

# 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接触解析結果)

小林一三<sup>\*1</sup>, 前野隆司<sup>\*2</sup>

## Relationship between the Structure of Finger Tissue and the Location of Tactile Receptors (2nd Report, Method of Dynamic Contact Analysis and Results for contact between the Finger and Plane Plate)

Kazumi Kobayashi and Takashi MAENO

*We calculate the transient dynamic response of the human finger skin and strain energy distribution at the tactile receptors. Especially, we focus on the effect of epidermal ridges on the tactile sensation. First we make a FE (finite element) model using measured geometric and material properties of an actual index finger. Next we show a method of dynamic contact analysis using FEM (finite element method). Then we analyze the contact between the finger with/without the epidermal ridges and a plane plate moved in the tangential direction after indented in the normal direction. We found that Merkel's corpuscles are relatively sensitive for detecting the indentation of the plate. Next, we analyze the contact between the finger and the plane plate moved in the tangential direction at a constant velocity. We found that Meissner's corpuscles are sensitive to detect the vibration due to the stick/slip.*

**Key Words :** Biomechanics, Tactile Receptor, Sensor, Contact Problem, Tribology, Finite Element Method

### 1. 緒 言

ヒトは、皮膚組織内部に配置された触覚受容器で取得した情報に基づき、接触した物体に関する複合的な情報を構築することができる。すなわち、重量や摩擦係数が不明の物体を滑ることなく巧みに把持し持ち上げたり、物体の表面をなぞる触運動によって物体表面の質感や物体の内部構造を検知することができる。このような触覚受容機構は3つの段階に分類される。1つめは、物体と皮膚との接触に基づき皮膚が変形し触覚受容器の位置に力学情報が伝播される機構である。2つめは、複数種複数個の触覚受容器が刺激に対して個別の神経インパルスを発射する機構である。3つめは、複数の神経インパルスを末梢および中枢神経系で処理して複雑な触覚情報を構築する機構である。このような触覚受容機構の解明は、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。

3つの直列の機構のうち、3つめに関しては、認知科学や神経生理学、心理学の観点から多くの研究が行われ

ているが、まだ明らかにされていない点が多い。一方、神経生理学の立場から、2つめの機構に着目した多くの研究が行われている。Johansonら<sup>(1),(2)</sup>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を、微小電極を用いた神経繊維の活動電位の計測によって明らかにした。Talbot<sup>(3)</sup>は、サルの手の手皮膚に振動する平板を接触させて振動刺激を行い、触覚受容器の振動検出特性を計測した。Freeman<sup>(4)</sup>は、振幅および周波数の異なる振動刺激に対するそれぞれの触覚受容器の応答を計測し、触覚受容器の振動検出閾値を求めた。これらの研究によって、個々の触覚受容器の特性は明らかにされてきた。しかし、2つめの機構は1つめの機構との分離が困難なため、それぞれの受容器の応答特性が受容器自体の特性によるものなのか、皮膚の変形と連成した結果なのかは明確でない。このため、近年、1つめに示した物体と接触する皮膚の変形と触覚受容器の位置の関係に関して、有限要素法などを用いた研究が行われはじめている。Srinivasan<sup>(5)</sup>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、神経インパルス発射頻度と皮膚組織のひずみエネルギー密度に比例関係があることを明らかにした。筆者ら<sup>(6)</sup>は、ヒトの指腹部断面を詳細にモデル化し、指と接触する平面が完全に固着している場合

\* 原稿受付 平成10年2月20日

\*1 学生員, 慶応義塾大学院 ( 223-8522 横浜市港北区日吉3-14-1 )

\*2 正員, 慶応義塾大学理工学部

および滑っている場合の解析を行い、触覚受容への指紋の役割および皮膚の変形と4つの触覚受容器の受容野との関係を示した。下条ら(7)は人工のフィンガの変形を解析し、皮膚構造が空間周波数フィルタの役割を果たしていることを示した。しかし、上述の有限要素解析(5)-(7)では、接触面に加わる摩擦力により生ずる固着・滑り現象は解析されていなかった。そこで、筆者ら(8)は、人工の曲面状フィンガと平板の接触解析を行い、フィンガ表面の固着・滑り状態とフィンガの変形の間関係を明らかにした。しかし、上述の研究(5)-(8)では、慣性力、減衰力などに起因する皮膚組織の動的特性を考慮した指の応答の解析は行われていなかった。

本研究では、動的特性をも考慮した指の接触解析を行う。まず、固着・滑りおよび動特性を考慮した接触解析手法について述べ、次いで指が平板と接触した場合の接触状態と、皮膚構造、触覚受容器位置の力学的関係についての解析を行う。

## 2. 動的接触解析手法

2.1 解析モデル 実際の指と物体の接触現象は、局所的な接触・非接触、固着・滑りを伴う複雑な現象であり、外力と応力、ひずみの関係の詳細な理解が必要である。このため筆者らは、前報(6)において、ヒトの示指(人差し指)断面の詳細な有限要素モデルを作製した。また、有限要素解析により求めた指の弾性特性および平板との接触特性が実際のヒト示指を用いた測定結果と定量的に一致することから、モデルと手法の妥当性を示した。図1に、前報で提案した、ヒトの示指の指紋の中心を通る末節骨直交断面の皮膚及び皮下組織構造の有限要素モデル(6)を示す。要素には平面ひずみ要素を用い、爪と末節骨の表面の節点の  $x, y$  方向変位を拘束した。有限要素コードにはMARCを用いた。図1(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、指紋の稜線凸部のある場合(b)、および、ない場合(c)の部分モデルである。表皮、真皮、皮下組織の三層からなる皮膚組織および表皮と真皮の境界に突出した柱状の真皮乳頭がモデル化されている。全体モデル(図1(a))の表皮・真皮部に、部分モデル(図1(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する。図1の記号( )で示した箇所は、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、縦弾性係数およびポアソン比の値は前報(6)で求めた通りである。すなわち、表皮・真皮・皮下組織の縦弾性係数はそれぞれ  $1.36 \times 10^5$  Pa,  $8.0 \times 10^4$  Pa,  $3.4 \times 10^4$  Pa, ポアソン比は0.48とした。密度は  $1.0 \times 10^3$

