

トがどのようにして多彩な感覚を区別しているのか、それぞれの喚起メカニズムはわかっていない。われわれが常日頃使用している触覚に関する言葉は40以上もあるにもかかわらず<sup>6)</sup>、「しっとり」感と「べたべた」感・「ぬるぬる」感の違いについては生理学的にも物理的にも誰も説明することはできないのだ！

われわれは、皮膚表面で起こる摩擦現象の非線形性が、多彩で繊細な触質感が発現する一つの原因なのではないかと考え、新たに『非線形触質感喚起モデル』を提唱している。ヒトがモノに触れる時、多くの場合は加速度が伴う。また、皮膚表面はフラクタルと呼ばれる階層性凸凹構造であり、粘弾性を持つため力学刺激に対する応答は単純な線形モデルでは記述できない。このように、複数の非線形効果が組み合わせると、アブノーマルな摩擦現象が起き、莫大な数の時空間パターンが発現する。この力学刺激の多様性が、多彩で繊細な触質感を喚起しているのではないだろうか？

われわれは、この仮説を検証するために、運動・表面構造・力学特性に非線形性を組み込んだ触質感センシングシステムを開発した<sup>7,8)</sup>。これまでに、ヒト指の表面・力学物性と形状を模倣した指モデル接触子やモーターの回転を偏心カムで往復運動させることで正弦運動を実現し、運動の非線形性を組み込むことができた。今後、このような新たなモデルや評価システムを用いることで、多様な触感の物理的な起源が明らかになるであろう。

## 2. 触覚のサイエンス

このように、触覚の世界を科学的な観点から理解するのはなかなか難しいが、ヒトが力学的な刺激をセンシングする基本的なメカニズムは明らかにされている。皮膚の内部には、周波数特性の異なる4種類の触覚受容器が存在するために、われわれは多様な触感を感じることができるのだ<sup>9)</sup>。触覚に関する書籍には、マイスナー小体はエッジの鋭さや点字のようなわずかな盛り上がり、メルケル触盤は垂直方向の変形・圧力の変化や材質・形に、ルフィニ終末は局所的な圧迫・皮膚の引っ張りに、パチニ小体は刺激の変化、特に加速度を伴う物理刺激に応答する、と書かれている。これらの触覚受容器の周波数特性が、正弦波振動刺激に対する振動検出閾の測定によって解析されており、例えばパチニ小体は250 Hzの総周波の振動に対して感度よく応答することが確認されているのだ<sup>10,11)</sup>。一方で、これらの定説については疑問の声もあった。例えば、メルケル触盤は触覚センサだと教科書には書いてあるが、実際には証明されていない、という指摘がなされていた。そこでMaksimovicらはメルケル細胞が単体で機械刺激に応答することを証明するとともに、その応答の特徴を見出した。刺激を与えると1ミリ秒以内に細胞膜を貫通する電流が流れはじめ、その応答は数ミリ～数十ミリ秒以内で不活性化す

つけたものを上下に平行に並べると、同じ長さの線分であっても前者の方が後者に比べて長く感じる(図1)。また、ツェルナー錯視では、4本の平行な水平線それぞれに方向のそろった短い斜めの線を水平線ごとに方向を変えて加えると平行な線分とは感じられなくなる。ヘリング錯視では、用紙の中央に縦方向に2本の平行線を引き、用紙の中心点から放射状に斜線を適当な本数だけ引くと2本の平行線が斜線の影響により歪んで見える。さらに、変わったところでは、Ouchi illusionというものがあり、その錯覚では横長の市松模様の中央に方向の違う市松模様の円形領域を描くと円形領域の中の模様がゆらゆら動いて見える。他にも膨大な数の幾何学的錯視が知られ、今日でも新しい錯視の発見が続いているようである。

一方、触覚の錯覚(錯触)は、前述の錯視に比べて数は圧倒的に少ないが、それでもその存在が相当数知られている<sup>3)</sup>。例えば、アリストテレスの錯覚とは、手の指を交差させて、その間に棒状物体をはさむと物が2個に感じられるという錯覚である。Comb イリュージョンでは、櫛の歯の先端に指をあて、櫛の根元をボールペンなどでゴシゴシすると櫛の歯の先端が飛び出るような感じがする。本稿で取り上げるバルバットハンドイリュージョン(VHI)では、フェンスに使われる金網のような粗い網を両手で握ると掌に滑らかな面の存在を感じる<sup>4-7)</sup>。この他にもいくつかの錯触の存在が知られている。後述でもそのいくつかを紹介しているが、詳しくは文献<sup>3)</sup>を参照されたい。

