

GS1201 指腹部圧迫による軟部組織の変形—MRI 撮影と FEM 解析—

Deformation of the soft tissue by pressing on the finger pulp
-MRI measurement and FEM simulation-

○ 武山 仁 (宇都宮大学院) 正 酒井 直隆 (宇都宮大学) 正 嶋脇 聡 (宇都宮大学)
平田 一郎 (日本電気株式会社) 三橋 秀男 (日本電気株式会社) 則枝 真 (日本電気株式会社)
杉本 英治 (自治医科大学)

Hitoshi TAKEYAMA, Naotaka SAKAI and Satoshi SHIMAWAKI

Dept. of Mechanical Systems Engineering, Utsunomiya Univ., 7-1-2 Yoto, Utsunomiya, 321-8585

Ichiro HIRATA, Hideo MITSUHASHI and Shin NORIEDA NEC Corporation

Hideharu SUGIMOTO Jichi Medical University and Hospital

1. 緒言

ヒトが物体に接触したときに接触部位がどのような変形を起こすか知ることは工学的、医学的にも大変興味深いことである。特に指尖部は手掌面の中でも、物体の特徴や性質をとらえる重要な部位であるため、力学的変形を知ることは重要なことであり研究も行われている⁽¹⁾⁽²⁾。指尖部が柔軟な変形を起こすことができるのは、脂肪組織中に血液が豊富に含まれこの血液が移動しているためである。そのため、この指腹部にある脂肪組織内の血液の移動による変形を明らかにすることはヒト指尖部の変形を解明するために非常に重要である。本研究では異なる対象物に三次元指尖部モデルを接触させ、その時の変形をシミュレーションした。また、ヒト指でも同様に対象物を押し当て変形状態を MRI によって撮影し、解析結果と体積の変化率を比較した。

2. 方法

2.1 三次元指尖部モデルの作成 右手に外傷や既往歴の無い成人男性 (22 歳) 1 名に対して、右手手関節より遠位に 1mm 間隔で CT, MRI 画像を取得した。CT 画像では皮膚と皮下組織、指骨を、MRI 画像では皮下組織内の血液を多く含む脂肪組織を識別するのに使用した。これらの画像から、輪郭抽出用ソフトウェア SURFdriver (ver.6.0, David Moody and Scott Lozanoff)を用いて、それぞれの輪郭を目視にて抽出した。

得られた輪郭のデータから、有限要素法解析ソフト ANSYS LS-DYNA (ver.10.0 サイバネット社)を用いて、三次元指尖部モデルを構築した。爪のモデルを実際のヒト指と比較して相当する部分に定義した。爪の厚さは 0.5mm とした。要素は 8 節点 6 面体要素であり、その数は 7533 個であった(図 1)。

2.2 有限要素法の計算条件 指骨、皮下組織、脂肪組織、皮膚、爪の 4 つの部位の物性値を表 1 に示す。

Table.1 Material constants for human fingertip⁽³⁾

	Young's moduls (kPa)	Poisson's ratio
Bone	1.7×10^7	0.3
Soft Tissue Fatty Tissue	34	0.5
Skin	136	0.5
Nail	1.7×10^5	0.3

今回の解析では各要素の材料モデルを指骨、爪は剛体、皮下組織、皮膚は線形弾性、脂肪組織は弾性流動体とした。

図 2 に示すように指先から 10mm の近位における指腹部

の下方に剛体球を設け、その剛体球を上方へ移動をさせて指腹部に接触させた。剛体球の直径は 2, 4, 6mm の 3 種類で行った。指尖部中心と剛体球の接触角度は 30deg とし、剛体球は 0.1 秒で 5.0mm 移動するように定義した。剛体球が指尖部モデルと接触したのち異なる方向へ回転することを避けるため、剛体球に移動方向以外の変位拘束と全方向回転拘束を与えた、指尖部モデルの拘束条件として、指骨と爪の一部に変位回転拘束を与えた。

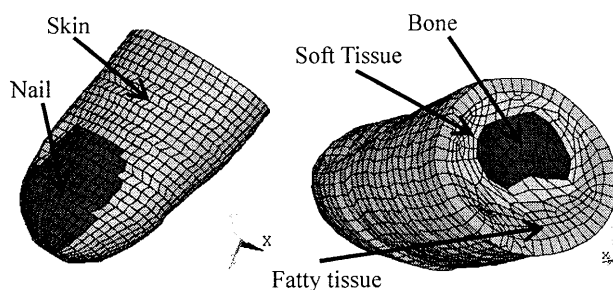


Fig.1 Three-dimensional finite element model of human index fingertip.

