

ヒト指腹部構造と触覚受容器位置の力学的関係*

前野 隆 司^{*1}, 小林 一 三^{*2}, 山 崎 信 寿^{*1}Relationship between Structure of Finger Tissue
and Location of Tactile Receptors

Takashi MAENO, Kazumi KOBAYASHI and Nobutoshi YAMAZAKI

There are several tactile receptors at specific locations in the tissue of human fingers. In this study we calculate in detail the deformation of finger tissue when a finger comes into contact with a rigid plate using a FE (finite element) model in order to clarify the reason for the precise location of the receptors. The FE model is constructed using the measured geometry and properties. As a result, we found that the strain energy is concentrated at tactile receptor locations. When a frictional force is applied, the stress/strain is concentrated near the edge of the contact area. By calculating using models with/without epidermal ridges/papillae, we found that the shape of the epidermal ridges/papillae influences the stress/strain distribution near the tactile receptors.

Key Words: Biomechanics, Contact Problem, Finite Element Method, Skin, Tissue, Tactile Receptor, Sensor

1. 緒 言

ヒトは、物体の表面をなぞる触運動によって物体表面の状態や質感を検知したり、物体を滑ることなく巧みに把持することができる。このような優れた特性を持つヒトの触覚受容機構を解明することは、生体を模倣した触覚センサや仮想的な触覚生成機構の開発のために重要である。

Johanson ら^{(1)・(2)}は、皮膚表面を刺激した場合の種々の触覚受容器の応答特性や受容野(触覚受容範囲)を、微小電極を用いた神経繊維の活動電位の計測から明らかにした。また、野呂⁽³⁾、赤松⁽⁴⁾は、ヒトが触運動によって接触対象物の表面粗さを認識する際の、指の押圧力と速度を計測した。さらに、機械工学的見地から、皮膚の変形を測定またはモデル化する試みも数多く行われている^{(5)・(8)}。工藤⁽⁵⁾は、皮膚変形の受容器への力学的影響を、皮膚粘弾性式を用いて一般化した。Srinivasan⁽⁸⁾らは、円形の指断面モデルの変形を有限

要素法を用いて解析した。しかし、従来の研究では、指内部構造と触覚受容器の位置関係など、生体組織細部の形態と配置には必ずしも十分な注意が払われてはいなかった。

本研究では、ヒト指腹部の皮膚表面(指紋)および皮下組織が複雑な形状を有すること(Fig. 1)に着目し、皮膚構造を有限要素法を用いて詳細にモデル化した。本モデルを用い、指が物体と接触した場合の触覚受容器近傍の応力・ひずみ状態を解析し、皮膚の構造と触覚受容器の位置の力学的関係を明らかにする。

2. モデルの構築

2・1 構造モデル Fig. 1にヒトの指腹部の皮膚及び皮下組織の構造と触覚受容器の位置・形状を示す^{(9)・(10)}。皮膚組織はおもに表皮、真皮、皮下組織の三層からなり、表皮と真皮の境界には指紋直下に柱状の真皮乳頭が突出している。指腹部内部にはマイスナー小体(長さ約150 μm , 直径40~70 μm), メルケル細胞(直径約7 μm , 厚さ約1 μm), ルフィニ終末(長さ0.5~2mm), パチニ小体(長さ0.5~2mm, 直径約0.7mm)などの触覚受容器が、それぞれFig.1に示した固有の位置

* 原稿受付 1996年6月6日。

^{*1} 正員, 慶応義塾大学理工学部(〒223 横浜市港北区日吉3-14-1)。^{*2} 学生員, 慶応義塾大学大学院。

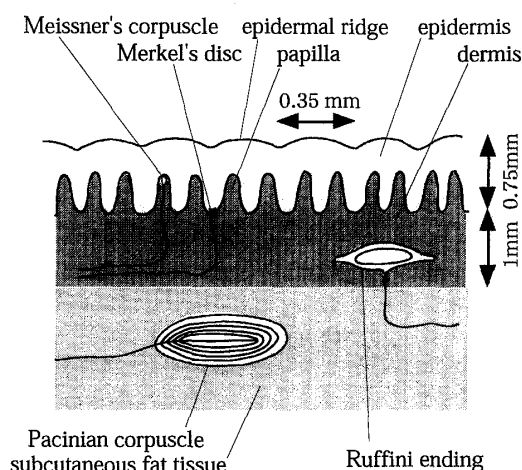


Fig. 1 Mechanoreceptors in finger tissue

Table 1 Characteristics of Mechanoreceptors ⁽¹⁰⁾

Name	Adaptation	Receptive fields	Detect Type
Meissner's corpuscle	Fast	Small	Velocity
Merkel's disc	Slow	Small	Intensity & Velocity
Ruffini ending	Slow	Large	Intensity
Pacinian corpuscle	Fast	Large	Acceleration