さて、錯覚が研究対象となる理由は、主に二つある。そのうちの一つは、生理学・心理学の伸展に寄与するということである。錯覚は、種々の受容器から知覚された情報を脳で統合化する過程で客観的事実と異なる結論を得ることで生じる。したがって、脳の機能解明を進める上で重要なヒントを与えてくれる可能性がある。生理学・心理学の分野の研究者はこの観点で錯覚を取り上げている。もう一方は、工学的応用である。知覚した情報を脳が統合化する過程で、客観的事実とは異なる感覚を生成するという仕組みを逆手にとって活用する方法である。最もわかりやすい工学的応用は、仮想現実感(VR)であり、脳に対象を事実であると思い込ますことを目的としているために、錯覚が有効となる。しかし、視覚のVRの場合、8Kビジョンのようにかなり精緻な画像を表示できるディスプレイがあるために、錯覚まで利用するという場面は少ないように思われる。これに対して、触覚の表示では、視覚に比べてハードウェアの開発がまだ十分でないために、脳を欺くというアプローチが有効となるものと思われる。

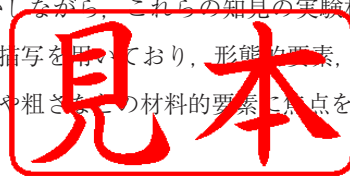
本稿では、VRに役立つ新しいハプティクス・デバイスの開発、一部の精神疾患の評価の手助けとなるデバイスの開発、リハビリテーションを補佐するデバイスの開発などを目指して、現在当研究室で進めているVHIに関する研究を紹介する。さらに、錯触から少し範囲を広げて、VHIと組み合わせるとより効果が期待できる他の錯覚現象についても紹介する。

続く2項では、代表的な錯触について、いくつか説明することにする。3項では、そのなか

また、これらの脳領域は、触覚情報の保持や検索などの触覚記憶にも関わっている。例えば、第1次体性感覚野は触覚の作業記憶<sup>19)</sup>に、第2次体性感覚は触覚刺激情報の数秒間の保持<sup>20)</sup>に、頭頂後頭皮質は触覚空間情報の短期間の保持に<sup>17)</sup>、島皮質は触覚的探索情報の長期記憶<sup>17)</sup>、外側後頭複合体は触覚的探索情報の表象<sup>21)</sup>などに関わっている。

### 1.3 触覚による物体認知における視覚との関わり

また、触覚による物体認知の高次的な機序の問題を扱った先行研究では、何かの対象物の特性を触知して判断を行う際に、先行する視覚体験から形成された視覚表象が触覚表象と結びつくことで認識が可能となることが報告<sup>13,22)</sup>されており、触覚処理過程における触覚表象は視覚表象に変換される傾向が強いことを示している。また、視覚と触覚を用いたクロスモーダルプライミングの研究では、物体の知覚表象を視覚・触覚間で共有していることを示している<sup>23-25)</sup>。このように物体認知に関わる知覚表象について、触覚表象と視覚表象の関連性を示唆する知見が散見される。しかしながら、これらの知見の実験材料は、一般的または新奇な3次元物体や線図のような2次元描写を用いており、形態的要素、特に形状に焦点を当てたものがほとんどであり、テクスチャや粗さなどの材料的要素に焦点を当てた研究は少ない。



### 1.4 物体認知における物理的特性

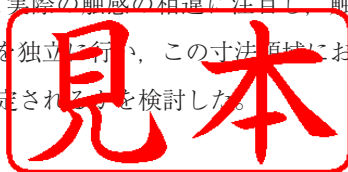
触覚による物体認知において、物体の物理的特性である形態的要素と材料的要素とではどちらが効率的に処理されるのだろうか。視覚での情報処理と比較した場合に、視覚は形態的要素と関係が強いのに対して、触覚は材料的要素との関係が強く、形態的要素より材料的要素の方が効率的に処理されることが示されている<sup>26-30)</sup>。また、日常物体の触認識において、材料的要素がその物体の認識を促進させることができる<sup>31)</sup>。

