

経皮的圧刺激によって筋肉内に生じる応力の3次元有限要素解析

高橋 賢 水村 和 枝

肩こりや筋肉痛の程度を調べようとするとき、皮膚の上から圧力を与えて、痛みを感じたときの圧力を記録するという方法を一般的に用います。専門的には、これを経皮的圧刺激による筋圧痛閾値の測定といいます。しかしさまざまな人がいるもので、皮下脂肪の厚さひとつをとってみても人によって全く異なります(図1)。したがって皮膚表面から一定の圧力を与えても、筋表面や筋内部で生じる応力は個人ごとに全く異なることになり、肩こりの程度などを経皮的圧刺激による筋圧痛閾値によって個人間で比較することは困難です。

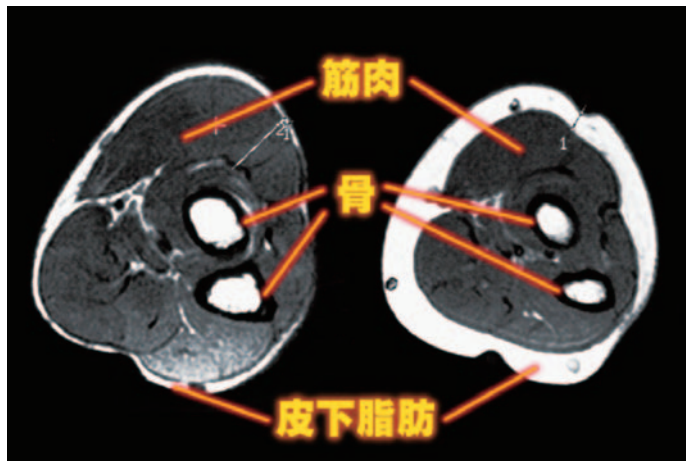


図1 ヒト前腕部のMRI断層画像

仮に皮下組織の厚さが一定だったとしても、皮膚表面から圧を加えたときの筋表面や内部の応力分布を実測するのは不可能なので、3次元有限要素解析を用いた構造力学シミュレーションによってこれを推定することを試みました。構造解析ソフトウェアとしてLS-DYNA 3D (version 950e)を、計算環境として名古屋大学情報連携基盤センターのGRIDスーパーコンピュータシステムを使用しました。このソフトウェアはダム内で生じている静的な圧力などを求めることができるだけでなく、自動車の衝突解析などの動的な問題を解くことができます。

ヒト前腕部の組織を物性的に捉えると、皮膚、皮下脂肪、筋、骨に大別できます。これらはある一定の物性値(線形モデルであればYoung率、Poisson比など)を持っており、これらの物性を持っている物体の空間内での配置、及び圧力の方向・強さなどの境界条件を与えれば、おのこの物体内部で生じている応力を時間の関数として求めることができます。シミュレーションで

用いたヒト前腕組織の配置図を図2に示します。モデルをできるだけ現実に近いものにするため、ヒト被験者（筆者）の前腕のMRI断層画像を基にして作成しました。このモデルは25,431個の6面体（一部は5面体）ソリッド要素から成り、圧刺激プローブや前腕を支える台及び骨の材料モデルとして線形の等方弾性体を用いました。皮膚・皮下脂肪・筋などの生体組織は与えた力に対して変形量が比例関係を示さない非線形材料なので、モデルとしてよく用いられるOgden rubberを用いました。拘束条件として、前腕を支える台は不動で皮膚組織と接触しており（貫通できない）、圧刺激プローブには上から垂直方向に222.1 kPaの圧を与え、皮膚と接触しているという条件を与えました。

