

8A43

X線 CT 画像に基づく下顎骨の個体別有限要素解析（骨の構造異方性の抽出）

Individual Finite Element Modeling of Lower Jaw Bone based on X-ray CT images

(A Study of an extraction method of structural anisotropy of bones)

正 ○小関道彦（信州大学） 学 宮下智弥（信州大院）

Michihiko KOSEKI and Tomoya MIYASHITA, Shinshu University, 3-15-1, Tokida, Ueda, Nagano, JAPAN.

Key words : Biomechanics, Patient-specific model, Finite Element Analysis, X-ray CT.

1. はじめに

近年、病気や怪我の診断に X 線 CT などの三次元医用画像が広く利用されている。X 線 CT は、X 線発生源と X 線検出器の間に対象物を置き、その周囲から X 線を照射して投影データを取得し再構成することにより対象物の断層画像を得る装置である。X 線 CT 画像の画素値は X 線の吸収量に従って定められ、X 線をよく吸収する領域ほど高い値を示し、生体内においては歯や骨などの硬組織が高い値として表示される。

一方、X 線 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^(1,2)。一般にこれらの解析モデルでは有限要素に等方性材料を設定して解析が行われることが多く、CT 画像の各画素を立方体要素として構成する超大規模モデルでなければ、組織の構造的な異方性を模擬することができていない状況にある。このため、小規模な解析モデルでも生体組織の材料異方性を考慮したモデリング手法が求められている。

そこで本研究では、生体組織の中でも緻密骨に注目し、その材料異方性を考慮した小規模個体別モデルを構築することを目的としている。本稿では、生体硬組織を撮影した X 線 CT 画像からの異方性情報抽出アルゴリズムを提案し、その適用結果について述べる。

2. 緻密骨の異方性情報抽出アルゴリズム

緻密骨内部には栄養供給を主目的とする微小管構造が張り巡らされている。例として鶏上腕骨の緻密骨領域について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) を使用して撮影した CT 画像を図 1 に示す。この CT 画像の空間分解能は約 $12 \mu\text{m}/\text{voxel}$ であり、緻密骨領域は一様ではなく、多数の黒点が観察される。この黒点が上述の微小管構造を示すものであり、緻密骨内で連続性をもっているのであれば、緻密骨の構造異方性を CT 撮影によって非破壊に観察できていることが示唆される。そして、このような異方性を有する緻密骨を等方性モデルとして解析したのでは力学的な挙動が正しく求まらないことが予想される。

そこで、この黒点の連続性を観察するため、CT 画像から画素値の低い領域を三次元的に抽出することを試みた。具体的には、注目画素の画素値と、その周囲 $9 \times 9 \times 9$ ボクセルの平均画素値を算出し、両者の比較によって画素値が周囲に比べて低い領域を抽出するものである。この処理を複数の CT 画像の全ての画素に適用することにより、局所的に画素値が低い領域を三次元的に抽出することが可能となる。

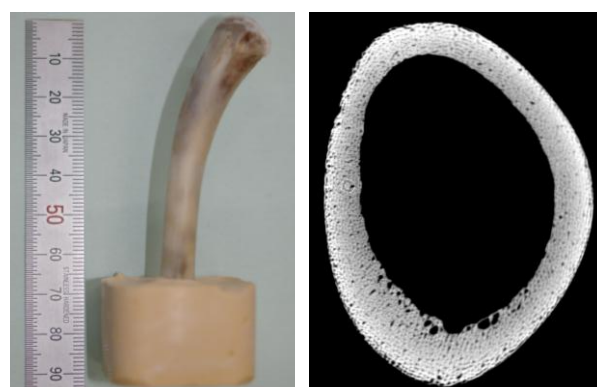
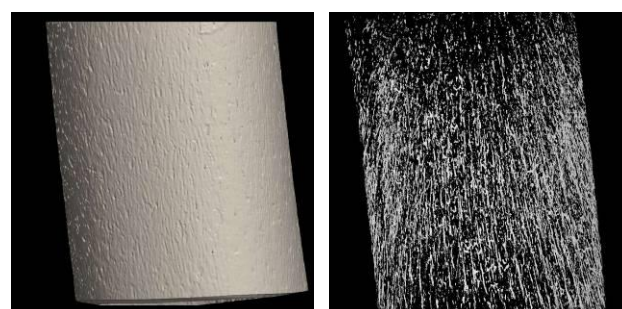
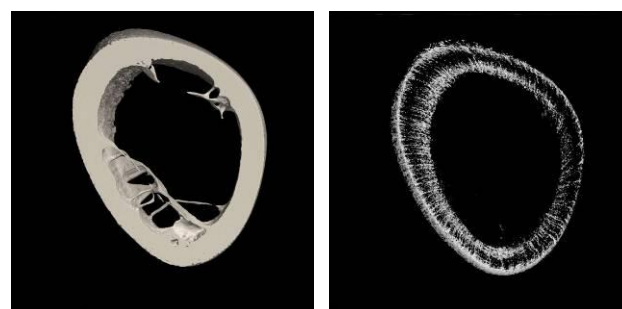


