

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) *

小林一三^{*1}, 前野隆司^{*2}

Relationship between the Structure of Finger Tissue and the Location of Tactile Receptors
(3rd Report, Results of Contact Analysis between a Finger and a Rough Plate)

Kazumi KOBAYASHI and Takashi MAENO

Contact condition between a cross section of a finger and a plane plate was analyzed in our previous study. In this study, transient dynamic response of the human finger skin and strain energy distribution at the tactile receptors are calculated when the finger is in contact with sinusoidal wave representing the surface roughness of objects. Especially, the effect of epidermal ridges, velocity of the finger movement and wavelength of the sinusoidal wave on the tactile sensation are focused. FE (finite element) model using measured geometric and material properties of an actual index finger is used. The contact between the finger with/without the epidermal ridges and the sinusoidal wave moved in the tangential direction after indented in the normal direction is calculated. It is found that Meissner's corpuscles are largely in relation with the detection of surface roughness, Merkel's discs do not detect the surface roughness when the wavelength is small. It is also found that the epidermal ridges change the pattern of strain energy density near the Meissner's corpuscles.

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

1. 緒 言

情報通信技術の進展に伴い、バーチャルリアリティや遠隔コミュニケーションなど、ヒトとコンピュータあるいはヒトとヒトがコミュニケーションするためのマンマシンインタフェースの重要性が増大している。コミュニケーション入出力の対象として、ヒトの五感のうち特に視聴覚と触覚が重要である。このため、視覚に関しては光学系やディスプレイの技術が、聴覚に関してはマイクやスピーカの技術が古くから確立されている。これに対し、触覚入出力機構の研究は緒についたばかりであり、様々な手法が試行錯誤的に試みられている段階である(1)-(3)。

感覚入出力機器開発のためには、ヒトの感覚受容機構の理解が不可欠である。このため、ヒトの視聴覚受容機構である目や耳の構造と機能に関する研究が古くから行われている。これに対応し、手掌部などの皮下に配置された触覚受容器の特性に関する研究も数多く行われている(4)-(7)。しかし、触覚受容器単体に関する研究がほと

んどであり、対象物が柔軟な皮膚に直接接触し皮膚の変形を介して触覚受容器に刺激が伝達される機械的機構に関する研究は十分には行われていない。

このため、筆者ら⁽⁸⁾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。また、筆者ら⁽⁹⁾は、固着・滑りおよび動的接触状態を考慮した接触解析手法を提案し、指と平板との動的接触状態と、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、触覚受容器近傍に生じる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れること、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・滑り現象が生じること、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ことを明らかにした。本報では、凹凸を有する物体と指の動的接触解析を行い、ヒト指腹部における表面粗さ検出機構に関する考察を行う。

* 原稿受付 平成10年10月10日

*1 慶応義塾大学大学院 [現: ソニー(株)]

*2 正員, 慶応義塾大学理工学部 (223-8522 横浜市港北区日吉3-14-1)

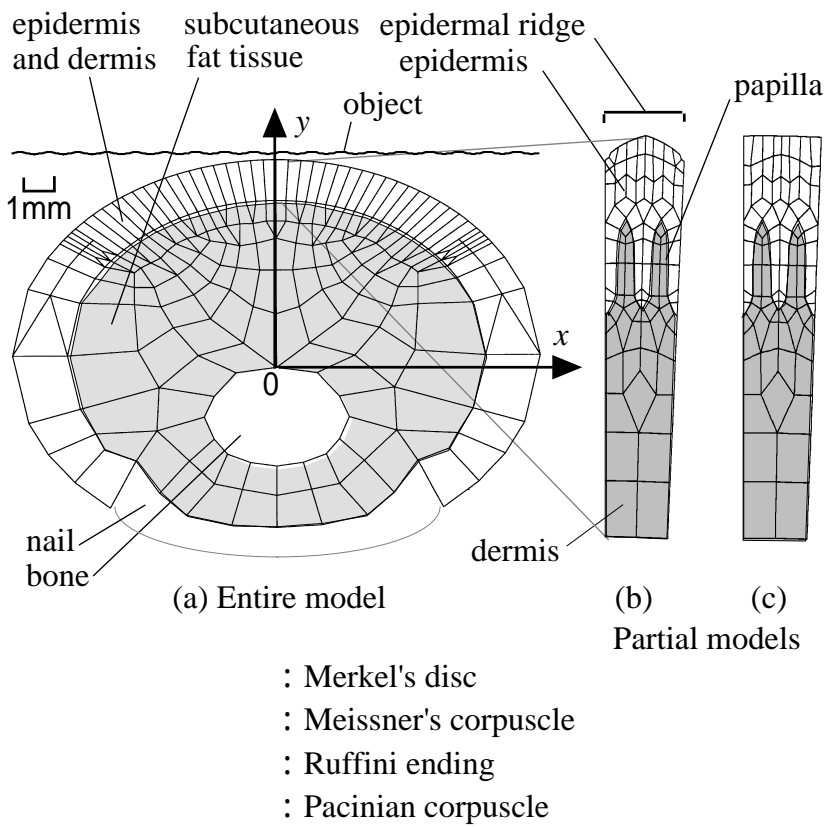


Fig. 1 Finite element model of finger cross section

2. 解析手法

前々報⁽⁸⁾で構築した指断面の有限要素モデルと、前報⁽⁹⁾で提案した動的接触解析手法を用いて、凹凸のある物体表面と指との接触解析を行った。概要を以下に述べる。

2・1 指断面モデル 図1に、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、4つ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、縦弾性係数、ポアソン比、密度、構造減衰係数の値は前報^{(8),(9)}と同じとする。