に配置されている。各触覚受容器は、Table 1 に示した触覚受容特性を有する ⁽¹⁰⁾。

このような構造の指腹部に対し、有限要素法コード MARC を用いた構造解析を行う。Fig. 2 に、示指（人差し指）の指紋の中心を通る末節骨直交断面全体をモデル化した有限要素分割図を示す。図の x 軸方向に指を動かす触運動時には、要素の面外方向の皮膚変形は小さいと考え、平面ひずみ要素を用いた。爪と末節骨は軟組織に比べて十分剛性が大きいため、要素は作らず、その表面の節点の x, y 方向変位を拘束した。Fig. 2 (b), (c) は、指紋一個に対応する表皮・真皮を 1 ユニットとした部分モデルで、指紋の稜線凸部のある場合 (b)、および、ない場合 (c) である。全体モデル (Fig. 2 (a)) の表皮・真皮部に、部分モデル (Fig. 2 (b), (c)) を複数個はめ込むことにより、指紋の稜線凸部の有無の触覚受容への影響を解析できる。また、表皮・真皮の物性値を変化させれば、真皮乳頭の有無の触覚受容への影響も解析できる。ユニットをはめ込んだときのモデルの要素数は約 3700、節点数は約 3900 である。Fig. 2 の記号 (●■▲▼) で示した箇所は、四種類の触覚受容器が配置されている位置の節点を表す。

モデルの寸法及び物性値の詳細は、第 3 章で述べる測定により決定する。

2.2 解析手法 指と物体との基本的な接触特性を求めるために、指が平面状の剛体と接触する場合を

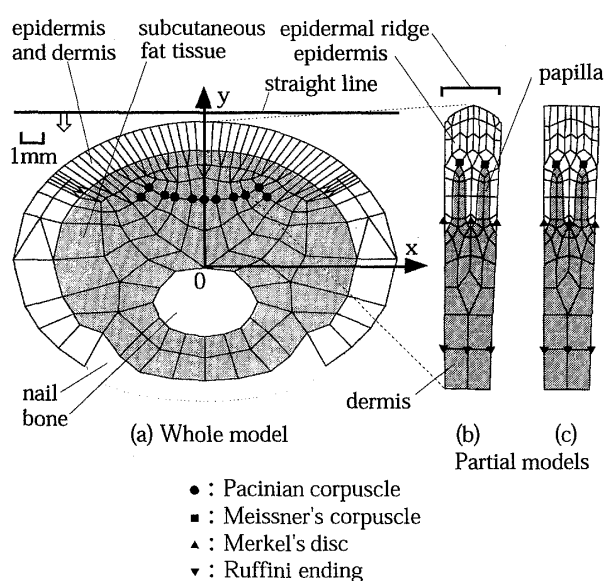


Fig. 2 Finite element model of finger cross section

想定し、x 軸に平行な直線 (Fig. 2 (a) straight line) と指断面モデル上面（指腹部）との接触解析を行う。第 3 章で述べるように、本解析の変形量の範囲では、線形な弾性係数を用いても妥当な変位・荷重関係を得ることができるため、軟部組織の材料非線形性は無視する。ただし、大変形による非線形性は考慮する。慣性力の影響は小さいので無視し、静的解析を行う。

まず、法線 (y) 方向の接触反力が加わる場合の解析では、接触する直線を -y 方向に数段階に分けて移動させ、摩擦力を考慮しない場合の直線と指表面との接触状態を求める。すなわち、直線と接触する節点では y 方向反力が正、非接触となる節点では反力が 0 となるような指の変形状態を求める。

接線 (x) 方向に摩擦力が加わる場合の解析では、クーロン摩擦を仮定し、法線反力に比例する接線反力（動摩擦力）が加わる場合の解を求める。まず、直線を y 方向に移動させて指表面と接触させた後に、直線を x 方向に移動させ、全体を滑らせる場合の結果を求める。この解析条件は、実際の指を左右に動かして行う触運動に対応している。動摩擦係数は、山羽ら ⁽⁷⁾ が計測した、指と様々な物体との間の摩擦係数の平均的な値である 1.0 とする。したがって、接触する節点には法線反力と同じ大きさの接線反力が加わることとなる。

3. モデルパラメータの決定

3.1 形状の測定 指の外径形状は、右手示指の石膏型を採取し、指紋の中心を通る末節骨直交断面と交わる外径線を石膏型の外周に沿って描き、外径線を読み取り顕微鏡で計測して求めた。その結果、指の外径線

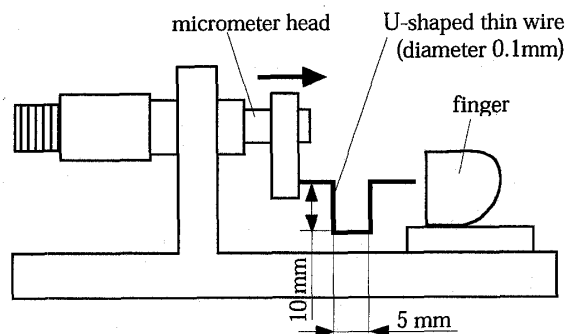


Fig. 3 Measurement system for property of finger tissue using U-shaped elastic thin wire

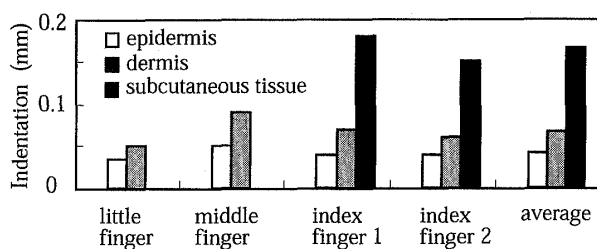


Fig. 4 Measured indentation of finger tissue

は、長軸17.44mm、短軸13.60mmの楕円に、指腹部側では誤差3.5%以内、爪側では6.5%以内で一致した。このため、解析モデルの外径形状は上述の寸法の楕円とした。