Fig.1 A humerus of a chicken and its CT image.



(a) Sagittal view.



(b) Axial view.

Fig.2 3D reconstructed image of canal structure in the cortical bone of the chicken.

図 1 で示した鶏上腕骨の CT 画像に対して本手法を適用し、画素値が平均値の 65%より低い画素を抽出した結果を図 2 に示す。図 2 では、オリジナルの対象領域の表面形状を左側に示し、右側にその領域に対して提案手法を適用した結果を示している。

2(a)には、軸方向に沿った明らかな方向性が表現されている。また、図 2(b)からは放射状の方向性があることがわかる。これらは緻密骨のハヴァース管やフォルクマン管の解剖学的な特徴とよく一致している⁽²⁾。すなわち、提案するアルゴリズムによって緻密骨内部の微小管による構造的な異方性の情報を X 線 CT 画像から抽出できていると考えられる。ただし、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討が必要であるとされる。

3. 家兎下顎骨への適用

咀嚼や発声に重要な役割を果たす下顎骨は、その機能・力学環境・成長過程がこれまで述べてきた鶏上腕骨のような長管骨に比べて大幅に複雑なため、緻密骨の構造異方性も複雑になると考えられる。そこで、提案する手法を家兎の乾燥下顎骨に適用した。図 3 に示す家兎下顎骨に対し、切歯の歯根周辺部位および臼歯の周辺部位について X 線 CT 撮影を行い、提案手法の適用を試みた。結果を図 4 に示す。

図 4(a)は切歯の歯根周辺部位について側方および上方から観察した結果である。この領域では下顎骨内に深く埋没する切歯の歯根に沿った方向性が観察される。これは切歯先端に加わる荷重を骨が支えるために力学的にも妥当な方向性であるように考えられる。そして、切歯歯根の末端部ではそこから放射状に方向性がある。これは、この付近の骨表面に筋が付着し、神経孔があることが影響していると考えられる。

図 4(b)は臼歯の周辺部位について側方および上方から観察した結果である。図 4(a)に示した切歯歯根周辺部位に比べて明確な方向性を観察できない。これは、下顎に加わる力学条件として大きな比重を占める咀嚼において、家兎のような草食動物では臼歯で植物を磨り潰す運動が多く行われるため、臼歯には様々な方向から荷重が加わり、それを支える骨が非常に複雑な構造になっているためであると考えられる。またこの領域には若干の海綿骨も含まれており、その骨梁構造も抽出されている可能性がある。

4. まとめ

生体硬組織を撮影した X 線 CT 画像からの異方性情報抽出アルゴリズムを提案し、試料として鶏上腕骨および家兎下顎骨を用いて X 線 CT 撮影を行った。そして、CT 画像に基づいて緻密骨内部の異方性情報の抽出および三次元的な観察を行った。今後、個体差による影響について検討を行うとともに、今回取得した情報から個体別モデルの要素の材料特性として異方性情報を設定して応力解析を実施する予定である。

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金 基盤研究 (C) (課題番号23500514) によって行われた。ここに記して感謝の意を表す。

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, Vol.72, No.717, pp.1470-1477, 2006.
- (2) 小関道彦・伊能教夫・榎宏太郎：ヒト下顎骨の個体別応力解析を目的とした咀嚼筋力推定；日本機械学会論文集 C 編, Vol.74, No.743, pp.1857-1864, 2008.
- (3) Gerard J. Tortora・Bryan Derrickson：トートラ人体解剖生理学；丸善株式会社, pp.117-124, 2007.