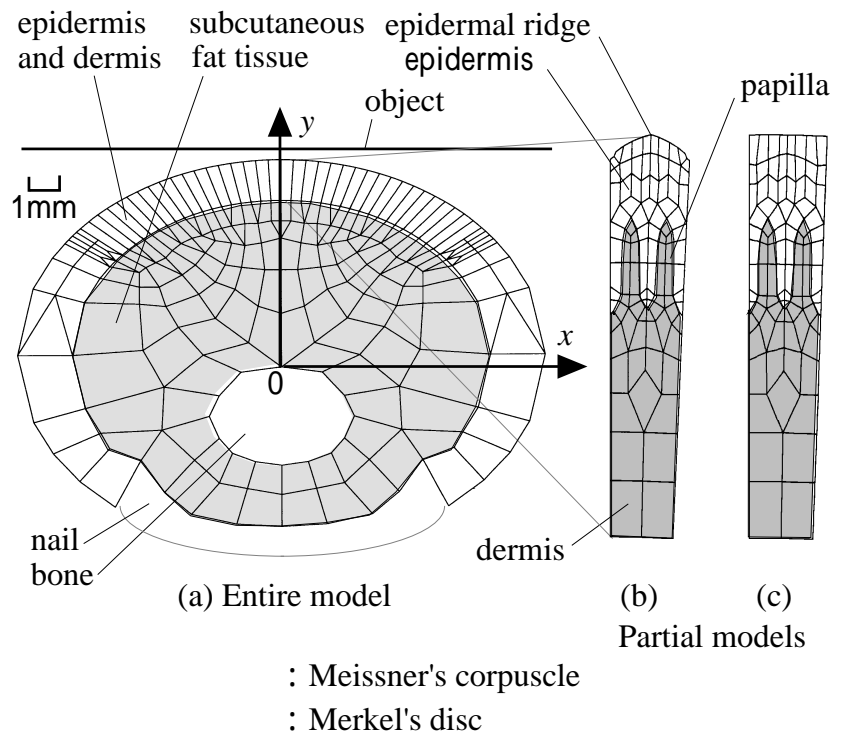


Fig. 1 Finite element model of finger cross section

$\text{kg/m}^3$ とした。指の減衰定数は、これまでにいくつかの測定例がある(9),(10)が、被験者や測定法の違いによってばらつきが大きく明確ではない。本研究では過去の研究(9),(10)を参考に以下の値とした。すなわち、減衰マトリクスと質量マトリクスの比として定義される構造減衰係数の値を  $0.02 \text{ s}^{-1}$ とした。なお、構造減衰定数の値を多少変化させても指の応答特性はほとんど変化しなかったことから、この値を用いても特に問題はないと考えられる。構造減衰定数の詳細な計測は今後の課題である。

2.2 接触解析アルゴリズム 2つの物体の動的接触特性を求めるために、一般に汎用有限要素コードが用いられる。しかし、接触による非線形問題を解析するための収束演算の発散を防ぐために、一般に接線力(摩擦力)により生じる表面間の固着・滑り状態が厳密に扱われていない。このため、筆者ら(8)は固着・滑りを考慮した準動的接触解析手法を提案した。準動的解析とは、慣性力、減衰力といった時間関数の項を無視した時刻歴解析のことである。本研究では、上述の手法を、任意の表面形状を有する物体の動的接触解析に拡張する。

図2に動的接触解析のフローチャートを示す。図1のように指と物体が接触する場合を考え、ある点で2つの物体が接触した時に接触面に平行な方向を接線方向、垂直な方向を法線方向と定義する。物体は剛体とする。まず、1ステップ前のある離散化時刻における指表面の節点  $i$  の  $x$  方向および  $y$  方向の位置  $w_x^F(i,t), w_y^F(i,t)$ ,  $x$  方向および  $y$  方向の速度  $v_x^F(i,t), v_y^F(i,t)$  が得られているものとする。一方、任意の時刻における物体の任意の表面の位置および速度が与えられているものとする。すなわち、指表面の節点  $i$  と同じ  $x$  座標上にある物体表面の位置および速度は、 $w_x^O(i,t), w_y^O(i,t), v_x^O(i,t), v_y^O(i,t)$  と

表されるものとする(図2a)。次に、時刻を $\Delta t$ だけ進める(b)。そして、接触領域が前の時刻のそれと同じであり、すべての節点が $\Delta t$ の期間固着していると仮定する(c)。有限要素法による動的解析を行うための仮の境界条件が得られた(d)ので、有限要素解析を行う(e)。次に結果(f)を3つの接触状態、すなわち、「非接触」、「固着」、「滑り」に分類(g, h)し、「非接触」の節点

では物体表面の位置が指表面の位置よりも上にあるか否かを判定する(i)。もしも指の位置が上であれば、その点は物体にめり込んでいるので、次の計算では「固着」とする。次に「固着」していた節点の接線反力(摩擦力)が最大静止摩擦力を越えているか否かを判定する(j)。 $f_n$ および $f_t$ はそれぞれ法線反力、接線反力である。接線反力が最大静止摩擦力を越えていたら、その点は滑るので

