

1 緒 言

骨は、構造要素そのものが構造を有する階層構造をしている¹⁾。そのため、骨の特性を知るためには骨の各スケールにおける特性、各スケールの特性の関係を調べることが重要となる。海綿骨は骨梁と呼ばれる梁、板状の要素により網目状構造をしており、配向性や多孔性を有している。また骨梁自身も骨構造単位に起因する層構造を持ち、その層の厚さは3~7 μm である。海綿骨の形態と力学特性の関係についてはよく知られた関係²⁾があるのに対し、骨梁の力学特性に関する知見は海綿骨に比べ限られている。また海綿骨特性と骨梁特性の関係に関する知見はほとんどない。また、骨梁の幅は200 μm ~1mmである。一般によく用いられている力学試験に圧縮試験や引張り試験があるが、これらの試験は試験片が微小であるときは実施が困難である。それに対し、微小硬さ試験は試験片が微小であっても行うことができるので、骨梁の力学特性を調べるには有効な手段であるといえる。そこで本研究では、硬さ試験を中心に海綿骨、骨梁に力学試験を行い、骨梁力学特性と骨梁構造の関係、骨梁物性と海綿骨構造特性の関係について調べ、海綿骨と骨梁の力学特性の相関について検討する。

2 方 法

2.1 骨梁力学特性と骨梁構造の関係 本研究では試料にウシ大腿骨を用いた。まず、座標軸を大腿骨前方方向をx軸、体幹軸方向をz軸とする右手系の座標軸で定義した。試料作成手順は、まず大腿骨の骨頭部と骨幹部を離断し、骨頭部を矢状面で二分した。次に、バンドソウを用いて各軸方向に沿う一辺が約10mmの海綿骨立方体試料を切り出した。切り出した試料は、ダイヤモンドカッター (South Bay Technology, Inc, SBT650) を用いて形状を整えた。続いて各端面をダイヤモンドカッターを用いて約1mm程度スライスし、そこからメスを用いて各軸方向配向している骨梁を1本ずつ切り出した。切り出した骨梁は石膏ベッドに固定した (Fig.1)。なお、試料を石膏で固定する前後で、試料の硬さの値に変化がないことは、皮質骨を用いて確認した。

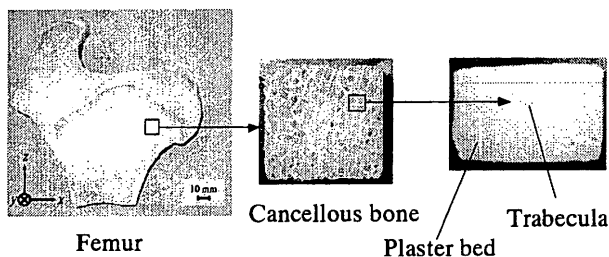


Fig.1 Specimen from bovine femur

また、骨梁硬さの計測にはピッカース硬さ試験を行い、骨梁の径方向深さの異なる面における硬さの変化を調べた。試験には微小硬度計 (島津製作所, HMV-1) を用い (Fig.2), 予備実験より試験荷重を10g, 荷重保持時間を10sと決定した。骨梁の試験面は耐水研磨紙 (#600, #1200) 及び研磨剤 (FUJIMI, METAPOLISH) で仕上げた。硬さは各試料につき長手方向に5点計測し、その平均を骨梁の硬さとした。また、試験面は径方向深さの異なる3面とした。まず骨梁表面を研磨した面を First layer と定義した。そこから滑走式マイクロトーム (サクラ精機, Ivs-410) を用いて、約12 μm ずつ削った面をそれぞれ Second layer, Third layer と定義した。

2.2 骨梁物性と海綿骨構造特性の関係 骨梁の配向方向を調べるために、まず海綿骨立方体試料の断層画像撮影を μX 線CT (日鉄エレックス, NX-HCP-C80-I) を用いて行った。断層撮影はxy平面で行い (1024 \times 1024), z軸方向に150枚スキャンした。撮った画像を骨梁部分と骨髄部分に二値化し、このデータを基に三次元的に平均切片長を求めた。この平均切片長の値をファブリック楕円体に近似し、主軸の方向余弦と主値を算出した。

