

解説

ヒト指腹部と触覚受容器の構造と機能

Structure and Function of Finger Pad and Tactile Receptors

前野 隆 司* *慶應義塾大学
Takashi Maeno* *Keio University

1. はじめに

ヒト指腹部表面の指紋・汗腺・触覚受容器(マイスナー小体)の配置を図1に示す。汗腺とマイスナー小体が指紋に沿って整然と規則的に配置されていることがわかる[1]。汗腺はなぜ、指紋の稜線凸部中央に配置されているのだろうか。異性の手と接触する際あるいは学会で指し棒を握りしめる際など、ここぞというタスクを行う際に、汗腺からの発汗により指表面の摩擦係数を増大させて滑りを回避するためだろうか。マイスナー小体はなぜ、指紋凸部にきれいに2列に配置されているのだろうか。指の構造と触覚受容との間には何らかの関係があり、物体の把持や操りといった高度なタスクを行うために必要な配置になっているのだろうか。つまり、指紋などの指腹部の構造と触覚受容器の配置は「器用な手」を持つ霊長類に固有な機構であり、器用なハンドリングのために最適設計されているのではないだろうか！これらの疑問に触発されて、私はヒトの皮膚構造と触覚受容の関係に興味を持った。ところが、獣医に聞いてみると、イヌにも指紋があるという。イヌは高度なハンドリングを行わないはずだが……。

本稿では、イヌは例外と考えるとして、ヒト・霊長類の指腹部と触覚受容器の構造と機能に関するこれまでの知見について概説する。ヒトの触覚を呈示・検出するデバイス、ヒトの触覚を模倣したセンサ、触覚センサを具備するロボットハンドなど、器用な人工の手実現を目指す方の一助となれば幸いである。

2. 皮膚の役割

生物はすべて外皮などで体が覆われている。このうち、陸生無脊椎動物の代表である昆虫(および他の節足動物)はかたい外皮を有するのに対し、多くの脊椎動物は柔軟な皮膚を持つ。昆虫の外皮がかたい理由は、一つ目には、外骨格によって体の構造を維持するためであろう。二つ目に、

外敵や環境からの刺激に抗するという目的があげられよう。三つ目に、小型であるため体積に対する体表面積の比が大きいため、環境の変化に対して水分バランスを維持する役割を担っている。

これに対し、ヒトに代表される脊椎動物は、内骨格系によって構造を維持できること、環境変化や外敵に知的に対処できること、水分バランスや温度の調整機能が優れていること、などの要因により、外皮をかたくする必要から逃れ、柔軟な皮膚を持つことが可能となった。

皮膚が柔軟になったことにより、物体との柔軟な接触が可能となった。物体との接触形態の複雑化に伴い、触覚受容器も分化、多様化、高密度化し、物体を滑り落とさずに把持することや、「つるつる」「ざらざら」といった触感を検出すること、物体の柔らかさ分布を検出することが可能となった。このように、手指の柔軟かつ複雑な構造とセンシングメカニズムは、前肢の冗長多自由度メカニズムと並び、ヒトの柔軟かつ器用な操り運動のために重要である。ヒトの皮膚が柔軟であることは、ヒトがヒトであることと深くかかわっているといえよう。

3. 指腹部における皮膚の構造

ヒトの指腹部における皮膚の構造について概説しよう。皮膚は大きく手掌型の無毛皮膚と有毛皮膚に分けられるが、

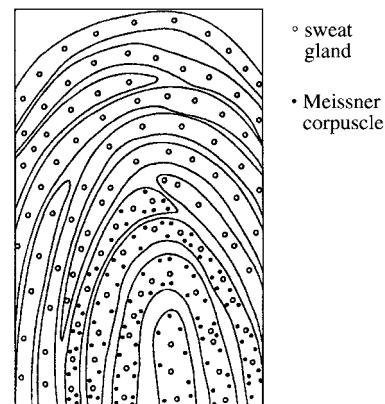


図1 Distribution pattern of epidermal ridge, sweat glands and meissner corpuscles [1]

原稿受付 2000年5月6日

キーワード: Human Finger, Tactile Receptor, Sensor, Structure

*〒223-8522 横浜市港北区日吉3-14-1

*Kohoku-ku, Yokohama-shi, Kanagawa

本解説では「器用な手」に大きくかわる、指腹部などの無毛皮膚について述べる。霊長類の皮膚構造と触覚受容器の構造・機能に関する研究は古くから行われており、解説記事も多い。本学会においても、ヒトの触覚受容器の構造と特徴に関する岩村 [2] の詳しい解説が掲載されているので、そちらも合わせて参照されたい。

