

放射光白色 X 線による四肢骨幹内残留応力分布測定の見直し

山田 悟史^{*1}, 但野 茂^{*2}, 東藤 正浩^{*2}, 藤崎 和弘^{*2}

^{*1} 実験責任者, 北海道大学大学院工学研究科, 博士後期課程 3 年(実施時 2 年)

^{*2} 共同実験者, 北海道大学大学院工学研究院

1. 背景・目的

骨組織は、階層構造を有し、微視的に見るとコラーゲンとそれに沈着したハイドロキシアパタイト(HAp)から成る複合材料である。HAp は六方晶系の結晶構造を有するため、X 線回折によって HAp 結晶の格子面間隔を測定することができる⁽¹⁾。骨組織には、血管などの他の組織と同様に⁽²⁾、残留応力が存在する⁽³⁾。骨組織に作用する残留応力は、組織の強度に大きな役割を果たしていると考えられる。実験者らは、骨組織を構成する HAp 結晶の変形状態を利用し、X 線回折 $\sin^2\psi$ 法によって骨組織に作用する残留応力を測定する手法を提案した⁽⁴⁾⁽⁵⁾。特性 X 線 Mo-K α を用いて、ウシ大腿骨、家兎四肢を対象に骨幹外周表層の残留応力を測定した結果、骨軸方向の引張の残留応力が認められた⁽⁴⁾⁽⁶⁾。しかし、これまでの通常の X 線回折装置を用いた測定では、測定可能な領域が骨幹外周表面から数 10 μm の表層に限られ、皮質骨内部の残留応力を確認するには至らなかった。骨組織に内在する残留応力の発生メカニズムや生体内での役割を解明するためには、骨幹内部の残留応力についても明らかにする必要がある。そこで本研究では、高輝度、高指向性を有するシンクロトロン白色 X 線を用いた四肢骨幹皮質骨内部の残留応力測定法を検討した。

2. 実験方法

2.1 測定原理

骨組織に応力が生じると、HAp 結晶の格子面間隔 d も変化する。図 1(a)に示すように骨組織に引張応力が作用しているとき、図 1(b)に示すように、HAp 結晶の格子面法線の方向によってその格子面間隔 d は異なる。この ψ 角と格子面間隔 d の関係は、応力が大きいほど顕著である。

残留応力測定点における座標系を図 2 のように定義する。X 線回折を生じる格子面の法線方向と z 軸のなす角を ψ とする。また、本研究では、半径方向に残留応力が作用しないと仮定した。

HAp 結晶ひずみ ε^H は、式(1)で定義できる。

$$\varepsilon^H = \frac{d - d_0}{d_0} \quad (1)$$

ここで、 d_0 は無ひずみ状態の格子面間隔である。

本研究では、HAp 結晶ひずみ ε^H と骨組織応力 σ の関係が式(2)で表されると仮定した。

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_x^H \\ \varepsilon_y^H \\ \varepsilon_z^H \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E^*} & -\frac{\nu^*}{E^*} & -\frac{\nu^*}{E^*} \\ -\frac{\nu^*}{E^*} & \frac{1}{E^*} & -\frac{\nu^*}{E^*} \\ -\frac{\nu^*}{E^*} & -\frac{\nu^*}{E^*} & \frac{1}{E^*} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \end{pmatrix} \quad (2)$$

z 軸から x 軸へ ψ 傾いた方向の HAp 結晶ひずみ ε_ψ^H は, $\varepsilon_x^H, \varepsilon_z^H$ を用いて式(3)で表される.

$$\varepsilon_\psi^H = \varepsilon_x^H \sin^2 \psi + \varepsilon_z^H (1 - \sin^2 \psi) \quad (3)$$

$\sigma_z = 0$ の仮定より, 式(2), (3)から骨軸方向の残留応力は式(4)により算出できる. ただし, d_ψ は ψ 方向の HAp 結晶の格子面間隔, K_d は応力定数である.

$$\sigma_x = \frac{E^*}{d_0(1+\nu^*)} \frac{\partial d_\psi}{\partial (\sin^2 \psi)} \equiv K_d \frac{\partial d_\psi}{\partial (\sin^2 \psi)} \quad (4)$$

