

# 皮下組織の内部構造に着目した触覚センサに関する基礎研究

田 中 由 浩\*<sup>1</sup>

## 【要 旨】

我々の触覚は、皮膚の変形や振動を基に受容されており、それらは皮膚内部にある機械受容器により検知されている。したがって、皮膚の構造は触覚受容において、力学的に重要な機能を有している。本研究では、特に皮膚の中でも構造があまり議論されていない皮下組織に着目し、その知見を基にした高感度な触覚センサ開発に向けて、力学的な特徴や触覚受容との関係を解析し基礎的検討を行なう。特に皮下組織の内部構造の規則性を明らかにするために、連続切片を作成し、3次元的に皮下組織内部の構造を観察することで、パチニ小体や脂肪、膠原線維の大きさやその関係について考察し、それを素にした有限要素法解析を実施し、構造が含む力学的原理について検討する。

## 1 はじめに

我々の触覚は、皮膚の変形や振動を基に受容されており、それらは皮膚内部にある機械受容器により検知されている。したがって、皮膚の構造は触覚受容において、力学的に重要な機能を有している。皮膚は、表皮、真皮、皮下組織の三層構造からなり、指紋や真皮乳頭などの特徴的構造も有し、その力学的機能が研究されてきた。Maenoらは、指紋や真皮乳頭によって皮膚表層の機械受容器の位置に外部刺激による応力集中が生じやすいことを有限要素法解析により示した<sup>1)</sup>。Scheibertらは、指紋の間隔に応じて皮膚で生じる振動の特定の周波数成分が重み付けされることを人工指により実験的に示した<sup>2)</sup>。これに対し、本研究では、特に皮膚の中でも構造があまり議論されていない皮下組織に着目し、その知見を基にした高感度な触覚センサ開発に向けて、力学的な特徴や触覚受容との関係を解析し基礎的検討を行なう。

これまでに、サル指の断面標本の顕微鏡観察から、膠原線維が脂肪や機械受容器の一種であるパ

チニ小体を覆っていることを確認し、この特徴を反映した有限要素法解析により、膠原線維が皮膚内部で発生する応力を拡散することを明らかにした<sup>3)</sup>。これはパチニ小体の高感度かつ広受容野の特徴を説明する一助になる可能性があり、この原理を明らかにして構造をモデル化できれば、ヒト皮膚のように柔軟で高感度・広受容野の触覚センサや、触覚メカニズム研究のための力学シミュレーションが期待できる。また、この単純なモデルにより、脂肪や膠原線維の大きさが内部応力の発生に影響することも有限要素法解析により確認してきた<sup>4)</sup>。したがって、皮下組織における、パチニ小体や脂肪、膠原線維の大きさやその関係が重要であるが、皮下組織内部の構造について、詳細には検討されていない。これは、触覚センサを開発する際に、どのように構造を反映させるか、その規則を明らかにするためにも重要である。そこで本研究では、これまでにサル指標本の観察や連続切片を用いた3次元構造観察を通じて、皮下組織内部の構造を詳細に調べることで、パチニ小体や脂肪、膠原線維の大きさやその関係について考察し、それを素にした有限要素法解析を実施し、構造が持つ力学的原理について検討する。

\* 1 名古屋工業大学 准教授

## 2 サル指の皮下組織構造の観察

### 2.1 サル指断面の切片試料

ニホンザルの指を用いて観察を行った。本研究では、これまでにすでに作成している、指の断面の標本や、連続切片にした標本を用いた。これらは、いずれも指先であり、厚みは5~20 $\mu\text{m}$ 程度で、アザン染色によって、膠原線維を特定しやすくしている。観察は、顕微鏡観察を（OLYMPUS社、BX53F）を用いて行った。

### 2.2 サル指断面の切片観察

複数のサルの指について、パチニ小体周辺に着目して指の断面標本を観察した。この時の顕微鏡画像の例を図1にいくつか示す。図より、これまでの先行研究と同様に、脂肪やパチニ小体を取り囲むように膠原線維が分布していることがわかる。さらに詳細にパチニ小体周辺に着目すると、脂肪に比べてパチニ小体は比較的太い膠原線維に覆われている傾向にあることが確認できた。また、パチニ小体周辺の脂肪の大きさについて着目すると、パチニ小体から遠い脂肪組織に比べて、パチニ小体周辺の脂肪組織の方が細かい傾向にあることがわかった。

