

マイスナー小体の空間配置についての考察（第4報）

○星 貴之, PHAM QUANG TRUNG, 田中 由浩, 佐野 明人 (名古屋工業大学)

Consideration of Spatial Configuration of Meissner Corpuscles (4th Report)

○Takayuki HOSHI, PHAM Quang Trung, Yoshihiro TANAKA, and Akihito SANO (NITech)

Abstract: Meissner corpuscles inside a fingertip are surrounded by a microstructure related to friction ridges. The effects of the microstructure were usually analyzed by using two-dimensional models. In this paper, the three-dimensional configuration of the microstructure is discussed focusing on the relation with Meissner corpuscles.

1. はじめに

指先の皮膚内部は、表皮、真皮、皮下組織などの層構造をなすことが知られている [1]. 特に表皮と真皮の間には複雑な凹凸構造 (Fig. 1) が存在する. これらの構造が機械受容器に与える作用について、これまでに有限要素解析を用いた議論がなされている.

Dandekar ら [2] は表皮、真皮、皮下組織 (脂肪、繊維)、骨、爪からなる、指全体の形状を再現した三次元有限要素モデルを作成した. 解析結果と生理学的な神経発火の比較から、メルケル細胞が歪エネルギー密度を検出している可能性を示した. ただし表皮や真皮の凹凸構造は再現されていなかった. 前野ら [3][4] は指紋と直交する指断面について、指紋と皮膚内部構造までも再現した二次元有限要素モデルを作成した. これにより各機械受容器への応力集中や、せん断力が与えられたとき隣り合うマイスナー小体に加わる応力に差が生じることを示した.

我々は第1報 [5] において、二次元モデルが奥行方向に一樣な構造を仮定しており実際の皮膚内部構造とは差異があることを指摘し、三次元構造を考慮することを提案している (Fig. 2). 真皮乳頭は指紋と平行な溝ではなく離散的に存在する円筒状の構造である. この構造の違いにより、真皮乳頭の中に位置するマイスナー小体が影響を受けることが予想される. また第2報[6] において、皮膚内部構造を再現した三次元有限要素モデルを用いて、奥行方向に一樣な構造を持つ場合と凹凸構造を持つ場合において異なる応力分布が現れることを見出した. 第3報 [7] では境界条件の影響を緩和するため指断面全体までモデルを拡大した. 奥行方向の構造によって真皮乳頭内に応力集中が生じることが確認された. 本稿では、表面への荷重の面的な広がりに着目した有限要素解析の結果について報告する.

2. 有限要素解析

2.1 モデル

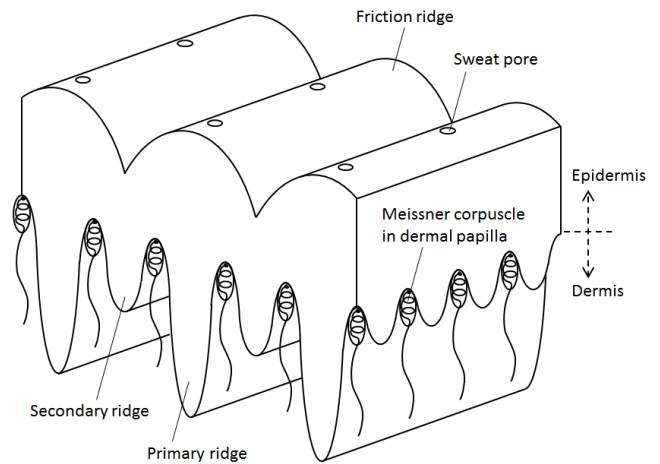
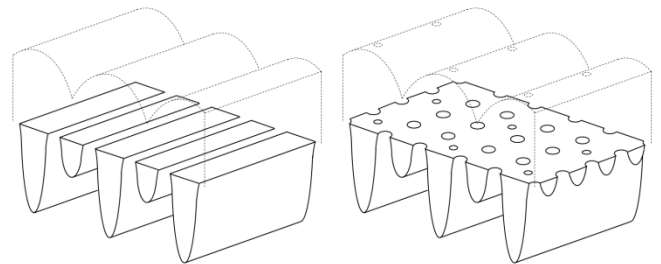


Fig. 1 Illustration of microstructure in skin of fingertip.



