生体由来の物質の触感とトライボロジー

－皮膚・毛皮・木材の質感の物理的起源－

Tactile Feel and Tribology of Biological Materials

－ Physical Origin of Texture of Skin, Fur and Wood －

野々村美宗

山形大学大学院

〒992-8510

山形県米沢市城南 4-3-16

Yoshimune NONOMURA

Graduate School of Science and Technology,
Yamagata University

4-3-16 Jyonan, Yonezawa 992-8510, JAPAN

論文要旨：われわれは、毛皮・木などの生体由来の物質の手触りの特徴は、温かくてさらさらしていてツルツルしていないことであることを明らかにした。これらの触感は触対象の熱物性、表面エネルギーおよび表面粗さによって支配されていた。多変量解析の結果から、これらの三つの支配因子のなかで表面粗さが最も重要であることがわかった。また、被験者が毛皮や木に触れると、好感や快適感が喚起された。これらの知見は、さまざまな工業製品を開発するうえで有用なだけでなく、ヒトが生物を認知するメカニズムを理解するうえでも重要である。

Abstract: We show that the features of biological materials, i.e. fur and wood, are warm, silky, and nonslippery sensations, which are governed by thermal conductivity, surface energy, and surface roughness. Interestingly, surface roughness is the most important factor in determining these three tactile sensations. When subjects touched biological materials, they perceived favorable feels: “Suki” and “Kaiteki”. These finding are valuable for developing some industrial products as well as for understanding the cognitive mechanism of biological materials.

Key words: features of biological materials, thermal conductivity, surface energy, surface roughness, tactile sensations, cognitive mechanism

1 はじめに

私たちは、何かを目にした時に、それが生きているか、あるいはそうでないか何となく感じることもある。もしもそれがごくありふれた丸い点だったとしても、ある規則的な幾何学的な運動をしていると、あたかも生き物であるかのように感じる^{1,2)}。また、点が自律的に動いているようにふるまったり、他の点と相互作用をしているように感じられた場合にも、われわれは生物を連想する³⁾。幼い子供ですら、モノの動く軌跡からそこに他者との相互作用や目的性を読み取って生物と無生物を区別してい

ると言われている⁴⁾。一方、われわれが生物らしさを感じるのは、何かを見たときだけではなく。生物や生物由来の物質に触れることによっても、さまざまな感覚や感情が喚起される。動物、赤ちゃん、さらさらした髪の毛に触れることで、ポジティブな感情が喚起されることは幾つかの研究グループによって指摘されているし⁵⁾、馬に触れたときの心拍数の変化から、動物に触れることによって「ペット効果」と名付けられるような感情が現れることも報告されている⁶⁾。もちろん、ヘビや魚、ゴキブリは生物といえどもネガティブな感情を喚起するが、一方で、木や皮革の手触りは多くの人に好まれるため、さまざまな工業製品の原料として用いる。また、化粧品の商品開発においても皮膚や髪の毛などの生体物質の触

連絡者：野々村美宗
E-mail：nonoy@yz.yamagata-u.ac.jp

感の特徴を物理的な見地から理解することは重要である。これらの臓器の手触りは、それらの健康状態や化粧品の効果を判断するうえで重要なバロメータだからである⁷⁾。Prall はヒトの皮膚の健康さはシミや色むらだけでなく滑らかさや柔らかさによっても判断されることを報告している⁸⁾。アトピー性乾燥肌の摩擦係数は正常肌よりも低いことが知られているし、加齢とともにきめが少なくなると摩擦係数が大きくなるとも言われている^{9, 10)}。皮膚の物性や手触りの違いによって健康状態が判断されるプロセスの中には、各個人が持っている標準的な皮膚らしい手触りと実際の感触を比較する、という心理的な過程が存在する。このように、触覚を通して生物と非生物、あるいは生物由来の物質がどのように認知されているか、という課題を解明することは、認知科学上重要であるだけでなく、化粧品をはじめとする、触れることによってその価値が認識されるすべての商品を設計・開発するうえでも有用である。