2・1 凹凸面モデル ヒトは物体表面のテクスチャを読み取るために、指で物体表面を撫でるように動かす触運動を行う。物体のテクスチャは、表面の微視的構造、硬度、熱伝導率などを検出し脳神経系で処理することによって認識される。中でも、表面の微視的構造が最も重要な情報であると考えられる。このため、厳密には、表面の微視的構造をモデル化し、指の挙動を有限要素解析すべきであろう。しかし、あまりに詳細なモデルは、計算時間、計算機記憶容量の観点から現実的でない。このため、本研究では、物体表面の微視的構造を模擬し単純化した正弦波状の凹凸面のモデルを用いる。凹凸面は変形しないものとする。

2・3 接触解析アルゴリズム 筆者ら⁽⁹⁾が提案した、任意の表面形状を有する物体間の動的接触解析手法を用いる。本手法によれば、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うことによって、任意形状の物体と接触する指断面の動的応答を解析することができる。

3. 解析結果

正弦波状の凹凸面の波長、凹凸面の移動速度、指紋の有無をパラメータとして、凹凸面が指モデルに接触しながら一定速度で移動する場合の解析を行った。以下にそれぞれの解析結果を示す。

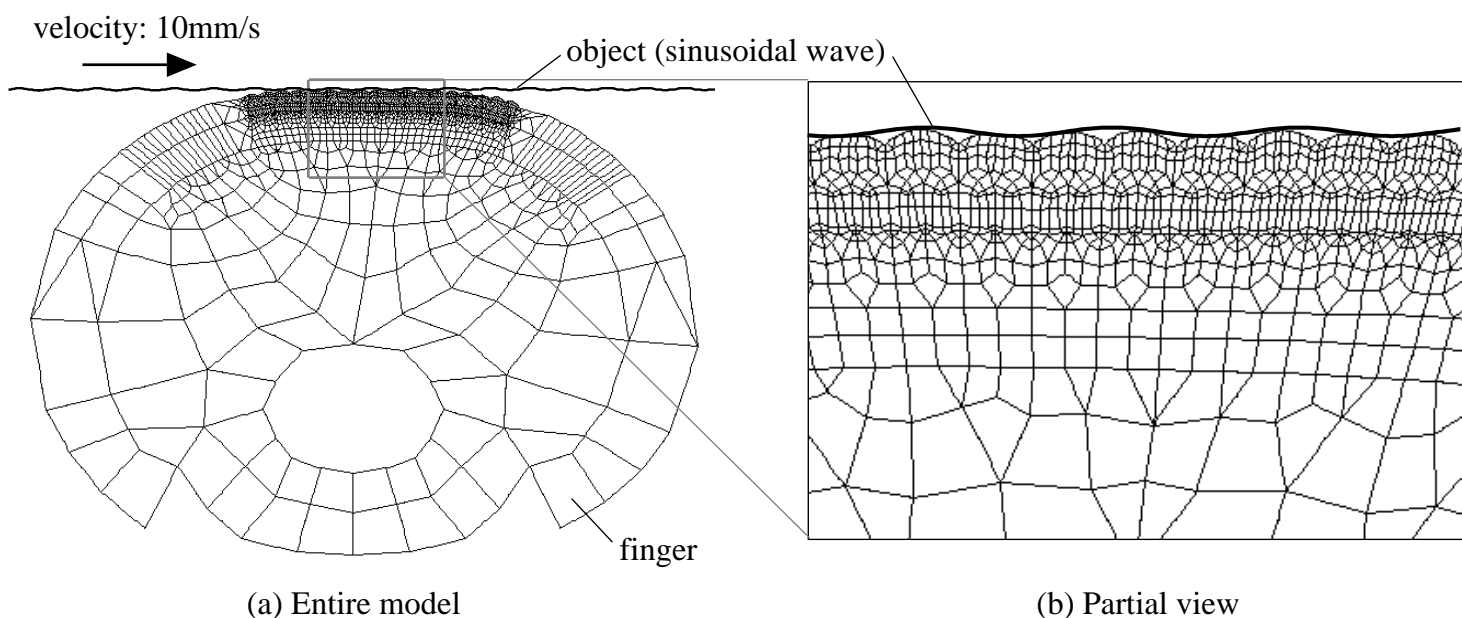


Fig. 2 Deformation of the finger model in contact with the sinusoidal wave-shaped plane

