



確率共鳴効果を用いた 肌触感の感度向上に関する研究

Improving the Sensitivity of Skin Texture Using the Stochastic Resonance

今野萌音¹⁾, 吉田成朗^{2,3)}, 雨宮智浩¹⁾, 鳴海拓志¹⁾

Mone KONNO, Shigeo YOSHIDA, Tomohiro AMEMIYA, and Takuji NARUMI

1) 東京大学大学院 情報理工学系研究科 (〒 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1, {konno, amemiya, narumi}@cyber.t.u-tokyo.ac.jp)

2) 東京大学 先端科学技術研究センター (〒 153-8904 東京都目黒区駒場 4-6-1, shigeo@star.rcast.u-tokyo.ac.jp)

3) 国立研究開発法人科学技術振興機構 さきがけ (同上)

概要: 日々のスキンケアで肌状態の変化を実感することは難しく、スキンケアを継続して行うモチベーションを保つことは難しいことが指摘されている。本研究ではスキンケアの効果実感を高めるために、肌状態の微細な変化を感じやすくする目的で、肌触感の感度を向上させる手法を提案する。予備検討として、手に振動を加えることで指先の感度を向上させられる確率共鳴効果に着目し、この効果が肌触感の感度向上に貢献するか調査した。

キーワード: 確率共鳴, 触覚, 肌触感

1. 研究の背景と目的

スキンケアには、美しく健康な肌状態にする効果だけでなく、肌状態の改善を実感することで物事に対するやる気をもたらす効果があることが示唆されている [1]。肌状態改善やその副次的効果を楽しむためには、適切なスキンケアを継続的に行うことが大切である。しかし、肌改善効果の実感には数週間から数ヶ月かかるため [2]、日々の努力に対する効果を実感することは難しい。実際に、スキンケア商品を使用しても効果の実感が得られるのに時間がかかった結果、効果を実感する前に別のスキンケア商品へ移ってしまう消費者が多数存在することが報告されている [3][4]。

このような問題に対し、筆者らは肌改善効果の実感を高めることができれば、適切なスキンケアの継続を促すことができると考えた。肌の改善効果は、視覚や触覚で知覚できる肌状態の変化を通じて判断され、肌状態の判断は、肌の明るさ（視覚情報）よりも、肌表面の触感・ざらつき（触覚情報）に頼るところが大きいことが知られている [5]。そこで、効果実感を高めるためのアプローチとして、少しの肌状態の変化でも人が知覚できるように、触覚の鋭敏さを向上させる方法に着目した。本研究では、触覚の鋭敏さに影響を与える手法として、指先に適切な振動が伝わることで本来感じられなかった微細な物理的刺激を感じられるようになる効果である確率共鳴現象に着目した。本稿では、そのような手法を実現するための初期検討として、手に振動を加えた時に、肌触感の構成要素である粗さ度合いと乾燥度合いに対し確率共鳴現象が発生するか、検証実験を行った。

2. 関連研究

本研究では、肌触感に対する指先の感度向上を目指して、確率共鳴効果を利用する。確率共鳴効果によって、物体表面の粗さに対する感度が向上することが知られている。例えば、Kurita et al. は、指先に振動を加えることで、サンドペーパーの粗さに対する指先の識別率が向上することを明らかにした [6]。検証実験では、指先に振動子を装着して振動を加えていた。振動を感じる閾値を、実験参加者ごとに計測した上で、振動の振れ幅が、閾値の 0 倍, 0.5 倍, 0.75 倍, 1.0 倍, 1.25 倍, 1.5 倍の 6 種類の条件下における、識別率を検証した。その結果、適切な振動の振れ幅（閾値の 0.5 倍と 1.0 倍）で識別率が向上することが示された。一方、Ikemura et al. は、手首に振動子を装着することでサンドペーパーの粗さに対する指先の識別率が向上することを示した [7]。これらの先行研究は、振動を直接指先に加えるだけでなく、指先以外の箇所から適切な大きさの振動を指先に伝搬することで、確率共鳴現象が起り、粗さに対する感度が向上することを示している。