2・2 試験片

試験片は, ウシ(雌, 26 ケ月齢, 推定体重 430kg)の大腿骨を用いた. 図 3 に示すように, 骨幹中央部から測定位置が大腿骨の中央となるようにダイヤモンド・ソー(South Bay Technology 製 SBT650)を用いて 60mm の長さで切り出した. 試料の骨髄と外周の軟組織は除去し, 自然乾燥状態で保存した. また, 試験片を実験装置内に固定するため, 試験片の一端をエポキシ樹脂を用いてアクリル製板に接着した.

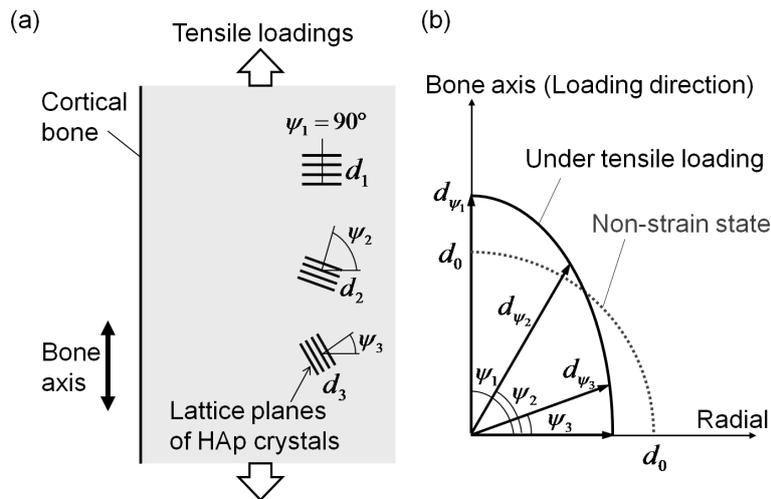


Fig. 1 Relationship between tissue stress σ and interplanar spacing d of HAp crystals. (a) Changes in the interplanar spacings d of HAp crystals oriented in different directions in the cortical bone under tensile loading. (b) Vector diagram of the interplanar spacing d of HAp crystals. The interplanar spacing of lattice planes oriented in the loading direction is the largest and that oriented normal to the loading direction is the smallest. The difference depends on the magnitude of the stress σ .

2・3 残留応力測定

骨幹試料の残留応力測定位置を図4に示す。残留応力分布の測定は、骨幹試料の中央面内とし、前方(A)、後方(P)、外側(L)、内側(M)の4部位について、それぞれ骨幹試料の外周表面から内周表面へ1mm間隔に測定した。

骨幹内部の残留応力分布を測定するためには、直径50mm程度の円筒形状の骨幹試料をX線が透過する必要がある。シンクロトロンから得られる高輝度、高指向性の放射光が必要となる。測定には、大型放射光施設SPRING-8の共用ビームラインBL28B2で得られる放射光白色X線を用いた。

図5に、X線回折実験の装置外観を示す。スイベルステージ(神津精機製SA07A-RS)を主とした傾斜機構を用いて $\sin^2\psi$ 法測定を行い、 $\psi = 90^\circ, 71.6^\circ, 63.4^\circ, 56.8^\circ$ における回折X線プロファイルを測定した。回折X線の検出にはGe半導体検出器(SSD)を、エネルギー弁別にはマルチチャンネルアナライザMCA(チャンネル数4096)を使用した。骨軸方向と半径方向の空間分解能とSSDの受光量を考慮し、入射スリットを $200 \times 200 \mu\text{m}$ 、受光スリットをともに $200 \times 150 \mu\text{m}$ に設定した。回折角 2θ は 5° に固定した。回折X線プロファイルの測定には、各条件において120秒照射した。

