

放射光白色 X 線によるラット大腿骨の CT 観察と
骨内部のひずみマッピングの検討
**Study on Observation of Femur of Rat by Computerized Tomography
and Strain Mapping in Bone Using Synchrotron White X-ray**

柴野 純一^a, 梶原 聖太郎^b, 桐山 幸治^c, 菖蒲 敬久^c, 清谷 真平^d

Jun-ichi SHIBANO^a, Kentaro KAJIWARA^b, Yukiharu KIRIYAMA^c,

Takahisa SHOBU^c and Shinpei KIYOTANI^d

^a北見工大, ^bJASRI, ^c原子力機構, ^d北見工大・院

^aKitami Institute of Technology, ^bJASRI, ^cJAEA, ^dGraduate student of KIT

SPring-8 の BL28B2 ビームラインで得られる放射光白色 X 線を用いて、骨の構造評価や内部ひずみ測定に関する基礎的検討を行った。まず、ラット大腿骨骨頭近傍の CT 観察による構造評価を試みた。その結果、内部の微細な骨梁構造の観察が可能であることがわかった。骨の内部ひずみ測定には、牛大腿骨の皮質骨を用いた。牛骨試験片に鉄鋼製小球を押し付け、接触点近傍の長骨軸方向ひずみ分布を測定した。その結果、鉄鋼製小球直下で圧縮のひずみ分布を明らかにすることができた。

A structural evaluation and an internal strain measurement of a bone using the synchrotron white X-ray obtained from BL28B2 beam line at SPring-8 were investigated. The internal structures of head of femur of rats were observed by computed tomographic (CT) scan, and fine trabecula structures in them could be estimated. Bovine cortical bone was used as a specimen for the internal strain measurement. Small steel ball pressed on the bone specimen, and strains along the long bone direction near the contact position were measured. As a result, compressive strain distribution in the region immediately below small steel ball could be found.

背景と研究目的： 高齢者特有の骨粗鬆症に由来する骨折、とりわけ大腿骨頸部骨折は高齢者を寝たきり状態に至らしめる確率が高い。そのため大腿骨骨折の予防は、健全な高齢化社会実現への大きな課題となっている。骨折の外的要因として転倒、内的要因としては加齢に伴う骨粗鬆症の進展が挙げられる。骨粗鬆症骨の詳細な検討が行われているが、それらの多くは骨試料の切断面で行われており非破壊での評価はほとんどない¹⁾。一方、著者らは放射光高エネルギー白色 X 線を用いて、厚さ 5mm～15mm の鉄鋼材料の内部ひずみを測定する方法を確立した²⁾。さらに、白色

X 線 CT により金属内部のき裂先端の検出が可能であることを確認した³⁾。これらの手法は骨組織の結晶体であるハイドロキシアパタイト HAp 結晶にも適用できる。

そこで本研究では、放射光白色 X 線を骨組織に適用し、その構造・力学特性評価の可能性を検討する。まず、ラット大腿骨の骨頭骨梁の X 線 CT による観察を行う。さらに、インプラントとの接触を想定し、牛大腿骨皮質骨に鉄鋼製小球を押し付け接触点近傍のひずみ分布測定を行う。

実験方法： 白色 X 線による CT 観察の対象には、正常骨モデルとしてウイスター京都ラ

ット (WKY) と骨粗鬆症モデルとして脳卒中易発症高血圧自然発症ラット (SHRSP) の大腿骨を用いた。いずれも 20 週齢のメスである。SHRSP は妊娠経験のあるものを用いた。実験には SPring-8 の共用ビームライン BL28B2 を利用した。CT による断層撮影には空冷 CCD カメラ (浜松ホトニクス C4880-10-14A) およびビームモニタ (浜松ホトニクス AA40P) を用いた。カメラ画像の画素サイズは縦横共に $5.83 \mu\text{m}$ であり、画素数は横 1000 個および縦 1018 個である。試料を 0.5° ステップで 0° から 180° まで回転させ、後方に設置した CCD カメラでその X 線透過像を取得した。露出時間は各ステップ 0.5 秒とした。得られたデータの CT 画像再構成には SPring-8・JASRI の上杉健太郎氏により提供されている Convolution back projection 法を用いたソフトウェアを利用した。再構成後の視点や角度の変換にはソフトウェア Image J を使用した。