しかしながら、肌触感は粗滑・乾湿・硬軟の 3 要素で構成され [8]、粗滑と乾湿の間には、等しい乾燥度合いであっても粗いものほど乾いて感じ、滑らかなものほど湿って感じるという相互関係があることが知られている [9]。さらに、主な肌悩みとしてニキビ（粗さ）と乾燥が挙げられる [10]。よって、粗さ度合いだけでなく乾燥度合いを含む肌触感に対して確率共鳴効果が認められるかを検証する必要がある。また、スキンケア時は、指先に振動子がついていると、化

粧水が振動子に付着するのを避けねばならず、スキンケアの邪魔になる可能性がある。

以上より、本研究では指先だけでなく指先以外に振動を加えた場合に、粗さと乾燥に対する感度向上に確率共鳴効果が貢献するのを検証する。

3. 指先に振動を伝えるシステムの構成

先行研究 [6][7] を参考に、0 から 300Hz のガウシアンホワイトノイズによる振動をピエゾアクチュエータを用いて提示するシステムを作成した。まず、PC ソフトウェアの LabView を使用してホワイトノイズを作成した。このホワイトノイズは、人間の指先にある触覚受容器の周波数特性を考慮して、300Hz のカットオフ周波数をもったローパスフィルタをかけることで、0~300Hz の周波数帯域を持つよう設計された。次に、デジタル信号であるホワイトノイズを、アナログデジタル変換器 (USB-6212, National Instruments, Austin, America) を用いてアナログ信号に変換した。そして、増幅器 (LA75A, Cedrat Technologies, Meylan, France) で増幅した信号をピエゾアクチュエータに送ることで、ピエゾアクチュエータ (APA400M, Cedrat Technologies, Meylan, France) を振動させた。

4. 肌触感感度に対する確率共鳴効果の影響の検証

確率共鳴効果が肌触感の感度に及ぼす影響について調査する実験を行った。実験では、参加者の手に振動を加えながら 9 種類の人工皮膚試料を触ってもらい、肌触感の評価をしてもらった。

4.1 実験設定・実験条件

実験参加者は 20 歳から 24 歳までの女性 12 名で、平均年齢は 22.4 歳だった。実験は大学内の一室で行った。実験部屋には机を 1 つと椅子を 2 つ用意し、机には PC2 台、アナログデジタル変換器、増幅器とピエゾアクチュエータを配置した。PC1 台、アナログデジタル変換器、増幅器とピエゾアクチュエータは、振動を発生させるために使用した。残りの PC1 台は参加者にアンケートの回答をしてもらうために使用した。

実験は以下の 3 要素を変えながら、参加者内計画で行った。

- 振動を加える位置：図 1 のように、利き手の人差し指の指先、手の甲、手首の 3 種類の位置にテープでアクチュエータを固定し、振動を加えた。
- 加える振動の振れ幅：参加者の振動に対する閾値（振動を感じるか感じないかの境界値）の 0 倍、0.6 倍、1.2 倍の 3 種類の振動の振れ幅を使用した。
- 触る人工皮膚試料の質感（粗滑度合い・乾湿度合い）：人工皮膚試料は、ビューラックス社で販売している、3 種類の粗滑度合い（smooth・normal・rough）と 3 種類の乾湿度合い（wet・normal・dry）を組み合わせた 9 種類を使用した。

参加者の振動に対する閾値は参加者ごとに、さらに振動を加える位置を変えるごとに計測し直した。計測する際は Kurita

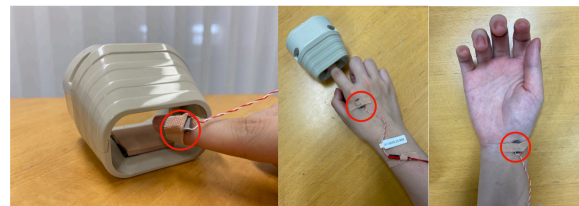


図 1: 振動を加える位置（人差し指の指先、手の甲、手首）

et al. の研究 [6] を参考に、極限法（上昇系列と下降系列を 3 回ずつ繰り返す）を利用し、上昇系列と下降系列の停止点の平均値を閾値とした。

4.2 実験手順

実験にあたり、参加者は実験に関する説明文書を読み、同意書への記入を行った。本実験の真の目的を知らせることが結果に影響することを防ぐため、参加者には「手に加える振動が肌触感に与える影響に関する実験」と伝えた。

