

び位置姿勢の推定

本手法では2D/3Dレジストレーションに用いる輪郭情報は骨折部の数だけ存在し、それらを拘束条件として骨折前の骨形状及び各骨片の位置姿勢を推定する。以下に手順を示す(Fig. 1)。

- (1) 骨折した骨のX線画像撮影を行う。
- (2) 撮影した骨の輪郭線を手動で抽出する。これは骨折時に分かれた骨片毎に行う。
- (3) それぞれの輪郭画像に対して2.1で作成した形状モデルを用いて2D/3Dレジストレーションを行い、各骨片の位置姿勢推定を行う。この際、Levenberg-Marquardt法を用いて最適化し、各骨片の位置姿勢を推定する。
- (4) 位置姿勢を固定した状態で、Brent法⁴⁾を用いて形状モデルのスケールを変化させ、2D/3Dレジストレーションの残差が最も小さくなる値に更新する。
- (5) 位置姿勢およびスケールを固定した状態で、形状モデルを(1)式を使用して変形させ、最適な形状に更新する。
- (6) (3)~(5)を計算が収束するまで繰り返し、X線撮影した骨の形状及び位置姿勢を推定する。

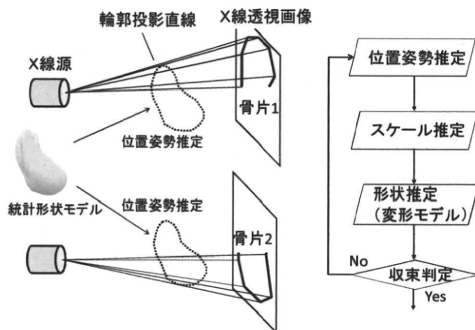


Fig. 1 Schematic diagram of proposed method

3. 実験

提案手法の精度を検証するために、骨折時の舟状骨を用いた骨形状と位置姿勢の推定を行った。比較のために、従来手法による骨形状と位置姿勢の推定を行った。その際、骨折時の舟状骨、骨折時の舟状骨の一部骨片を用いて計算を行った。正常な舟状骨を用い提案手法による計算結果をシステムの限界精度とした。実験には20~30代の男性22名、女性15名(計37名)の手根部を撮影したCT画像を用い、舟状骨(左手)の表面形状モデルを抽出した。このモデルを手法2.1に適用し、統計形状モデルを作成した。CT画像を撮影した被験者の舟状骨は正常骨であったため、仮想的に、骨折時を想定した骨折状態の骨の輪郭画像を作成した。その際の画像条件は骨片数2、画素数512×512、輪郭点数150~200とし、撮影条件は撮影方向2方向、2つの撮影方向の相対角度は90°とした。得られた統計モデルと輪郭画像を用いて提案手法2.2の検証を行った。この時、位置姿勢の初期値を正解値に対して5mm、5°の標準偏差を与え、試行回数を被験者毎に50回とした。形状推定精度の評価にはLeave-one-out cross validation法(Fig. 2)を用いた。この手法は、全サンプルから、一つのサンプルを除き、残りのサンプルでモデルを作成したときに、あらかじめ除いていたサンプルを正確に予測することができるかを検定する方法である。

形状推定評価は残差と体積誤差、位置姿勢推定評価は位置誤差と角度誤差を評価項目とした。

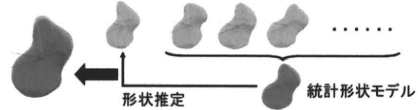


Fig. 2 Leave-one-out cross validation method

4. 結果・考察

形状誤差と位置姿勢誤差の結果を、それぞれTable 1とTable 2に示す。推定位置における骨と正解位置における骨との体積誤差が40%以上の時、計算が発散したとして除外した。

Table 1 Error of shape estimation

	体積誤差 [%]	平均残差 [mm]	最大残差 [mm]	発散データ数
骨折時に提案手法を適用	12.57	0.35	1.50	1
骨折時の骨片1に 従来手法を適用	13.93	0.42	1.72	6
骨折時の骨片2に 従来手法を適用	15.90	0.54	2.19	20
骨折時に従来手法を適用	36.54	1.78	5.59	0
正常時に提案手法を適用	10.19	0.28	1.36	0

Table 2 Error of pose estimation

	角度誤差 [deg]			位置誤差 [mm]			発散データ数
	x	y	z	x	y	z	
骨折時に提案手法を 適用(骨片1)	1.62	1.78	4.28	0.18	0.31	0.21	23
骨折時に提案手法を 適用(骨片2)	4.42	4.31	3.35	0.37	0.43	0.40	91
骨折時の骨片1に 従来手法を適用	2.27	1.97	4.36	0.16	0.33	0.22	19
骨折時の骨片2に 従来手法を適用	4.83	3.96	3.22	0.29	0.46	0.48	102
骨折時に従来手法を 適用	2.47	0.42	1.02	0.14	0.08	0.06	0
正常骨に提案手法を 適用	1.41	0.36	0.41	0.06	0.02	0.04	0

