

Revisiting softness perception: やわらかさ知覚研究の近況

東京都立大学 岡本 正吾

1. はじめに

やわらかさ知覚の機序は古くて新しい研究課題である。人はこれに特化した機械受容器を有さない。また、人は硬さに関する特定の物理量を知覚しているわけでもない。今日まで、やわらかさ知覚の機序は完全に理解されていない。本稿では、やわらかさ知覚についてこれまでに分かっていることをまとめ、注目に値する最近のトピックを紹介する。Cavdan ら (2021) が指摘するとおり、やわらかさは多元的なものである。本稿が対象とするのは、ボリュームのある物体の変形性のやわらかさであり、織布のそれとは異なることに留意していただきたい。また、本稿では、「硬さ」を機械的な量で定義されるもの、「軟らかさ」を硬さの逆数、「やわらかさ」を人が知覚する量として使いわけている。

2. わたしたちは何をやわらかさと呼んでいるのか？

2-1 剛性なのか弾性係数なのか？

人がやわらかさと呼んでいるものが、機械的な硬さの逆数であるならば、それは一体、どの硬さのことであろうか。機械的な硬さに関する指標として容易に思い浮かぶのは、剛性（ばね定数）と弾性係数（ヤング率）である。前者は、物体を押して変形させるときの反力と変位の比で定義され、材料のみならず物体の厚みなどの構造にも依存する。後者は、材料固有の硬さである。人がこれら2種類の硬さを区別できるとすれば、興味深い。しかし残念ながら、人の手指は試験機械のように機能しないことがわかっている。

Bergmann Tiest と Kappers (2009) は、上記の疑問に答えるべく、剛性と弾性係数を操作した試料群のやわらかさを比較する心理物理学実験を行った。例えば、表面には同じゴム材料を用いてい

るが、中身には異なる強さのばねを仕込んだ試料を用意した。実験の結果、人は剛性と弾性係数の両方を加味して、やわらかさを判断していることが明らかになった。これが意味することは Fig. 1 のように、弾性係数が大きくて（つまり硬い）厚いゴム片と、弾性係数が小さくて（つまり軟らかい）薄いゴム片が同じやわらかさを感じられるということである。薄いゴム片は、その薄いという構造ゆえに剛性が大きい。このように、硬さに関する複数の物理量を統合したものを、人は感じている。やわらかさ知覚を論じるとき、硬さに関する特定の物理量だけを計測・議論しても、やわらかさ知覚が上手く説明できないのはこういう訳である。

2-2 やわらかさは皮膚感覚なのか深部感覚なのか？

やわらかさは皮膚中の受容器（皮膚感覚）で感じるものか、それとも筋や腱に内在する受容器（深部感覚）で感じるものであろうか。Friedman ら (2008) は鮮やかな実験方法でこの疑問を検証した。Fig. 2 のように、ゴム試料を指で押し込む条

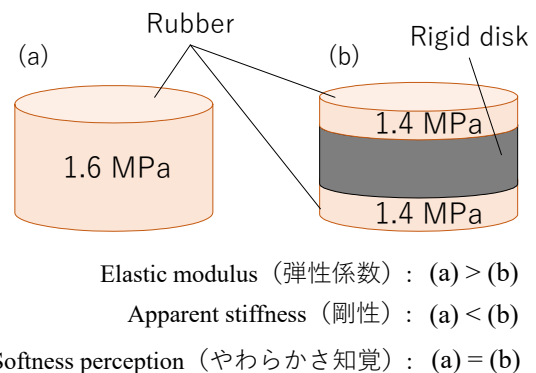


Fig. 1 Perceived softness is determined by integrating stiffness and elasticity.