(a) Assumption in 2D model. (b) Actual 3D configuration.
Fig. 2 Horizontal cross sections including dermal papillae.

有限要素解析ソフト Abaqus [8] を用いて三次元有限要素モデルを作成した (Fig. 3). 表皮、真皮、皮下組織からなる三層構造とした. 表皮の上面には指紋 (Friction ridges), 表皮と真皮の境界には乳頭間溝 (Primary ridges), 稜間溝 (Secondary ridges), 真皮乳頭 (Dermal papillae) が再現されている. 作成したモデルにおける各部位の寸法を Table 1 に示す. 文献 [4] に倣い乳頭間溝と稜間溝を同じサイズとした. 表皮、真皮、皮下組織の弾性率を 0.136 MPa, 0.080 MPa, 0.034 MPa, ポアソン比を 0.48 とした.

モデルは二通り作成した (Fig. 4). (a) 二次元モデル

Table 1 Size of microstructure.

	Height [μm]	Width [μm]
Friction ridges	70	440
Primary and secondary ridges	350	110
Derma papillae	150	110

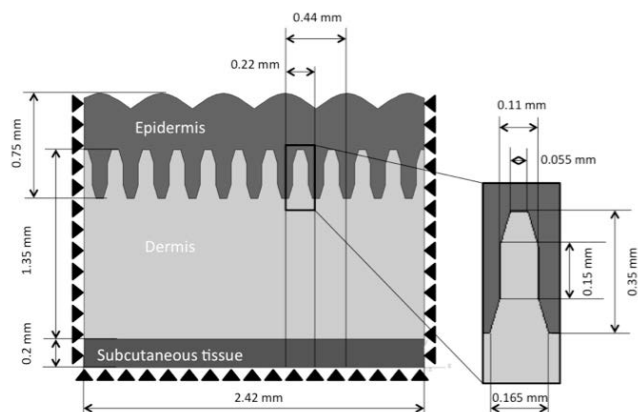


Fig. 3 Developed FEM model.

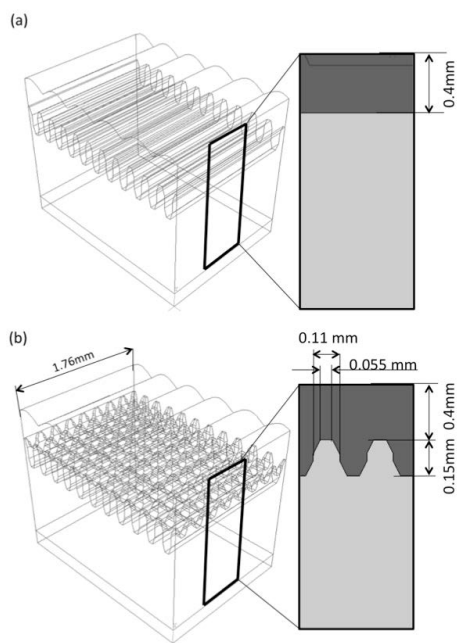
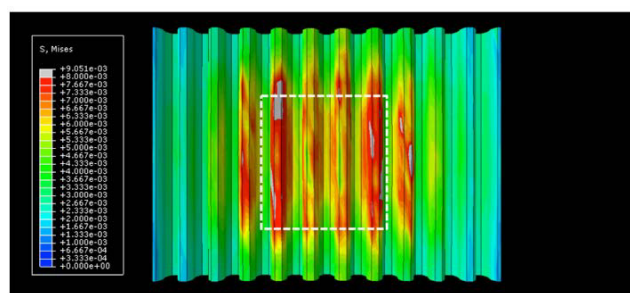
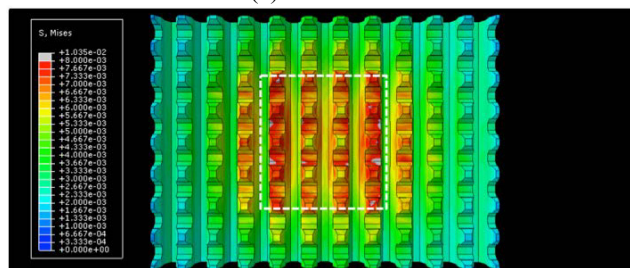


Fig. 4 Side structure. (a) 2D and (b) 3D models.