提案手法は従来手法に比べ体積誤差、残差共に小さくなり、また収束率が向上した。しかし、位置姿勢誤差では、提案手法と従来手法に大きな差はなかった。提案手法では形状推定時の拘束条件が増えるため形状推定精度が向上するが、位置姿勢推定時は従来手法と拘束条件が同じであるため、妥当な結果であると考えられる。以上から、提案手法を用いることで形状推定精度を向上することができたと考える。

5. 今後の展望

今後は、使用する輪郭の情報量と誤差の関係について未確認であるため、輪郭に応じた誤差解析を行う。また、骨形状と誤差の関係を解析することで、誤差の原因を特定し、精度向上を目指す。

文献

- 1) 高村俊介ほか, "舟状骨を対象とした2次元X線画像からの3次元骨形状推定法," 第25回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2007
- 2) T.F.Cootes, C.J.Taylor, D.H.Cooper and J.Graham, "Active Shape Models-Their Training and Application," Computer Vision and Image Understanding, vol. 61, pp. 38-59, 1995.
- 3) Paul J.Besl and Neil D.McKay, "A Method for Registration of 3-D Shapes" IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 14, pp. 239-256, 1992.
- 4) Brent, Richard P. "Algorithms for minimization without Derivatives (Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall), chapter 5, 1973

09(XVI)-89

μ CT 解析ソフトを用いた 3次元慣性モーメントによる仮骨強度評価

○飛田健治 大西五三男 松本卓也 大橋暁 別所雅彦 金子雅子 松山順太郎 中村耕三
東京大学医学部整形外科

Callus strength evaluation of 3-dimensional cross-sectional moment of inertia using micro CT software

¹Tobita, K; ¹Ohnishi, I; ¹Matsumoto, T; ¹Ohashi, S; ¹Bessho, M;
¹Kaneko M; ¹Matsuyama, J; ¹Nakamura, K

¹ Department of Orthopaedic Surgery, Faculty of Medicine, University of Tokyo,
Tokyo, Japan

Abstract: μ CT scans allow us to calculate strength-related parameters such as cross-sectional moment of inertia (CSMI). LIPUS reportedly enhances restoration of strength at fracture healing sites. The purpose of this study was thus to investigate the effects of LIPUS on osteotomy callus healing using 3D analyses of CSMI. Bilateral, transverse, mid-tibial osteotomies with a 2-mm gap were performed in 42 rabbits. LIPUS was continued for both the treatment group and the control group for 4, 6, or 8 weeks. After the tibia was scanned by μ CT, region of interest (ROI) was set at the center of the osteotomy gap with a width of 1 mm. We calculated the axial CSMI (CSMIx, CSMIy), and the polar CSMI (CSMIp). As for comparison of 3D CSMIs at the same time point, values for the LIPUS groups were significantly higher than those of the control groups for CSMIx, CSMIy, and CSMIp at 6 and 8 weeks. Bone healing by 3D CSM and CSMI has not been described before. Our results demonstrate that these bone strength parameters improved with LIPUS during the early phases. However, whether the late phase of callus formation is influenced remains unclear.

Keywords: Bone strength, cross-sectional moment of inertia, low intensity pulsed ultrasound

INTRODUCTION:

基礎研究における骨強度評価は力学試験を行い実測値の評価することが一般的であるが、1方向の骨強度評価に限定される。マイクロCT（以下 μ CT）は硬組織試料の非侵襲的3次元形態評価ができ、骨強度関連パラメータを用いて骨強度予測が可能である。低出力超音波パルス治療（以下、LIPUS）は骨癒合を促進する。本研究の目的はLIPUS照射が仮骨強度に及ぼす効果を μ CTの3次元慣性モーメントを用いて評価することである。

MATERIALS AND METHODS:

Animal surgery:

21-23週齢、体重約4kgで雄の日本白色家兎42羽を用いた。脛腓骨結合部を確認し、そこから12mm遠位の位置を骨切り部位とした。骨切りを行う前に、ステンレス製の貫通ピン（径2.0mm、長さ50mm）を脛骨冠状面に平行に近遠位2本ずつ計4本挿入した。ピン間隔は1-2ピン間16mm、2-3ピン間24mm、3-4ピン間16mmで2-3ピン間の中心が骨切り部位となるようにピンを刺入した。正確性と再現性を得るためにピン刺入に専用のジグを開発し使用した。4本のステンレスピンはbilateral external fixation (IMEX社創外固定: KE type)にて固定し、内外クランプ間距離を35mmに統一した。骨切りは軟部組織を保護し、軟部組織幅0.36mmのT-sawにて生理食塩水をかけながら骨切りを行った。gapの作成には2mmのスペーサーを挿入して行

