

図1 CT/有限要素法(FEM)による予測骨折強度とDXA法による骨密度との比較

** : $P < 0.01$

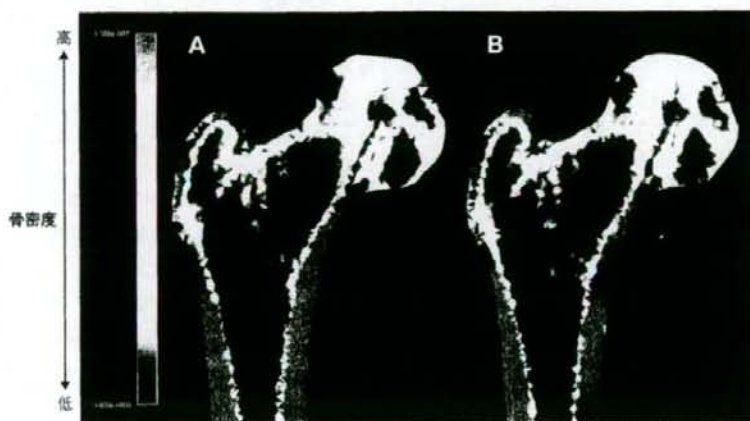


図2 ラロキシフェン投与群(79歳)

A: 初回時(予測骨量荷重: 330kgf, 頸部骨密度 0.168g/cm³). B: 1年後(予測骨量荷重: 350kgf, 頸部骨密度 0.654g/cm³).

転を改善すると言われていることから、ビスフォスフォネートで変化がないという結果が出ていれば、ラロキシフェンでも大きな変化はみられないと推測している。

以上より、薬剤効果による予測骨折荷重の増加

は、検出可能であった。リセドロネート、ラロキシフェンともに、主圧縮骨梁を中心に骨密度が増加していた。DXA法による骨密度の変化より、CT/有限要素法の予測骨量の変化のほうが大きかった。



2008 Oct.
Vol. 10 No. 3

日本コンピュータ外科学会誌

Journal of Japan Society of Computer Aided Surgery

第17回日本コンピュータ外科学会大会特集号

～安全と安心のためのCAS～

*Special Number / 17th Annual Congress of Japan Society of
Computer Aided Surgery*

会期：2008年10月31日（金）・11月1日（土）・2日（日）

会場：東京女子医科大学 弥生記念講堂 〒162-8666 東京都新宿区河田町8-

大会長：伊関 洋 東京女子医科大学 先端生命医学研究所

■ 特別企画

特別講演「医療再生」

特別シンポジウム「Women In Computer Aided Surgery」

パネルディスカッション(1)「医・理・工融合研究施設から発信する新しい医工学

パネルディスカッション(2)

「レギュラトリーサイエンスからみた治療機器実用化のための問題点と解決策

■ 一般演題

手術場・環境システム/セグメンテーション

VR・トレーニング・シミュレーション

内視鏡/手術機器・デバイス/ナビゲーション

画像/ロボット・マニピュレータ

レギュラトリーサイエンス・安全評価/ポスターセッション

■ 教育セミナー要旨

協賛

ライフサポート学会、日本生体医工学会、日本ロボット学会、日本医用画像工学会

日本コンピュータ外科学会

08(XV)-71

CT/有限要素法を用いた新鮮死体大腿骨標本の予測骨折部位の検証

○ 別所 雅彦^a、大西 五三男^a、松本 卓也^a、大橋 暁^a
飛田 健治^a、金子雅子^a、中村 耕三^a

^a 東京大学整形外科

Prediction of the fracture location of the proximal femur by a CT based finite element method

M. Bessho^a, I. Ohnishi^a, T. Matsumoto^a, M. Kaneko^a, S. Ohashi^a, K. Tobita^a,
K. Nakamura^a

^a The Department of Orthopaedic Surgery, The University of Tokyo, Tokyo, Japan

Abstract: Hip fractures are the most serious complication of osteoporosis and have been recognized as a major public health problem. In elderly persons, hip fractures occur as a result of increased fragility of the proximal femur due to osteoporosis. It is essential to precisely quantify the strength of the proximal femur in order to estimate the fracture risk and plan preventive interventions. CT based finite element analysis could possibly achieve precise assessment of the strength of the proximal femur. The purpose of this study was to create a simulation model that could accurately predict the fracture location of the proximal femur using a CT based finite element method and to verify the accuracy of our model by load testing using fresh frozen cadaver specimens. Eleven right femora were collected. The axial CT scans of the proximal femora were obtained with a calibration phantom, from which the 3D finite element models were constructed. Non-linear finite element analyses were performed. A quasi-static compression test of each femur was conducted. FE analysis showed that the solid elements and shell elements in undergoing compressive failure were at the same subcapital region as the experimental fracture site..