最初に、参加者の振動に対する閾値を計測した。ピエゾアクチュエータから発する音の大きさが計測値に影響を与えることを避けるため、閾値を計測している間は、参加者にノイズキャンセリング機能を有したヘッドフォンを着用してもらった。実験者が振動の振れ幅を上昇・下降させ、参加者にはそれぞれ振動を感じ始めた瞬間と感じなくなった瞬間に手を挙げて合図を出してもらった。

次に、参加者には、加える振動の振れ幅の各条件下で、9 種類の人工皮膚試料を触りながら触感を評価してもらった。試料は振動を加えている手の人差し指指先で触ってもらった。9 種類の人工皮膚試料を触る順番は、実験者が参加者ごとにランダムに変更した。これら 9 種類の試料のスコア付けによる評価は、加える振動の振れ幅に関する 3 種類全ての条件下で行うため、試料の触感に関する評価を 3 セット行ってもらった。3 種類の振動の振れ幅はランダムな順番で提示された。

閾値計測から試料のスコア付け 3 セットを行うまでの手順を、振動を与える位置の各条件下（人差し指の指先、手の甲、手首）で行なった。つまり、触感に対する評価の総試行数は、参加者一人当たり 3（振動を与える位置 3 種類）× 9（試料 9 種類）× 3（振動の振れ幅 3 種類）となる。振動を与える位置は参加者ごとにランダムな順番に変更した。

4.3 実験仮説

先行研究 [11][12] によると、指先・手の甲・手首に振動を加えた時の人差し指指先の触覚感度は、振動の振れ幅が閾値の 0.6 倍であるときに最も向上する。したがって、本実験においても振動を加える 3 種類の位置すべての条件下で、振動の振れ幅が閾値の 0.6 倍であるときに人工皮膚試料の質感に対する感度が高くなると考えた。

また、物質の質感評価において、粗いものほど乾いて感じ、滑らかなものほど湿っていると感知することが知られている [9]。つまり、同じ乾湿度合いの試料であっても、確率共鳴効果で粗さを強く感じることであれば、乾燥を強く

感じさせられる可能性がある。さらに、試料の粗さ度合いが低い場合、そもそも乾燥を感じにくく、確率共鳴効果が乾燥に対する感度向上に貢献できない可能性もある。よって、確率共鳴効果が乾燥に対する感度へどのように影響を及ぼし得るのか確認する必要がある。

4.4 評価方法

人工皮膚試料の質感に対する感度は、参加者による人工皮膚試料の粗さと乾燥に対するスコア付けの値によって評価した。参加者には、「基準試料の粗さ度合いと乾燥度合いをそれぞれ 100 点としたときにその試料の粗さ度合いと乾燥度合いは何点か正の値で評価して欲しい」と伝えた。基準試料として、粗滑度合い、乾湿度合いともに normal 条件である試料を使用した。つまり、粗さ度合いに関するスコアは基準試料よりもざらざらだと感じたら 100 より大きい値で、乾燥度合いに関するスコアは基準試料よりも乾燥していると感じたら 100 より大きい値を回答することになる。視覚情報で試料を評価されるのを避けるために、試料はケースに入れて参加者から見えないようにした（図 1 左）。また、基準試料と 9 種類の試料を区別するために、基準試料はグレー、9 種類の試料はホワイトのケースに入れた。