指断面内の真皮、表皮の厚さおよび末節骨、爪の断面形状は、ヒト新鮮屍体の示指断面を解剖し、ノギスによって計測した。その結果、指腹部の真皮、表皮の厚さはそれぞれ約0.75mmおよび1.0mmであったので、これらの値をモデルの真皮、表皮厚さとして用いる。

指紋の稜線凸部および真皮乳頭の形状は、指断面写真⁽¹¹⁾を参考に決定した。指紋の稜線の高さは約0.1mm、ピッチは約0.35mm、真皮乳頭の高さは約0.35mm、幅は0.11mmとした。

3.2 弾性率の比の測定 ヒトの皮膚の物性値の計測はこれまでも行われている^{(5)-(7), (12)}が、皮膚を真皮・表皮に分けた計測結果は示されていない。厚さ1mm前後の表皮、真皮の物性値を測定するためには、微小な変位計が必要である。このため、Fig. 3に示したように、直径0.1mmのU字状の銅製弾性針をヒト新鮮屍体の指断面にマイクロメータを用いて0.2mm押し込み、その時の弾性針の変形量を読み取り顕微鏡で測定することによって、皮膚組織の相対的弾性を求めた。弾性針のばね定数は、0.21N/mである。なお、実際の皮膚組織の変位と荷重は非線形の関係にあるため、厳密には押し込み量を変えて計測を行う必要があるが、Fung⁽¹²⁾の測定によれば変形量の小さい範囲では線形関係があること、および本研究では定性的な比を求めることから、押し込み量を一定

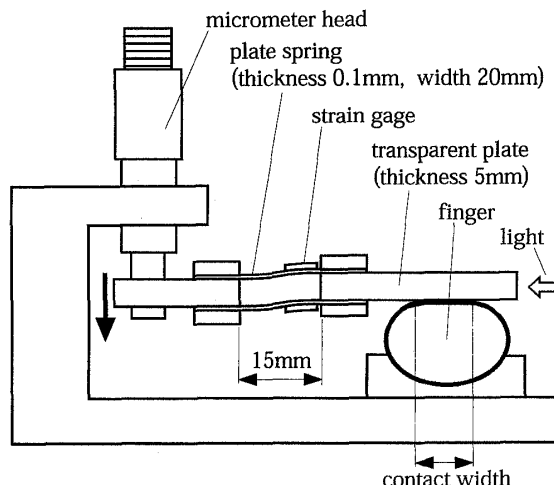


Fig. 5 Measurement system for deformation, contact width, and normal force between finger tissue and plate

値として測定した。

新鮮屍体より切り出した小指、中指指腹部の表皮・真皮、および、示指指腹部2カ所の表皮・真皮・皮下組織に対し、マイクロメータヘッドを0.2mm押し込んだときの、組織への針先端の押し込み量をFig. 4に示す。この結果から計算した表皮・真皮・皮下組織の弾性率の平均値の比は約8:5:2であった。

3.3 物性値の決定 剛体平板と指腹部が接触する際の荷重、変形量、接触面積の関係を測定し、また、前掲の皮膚組織の弾性率の比を保ったまま組織の縦弾性係数の値を変えて有限要素法による接触解析を行い、荷重と変形量の関係及び荷重と接触面積の関係が測定値と一致するように表皮・真皮・皮下組織の縦弾性係数を求めた。

Fig. 5に測定装置を示す。指に押し込む透明なアクリル平板が、二枚の平行なりん青銅製の板ばねを介して、マイクロメータヘッドに接続されている。マイクロメータヘッドを押し込むと、アクリル板は平行移動して指腹部に接触し、板ばねは変形する。板ばねにはひずみゲージが貼られており、板ばねのひずみから板ばねの変形量および押圧力が求められる。したがって、マイクロメータヘッドの押し込み量から板ばねの変形量を減算することによって、アクリル平板の指への押し込み量が求められる。また、透明なアクリル板の側面から可視光を照射し、アクリル板を光導波路として用いると、アクリル板が指と接触した部分でのみ散乱光が発生するので、散乱光を上から撮影することによって、指と平板との接触領域を測定することができる。散乱光の測定例をFig. 6に示す。また、Fig. 7に、モデルと同一の部位における接触幅と荷重の測定結果を□で示す。

次に、第2章で構築した指モデルに直線を押し込んだ

場合の、押し込み量と接触幅、押し込み量と荷重の関係の計算を行い、測定値と比較して指の軟組織の物性値を決定する。接触解析で得られる接触荷重は接触線上の分布であるので、実際の面状接触荷重分布に換算して比較する必要がある。実際の指と平板との接触領域の形状はほぼ楕円形状であった。このため、同心楕円上の荷重値は等しいと仮定して、計算で求めた二次元接触荷重分布を三次元の総荷重に換算することによって、計算値を実験値と比較する。