い、全個体のgap sizeを統一した。創内を十分洗浄しgap内に介在物が無い事を確認し閉創した。

LIPUS treatment:

LIPUSの照射/非照射群に分け、観察期間を4,6及び8週とした。機種はセーフス SAFHS 2000J（帝人ファーマ株）を使用した。照射部位は患側脛骨骨切り部分で、前面より照射した。術後3日より1週間に6日、吸入麻酔下に20分間行い、超音波条件は1.5MHz sine waves, burst幅200 μ sec (repeating at 1kHz), 30mW/cm² (average intensity)とした。非照射群は照射群と同様の条件でダミーの機種を用いて模擬照射を行った。非照射・照射の設定はランダムに行い、 μ CTの解析終了時までsingle-blind testを行った。

MicroCT Analysis:

と殺後microCT撮影を行った。MicroCTの撮影にはScan X mate-E090（コムスキャンテクノ）を使用し、撮影条件を電圧60kV、電流80mAで、1ボクセルサイズを28.57 μ m³とした。gap 2mmの中心1mmを関心領域とし、解析を行った(Fig. 1)。解析ソフトにはTRI-BONE(ラトックエンジニアリング)を使用した。解析方法は、関心領域の36枚のCTデータを、専用のHAファントムを用いてBMD値に変換した。仮骨の閾値を200mg/cm³とし、二値化した。また同ソフトを用いて3次元画像を作製し関心領域の仮骨体積BV(cm³)と、仮骨質量BMC(mg)と仮骨体積内のミネラル成分の密度mBMD (BMC/BV: mg/cm³)

を計測した。さらに関心領域の重心を原点に設定した。原点を通る脛骨の Long Axis (polar) を Z 軸、Medial-Lateral を Y 軸、Anterior-Posterior を X 軸に設定した。脛骨の ML 方向は脛骨後面に平行で重心を通る骨冠状面内に設定した。

3 次元の慣性モーメント評価: 3D Cross-Sectional Moment of Inertia (CSMI)

3 次元上に関心領域の重心を通る任意の軸を、x 軸とのなす角 Φ と z 軸(polar)とのなす角 θ を用いて計測する(Fig. 2)。この軸 I(θ, ϕ) 周りの CSMI を、I から距離距離 (r) にある骨量 (m) を用いて、CSMI: $I(\theta, \phi) = \int r^2 dm = \int pr^2 dV$ ($mg \cdot mm^2$)とした。dm は微小質量 (BMC/voxel)、p は仮骨の密度で mBMD を用いた。今回我々は仮骨 CSMIy: I(90, 90), CSMIx: I(90, 0), と CSMIp: I(0, any)の 3 方向のパラメータを評価した(Fig. 3)。

Statistical Analysis

microCT から算出した慣性モーメントは a one-way ANOVA test を行い、解析には SPSS ver17.0 (SPSS Inc, Chicago, IL) を使用した。有意水準は $p < 0.05$ とした

RESULTS:

LIPUS 照射/非照射群間の CSMI の比較で、6 週では CSMIx: $127.83 \pm 16.67 mg mm^2$ vs $58.06 \pm 31.32 mg mm^2$; $p < 0.05$, CSMIy: $163.88 \pm 42.52 mg mm^2$ vs $64.43 \pm 37.00 mg mm^2$; $p < 0.05$, CSMIp: $287.83 \pm 48.24 mg mm^2$ vs $120.38 \pm 65.01 mg mm^2$; $p < 0.05$ であった。8 週群では CSMIx: $149.01 \pm 57.52 mg mm^2$ vs $46.29 \pm 46.07 mg mm^2$; $p < 0.05$, CSMIy: $151.03 \pm 47.72 mg mm^2$ vs $43.85 \pm 49.63 mg mm^2$; $p < 0.05$, CSMIp: $294.75 \pm 93.10 mg mm^2$ vs $87.71 \pm 90.08 mg mm^2$; $p < 0.05$ と 6,8 週において 3 方向全てにおいて有意に高値であった。

DISCUSSION:

近年 μ CT を用いた 3 次元骨形態計測評価が行われているが、仮骨のモーメントを 3 次元的に評価した先行研究はない。2 次元の慣性モーメントは骨強度と相関が高いと言われている。本研究において、照射群は非照射群と比べ 6,8 週の 3 次元慣性モーメントは X, Y, Z 軸方向共に有意に高値であった。照射群間比較では、3 次元慣性モーメントの 3 つのパラメータに有意差は見られず、非照射群間も有意差は見られなかった。継続的な LIPUS 照射は骨強度の回復を早めることは臨床基礎研究より検証されており、本研究においても LIPUS の効果を定量的に評価できた。今回力学試験との比較がないが、 μ CT は骨強度関連パラメータを用いて 3 次元的な定量的骨強度評価が可能で、今後の骨強度評価にも応用可能である可能性が示唆された。

Figures and Figure Legends

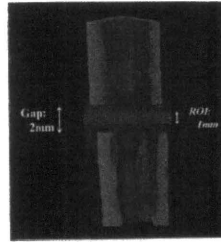


Fig. 1: Region of interest was set at the callus healing area. It defined as a center of the osteotomy gap with a width of 1 mm.