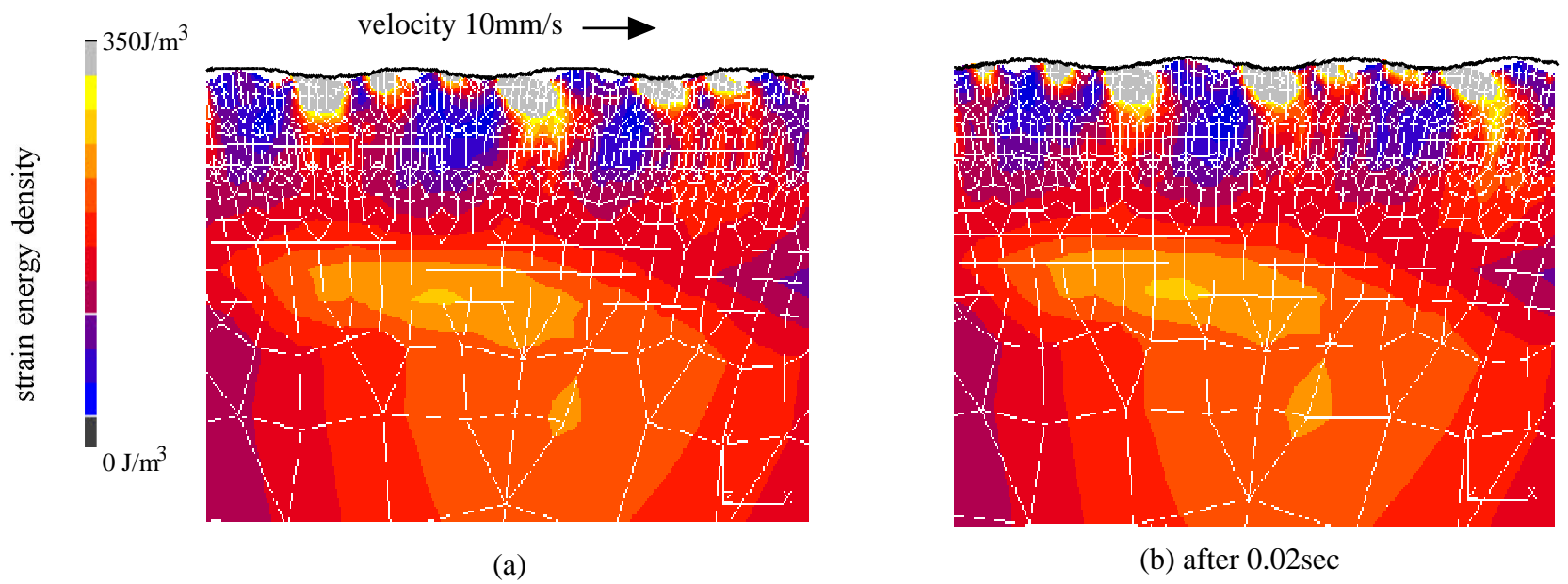


Fig.3 Distribution of strain energy density

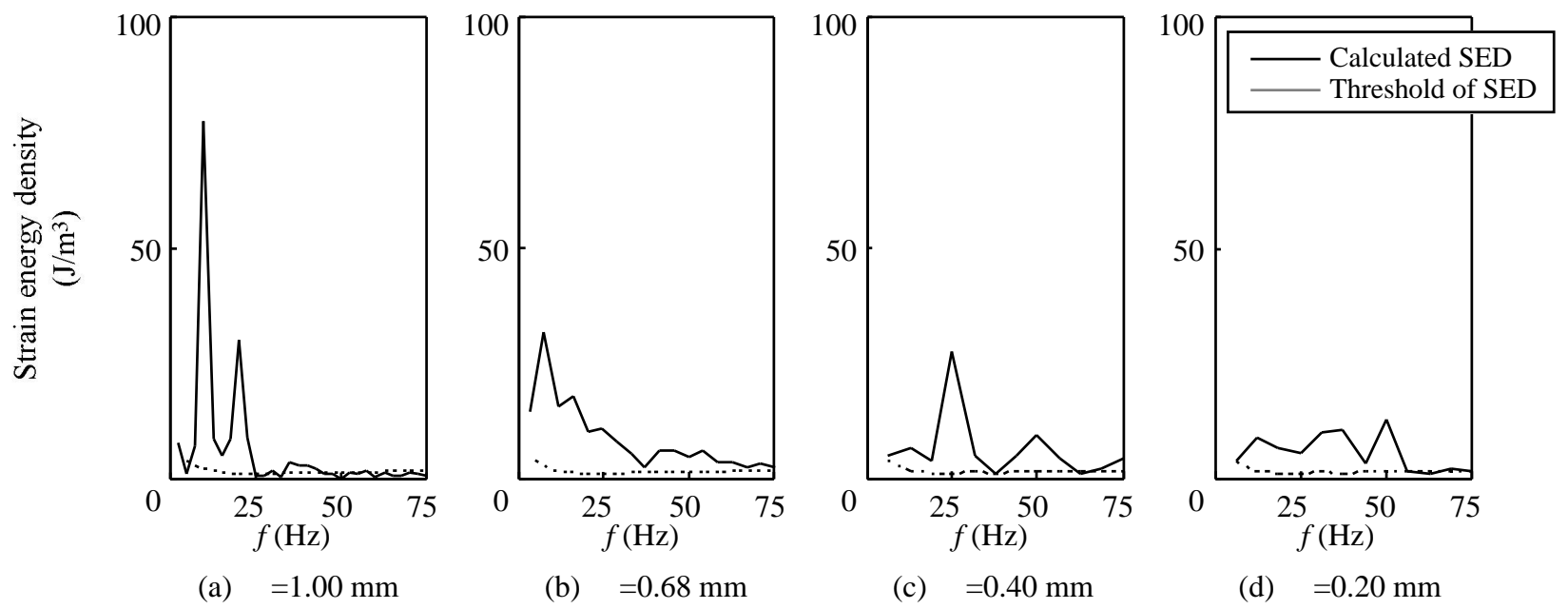


Fig.4 Frequency response of strain energy density at the Meissner's corpuscles when the velocity of the rough plate is 10mm/s