以上のことから、触覚による物体認知において、形態的要素は視覚表象と協働して物体を認識しているのに対し、材料的要素はその物体が何であるかという物体の同定に必要な要素であることがわかる。しかしながら、触覚が優位に処理をなしている材料的要素から生じる触覚表象がどのような性質をもち、さらには、物体の同定に至る記憶表象や意味システムとどのように関わっているかという問題に対して、未だ一定の見解は得られていない。

そこで本節は、材料的要素、特に表面素材の属性に焦点を当て、その属性からの触覚表象がどのような構造をもち、触覚表象が長期記憶(意味記憶やエピソード記憶)とどのように関わっているかを述べていく。

ドットパターンによる実験例も数多く見受けられる。Connorら<sup>10)</sup>はドット間隔を変化(0.8～6.5 mm)させた場合に、間隔が3.2 mmで粗さ感が最大になることを示した。一方Meftahら<sup>11)</sup>は、ドット間隔を1.5～8.5 mmの範囲で変化させた実験を行い、粗さ感はドット間隔に対し全域で単調増加し、Connorらが示したような感覚量のピークは生じないとした。Meftahはこの違いの原因として、ドット配置や触察方法(能動/受動)の違いの他、Connorらの実験ではドット高さが低い(0.35 mm)ために指の底付きが生じた可能性を挙げている。Blakeら<sup>12)</sup>はドットの直径(0.25～2.5 mm)と高さ(0.28～0.62 mm)を変化させ、粗さ感がドット高さに従って増加し、ドット直径に従って減少することを示した。より微細な領域を対象とした例として、Yoshiokaら<sup>13)</sup>は溝幅0.1～2 mmの溝パターンを用い、1 mm以下の領域でも順応が遅く刺激の強度に応答する触覚受容器(SA1)による知覚メカニズムで粗さ感が説明できることを示した。これらの先行研究から、刺激の周期や形状と粗さ感の関係について一般的な傾向を知ることができる。

本研究では見た目の印象と実際の触感の相違に注目し、触察による評価実験(実験A)と、目視による評価実験(実験B)を独立に行い、この寸法領域において視・触覚による粗さ感がどのような寸法要因に従って決定されるかを検討した。



## 1. 視・触覚における粗さ感の決定要因に関する実験

### 1.1 試料

実験用試料は、通常の量産工程と同様に、小径エンドミルで切削加工した金型を使用し、黒色ABS樹脂を射出成形して製作した。この方法では試料の種類と同数の金型を製作するため初期コストがかかるが、製品と同等の均質な試料を大量に得ることができる。また、自然物を利用する場合のように、素材の物性の影響を受けることなく表面形状の効果を単独で評価できる。パターンは、見た目が均一で触動作における方向性の偏りが無いものとして、平面上に半球形の突起(高さは球の半径に等しい)を格子状に配置したものとした。図1に試料の外形とテクスチャパターンの寸法パラメータを示す。寸法の範囲は通常の加工で使用される最小ツール径(R0.05 mm)を参考に決定し、ドットの直径と間隔を表1のように組合せた6種類のパターンを製作した。この範囲ではスベスベ・サラサラといった連続的な印象から、ブツブツといったやや離散的な凹凸感が感じられる。図2に1×1 mmの範囲のドット配置の模式図を示す。

さ)が要求されていることがわかる。続いて、肌触りと柔らかさが重視されている。このため日本の製紙業界では、価格を抑えつつ、肌触り感が良く柔らかいティシュペーパーを開発する方向にある。