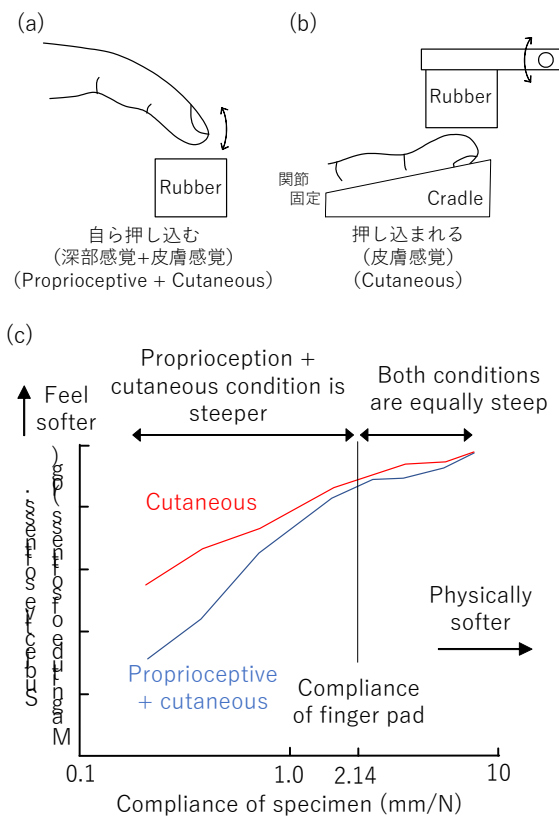


Fig. 2 Experiment conducted by Friedman et al. (2008). (a) Active condition where proprioceptive and cutaneous cues are available. (b) Only cutaneous cue is available. (c) Results of magnitude estimation under conditions (a) and (b).

件(a)と、指腹にゴム試料が押し込まれる条件(b)でのやわらかさ知覚を比較した。条件(a)では、皮膚感覚と深部感覚の両方を利用できる。条件(b)では、指の関節は固定されており、皮膚感覚のみが利用できる。これらの条件で、硬さが異なるゴム試料のやわらかさをマグニチュード推定法によって調査した。その結果が、Fig.2(c)である。横軸がばね定数の逆数であり、軟らかさを意味する。縦軸は、実験参加者が回答した主観的なやわらかさである。これらの曲線は、傾きが大きいほど感度が高いことを意味する。条件(a)の方が曲線の傾きが大きく、やはり皮膚感覚と深部感覚の両方が使用できる条件の方が、やわらかさ知覚の感度が優れている。すなわち、皮膚感覚と深部感覚の両方がやわらかさ知覚に寄与していることを意味する。しかし、Friedmanらの指摘はこれで終わらない。対象のゴム試料のコンプライアンス(ばね定数の逆数)が、指腹のそれと同等以上であるとき

(つまり、ゴム試料が指腹よりも軟らかいとき)、条件(a)と(b)ではやわらかさの曲線の傾きに差が無いことを指摘している。このことは、指腹よりも軟らかい物のやわらかさ知覚では、皮膚感覚が支配的であることを意味する。同様の指摘は、Bergmann TiestとKappers(2009)によってもなされている。人は対象物の硬さに応じて、深部感覚と皮膚感覚を使い分けるもしくは併用しているのである。皮膚よりも硬い物のやわらかさ知覚に関しては、深部感覚の寄与が大きくなる。

3. やわらかさに関する最近の展開. やわらかさ知覚をさらに理解するための糸口

3-1 人肌のやわらかさは特に気持ち良い

一般に、人は硬い物よりも軟らかいものを好む。軟らかいものの方が触り心地が良いからである。しかし、軟らかすぎてもいけない。これを端的に示す例として、Kitadaら(2021)の研究を紹介する。Kitadaらは、硬さが異なるゴム試料を11種類用いて、それらを指で押したときに感じられるやわらかさと、心地よさを調査した。その結果、人肌の硬さに近い硬さのゴム試料ほど心地よいと感じられ、軟らかさと心地よさは単純に相関しないとした。肌に触れる製品においては、軟らかい材料を用いるほど良いと思われがちであるが、軟らかいことと触り心地が良いことは別のことである。今のところ、人肌の軟らかさが心地よいと感じられる理由は不明であるが、今後のやわらかさ知覚の研究は、心地よさという尺度を併せて用いることで新しい展開になるかもしれない。