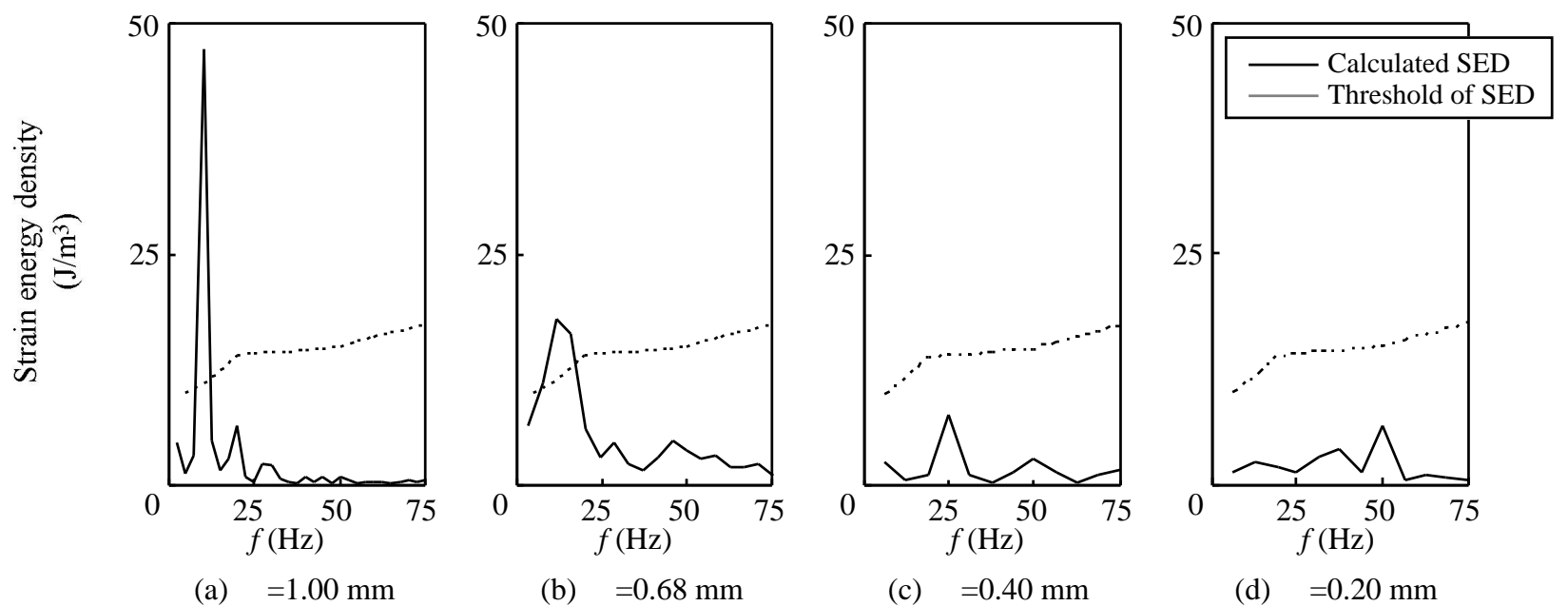


Fig.5 Frequency response of strain energy density at the Merkel's discs when the velocity of the rough plate is 10mm/s

3・1 表面粗さの影響 ヒトは対象面の粗さを、「つるつる」、「ざらざら」といった官能量として識別することができる。これは、表面粗さの変化に応じて触覚受容器の応答が変化するためであろう。そこで、正弦波状の凹凸面の波長を変化させた解析を行い、対象面状態変化の触覚受容への基本的な影響を調べることとする。すなわち、波長が1mm, 0.68mm, 0.4mm, 0.2mmの4通りの凹凸面と、指紋のある指モデルとの接触解析を行った。凹凸面の接線方向速度は10mm/s, 振幅は0.025mmとした。摩擦係数は0.5とした。まず、指紋のあるモデルに対し、凹凸面を十分に遅い速度で-y方向に0.55mm押し込んだ後に、x方向に速度10mm/sで十分長い時間移動させる解析を行った。十分長い時間とは、初期値の影響を十分無視できるだけ解が定常になるまでの時間という意味である。本解析の場合、約0.2秒程度経過後には解は定常となることを確認した。

図2に十分長い時間経過後の、波長1mmの凹凸面と接触する指モデルの変形図を示す。部分拡大図(b)をみると、正弦波状の凹凸面に指紋の稜線凸部が接触している様子がわかる。

図3に、十分長い時間経過後(図(a):接線方向移動量 $\Delta x = 5$ mm, 法線方向押し込み量 $\Delta y = 0.55$ mm, 時間 $t = 0.5$ s 経過後, 図(b): $\Delta x = 5.2$ mm, $\Delta y = 0.55$ mm, 時間 $t = 0.52$ s 経過後)の変形およびひずみエネルギー密度(Strain Energy Density, 以下SEDと略記。)の分布を示す。前報⁽⁹⁾で述べたように、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。図より、凹凸面と指紋稜線が接触し皮膚が大きく変形している部分ではSEDが大きくなっていることがわかる。また、図(a)と(b)を比較すると、面の移動に応じて、指表面付近に見られるSEDの大きい位置が移動している。つまり、SEDが集中している部分付近に配置されたメルケル小体、マイスナー小体におけるSEDの値は、凹凸面の移動に伴い変化していると考えられる。

一方、皮膚深部におけるSED分布はあまり変化しない。指深部に配置されたパチニ小体、ルフィニ小体は、SED変動速度あるいは加速度の大きさに比例した神経インパルスを発射する触覚受容器である。したがって、パチニ小体、ルフィニ小体は物体の表面粗さ受容には関わっていないと考えられる。このことは、くし歯状の刺激棒を指の法線方向に押し込んで神経インパルス発射を測定したPhillips⁽¹⁰⁾らの結果と一致している。また、指を均一半無限弾性体と仮定したならば、物体の凹凸に基づく指内部の応力パターンは弾性体内部で指数関数的に