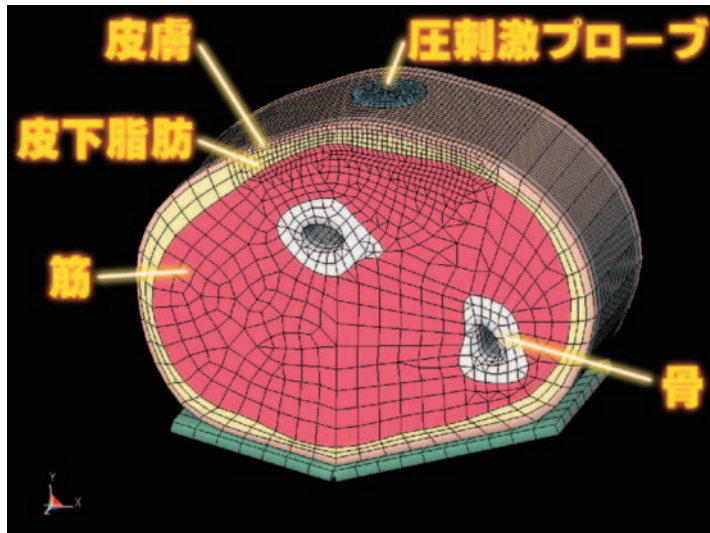


図2 ヒト前腕部の3Dモデル

得られた解析結果を図3に示します。この図はプローブ直径を含む断面におけるMises応力の分布を示したものです。この図から、プローブに与えられた圧力によって皮膚・皮下脂肪・筋が下方方向に変位していることが分かります。また図中の色はMises応力の強さ（青が最低値、赤が最高値）を示しており、圧刺激プローブの角が接している部分の皮膚において最も強い応力が生じていることが観察されます。この応力分布は3次元的に見ることも可能で、図4にMises応力を等値面プロットであらわしたものを示します。これらの2次元断面・3次元等値面解析は、ポストプロセッサソフトウェアとしてLS-prepostを使用しており、任意の断面・角度で解析できるほか、変位・応力が経時的に変化するムービーファイルを作成することも可能です。

このようなシミュレーション解析には実測値との整合性があるかどうかという問題が常につきまといま。我々はヒト被験者の前腕に実際に加重を与えたときの組織の変位をMRI断層画像として記録し、この変位がシミュレーションの結果と一致するかどうか検討したところ、良好な結果を得ました。今後の課題として、1. 皮膚表面に生じる応力を最小にし、筋に生じる応力を最大とするプローブの形状の探索、2. 皮下脂肪の厚さをパラメータ化し、皮膚に与えられた力

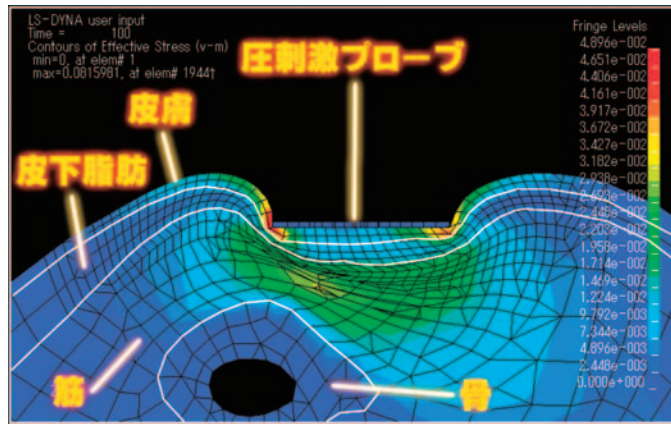


図3 経皮的圧刺激により前腕組織に生じた Mises 応力の分布

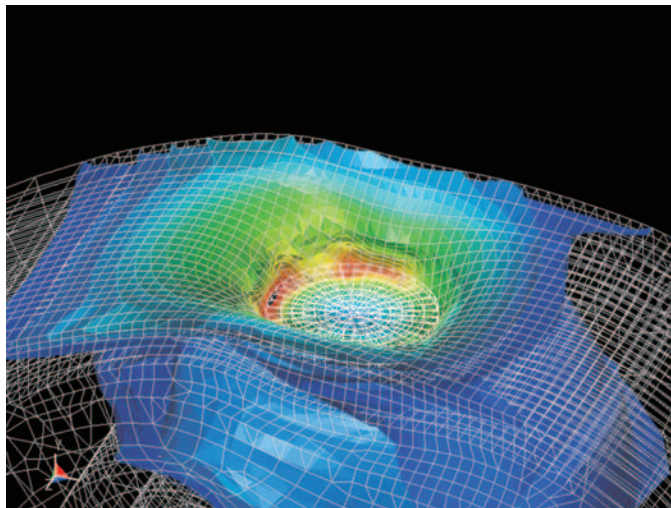


図4 Mises 応力の 3次元等値面プロット

によって筋に生じる力を推定する, 3. 筋肉内に硬結 (病的に硬い部分) がある場合の応力分布を求め, 硬結部位の可視化を試みる, などがあります。

当研究室では今回ご紹介しましたような構造解析シミュレーションに興味を持ち, やってみたいという方を歓迎致します。ご興味をお持ちでしたら, 下記までご連絡いただけましたら幸いです。

〒 464-8601 名古屋市千種区不老町

Tel: 052-789-3864 (内線 3864) Fax: 052-789-3889

E-mail: spacevet@v001.vaio.ne.jp

(たかはし けん: 名古屋大学環境医学研究所神経性調節分野)
 (みずむら かずえ: 名古屋大学環境医学研究所神経性調節分野)