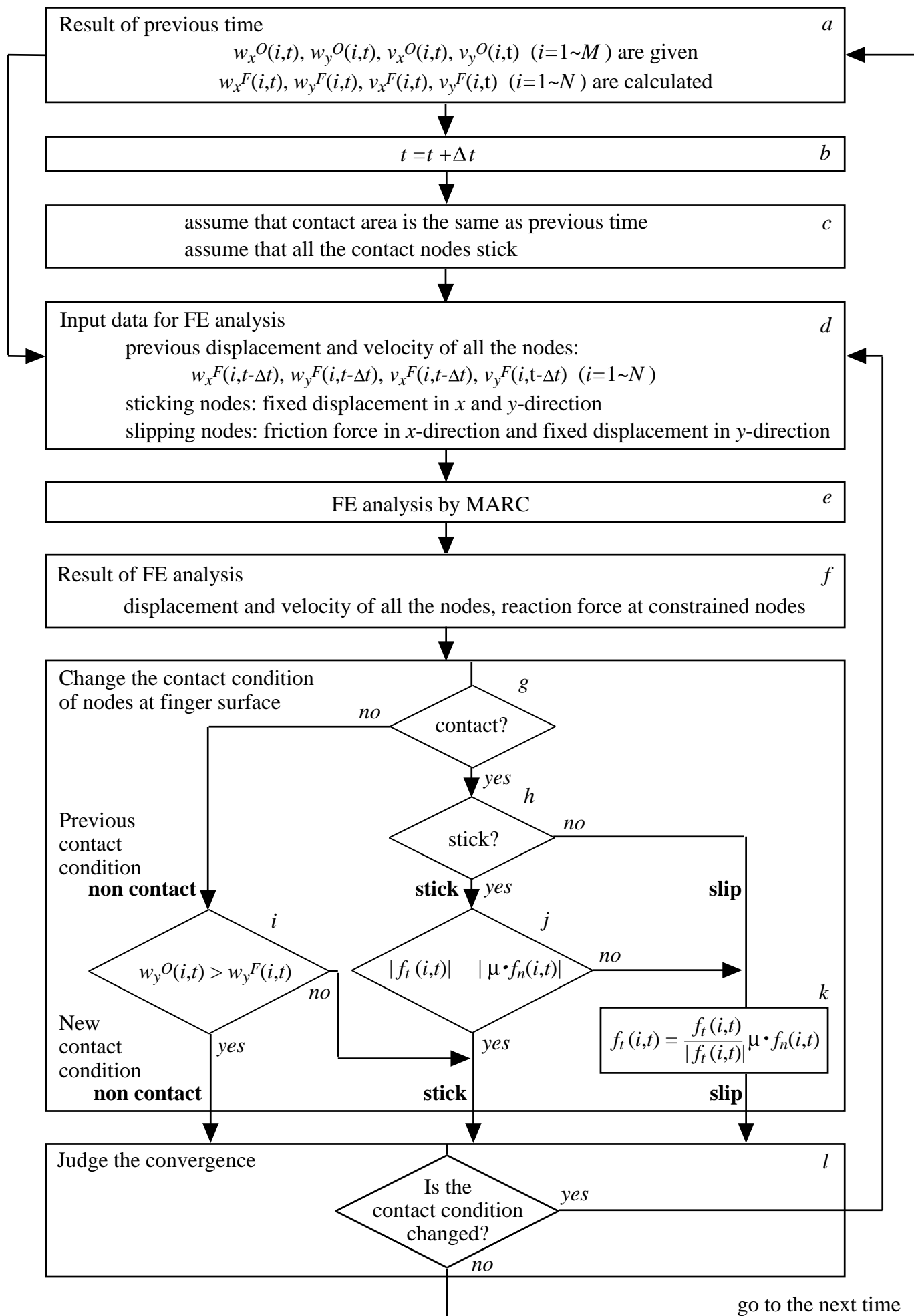


Fig. 2 Flow chart of contact analysis for a certain time

接線反力の大きさを変更( $k$ )し、次の計算では「滑り」とする。接線方向が  $x$  軸方向と一致しない場合には、点  $i$  における物体表面の傾きを接線の傾きとする。次に、接触条件を満たしているかどうかを判定する( $l$ )。もしもすべての表面節点で「非接触」、「固着」、「滑り」の分類を変更していないならば、妥当な接触状態が得られているので収束とみなし、次の時刻に進む。接触条件を変更した節点があれば、再び  $d$  に戻って計算を繰り返す。以上の操作を続けることにより、各時刻における収束解が得られ、クーロンの法則を満たす動的接触状態が求まる。すなわち、接触領域内の固着・滑り状態および垂直反力・法線反力分布、モデル全体の变形・速度および応力・ひずみ分布が求まる。

本解析の变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および大变形による非線形性は無視する。また、図 2  $d$  において、厳密には「滑る」節点の法線方向の変位を拘束し接線方向に摩擦力を加えるべきであるが、本解析の範囲では接線方向と  $x$  軸方向のなす角は十分小さいので、 $y$  軸方向の変位を拘束し  $x$  軸方向に摩擦力を加えている。すべての節点の初期位置および初速を入力し、質量マトリクス、減衰マトリクスも考慮して動的解析を行っているので、動的応答が解析される。

なお、図 2 のフローチャート中、 $e$  の有限要素解析以外の部分は Fortran プログラムを用いて作成した。

### 3. 解析結果

#### 3.1 ひずみエネルギー密度とインパルス発射の関係

Srinivasan<sup>(5)</sup>らは、図 3 の上部に示したような凹凸波長の変化する刺激棒と指断面が接触する際に、触覚受容器で生じ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 ( Strain Energy Density, 以下 SED と略記する。 ) の分布が同様な傾向を示すことを示した。彼らが対象とした触覚受容器は、遅い応答を示す受容器であり、たとえばメルケル小体がこれに含まれる。本研究で用いる指紋のある指モデルにおいても SED の分布がメルケル小体のインパルス発射頻度と一致することを確認するために、以下の計算を行った。すなわち、図 1 (a),(b) の指断面モデルの指腹部に図 3 の刺激棒の左端を 1.0 mm 押し込んだ場合の接触解析を行う。次に、刺激棒を 0.5 mm ずつ左に移動させて合計 50 回の解析を行う。このときのモデル中央のメルケル小体の位置における SED の変化を、インパルス発射頻度の実験値<sup>(11)</sup>とともに図示したのが図 3 であ

Fig. 3 Comparison of spacial response profile of tactile receptors with SED distribution by FE analysis