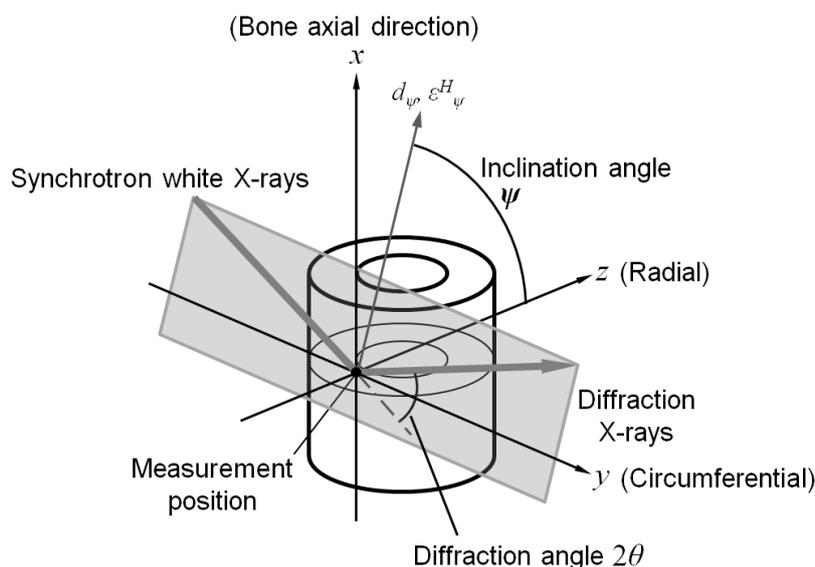


Fig. 2 Coordinate system at a measurement position in the cortical bone

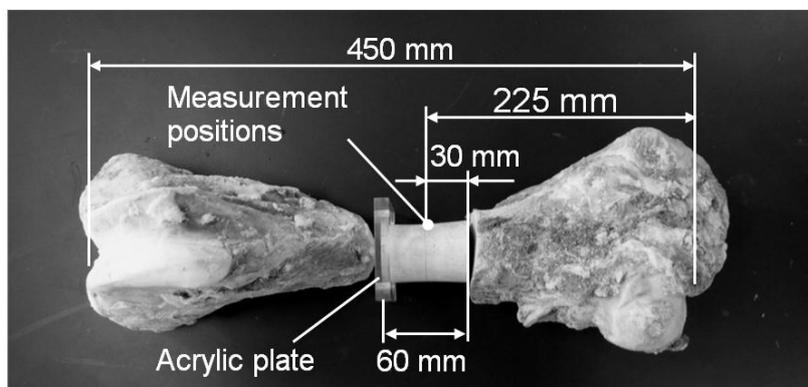


Fig. 3 Diaphysis specimen. The specimen was taken from the middle diaphysis of a bovine femur. It was 60 mm long in the bone axial direction and cut using a low speed diamond wheel saw. The measurement position was the center of the femur and the diaphysis specimen, respectively.

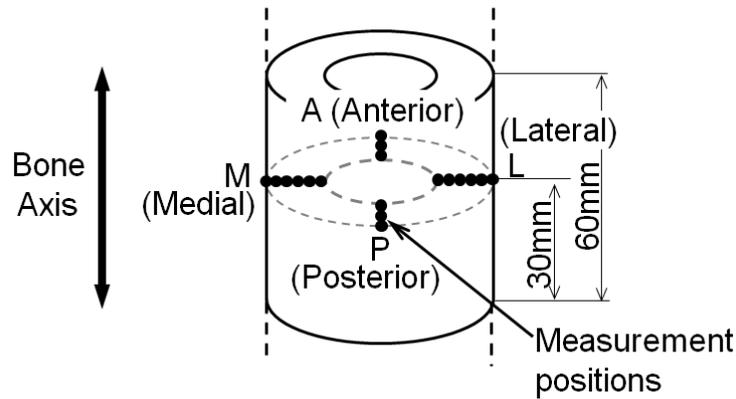


Fig. 4 Measurement positions in the diaphysis specimen. The positions are sited at 1mm intervals from the outer surface toward the inside of the specimen at four parts: anterior (A), posterior (P), lateral (L), and medial (M).