減衰するため、深部の触覚受容器には表面の凹凸の情報はほとんど伝わらないというShinoda⁽¹¹⁾らの指摘ともよく一致している。以上のように、これまでに計測あるいは理論解析により指摘されていた、パチニ小体、ルフィニ小体は物体の表面粗さ受容には関わっていないという点が、指断面を詳細にモデル化した本数値解析によって裏付けられたと言えよう。以下では、SEDが集中している指表面付近に位置しているメルケル小体とマイスナー小体に着目して解析を行う。

図4および図5に、指断面中央部($x=0$ 付近)のメルケル小体およびマイスナー小体の位置におけるSED振幅の時刻歴分布の周波数分析結果を実線で示す。図中波線は、前報⁽⁹⁾で求めたSEDの閾値、すなわち、触覚受容器のインパルス発射閾値にあたる振幅で平板を振動させた際のSEDの振幅分布を示す。SEDの閾値より、ある触覚受容器の位置において、ある周波数、ある振幅のSEDが得られたときに、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。図より、SEDの振幅が最大となる周波数は、対象面の波長に反比例して増大していくことがわかる。これは、波動の式 $v = f \lambda$ (v : 速度, f : 周波数, λ : 波長)より明らかである。図4のメルケル小体の位置におけるSEDの振幅は、速度を変化させた場合とは異なり、面の波長が小さくなると、インパルス発射閾値(SEDの閾値)よりも小さくなっている。つまり、対象面の波長が小さいときにはメルケル小体はインパルスを発射しない。

一方、図5に示したマイスナー小体の位置におけるSEDの振幅は、面の波長が小さくなるにつれて小さくなるものの、計算した周波数全域においてインパルス発射閾値よりも小さくはならなかった。これらより、対象面の粗さが小さい場合には、メルケル小体は触覚受容に関与せず、マイスナー小体のみが関与していることがわかる。

上記の結果は、細かい表面粗さの検知にはマイスナー小体のみが関わっているというVallboら⁽¹²⁾の生体計測結果とよく一致している。また、皮膚の空間周波数フィルタ効果により、波長1mmよりも小さい波長の表面刺激はどの触覚受容器にもほとんど伝わらないというEllisら⁽¹³⁾の解析結果とも定性的に一致している。ただし、本解析結果はマイスナー小体には表面の刺激が伝達されている点が異なる。これは、本解析のモデルは指紋稜線凸部、真皮乳頭などの皮膚構造を詳細にモデル化しているため、物性の異なる表皮と真皮乳頭の境界に配置されたマイスナー小体近傍のSEDの集中が詳細に表現できているためであると考えられる。

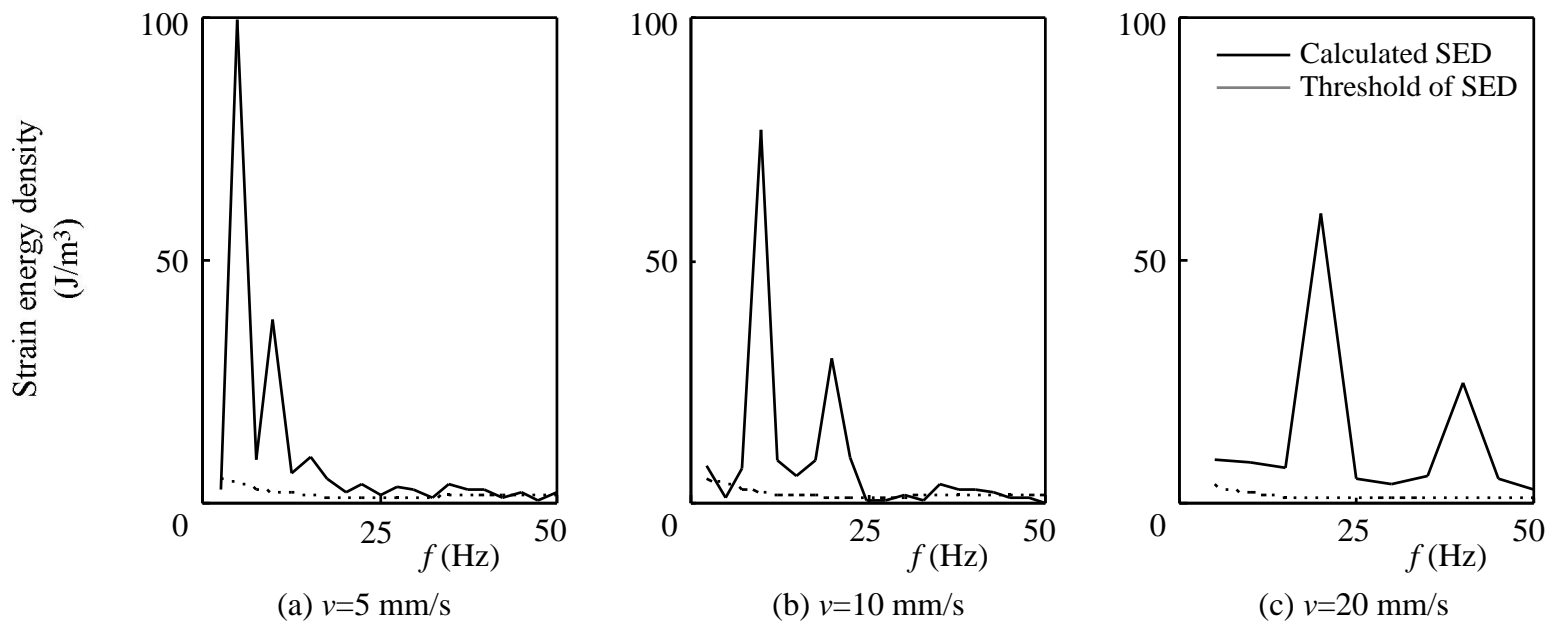


Fig.6 Frequency response of strain energy density at the Meissner's corpuscles when the wavelength of the rough plate is 1.0mm