霊長類の指先や手（足）のひらには、皮膚パッド (cutaneous pad) と呼ばれるふくらみがあり、それぞれのパッドには凹凸がある。ヒトの場合には指先のみにはパッドが存在し、凹凸は指紋と呼ばれる。これらのパッドは、霊長類が物体の器用な把持やハンドリングを行えることと深くかかわっている。ここでは、ヒトの指先について述べる。

図 2 にヒト指腹部軟組織断面の模式図を示す。ヒト指腹部の軟組織は、表皮 (epidermis)、真皮 (dermis)、皮下脂肪組織 (subcutaneous fat tissue) から成る。表皮と外界との境界には指紋 (epidermal ridge) がある。指紋は高さ約 0.1 [mm]、幅約 0.3~0.5 [mm] の小稜であり、胎児のときに形成されたパターンが一生変わらないことが知られている。また、表皮と真皮の境界には真皮乳頭 (papilla) と呼ばれる突起群がある。真皮乳頭は指紋の直下に整然と 2 列に配置されており、ヒトの場合は真皮乳頭の先端がさらに枝分かれしていることが多い。表皮は角質層 (Stratum

corneum)、透明層、顆粒層、有棘層、基底層より成り、角質層が表皮の 2 分の 1 から 3 分の 2 の厚さを占める。真皮乳頭近傍の基底層および有棘層深部の細胞は有糸分裂を行い、表層に向かって細胞を送り出す。細胞は顆粒層、透明層を上昇しながら次第に角化し、角質層に至る。角質層は、ケラチン (角質) で満たされた非常に扁平な死んだ細胞が堆積したかたい層である。化学的に安定な物質である角質層は体を保護する役割を担っているが、その表面は時間が経つと摩耗し、垢となって剥がれ落ちる。ある触覚センサの研究者が、柔軟なロボットフィンガを工業用ロボットのために実用化しようと試みたところ、摩耗が激しく断念せざるを得なかったという。ヒトのように、軟組織を再生し続けることによって常に表面を新生面に保ち激しい摩耗に耐えるという芸当は、人工物には真似できないことなのかもしれない。

筆者らの計測 [3] によれば、変位が十分小さい範囲では、表皮・真皮・皮下組織の縦弾性係数は、それぞれ、約 1.4×10^5 Pa, 8.0×10^4 Pa, 3.4×10^4 Pa であった。表面に近いほどかたい層となっていることがわかる。指表面と物体との間の摩擦係数は、もちろん対象物によって変化するが、一般に 0.5~2.5 程度である [4]。なお、指紋稜線凸部の汗腺から分泌される汗により、物体との間の摩擦係数は大きく変化する。

4. 触覚受容器の配置と特性

皮下には多数の触覚受容器が存在している。無毛皮膚部には、形・大きさ・配置の異なる複数種の触覚受容器が埋め込まれており、それぞれの触覚受容器の配置は皮膚構造と深くかかわっている。目や耳が独立した単一の組織であることと対照的である。図 2 に四つの触覚受容器の配置を、表 1 に大きさと特性を示す。

図 2 に示したように、マイスナー小体は真皮乳頭内に存在する楕円球状の受容器であり、受容器の内芯が表皮下部の基底層と結合している。真皮乳頭が指紋直下に 2 列に配置されているために、マイスナー小体も図 1 で示したように指紋直下に 2 列に並んでいるのである。

