官能検査では Nubuck と Textile が「すべりやすい」に分布したが、図 2 の第 1 象限に分布し「触り心地がよい」のは Nubuck のみであった。Textile は図 2 の第 2 象限に分布し「すべりやすいが、触り心地がよくない」試料である。

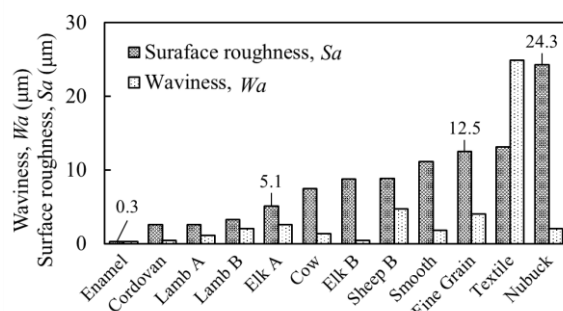


Fig. 2 Surface roughness and waviness measurement results of silicone rubber with a structured surface.

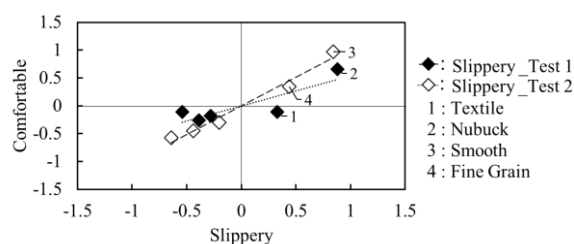


Fig. 3 Correlation between the tactile sensations of comfort and slipperiness.

図4と5には、「触り心地がよい」と正の相関があった「すべりやすい」と粗さおよび平均摩擦係数の関係を示した。「すべりやすい」に対して、粗さの相関係数は1回目の官能検査で0.98 ($p=0.004$), 2回目の官能検査で0.71 ($p=0.18$)と正の相関を、平均摩擦係数の相関係数は1回目の官能検査で-0.94 ($p=0.02$), 2回目の官能検査で-0.71 ($p=0.18$)と負の相関を示した。「すべりやすい」試料の Textile, Smooth, Nubuck, Fine Grain の4つは、図3において他の試料よりも粗さが大きく平均摩擦係数が小さかった。

図6と7には、平均摩擦係数とうねりおよび接触角を変数に用いたクラスター分析の結果を示した。階層クラスタリングによって12種類のシリコン試料を4つに分類した。Textile が, Smooth, Nubuck, Fine Grain の3つの試料とは離れて、うねりが大きいことでクラスターD、接触角が小さいことでクラスターFと、単独のクラスターで分布した。Nubuck と Fine Grain は同じクラスターに分類された。

Textile, Smooth, Nubuck, Fine Grain の4つの試料は粗さが大きく平均摩擦係数が小さいことで「すべりやすい」触感であると考えられた。しかし、「すべりやすさ」と正の相関があった「触り心地」においては、Textile とその他 Smooth, Nubuck, Fine Grain で触感が異なった。この原因は2つ考えられる。1つ目に、2回の官能検査それぞれで触感評価をした粗さの領域が異なったためと考えられる。2つ目に、クラスター分析でうねりと接触角の値によってTextileが他の試料から離れて分類されことから、触り心地へのうねりや接触角の影響が示唆されたためと考えられる。

4. おわりに

本研究では、表面に凹凸構造を有するシリコンシートにおける「触り心地がよい」と関係のある触感及び物理量を明らかにするために、作製した試料に対して物理量の測定と触感の官能検査、測定結果に対して相関分析およびクラスター分析を行った。「触り心地」と「すべりやすさ」には正の相関があり、これら触感に対しては粗さが正の相関、平均摩擦係数が負の相関があった。加えて、「触り心地」にはうねりや接触角が影響していることや、Nubuck と Fine Grain の触感が類似していることが示唆された。今後、粗さの大きさが近くうねりまたは接触角の大きさが異なる試料の組み合わせや Smooth, Nubuck, Fine Grain, Textile の組み合わせの官能検査によって、触り心地に影響する物理量の関係について更なる検討が必要とされる。

文献

- 1) 青山・中塚: デジタルスタイルデザインに関する研究-シボ(テクスチャ)デザインシステムの開発-, 精密工学会誌, 75, 7 (2009) 847.
- 2) 村田・金井・嘉村・森嶋・西松: 表面塗装が本革ステアリングホイールの「握り心地」評価に及ぼす影響, J. Text. Eng., 57, 6 (2011) 139.
- 3) 岡本: 触感と摩擦, トライボロジスト, 69, 8 (2024) 553.
- 4) L. S. Lederman: Tactile roughness of grooved surfaces: The touching process and effects of macro- and microsurface structure, Perception & psychophysics, 16, 2 (1974) 385.
- 5) N. Kawasegi, M. Fujii, T. Shimizu, N. Sekiguchi, J. Sumioka & Y. Doi: Evaluation of the human tactile sense to microtexturing on plastic molding surfaces, Prec. Eng., 38 (2014) 292.
- 6) 千葉・黒田・山口: 複数の物理的指標に基づいた皮革の手触り感の評価手法の提案, ライフサポート, 30, 2 (2018) 44.
- 7) 神川・野々村・前野: 皮膚上塗布物のトライボロジ特性と触感の関係, 日本機械学会論文集(C編), 73, 730 (2007) 1827.

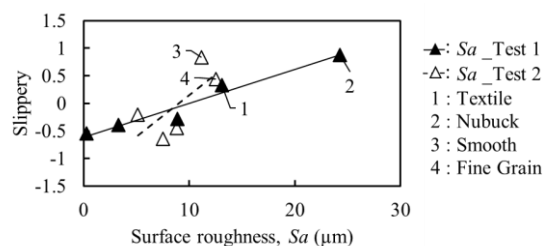


Fig. 4 Correlation between the tactile sensations of slipperiness and surface roughness.

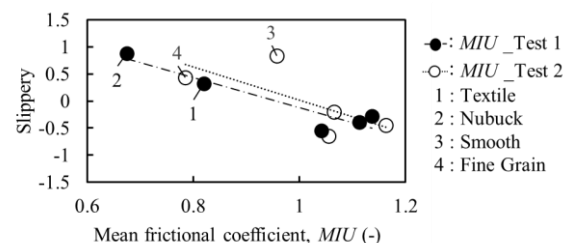


Fig. 5 Correlation between the tactile sensations of slipperiness and mean frictional coefficient, MIU.

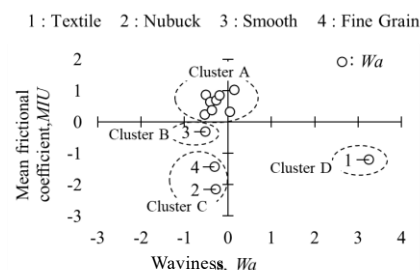


Fig. 6 Results of cluster analysis involving the mean frictional coefficient and waviness.

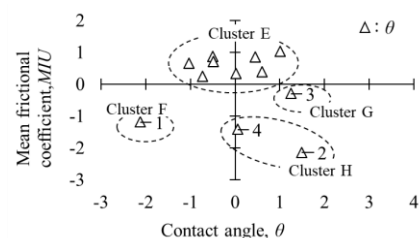


Fig. 7 Results of cluster analysis involving the mean frictional coefficient and contact angle.