モノの手触りを評価する触覚センサーは数多く提案されている¹¹⁾。皮膚表面に加わる力学的な刺激は、歪ゲージや感圧導電性ゴム、光学素子、磁気抵抗子を用いてセンシングされる。さらに、これらの素子をモジュール化することで、ロボットの体表面や医療・福祉機器への実装も試みられている。筆者らは、ヒトがモノに触れた時の触感と指に加わる力を同時に評価できる手触り評価装置を用いて、ヒトがモノに触れた時の触感とその物理的起源の解明に努めてきた¹²⁻¹⁵⁾。われわれは、「生物らしい手触り」という抽象的で繊細な感覚を理解するためには、触感の官能評価と物性評価を同時にすることのできる本装置が有用であると考えている。生き物はアクティブに環境に働きかけることによって多様な情報を得ている^{16, 17)}。モノに触れた時に発生する触力覚情報は接触の動作や速度によって変化する^{18, 19)}。そのため、モノの触感の生成メカニズムを正確に理解するためには、官能評価と摩擦などの物性評価を同時に行うことが望ましい。まずはヒトにその触対象を自由に触らせ、その時に発生する感覚と皮膚に加わった刺激の関係を解析することが有効である。

本総説では、われわれが用いている手触り評価装置の概要を紹介した後、人工皮膚、木、兎の毛皮など7つの物質について、手触りの生物らしさを示す「生物度」を評価した結果を紹介する²⁰⁾。「生物度」とは、被験者が手触りから連想したモノを基に導いた指標である。手触りの生物らしさ、という複雑な心理的概念を官能評価から導き出すために、この新しい指標を開発した。心理物理実験においては、なるべく適切な質問項目と尺度を設定することが重要である²¹⁾。筆者には、被験者に「こ

の手触りは生物らしいですか？」と質問することはいささか唐突のように感じられたため、「この手触りからどんなモノを連想しますか？」という問いかけに対する回答から、被験者が感じている感触の生物らしさを類推することとした。次に、生体由来の物質の中でも、とくに皮膚の手触りの特徴について解析した結果について概説する。さらに、これらの物質に触れた時に喚起される感情を評価した研究の成果に触れる²²⁾。

2 手触り評価装置の概要と特性

われわれが使用している手触り評価装置の概要を Fig. 1 に示す。2枚の板ばねからなる平行移動機構に貼付したひずみゲージにより、試料に触れた時の接線方向および法線方向の応力が測定できる。被験者は、装置に設置された基板上に人差し指を置き、左右方向に自由に動かして触感を評価する。これまでに、白土らは布、紙、木、金属など固体材料の手触りを評価し、粗さ感、冷温感など4つの感性因子によってこれらの触感が区別されていることを示した²³⁾。また、神川らは化粧品に用いられる油剤やパウダーの手触りと摩擦特性の関係を系統的に解析し、べたべた、さらさら、しっとりなどの触感の発現機構を明らかにした¹³⁾。さらに最近では、水や油、エタノールなどの水溶液の手触りを評価し、水の手触りの特徴がキュキュッと感であり、この感覚は数十 ms おきに皮膚に数 N のせん断力が加わることに起因することを明らかにした¹⁴⁾。また、テフロンやポリエチレンなどの疎水性表面では、水と油を触り間違えることはないが、ガラス板上では多くの被験者がこの二つの感触を区別できないことも示した¹⁵⁾。このようにこの手触り評価装置は固体試料だけでなく、液体や粉体の手触りを評価し、その発生メカニズムをトライボロジーの観点から解析することができる優れたものといえる。

Fig. 1 Photograph of the tactile evaluation system. This device measures the friction forces and vertical stresses using strain gauges on two plate springs.