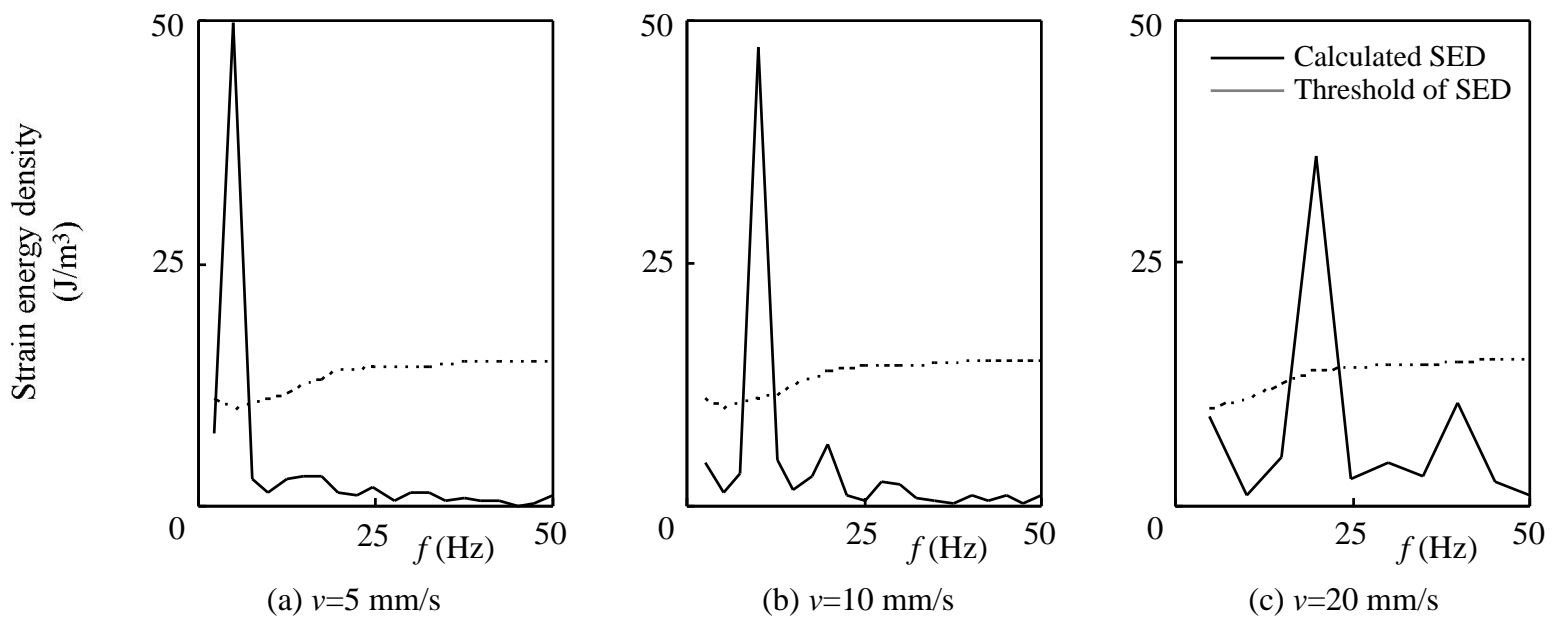


Fig.7 Frequency response of strain energy density at the Merkel's discs when the wavelength of the rough plate is 1.0mm

3・2 速度の影響 一般に，物体表面のテクスチャを認識するために行う指の触運動速度を変えると，触覚受容特性は変化するとされている⁽¹⁴⁾．そこで，凹凸面の接線方向速度を変化させた場合の接触解析を行った．他の解析同様，凹凸面を指にゆっくりと0.55mm押し込んだ後に， x 方向に十分長い時間移動させた．面の接線方向の移動速度は，5 mm/s，10mm/s，20mm/sの3通りとした．摩擦係数は0.5とした．

指断面中央部 ($x=0$ 付近) のメルケル小体およびマイスナー小体の位置におけるSEDの時刻歴分布をフーリエ変換した結果を図6および図7に実線で示す．波線はSEDの閾値である．

図より，SEDの振幅が最大となる周波数は，波長を変化させた場合と同様，対象面の移動速度に比例して波動の式 $v = f \lambda$ に従い増大していくことがわかる．また，

指の速度が大きくなるに従い，SED振幅の最大値が小さくなることわかる．これは指皮膚の粘性の影響と考えられる．SEDの振幅とインパルス発射閾値（波線，SEDの閾値）を比較すると，前者はいずれかの周波数において後者よりも大きくなっている．これより，マイスナー小体およびメルケル小体は，与えた凹凸面移動速度範囲では，凹凸面速度に関係なくインパルスを発射すると考えられる．

3・3 指紋の影響 前報⁽⁹⁾において，凹凸のない平面と，指紋のある指モデルまたは指紋のない指モデルとの接触解析を行った．この結果，指紋がある場合には，物体と指との局所的な固着・滑り現象が生じるとともに，触覚受容器近傍のSEDが増大することがわかった．表面粗さを有する面と指との接触の場合にも，指紋の有無によって触覚受容器近傍のSED分布に違いが生じると考えられる．そこで，指紋稜線凸部のある指モデルおよ