3-2 人は軟らかさを正しく判断できない. やわらかさ知覚の錯覚

錯覚といえば視錯覚のことと思われがちであるが、触覚にも錯覚は存在する。やわらかさの錯覚として有名なのはベルベットハンド錯覚である。古典的には、張られた糸を両掌で挟んで前後(糸が張られた方向と直交する方向)に糸を擦ると、掌がやわらかく感じられるという現象として知られる。科学館などで展示されていることもある。最近では、異なる条件でも同様の錯覚が生じることが知られている(Yokosakaら, 2021)。ここではさらに2種類のやわらかさ錯覚を紹介し、人は物の硬軟を正しく判断できないという例を示す。

まずは、Finger-concave錯覚である(Inoueら, 2022)。Fig.3のように指先と同じくらい大きさの凹み(concave)に、指腹を押し当てると、平

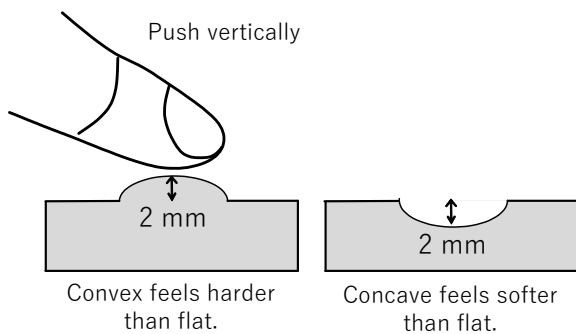


Fig. 3 Finger-concave and finger-convex softness illusion

な面に指腹を押し当てた時よりもやわらかく感じられる。その効果は絶大で、0.55 MPa のゴムで作られた試料のやわらかさが、凹み形状によって0.23 MPa のゴム試料のやわらかさと同等に感じられる。通常、弾性係数の弁別閾（やわらかさ・硬さの違いが判別できる閾値）は、15%程度(Bergmann Tiest & Kappers, 2009)とされているので、凹みのやわらかさ知覚への効果は大きい。逆に、指腹と同程度の大きさの凸に指腹を押し当てると、硬く感じられる。

次に、摩擦のやわらかさ知覚への効果である。Arakawa ら (2019) は、同じ硬さのゴムと成型法で作られた複数の試料に粉体潤滑を施すことで、表面の摩擦のみが異なる5種類の刺激を用意した。これらを実験参加者が指で押すと、同じやわらかさに感じられた。しかしながら、参加者がこれらの試料を指で擦ってやわらかさを判断すると、摩擦が小さい試料ほど、やわらかいと回答した。指で表面を擦ってやわらかさを判断するときは、摩擦の影響によって物体の硬軟を正確に判断できない。やわらかさ知覚の研究では試料を指で押したり、摘まんだりしてやわらかさを判断する課題がほとんどであるが、物を擦ることでやわらかさの知覚は可能であり、日常生活ではむしろ一般的な方法ともいえる。しかしながら、擦り動作でのやわらかさ知覚の研究はこれまでに見逃されていた側面であり、今後の展開が楽しみである。

錯覚は、人の知覚情報処理を解き明かすための重要な現象であり、古今東西、研究者らの関心の的となってきた。こういった錯覚現象を切り口に、人が感じるやわらかさの理解が進んでいくことが期待される。