3 生体由来の物質の手触り

30名の被験者が手触り評価装置に設置された7種類の固体試料に触れた時の生物度を評価した。7つの固体試料の生物度と物性値を Fig. 2 に示す。被験者には、各試料の手触りから連想するモノとその理由を挙げてもらい、それを基に「生物度」を3段階で評価した。生物度3は毛皮や人肌などの生体由来の物質、生物度2はぬいぐるみ、布、糸などの生体由来の物質の加工品、生物度1は非生体物質とした。兎の毛皮が最も高い生物度=2.8を、アルミが最も低い1.2を示した。これらの結果は、多くの被験者が兎の毛皮に触った時に生体物質又はその加工品を、アルミに触った時、非生体物質をイメージしたことを示している。また、生物度によって固体試料を3つのグループに分類することができた。第1は生物度の最も高い兎の毛皮と木からなるグループ、第2は生物度が中程度の人工皮膚とゴムからなるグループ、第3は生物度の最も低いPET、ガラス、アルミからなるグループである。

どのような摩擦抵抗が生物らしい手触りを喚起するのだろうか？手触り評価装置によって測定された摩擦データは、生物度の高い固体試料は、摩擦抵抗が低いことを示している。水平応力、垂直応力および摩擦係数のプロファイルを図3に示す。固体試料上で指を左右に動かした時、摩擦力と摩擦係数は正と負のシグナルを示した。

Fig. 2 Tactile index of biological materials (TIB) of seven objects. This index rated on a three-points scale; where score 3 means objects of biological origin; score 2, artifacts of objects of biological origin; score 1, non-biological materials. The physical properties of the objects, i.e. thermal conductivity λ , Young's modulus E , surface roughness R_a , surface energy γ , static friction coefficient μ_s , dynamic friction coefficient μ_D , and temperature difference ΔT , are also shown. The symbols **, ***, and N.S. mean $P < 0.01$, $P < 0.001$, and nonsignificant in t -tests.

Fig. 3 Change in frictional coefficient (straight lines), friction force (dot-lines) and vertical stress (dashed-lines) when a subject rubbed rabbit fur (a), pine wood (b), and aluminium (c) by a fingerpad. Positive signals on the friction force and frictional coefficient demonstrate a frictional resistance to the right, and negative signals to the left.

正のシグナルは右方向への、負の信号は左方向への摩擦抵抗を示している。生物度の高い第1グループに属する兎の毛皮の静摩擦係数と動摩擦係数はそれぞれ 0.6 ± 0.2 , 0.5 ± 0.3 だった (Fig. 3a)。これらの摩擦係数は他のグループより明らかに低かった。生物度が中程度の第2のグループに属する人工皮膚の静摩擦係数と動摩擦係数はそれぞれ 0.8 ± 0.3 , 0.6 ± 0.3 だった (Fig. 3b)。さらに、生物度が最も低い第3のグループに属するアルミは、 2.2 ± 1.3 , 1.7 ± 0.8 だった (Fig. 3c)。これらの結果は、摩擦抵抗が小さいことは生体物質の手触りの一つの特徴であることを示している。

生体物質の手触りの特徴を明らかにするために、生物度と触感に関する官能評価の関係を解析した。その結果、

生体物質の手触りの特徴は「温感」,「サラサラ感」,「ツルツル感」であることが分かった (Fig. 4a)。この図において, 単方向の矢印は因果関係を, 双方向の矢印は相関関係を示している。「温感」,「サラサラ感」,「ツルツル感」は生物度に対して各々 0.29, 0.32, -0.29 の寄与率を示した。すなわち, $\text{生物度} = 0.29 \times (\text{温感}) - 0.29 \times (\text{ツルツル感}) + 0.32 \times (\text{サラサラ感}) + 0.37$ という関係を示している。

これらの手触り因子は固体試料の熱伝導度 (λ_c) と表面粗さ (R_a), さらに手触り評価時の摩擦抵抗 (μ_D) に支配されていることが分かった (Fig. 4b)。動摩擦係数から「サラサラ感」への寄与率は -0.47, 表面粗さから「ツルツル感」への寄与率は -0.47 だった。これらの結果は「サラサラ感」は動摩擦係数を小さくすることで, 「ツルツル感」は表面粗さを大きくすることで制御できることを示唆している。「サラサラ感」と「ツルツル感」の物理的起源が単一であるのに対し, 「温感」の物理的起源は熱伝導度と表面粗さの二つであることが明らかになった。熱伝導度と表面粗さは「温感」に対して各々 -0.20, 0.43 の寄与率を示した。これらの結果は「温感」は熱伝導度を小さく, 表面粗さを大きくすると高めることができることを示している。