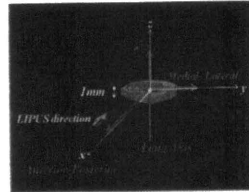


Fig. 2: The XYZ plane was defined as the Z axis coincided with the long axis of the tibia, with the Y axis parallel to mediolateral direction and the X axis parallel to anteroposterior direction. The LIPUS transducer was placed onto the anterior surface of the operated leg.

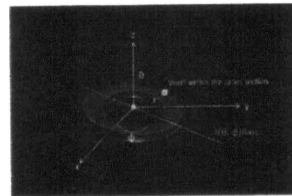


Fig. 3: An optional line (I) can be drawn in this XYZ coordinate. The angle of the Z axis (θ) was measured, and also the degree of angle of the X axis (ϕ) was measured.

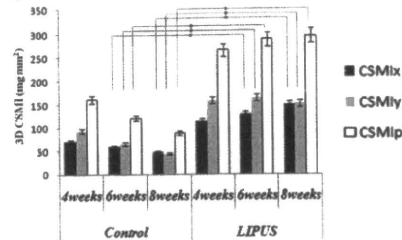


Fig. 4: No significant differences were seen among the three control groups. Likewise, the three LIPUS groups showed no significant differences. When 3D CSMIs at the same time point were compared, values for the LIPUS groups were significantly higher than those of the control groups for CSMIx, CSMIy, and CSMIp at 6 and 8 weeks.

09(XVIII)-97 CT/有限要素法による非線形解析を用いた大腿骨近位部の強度評価 -荷重・拘束条件の相違による予測骨強度・部位の相違について-

○別所雅彦^a, 大西五三男^a, 松本卓也^a, 金子雅子^a, 大橋暁^a, 飛田健治^a, 中村耕三^a

^a 東京大学医学部整形外科

Prediction of strength and fracture location of the proximal femur by a CT-based nonlinear finite element method - Effect of load direction on hip fracture load and fracture site -

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

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

Abstract: The aim of this study was to investigate the effect of load direction on fracture risk of the proximal femur. For this purpose, we evaluated changes in magnitude of strength for the proximal femur with changes in load direction by analyzing the contralateral femur in patients with hip fracture using the nonlinear CT/FEM. We also verified changes in fracture risk by site. From these analyses, we identified load and boundary conditions that could increase risk of hip fracture and clarified that this could possibly cause the fracture types commonly seen in clinical situations. 28 femora in female patients with contra-lateral hip fracture were enrolled. Axial CT images of the proximal femur were obtained as well as scans of a calibration phantom. The CT data were transferred to a workstation and 3D finite element models were constructed from the CT data. Materially nonlinear finite element analysis was performed by the Newton-Raphson method. Fracture loads were predicted and sites at fracture risk were identified. Correlations between predicted fracture load and load direction were investigated. Predicted fracture type was compared with contralateral actual fracture type. Predicted fracture type corresponded significantly to contralateral actual fracture type. The present study could contribute to providing us with useful information for the establishment of effective measures to prevent hip fractures.

Keywords: Hip fracture, Osteoporosis, Finite element method, Computed tomography.

1. 目的

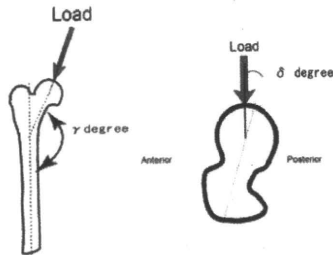
骨粗鬆症が原因による大腿骨近位部骨折が近年増加し、社会的な問題となっている。個々の患者の骨折リスクの正確な把握や、それに対応した有効な予防策を確立することはいっそう重要な意義を持ってきている。我々は構造強度の定量評価が可能なCT/有限要素法に着目し、CT/有限要素法による大腿骨近位部の強度を正確に評価する方法を確立した[1]。本方法の利点のひとつは、強度の荷重方向依存性を明らかにできることである。骨折リスクの高い荷重方向を特定することができれば、より有効な骨折予防法を確立することができる。本研究の目的は、大腿骨近位部骨折患者の非骨折側の大腿骨近位部の3次元CT非線形有限要素解析を行い、荷重方向の相違による予測骨折荷重を定量予測し、同時にその骨折部位の局在を明らかにすることである。特に骨折リスクの高い荷重・拘束条件を同定し、またその条件が現実の臨床において好発する骨折型を再現するか検討した。