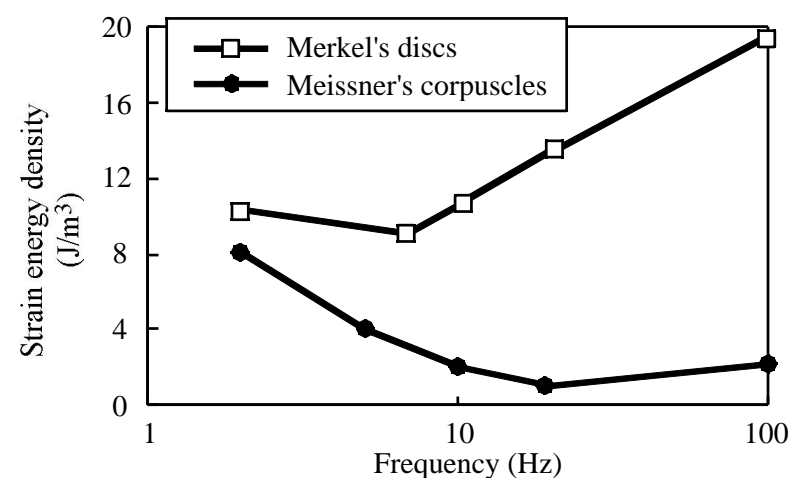


Fig. 4 Relationship between the minimum amplitude of the SED which can be detected by tactile receptors and the frequencies of the plane plate in contact with the finger

る。両者の相関係数  $R$  は 0.85、危険率は  $P < 0.0001$  であった。両者の間には十分な相関が見られるので、SED はインパルス発射頻度にほぼ比例する量と考えてよいことが確認できた。

なお、SED はひずみエネルギーに比例する。ひずみエネルギーはせん断ひずみエネルギーと体積ひずみエネルギーの和として表される。皮膚組織のポアソン比は 0.5 に近いので体積変化は小さく、ひずみエネルギーはせん断ひずみエネルギーにほぼ等しいと考えてよい。ミーゼス応力はせん断ひずみエネルギーの 1/2 乗に比例する。したがって、前報<sup>(6)</sup>で触覚受容器近傍における受容特性の指標として用いたミーゼス応力は、SED の 1/2 乗に比例する量である。つまり、ミーゼス応力を用いることは的外れではなかったものの、SED を用いる方がより現実的である。本報ではインパルス発射頻度にほぼ比例する SED を触覚受容特性の指標として用いる。

次に、触覚受容器にインパルスを発射させるために必要な SED の最小値を求める。Freeman<sup>(4)</sup> は、法線方向に振動する平板をサルの指表面に接触させたときのメルケル小体およびマイスナー小体のインパルス発射状態を調べ、振動の周波数とインパルス発射閾値 (触覚受容器にインパルスを発射させるために必要な平板の最小振幅) の関係を求めている。そこで、指と法線方向に振動する平板の接触解析を行った。すなわち、指モデルに、Freeman<sup>(4)</sup> が求めたインパルス発射閾値にあたる振幅の振動を、周波数を変えて加えた。このとき触覚受容器の位置における SED の値は変動する。そこで、SED の振動振幅を、その周波数の刺激を検出する SED の閾値と考

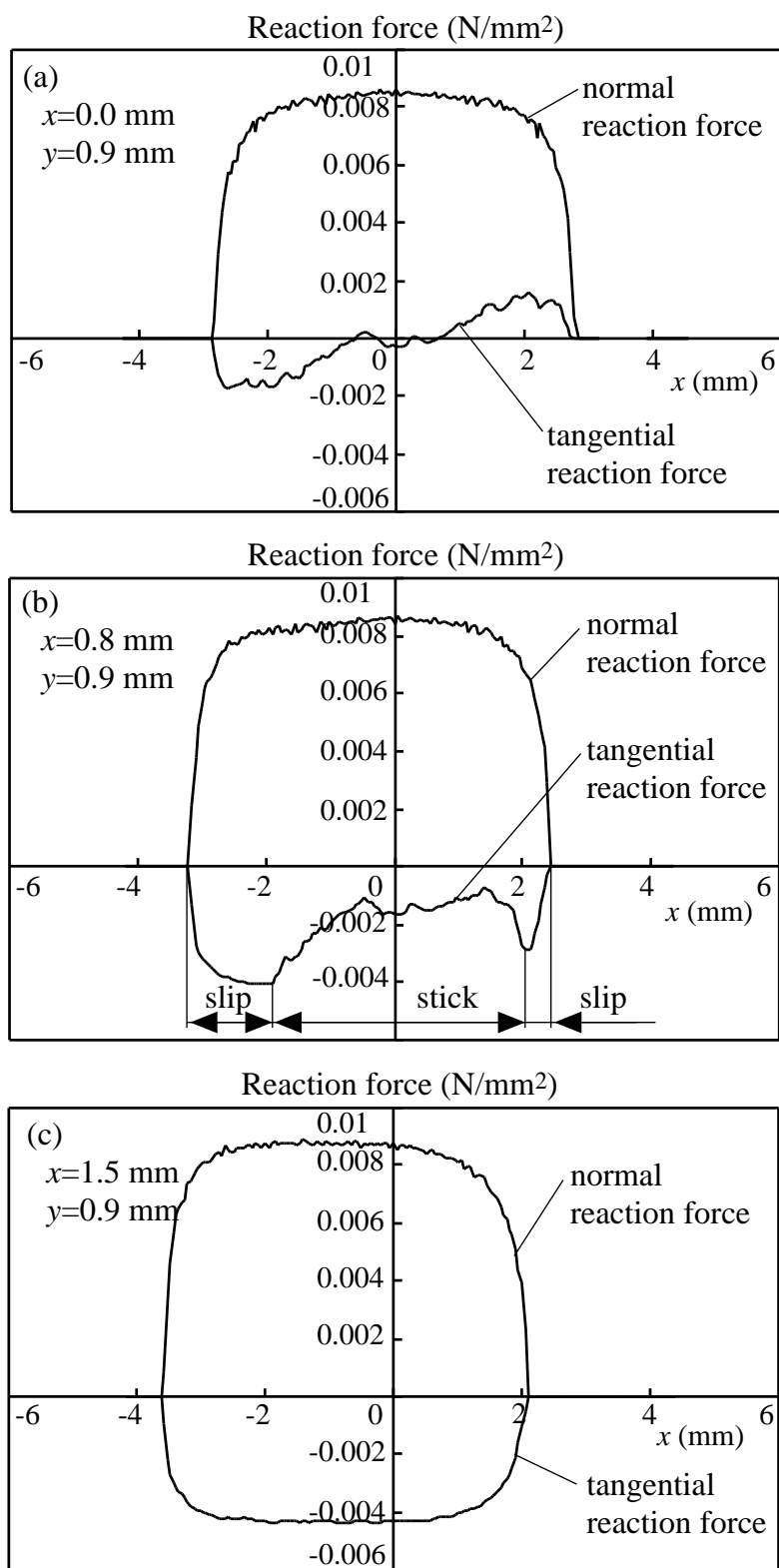


Fig. 5 Reaction force between a flat plate and a finger model without epidermal ridges

