

学位論文題名

Microscopic Deformation and Structural Anisotropy in Bovine Cortical Bone

(牛皮質骨の微視的変形特性と構造異方性に関する研究)

学位論文内容の要旨

生体骨には血管走行や神経走行のための foramen(栄養孔) が多数存在する。これら foramen は皮質骨表面に円孔を示す。過度の負荷時においても foramen 周囲は骨折の起点とはならないことが知られている。この周囲の骨組織はマルチスケールにわたる階層構造により、局所的に高い強度と剛性を示し、円孔周囲の集中応力を十分に支持している。また、骨組織はミネラル成分(アパタイト)とコラーゲン線維の微視的複合構造である。骨組織内アパタイト構造は結晶配向性を有し、それが骨強度の異方性を示す。

本研究ではこれら皮質骨の微視的変形特性と構造異方性および骨組織の変形メカニズムを明らかにするため、骨組織内アパタイトの結晶構造と配向分布と負荷外力との関係を検討した。これらの測定には、X線二次元検出器(イメージングプレート)を利用し、骨組織測定手法を開発した。そして、負荷時のアパタイト結晶のひずみや、骨組織中の残留ひずみ、配向特性を求めた。これらナノレベルの変形パラメータと骨組織の巨視的な変形特性の関連を検討した。

本論文は以下の全9章で構成されている。

第1章は、序論である。本研究の背景と目的について述べた。

第2章では、骨組織の力学的・構造的特性について解説した。

第3章では、X線回折現象の基礎、結晶配向性、ひずみ計算手法について説明した。また、本研究で使用した実験装置や周辺機器の詳細、および試験片の作製法について記載した。

第4章では、foramen 周辺組織のアパタイト結晶の配向と分布、結晶ひずみについて調べた。顕微鏡観察により孔周辺の組織的な強化構造を有し、孔周辺のアパタイト結晶は孔周方向に沿って配向していることが確認された。また、負荷時における孔近傍のアパタイト結晶ひずみは遠位部に比べ非常に大きいことがわかった。

第5章では、foramen 周辺組織内のアパタイト結晶の配向特性を、配向方位と配向量から評価した。結晶の特定格子面((002)面)からの回折X線に注目し、各方位に対する強度分布から任意角への配向量(配向度)を計算した。また、foramen 周辺組織のアパタイト結晶の残留ひずみを測定した。残留ひずみは結晶配向度高い部位で大きい傾向を示した。

第6章では、皮質骨の異方性変形特性と微視構造の関係を明らかにした。配向量の異なる複数の引張試験片を作製し、負荷中のアパタイト結晶のひずみと配向量の関係を調べた。本測定結果から、巨視的な骨組織の構造異方性がアパタイト結晶の配向量と変形量に依存することが解った。

第7章では、負荷前後でのアパタイト結晶の配向と結晶ひずみについて記述した。繰り返し負荷

時の結晶配向度の変化と、各負荷に対する結晶ひずみ量の変化を測定した。再負荷時の配向度と結晶ひずみは初期負荷の影響を受け、異なる値を示した。本結果は骨組織内微視構造の負荷応答と、構造最適化機能の解明に重要な情報を与えることが期待できる。

第 8 章では、低結晶性を示す骨組織内アパタイトでは、明瞭な回折 X 線パターンを得られないことが多い。このような場合でも高精度にひずみを測定するため、本研究では、低強度の回折画像からでも高精度にひずみを計算する手法を提案した。本手法を従来のひずみ計算手法と比較することで、ひずみ測定精度の向上を確認した。

第 9 章では、本研究の総括として、本解析手法の有効性と、測定結果の妥当性、適用範囲を議論した。

本研究では骨組織の微視構造特性を評価し、X 線回折法を用いてアパタイト結晶のひずみと配向性を詳細に明らかにした。また、生体骨に存在する foramen 周辺や異方性弾性を示す皮質骨領域の変形特性をアパタイト結晶の局所的な結晶特性により定量化した。これらの結果から、異方性を有する骨構造各部において、ナノレベルの構造特性が、骨組織の異方性構造や変形に寄与していることが解った。本手法を用いれば、骨折を誘発する初期クラックの発生や伝播に寄与する局所的な変形をアパタイト結晶の配向度の変化や結晶ひずみによって定量的に測定することができる。X 線回折法を応用とした本解析手法は、非破壊、無侵襲生体計測法として、臨床における骨折や骨粗しょう症などの骨疾患診断に有効な手段となる可能性を示した。