また、海綿骨の力学特性を調べるために、海綿骨立方体試料の圧縮試験を力学試験機 (島津製作所, EZTest-100N) を用いて行い、x, y, z軸方向の弾性率を計測した。なお、最大荷重は40N, ひずみ速度は3mm/minとした。試験はx, y, zの各軸方向に10サイクル行い、その平均を海綿骨の弾性率と

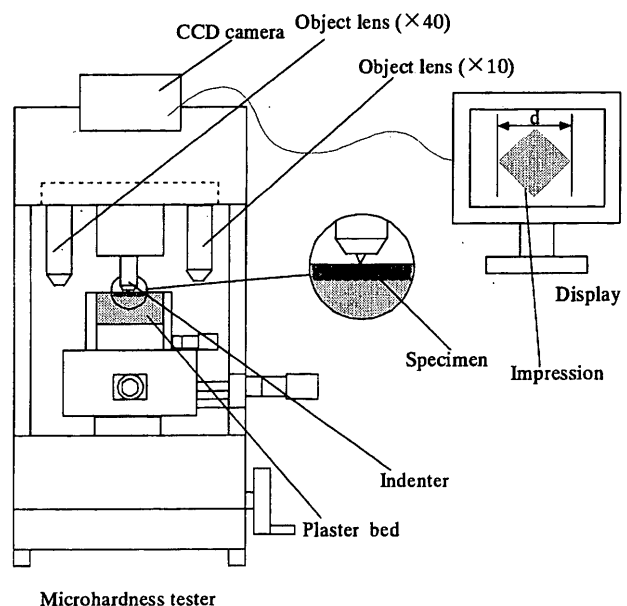


Fig.2 Micro Vickers hardness test

し、各軸方向の海綿骨弾性率の比較を行った。

また、骨梁の硬さを計測する試験面は、先ほど定義した First layer のみとした。他の試験条件は 2.1.2 と同じであり、各軸方向に配向した骨梁の硬さの比較を行った。

3 結果と考察

3.1 骨梁力学特性と骨梁構造の関係 骨梁の径方向深さの異なる面における硬さを Fig.3 に示す。x, y, z 軸方向のいずれに配向している骨梁においても深さの差異による硬さに有意な差はみられなかった。このことより、骨梁の硬さは骨梁の径方向深さによって変化しないと推察される。また、今回の実験において、試験面の間隔は約 12 μm であるのに対し、骨梁の層の厚さは 3~7 μm であるので、骨梁内の異なる層における硬さ試験を行っていることになる。それゆえ、骨梁の異なる層における硬さに差はないものと推察される。

3.2 骨梁物性と海綿骨構造特性の関係 骨梁硬さ・配向性と海綿骨構造特性の関係について示す。Fig.4(a)にファブリック楕円体の主軸 1, 2, 3 軸の座標軸についての方向余弦を示す。それぞれの方向余弦の値が 1, 又はほぼ 1 に近い値をとっていることから、主軸 1, 2, 3 軸と座標軸 x, y, z 軸の方向はそれぞれ一致していることになる。また、Fig.4(b)に海綿骨立方体試料の各主軸方向におけるファブリック楕円体の主値を示す。1 軸方向の主値は 2, 3 軸の主値に比べて有意に低い値をとった。このことから、骨梁は 2, 3 軸方向、すなわち y, z 軸方向に長く配向していることがわかる。また、Fig.5 に骨梁の配向方向と骨梁の硬さの関係を示す。x 軸に配向する骨梁の硬さに比べ、y, z 軸に配向する骨梁の硬さが有意に高い値をとった。このことから、y, z 軸配向の骨梁が硬いことがわかる。そのため、骨梁の硬さは骨梁の配向方向により異なることになる。また、Fig.6(a)に各軸方向の海綿骨弾性率を示す。x 軸方向の海綿骨弾性率に比べ、z 軸方向の海綿骨弾性率が有意に高い値をとった。このことから、海綿骨の弾性率は x 軸方向で低く、z 軸方向で高くなることがわかる。また、Fig.6(b)に示すように骨梁の配向方向と骨梁弾性率は x 軸配向の骨梁で低く、z 軸配向の骨梁で高い値を取ることを報告している³⁾。これらの結果を統合すると、海綿骨の力学的異方性には骨梁の配向方向、骨梁弾性率、骨梁硬さの三者が相互

