

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 24 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23500514

研究課題名(和文) 骨梁構造の力学的異方性を考慮した骨体の患者別小規模モデルの構築

研究課題名(英文) Individual Stress Analysis of Bone Tissue using Small Scale FE Model with Anisotropic Material Properties

研究代表者

小関 道彦 (KOSEKI, Michihiko)

信州大学・繊維学部・准教授

研究者番号：50334503

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：X線CT画像に基づく患者別有限要素解析の解析結果の信頼性を高めることを目的として、骨の構造異方性を考慮した解析技術について検討を行った。CT画像から緻密骨内部の微小管構造を抽出し、これを数値化するアルゴリズムを提案した。本アルゴリズムは、異方性情報の抽出に加え、CT画像の信頼性を低下させるパーシャルボリューム効果を低減することが可能である。数値化した異方性情報を有限要素モデルに設定した応力解析を実施し、異方性情報を考慮することの重要性を示した。

研究成果の概要(英文)：Patient-specific simulation with Finite Element (FE) method is a significant technique to examine biomechanical characteristics of bones. In order to improve the analytical performance, we have studied an individual FE analysis method with a consideration of structural anisotropy of bone tissue. Firstly we extract the structural anisotropy of cortical bone from microfocus X-ray CT images. The extracted image clearly illustrates Haversian and Volkmann's canals that causes the structural anisotropy of the cortical bones. Next we compute anisotropy factors based on the images. The factors indicate three dimensional stiffness distributions. Finally we perform FE analyses using the anisotropic material properties based on the factors. The analytical results suggest the importance of the material anisotropy in stress analyses of bone tissue.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：人間医工学・医用生体工学・生体材料学

キーワード：バイオメカニクス 個体別モデリング X線CT 異方性材料

1. 研究開始当初の背景

生体組織の力学的特性を知るためには、細胞・組織・器官・個体のマルチスケールでの検討を行い、その上で相互の関係を調べることが重要となる。本研究で扱う骨体の場合には、力学負荷を支えるための重要な要素として、マクロスケールでの骨格全体あるいは単一骨の形態と、ミクロスケールでの骨単位の結合構造の両方を十分に考慮することが必要となる。

これまでに、スケールごとに X 線 CT 画像に基づく有限要素モデルを用いた検討が進められている。それらの検討では、解析的手法だけでなく実験的な検討も並行して進められており、各スケールでの力学的挙動に関する知見が蓄積され、解析の信頼性は日々向上している。特に、整形外科や歯科治療の現場からは骨全体のスケールでの力学状態を患者別に解析することが求められており、申請者を含む多くの研究者によって成果が挙がっている。

しかしながら、各スケールの相互関係についての検討が不十分であった。すなわち、骨全体の形態に関するマクロスケールの解析において、ミクロスケールの骨単位をモデル化するためには計算量が膨大になるなどの問題があり、マルチスケールを考慮したモデリングでは解決が求められていた。

2. 研究の目的

上記に述べた背景と課題を踏まえ、本研究では下記二点の研究目的を設定した。

第一の研究目的：骨体の力学的異方性の情報を、三次元医用画像から抽出するアルゴリズムを構築すること。特に、マイクロフォーカス X 線 CT を用いて骨体の標準的な異方性マップを構築し、医療用 CT からの情報と統合することにより患者ごとの構造異方性に関する正確な情報を抽出すること。

第二の研究目的：力学的異方性を考慮した小規模患者別モデリングを実施し、等方性材料を設定した従来モデルよりも信頼性の高い応力解析を実施すること。

3. 研究の方法

生物の骨は一般に、外層は緻密骨、内部は海綿骨と呼ばれる組織で構成されている。緻密骨中には栄養血管が通っているハヴァース管が長軸方向に、それと直交する方向にフォルクマン管が存在する。ハヴァース管は骨単位の包まれており、このパイプ構造が曲げに対する強さを生み出している。また、ハヴァース管およびフォルクマン管は外力に対して応力集中を最小にする方向に形成されていると考えられている。