本研究は, 生体由来の物質の手触りの特徴とその物理的起源に関するはじめての報告である。ここでは, 今回

検討した7つの固体試料の中で, 被験者が手触りを通して生物と無生物を区別したメカニズムについて考察する。生物度を指標とした解析から, ヒトはモノに触れた時に得られる情報の中から, 「温感」, 「サラサラ感」, 「ツルツル感」に基づいて生物由来の物質を判断したことが明らかになった。温かく, サラサラしていて, ツルツルしていないものに触れた時に生物/生体物質として認識がなされた。この結果はわれわれが抱いている一般的なイメージと一致する。さらにこれらの手触り因子は熱伝導度, 表面粗さ, 動摩擦係数により制御できる。最も生物度が高い兎の毛皮は, 熱伝導度が $0.04 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, 表面粗さが $9.0 \mu\text{m}$, 動摩擦係数が 0.5 だったのに対し, 最も生物度が低いアルミは熱伝導度が $240 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, 表面粗さが $0.6 \mu\text{m}$, 動摩擦係数が 1.7 だった。兎の毛皮は最も熱伝導度が小さく, 表面粗さが大きく, かつ動摩擦係数が小さいため, 突出して高い生物度を示したものと考えられる。

われわれは, さまざまな生体由来の物質の中でも, ヒト皮膚の手触りの特徴を明らかにすることにも成功している¹²⁾。ヒト皮膚は固さの異なる複数の層からなっているだけでなく, その表面に細かい規則的な凹凸が存在するために, 特徴的な摩擦特性を示す。ヒト皮膚は最も表面にある表皮とその下にある柔らかい真皮に分類される。さらに, 皮膚の表面にはきめと呼ばれる細かいパターンが存在する。ヒト皮膚の摩擦特性をはじめて評価したのは Naylor だと言われている²⁴⁾。その後, Comaish らはさまざまな物質に対する皮膚の摩擦係数を評価し, ヒト皮膚は粘弾性であるため単純なアモントン則では説明できないこと, 摩擦を評価するプローブによって摩擦係数が変化することを示した²⁵⁾。皮膚の摩擦特性はプローブの材質だけでなく, その動かし方や皮膚の状態によっても変化する²⁶⁾。われわれは, 指で触ったときの感触がヒト皮膚と極めてそっくりな人工皮膚を開発した (Fig. 5)¹²⁾。この人工皮膚は, 柔らかいシリコンゴムからなる深層と硬いウレタン樹脂からなる表層の二層からなっている。ウレタン樹脂の表面には, 深さ $200 \mu\text{m}$ の六角形の溝が $600 \mu\text{m}$ 間隔で刻まれている。この人工皮膚を 12 人の被験者が触ったところ, 10 名が「ヒトの皮膚に似ている」と回答した。因子分析により, 「しっとりしていて, なめらかなこと」が皮膚の手触りの特徴であることがわかった。また, ヒト皮膚との類似性を高めるためには, 人工皮膚の素材や硬さを最適化するだけでなく, 表面に数百 μm の間隔で凸凹を刻むことが重要であることが示された。このことから, 皮膚表面の幾何学的な特徴はその手触りを左右する重要な因子であることが明らかになった。

Fig. 4 Path diagrams between tactile index of biological materials and tactile factors (a), and physical factors and tactile factors (b).

Fig. 5 Photograph of an artificial skin.

