

X線 CT 画像に基づく生体硬組織の個体別有限要素解析

Individual Finite Element Analysis of Living Hard Tissue based on X-ray CT images

○ 学 宮下智弥(信州大院) 正 小関道彦(信州大) 学 遠藤孝修(信州大)

Tomoya MIYASHITA, Michihiko KOSEKI, and Takano ENDO

Shinshu University, 3-15-1, Tokida, Ueda, Nagano, JAPAN

Key Words: Biomechanics, Living Hard Tissue, Patient-specific model, X-ray CT, Anisotropy.

1. 諸言

近年、病気や怪我の診断に X 線 CT などの医用画像装置が広く利用されている。X 線 CT 装置とは、X 線発生源と検出器の間に対象物を置き、その周囲方向から投影データを取得し再構成することで対象物の断層画像を得る装置である。CT 画像は X 線を吸収する度合いによって各画素に CT 値が設定され、生体硬組織の場合には X 線をよく吸収する領域（ヤング率が大きい領域）ほど CT 値は高い値を示す。

一方、この技術を利用し CT 画像に基づいて生体硬組織を個体別にモデル化し、有限要素法により生体内の力学状態を調べる研究も盛んに行われている[1]。一般にこれらの解析モデルは、等方性材料と仮定し解析が行われている。しかし、生体硬組織をより正確に解析するためには、その材料特性を異方性材料として設定する必要がある。

そこで本研究では、材料特性に異方性を考慮した個体別モデルの構築、解析を目的とする。本稿では、生体硬組織を撮影した CT 画像からの異方性情報抽出アルゴリズムとその結果について述べる。

2. 骨の基本構造

骨は主に骨膜、緻密質、海綿質で構成されている[2]。骨膜は繊維性結合組織の膜で、骨の表面を保護する役割がある。緻密質は海綿骨と比べて硬い組織で、骨の外側を構成している。緻密質の内部には骨細胞へ栄養を運ぶために血管、神経、リンパ管の通路が存在し、鉛直方向にハヴァース管（中心管）、円周方向にフォルクマン管（貫通管）が直交するように通っている。海綿骨は、骨梁と呼ばれる骨性の小さな柱が不規則に絡み合った形状をしている。緻密質と比較して多くの隙間が存在しているため軽量で、梁の役割を果たしている。上腕骨や大腿骨などの縦方向に長い骨を長骨と呼ぶ。長骨は骨端部と骨幹部に分けられ、それぞれ構成が異なる。長骨の上下端を骨端と呼ぶ。骨端の内部は海綿質で満たされ、その表面を緻密質が薄く包んでいる。さらにその外側（関節面）には骨膜に変わり関節軟骨（硝子軟骨）が覆っている。骨幹部は、上下骨端部間の領域で緻密質からなる。

3. 実験試料の作製と CT 撮影

実験試料として鶏の上腕骨を使用した。初めに、食用鶏手羽元を水に浸し 30 分程度加熱し筋組織を除去する。その後十分に乾燥させ、上腕骨の下部を模型用超硬石膏（ニューフジロック、株式会社ジーシー）で固定した。このとき上腕骨の固定角度は骨幹部部分がほぼ垂直になるようにした。作製した実験試料を図 1 に示す。この実験試料について内部情報を取得するために CT 撮影を行った。撮影にはマイクロフォーカス X 線 CT 装置（ScanXmate-A130SS940、コムスキャンテクノ株式会社）を使用し、空間分解能約 12 $\mu\text{m}/\text{voxel}$ の CT 画像を 400 枚撮影した。撮影された骨幹部の CT 画像を図 2 に示す。



Fig.1 Test sample

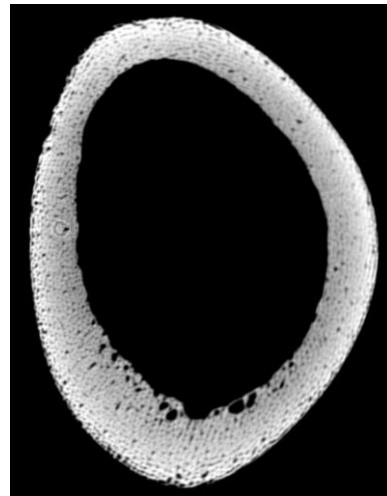


Fig.2 CT Image of humerus of chicken

4. 異方性情報抽出アルゴリズム

緻密質によって構成される上腕骨の CT 画像を詳細に調査したところ、CT 画像に多数の黒点が観察された。これは、2 章で述べたように骨幹部には骨細胞へ栄養を運ぶために微小な管が張り巡らされており、この管領域が周囲の硬組織と比較して低い CT 値を示しているためであると考えられる。そこで CT 画像に表現されるハヴァース管などの連続性の情報に基づき、骨幹部の異方性情報を抽出することを試みた。具体的には、撮影した 400 枚の CT 画像を読み込み 3 次元的にこの領域を抽出する。まず、注目している画素を中心とする $9 \times 9 \times 9 \text{ voxel}$ の領域の CT 値の平均を算出する。そして、注目している画素が平均値の 65%より低い場合その画素を抽出する。全ての画素についてこの処理を適用し、異方性情報を抽出する。