を奥行方向に引き延ばしたものと (b) 奥行方向の凹凸を考慮したものである。これらの比較から、奥行方向（指紋と平行な方向）に均一でない構造の効果を検証する。奥行方向を Z 軸，水平方向を X 軸，鉛直方向を Y 軸とする。第 3 報 [7] では Z 方向に真皮乳頭 4 個の厚さを持つモデルを用いて XY 平面の空間分布を調べた。本稿では XZ 方向の空間分布を調べるため，X 方向を指紋 6 本分の幅 (2.42 mm)，Z 方向を 2 倍の厚さ (1.76 mm) とした。



(a) 2D model.



(b) 3D model.

Fig. 5 Analyzed distribution of von Mises stress.

2.2 解析

前述のモデルを用いて、指紋側から Y 方向の荷重を与えた場合の解析を行った。モデルの側面および底面について、それぞれに垂直な方向の変位を拘束した。指紋側の表面中央に 0.88 mm 角の剛体板を配置し、Y 方向下向きに 100 μm 押し込んだ。

マイスナー小体が存在する真皮乳頭の先端を含む断面におけるミーゼス応力の分布を Fig. 5 に示す。点線は剛体板の範囲である。X, Z どちらの方向についても、奥行方向の凹凸がある場合にミーゼス応力が剛体板の外側に広がりにくい傾向が見られた。

3. おわりに

本稿では皮膚内部の三次元構造とマイスナー小体の関係について有限要素解析を行った。奥行方向の構造によりミーゼス応力の分布が接触面の形状をよく反映する傾向が見られた。

この応力分布により接触面の詳細な形状知覚が可能であるように思われる。一方、マイスナー小体の神経支配は一本の神経軸索が複数本に分岐し、また一個のマイスナー小体に複数本の神経軸索が接続するという複雑なものであることが報告されており [9]，そのため応力分布をそのまま感じ取れない可能性もある。

参考文献

- [1] 岩村吉晃: タッチ, 医学書院, 2001.
- [2] K. Dandekar, B.I. Raju, and M.A. Srinivasan: 3-D finite-element models of human and monkey fingertips

- to investigate the mechanics of tactile sense, *Journal of Biomechanical Engineering*, vol. 125, pp. 682-691, 2003.
- [3] 前野隆司, 小林一三, 山崎信寿: 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] 前野隆司, 山田大介, 佐藤英成: ヒト指紋形状の力学的意味, *日本機械学会論文集 (C 編)*, vol. 71, no. 701, pp. 245-250, 2005.
- [5] 星貴之, Pham Quang Trung, 田中由浩, 佐野明人: マイスナー小体の空間配置についての考察, 第 13 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2012) 論文集, pp. 323-324, 2012.
- [6] 星貴之, Pham Quang Trung, 田中由浩, 佐野明人: マイスナー小体の空間配置についての考察 (第 2 報), 第 14 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2013) 論文集, pp. 667-668, 2013.
- [7] 星貴之, Pham Quang Trung, 田中由浩, 佐野明人: マイスナー小体の空間配置についての考察 (第 3 報), 第 15 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2014) 論文集, pp. 1654-1656, 2014.
- [8] Abaqus,
<http://www.3ds.com/products-services/simulia/portfolio/abaqus/latest-release/>, last accessed on 29 Sep. 2014.
- [9] M. Paré, A.M. Smith, and F.L. Rice: Distribution and terminal arborizations of cutaneous mechanoreceptors in the glabrous finger pads of the monkey, *Journal of Comparative Neurology*, vol. 445 (4), pp. 347-359, 2002.