4 生体由来の物質の触感によって喚起される感情

生体由来の物質の触感によって喚起される感情を明らかにするために、6名の被験者を対象とした官能評価を行った。前章で取り上げたのと同じ7つの固体試料に触れて貰い、180語の感情に関する言葉の中から、その時の感情と最も適合するものを選択して貰った。その結果、6人中1人以上が選択した言葉は59語だった。さらに、生体由来の物質である兎の毛皮・松木材・人工皮膚で喚起され、天然ゴム・PET・ガラス・アルミで喚起されなかった感情は「好き」、「快適」であった。以後、これらの言葉で示される感情を「好感」および「快適感」とする。Table 1に6名の被験者が触対象に触れた時に好感および快適感が喚起された人数を示す。PET・ガラス・アルミに触れた時は誰もこれらの感情を喚起されなかったのに対し、毛皮や木に触れた時は3名以上が好感を、2名以上が快適感を感じた。これらの結果は、産業界で広く用いられている生体由来の物質は、無生物物

質よりもポジティブな感情を強く喚起することを示している。

好感や快適感はどうのようにして喚起されるのだろうか？感性因子の中でも「サラサラ感」と「ツルツル感」は好感に対し特徴的な傾向を示した(Table 1)。すなわち、6名の被験者のうち5名以上が、好感を喚起しやすい兎の毛皮や松木材に触れた時に「さらさら」という感覚語を選択した。今後、この言葉で示される感覚を「サラサラ感」とする。一方で、3名以上の被験者が、好感を喚起しにくいガラスやアルミに触れた時に「つるつる」という感覚語を選択した。今後、この言葉で示される感覚を「ツルツル感」とする。次に、好感が喚起されるメカニズムを明らかにするために、感情・触感に関する心理的パラメータと触対象の物性の関係を多変量解析した。好感は「サラサラ感」と「ツルツル感」に支配されており、「サラサラ感」が高く、「ツルツル感」が低いほど好感が高まることを示していた。また、「サラサラ感」、「ツルツル感」と動摩擦係数の間には相関係数 -0.70 , 0.46 の相関が、表面粗さとの間には 0.39 , -0.80 の相関が示された。以上のことから、生体由来の物質に触れた時に喚起されるポジティブな感情は、触対象がサラサラしていてツルツルしていない時に現れること、これらの感情にも触対象の摩擦特性と表面構造が関与していることが明らかになった。

5 おわりに

生命とは何か、という問いに答えることはサイエンスの最も重要な課題の一つである^{27, 28)}。「われわれは生命をどのように認知しているか」という問いも認知科学的見地から興味深い。われわれの研究によって、生体由来の物質に接触した時に皮膚上に加わる力学的な刺激とその時に喚起される感情の関係が明らかになったことがこれらの命題を解決するためのささやかな一助となれば幸いである。なお、本研究で得られた知見は、今回検討し

Table 1 Sensory factors and physical factors for seven substrates. R_a : surface roughness, μ_D : dynamic friction coefficient.

Substrate	Emotional factors		Tactile factors		Physical factors	
	Suki	Kaiteki	Silky feel	Slippery feel	μ_D	R_a/m
Rabbit fur	5	3	6	0	0.52	8.96×10^{-6}
Pine wood	3	2	5	2	0.61	1.04×10^{-6}
Artificial skin	1	1	0	0	1.08	1.71×10^{-6}
Natural rubber	1	0	2	4	0.88	0.92×10^{-6}
PET	0	0	2	5	1.75	0.35×10^{-6}
Aluminium	0	0	0	4	1.74	0.61×10^{-6}
Glass	0	0	0	3	1.89	0.72×10^{-6}

た7つの固体物質の中で毛皮や木が生物らしい手触りとして認識されたメカニズムを説明したにすぎない。本来であればわれわれが手を触れることのあるすべての物質について生物度を評価し、その結果に基づいて生物らしい手触りの発現メカニズムが解析されるべきであるが、心理物理実験の設計上の制約から、手触りに特徴のある幾つかの固体試料に限定せざるを得なかった。また、今回ご紹介した抽象的な概念を心理物理実験によって評価し、その物理的支配因子を抽出していく技術は必ず化粧品を評価したり、商品設計を進めるうえで有用であるものと確信する。これまでの化粧品のトライボロジーと使用感の関係に関する研究については既報を参考されたい⁷⁾。近年、ナノ～メソスケールの界面で起こる生命現象に関する物理的・化学的理解は飛躍的に進み、生命体が形作られ、それがダイナミックに運動するメカニズムについては少しずつ明らかになりつつある²⁹⁾。今後は、外部からの刺激に反応して感覚や感情が自発的に喚起される心の動きの仕組みが解明されていくであろう。