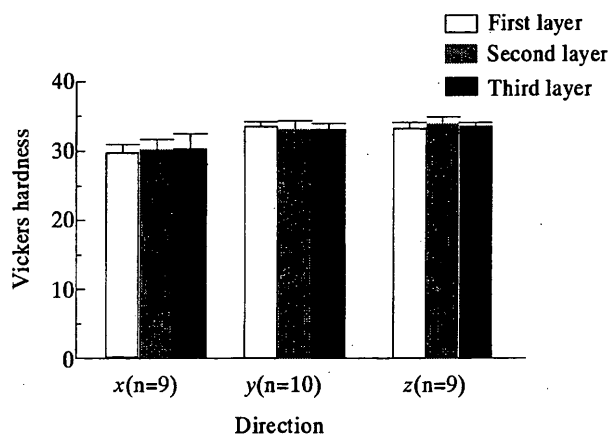


Fig.3 Vickers hardness in different layer in trabecula

に関係していることが推察された。

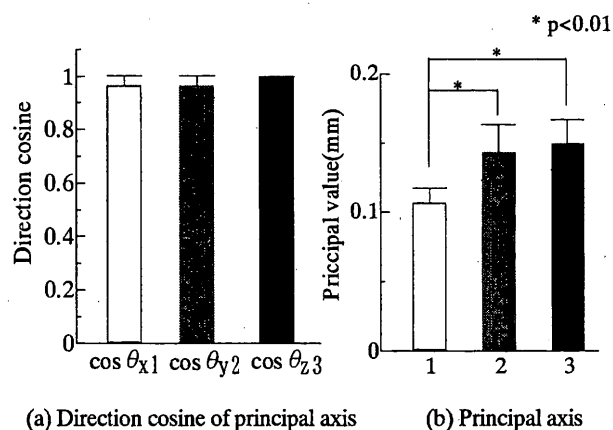


Fig.4 Fabric ellipsoidal analysis (n=10)

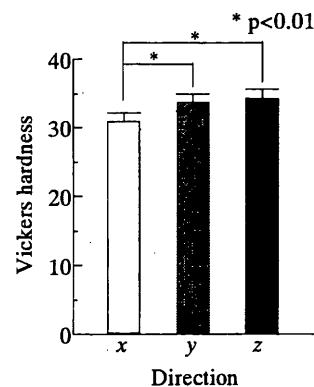


Fig.5 Trabecula orientation vs. Vickers hardness (n=10)

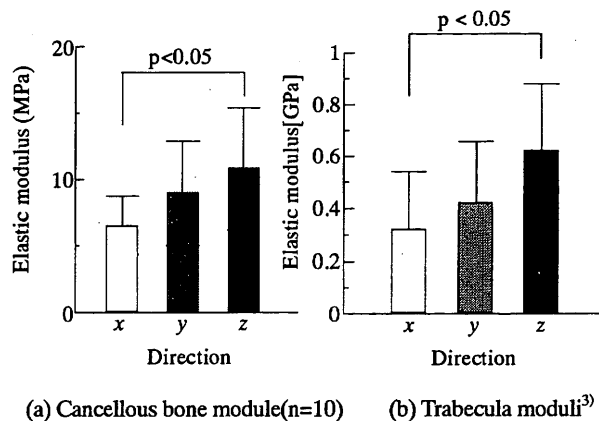


Fig.6 Elastic moduli

参考文献

- 1) J.Y.Rho, K.S.Liisa and P.Ziopoulos, Med. Eng. Phy., 20, 92 (1998).
- 2) D.R.Carter and W.C.Hayes, J. Bone Jt. Surg., 59-A, 954 (1977).
- 3) 松本他 2 名, 機構論, 02-1, 33, (2002).