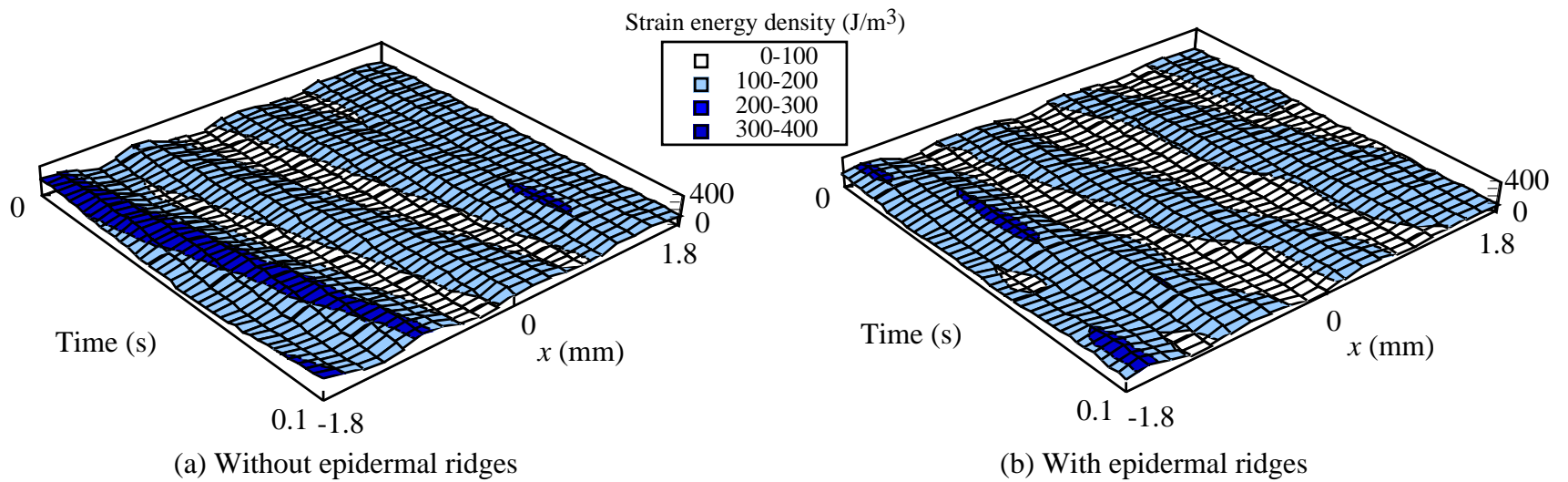


Fig. 8 Distribution of strain energy density at the Merkel's discs when the velocity of the rough plate is 10 mm/s

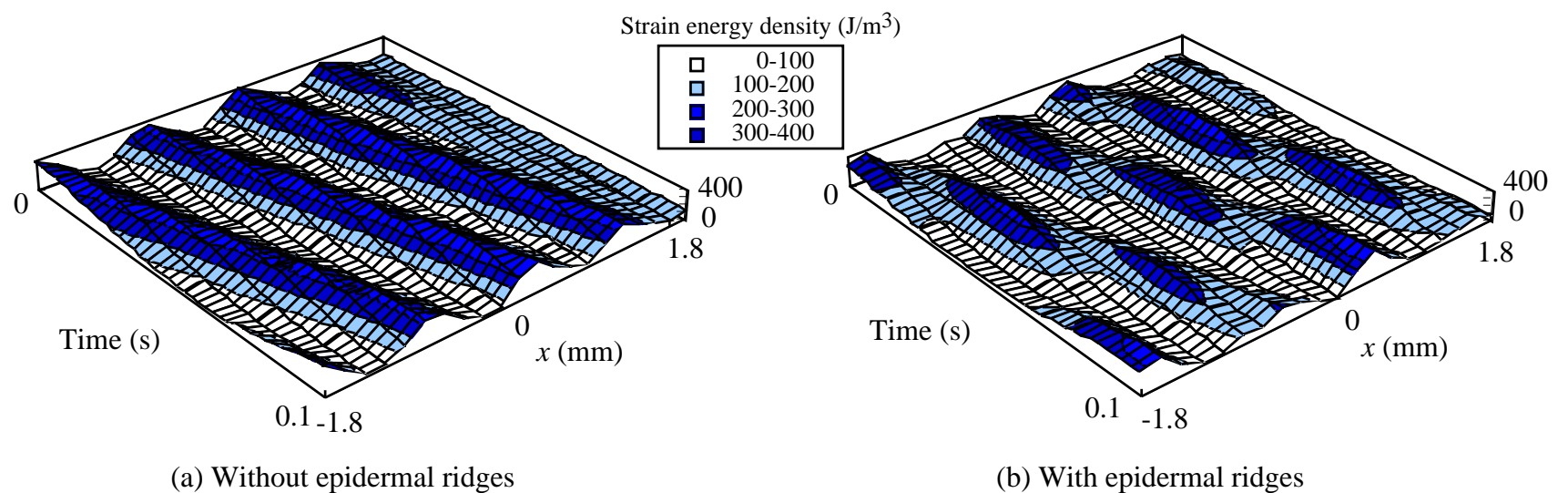


Fig. 9 Distribution of strain energy density at the Meissner's corpuscles when the velocity of the rough plate is 10 mm/s

び指紋稜線凸部のない指モデルと波長1mmの凹凸面との接触解析を行った。これまでの解析と同様、面を指にゆっくりと0.55mm押し込んだ後に、 x 方向に速度10mm/sで十分長い時間移動させた。摩擦係数は0.5とした。