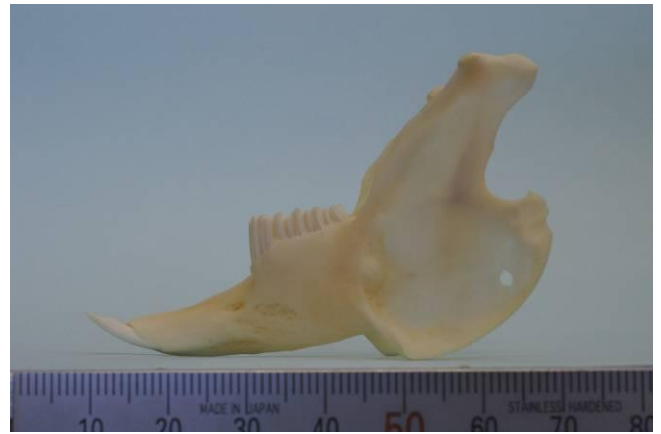
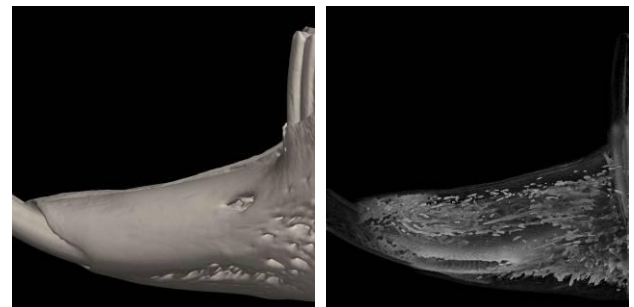
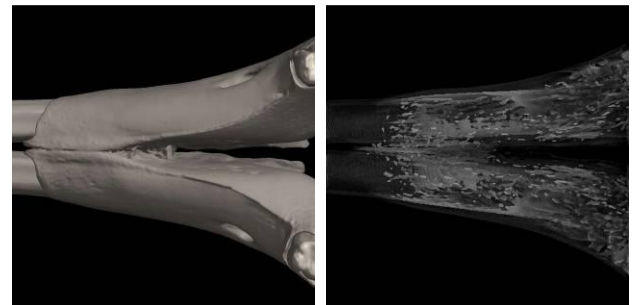


Fig.3 A lower jaw bone of a rabbit.



(a) Incisor region.



(b) Molar region.

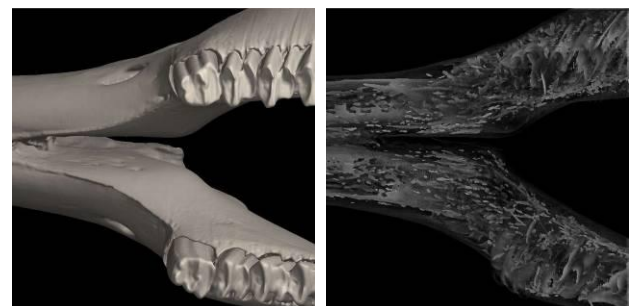
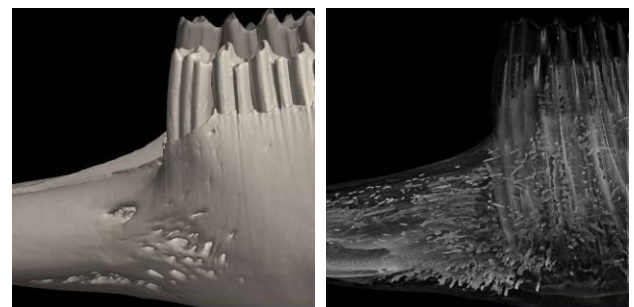


Fig.4 Extracted structural anisotropic information.