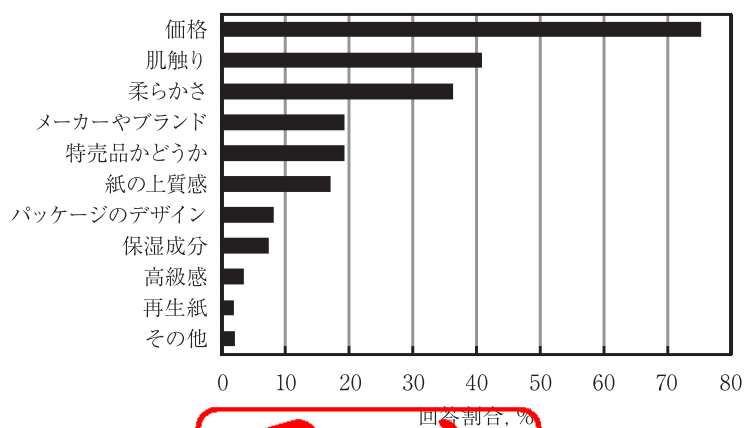


図2 ボックス型のティシュペーパーを購入する際に重視する点<sup>2)</sup>

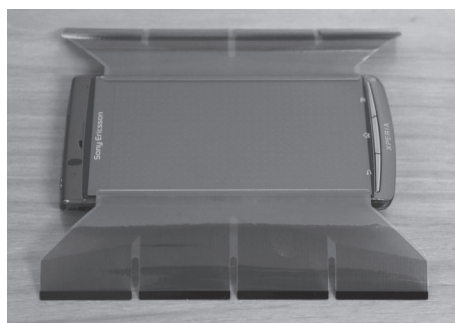
従来、肌触り感の評価には、人の感覚による官能評価試験が用いられてきている。官能評価試験の利点として、人間による閾値は機械式の測定機器よりも優れている点が挙げられる。測定機器では個別の成分について測定・抽出することは可能であるが、総合的な評価は難しい。一方、人間の感覚器では、測定機器では分析不可能な領域も敏感に感じ取ることが可能であるため(個人差はあるものの)、複合的な評価を行う場合には測定機器よりも上手く捉えることができる。このため、官能評価は様々な産業分野で用いられており、食品、化粧品、自動車、建設、電気機器などの分野で活用されている<sup>3)</sup>。しかし、官能評価にも問題点は多く存在する。例えば、心理効果による偏りが生じやすいこと、体調や気分により感度や判断尺度が異なること、人間の感覚器は疲労しやすいこと、評価対象間の相対比較となるため過去のデータとの比較が困難であることなどが挙げられる<sup>4,5)</sup>。過去のデータとの比較ができなければ、過去から続く製品開発における設計指針を得にくく、これがティシュペーパーの開発におけるブレークスルーを阻む壁となっているといえる。そこで、官能評価に代わり、官能評価値と高い相関がある新たな設計指標が求められている。

官能評価試験ではティシュペーパーが人間の皮膚との摩擦により評価されていることに着目し、本節では、ティシュペーパーの機械的性質や摩擦特性と、肌触りに関する官能評価値との関係について紹介する。

いという課題がある。第三の手法は電気刺激である。画面上に透明電極を形成することで実現できる。また先の二つの手法と比べ高い解像度の触覚提示が可能であり、指を動かさなくても触覚提示ができる。

図1にタッチパネルのための電気触覚ディスプレイの試作例を示す<sup>9)</sup>。

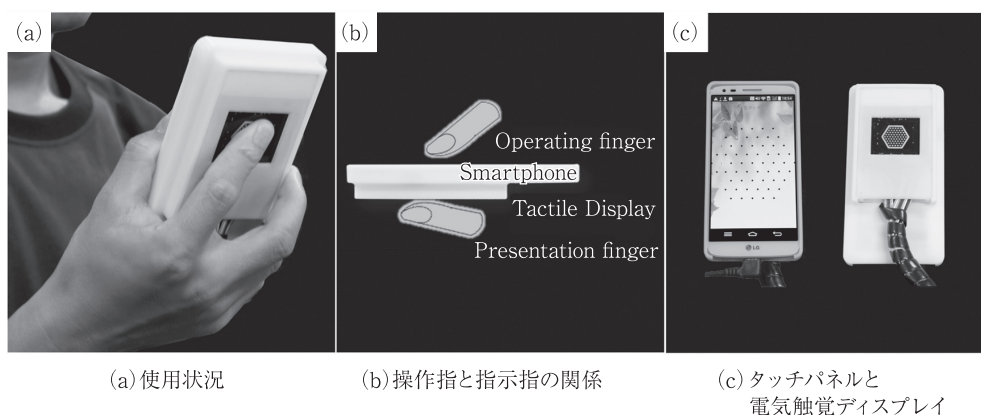
図1 タッチパネルのための透明電気触覚ディスプレイ



ITO電極を用いた直径1 mmの電極が

3 mm間隔で $32 \times 16$ 点並んでいる。電気触覚ディスプレイの特徴として刺激回路を用いたタッチセンシングが可能であり、本試作でも10 kHzでのタッチセンシングとそれに基づく触覚提示が実現されている。