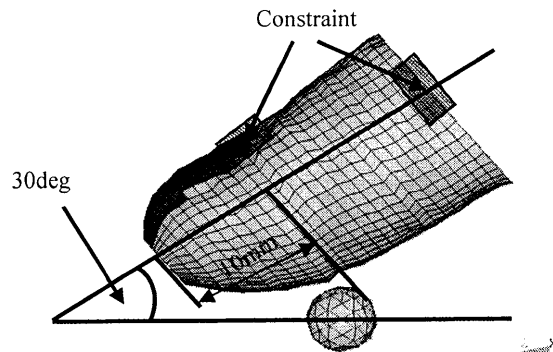


Fig.2 Calculating condition of mechanical deformation.

2.3 評価方法 解析結果をヒト指尖部の力学的変形の実験結果と比較した。実験の被験者はモデル作成で画像撮影を行った人物と同一である。実験方法は被験者の右手示指の指先から 10mm 近位における指腹部に、先端が球状をした対象物を接触させた。その球の直径は 2, 4, 6mm である。被験者は右手示指の指腹部を上方に向け、接触面と指尖部が接触角度 30deg となるよう台座に沿って指を置いた。荷重は 2.0N とし、指尖部変形の様子を MRI で撮影した。

2.4 体積変化率の測定 体積の変化率は無負荷状態と負荷をかけた状態での指の 1mm 毎の体積を比較して求めた。体積は 1mm 毎の面積を計測して(1)式で求めた。このとき指先から最も遠位にある断面までの距離を l と仮定して計算した。

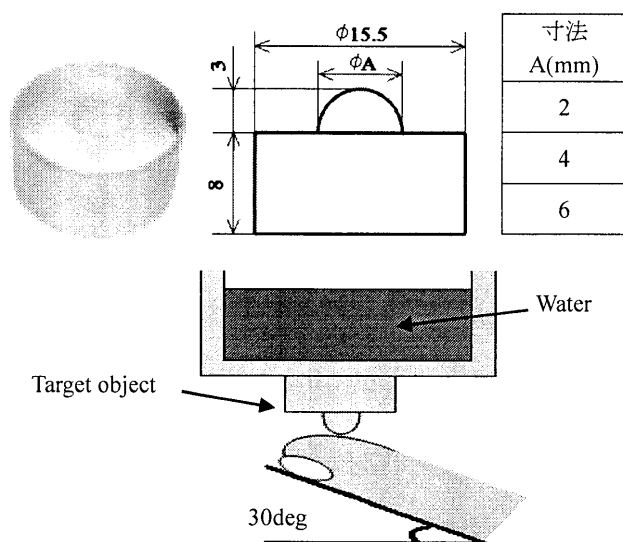


Fig.3 Target object and experimental apparatus

$$V = (S_2x) / 3 - S_1(x-L)/3 \quad (1)$$

計測した結果、断面の変形が見られた、指先から 10mm 地点を中心とし前後 6mm の体積変化率を求めた。

3. 結果

図 4 は荷重 2.0N で対象物先端球径 2mm, 4mm, 6mm を指腹部に接触させた際の、指尖部の指先からの各距離における体積の変化率を示す。解析結果とヒト指の力学的実験の両方で体積が増加、接触中心付近では脂肪組織の体積が大きく減少しているのが確認できた。しかし、両者には定量的な差がみられ、解析結果のほうがヒト指の結果より大きな値を示す傾向がみられた。

球径が 2mm と 4mm の結果はほぼ同じものとなったが、6mm では 2mm と 4mm でみられた指先から 9mm 付近での凸部がみられなかった。また、6mm が接触点での体積の減少率が一番大きかった。

