

101 海綿骨骨梁構造三次元再構築の試み

Three-Dimensional Reconstruction of Trabecular Structure

○ 学 斉藤 暁 (新潟大院) 学 伊藤 学 (新潟大院)
正 原 利昭 (新潟大工) 谷澤龍彦 (新潟大医)
高橋栄明 (新潟大医) 荒井良重 (新潟大医)

Satoru SAITO, Manabu ITO, Graduate School of Engineering, Niigata University, 8050, Ikarashi 2-nocho, Niigata
Toshiaki HARA, Department of Mechanical Engineering, Niigata University
Tatuhiko TANIZAWA, Hideaki TAKAHASHI and Yoshishige ARAI, School of Medicine, Niigata University

KeyWords: Biomechanics, Structural Analysis, Nondestructive Inspection, Trabecular Bone, Mean Intercept Length, pQCT

1. 緒言

海綿骨は皮質骨から伝達される荷重を分散し、支持する役割を担う。このような機能を維持・構成それを構成する骨梁構造は方向性を有するために骨密度のみを用いて骨の力学的特性を推定することは不十分である。このような特性を正確に推定するためには骨梁構造も併せて評価する必要がある。骨組織形態計測においては、従来より骨梁数、骨梁幅といった指標が用いられている⁽¹⁾。しかしこれらの指標は骨梁構造を2次元的なものとして取り扱っているために3次元的な性質を評価する上で十分とは言えない。これを解決するためには構造を3次元的に取扱い、評価する必要がある。

骨梁構造を3次元的に観察するため連続断面再構築法⁽²⁾やマイクロCTを使い非破壊的に撮影し再構築する方法⁽³⁾が従来から多用されている。

一方、peripheral Quantitative Computed Tomography (以下pQCT)はDEXA, QCTの抱える問題点を改善するため、すなわちX線被曝量の減少と、非破壊的に試料の断面情報を得るために開発された装置であり、操作性と安全性から3次元的な骨評価の有力な手法として期待されている。この装置は測定対象が皮質骨や海綿骨の平均密度といった比較的大きな評価量であり、適用可能性において未知の部分が多いようであるがいくつかの研究例は見受けられる⁽⁴⁾。しかし、海綿骨の骨梁のような微小構造を対象とした研究例は未だ見受けられない。

そこで本研究では、pQCTを用いて海綿骨骨梁構造を非破壊的に測定し、3次元骨梁構造モデルをコンピュータ上に再構築した。更に、そのモデルの構造解析を行って構造指標を求め、併せて力学試験の結果と構造指標とを比較してその有効性を検討した。

2. 試料および方法

2.1 試験片

試験片は新鮮ウシ大腿骨遠位部の海綿骨より採取し、一辺8mmの立方体に加工した。このとき試験片の各面は前後方向(A-P方向)、内外側方向(M-L方向)、遠近位方向(P-D方向)に垂直となるよう加工に留意した。試験片は加工から実験まで生理食塩水により常に湿潤状態を保った。

また力学試験終了後、pQCTから得られるデータを明瞭化させるために測定対象外である骨髄をエアガンおよび超音波洗浄機により除去した。

2.2 力学試験

海綿骨試験片の力学的特性に及ぼす保存の影響や、pQCT

撮影の際に生じる乾燥による影響を避けるために力学試験を先に行った。

力学試験はインストロン型万能試験機(島津製作所製, SHIMADZU AUTOGRAPH AG-25)を用いてひずみ速度 $0.1\%/\text{sec}^{-1}$ の準静的非破壊圧縮試験を行い試験片変位は伸び計(SG-25-10)により、荷重はロードセル(cap.5Kg)により測定した。測定はプレコンディショニングを行いヒステリシスの影響を取り除いた後、応力が0.6MPaになるまで圧縮を行いそのとき得られた荷重-変位曲線より弾性率を求めた。測定は一つの試験片に対してについて前述のA-P, M-L, P-Dの3方向について行った。

2.3 3次元再構築

測定に使用したpQCT(Norland-stratec社製, XCT-960)から得られるデータは1スライスの厚さ2.5mm、一つの要素の大きさは $0.145 \times 0.145\text{mm}$ 、要素数 128×128 個、測定範囲は直径18.56mmの円形である。