内部ひずみ測定対象は牛骨大腿骨から採取した皮質骨とし、フライス盤で直方体に成形した。長骨軸に垂直な断面は $6.94 \times 6.98 \text{mm}^2$ である。回折 X 線エネルギーの検出には Ge 半導体検出器 SSD, エネルギーの弁別にマルチチャンネルアナライザ MCA(4096 チャンネル)を利用した。エネルギー較正式は、鉛の蛍光 X 線 $\text{Pb-K}\alpha 1(74.9694 \text{keV})$, $\text{Pb-K}\alpha 2(72.8042 \text{keV})$ と放射性同位元素 $\text{Co-57}(122 \text{keV})$ を用いて求め、式(1)となった。

$$E_n = 0.0601 \times CH + 0.9881 \text{ [keV]} \quad (1)$$

ここで, CH は MCA のチャンネルナンバーである。

試料長骨軸方向を Z 軸とし、試料表面 Z 軸上で鉄鋼製小球 (直径約 3.6mm) を約 74N で押し付けた。骨試料に圧縮負荷を掛けながら

放射光を照射するための小型試験装置を図 1 に示す。スリットにより高さ $100 \mu\text{m}$, 幅 $200 \mu\text{m}$ に成形した白色 X 線を回折角 $2\theta = 5^\circ$ で 1 点あたり 600 秒照射した。接触点直下の x-z 面内で幅 1mm, 深さ 0.8mm の領域を 54 点に分割して長骨軸方向格子面間隔を測定し、無負荷時の値との比較からひずみを算出した。

結果と考察： 図 2 に SHRSP, 図 3 に WKY の大腿骨骨頭近傍の CT 画像を示す。放射光のアブソーバとして上流に 7mm 厚の Al 板を設置している。試料とカメラの間の距離は 150mm とした。SHRSP のほうが WKY に比べ骨梁がやや太く密度も高いように見える。これまでに行った長骨軸に沿った断面での観察では両者に大きな違いが見られなかったが、三次元的に観察することによって異なった結果が得られる可能性が高まった。

図 4 に骨試料から得られた白色 X 線の回折線プロファイルを示す。HAp(002)面など多くの回折面情報が得られているがバックグラウ

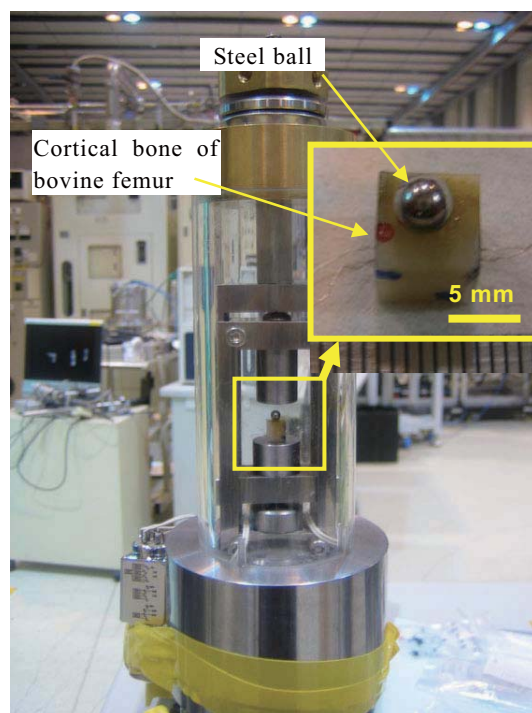


Fig. 1. Compression equipment of bone for internal strain measurement using synchrotron white X-ray.

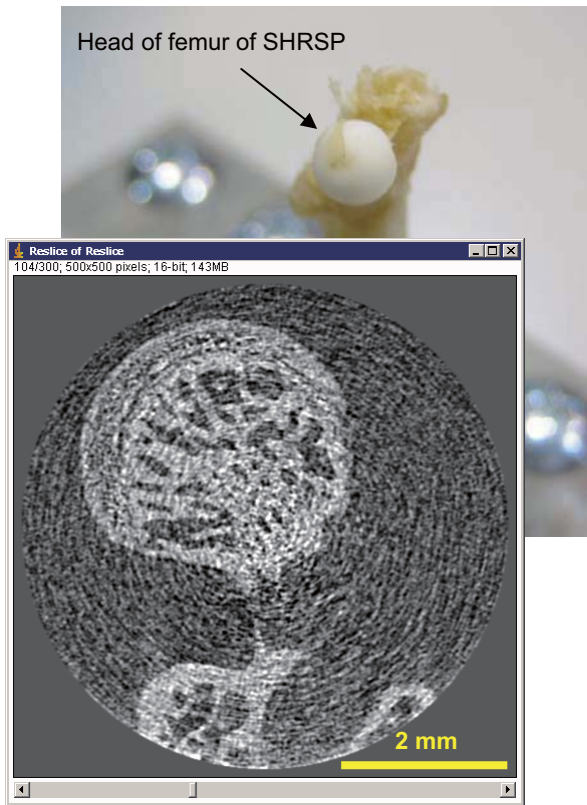


Fig. 2. CT image of head of femur of SHRSP.