前掲の皮膚組織の弾性率の比を保ったまま組織の縦弾性係数の値を変えて有限要素法による接触解析を行った結果をFig. 7に示す。図(a)を見ると、縦弾性係数の値を変えても押し込み量と接触幅の関係はあまり変化せず、接触幅は測定値よりも小さめになっている。これは、実際の指断面形状は完全な楕円形ではないことに起因すると考えられる。しかし、両者の傾向は良く一致しているので、解析モデルの外径形状を実際の指に近づけることはせず、単純な形状である楕円とすることにする。図(b)を見ると、表皮・真皮・皮下組織の縦弾性係数がそれぞれ $1.36 \times 10^5 \text{ Pa}$, $8.0 \times 10^4 \text{ Pa}$, $3.4 \times 10^4 \text{ Pa}$ のときに、計算値は測定値と良く一致している。したがって、本計算の範囲では、線形な材料特性を用いても、接触による変位-荷重の非線形関係を十分表現できることがわかった。このため、以下ではこれらの値を用いて解析を行う。なお、皮膚組織のポアソン比は0.48とした⁽¹²⁾。

4. 解析結果と考察

4・1 法線荷重・接線荷重の影響 法線荷重および接線荷重の、触覚受容器近傍の応力・ひずみ状態への影響をみるために、指紋および真皮乳頭のあるモデル (Fig. 2 (b)) の法線方向に平板を0.8mm押し込んだ場合、および、さらに平板を接線方向に滑らせた場合の計算を行った。Fig. 8およびFig. 9に、両者の変形分布およびミーゼスの相当応力分布を示す。ミーゼスの相当応力 σ は、主応力 σ_1 , σ_2 , σ_3 および主せん断応力 τ_1 , τ_2 , τ_3 を用いて、次式で表される。

$$\sigma = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (1)$$

$$= \sqrt{2} \cdot \sqrt{\tau_1^2 + \tau_2^2 + \tau_3^2}$$

一般に、ミーゼスの相当応力は塑性力学で用いられる指標であるが、式(1)より明らかなように、ミーゼスの相当応力はせん断歪エネルギーに比例するので、本研究では応力値の相对比较を行うための指標として用いた。

法線方向に平板を押し込んだ場合には、法線方向荷重 (接触する節点のy方向荷重の総和) は0.12Nであった。

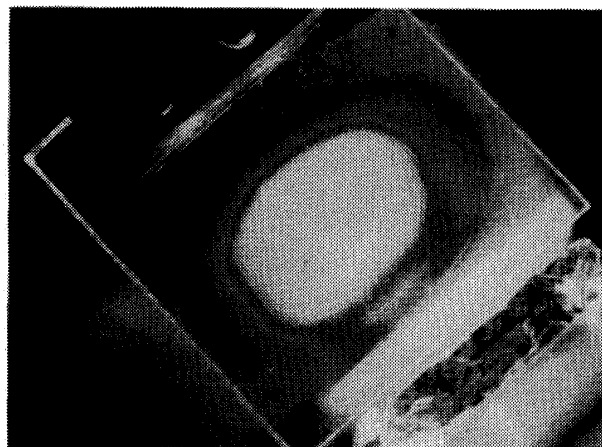
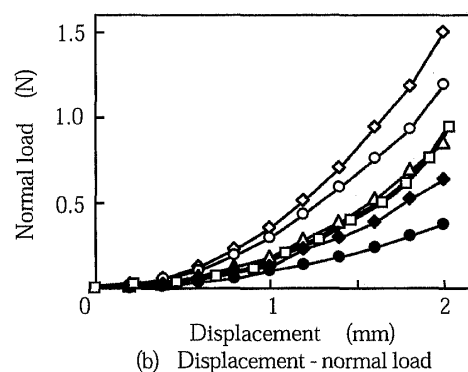
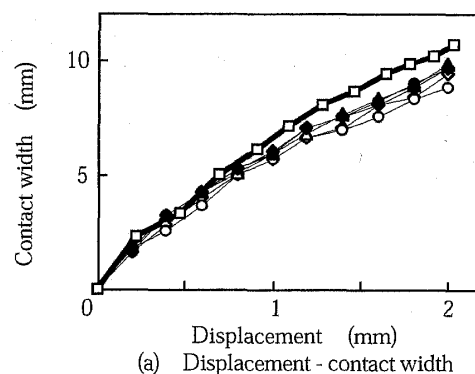


Fig. 6 Measured contact region between the finger tissue and the plate



	Young's moduli used for calculation (MPa)	epidermis	dermis	subcutaneous tissue
◇	0.24	0.15	0.06	
○	0.2	0.125	0.05	
△	0.136	0.08	0.034	
●	0.1	0.0625	0.025	
■	0.06	0.0375	0.015	
□	experimental result			

Fig. 7 Measured and calculated relationship between displacement and contact width/normal load