2. 対象と方法

対象は、女性の大腿骨近位部骨折患者 28 名

(平均 85.2 歳、平均身長 146 cm、平均体重 43 kg) (頰部内側骨折患者 13 例、転子部骨折患者 15 例)。受傷後 1 週間以内に定量的CTを撮像し、非骨折側の3次元骨強度解析モデルを作成した。倫理委員会の承認のもと患者の同意を得て、骨量ファントムとともに大腿骨頭から小転子下 17cm まで、3mm 厚の定量的CT撮影を行った。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0.4mmの3節点シェル要素を使用し、3次元解析モデルを作成した[1]。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、降伏応力および臨界応力は Keyak[2]ら、および Kellar[3]らの方法により設定した。骨頭への荷重方向は、前額面において骨軸から γ 度、横断面において頸部軸から δ 度前方方向に傾斜した荷重をかけた(Fig. 1)[4]。荷重条件および拘束条件は、立位を模擬した条件($\gamma 160^\circ \delta 0^\circ$)(立位条件)、転倒を模擬した条件、転倒条件 1($\gamma 120^\circ$

$\delta 0^\circ$), 転倒条件 2 ($\gamma 60^\circ \delta 0^\circ$), 転倒条件 3 ($\gamma 60^\circ \delta 15^\circ$), 転倒条件 4 ($\gamma 60^\circ \delta 45^\circ$)を設定した[4, 5]。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 μ 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・予測骨折部位を解析した[1]。各荷重拘束条件の相違による強度の相違を比較し、相関性を検討した。また、予測骨折部位と対側の骨折型とを比較した。統計処理は、Pearson's test, Friedman test, Post hoc test に Scheffe's test, Fisher's exact test を用いた。有意水準を 0.05 以下とした。



(Fig. 1) Load direction

3. 結果

予測骨折荷重の平均は、立位条件 3080 N(標準偏差(SD) 551 N)、転倒条件 1、2210 N(SD 606 N)、転倒条件 2、1047 N(SD 236 N)、転倒条件 3、970 N(SD 199 N)、転倒条件 4、700 N(SD 167 N)であった。立位条件の予測骨折荷重は、転倒条件 1 をのぞくすべての転倒条件よりも有意に大きかった($p < 0.001$)。各転倒条件の予測骨折荷重を比較すると、転倒条件 1 の予測骨折荷重は、転倒条件 2, 3, 4 と比較すると、有意に大きかった($p = 0.02, p < 0.001, p < 0.001$)。転倒条件 2 の予測骨折荷重は、転倒条件 4 より明らかに高かった($p < 0.001$)。転倒条件 3 の予測骨折荷重は、転倒条件 4 より明らかに高かった($p < 0.01$)。各条件間での予測骨折荷重の相関係数(r)を、Table. 1 にて示す。骨折部位予測においては、立位条件では全例に頸部骨折が発生した。転倒条件 1 をのぞく転倒条件では、全例に転子部骨折が発生した。しかし転倒条件 1 においては、頸部骨折と転子部骨折の両者が予測され、実際の骨折型と予測骨折型が一致したものは 20 例、一致しなかったものは 8 例で、実際の骨折型と予測骨折型とにおいて有意な関連があった($p < 0.01$)。

	S.C.	F.C. 1	F.C. 2	F.C. 3	F.C. 4
S.C.	-	n.s.	0.52	0.55	0.67
F.C.1	n.s.	-	0.55	0.55	0.49
F.C.2	0.52	0.55	-	0.88	0.67
F.C.3	0.55	0.55	0.88	-	0.81
F.C.4	0.67	0.49	0.67	0.81	-

n.s.: not significant

S.C.: Stance configuration, F.C.: Fall configuration

(Table. 1)

4. 考察、結語

書式は δ が大きくなるほど、臨床的には側方転倒から後側方に転倒する条件となり、側方転倒よりも後側方に転倒する方が有意に弱い外力で骨折が発生することが示唆された。

各条件間の予測骨折荷重の相関性は、有意にあるものの相関性は低く、個々の患者の大腿骨近位部の強度を正確に評価するためには、複数の条件で評価すべきであると考えられた。

転倒条件 1 以外の転倒条件ではすべて転子部骨折が予測された。Hirsch ら[6]は、頸部内側骨折が発生するためには頸部軸方向からの圧縮力が必要であると報告しており、彼らの報告は我々の結果を支持するものである。頸体角は $120 \sim 130^\circ$ 程度といわれており、転倒条件 1 は、頸部内側骨折を引き起こす可能性がある荷重方向であると考えられた。大腿骨の形態学的特徴に左右差がない[7]と仮定すると、立位条件や転倒条件 1 を除いた転倒条件では、患者の形態的特徴によらず方向のみで骨折型が決定する可能性があった。しかし転倒条件 1 では、個々の患者の形態的相異によって異なる骨折型が発生する可能性が示唆された。