4.5 実験結果

振動を加える 3 種類の位置それぞれにおいて、振動の振れ幅・人工皮膚試料の粗滑度合い・人工皮膚試料の乾湿度合いの 3 要因分散分析を行った。

図 2 に示すように、人差し指の指先に振動を加えた場合、粗さ度合いのスコアに関して、試料の粗滑度合いの主効果 ($F(2,22) = 62.28, p < .05$) と、試料の粗滑度合いと試料の乾湿度合いの一次の交互作用 ($F(4,44) = 9.7925, p < .05$) に有意差が見られた。また、振動の振れ幅と試料の乾湿度合いの一次の交互作用 ($F(4,44) = 2.19, p = 0.086$) に有意傾向が見られた。Shaffer の方法による多重比較を行った結果、試料の乾湿度合いが dry 条件下で、振動の振れ幅が 0 倍と 0.6 倍の間に有意差が見られ ($0 \text{ 倍} < 0.6 \text{ 倍}, p < .05$)、振動の振れ幅が 0 倍の条件下で、試料の乾湿度合いが normal 条件と dry 条件の間で有意差が見られた ($\text{dry} < \text{normal}, p < .05$)。さらに、試料の乾湿度合いすべての条件 (wet・normal・dry) 下で試料の粗滑度合いに有意差が見られ ($\text{smooth} < \text{normal} < \text{rough}, p < .05$)、試料の粗滑度合いが smooth 条件のときに試料の乾湿度合いの間に有意差が見られ ($\text{dry} < \text{wet}, \text{dry} < \text{normal}, p < .05$)、試料の粗滑度合いが rough 条件のときに試料の乾湿度合いの間に有意差が見られた ($\text{wet} < \text{dry}, \text{normal} < \text{dry}, p < .05$)。

図 3 に示すように、人差し指の指先に振動を加えた場合、乾燥度合いのスコアに関して、試料の粗滑度合いの主効果 ($F(2,22) = 7.87, p < .05$) と、試料の乾湿度合いの主効果 ($F(2,22) = 23.56, p < .05$) と、振動の振れ幅と試料の粗滑度合いの一次の交互作用 ($F(4,44) = 2.83, p < .05$) に有意差が見られた。Shaffer の方法による多重比較を行った結果、試料の粗滑度合いの間に有意差が見られた ($\text{smooth} < \text{rough}, \text{normal} < \text{rough}, p < .05$)。また、試料の粗滑

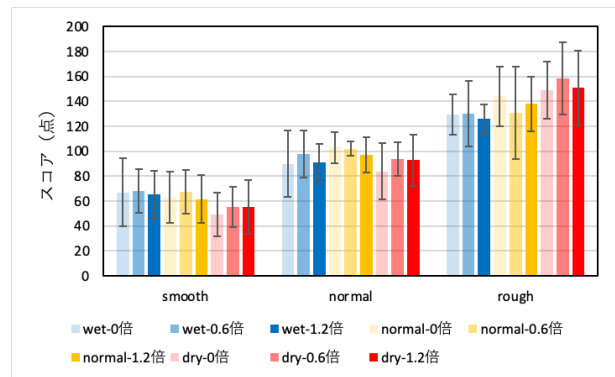


図 2: 粗さ度合いのスコア (人差し指の指先に振動を加えた条件)

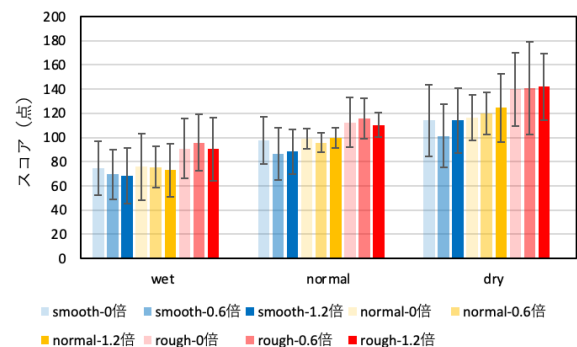


図 3: 乾燥度合いのスコア (人差し指の指先に振動を加えた条件)