メルケル小体は狭義のメルケル細胞と軸索終末 (メルケル盤) の複合体であり、真皮乳頭間の真皮基底層の最深部

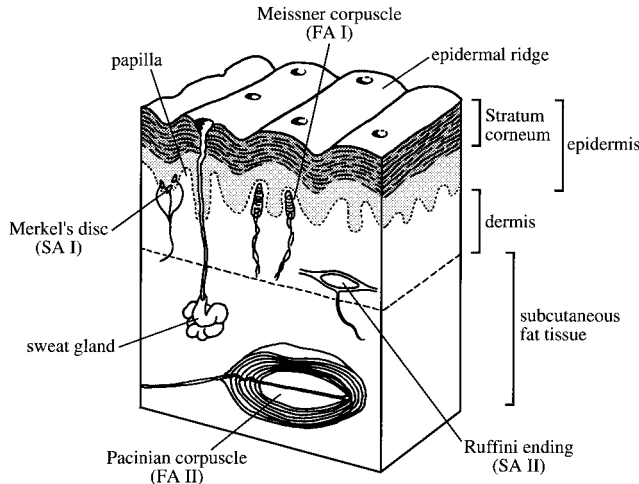


図 2 Tissue and tactile receptors of glabrous skin

表 1 Characteristics of tactile receptors at glabrous tissues

Name of receptors	type	receptive field	adaptation	size
Meissner corpuscle	FA I (RA I)	small	fast	L=20-150 μ m, D=40-70 μ m
Merkel's discs	SA I	small	slow	D=7 μ m, T=1 μ m
Pacinian corpuscle	FA II (RA II, PC)	large	very fast	L=0.3-1.5mm, D=0.2-0.7mm
Ruffini endings	SA II	large	slow	L=0.5-2mm, D=0.2mm

(L: length, D: diameter, T: thickness)

に数個ずつかたまっている．一群のメルケル小体は1本の神経繊維の支配を受ける．

パチニ小体は，皮下組織内や真皮の深層に存在する卵形の大きな受容器であり，1本の無随神経軸索を取り巻く内殻と，それをタマネギの皮のように何層にも包み込む外皮から成る．内殻—外皮間および外皮と外皮の間には液体を含む．

ルフィニ小体は真皮のやや深部に存在する紡錘形の受容器であり，長軸方向が皮膚面に平行である．皮膚を横方向に引っ張るとインパルスを発射することが知られている．

これら四つの触覚受容器の応答特性は，表1に示したようにFA(またはRA)とSAに分類される[2]．RAは古くから生理学者が用いてきた用語であり，FAはValboら[5]が使い始めた用語である．FA, RA, SAは，それぞれ，fast adapting, rapidly adapting, slowly adaptingの略であり，FA(またはRA)は応答(順応, adaptation)の速い受容器，SAは遅い受容器，という意味である．すなわち，前者は刺激量が変化する際に応答する受容器，速度・加速度受容器または周波数帯域が広い受容器，などと呼ばれる．後者は，刺激を持続させるときにインパルスを発射する受容器，刺激強度受容器などと呼ばれる．以下に，制御工学的な言葉を用いた物理的意味の整理を試みる．図3に皮膚表面に振動刺激を加えた場合の機械受容器の振動検出閾値[6][7]を模式的に示す．振動検出閾値とは，加えた振動の振幅がそれ以上であれば触覚受容器がインパルスを発射できる，最小振動振幅である．図より，周波数を変えてもSA I(メルケル小体)の振動検出閾値はほぼフラットであることがわかる．一方，FA I(マイスナー小体)の場合には，数10[Hz]以下の周波数範囲では，周波数が10倍になると振動検出閾値はほぼ10分の1(-20 [dB/dec])になっている．これより，FA Iは数10[Hz]の振動変位に対し最も敏感であるといっても良いが，むしろ，数10[Hz]以下の周波数では振動速度振幅(変位の時間による一回微

分の振幅)の閾値がほぼフラットであるという方が的確であろう．なぜなら，速度の振幅は，周波数と変位振幅の積に比例するからである．

FA II(パチニ小体)では，振動検出閾値は周波数の増加とともに急激に(周波数が10倍になると振動検出閾値はほぼ100分の1(-40 [dB/dec])に)減少し，100~300[Hz]程度で極小値となる．これは，数100[Hz]以下の周波数では振動加速度振幅の閾値がほぼフラットであるということである(加速度の振幅は，周波数の2乗と変位振幅の積に比例するため)．

直感的理解のために，刺激の強さと触覚受容器の出力 y が比例する，という線形近似を強引に行って関係を整理すれば，図3の右側の図のようになる．つまり，SA I(メルケル小体)は変位センサであり，変位入力 x に対するゲインはフラットで，静的な変位(周波数0)にも応答する．FA I(マイスナー小体)は数10[Hz]のカットオフ周波数以下の周波数帯域では速度入力 \dot{x} に対するゲインがほぼフラットとなる速度センサである．FA II(パチニ小体)は数100[Hz]のカットオフ周波数以下の周波数帯域では加速度入力 \ddot{x} に対するゲインがほぼフラットとなる加速度センサである．図示していないが，SA II(ルフィニ小体)もSA Iと同様な特性を呈する．以上のように，四つの触覚受容器は，それぞれ周波数帯域と物理量を分担して検出しているということができる．