荷重方向による予測骨折荷重の変化に関しては、Keyak ら[4]の報告がある。しかし、彼女らの報告では、対象が 4 例のみで統計学的な検討がなされていなかった。また、骨折部位の相異に関して言及されていなかった。本研究は、大腿骨近位部骨折をより効率よく予防する対策を確立するために資する知見を得ることに貢献すると考える。

文献

- 1) Bessho et al., J Biomech 1745-53. 2007
- 2) Keyak et al., J Biomech 31, 125-133. 1998
- 3) Keller., J Biomech 27, 1159-1168. 1994
- 4) Keyak et al., J Orthop Res 19, 539-544. 2001
- 5) Fujii., Nippon Seikeigeka Gakkai Zasshi 61, 531-541. 1987
- 6) Hirsch et al., J Bone Joint Surg Br 42, 633-640. 1960
- 7) Boston., Injury 14, 207-210. 1982

09(XVIII)-98

CT・CAD/有限要素法解析を用いた Lag screw 刺入高位による

大腿骨頸部の応力・ひずみの検討

○松本卓也^a, 大西五三男^a, 別所雅彦^a, 大橋暁^a, 金子雅子^a, 飛田健治^a, 中村耕三^a

^a 東京大学医学部整形外科

Assessment of the Lag Screw Bone Interface Using a CT and CAD Based Finite Element Analysis

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

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

The purpose of this study was to assess stress and strain at a lag screw and bone interface using computer-aided design (CAD) data for a lag screw and patient-specific 3-dimensional (3D) finite element (FE) analysis (FEA). FE models were created from 3 patients with different bone mineral density. Using CAD data for a compression hip screw system which was supplied by the manufacturer (Mizuho Co Ltd., Japan), 3D FE models of the proximal femur with lag screw and angle plate in place were constructed. The screw was inserted at the center of the femoral neck in the sagittal plane parallel to the axis. In the coronal plane, 4 different screw positions were created; just above the calcar femorale (CF); 5 mm, 10 mm, 15 mm proximal to CF individually. Linear FEA was conducted, and the minimum principal strain and equivalent stress were calculated for each of the screw height conditions. Analysis of minimum principal strain and equivalent stress showed that the high value area tended to widen in a patient with osteoporosis, and that the more proximally the screw was inserted, the area with high equivalent stress widened at CF. Therefore, in severely w patients, placement of screws must be carefully planned to avoid postoperative cut out after fixation.

Key word: hip fracture, osteoporosis, finite element analysis

【背景・目的】

高齢者の骨脆弱性に起因する大腿骨近位部骨折の患者の問題は社会的・経済的な問題だけでなく、治療上の問題として早期手術が望まれる一方で、周術期のリスクを高める合併症がありジレンマの中で治療法の選択に迫られる。手術に際しても、重度の骨粗鬆症は、通常の術後経過においてインプラントのカットアウトを引き起こし、再手術を余儀なくされる場合がある。臼井らはCHSによる手術療法は整復が良好で、ラグスクリューの位置が良ければ早期全荷重歩行が可能であると報告しており、個々の患者においてインプラントを適正に設置するための術前計画と術後のカットアウトのリスクを精度高く評価が必要である。本研究では大腿骨頸部の強度を高精

度で予測する有限要素法解析モデル[1]を応用し、患者固有の大腿骨近位部のCT dicom データとインプラントのCAD データを用いた有限要素法線形解析で、インプラント刺入高位の相違による大腿骨頸部/インプラント周囲の応力・ひずみを解析し、術後の荷重歩行によるカットアウトの危険性を予測・評価することである。

【対象と方法】

症例は骨粗鬆症骨折例として大腿骨転子部骨折を受傷した83歳女性、骨粗鬆症非骨折例として未治療の原発性骨粗鬆症患者の66歳女性、非骨粗鬆症例として大腿骨骨髄炎後の30歳女性の3例。使用するインプラントは手術手技としてスクリュー位置を最初に設定しプレートを設置するCHSを選択し

た。各症例に対し健側の大腿骨近位部を 2mm slice で定量的 CT を撮影。QCT Pro を用いて大腿骨頸部の骨密度(vBMD)を計測。

有限要素モデル作成・解析のソフトウェアに RCCM 社製 MECHANICAL FINDER を用いた。各症例につき CT 画像上で閾値処理し解析対象となる健側大腿骨近位部を抽出、3次元構築し、大腿骨転子部骨折の観血的整復内固定術を模擬して、頸部から骨頭直下まで瑞穂医科工業製の CHS・lag screw を大腿骨頸部の前後方向では中央かつ頸部骨軸に平行に、冠状面で lag screw 位置が、頸部最遠位(calcar 直上)のもの、頸部最遠位から 5mm、10mm、15mm 近位に設置し、各々に plate を骨幹部に取り付けたモデルを作成した。(図 1)