度合いが smooth 条件下で、振動の振れ幅の条件が 0 倍と 0.6 倍の間に有意差が見られ ($0.6 \text{ 倍} < 0 \text{ 倍}, p < .05$)、振動の振れ幅が 0 倍の条件下で、試料の粗滑度合い normal 条件と rough 条件の間 ($\text{normal} < \text{rough}, p < .05$)、振動の振れ幅が 0.6 倍の条件下で、試料の粗滑度合いすべての条件の間 ($\text{smooth} < \text{normal} < \text{rough}, p < .05$)、振動の振れ幅が 1.2 倍の条件下で、試料の粗滑度合いすべての条件の間 ($\text{smooth} < \text{rough}, \text{normal} < \text{rough}, p < .05$) に有意差が見られた。

手の甲に振動を加えた場合、粗さ度合いのスコアに関して、試料の粗滑度合いの主効果 ($F(2,22) = 104.60, p < .05$) と、試料の粗滑度合いと試料の乾湿度合いの一次の交互作用 ($F(4,44) = 5.90, p < .05$) にのみ有意差が見られた。乾燥度合いのスコアに関して、試料の粗滑度合いの主効果 ($F(2,22) = 24.82, p < .05$) と、試料の乾湿度合いの主効果 ($F(2,22) = 21.44, p < .05$) にのみ有意差が見られた。

手首に振動を加えた場合、粗さ度合いのスコアに関して、試料の粗滑度合いの主効果 ($F(2,22) = 75.61, p < .05$) と、試料の粗滑度合いと試料の乾湿度合いの一次の交互作用 ($F(4,44) = 13.00, p < .05$) にのみ有意差が見られた。乾燥度合いのスコアに関して、試料の粗滑度合いの主効果 ($F(2,22) = 14.15, p < .05$) と、試料の乾湿度合いの主効果 ($F(2,22) = 26.67, p < .05$) にのみ有意差が見られた。

4.6 考察

本実験では、人差し指の指先に振動を加えた場合、一定の条件下では、加える振動の振れ幅の違いによって試料の質感のスコアに有意差が見られた。具体的には、試料の乾湿度合いが dry 条件である時に、振動の振れ幅が 0.6 倍の方が 0 倍の時よりも粗さを強く感じる傾向が見られた（結果 1）。先行研究 [6][7] では、乾燥物体であるサンドペーパーの粗さの識別率を用いて粗さに対する感度を評価していた。つまり、乾燥している時に粗さを強く感じた本実験の結果は、先行研究の示す結果と方向性が等しいと考える。

また、試料の粗滑度合いが smooth 条件である時に、振動の振れ幅が 0 倍の方が 0.6 倍の時よりも乾燥を有意に強く感じる事が分かった（結果 2）。この結果は実験仮説と一致しており、滑らかなものほど湿って感じる事と、ノイズ振動を加算しても検出閾を超える粗さ刺激が存在しないことが、乾燥度合いの評価をしづらくした可能性がある。さらに、振動の振れ幅が 0.6 倍の時のみ試料の粗滑度合いが smooth, normal, rough の順に乾燥度合いのスコアが有意に高くなった（結果 3）。物質の質感評価において、粗いものほど乾いて感じ、滑らかなものほど湿っているとすることが知られているが [9]、この傾向は 0.6 倍の大きさの振れ幅を加えることでより強く現れることが分かった。確率共鳴の効果は粗さ度合いに対してのみ言及されており [6][7]、乾燥度合いに対する感度へ与える影響については明らかになっていない。しかし本実験の結果から、確率共鳴効果が、粗滑度合いという条件を介して、乾湿度合いの感じ方に影響を与える可能性がある。

さらに、手の甲と手首に振動を加えた場合には、加える振動の振れ幅の違いによって試料の粗さ度合いと乾燥度合いのスコアに有意差は見られなかった。手首に振動を加えて確率共鳴現象が発生することを明らかにした先行研究 [7] では、本実験よりも最大振れ幅が大きいピエゾアクチュエータを使用していた。一方で、本実験で使用したピエゾアクチュエータは、人差し指指先に振動を加えて確率共鳴現象が起こることを明らかにした先行研究 [6] と同様のものを使用していた。よって、加えた振動が、試料に触れる部分である人差し指指先まで十分伝わらなかったことで、手の甲と手首に振動を加えた場合に確率共鳴効果が現れなかった可能性がある。