タッチパネルのための電気触覚ディスプレイが透明電極によって実現可能であるといっても、現実的な課題は多数存在する。例えば電極への配線をITO電極で実現した場合、高い抵抗値(例えば3 cm程度の配線で $10 \text{ k}\Omega$ 程度)を持つため電気刺激への障害となる。また、透明ガラス基板の表面と裏面をつなぐ配線を実現するには、ガラス基板自体に微細な穴を開け、さらに穴を導電体で充電するというプロセスが必要となり、これは一般的に難しいため、配線と電極を同じ面に形成することになり、配線によって電極のサイズが制限されてしまう。こうした課題に対する別のアプローチとして、デバイスの裏側に電気触覚ディスプレイを配置する試みも行われている<sup>10)</sup>(図2)。ディスプレイ面で操作する指(操作指)の周辺の情報を、裏面で異なる指(提示指)に触覚提示するというアプローチであり、触覚提示装置が透明でなければな



(a) 使用状況

(b) 操作指と提示指の関係

(c) タッチパネルと電気触覚ディスプレイ

図2 デバイス裏面に配置した電気触覚ディスプレイ

(a) 使用状況, (b) 操作指と提示指の関係, (c) タッチパネルと電気触覚ディスプレイ



あった。すなわち、多くの風覚ディスプレイの構成において、風源が等間隔(主に45度間隔)に並べられているが、この配置が妥当であるという根拠は明確ではなかった。風源の間隔が広すぎれば、システム設計者が意図した風向と実際に被験者が感じている風向との間のずれによりユーザは違和感を覚えることになり、一方、間隔が狭すぎれば風源の数が過剰となり、オーバースペックなシステムになる。これらのシステムが風源を等間隔に配置していたことの要因は、人の風向知覚特性が明確になっていなかったためと考えられる。風向知覚特性が明確になれば、より最適な風源配置を持つシステムが構築可能となる。例えば、正面が風向を判断しやすく、背面が判断しにくいのであれ

ば、図1のように、風源を配置することが理想的である。

そこで、本稿では人の風向知覚特性とそれから導き出される風覚提示装置の設計指針を提示する。

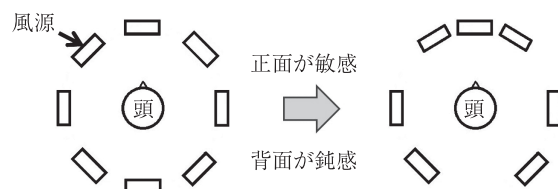


図1 理想的な風源配置例



## 1. 近年の風覚提示研究事例

### 1.1 風覚提示システム事例

風を利用して非接触に感覚を提示するシステムの事例を紹介する。

Sawadaらはスクリーンに風を送り込むと別のスクリーンから風が提示されるビュー・ビュー・Viewというシステムを作成しており、風を使ってコミュニケーションを可能にしている<sup>5)</sup>。Suzukiらは、風圧を利用し非拘束な力覚提示を行っている<sup>6)</sup>。Minakuchiらは、情報の種類によって、風の吹く方向や強さを変化させ、情報を提示するシステムを提案している<sup>7)</sup>。Matsukuraらは、風に香りを乗せ、風を衝突させることで風向を変え、あたかもディスプレイに表示されている映像から香りが伝わったかのように感じさせる研究を行っている<sup>8)</sup>。

### 1.2 風覚提示による臨場感向上の研究事例

このように、風は非接触でユーザに触覚を提示することができる。これを利用し、映像と風を同時に提示することで、臨場感を高める研究も存在する。古くは有名なHeiligによるSensorama<sup>9)</sup>が挙げられる。Sensoramaはマルチモーダル映画であり、視覚や聴覚だけでなく、触覚や嗅覚にも刺激を与える。その中に、前方から風を感じることができる風覚も含まれ、街中をオートバイで疾走するコンテンツが存在した。Moonらは、人を覆うフレームにファンを設置した風覚ディスプレイWind Cubeの設計と評価を行った<sup>10)</sup>。フレームに3つのレベル(45

