

マイスナー小体の空間配置についての考察（第2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 (2nd 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。

我々は前報 [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。本稿では皮膚内部構造を再現した三次元モデルとそれを用いた予備的な解析について報告する。

2. 有限要素解析

2.1 モデル

有限要素解析ソフト Abaqus [6] を用いて三次元有限要素モデルを作成した (Fig. 3)。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

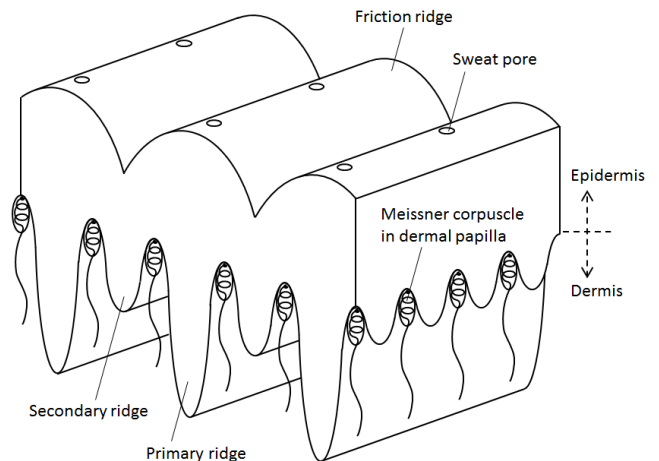
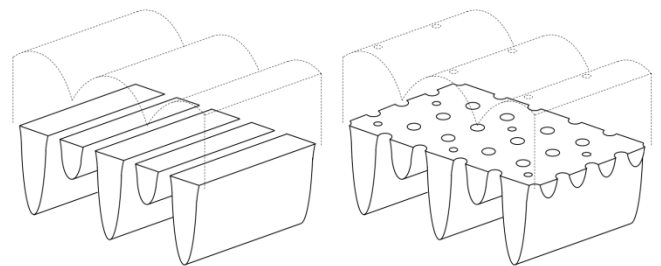


Fig. 1 Illustration of microstructure in skin of fingertip.



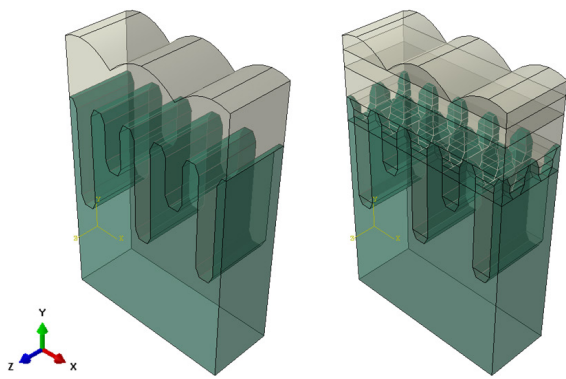
(a) Assumption in 2D model. (b) Actual 3D configuration.
Fig. 2 Horizontal cross sections including dermal papillae.

表皮、真皮の弾性率を 0.136 MPa, 0.080 MPa, ポアソン比を 0.48 とした。

モデルは二通り作成した (Fig. 3)。 (a) 二次元モデルを奥行方向に引き延ばしたものと (b) 奥行方向の凹凸

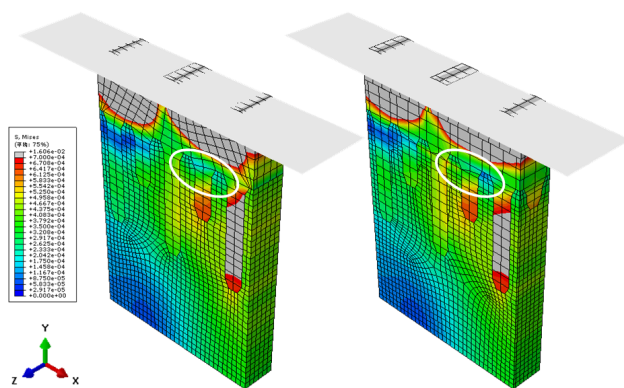
Table 1 Size of microstructure.

	Height [μm]	Width [μm]
Friction ridges	110	460
Primary ridges	700	120
Secondary ridges	200	120
Dermal papillae	150	110



(a) 2D model. (b) 3D model.

Fig. 3 Developed FEM models.



(a) 2D model. (b) 3D model.

Fig. 4 Analyzed distribution of von Mises stress.

を考慮したものである。これらの比較から、奥行方向に均一でない構造の効果を検証する。指紋と垂直な方向を X 軸，指紋と平行な方向を Z 軸，高さ方向を Y 軸とする。今回は応力分布の傾向の観察を目的とし，皮膚の一部（指紋 3 本程度の狭い領域）のモデルを作成した。

2.2 解析

前述のモデルを用いて，皮膚表面に X 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。摩擦係数を 1 とし，剛体板を Y 方向下向きに 10 μm 押し込んだあと X 方向へ 40 μm 平行移動させた。

モデル中央の XY 断面におけるミーゼス応力の分布を Fig. 4 に示す。両者同様の傾向を示すものの，マイスナー小体が存在する真皮乳頭において強度の違いが見られた。特に，Fig. 4 に○印で示した隣接する真皮乳頭のミーゼス応力の比率は (b) のほうが大きい。これは，前報 [5] でも指摘したように真皮乳頭の構造の違

いに起因すると考えられる。仮に隣接するマイスナー小体の反応の比率によって垂直応力とせん断応力を区別しているとすれば，その増強に寄与している可能性がある。

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，せん断応力に対する感度が向上している可能性が示された。ただし，本稿で用いたモデルは皮膚の一部を切り出した状態であり，境界条件が解析結果に大きく影響する恐れがある。今後，モデルの妥当性の確認や修正を行ったのち，他の条件についての解析を進める予定である。

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] Abaqus, <http://www.3ds.com/products-services/simulia/portfolio/abaqus/latest-release/>, last accessed on 27 Sep. 2013.