Key words: Finite element method, Bone strength, Osteoporosis, Fracture site, Femur

1. 目的

骨粗鬆症が原因である大腿骨近位部骨折の患者は、近年、発生件数が年間約 12 万人となり、1987 年から比較すると、1992 年で 1.7 倍、2002 年で 2.2 倍となっており、年々確実に増えている[1]。現在の骨強度評価は、主に X 線写真および DXA (dual energy X-ray absorptiometry) による骨密度で評価されている。DXA 法による骨密度測定は、骨の立体的構造強度を定量評価できないという限界がある。こうした背景から、CT/有限要素法を用いて、骨強度を定量的に評価できる解析モデルの開発を行った。解析モデルの精確性の評価を行うために、新鮮凍結死体標本の圧縮試験を行った。前回[2]、骨折荷重の実験と解析の結果の相関が、 $r = 0.979$ と高く、骨折荷重が正確に評価できることを報告した。今回、骨折部位に関して実験と解析の比較検討を行った。

2. 対象と方法

男性 5 人 (30~90 歳 平均 56.8 歳)、女性 6 人 (72~85 歳 平均 72.8 歳) から摘出した右大腿骨 11 本を使用した。倫理審査委員会の承認をへて遺

族への説明同意を得た後に、死後 12 時間以内に採取し、実験まで凍結保存した。CT 画像、軟 X 線にて摘出大腿骨に骨折、ガン転移などの骨病変がないことを確認した。大腿骨は、小転子中央から遠位に 14 cm の部分で骨幹部を切断した。レジストレーション用にエポキシ樹脂マーカーを計 11 個、貼り付けた。CT (Aquilion Super 4、東芝メディカルシステムズ) を用いて、骨量ファントム (B-MAS200、京都科学) とともに、検体を 3mm スライスで撮影を行った。圧縮試験は、大腿骨骨軸 20 度傾けて骨頭に対して準静的に圧縮を行った (Fig. 1)。実験後、骨折部位を確認するために 0.5mm スライスで CT 撮影を行った。一方、定量的 CT から、海綿骨に 3mm の 4 節点ソリッド要素と、皮質骨外層に 0.4 mm の 3 節点シェル要素を使用し、3 次元骨強度解析モデルを作成した。骨は不均質材料とし、重量密度は各要素に対して骨量ファントムの CT 値から換算式により計算した。材料特性は各要素の位置に対応する重量密度から個々に算出し、これに対応する要素の材料特性に割り当てた。

ヤング率は Keyak [3]ら、および Keller [4]らの方法により設定した。ポアソン比は、0.4 とした。荷重条件および拘束条件は、骨軸から 20 度内側に傾けた方向で骨頭を圧縮し、骨幹部遠位端を拘束した条件とした。

Newton-Raphson 法を用いた荷重増分法による非線形解析を行い、1 つのシェル要素の最大主応力がその要素の臨界応力を超える場合（クラック）、または、1 つのシェル要素の Drucker-Prager 相当応力が要素の降伏応力を超え、かつ最小主歪みが -10000 micro strain 以下の場合（圧潰）をそれぞれ骨折と定義した。1 要素以上の破壊を骨折と定義し、予測骨折荷重を解析した。

実験での骨折部位と予測骨折部位を比較対照した。また、骨折部位と解析での最小主ひずみ分布の比較も行った。



Fig. 1: Uniaxial compressive loading testing

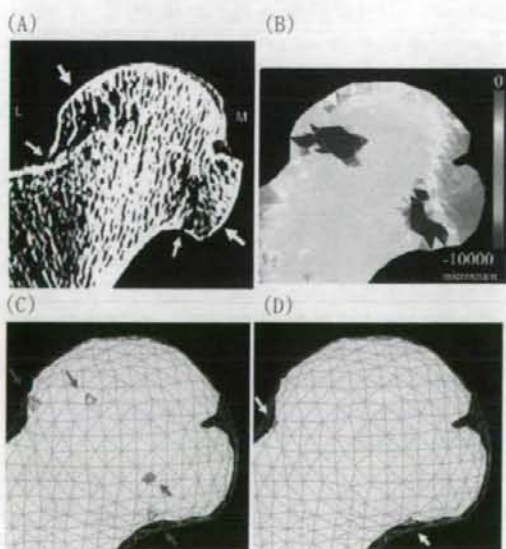


Fig. 2: (A) Fracture sites in a tested specimen

(FR02). The arrows indicate the fracture site. The specimen sustained a fracture of the subcapital region. (B-D) Predicted fracture sites. (B) The minimum principal strain distribution under the predicted fracture load is shown for a mid-sagittal section by the FE model. The area with the lowest minimum principal strain is at the subcapital region. (L; lateral, M; Medial). (C) The failed tetrahedral elements in the mid-sagittal section (arrows) predicted by FE analysis. (D) The failed triangular elements in the mid-sagittal section (arrows) predicted by FE analysis.

3. 結果

11 検体すべてにおいて大腿骨頭下に骨折が発生していた。また、実験での骨折部位は、予測骨折部位とほぼ一致していた。また、最小主ひずみ分布は骨折分布とほぼ一致していた (Fig. 2)。

4. 考察

先行研究では、Keyak ら [5] が実際の骨折部位と予測骨折部位比較しているが、骨折部位を CT 等で正確に検証していない。我々の CT/有限要素法モデルは、骨折荷重ばかりではなく骨折部位も予測可能であることが検証された。

文献

- 1) Yoshimura, N., Suzuki, T., Hosoi, T. and Orimo, H., Epidemiology of hip fracture in Japan: incidence and risk factors. *Journal of Bone and Mineral Metabolism* 2005;23 Suppl:78-80.
- 2) 新鮮死体大腿骨標本の CT/有限要素法による予測骨折荷重の正確性の検証, 別所雅彦, 大西五三男ら, *日本コンピュータ外科学会誌*, 2007, 9 巻 3 号 Page 274-275
- 3) Keyak, J. H., Lee, I. Y. and Skinner, H. B., Correlations between orthogonal mechanical properties and density of trabecular bone: use of different densitometric measures. *J Biomed Mater Res* 1994;28:1329-36.
- 4) Keller, T. S., Predicting the compressive mechanical behavior of bone. *J Biomech* 1994;27:1159-68.
- 5) Keyak, J.H., et al., Prediction of fracture location in the proximal femur using finite element models. *Med Eng Phys*, 2001. 23(9): p. 657-64.