が意味と結びつく音象徴性を利用することで、オノマトペによって表される材質感や快・不快といった感性情報を定量化し、顧客が求める質感を把握するための官能評価手法について述べる。手触りが重要なモノづくりにおいて、顧客が求める質感を「もっとさらっとしている方がいい」といったオノマトペで表すことは多く、この理解は重要である。本節では特に、オノマトペにはどのような情報が込められているのか、オノマトペのような一見あいまいな表現を活用するためにはどうしたらよいのか、オノマトペに着目すると何ができるのか、について解説したい。

## 1. オノマトペに結びつく手触りの快・不快

一般的に言語の持つ音韻と言語によって表される意味の関係性は恣意的なものであるが、オノマトペにおいては、音韻と意味との間に何らかの関係性(音象徴性)があるとされる。とりわけ日本語のオノマトペについては、特定の音や音の組み合わせが語中の箇所によって特有の音象徴的意味を持つとされ、音象徴が体系的であるとされる<sup>4)</sup>。オノマトペの音象徴性に着目した触覚の材質感表現については、早川<sup>5)</sup>が先駆的な研究を行っており、「粗滑」、「硬軟」、「乾湿」といった触質感の代表的なカテゴリ分類において、使用されるオノマトペの音韻が異なることを報告している。例えば、粗い手触りを表すオノマトペでは、第1モーラ(第1音節)の子音に /z/ が多く使用され(「ざらざら」など)、滑らかな手触りを表すオノマトペの多くは第1モーラの子音に /s/ が使用されている(「さらさら」など)。各触質感を表すオノマトペ、それぞれに特徴的な第1モーラの子音があるとされる。

筆者らは、オノマトペの音韻と快・不快といった情緒・感性的評価との関係性について、触覚に異常がなく、触覚の特殊技能を持たない20代男女各15名を対象に、様々な触素材に触れたときの感覚をオノマトペで表現してもらうとともに、快・不快を評価してもらう実験を行った<sup>6)</sup>。実験素材として、再現性があり、指先との接触で磨耗しない、布、紙、金属、樹脂などを50素材選定した。被験者に、8 cm × 10 cm の穴のあいた箱に手を入れ(素材は見えない)、素材の表面を利き手の人差し指の腹で、軽くなぞるように触れて、50素材の触感をオノマトペで表し、快・不快の感性評価(+3から-3の7段階)を行ってもらった。実験により、1,500通り(50素材×30人)のオノマトペと快・不快評価値の組み合わせが得られた。回答されたオノマトペの数は、触素材1つに平均1.24個(分散0.69)で、触素材の種類ごとに有意差はなかった。回答されたオノマトペの形式は、2モーラ音が繰り返される形式(例えば「さらさら」など)が1,268通りで、全体の84.5%を占めた。得られた快・不快評価値は平均0.38であり、やや快が多く回答されたものの、快・不快どちらかに大きく偏るものではなかった。触素材ごとの評



本節では、製品の「心地」を評価する際に必要となる官能検査方法の特徴と、官能検査を行うときの留意点について述べる。

## 1. 感性情報とは

知識情報は論理的な情報であるため、「客観性、一意性、普遍性、再現性」が保証されていなければならない。

一方、感性情報は「個人が対象物に対して持っている経験への依存性が高く（主観性）、受け手によって情報が異なる意味を持つ（多義性）、得られた情報より様々な印象が連想される（連想性）、個人が情報を受ける環境によって影響される（状況依存性）」情報である。

## 2. 官能検査とは

我々の身の回りにある製品において、ヒトの五感で計測される快適性（心地）、使いやすさなどの「感性品質」が重要視されてきている。しかし、測定機器による客観的な計測と違って、感性品質はヒトが主観的に評価する「人からヒト」によって評価が異なることが多い。官能検査は、ヒトの有する五感を使って行う検査・評価技術であり、日常生活はもとより、新製品開発、市場調査、品質管理などに広く活用されている。

JIS Z9080（官能検査通則）では「官能検査」の対応英語は「sensory test」であるが、好き嫌いという嗜好の評価も含んでいるので「sensory evaluation」ともいう。アメリカ材料試験協会（American Society of Testing and Materials：ASTM）の規格（E253-99a）では「sensory evaluation」を用いている。本節では、「官能評価」と「官能検査」は同義とする。