本研究では、特に緻密骨に注目して検討を実施した。まず、マイクロフォーカス X 線 CT 画像から異方性情報を可視化する手法について検討を行った。その際、パーシャルボリューム効果と呼ばれる X 線 CT 画像の信頼

性を低下させる現象についても改善を試みた。次に、抽出された異方性情報を数値化する方法について検討を行った。最後に、数値化された異方性情報を設定した解析モデルを用いた力学解析を実施し、その有用性について検討を行った。

なお、本研究では効率的な研究進捗を図るため、理想的な CT 画像として数値ファントムを作成し、これを用いた検討により異方性の抽出および数値化のアルゴリズムを構築する。その後、実際の X 線 CT データに適用し、その有用性の検証を行った。

4. 研究成果

(1) 異方性情報の可視化

まず、鶏橈骨をマイクロフォーカス X 線 CT 装置で撮影した。今回使用した CT 画像の空間分解能は約 $11\mu\text{m}/\text{pixel}$ となっている。ここで、X 線 CT 画像の各画素には撮影対象物の物性を反映した CT 値と呼ばれる値が格納されている。微小管が周囲の骨組織に比べて低い CT 値を有すると予想し、CT 値が低い画素だけを抜き出して画像化したものを図 1 に示す。

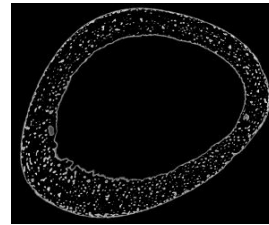


図 1 鶏橈骨の異方性情報抽出結果

結果では、多数の微小領域が抽出されており、これらが緻密骨内部の微小管構造を表していると考えられることから、今回の実験に用いる CT 画像は緻密骨内の微小管構造を表現可能な空間分解能を有することが示された。以降の検討では、生体骨の異方性を示す主な要因として栄養血管などの微小管構造を考え、X 線 CT 画像に基づいてその情報を物性値として設定することとする。

しかし、図 1 を詳しく観察すると、骨表面（輪郭）も抽出されてしまっている。これは、パーシャルボリューム効果と呼ばれる、物質境界面で CT 値が不正になる現象によるものであり、この結果は、骨表面の CT 値が本来あるべき値よりも低くなっていることを示している。

(2) 数値ファントムによるアルゴリズム構築

実際の骨組織を用いた検討では個体差による影響を無視できないため、微小管構造を有する緻密骨を模擬した数値ファントムを作成した。この数値ファントムに対し、図 1 と同様の手順で抽出した異方性情報を図 2 に示す。この数値ファントムはパーシャルボリューム効果をも再現しており、骨の場合と同様に物体表面も輪郭状に抽出されていることがわかる。

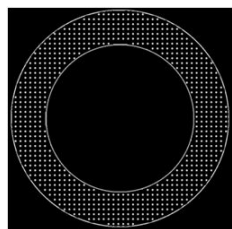


図2 数値ファントムの異方性情報抽出結果

そして、連続する断層画像に対して抽出処理を繰り返し適用し、それを積層することによって抽出領域の立体形状を求める。抽出領域の体積を個々に算出したところ、微小管構造に対して物体表面の体積が大幅に大きく算出されることが分かった。そこで、抽出された組織の体積が大幅に大きな組織を無効化したところ、パーシャルボリューム効果を削減することに成功した。

本手法を図1のCT画像に適用し、900枚の抽出画像を積層して構築した三次元像を図3に示す。得られる画像では輪郭は抽出されておらず、内部構造だけを表示している。そしてこの構造は、緻密骨内部の微小管構造の特徴とよく合致していることがわかる。以上のことから、提案する手法により、X線CT画像から骨内部の微小管構造によって構成される異方性情報を正しく抽出することに成功した。