接線方向に平板を滑らせた場合には、摩擦係数が1であるので、法線方向及び接線方向荷重 (動摩擦力) 0.12Nが

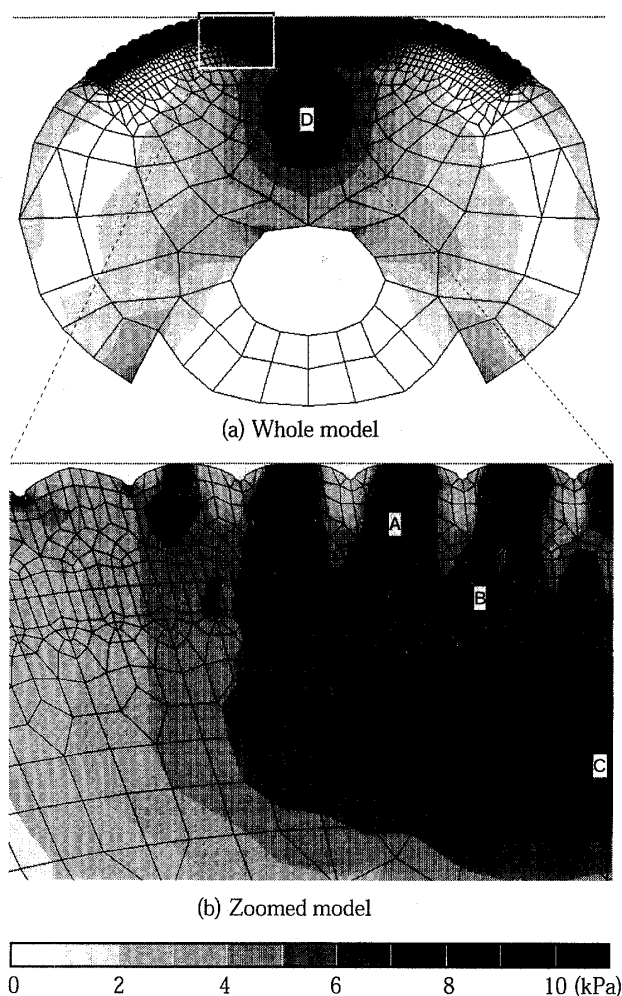


Fig. 8 Equivalent Von Mises stress distribution when normal contact load is applied

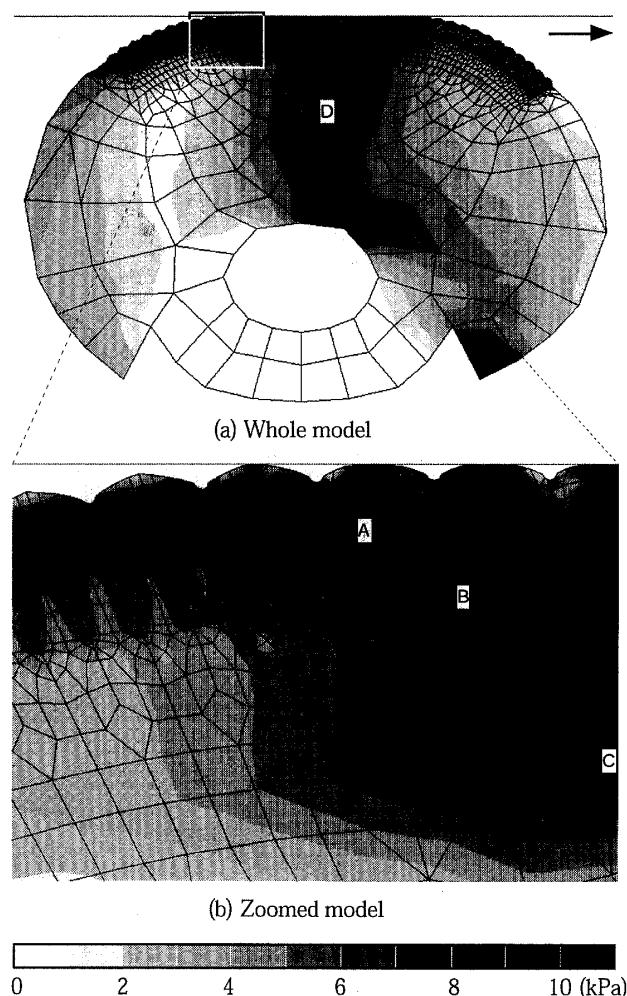


Fig. 9 Equivalent Von Mises stress distribution when normal and tangential contact load are applied

指表面に加わっている。

Fig. 8およびFig. 9より、摩擦力の有無に関わらず、マイスナー小体(A)、メルケル細胞(B)、ルフィニ終末(C)、パチニ小体(D)の存在する部分において応力が集中していることがわかる。これらは主に触覚受容器が皮膚組織の境界面付近に配置されていることに起因する。

直線の押し込み量を0.1mmから1.0mmまで0.1mm置きに変えた場合の、y軸 (Fig. 2参照) 上におけるミーゼスの相当応力分布をFig. 10に示す。y=5.62および6.37の位置で応力値が不連続となるのは、組織の物性値がこの点で変化するためである。パチニ小体が配置されている皮下組織内の応力は、他の受容器の位置の応力と異なり、平板の押し込み量が大きくなるに従って応力集中位置が深部に移動している。これは、材料物性が均一な円筒と平面との接触時の応力集中⁽¹³⁾と類似した現象である。パチニ小体は皮下組織の様々な深さの場所に分布しているが、これにより、任意の大きさの法線方向接触力

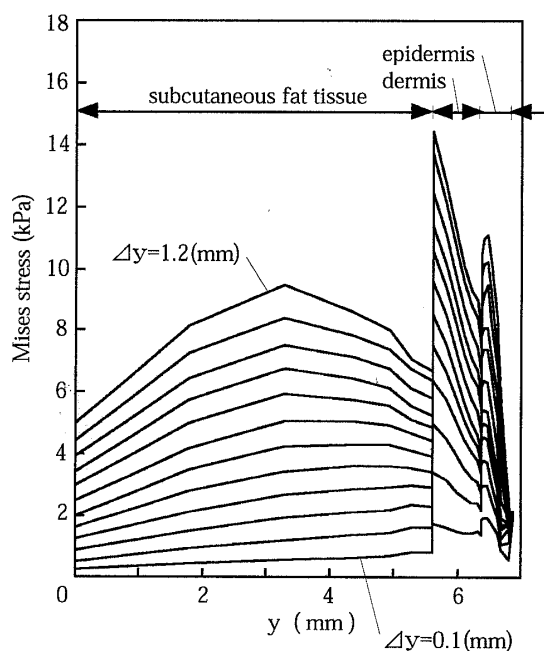


Fig. 10 Equivalent Von Mises stress distribution at $x=0$ for different penetration of the straight line