まず、中央($x=0$ 付近)のメルケル小体およびマイスナー小体の位置におけるSEDの時刻歴分布の周波数分析を行ったところ、指紋の有無によってSEDの周波数応答波形はあまり変化しなかった。従って、周波数応答波形からは、指紋が有る場合もない場合もメルケル小体やマイスナー小体においては同様な神経インパルス発射が生じているように思える。しかし、上述の周波数応答波形は中央の触覚受容器のみの結果であり、触覚受容器の空間分布の影響は考慮していない。空間分布をも考慮すれば、マイスナー小体近傍のSED分布は指紋の有無の影響を反映していることを以下に示す。

図8および図9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。時間軸は、十分長い時間解析を行い解が定常になった後の凹凸面1周期分の移動時間(0.1秒間)を表示している。図

(a)は指紋稜線凸部のない場合、(b)はある場合の結果である。図8のメルケル小体の位置におけるSEDの分布を見ると、時間の経過に伴い、凹凸面の凸部が x 軸の正の方向に移動していくのに応じて、SEDの極大値も x 軸の正の方向に移動していくことがわかる。分布の時空間パターンは、指紋がない場合(a)もある場合(b)もほぼ同じである。したがって、前報⁽⁹⁾の結果同様、メルケル小体の触覚受容感度には指紋の有無はあまり影響を及ぼさないと言える。

一方、図9に示したマイスナー小体の位置におけるSEDの分布をみると、指紋の有無によってSEDの時空間分布パターンは異なっている。すなわち、指紋のない場合(a)には、メルケル小体の場合と同様、SEDの極大値は対象物凸部の移動に伴い x 軸の正の方向に移動している。これに対し、指紋のある場合には、時空間平面内を斜めに進行する稜線に孤立した極大値が生じる分布となっている。これは対象面と指との接触領域が一定とはならず、指紋の稜線凸部と対象面の凸部が接触する際に接触力が大きくなり、最も指表面に近い位置に配置された触覚受容器であるマイスナー小体にその影響が

及ぶためである。

以下に、複数の極大値をもつSEDの時空間分布が触覚の認識のために重要である可能性について考察する。

視覚野では、2次元の網膜に投影された視覚情報が、神経シグナルに変換される。そして、視覚受容のための神経回路における側抑制によって、ラプラシアン：

$$I // x + I // y \quad (1)$$

が計算されることが知られている。ここで x と y は網膜面内の直交座標であり、 I は神経シグナルの強度である。式(1)の y 軸を時間 t に置き換えると、

$$I // x + \cdot I // t \quad (2)$$

となる。ここで \cdot は定数である。

マイスナー小体は速度受容器であるので、SEDの時間微分 $I // t$ に比例した量が計算されている。一方、側抑制により、SEDの空間微分 $I // x$ に比例した量が計算されると考えられる。つまり、触覚受容のための神経回路では式(2)の値が計算されると推測される。図9(b)のように複数の極大値を持つSED時空間分布の場合、極大値近傍では式(2)の値は大きくなる。以上より、神経インパルスの時空間分布を変化させる指紋の効果は、表面粗さの認識のために重要な役割を果たしていると考えられる。

実際にどのような時空間パターンをどのように神経回路で処理することによって人間の官能量が生成されるのか、といったヒトの高度な情報処理手法の解明は今後の課題である。

4. 結 論

指が凹凸面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) メルケル小体およびマイスナー小体では凹凸面の移動に伴うSEDの変化を検出できる。ただし、凹凸面の波長が小さい場合にはメルケル小体におけるSEDの変化は小さいことから、メルケル小体は細かい凹凸形状の検出には関与しない。また、皮膚深部の触覚受容器(パチニ小体、ルフィニ小体)は凹凸面形状の検出に関

与しない。

(2) 触運動の速度は、インパルス発射の有無には影響しないが、SEDの振幅最大値の大きさに影響する。

(3) 指紋の有無は、メルケル小体近傍のSEDにはあまり影響しない。一方、マイスナー小体近傍のSEDの時空間分布は、指紋のある場合には時空間平面内を斜めに進行する稜線に孤立した極大値が生じる分布となる。

謝辞 本研究の一部は守谷育英会の研究助成金により行われた。

文 献

- (1) 特集 人工現実感, 日本ロボット学会誌10-7 (1992).
- (2) 特集 センサーストロボットハンド, 日本ロボット学会誌11-7 (1993).
- (3) 河合, 平野, 前野, 把持力制御のための曲面状ひずみ分布センサの開発, 機論64-627, C (1998), 4264-4270.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) Shepherd, G. M.ほか, *Neurobiology*, Oxford Univ. Press,(1988).
- (8) 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.
- (9) 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, 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, 機論64-628, C (1998), 4798-4805.
- (10) Phillips, J. R. and Johnson, K. O., Neural Mechanisms of Scanned and Stationary Touch, *J. Acoust. Soc. Am.*, 77-1, (1985) 220-232.
- (11) Shinoda, H., Uehara, M. and Ando, S., A Tactile Sensor Using Three Dimensional Structure, *Proc. 1993 IEEE Intl. Conf. Robotics and Automation*, (1993) 435-441.
- (12) Vallbo, A. B. and Johansson, R. S., Properties of Cutaneous Mechanoreceptors in the Human Hand related to Touch Sensation, *Human Neurobiology*, 3 (1984), 3-14.
- (13) Ellis, R. E. and Qin, M., Singular-Value and Finite Element Analysis of Tactile Shape Recognition, *Proc. 1994 IEEE Intl. Conf. Robotics and Automation*, (1994) 2529-2535.
- (14) 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, No.9 (1988), 51-55.