一方，FA, RA, SAの後のIおよびIIは，受容野の広さを表す．受容野とは，触覚受容器が応答できる皮膚の範囲である．タイプIは受容野が狭い(直径2~4[mm])タイプ，タイプIIは広くて境界が不鮮明なタイプである．前者は皮膚の上部にある小さな受容器であり，後者は皮膚深部あるいは皮下脂肪層にある大きな受容器である．皮膚は空間周波数フィルタであり[8]，深くなるほど情報はあいまいになるので，受容器の配置と受容野の関係は力学的に妥当であるといえよう．四つの触覚受容器は，時間的な周波数のみならず，空間周波数帯域をも分担して検出しているということができる．

5. 皮膚の構造と触覚受容の関係

上述の議論は，触覚受容器の応答特性の神経生理学的知見である．一方，皮膚の力学的構造と触覚受容との関係はどうなっているのだろうか．つまり，皮膚がどのように変形したときに，触覚受容器は応答するのであるだろうか．

Srinivasan [9] らは，凹凸波長の変化するくし歯状の刺激棒と指断面が接触する際に，触覚受容器が発する神経インパルスの発射頻度と，有限要素法で求めた触覚受容器近傍のひずみエネルギー密度(SED)の分布を比較した．その結果，両者は非常によく似た傾向を示した．つまり，それぞれの触覚受容器は，SEDがそれぞれの受容器の閾値に達

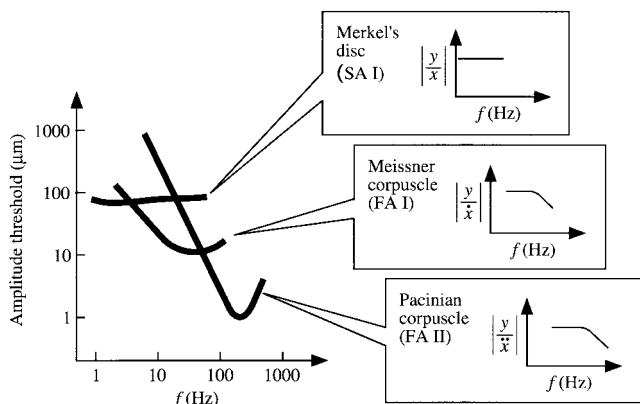


図3 Thresholds of tactile receptors for vibratory stimulus

するとインパルスを発射しているのである。

また、筆者ら [3] [10] [11] は、指腹部の指紋、表皮、真皮、皮下脂肪組織の形状を詳細にモデル化して対象物との静的・動的な接触時における各触覚受容器のインパルス発射頻度を有限要素解析し、それぞれの触覚受容器の配置の妥当性を確認した。つまり、真皮と表皮の境界付近に配置されている SA I (メルケル小体) と FA I (マイスナー小体) は、ちょうど応力集中が生じる場所に配置されているため、皮膚構造の影響を受けやすい。特に、SA I (メルケル小体) は、真皮乳頭を考慮した場合に SED が大きくなり、触覚受容感度が増大する。これは、真皮乳頭の構造により応力集中が生じたためである。一方、FA I (マイスナー小体) は指紋の構造を考慮した場合に SED が大きくなり、触覚受容感度が増大する。これは、それぞれの指紋の凸部で接触反力の極大値が生じ、近傍で応力集中が生じるためである。特に、指紋表面に接線方向の摩擦力が加わった場合には、指紋直下に 2 列に並んだマイスナー小体のうちの一方の SED が大きく、他方の SED が小さくなる。

一方、ヘルツの接触理論 [12] として知られているように、曲面状弾性体が平板と接触する際には、弾性体内部にせん断ひずみエネルギーが極大となる箇所がある。FA II (パチニ小体)、SA II (ルフィニ小体) は、ちょうどせん断ひずみエネルギーが極大となる箇所付近に配置されている。