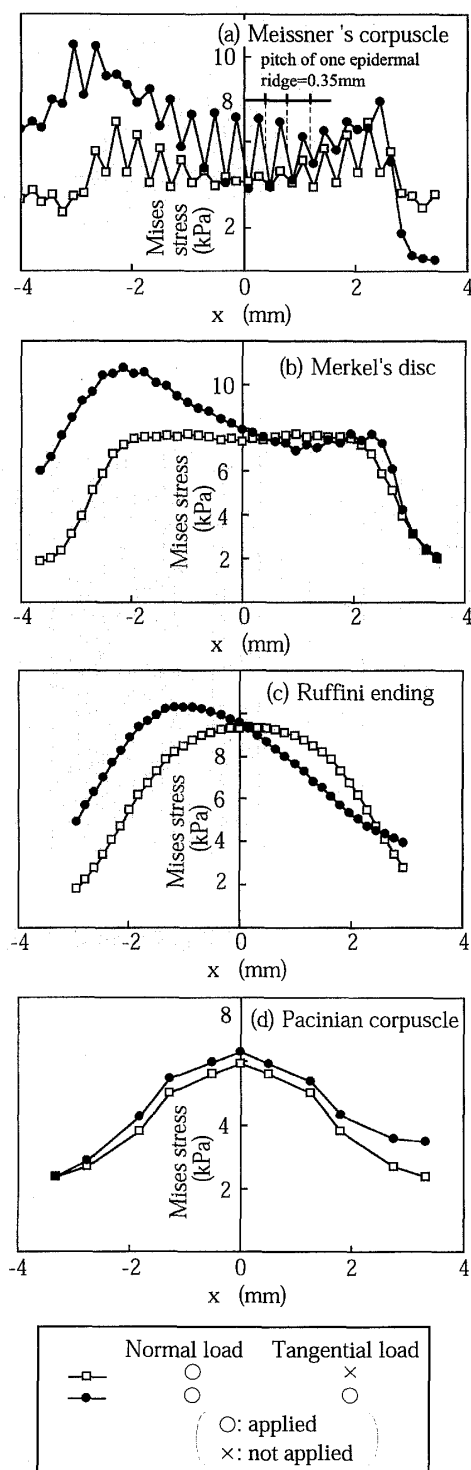


Fig. 11 Stress distribution at mechanoreceptors with and without tangential contact load

によって生じた様々な位置の応力集中を受容することができると考えられる。

法線荷重および接線荷重の、触覚受容器近傍の応力への影響を詳細にみるために、Fig. 2に記号(●▲▼)で示した四種類の触覚受容器の位置におけるミーゼスの

相当応力分布をFig. 11に示す。図(a)から(d)はそれぞれマイスナー小体、メルケル細胞、ルフィニ終末、パチニ小体の存在する位置におけるx軸方向ミーゼス応力分布である。

図(a)のマイスナー小体位置の応力分布をみると、垂直荷重のみが加わった場合(□)には、応力は左右対称に分布し、接触端部($x=\pm 2\text{mm}$ 付近)において最大となっている。一方、平板が滑り、接線力が加わる(●)と、接触開始側($x=-3\text{mm}$ 付近)の応力が大きくなっている。ヘルツの弾性接触理論⁽¹³⁾によれば、平板と接触した円筒が右向きの接線荷重を受け、右向きに変形すると、応力集中位置は円筒内部の中心軸上から右側へ移動する(付録参照)。本結果は、弾性接触理論の知見と反する。これは、本モデルは末節骨および爪の部分でのみ変位が拘束されており、弾性接触理論とは構造および境界条件が異なることに起因する。マイスナー小体の受容野は比較的狭い(Table 1)ので、マイスナー小体は接線力の有無による応力集中の変化が大きくなる位置に配置されていることがわかる。

なお、接線荷重の有無に関係なく、共に応力が一つおきに大小となっている。これは、指紋一つに対し真皮乳頭が二つあり、真皮乳頭頭部にマイスナー小体が位置することに起因する。それぞれの指紋を弾性接触理論(付録)の円筒と対応づけて考えれば、指紋の突起部が平板と接触し、x軸方向に変形すると、指紋直下では応力集中位置が指紋中心部からx方向に移動することがわかる。この結果、指紋直下の二つのマイスナー小体の位置の応力は異なることとなる。したがって、マイスナー小体は、指紋直下の真皮乳頭上部に二列に配置されることによって、指紋稜線の変形を感度良く検出していると考えられる。なお、応力値が一つ置きに大小となる現象は、隣接した触覚受容器における検出量の傾きを求めるために生体内で行われる側抑制と何らかの関係があるのではないかと考えられる。