測定は図1に示すように1スライス(A-P-M-L平面)であり、それをP-D方向に複数枚連続的に撮影して重ね合わせるにより3次元モデルを再構築する。再構築を行うにあたり、まずpQCTより得られたデータをコンピュータ(FUJIX製, SPARC Station IPX)に読み込む。このとき座標軸を設定しx軸をA-P方向、y軸をM-L方向、z軸をP-D方向とした。

pQCTより得られたデータはノイズを多く含んでいたためフィルタをかけノイズを除去した後、二値化処理を行った。試験片を乗せたアクリル樹脂製のテーブルが含まれていると構造解析の際、テーブルも含めて解析してしまうためこの段階で取り除いた。

スライス数、すなわちz方向の要素数がx, y要素数に対

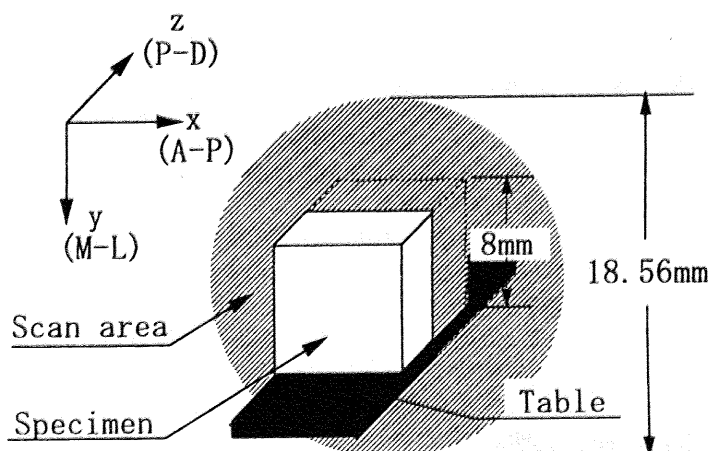


Fig.1 Axis Definition

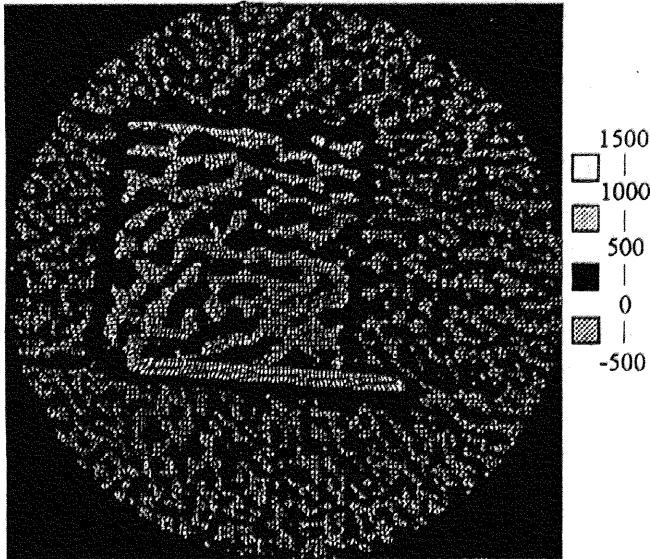


Fig.2 pQCT Data

して少ないために x, y 方向の要素サイズに対して z 方向の要素サイズが大きくなる。このままでは構造解析の際に不都合が生じるので、x, y 方向の要素サイズと等しくなるよう z 方向のデータを調整した。

2.4 構造解析

構造解析の指標として Mean Intercept Length (以下 MIL) を用いた。これは任意の測定面に対してある角度の傾きを持つ直線が横切った骨梁の平均長さを表している。極座標系においてこの値を半径に、測定した直線の傾きを角度としてプロットすると MIL は楕円体の表面に近似でき、これを MIL 楕円体という。2次元の場合、楕円体は楕円形となり直線の傾きは θ のみで決定できるため以下の式で表すことができる⁽⁵⁾。

$$\frac{1}{L^2(\theta)} = M_{11} \cos^2 \theta + M_{22} \sin^2 \theta + M_{12} \sin \theta \cos \theta$$