3-3 やわらかさ知覚の個人差の理由は指にあり

やわらかさ知覚に個人差があることは意外なほど見逃されていた。近年、Li ら (2021) が、指腹が軟らかい人ほど、また、指先が小さい人ほど硬軟判断の成績が優れると報告した。実験では、指腹と類似した硬さで、しかし指腹よりも硬いゴムと軟らかいゴムを含めた試料が用いられた。10名の実験参加者は、対となって提示されるゴム試料のどちらが軟らかいかを回答する課題を繰り返した。10名のパネルについて、指先が軟らかい人ほど、指先が小さい傾向があったため、指先が小さいことと、軟らかいことのどちらが、硬軟知覚の感度を向上させているかは不明である。軟らかくて小さい指先を有する参加者ほど感度が良いという現象の説明として、Li らは、軟らかい指であるほど、ゴム試料に指が押し込まれる過程での接触面積の変化が顕著であることを指摘している。指が軟らかいことによって接触面積を手掛かりとするやわらかさ知覚の感度が向上すると示唆している。面白いのは、こういった現象はパッシブタッチ（ゴム試料に指を非随意的に押し込む）条件下で見られるが、アクティブタッチ（随意的に指をゴム試料に押し込んでやわらかさを調べる）条件下では観察されない (Xu ら, 2021)。指先が硬い人は、接触時の接触状態の変化を拡大するような補完的な触察戦略を採用していると思われる。つまり、アクティブタッチ条件下では、指が硬いからといって、やわらかさの判断が苦手ということはない。

やわらかさ知覚の個人差の研究は、上記のとおり、ごく近年に本格的に始まったところである。一連の研究は、人が手掛かりとする情報が何であるかを明らかにする可能性が高く、今後、注目の研究課題である。

4. 結びに

人が知覚するやわらかさは、1)機械的な硬さを表す物理量の逆ではないこと、2)皮膚感覚と深部感覚を含む複数の知覚原理が同時に作用していること、3)表面形状や摩擦などの硬さ以外の特性にも影響を受ける錯覚があること、4)個人差があることを紹介してきた。これらの要素の全てが、やわらかさ知覚が何であるかの理解を容易ならざるものになっている。本稿に書き足りぬことおよび相補的な内容を拙著 (岡本 2020) に記載しているので、併せてご覧いただければ幸いである。例えば、硬さ知覚についても解説をしている。やわらかさ知覚は、指で物体に力を加えたときの変形を基に

している。しかし、指の力では変形しないほどの硬さの物体に関しては、その表面を叩く（タップ）ときに発生する振動を基にした硬さ知覚戦略を人は採用している。

引用文献

Cavdan M., Doerschner K. and K. Drewing; Task and material properties interactively affect softness explorations along different dimensions, *IEEE Trans. Haptics*, 14(3) 603–614 (2021)

Bergmann Tiest W. M. and Kappers A. M. L.; Cues for haptic perception of compliance, *IEEE Trans. Haptics*, 2(4):189–199 (2009)

Friedman R. M., Hester K. D., Gree B. G., LaMotte R. H.; Magnitude estimation of softness, *Exp Brain Res*, 191(2) 133–142 (2008)

Inoue K., Okamoto S., Akiyama Y., Y. Yamada; Surfaces with finger-sized concave feel softer, *IEEE Transactions on Haptics*, 15 (2022)

Arakawa N. and Okamoto S; Less frictional skin-like materials are felt softer in a physically inconsistent manner, *Proceedings of IEEE World Haptics Conference, WPI10* (2019)
Yokosaka T., Suzuishi Y., Kuroki S.; Feeling illusory textures through a hole: Rotating frame at skin-object interface modifies perceived tactile texture, *IEEE Trans. Haptics* (2021)

Xu C., Wang Y., and Gerling G. J.; Individual performance in compliance discrimination is constrained by skin mechanics but improved under active control, *Proceedings of IEEE World Haptics Conference*, 445–450 (2021)

Li B., Gerling G. J.; Individual differences impacting skin deformation and tactile discrimination with compliant elastic surfaces, *Proceedings of IEEE World Haptics Conference*, 721-726 (2021)

岡本 正吾; 触力覚による柔らかさ・硬さ知覚, *システム/制御/情報*, 64(4) 121–125 (2020)



おかもと しょうご
岡本 正吾

この作成手順書は、解説原稿を学会誌掲載様式に仕上げる為の作成方法について述べてる。パソコンの OS, 使用アプリケーションやプリンタードライバーによってはこのマニュアル指定通りにレイアウトできない場合も起こり得るが、出来る限りこの様式に従うことが望ましい。指定と著しく異なる場合、または、様式通りの作成が難しい場合は事務局まで連絡のこと