Fig. 11 (b)のメルケル細胞位置の応力分布をみると、マイスナー小体同様、垂直荷重のみが加わった場合には、接触端部($x=\pm 2\text{mm}$ 付近)の応力が最大となり、接線荷重が加わると接触開始部分($x=-2\text{mm}$ 付近)の応力が最大になっている。メルケル細胞の受容野も比較的狭い(Table 1)ので、メルケル細胞も接線力の有無による応力集中の変化が大きくなる位置に配置されていることができる。

Fig. 11 (c)にルフィニ終末の位置における応力分布を示す。垂直荷重のみが加わった場合には中央部($x=0\text{mm}$)の応力が、接線荷重が加わると接触開始側($x=-1\text{mm}$ 付近)の応力が、最大になっている。しかし、

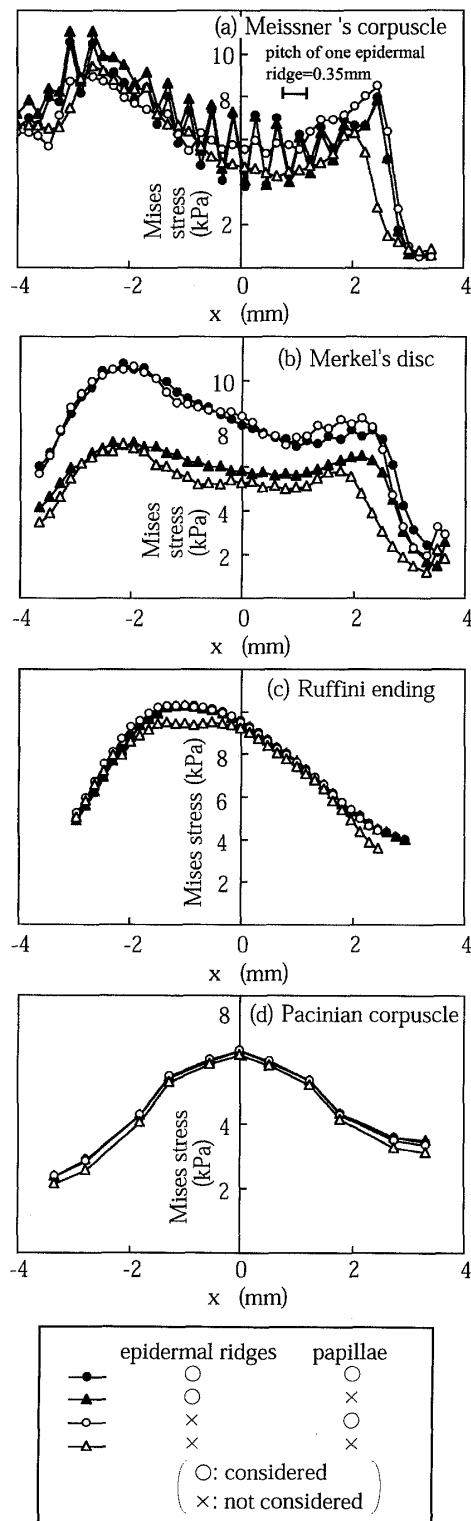


Fig. 12 Stress distribution at mechanoreceptors with and without epidermal ridges/papillae

ルフィニ終末の受容野は広く (Table 1), 数 mm から十数 mm である^{(1)・(2)} ので, 接線力の有無による応力集中の微妙な変化を検出するには適していない。したがって, ルフィニ終末は, 圧迫力のセンサとしての役割

Table 2 Effect of the contact force and the structure of finger tissue on stress concentration near the mechanoreceptors

Name of mechanoreceptors	Contact force Normal	Contact force Tangential	Structure epidermal ridges	Structure papillae
Meissner's corpuscle	○	○	○	△
Merkel's disc	○	○	△	○
Ruffini ending	○	△	×	×
Pacinian corpuscle	○	×	×	×

○: Contact force or structure largely affects the stress concentration near the mechanoreceptors.

△: Contact force or structure rarely affects the stress concentration near the mechanoreceptors.

×: Contact force or structure does not affect the stress concentration near the mechanoreceptors.

を果たしていると考えられる。

Fig. 11 (d) にパチニ小体の位置における応力分布を示す。パチニ小体においては接線力の影響はほとんど見られない。また, パチニ小体の受容野は広い (Table 1)。したがって, パチニ小体は, 接線力による応力分布の変化をとらえているとは考えにくく, 圧迫力のセンサとしての役割を果たしていると考えられる。

4・2 指紋・真皮乳頭の影響 Fig. 2 で示したモデルを用いて, 指紋および真皮乳頭の有無が触覚受容器近傍の応力状態へ与える影響を解析した。解析方法は 4・1 節と同様である。Fig. 12 に, 指紋稜線凸部および真皮乳頭があるモデルおよびないモデルにおける, ミーゼスの相当応力の分布を示す。

Fig. 12 (a) のマイスナー小体位置の応力分布をみると, 指紋の無いモデルでは応力が滑らかに分布している。一方, 指紋のあるモデルでは, 4・1 節で述べたように, 指紋稜線凸部があることによって, 応力値が一つおきに大小となっている。これより, 従来は滑りどめとしての役割を担っていると考えられてきた⁽¹⁴⁾ 指紋稜線凸部の形状は, 触覚受容感度の向上のためにも重要な役割を担っていると考えられる。