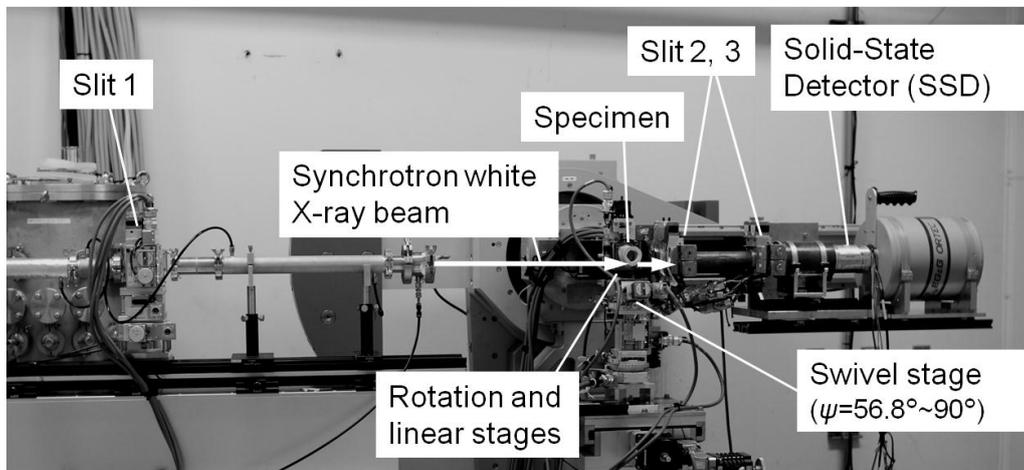


Fig. 5 Measurement setup for X-ray diffraction at the BL28B2 in SPring-8. The specimen was fixed on a swivel stage to enable changes in the ψ angle (90.0° , 71.6° , 63.4° , and 56.8°). The synchrotron white X-ray beam was collimated with a slit (Slit 1: $200\ \mu\text{m}$ high, $200\ \mu\text{m}$ wide). The diffracted X-rays were detected by a solid state detector (SSD). Scattered X-rays were eliminated from the diffracted X-rays with two slits (Slits 2 and 3: $200\ \mu\text{m}$ high, $150\ \mu\text{m}$ wide).

3. 結果と考察

図 6 に残留応力分布を示す。グラフ横軸は、前方(A)、後方(P)、外側(L)、内側(M)の 4 部位における、骨幹外周表面からの深さを示す。縦軸は、骨軸方向の残留応力 σ_x を表す。ただし、各方位ともに骨幹内周表面から 2 mm 程度の領域は、回折 X 線強度が非常に低く有効なプロファイルを得ることができなかつたため、これらの領域の結果は図示していない。図 6 より、骨幹外周表面では 4 部位すべてにおいて引張の残留応力が認められた。この傾向は、特性 X 線 Mo-K α による骨幹外周表面の残留応力測定⁽⁴⁾⁽⁵⁾と一致した。また、骨幹皮質骨内部では、圧縮の残留応力が認められた。特に前方(A)では、骨幹外周表面より深さ 2 mm 以上の領域では、平均 -9.0 MPa の圧縮の残留応力が存在し、骨幹外周表面の残留応力に比べて大きさは 1/3 程度であった。骨幹皮質骨では、外周表層で引張の残留応力が存在し、皮質骨内部で圧縮の残留応力が分布していることが確認できた。

本研究では、シンクロトロン白色 X 線を用いた四肢骨幹皮質骨内部の残留応力測定法について検討し、ウシ大腿骨骨幹部を対象に皮質骨内部の残留応力分布を測定した。この結果、本手法により骨幹内部の残留応力分布を測定することが可能であることを確認した。また、実験者らは、特性 X 線 Mo-K α を用いた骨幹外周表面の残留