えることとする。

図4に、インパルス発射閾値にあたる振幅で振動させた平板の周波数と、そのときの SEDの振幅の関係を示す。図の極小値はFreeman<sup>(4)</sup>が求めたインパルス発射閾値曲線の極小値を反映している。すなわち、例えば、メルケル小体では、周波数8.7Hzで変動するSEDの振幅は $9.1\text{J/m}^3$ 以上であれば検出される。マイスナー小体では、周波数20Hzで変動するSEDの振幅は $0.98\text{J/m}^3$ 以上であれば検出される。指が様々な物体と接触した場合のSEDの周波数分布が求まれば、図4を用いることによって、そのときにその触覚受容器がインパルスを発射するか否かを見積もることができる。

### 3・2 平板が接線方向に動き始める場合 指と接

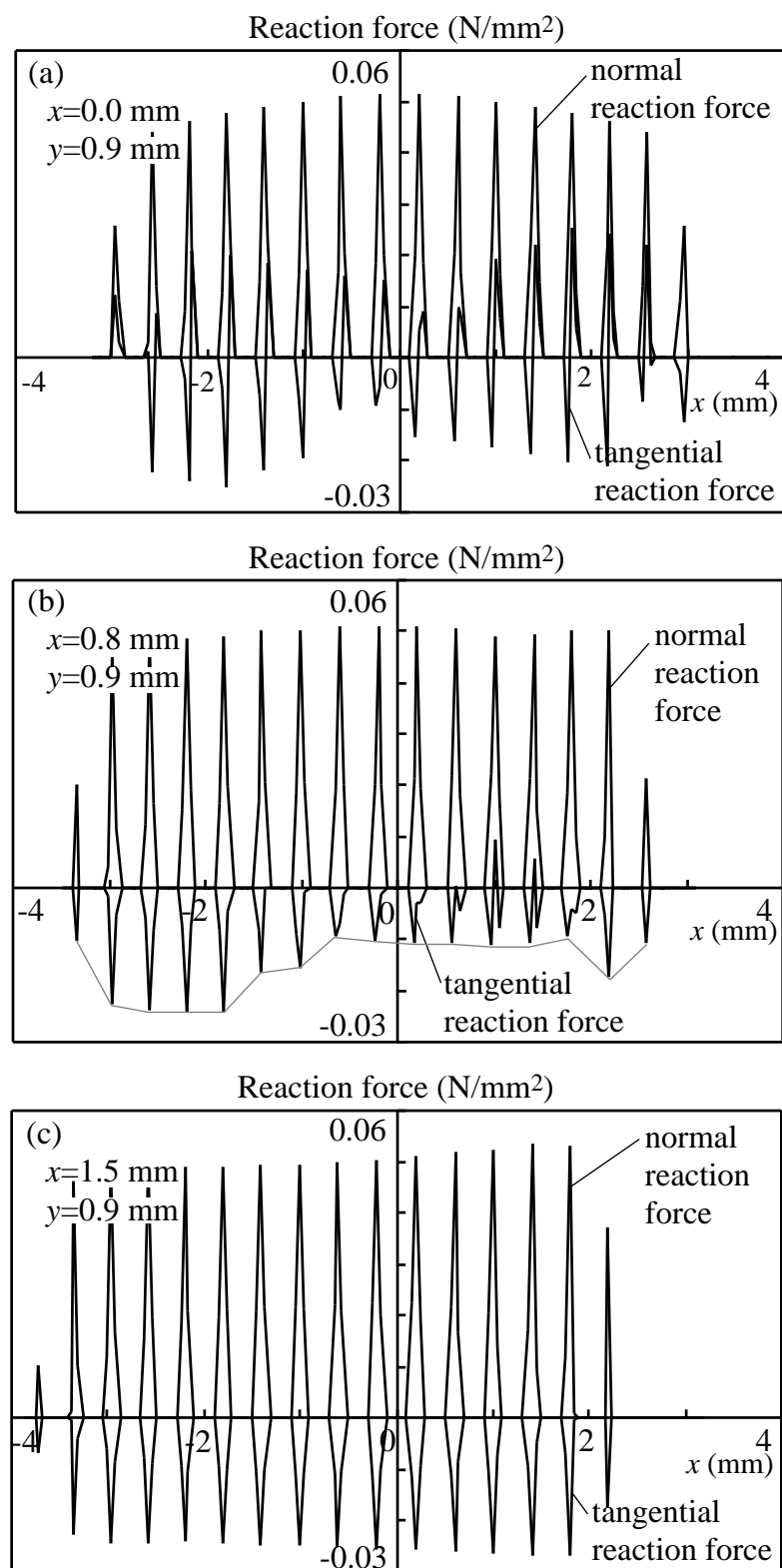


Fig. 6 Reaction force between a flat plate and a finger model with epidermal ridges

触した平板が滑りはじめる状態の解析は、指で物体を把持し持ち上げる際の挙動<sup>(12)</sup>を解明するために重要である。筆者らは指紋のような突起のない曲面状弾性体と平板の接触解析を行った<sup>(8)</sup>。本研究では、実際の指と平板との接触解析を行う。