謝 辞

本研究は科学研究補助金基盤研究(C)(22540417)および株式会社東海理化の研究助成によって行われた。

文 献

- 1) F. Heider & M. Simmel, *Am. J. Psychol.*, **57**, 243-9 (1944).
- 2) B. J. Scholl & P. Tremoulet, *Trends Cognitive Sci.*, **4**, 299-309 (2000).
- 3) J. Bassilli, *J. Person. Soc. Psychol.*, **33**, 680-5 (1976).
- 4) D. H. Rakison & D. Poulin-Dubois, *Psychol. Bull.*, **127**, 209-28 (2001).
- 5) 浜治世, 文教女子大学紀要, **1**, 109-38 (1997).
- 6) J. K. Vormbrock & J. M. Grossberg, *J. Behavioral Med.*, **11**, 509-17 (1988).
- 7) 野々村美宗 & 前野隆司, トライボロジスト, **54**, 371-6 (2009).
- 8) J. K. Prall, *J. Soc. Cosmet. Chem.*, **24**, 693-707 (1973).
- 9) M. Lodén, H. Olsson, T. Axéll & Y. W. Linde, *Br. J. Derm.*, **126**, 137-41 (1991).
- 10) K. Nakajima & H. Narasaka, *Intl. J. Cosmet. Sci.*, **15**, 135-51 (1993).
- 11) 下条誠, 前野隆司, 篠田裕之, 佐野明人 監修, 触覚認識メカニズムと応用技術－触覚センサ・触覚ディスプレイ, サイエンス & テクノロジー (2010).
- 12) 白土寛和, 野々村美宗 & 前野隆司, 日本機械学会論文集 (C編), **73**, 541-6 (2007).
- 13) 神川康久, 野々村美宗 & 前野隆司, 日本機械学会論文集 (C編), **73**, 1827-33 (2007).
- 14) Y. Nonomura, T. Fujii, Y. Arashi, T. Miura, T. Maeno, K. Tashiro, Y. Kamikawa & R. Monchi, *Colloids Surf. B*, **69**, 264-7 (2009).
- 15) Y. Nonomura, Y. Arashi & T. Maeno, *Colloids Surf. B*, **73**, 80-3 (2009).
- 16) J. J. Gibson, *Psychol. Review*, **69**, 477-91 (1962).
- 17) J. H. Solomon & M. J. Hartmann, *Nature*, **443**, 525 (2006).
- 18) S. J. Lederman & R. L. Klatzky, *Cognitive Psychol.*, **19**, 342-68 (1987).
- 19) M. A. Srinivasan & R. H. LaMotte, *J. Neurophysiol.*, **73**, 88-101 (1995).
- 20) T. Miyashita, T. Maeno & Y. Nonomura, *Colloids Surf. B*, **80**, 176-9 (2010).
- 21) 小塩真司 & 西口利文, 質問紙調査の手順, ナカニシヤ出版 (2007).
- 22) 宮下高明, 前野隆司 & 野々村美宗, *J. Jpn. Soc. Colour Mater.*, **84**, 169-72 (2011).
- 23) 白土寛和, 前野隆司, 日本バーチャルリアリティー学会論文誌, **9**, 235-40 (2004).
- 24) P. F. D. Naylor, *Br. J. Derm.*, **67**, 239-48 (1955).
- 25) S. Comaish & E. Bottoms, *Br. J. Derm.*, **84**, 37-43 (1971).
- 26) R. K. Sivamani & H. I. Maibach, *Proc. IMechE Part J.*, **220**, 729-37 (2006).
- 27) シュレーディンガー, 生命とは何か, 岩波書店 (2008).
- 28) ピエル・レイジ・ルイージ, 創発する生命 化学的起源から構成的生物学へ, NTT出版 (2009).
- 29) 日本化学会編, 現代界面コロイド科学の事典, 丸善 (2010).