以上のように、それぞれの触覚受容器は、指紋、真皮乳頭などの複雑な皮膚構造と深くかわり合うことによって、触覚情報を検出しているのである。

6. おわりに

ヒト指腹部と触覚受容器の構造と機能について概説した。現代人は五感のうち視覚を用いる割合が 90% であるともいわれるが、大脳皮質マップを見ると、体性感覚野はずいぶん大きい。このことは、触覚情報処理の複雑さと多様さを表しているといえよう。しかし、多種類の触覚受容器で得た複雑な情報を脳でどのように処理しているのかという点についてはまだ明らかになっていない点が多い。触覚受容器の特性に関して先駆的な仕事 [5] を行った Johansson も近年は脳の研究に注力している [13] といったように、近年は、触覚受容とその情報処理にスポットが当てられている感がある。一方、ヒトの触覚に学ぶ触覚センサや触覚ディスプレイの研究 [14] [15] も盛んに行われており、今後の進展が期待されている。以上のように、ヒトについての理解を深めるとともに、ヒトに学ぶ人工物の設計法を明らかにすることがますます求められているといえよう。

参考文献

- [1] H.H. Kornhuber: The Somatosensory System. Georg Thieme, Stuttgart, 1975.
- [2] 岩村: “ヒト触覚受容器の構造と特性”, 日本ロボット学会誌, vol.2, no.5, pp.438-444, 1984.
- [3] 前野, 小林, 山崎: “ヒト指腹部構造と触覚受容器位置の力学的関係”, 日本機械学会論文集, C 編, vol.63, no.607, pp.881-888, 1997.
- [4] 嶋田, 韓, 川村: “人間の手指の摩擦特性の解析”, 計測自動制御学会論文集, vol.32, no.12, pp.1581-1587, 1995.
- [5] A.B. Vallbo and R.S. Johansson: “Properties of Cutaneous Mechanoreceptors in the Human Hand Related to Touch Sensation,” Human Neurobiol 3, pp.3-14, 1984.
- [6] W.H. Talbot, I. Darian-Smith, H.H. Kornhuber and V.B. Mountcastle: “The Sense of Flutter-Vibration: Comparison of the human Capability with Response Patterns of Mechanoreceptive Afferents from the Monkey Hand,” J. Neurophysiology, 31, pp.301-335, 1968.
- [7] A.W. Freeman and K.O. Johnson: “A Model Accounting for Effects of Vibratory Amplitude on Responses of Cutaneous Mechanoreceptors in Macaque Monkey,” J. Physiol., 323, pp.43-64, 1982.
- [8] R.E. Ellis and M. Qin: “Singular-Value and Finite Element Analysis of Tactile Space Recognition,” Proc. IEEE ICRA, vol.3, pp.2529-2534, 1994.
- [9] M.A. Srinivasan and K. Dandekar: “An Investigation of the Mechanics of Tactile Sense Using Two-Dimensional Models of the Primate Fingertip,” Trans. ASME, J. Biomech. Eng., 118, pp.48-55, 1996.
- [10] 小林, 前野: “ヒト指腹部構造と触覚受容器位置の力学的関係 (第 2 報, 動的接触解析手法および移動する平面と指の動的接触解析結果)”, 日本機械学会論文集, C 編, vol.64, no.628, pp.4798-4805, 1998.
- [11] 小林, 前野: “ヒト指腹部構造と触覚受容器位置の力学的関係 (第 3 報, 凹凸を有する面と指の接触解析結果)”, 日本機械学会論文集, C 編, vol.65, no.636, pp.3321-3327, 1999.
- [12] K.L. Johnson: Contact Mechanics. Cambridge Univ. Press, 1985.
- [13] R.S. Johansson: “Sensory Control of dexterous manipulation in humans,” In: Hand and Brain. edited by A.M. Wing, P. Haggard, and J.R. Flanagan, New York: Academic, pp.381-414, 1996.
- [14] 山田: “把持までのセンシング戦略, その 2: 滑りと静摩擦係数の検出 - 表面粗さ情報の取得”, 日本ロボット学会誌, vol.11, no.7, pp.959-965, 1993.
- [15] 山田: “触覚”, 日本ロボット学会誌, vol.16, no.7, pp.893-896, 1998.



前野隆司 (Takashi Maeno)

1962年1月19日生。1986年東京工業大学機械工学専攻修士課程修了。同年キヤノン(株)入社。1990~1992年カリフォルニア大学バークレー校客員研究員。1995年慶應義塾大学専任講師, 現在助教授。工学博士。1995年日本音響学会技術開発賞受賞。1999年日本機械学会賞(論文)受賞。アクチュエータ, センサ, ロボット等の研究に従事。日本機械学会, 計測自動制御学会, 日本音響学会, 日本デザイン学会等の会員。(日本ロボット学会正会員)