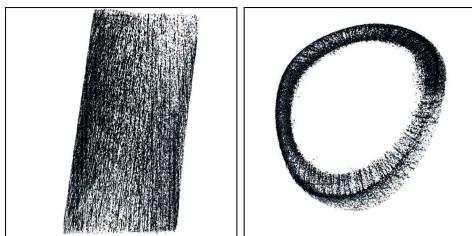


図3 三次元的に抽出された異方性情報

(3) 異方性情報の数値化

抽出された異方性情報を解析モデルに設定するためには数値化が必要となる。本研究では、X線CT画像から抽出した異方性情報を数値化する方法として、式(1)を提案した。

$$A_v = \sum_{i=1}^n i^2 N \quad (1)$$

ここでは、注目するボクセルの周囲 $n \times n \times n$ の領域において、 x 、 y 、 z それぞれの方向に対し i 個のボクセルが N 組連続しているとき、異方性の強さを表す数値 A_v が算出される。本式では、連続ボクセル数 i が大きいほど方向値が大きくなるように重み付けを行っている。これは、長いパイプ状構造はその長手方向に強く、短いパイプ状構造が複数あっても強度が高くないことを意図してモデル化したものである。

数値ファントムに対して、提案手法に基づいて異方性情報を数値化した三次元モデルを図4に示す。いずれのモデルも円管長軸方

向 (z 方向) に高い数値が表れており、これは数値ファントムに設定したハヴァース管に由来する異方性を正しく数値化できていることを示している。 x 方向および y 方向に注目すると、Model A ではパーシャルボリューム効果によって不適切な数値が表面に表れている。それに対し、本研究が提案する手法を用いた Model B では、パーシャルボリューム効果を含まない画像から数値化した Model C と同様の値となっており、パーシャルボリューム効果の影響を適切に低減できていることがわかる。

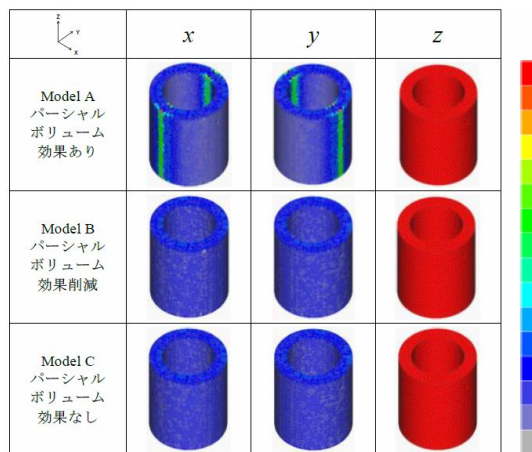


図4 異方性情報の数値化 (数値ファントム)

同様に、鶏撓骨の場合にも図5に示すようにX線CT画像に基づいて異方性情報を三次元的に数値化することができた。数値ファントムの場合だけでなく実際の実験データに対しても、パーシャルボリューム効果の影響を適切に低減できていることがわかる。

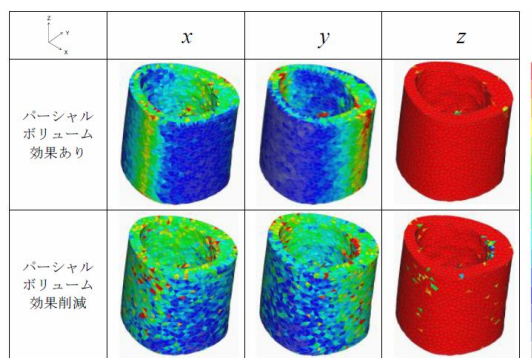


図5 異方性情報の数値化 (鶏撓骨)

(4) 異方性情報を考慮した応力解析

算出された異方性情報を物性値に変換し、有限要素モデルに設定して応力状態の解析を実施した。本研究では、解析モデルに設定する材料物性のうち縦弾性係数のみに異方性情報が影響すると仮定し、これをX線CT画像に基づいて構築した有限要素モデルに設定して解析を実施した。解析により得られた相当応力分布を図6に示す。