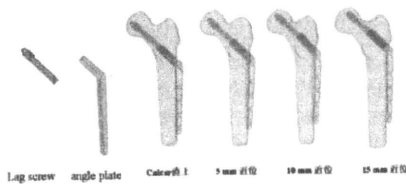


図 1 lag screw, angle plate とスクリュー刺入高位別の有限要素モデル

各有限要素モデルは大腿骨の海綿骨では 1~4 ミリの四面体要素、皮質骨外層では 0.4mm 厚の正三角形要素の皮質シェルを構築、screw, plate の金属材料は 1~4 ミリの四面体要素のみでシェル要素を用いなかった。各要素の材料特性は要素位置に対応する CT 値から骨密度を算出し、Keyak[2](1998)、Keller[3](1994)らの理論に基づいた不均一材料、金属材料は Ti6Al4V チタン合金のものを用い均一材料とした。金属材料と骨界面の境界条件は完全固着、screw と plate の境界はギャップ要素を用いた。荷重条件および拘束条件は、片脚に全体重をかけた体勢を模擬した条件を設定、980N の荷重をかけた。各有限要素モデルに対し線形解析を行い各症例について screw 高位別に相当応力、最小主ひずみ比較検討した。

【結果】

1. 骨密度の比較

骨粗鬆症骨折例、骨粗鬆症非骨折例、非骨粗鬆症例の大腿骨頸部の vBMD は各々 157.3 mg/cm³, 260 mg/cm³, 321.2 mg/cm³ であった。

2. 最小主ひずみ分布

Screw 位置が calcar 直上より近位にあるほど大腿骨頸部における screw 周囲の最小主ひずみの絶対値および大腿骨頸部基部における相当応力が増加する傾向は若年例、骨粗鬆症例、骨折例の 3 例とも同様の傾向があった。しかし、応力・ひずみの絶対値が高い範囲は骨折例、骨粗鬆症例、若年例の順に少なくなる傾向にあった。(図 2)

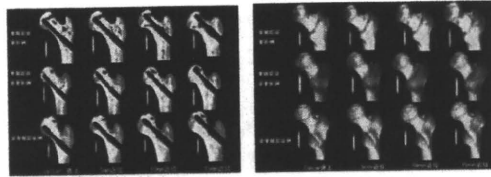


図 2 スクリュー刺入高位による最小主ひずみ分布(左)と相当応力分布(右)

【考察】

本研究結果より 3 例のうち骨密度が低いほど相当応力、最小主ひずみの絶対値ともに高くなる傾向にあるため、骨密度が低い症例ほどカットアウト予防のために刺入部位のより精確な決定を行う必要がある。大腿骨転子部骨折治療後の retrospective な臨床研究からカットアウトの予防のためにスクリューの設置位置や金属材料の相違、術後の荷重歩行について多くの報告がある。患者固有の解析モデルを作成できる本法を用いて、Gamma nail type などの種々のインプラントを検討することや骨折側のデータを利用して実際に骨折を整復・手術した状態の有限要素法モデルを作成し解析することによりより精細な術前計画や術後のリハビリ計画として発展させたいと考える。

09(XIII)-69 CT/有限要素法解析を用いた創外固定抜去後骨欠損例の経時的骨強度予測

○大橋 暁^a, 大西 五三男^a, 松本 卓也^a, 別所 雅彦^a, 金子 雅子^a, 飛田 健治^a, 松山 順太郎^a, 岡崎 裕司^b, 佐藤 和強^b, 中村 耕三^a

^a 東京大学医学部整形外科, ^b 都立府中病院整形外科

Prediction of strength of the bone with a defect using CT based finite element method -Strength change with time after removal of external fixator-

S. Ohashi^a, I. Ohnishi^a, T. Matsumoto^a, M. Bessho^a, M. Kaneko^a, K. Tobita^a, J. Matsuyama^a, H. Okazaki^b, W. Sato^b, K. Nakamura^a

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

^b Department of Orthopaedic Surgery, Tokyo Metropolitan Fuchu Hospital, Tokyo, Japan

Abstract: CT-based finite-element method (FEM) was carried out to evaluate strength and strain change over time of the bone with a defect after external fixator removal. With the CT images of the 41-year-old male patient with a bone defect after tibia fracture, the FEM models of bilateral tibiae were created and axial compressive load was applied on each tibia plateau. The non-linear FEM analysis showed predicted fracture load was 760kgf for the healthy side tibia and 135kgf (one month post removal), 265kgf (four months), and 300kgf (eight months) for the tibia with a defect. The predicted load, with which minimum principal strain exceeds -3000 microstrain, the optimum strain limit, was 40kgf (one month), 85kgf (four months), and 125kgf (eight months), respectively. We made patient start from partial weight bearing to full weight bearing step by step according to these results. We believe this patient specific CT-based FEM is useful to decide bearing weight of patients from predicted strain at fracture site as well as from predicted fracture load.