官能検査は、分析型（Ⅰ型）官能検査と嗜好型（Ⅱ型）官能検査の2種類に大別され、表1は両者の特徴を示している。

分析型（Ⅰ型）は、検査員に判断能力を要求し、「ヒト（検査員）で対象物（製品）を測る」官能検査法である。そのため、検査員が検査能力の均質な専門家であるために、個人内変動や個人間

表1 官能検査について

|              | 分析型（Ⅰ型）                                                  | 嗜好型（Ⅱ型）                                                  |
|--------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| 目的           | 品質の差の検出<br>欠点の格付け                                        | 好みの分析                                                    |
| 検査員<br>（パネル） | 専門家<br>少人数の均質集団<br>識別能力は大<br>個人内変動 小<br>個人間変動 小<br>客観的判断 | 素人<br>多人数の異質集団<br>識別能力は普通<br>個人内変動 大<br>個人間変動 大<br>主観的判断 |
| 適用分野         | 品質検査<br>工程管理など                                           | 嗜好調査<br>イメージ調査など                                         |

負荷重で接触され、触対象物側が直線摺動した際、指紋パターンの凸部に挙動が発生する。この微細な挙動を触覚接触子と直結されている荷重センサ(ロードセル)が触覚特性として忠実に測定することが可能となっている。このように、触覚接触子と荷重センサとの位置関係が直結であれば指紋パターン凸部の挙動変化を忠実に捉えることはできるが、荷重センサと接触子との位置が隔たっている条件では、摺動時に摩擦力伝達部品のたわみ、慣性力あるいは共振の発生などの影響で、触覚特性を正確に測定することは困難となる。

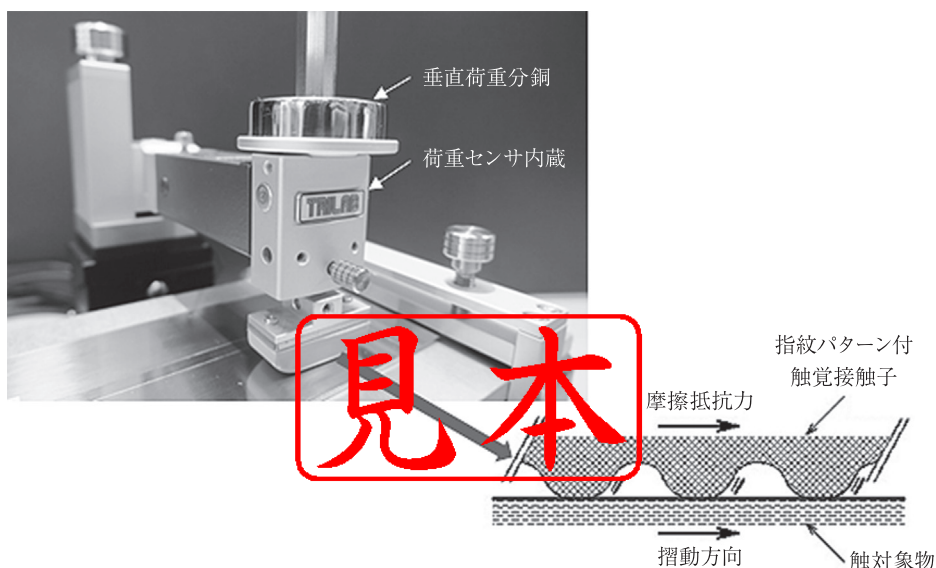


図1 指紋パターンの詳細

## 1.2 指紋パターンの測定例

指紋パターン付触覚接触子の有効性を示す測定例を紹介する。

日ごろ手にしているスマートフォンタッチパネルの表面状態による指触りの触覚評価測定を行った。測定条件を表1に示す。試験体として用いたタッチパネル面の状態は、A：保護シールなしのガラス面、B：クリーン状態の保護シール面、C：手垢が付着した保護シール面である。各タッチパネル面に所定の荷重をかける接触子には、前項で記した指紋パターン付触覚接触子を用いた測定①と人工皮膚(100  $\mu\text{m}$ 厚・指紋パターンなし)を取り付けたアルミ製の面接触子を用いた測定②で評価を行った。