ここで $L(\theta)$ は MIL 測定値、 M_{11} 、 M_{22} 、 M_{12} は MIL テンソルの成分である。MIL テンソルは二階の対称テンソルでありこの指標を用いることにより骨梁構造の主な配向方向がテンソルの主軸の方向として求められる。

3次元に再構築したモデルに対し自作のプログラムを使い MIL を得た後、それらの値を最小二乗法により前出の楕円の式に近似させて MIL 楕円形を求めた。

3. 結果および考察

図2はpQCTから得られた1スライス分のデータをグラフにして示したものである。図において各要素はX線吸収量に従って濃淡をつけて表してある。ノイズにより測定範囲の円が明らかになり、試験片直下にテーブルが認められる。

このデータに対して前述の画像処理を行ったものが図3である。この図より得られる MIL は図4の黒点であり、MIL 楕円形が同図の実線である。

図5は x-y 平面、y-z 平面、z-x 平面についてそれぞれのスライスで得られた MIL を平均したものを黒点で表し、MIL 楕円形を実線で表したものである。y-z 平面、z-x 平面の平均 MIL において z 方向に著しく大きい MIL が認められるが、これは z 方向の要素サイズを調整したことによると思われる。これを解決するためには z 方向要素数すなわちスライス数を x, y 方向要素数と等しくする必要があると考えられる。

力学試験から得られた3軸方向の弾性率を表1に示す。こ

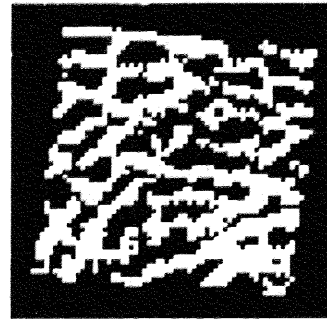


Fig.3 Cross Section Image

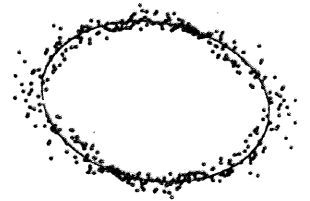


Fig.4 MIL and Fabric Ellipse

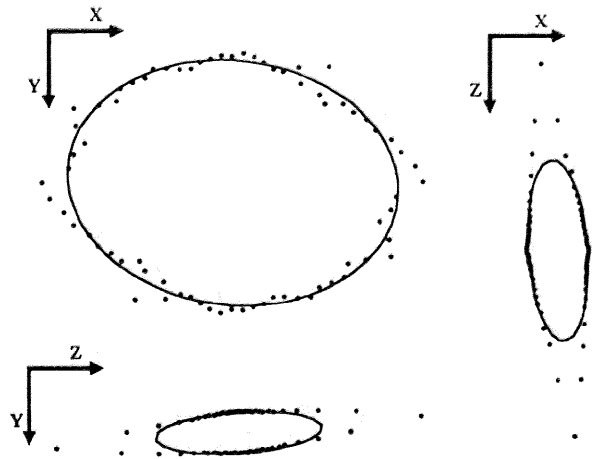


Fig.5 MIL Ellipses

Table 1. Elastic Modulus

Direction	A-P (X-axis)	M-L (Y-axis)	P-D (Z-axis)
Modulus [MPa]	286.34	150.52	431.43

のように楕円の長軸方向と弾性率の高い方向が一致することが確認できる。

従って MIL 楕円形、もしくは3次元に拡張した MIL 楕円体は骨梁構造を表す指標の一つとして有効なものであることが確認できた。

4. 結言

pQCT を用い微小構造である骨梁構造を測定し得られたデータより3次元モデルを再構築した。このモデルより MIL を用いた構造解析を行い得られた結果は力学試験からの結果と定性的に一致した。従って pQCT を用いた骨梁構造解析の有効性が確認できた。

参考文献

- (1) 内山ら 他2名., 日骨形態誌,4,83-89,(1994)
- (2) 例えば, Dalstra.M., et al., J.Biomech,26(4/5), 523-535,(1993)
- (3) 例えば, Rietbergen.B., et al., J.Biomech,28(1), 69-81,(1995)
- (4) 例えば, Melton.L.J., et al., Journal of Bone and Mineral Research,8,1227-1233,(1993)
- (5) Harrigan.T.P., Mann.R.W., J.Mater.Sci.,19,761-767,(1984)