3A09

ヒト幼児およびアカゲザルの示指皮膚の押し込み挙動計測

Deformation measurement at pushing of the index finger skin layer of

Human children and a Macaca mulatta

非 〇川口 哲司 (金沢大院)
正 宮崎 祐介 (東工大)
非 西村 剛 (京都大)

正 坂本 二郎 (金沢大)
正 多田 充徳 (産総研)

Satoshi KAWAGUCHI, Graduate School of Kanazawa University, Kakuma-machi, Kanazawa, Ishikawa 920-1167

Jiro SAKAMOTO, Kanazawa University

Yusuke MIYAZAKI, Tokyo Institute of Technology

Mitsunori TADA, National Institute of Advanced Industrial Science & Technology

Takeshi NISHIMURA Kyoto University

Key words : Injury Biomechanics, a little child, Macaca mulatta, Index finger

1. 緒言

日常生活における事故の中でも指挟みによる傷害は多い。例えば子供の怪我の部位では第1位が頭であり、第2位が手の怪我である⁽¹⁾。事故の特徴として、原因となる製品が我々の身の回りに存在し、最悪の場合は指の骨折・切断という重篤な怪我になり得ることが挙げられる。このような事故を防止する為に、各種製品の設計に反映できる傷害を予測・評価する技術の確立が求められる。これまでの研究では、皮膚組織の非線形な材料特性を同定し、指挟み事故を再現可能な指有限要素モデルが構築されている⁽²⁾。しかし、ヒト幼児の指を対象とした皮膚組織の材料特性は同定されていない。また、皮膚の裂傷評価基準も存在しない。その為、ヒト幼児を対象とした傷害リスクを評価するのは困難であった。そこで本研究は、ヒト幼児及びアカゲザルの指の変形挙動を計測し、ヒト幼児の指における皮膚組織の材料特性及び皮膚組織が破断に至るまでの過程を明らかにすることを目的とした。

2. 実験

2.1 実験装置

ヒト幼児及びアカゲザルの示指皮膚の変形挙動を計測する為に、Fig.1 に示す実験装置を用いた。本装置はフォースゲージ、フォースゲージスタンド、光源、CCD カメラ、圧子で構成され、圧子により指腹を押し込むことができる(Fig.2)。但し圧子には、アカゲザルの場合において皮膚が破断する様子を捉えるため剃刀刃を用いた。フォースゲージは上下可動であり、フォースゲージ先端に取り付けられている圧子で指を押し込んだ際の荷重を計測できる。なお、押し込み変位はフォースゲージスタンド内蔵の変位計で計測することができる。また、CCD カメラと光源より指押し込み時における指腹部の変形挙動を装置側面視点から計測が可能である。

Force gauge stand

Fig.1 Experiment device

Fig.2 indenter of experiment device

2.2 実験対象及び条件

実験は4歳から5歳の子供(男児3名、女児7名)及びオスのアカゲザル(5歳5ヶ月)を対象にした。なお、圧子の変位はヒト幼児の場合は無痛条件の3[mm]、アカゲザルの場合は表皮が破断するまでとした。

3. 解析モデルの構築

ヒト幼児及びアカゲザルにおける示指皮膚の非線形材料特性を同定するために有限要素法を用いて解析を行った。

3.1 形状

ヒト幼児及びアカゲザルはヒト成人の指と比較した際、指全体として骨や爪の大きさに相対的な差があまりないと考えられる。そこで本研究では、先行研究⁽²⁾で構築された成人男性の示指におけるMRI画像をもとに構築された示指有限要素モデルを、長さ、幅、厚みの3寸法(Fig.3)を等倍変形させる3寸法スケーリングを用いてヒト幼児及びアカゲザルの示指有限要素モデルを構築した(Fig.4, Fig.5)。スケーリングの際にはTable.1に示す寸法比を用いた。なお、モデルは末節骨及び中節骨の皮質骨、上皮、下皮、爪、の5つのパートで構成され、全体の要素は7728である。また、上皮、下皮、爪は六面体要素、皮質骨は四角形要素で構成される。爪、皮質骨の材料定数は先行研究⁽²⁾より決定した(Table.2)。モデル作成にはHyperMesh11.0(Alter engineering社製)を用いた。

Fig.3 Three size of finger

Fig.4 FE model of human child finger

Fig.5 FE model of Macac mulatta finger

Table.1 index finger of scaling ratio

	length[mm]	width[mm]	thick[mm]
human adult	20.02	14.40	10.70
human child (average)	15.22	12.00	10.10
ratio (human child/human adult)	0.76	0.83	0.94
Macaca mulatta	11.70	6.00	7.80
ratio (Macaca mulatta/human adult)	0.58	0.42	0.73