まず、平板と指紋のない指モデルとの基本的な接触状態をみるために、平板の  $-y$  方向への押し込み量  $\Delta y$  を  $0.9\text{mm}$  とした後に、平板の  $x$  方向移動量  $\Delta x$  を増加させた場合の解析を行った。摩擦係数  $\mu$  は  $0.5$  とした。  $\Delta x$  を  $0$  から  $1.5\text{mm}$  まで変化させたときの反力分布の変化を図5に示す。図より、平板を  $x$  方向に移動させても法線反力の分布はほとんど変化しないことがわかる。一方、接線反力は変化している。  $\Delta x$  の増大とともに、接

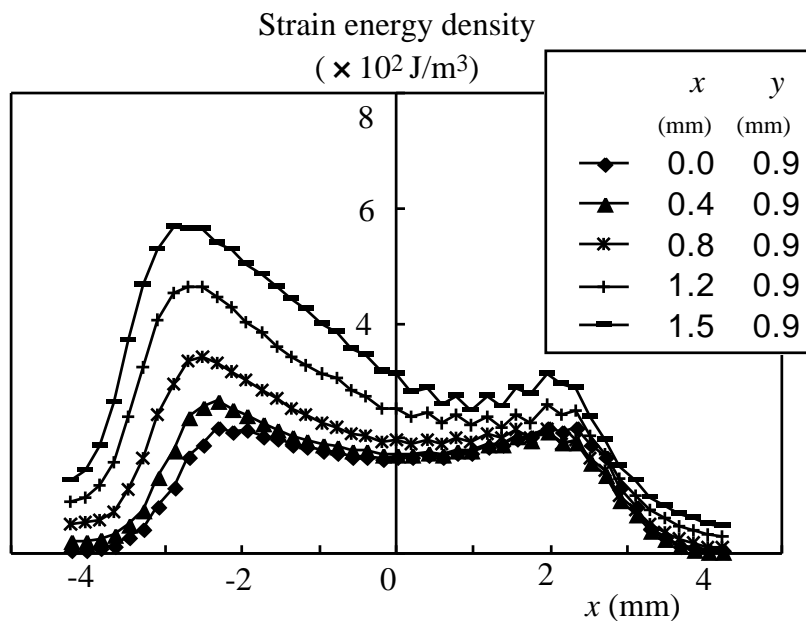


Fig. 7 Strain energy density distribution near Merkel's discs for a model without epidermal ridges

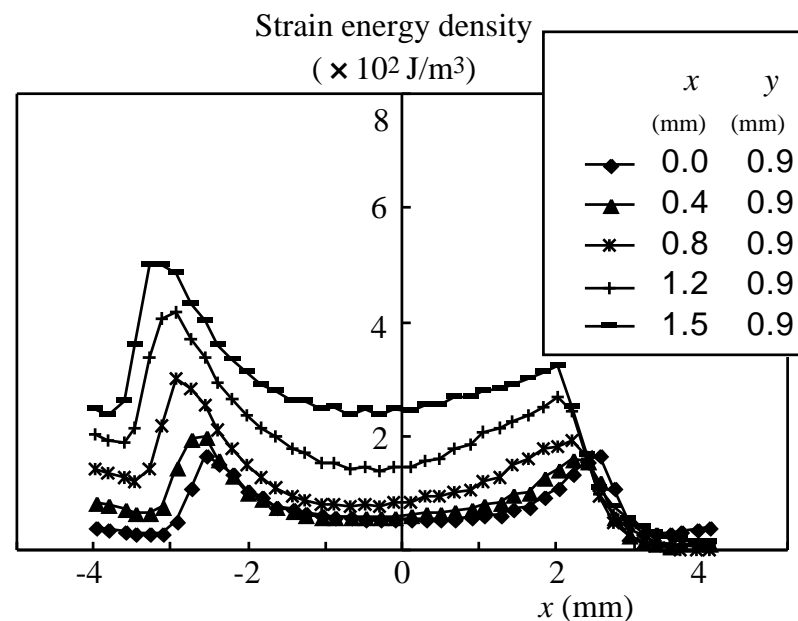


Fig. 9 Strain energy density distribution near Meissner's corpuscles for a model without epidermal ridges

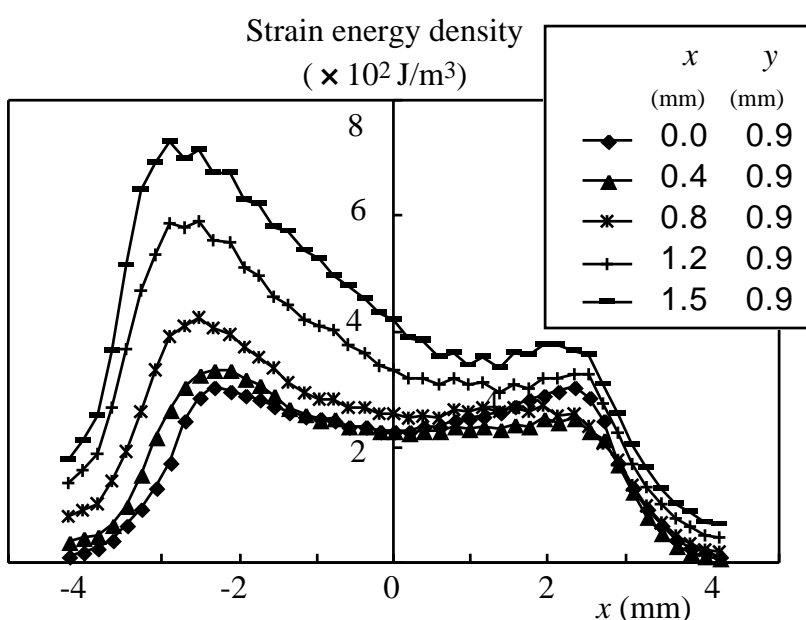


Fig. 8 Strain energy density distribution near Merkel's discs for a model with epidermal ridges