Fig. 12 (b) のメルケル細胞の位置の応力分布をみると, 真皮乳頭のあるモデルは真皮乳頭の無いモデルよりも応力が大きくなっている。このことから, 真皮乳頭の存在がメルケル細胞の位置の応力集中に影響しているといえる。このため, 真皮乳頭の形状はメルケル細胞の触覚受容感度の向上のために重要と考えられる。

Fig. 12 (c) および (d) の, ルフィニ終末・パチニ小体の位置の応力分布をみると, 指紋稜線凸部および真皮乳頭の有無によって, 触覚受容器の位置の応力状態はほとんど変化していない。これより, ルフィニ終末およびパチニ小体は, 指紋・真皮乳頭の形状変化の影響をほ

とんど受けないことがわかる。

Table 2に、以上の解析結果のまとめを示す。マيسナー小体、メルケル細胞は、接線力（摩擦力）の変化を検出できるセンサであり、ルフィニ終末、パチニ小体は法線力を検出する圧迫力センサであると考えられる。また、指紋稜線凸部の形状はマيسナー小体の、真皮乳頭の形状はメルケル細胞の、触覚受容感度向上のために重要である。

5. 結 論

測定によって求めた形状及び材質を用いて指の2次元断面の有限要素モデルを作成した。本モデルを用いて指紋・真皮乳頭を有する皮膚の構造と触覚受容器の位置との関係を考察した結果、それぞれの触覚受容器は応力集中の大きい部分に存在すること、接線力および指紋・真皮乳頭の形状は受容野の小さい触覚受容器の特性に大きな影響を及ぼすこと等が明らかになった。

今後は触覚受容器の動的応答特性を解析するとともに、皮膚の触覚受容器を模倣した分散型触覚センサの開発を行ってゆく予定である。

最後に、本研究への助言を賜るとともにヒト指頭部の解剖を行って頂いた慶応義塾大学医学部助手名倉武雄氏に謝意を表す。

付録 弾性接触理論の解

一様な材質の半無限平板と円筒が接触し、接線力が加わった場合の、半無限平板内の主せん断応力の分布⁽¹³⁾をFig. 13に示す。ただし、接触領域は $-1 < x/a < 1$ 、半無限平板と円筒の間の摩擦係数は0.2であり、法線反力 f_n の0.2倍の接線反力 f_t が右向きに加わっている。図より、円筒と接触した半無限平板が右向きの接線荷重を受けると、応力集中位置は半無限平板内部の中心軸上から右側へ移動する様子がわかる。ミーゼスの相当応力分布も同様な傾向を示す。

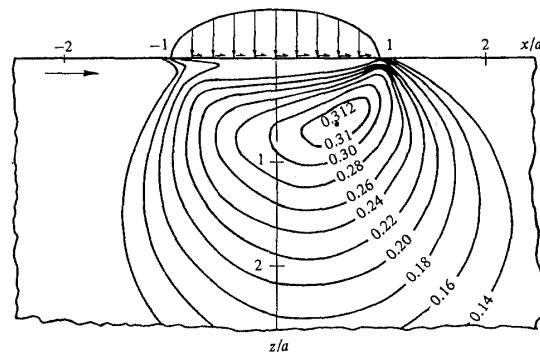


Fig. 13 Contours of the principal shear stress beneath a sliding contact, $f_t = 0.2 \cdot f_n$

文 献

- (1) Johansson, R.S., Tactile Sensibility in the Human Hand: Receptive Field Characteristics of Mechanoreceptive Units in the Glabrous Skin Area. *J. Physiol.* 281, (1978), 101-123
- (2) Johansson, R.S., Tactile Sensibility in the Human Hand: Relative and Absolute Densities of Four Types of Mechanoreceptors in the Glabrous Skin Area. *J. Physiol.* 286, (1979), 283-300
- (3) 野呂, 感覚計測に関する人間工学の適用—触覚計測を例として—, 計測と制御, 23-3, (1989), 283-288
- (4) 赤松, あらさ知覚における触運動の速度・押圧力の特性, 第9回バイオメカニズム学術講演会 (1988), 51-54
- (5) 永沼, 谷江, 工藤, 小特集 生体の硬さ測定と人工感覚 機械による硬さ認識 皮膚の力学的挙動と計測法, 計測と制御, 3-14, (1975), 263-280
- (6) 朝野, 鈴木, 尾俣, 皮膚の力学的特性とその測定法, 日本バイオレオロジー学会誌, 6-3 (1992), 17-25
- (7) 山羽, 高野, 尾崎, 人間の指の物理的特性, バイオメカニズム 3, (1975), 27-45
- (8) Srinivasan, M. A. and Dandekar, K., An Investigation of the Mechanics of Tactile Sense Using Two-Dimensional Models of the Primate Fingertip, *Trans. ASME, J. Biomech. Eng.*, Vol. 118 (1996), 48-55
- (9) 岩村, ヒト触覚受容器の構造と特性, 日本ロボット学会誌, 2-5, (1984), 54-60
- (10) Shepherd, G. M. ほか, *Neurobiology*, Oxford Univ. Press, (1988)
- (11) 小川, 組織学 第2版, 文光堂, (1993)
- (12) Fung, Y. C., *Biomechanics: Mechanical Properties of Living Tissues*, Springer-Verlag (1981)
- (13) Johnson, K. L., *Contact Mechanics*, Cambridge Univ. Press (1985)
- (14) 岡島, 皮膚紋理, 小児医学, 4-6, (1974) 160-172