学位論文審査の要旨

主査 教授 但野 茂
副査 教授 成田 吉弘
副査 教授 中村 孝
副査 教授 佐々木 直樹 (理学研究院)

学位論文題名

Microscopic Deformation and Structural Anisotropy in Bovine Cortical Bone

(牛皮質骨の微視的変形特性と構造異方性に関する研究)

生体骨には血管走行や神経走行のための foramen(栄養孔)が多数存在する。これら foramen は皮質骨表面に円孔を示す。過度の負荷時においても foramen 周囲は骨折の起点とはならないことが知られている。この周囲の骨組織はマルチスケールにわたる階層構造により、局所的に高い強度と剛性を示し、円孔周囲の集中応力を十分に支持している。また、骨組織はミネラル成分(アパタイト)とコラーゲン繊維の微視的複合構造である。骨組織内アパタイト構造は結晶配向性を有し、それが骨強度の異方性を示す。本論文では、これら皮質骨の微視的変形特性と構造異方性および骨組織の変形メカニズムを明らかにするため、骨組織内アパタイトの結晶構造と配向分布と負荷外力との関係を検討している。これらの測定には、X線二次元検出器(イメージングプレート)を利用し、独自の骨組織測定手法を開発している。そして、負荷時のアパタイト結晶のひずみ、骨組織中の残留ひずみや結晶配向特性を求め、これらナノレベルの変形パラメータと骨組織の巨視的な変形特性の関連を検討している。

まず、foramen 周辺組織のアパタイト結晶の配向と分布、結晶ひずみについて調べている。顕微鏡観察により孔周辺の組織的な強化構造を有し、孔周辺のアパタイト結晶は孔周方向に沿って配向していることが確認している。また、負荷時における孔近傍のアパタイト結晶ひずみは遠位部に比べ非常に大きいことを確認している。次に、foramen 周辺組織内のアパタイト結晶の配向特性を配向方位と配向量から評価している。結晶の特定格子面((002)面)からの回折X線に注目し、各方位に対する強度分布から任意角への配向量(配向度)を計算している。また、foramen 周辺組織のアパタイト結晶の残留ひずみを測定し、残留ひずみは結晶配向度高い部位で大きい傾向を示すことを確認している。皮質骨の異方性変形特性と微視構造の関係を明らかにするため、配向量の異なる複数の引張試験片を作製し、負荷中のアパタイト結晶のひずみと配向量の関係を調べている。本測定結果から、巨視的な骨組織の構造異方性がアパタイト結晶の配向量と変形量に依存することを示している。さらに、負荷前後でのアパタイト結晶の配向と結晶ひずみについて記述している。繰返し負荷時の結晶配向度の変化と各負荷に対する結晶ひずみ量の変化を測定している。再負荷時の配向度と結晶ひずみは初期負荷の影響を受けることを示している。本結果は骨組織内微視構造の負荷応答

と、構造最適化機能の解明に重要な情報を与えることが期待できる。低結晶性を示す骨組織内アパタイトでは、明瞭な回折 X 線パターンを得られないことが多い。このような場合でも高精度にひずみを測定するため低強度の回折画像からでも高精度にひずみを計算する手法を提案している。本手法を従来のひずみ計算手法と比較することで、ひずみ測定精度の向上を確認している。

これを要するに、著者は、骨組織の微視構造特性を評価し、X 線回折法を用いてアパタイト結晶のひずみと配向性を詳細に明らかにし、生体骨に存在する foramen 周辺や異方性弾性を示す皮質骨領域の変形特性をアパタイト結晶の局所的な結晶特性により定量化したものであり、これらの成果は、医療福祉工学や人間機械システムデザイン学の発展に寄与するところ大である。よって、著者は北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格があるものと認める。