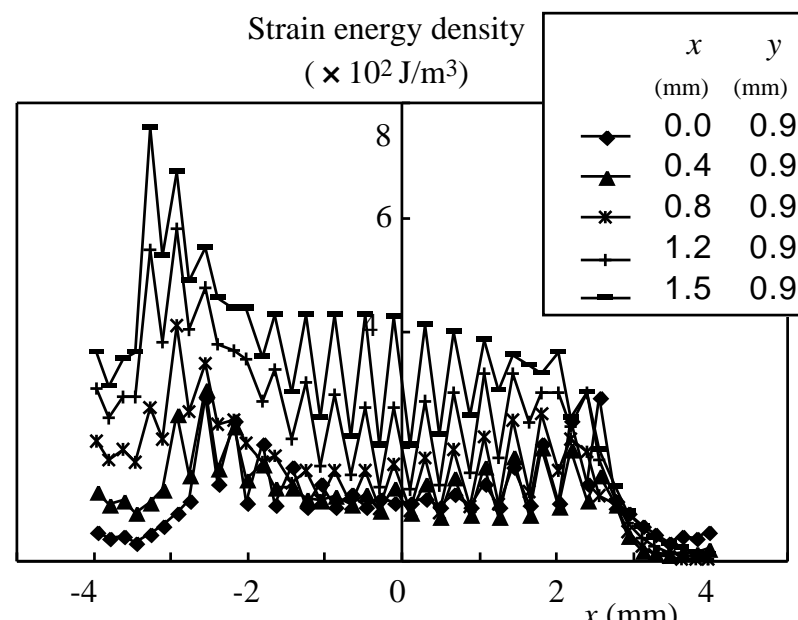


Fig. 10 Strain energy density distribution near Meissner's corpuscles for a model with epidermal ridges

触部両端から滑り領域が増大 (図b) し,  $\Delta x = 1.5\text{mm}$  のときにすべての接触する節点は滑る (図c) . これは曲面状弾性体と平板の接触解析結果<sup>(6)</sup>と同じ現象である .

次に, 指紋のある指モデルと平板の接触解析結果を図6に示す . 指紋に対応して, 接触領域は16箇所分割されている . 平板の接線方向移動量を変化させても, 法線反力分布はあまり変化しない . 一方, 接線反力分布は変化している . すなわち,  $\Delta x$  が0のとき (図a) , ほとんどの接触点は固着しており, それぞれの接触領域における接線反力分布は極小値と極大値を有する分布となっている .  $\Delta x$  が0.8mm (図b) になると, 多くの接触領域は極小値のみを持つ分布になる .  $0.5 < x < 1.5$  の接触領域では, 接線反力は中央に極大値, 両端に極小値を有する分布となっている . また, 各接触領域での極小値を結んだ線 (図6(2)の波線) は指紋のない場合の分布形状とよく似ている .  $\Delta x = 1.5\text{mm}$  になるとすべて

の接触する節点は滑り, 極小値のみを有する分布となる (図c) .  $\Delta x$  が0.8mmのときの特徴的な接線反力分布は, 接触部全体としてみると両端の指紋から滑りが生じるとともに, 中央よりもやや右の指紋の稜線ではそれぞれの接触領域内で局所的な固着・滑りが生じていることを表している . つまり, 指紋の存在により固着・滑りの分布が局在化して接線反力分布が複雑化している . また, 指紋のあるモデルでは, 法線・接線反力の極大値が指紋のないモデルの場合よりも大きくなっている .

次に, 図7から図10に指紋のない場合およびある場合のメルケル小体およびマイスナー小体の近傍におけるSEDの分布を示す .

図7および図8を見ると, 指紋の有無にかかわらずメルケル小体の位置におけるSEDの分布形状はあまり変化しないことがわかる . 前報<sup>(6)</sup>でも示したように, 指紋のある場合の方がSEDがやや大きくなっており, 触覚受容感度は向上している . いずれの場合も,  $x = \pm 2.5\text{mm}$  の



付近にSEDの極大値が見られ、平板が接線方向に移動するに従いその大きさは増大している。これは、平板の接線方向移動に伴い、局所滑り領域が  $x = \pm 2.5\text{mm}$  付近から中央に向かって増大し、動摩擦力が加わることに起因すると考えられる。前報では  $x = \pm 2.5\text{mm}$  付近のミーゼス応力の極大値は構造および境界条件によるものと予測していたが、本報では境界条件のうち接線方向の固着・滑り条件が重要であるということを示せた。

図9および図10を比較すると、指紋が無い場合にはマイスナー小体の位置におけるSEDの分布形状はメルケル小体の位置における分布とよく似ているのに対し、指紋がある場合にはSED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。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、指紋稜線の局所的な固着・滑り状態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。また、指紋のある場合の方がSEDが大きくなっており、指紋の存在により触覚受容感度は向上しているといえる。マイスナー小体の場合は、 $\Delta x = 0$  のときには  $x = \pm 2.5\text{mm}$  付近にSEDの極大値が見られるが、 $\Delta x$  が大きくなると中央付近のSEDの値も増大するために値が特に大きい部分は  $x = -2.5\text{mm}$  付近のみとなる。これより、マイスナー小体では接触部中央付近での接触状態の変化を感度よく検出していると考えられる。

次に、図8と図10の比較を行う。すなわち、指紋のあるモデルにおける、メルケル小体とマイスナー小体の近傍でのSEDの分布の変化を比較する。特に  $x = 0$  付近に着目すると、 $\Delta x$  が0から1.5mmに増加するとき、 $x = 0$  の位置におけるメルケル小体でのSEDは230 J/m<sup>3</sup>から420 J/m<sup>3</sup>へとほぼ倍増する。一方、マイスナー小体でのSEDははじめ102 J/m<sup>3</sup>程度であったものが、424 J/m<sup>3</sup>程度にまで増加する。これより、メルケル小体は平面の押し込みを検出する際に、マイスナー小体は平面の接線方向への移動を検出する際に、相対的な感度が高いと考えられる。

なお、本節の解析で得られたSEDの大きさは、図4に示したインパルスを発射しうるSEDの最小値を超えている。平板の移動速度にも因るが、いずれの触覚受容器においてもインパルスを発射していると考えてよからう。

### 3・3 平板が接線方向に等速移動する場合 前節

の解析は、平らな物体を静かにつかみ持ち上げる場合に相当する。一方、指腹部で物体表面のテクスチャや点字を読みとるために、ヒトは指を定速で動かして物体をなぞる触運動を行う。本節では、触運動時の指と触覚受容器の基本的な特性を明らかにするために、一定速度で移動する平板と指の接触解析を行う。本来は指を動かすべきであるが、定速運動の場合には同じ結果が得られるので他の解析との整合性のため平板を動かす。