4. 考察

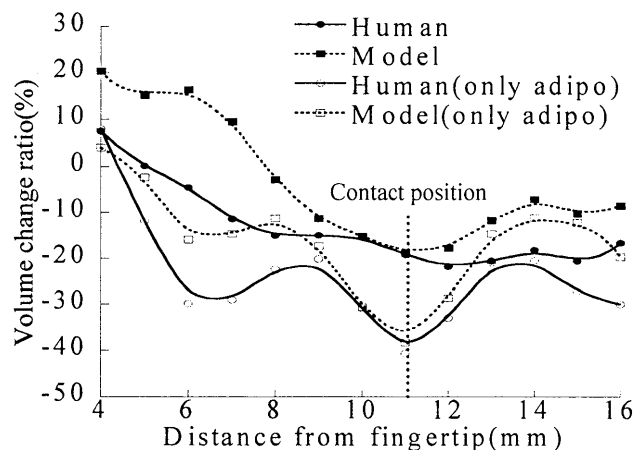
ヒト指の力学的実験結果と解析結果では体積変化率に定量的な差はあったが、体積の増加・減少のタイミングは一致していた。そのため、体積がどのように移動をするか傾向を観察するには十分なモデルであると言える。

指腹部が大きく変化していても横幅(尺側、桡側)はあまり変化していない結果となった。図 4 を見ると体積は接触点付近で一番減少している。その個所とその周りの体積を比較すると接触点周辺のほうが減少は少ない。これは、対象物による圧迫により押し出された体積が移動していると考えられる。なぜなら、体積が指骨軸方向より横幅方向により移動したとしたら、1mm 毎の体積は変わらないか、増える結果となると考えられる。このことから、指の内部(皮下組織、脂肪組織等)は接触点を中心として移動し、横幅方向よりも指骨軸方向への移動が大きいことがわかる。

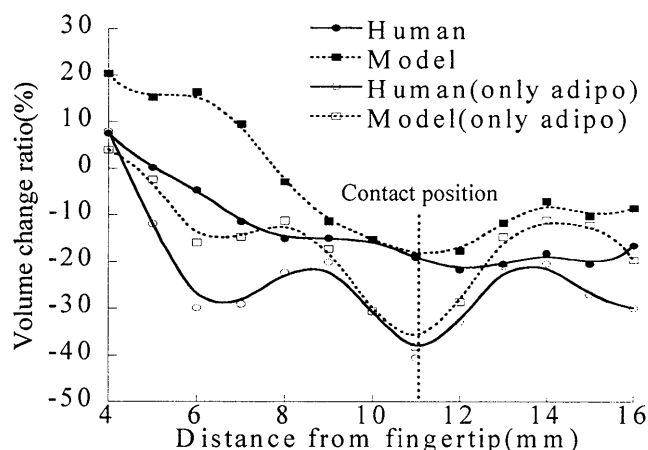
5. 結論

本研究では、CT・MRI 画像から 3 次元ヒト指尖部モデルを作成し、皮下組織の一部を血液の多い脂肪組織とし、弾性流動体を使用して指尖部の力学的変形シミュレーションを行った。接触点を中心に脂肪組織は特に遠位または近位

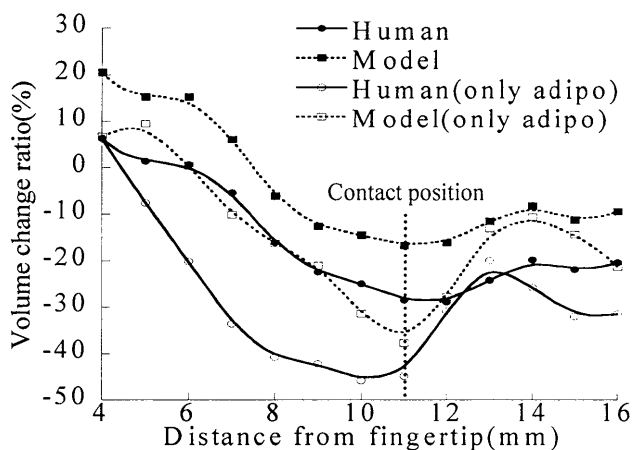
に移動し、尺側、桡側へは移動が少ないことがわかった。



(a) diameter of 2mm



(b) diameter of 4mm



(c) diameter of 6mm

Fig.4 Comparison between experiment and simulation for the relation between volume change ratio and distance from fingertip

6. 参考文献

- (1) 嶋脇, 酒井: 平面圧迫時のヒト指尖部の力学的変形. 日本臨床バイオメカニクス学会, 24, 157-162, 2003.
- (2) 大木, 酒井, 嶋脇: CT 画像から構築した三次元ヒト指尖部モデルの力学的変形シミュレーション<第三報>. バイオエンジニアリング講演会講演論文集, 20, 207-208, 2007
- (3) 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(C), 63(607), 881-888, 1997