5. 結論と今後の展望

考察で示した結果 1 から 3 をもとに考えると、適切な振れ幅の振動を指先に加えることで、肌が乾燥している時はざらつきを感じ易く（肌状態が悪い時はより悪く感じる）、肌がつるつるしている時は乾燥を感じにくくなる（肌状態が良い時はより良く感じる）と解釈できる。つまり、スキンケア時に指先に振動を加えることで、肌の不調や好調を強く認識させられる可能性が示された。

他方、本実験では手の甲と手首に振動を加えた場合には確率共鳴の効果は確認できなかった。一方で、人差し指に

振動を加えた場合は、一定の条件下では、加える振動の振れ幅の違いによって試料の質感のスコアに有意差が見られた。スキンケア時にアクチュエータが化粧水に触れないようにする等、実用上の問題を考えると、指先以外にアクチュエータをつけることが好ましい。本実験で手の甲と手首に振動を加えた場合に確率共鳴の効果が確認できなかった理由として、加えた振動を指先まで伝えられなかった可能性があることから、指先以外での振動提示でも適切な振動を指先まで伝えることのできる設計を考慮し、確率共鳴効果が肌触感の感度に与える影響を再度検証する必要がある。

参考文献

- [1] 平尾直靖: スキンケアの心理的な効果について 皮膚感覚, 情動, 肌改善効果の視点から, 日本化粧品技術者会誌, 36(1), 1-9 (2002).
- [2] 上原静香: ハトムギ全粒熱水抽出エキス摂取による肌改善効果, 日本補完代替医療学会誌, 16(1), 33-38 (2019).
- [3] キニナルコスメ. 「コスメ不倫はもはや常識?! マイベストへの道はやっぱり口コミ」. 2018. https://kininarucosme.com/item_p057/, (参照 2021-07-30)
- [4] PR TIMES. 「スキンケアについての意識調査」. 2021. <https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000034.000040075.html>, (参照 2021-07-30)
- [5] ナリス化粧品. 「スキンケアについてのアンケート」. 2019. https://www.naris.co.jp/news_release/wp-content/uploads/2019/11/HADA-20191115%E3%80%80-1.pdf (参照 2021-07-21)
- [6] Kurita, Y., Shinohara, M. and Ueda, J.: Wearable sensorimotor enhancer for fingertip based on stochastic resonance effect, IEEE Transactions on Human-Machine Systems, 43(3), 333-337 (2013).
- [7] Ikemura, S., Endo, T., and Matsuno, F.: Multiple Remote Vibrotactile Noises Improve Tactile Sensitivity of the Fingertip via Stochastic Resonance, IEEE Access, 9, 17011-17019 (2021).
- [8] 白土寛和, 野々村美宗, 前野隆司: 肌質感を呈する人工皮膚の開発 皮膚の表面凹凸パターンと弾性構造の模倣に基づく肌質感の実現と評価, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 73, No. 726, pp. 541-546 (2007).
- [9] 岡島達雄, 武田雄二: 触覚による乾湿感の定量化: 建築仕上げ材料の感覚的評価に関する研究 (その 5), 日本建築学会論文報告集, Vol. 327, pp. 12-19 (1983).
- [10] PR TIMES. 「お肌の悩みと化粧品の選び方」. 2020. <https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000002.000058242.html>, (参照 2021-07-29)
- [11] Chamnongthai, K. et al.: Two-dimensional fingertip force training with improved haptic sensation via stochastic resonance, IEEE Transactions on Human-Machine Systems, 50(6), 593-603 (2020).
- [12] Lakshminarayanan, K. et al.: Application of vibration to wrist and hand skin affects fingertip tactile sensation, Physiological reports, 3(7), e12465 (2015).