平板を指にゆっくりと0.55 mm押し込んだ後に、 $x$  方向に速度10 mm/sで十分長い時間移動させる解析を行った。平板の移動速度は、触運動時の一般的な速度の範囲内の値<sup>(13)</sup>とした。摩擦係数は0.5とした。

図11および図12に、メルケル小体およびマイスナー小体の位置におけるSEDの時刻歴分布を示す。図より、SEDは時間とともにかなり変動していることがわかる。これは、指紋の存在により、それぞれの指紋と平板との接触面に局所的な固着・滑りが発生し、対象物が平面であるにもかかわらず指が振動的な挙動を示したためである。

それぞれの波形を周波数分析したところ、いずれも1~20 Hz程度の周波数成分が大きかった。なお、メルケル小体のSEDの大きさは最大9.2 J/m<sup>3</sup>程度(2.5 Hzの成分)であった。図4によれば、メルケル小体で検出できるSEDは1~20 Hzの範囲では9.1~13.3 J/m<sup>3</sup>程度であり、メルケル小体では平板の等速移動時の振動を検出していないと考えられる。一方、マイスナー小体のSEDの大きさは最低でも5.0 J/m<sup>3</sup>程度(17.5 Hzの成分)であった。マイスナー小体で検出できるSEDは1.0~8.1 J/m<sup>3</sup>程度であるので、マイスナー小体では平板の等速移動時の振動を十分に検出していると考えられる。

一方、指紋のないモデルで同様な解析を行ったところ、局所的な固着、滑りが生じないため、図5(c)のようなほぼ定常な変形状態が保たれた。つまり、指紋は局所的な固着・滑りを発生させて、触覚受容器に指表面の局所的な挙動を検出させる働きがあることがわかった。前節および本節の結果より、実際の指紋がほぼ同心円状になっている理由は、物体がいずれの方向に移動する場合にも、指紋稜線方向と物体移動方向がほぼ直交する部分の触覚受容器で固着・滑り状態を検出するためであることが推測できる。一方、指紋稜線方向と物体移動方向が平行な部分では、指紋のないモデルの解析結果と同様な現象が生じていると考えられる。

以上のように、マイスナー小体では平板の等速移動時の振動を十分に検出できる。一方、メルケル小体では、皮膚が空間周波数フィルタ<sup>(7)</sup>としてのみならず周波数フ

フィルタの役割も果たすために、SEDの値は小さくなり、振動に反応していないと考えられる。一方、平面の押し込みに対しては、メルケル小体のSEDが相対的に大きくなっていった。これらの結果を総合すると、神経生理学の知見<sup>(1)-(4)</sup>、すなわち、メルケル小体は変位や低周波の振動に反応し、マイスナー小体は高周波の振動に反応する、という知見は、皮膚の構造と触覚受容器の位置により説明できることを示すことができた。

#### 4. 結 論

固着・滑りおよび動特性を考慮した接触解析手法を提案し、指が平板と接触した場合の接触状態と、皮膚構造、触覚受容器位置の力学的関係についての解析を行った。この結果、以下の諸点を明らかにした。

- (1) 触覚受容器のひずみエネルギー密度 ( SED ) とインパルス発射頻度はほぼ比例関係にあり、SEDの大きさを用いて触覚受容器の特性を見積もることができる。
- (2) 平板を指紋のある指モデルに押し込んだ後に接線方向に移動させると、指紋に対応するそれぞれの接触領域に局所的な固着・滑り現象が生じる。
- (3) 皮膚組織内の異なる位置に配置された異なる触覚受容器はそれぞれ皮膚構造と配置に起因する固有の特性を有する。すなわち、メルケル小体は平板の押し込みに対する触覚受容感度が大きく、マイスナー小体は平板の接線方向への移動状態の検出感度が大きい。

次報では、凹凸面のある物体と指の間の動的接触解析を行い、表面粗さ検出機構に関する考察を行う。

#### 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) Talbot, W. H., Darian-Smith, I., Kornhuber, H. H. and Mountcastle, V. B., The Sense of Flutter-Vibration: Comparison of the human Capability with Response Patterns of Mechanoreceptive Afferents from the Monkey Hand, *J. Neurophysiology*, 31, (1968), 301-335.
- (4) Freeman, A. W. and Johnson, K. O., A Model Accounting for Effects of Vibratory Amplitude on Responses of Cutaneous Mechanoreceptors in Macaque Monkey, *J. Physiol.*, 323, (1982), 43-64.
- (5) 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.*, 118, (1996), 48-55.
- (6) 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, *機論*63-607, C (1997), 881-888.
- (7) 下条, 触覚センサにおける弾性体カバーの空間周波数フィル

- タリング効果, *機論*59-567, C, (1993), 3458-3463.
- (8) 前野, 小林, 河合, 平野, 曲面状弾性体の内部ひずみ分布検出に基づく把持力制御法, *機論*64-620, C (1998), 1258-1265.
- (9) 岡, 入江, 皮膚軟部組織モデルのための生体定数, *バイオメカニズム学会誌*, 17-4 (1993), 216-222.
- (10) Hajian, A. Z. and Howe, R. D., Identification of the Mechanical Impedance at the Human Finger Tip, *Trans. ASME, J. Biomech. Eng.*, 119, (1997), 109-114.
- (11) Phillips, J. R. and Johnson, K. O., Tactile Spatial Resolution-II. Neural Representation of Bars, Edges and Gratings on Monkey Afferents, *J. Neurophysiol.* 46-6, (1981), 1192-1203.
- (12) Johansson, S. and Westling, G., Signals in Tactile Afferents from the Fingers Eliciting Adaptive Motor Responses during the Precision Grip, *Exp. Brain Res.*, 66, (1988), 141-154.
- (13) 赤松, あらさ知覚における触運動の速度・押圧力の特性, *バイオメカニズム学術講演会*, 9, (1988), 51-54.