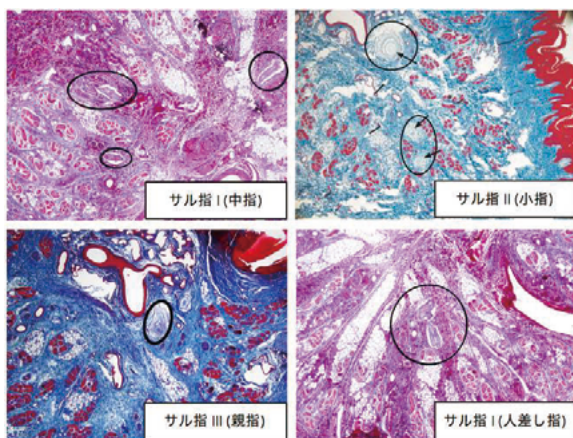


図1 複数のサル指の断面標本の顕微鏡画像（○はパチニ小体を示している）

### 2.3 内部構造の3次元構築

前節では、1枚の切片画像で構造の傾向を観察したが、より確実に特徴を捉えるために、パチニ小体とその周りの脂肪を三次元化した。一部のサル指標本については、既に連続切片試料を作成しており、これを用いて、連続画像を1枚1枚重ね合わせる事によって三次元構築を行った。用いたソフトはAmira 5.6である。図2に三次元構築された立体像の例を示す。



図2 連続切片を用いたサル指の皮下組織の3次元構築（黒：パチニ小体，その他：脂肪組織）

図2より、前節と同様の傾向が確認されることがわかる。パチニ小体周辺に着目すると、パチニ小体の周辺には脂肪組織は無く、少し離れたところに脂肪組織が取り巻いている。図中の隙間は、膠原線維がある場所であり、パチニ小体周辺は比較的太い膠原線維で覆われていると見ることが出来る。また、脂肪組織の大きさに着目すると、パチニ小体から離れた位置にある脂肪組織は比較的大きな形状をしている。したがって、パチニ小体とその周りの脂肪や膠原線維について、大きさや配置に関する特徴が推察された。一つは、パチニ小体周辺の脂肪組織が細かいこと、もう一つはパチニ小体周辺の膠原線維は、パチニ小体から離れている膠原線維よりも太いことである。

## 3 有限要素法解析

上記で得られた特徴：パチニ小体周辺の脂肪組織が細かいこと、パチニ小体周辺の膠原線維はパ

チニ小体から離れている膠原線維よりも太いこと、を基に指の断面解析モデルを作成し、有限要素法解析により、その効果を検討した。

### 3. 1 解析モデル

図3および図4に解析に用いたモデルの基本形および、パチニ小体は脂肪と同等と仮定し脂肪や膠原線維の位置や大きさを変更したモデルの代表例を示す。図3のように、脂肪は六角形でモデル化し、図4に示すように、指の断面をモデル化した。また表1に各種パラメータを示す。モデルの厚みは10mmとし、剛体平板の0.3mm押し込みによる静解析を行った。なお、機械受容器の神経発火頻度はひずみエネルギー密度に比例することがSrinivasanら<sup>5)</sup>によって報告されている。そこで、本解析でもひずみエネルギー密度を解析結果の評価指標として使用した。

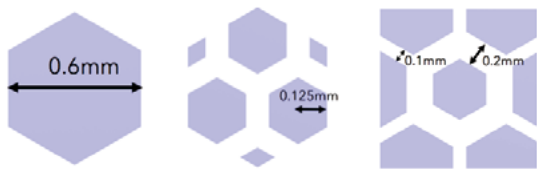


図3 脂肪組織のモデル化（左：基本形，中央：脂肪が小さいタイプ，右：膠原線維が太いタイプ）

	Young's moduli[MPa]	Poisson's ratio	Density[kg/m <sup>3</sup> ]	Behavior
Epidermis	0.136	0.48	1000	Elastic
Dermis	0.08			
Subcutaneous tissue	0.034			
Fiber	0.08			
Adipose	0.0085	0.3	7850	Rigid
Bone	$2 \times 10^9$			
Nail	$2 \times 10^9$			