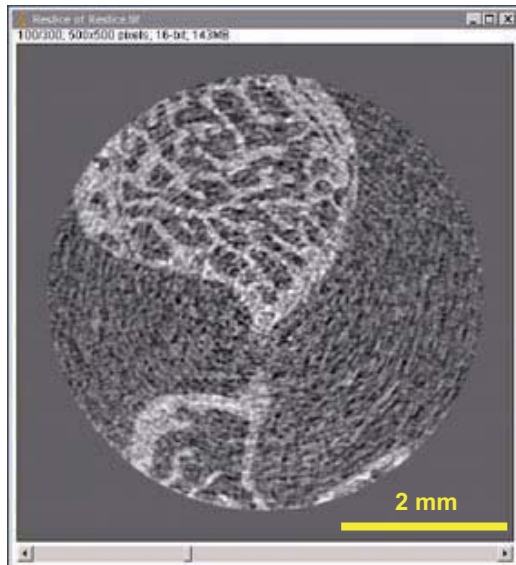


Fig. 3. CT image of head of femur of WKY.

ンドも高く、測定精度の低下が懸念される。回折角を種々検討したが、 5° が適当であった。しかし、この角度でもかなりの低角であり、検出器への散乱X線の影響も大きくなっていると考えられる。

図5に鉄鋼製の小球直下の骨試料のひずみ分布を示す。ひずみはHAp(002)面から算出した。

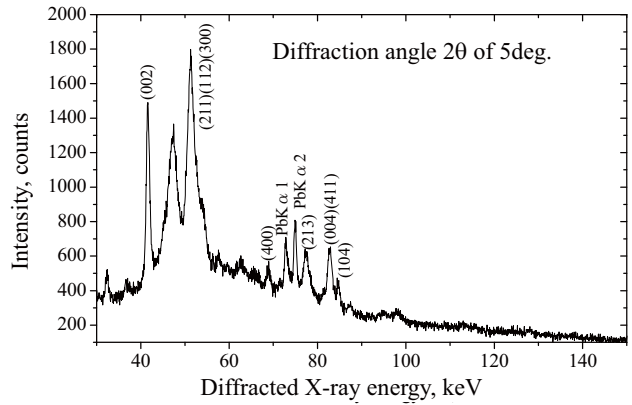


Fig. 4. Diffracted X-ray profiles of cortical bone of bovine femur.

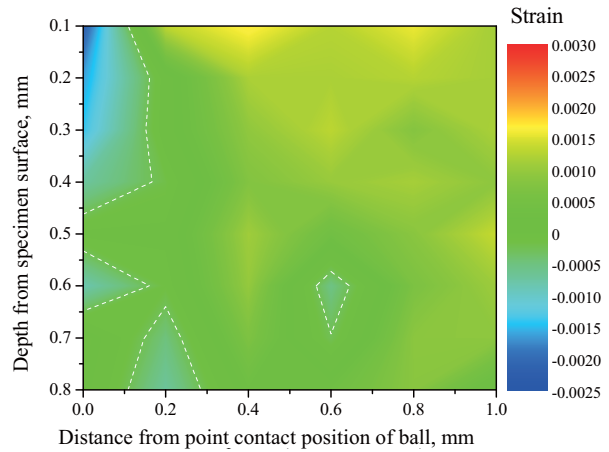


Fig. 5. Strain distribution of HAp(002) plane in cortical bone of bovine femur under compression load with small steel ball.

図から、小球直下に大きな圧縮応力が存在することがわかる。分布形状は幅に比べ深さがある縦長となった。大腿骨では長骨軸方向にHAp結晶が配向した異方性を有しているため、その影響も考えられる。接触点から離れるにしたがって引張りひずみが分布している。今後、骨組織の力学的異方性を考慮したシミュレーションとの比較により詳細な検討を行う。

参考文献

- 1) J.D. Almer, S.R. Stock, J. of Structural Biology, Vol.152, pp.14-27(2005).
- 2) J. Shibano, T. Shobu, K. Suzuki, K. Kiriya, K. Kajiwar, H. Kaneko and M. Kobayashi, Materials Science Forum, Vols.571-572, pp.267-270(2008).
- 3) 柴野純一, 桐山幸治, 梶原堅太郎, 菖蒲敬久, 鈴木賢治, 新居恭征, 三浦節男, 小林道明, 材料, 58巻7号(2009) in press.

キーワード

シンクロトロン放射光, 白色X線, 骨粗鬆症, ハイドロキシアパタイト, CT, ひずみ