今回は計算の簡略化のために、元の CT 画像から 512×512pixel の領域を切り出し本アルゴリズムを適用した。異方性情報を抽出した CT 画像を図 3 に示す。また、本アルゴリズムを適用した 400 枚の CT 画像を積層し、3 次元的に表現した画像を方向別に図 4(a),(b),(c)に示す。

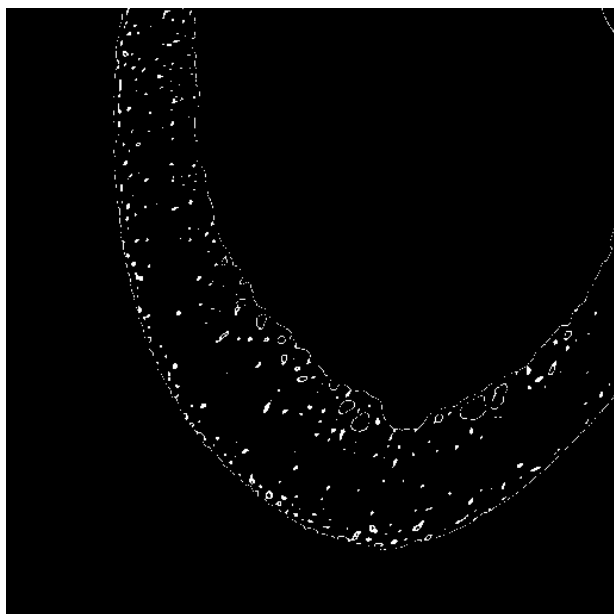


Fig.3 Extracted anisotropic information from a CT image

図 3 より管領域が白色の点群として抽出されていることがわかる。また、図 4(a)より周方向では放射状の方向性があることがわかる。さらに、図 4(b),(c)より鉛直方向には縦の方向性があることがわかる。これらの特徴は解剖学的なハヴァース管、フォルクマン管の方向性の特徴と一致している。よって今回のアルゴリズムで異方性情報を抽出できることが確認できた。しかし、生体硬組織は個体差があるため今回のアルゴリズムが全ての場合で適切であるか、今後さらなる検証と検討が必要であると考えられる。

5. 結言

実験試料として鶏上腕骨を用いて CT 撮影を行った。そして、CT 画像に基づいて骨幹部における異方性情報の抽出および 3 次元的な観察を行った。

今後の予定として、今回取得した情報から個体別モデルへの物性値の対応付けを検討する。また、骨端部についても同様に CT 撮影を行い、異方性情報の取得を行う。さらに個体差による影響についても検証および検討を行う。

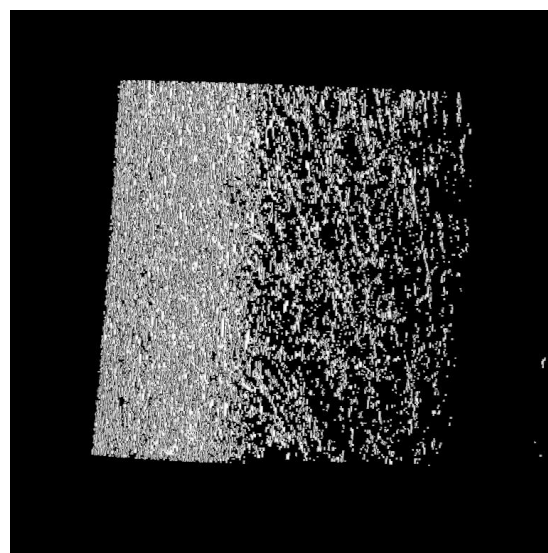
参考文献

[1] 小関道彦・上西雅也・伊能教夫・榎宏太郎：X 線 CT 画像に基づく骨体の個体別モデリング手法に関する研究(骨形態を考慮した要素分割手法の提案)；日本機械学会論文集 C 編，72-717，(2006)，1470-1477

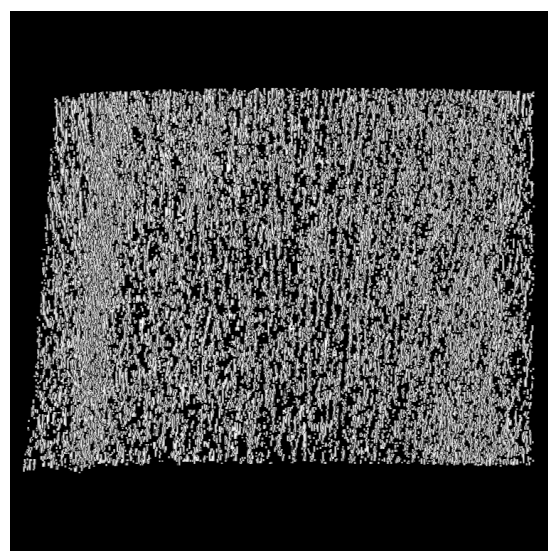
[2] Gerard J. Tortora・Bryan Derrickson：トートラ人体解剖生理学；丸善株式会社，(2007)，117-124



(a) Top view



(b) Front view



(c) Right side view

Fig.4 Extracted anisotropic information from CT images