Table.2 Material property without skin

	Young's modulus[kPa]	Poisson's ratio
cortical bone	1.00×10^4	0.30
nail	1.00×10^2	0.30

3. 2. 1 皮膚の材料モデル

皮膚の非線形変形挙動を正確に再現するために、Ogden モデルを用いた。Ogden モデルはひずみエネルギー W の主応力方向の伸長比 λ に関する N 次級数として次式で表現される。

$$W = \sum_{n=1}^N \frac{\mu_n}{\alpha_n} (\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n} - 3) \quad (1)$$

μ_n と α_n は定数である。ここで、皮膚の変形特性を非圧縮性で単軸引張・圧縮変形を仮定し、伸長比 λ を工学ひずみ ε に置き換えることで次式のように表現される。

$$\sigma = \sum_{n=1}^N \mu_n \left((\varepsilon + 1)^{\alpha_n - 1} - (\varepsilon + 1)^{-\frac{1}{2}\alpha_n - 1} \right) \quad (2)$$

指軟組織の変形は1次項のみで表現可能⁽⁸⁾であることから $N=1$ とし、 α を両層で同値と仮定した。

3. 2. 2 解析条件及び材料定数決定方法

皮膚組織の変形に影響を与えないと考えられる骨及び爪を剛体定義した。また押し込み実験を再現のため、爪と末節骨を完全固定し、圧子の変位として指有限要素モデルの圧子通過上の節点に強制変位を与え解析を実施した(Fig.6)。

材料定数を決定する際、指の変形形状が上皮と下皮のヤング率の比によって変化することから、実験とシミュレーションの指変形形状が等しくなるヤング率の比を算出し、その値を用いて押し込み量に対する反力の関係が実験とシミュレーションで合致する μ と α を算出した。

Fig.6 Boundary condition

4. 結果・考察

Fig.7、Fig.8 に圧子を 3[mm]押し込んだ際のヒト幼児及びアカゲザルの示指皮膚における押し込み部周辺の変形を実験と解析で比べたものを示す。その際のヤング率比を Table.3 に示す。これより解析モデルと実験の変形形状に近いことがわかる。そこで Table.3 に示す値を条件に加え解析した結果を、Fig.9、Fig.10 に反力-押し込み量線図を実験結果と合わせて示す。その場合の材料定数を Table.3 に示す。これより、ヒト幼児、アカゲザルの示指皮膚は非線形特性を有し、Fig.10 より皮膚破断直前には非線形性が失われていること

がわかる。また解析モデルは、ヒト幼児及びアカゲザル共に押し込み量 2.0[mm]～3.0[mm]の領域においても非線形特性をよく表現できていることが確認できる。一方、材料定数をヒト幼児とアカゲザルで比較した場合、上皮における μ の値は大きな差がないことがわかる。以上より、アカゲザルを用いた実験よりヒト幼児における示指皮膚の破断過程を明らかにすることが可能であると考えられる。

Fig.7 deform of human child finger

Fig.8 deform of Macaca mulatta

Table.3 Young's modulus ratio in hypodermis and dermis

	human child	Macaca mulatta
Young's modulus ratio (hypodermis/dermis)	1/100	1/10

Fig.9 Reaction force-depth curve of Human child finger

Fig.10 Reaction force-depth curve of Macaca mulatta finger

Table.4 Material property of skin

	μ (Pa)	α
human child		
dermis	35938	16
hypodermis	359	16
Macaca mulatta		
dermis	29280	15
hypodermis	2928	15

5. 結言

指挟み事故における皮膚の裂傷評価に向けて、ヒト幼児及びアカゲザルの示指皮膚の挙動を計測した。また、実験を再現した解析を行うことでヒト幼児とアカゲザルにおける示指皮膚の材料定数が近いことを確認した。今後は、アカゲザルの皮膚が破断するまでの大変形領域を解析し、皮膚の傷害耐性値を算出する予定である。

参考文献

- (1) 経済産業省製造産業局 デザイン・人間生活システム政策室, "キッズデザインの輪", <http://kd-wa-meti.com/index.html>, 2011
- (2) 宮崎祐介, 山崎剛, 坂本二郎, 多田充徳, 持丸正明, 非線形弾性変形特性を有する指有限要素モデルの構築と指はさみシミュレーションへの応用, 日本機械学会年次大会講演論文集, J021033, 2011
- (3) 多田充徳, 磁気共鳴画像と反復有限要素解析に基づく生体軟組織の材料定数推定, Vol. 43, 2005