応力分布には、等方性モデルと異方性モデルとの間に大きな差が見られる。それに比べ、

パーシャルポリューム効果の有無はそれほど解析結果には影響していないようである。これは、骨の材料物性の不均質性によるものとも考えることもできるが、異方性情報から材料物性に交換する方法に、さらに検討の余地が残されている可能性を示唆している。

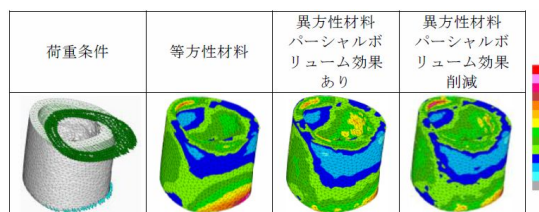


図6 異方性を考慮した個体別応力解析結果

(5) 異方性構造を有する海綿骨状試験片の試作

ここまでの研究では、緻密骨の微小管構造に注目し、実際の骨および数値ファントムを対象として検討を行っていた。緻密骨の場合、その異方性の個体差はそれほど大きくないと予想され、また、人工的な模擬骨も比較的容易に作成することができる。しかし、提案手法を海綿骨に適用することを考えると、その信頼性検証のためには明確な方向性を有する試験片が必要となる。しかし、現在市販されている海綿骨試験片は、そのポラス構造に有意な異方性がない。そこで、異方性を有する海綿骨状試験片の製作を試みた。

実際の海綿骨の骨梁構造のような異方性を有した模擬海綿骨を作成する方法として、発泡樹脂の硬化過程において振動刺激を与えることにより空孔の形状および分布に異方性を設けることを試みた。具体的には、円柱状の成形容器に対し、四方から様々な周波数で振動刺激を与えている。

作成の結果、ある特定の周波数での刺激に対し、生成される多孔質構造には明らかな方向性（円柱長軸方向）を観察することができた。まだ異方性の細かい制御には至っていないが、新しい模擬骨生成手段として期待される。

(6) 結論

本研究では、骨体の個体別応力解析において異方性の考慮を実現したことに加え、付随成果としてパーシャルポリューム効果の影響低減を実現した。また、骨種別の適用範囲を広げ、新しい模擬骨生成手段を提案することができた。信頼性の検証が不十分であるなどまだ解決すべき課題が残されてはいるが、以上のことから、骨組織の解析精度向上について、おおむね当初目的を達成できたと考えられる。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔学会発表〕（計5件）

長谷川琢也, 小関道彦: 骨組織の構造異

方性を考慮した個体別有限要素解析; 日本機械学会 北陸信越支部第 51 期総会・講演会, 2014 年 3 月 8 日, 富山県.
Michihiko KOSEKI, Takuya HASEGAWA: Individual Stress Analysis of Bone Tissue using Small Scale FE Model with Anisotropic Material Properties; The 15th International Conference on Biomedical Engineering, 6th Dec. 2013, Singapore.

長谷川琢也, 小関道彦: 骨組織の構造異方性を考慮した個体別有限要素解析; 日本機械学会 北陸信越支部第 50 期総会・講演会, 2013 年 3 月 9 日, 福井県.

小関道彦, 宮下智弥: X線CT画像に基づく骨組織の異方性情報抽出と個体別有限要素解析; 日本機械学会 2012 年度年次大会, 2012 年 9 月 9 日, 石川県.

小関道彦, 宮下智弥: 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); 日本機械学会 第 24 回バイオエンジニアリング部門講演会講, 2012 年 1 月 7 日, 大阪府.

〔その他〕

ホームページ等

<http://fiber.shinshu-u.ac.jp/koseki/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小関 道彦 (KOSEKI Michihiko)

信州大学・繊維学部・准教授

研究者番号：50334503