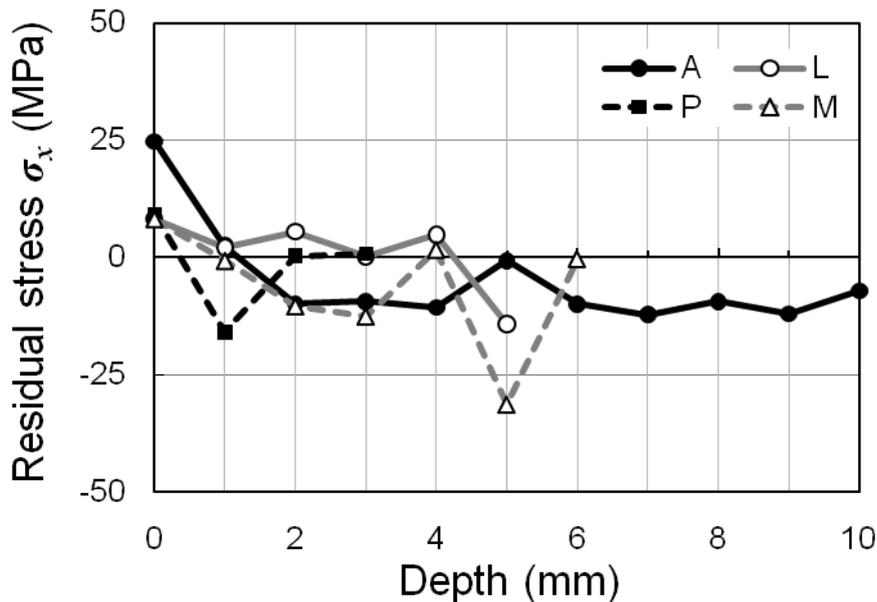


Fig. 6 Radial distribution of the residual stress in the bone axial direction from the outer surface to the inside of the diaphysis specimen at the four parts: anterior (A), posterior (P), lateral (L), and medial (M).

応力測定から、骨軸方向に大きな引張の残留応力が存在することを確認してきた⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾。骨幹外周表層で全周にわたって骨軸方向に引張の残留応力が測定されたことから、外周表層と皮質骨内部での応力平衡を予想した。本研究では、骨幹皮質骨の残留応力分布を測定し、骨幹外周表層で引張の残留応力が、皮質骨内部で圧縮の残留応力が分布していることを確認した。これより、表層に作用する引張の残留応力は、皮質骨内部の圧縮の残留応力と釣り合うように存在していることが考えられる。力の釣り合いに関する定量的な評価や測定精度については今後の課題とする。

謝 辞

本研究は、科学研究費補助金基盤研究(A)(19200035)、および科学研究費補助金特別研究員奨励費(09J00736)の助成を受けた。シンクロトン白色 X 線による実験は、大型放射光施設 SPring-8 のビームライン BL28B2 で行った(萌芽的研究課題 2010A1592)。また、実験に際し梶原堅太郎氏(JASRI)の協力を得た。

文 献

- (1) Fujisaki, K., and Tadano, S., “Relationship between Bone Tissue Strain and Lattice Strain of HAp Crystals in Bovine Cortical Bone under Tensile Loading”, *Journal of Biomechanics*, Vol. 40, No. 8 (2007), pp. 1832-1838.
- (2) Fung, Y.C., *Biomechanics: Motion, Flow, Stress, and Growth*, Springer, New York, USA, pp. 388-393, 500-503. 1990.
- (3) Tadano, S., and Okoshi, T., “Residual stress in bone structure and tissue of rabbit’s tibiofibula”, *Bio-Medical Materials and Engineering*, Vol. 16 (2006), pp.11-21.
- (4) 山田悟史, 但野茂, 東藤正浩, “X 線回折 $\sin^2\psi$ 法による牛大腿骨骨幹部の残留応力測定”, 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 74, No. 742 (2008), pp.894-900.
- (5) Yamada, S., and Tadano, S., “Residual Stress around the Cortical Surface in Bovine Femoral Diaphysis”, *Transactions of the ASME, Journal of Biomechanical Engineering*, Vol. 132, No. 4 (2010), pp. 0445031-0445034.
- (6) Yamada, S., Tadano, S., Todoh, M., and Fujisaki, K., “Residual Stresses at the Cortical Bone of the Rabbit Extremities”, *IFMBE Proceedings - WCB2010*, Vol. 31 (2010), pp. 780-783.