表1 有限要素法解析に用いた指の内部組織の各力学パラメータ

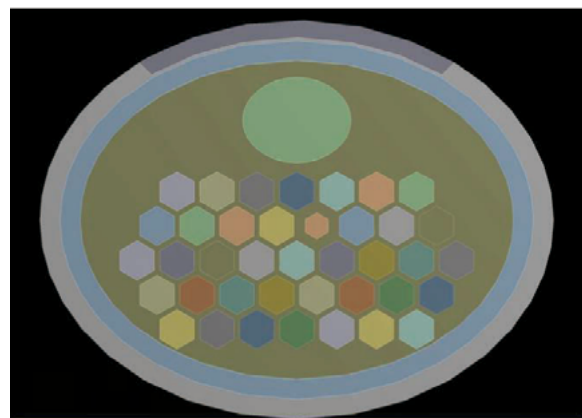
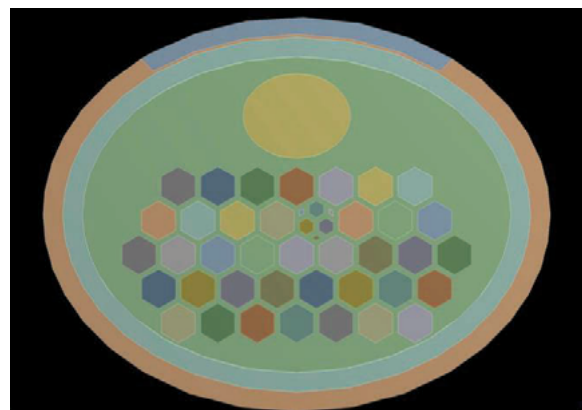
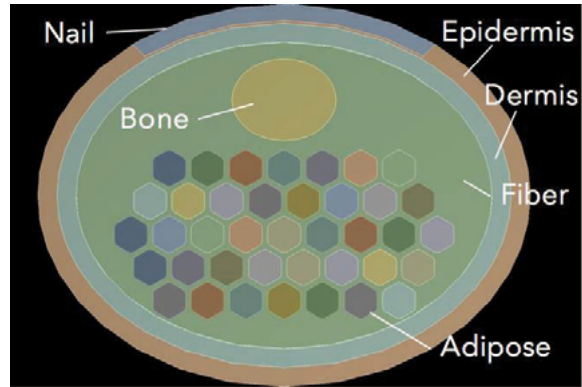


図4 有限要素法解析に用いた指の断面モデルの代表例（上：基本形，中央：脂肪が小さいタイプ，下：膠原線維が太いタイプ）

### 3. 2 解析結果

図5～7に解析結果の各条件の代表例を示す。図5より、これまで同様に、膠原線維があることによって、皮下組織全体に応力が拡散しやすく、特に深部方向に拡散することが確認できる。また、新たな検討として、膠原線維への応力集中にも注

目をした。膠原線維へも、脂肪と同様に、深部方向に応力が拡散している様子が見えるためである。

続いて、図6について考察する。図6は脂肪組織を部分的に細かくした場合である。図6より、脂肪への拡散と、細かい脂肪組織周辺の膠原線維において高いひずみエネルギー密度が生じていることがわかる。全体的な応力集中の発生も、細かい組織にした方によっている傾向が見られた。なお、細かくする部分をさらに指断面の端に移動させた場合について同様の解析を行ったが、左右方向に対しては明瞭な拡散は見られなかった。

また、図7に示した、部分的に膠原線維を太くした場合について考察する。図7に示すように、脂肪への拡散は見られないが、太い膠原線維において高いひずみエネルギー密度が生じていることがわかる。図6と同様に、全体的な応力集中の発生も、細かい組織にした方によっている傾向が見られた。また、特徴位置をさらに端に移動した場合について解析も行ったが、左右方向に対しては明瞭な拡散は見られなかった。

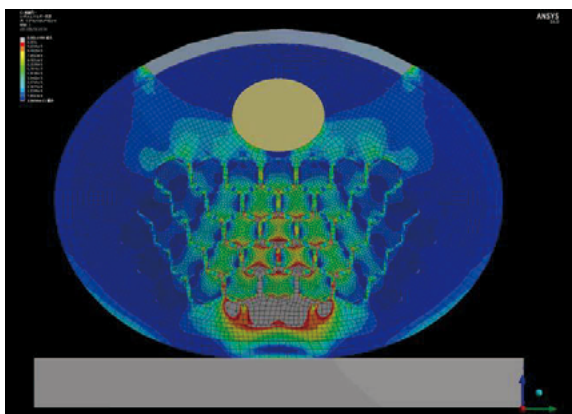


図5 基準モデルに対する解析結果

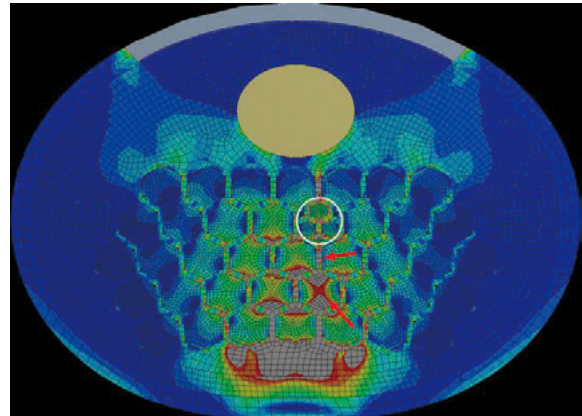


図6 脂肪を細かくし小さくしたタイプに対する解析結果 (○が該当箇所を示す)

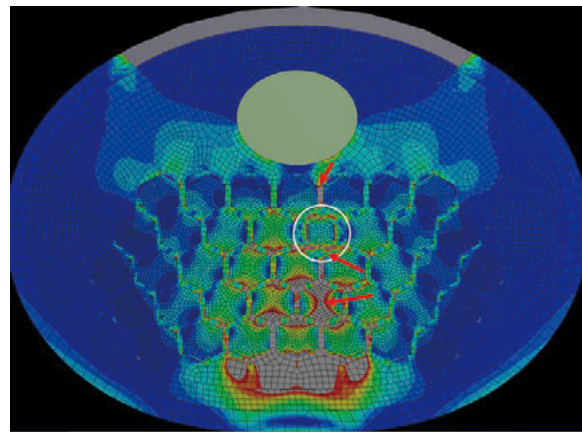


図7 膠原線維を太くしたタイプに対する解析結果 (○が該当箇所を示す)

### 3. 3 考察

結果より、脂肪を細かくしたり、膠原線維を太くしたりすることによって、皮下組織の内部応力の拡散を偏向させられることがわかった。特に、脂肪を細かくすること、膠原線維を部分的に太くすることによって、脂肪や膠原線維への応力集中を高めることができることがわかった。ただし、傾向としては、膠原線維への応力集中の変化の方が顕著のようにも見られた。パチニ小体とその周りを取り巻く膠原線維との力学な関係について、今後調査が必要であると考えられる。

パチニ小体のような触覚センサを人工皮膚のよ

うに柔らかい材質に埋め込む際に、本結果を基に、内部構造を部分的に変更することで、内部で応力を拡散し深部まで到達させつつ、センサの位置に狙ってより大きな応力集中を発生させることが期待でき、得られた知見は触覚センサに有益と考えられる。

#### 4 まとめ

皮下組織内部の構造を観察することで、パチニ小体や脂肪、膠原線維の大きさやその関係について考察し、それを素にした有限要素法解析を実施し、構造が含む力学的原理について検討した。連続切片による3次元構築も併用して観察を行なった結果、パチニ小体周辺の脂肪組織が細かいこと、パチニ小体周辺の膠原線維はパチニ小体から離れている膠原線維よりも太いこと、の傾向があることがわかった。この観察結果を基に、複数の指モデルを構築し、有限要素による皮下組織内部で発生する応力について数値解析を行なった。その結果、脂肪を細かくすること、膠原線維を部分的に太くすることによって、脂肪や膠原線維への応力集中を高めることができることがわかった。なお、ひずみエネルギー密度は左右方向に対しては拡散しない傾向が明らかとなった。以上の知見は、ヒトの触覚、特にパチニ小体のように、少数のセンサで高感度かつ広受容野で外部刺激を検出するために有益な構造と考えられる。

今後は、パチニ小体周辺構造を考慮した3次元モデルの解析や、膠原線維とパチニ小体との力学的関係の解明を進め、同時に、触覚センサの実現に向けて、得られた知見を基にした実モデルを製作したいと考えている。

#### (参考文献)

- 1) Maeno, T., Kobayashi, K., and Yamazaki, N., “Relationship between the structure of human finger tissue and the location of tactile receptors”, JSME Int. J. Ser. C., Vol. 41 (1998), pp. 94-100.
- 2) Scheibert, J., Leurent, S., Prevost, A., and Debregeas, G., “The role of fingerprints in the coding of tactile information probed with a biomimetic sensor”, Science, Vol. 323 (2009), pp. 1503-1506.
- 3) Tanaka, Y., Ito, T., Hashimoto, M., Fukasawa, M., Usuda, N., and Sano, A., “Collagen fibers induce expansion of receptive field of Pacinian corpuscles”, Advanced Robotics, Vol. 29 (2015), pp. 735-741.
- 4) 田中由浩, 橋本真佳, 園井悠人, 深澤元晶, 白田信光, 大竹義人, 福本学, 佐野明人, 皮下組織における膠原線維の分布による応力拡散効果に関する量的検討, 日本機械学会 第29回バイオエンジニアリング講演会, (2-17), 1D33.
- 5) Srinivasan, MA., Dandekar, K., “An investigation of the mechanics of tactile sense using two dimensional models of the primate fingertip”. J. Biomech. Eng., Vol. 118 (1996), pp. 48-55.