Key words: Finite element analysis, Bone defect, Strength prediction, Strain distribution, Fracture

背景および目的

骨延長・骨折後の強度判定は臨床において、通常、X線写真、CT画像などを用いた定性的形態評価による事が多い。今回、創外固定抜去後骨欠損例のCT画像から患者固有の3次元有限要素モデルを作成し、構造強度解析を行うことにより、定量的に骨癒合・骨欠損部の強度を経時的に定量評価を行い、荷重量決定の指針とした。

症例と方法

41歳男性。交通事故にて左脛腓骨遠位開放骨折(Gustilo III-B)を受傷。近医にて緊急に洗浄・デブリードマンを行い3週後脛骨ORIF(観血的整復内固定術)を行ったが、軟部組織が壊死し当院を紹介受診。骨髄炎の診断にてプレート抜去、血管柄付骨移植術を施行し、イリザロフ創外固定術を行った(Fig.1)。術7ヶ月後より遠位ハーブピン周囲に潰瘍が形成され翌月創外固定を抜去した(Fig.2)。抜釘時患者体重が90kgあり、また、脛骨後方に骨欠損が残存しており、荷重可能量の検討のため、抜釘後1ヶ月、4ヶ月、8ヶ月にそれぞれ骨量ファントム(B-MAS200; 京都科学、京都)と共にCT撮影(Aquilion super4, Toshiba medical systems)(撮像条件: 120kV, 150mA, continuous 1.0 mm thick slices, 0.45 mm pixels, 512 by 512 matrixes)を行い、CT画像を基に3次元有限要素モデルの作成・強度解析を行った。

スライス厚1mmのCT画像から、健側・患側脛骨を抽出し、3次元有限要素法モデルを作成した(Fig.3)。皮質骨および海綿骨に対して2ミリの四面体要素(ソリッド)、皮質骨外層に対して0.4ミリ厚の三角形要素(シェル)を用い、advancing front法にてメッシュを行った。骨は不均質材料とし、各要素の材料特性は、要素位置に対応するCT値から骨密度を算出し、Keyakら²⁾、Kellarら³⁾の理論に基づいてヤング率と降伏応力を算出、ポアソン比は0.4とした¹⁾。

要素破壊を以下のように定義した。引張側は脆性材料として最大主応力説に基づき、最大主応力が臨界応力を越えた場合に破壊が起こることとした。圧縮側は、モデル骨を弾塑性として降伏と圧壊をそれぞれ定義し、降伏はDrucker-Prager相当応力が降伏応力以上となった場合に、破壊は最小主歪みが $-10000 \mu \epsilon$ 以下となった場合に起こることとした。骨折は、少なくとも1要素のシェルに破壊が発生した場合と定義した¹⁾。

荷重・拘束条件は、脛骨下端部を完全拘束し、脛骨高原関節面より骨軸方向へ荷重を加え、5kgfのステップにて1000kgfまで非線形解析を行った。節点数は70,189~73,129、要素数は399,762~416,782、解析時間は約170時間であった。

100kgf 荷重時の変形、予測骨折荷重量と部位、100kgf 荷重時における最小主ひずみの分布を検討した。また、各荷重量における最小主ひずみの絶対値の最大値を計測し、3000 microstrain ($\mu\epsilon$) をその値を超えた荷重を求めた。

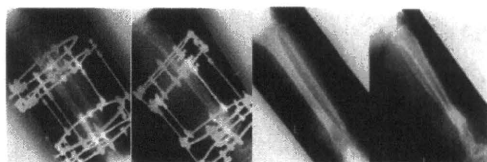


Fig. 1 (左) 創外固定期間中の単純レントゲン正面・側面像
Fig. 2 (右) 創外固定除去後の単純レントゲン正面・側面像

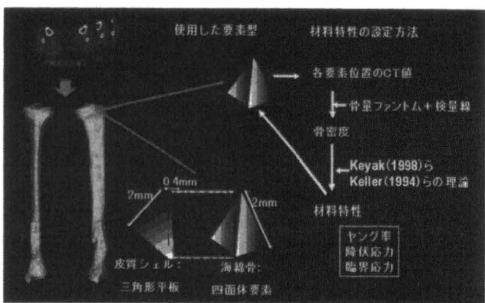


Fig. 3 CT画像ベース3次元有限要素法モデル作成の概要

結果

変形図

荷重により、脛骨は患側健側共に前方凸の変形を呈した (Fig.4A)。

予測骨折荷重量と部位

骨折荷重は、健側脛骨では760kgf (骨折部位: 脛骨遠位部)であった (Fig.4B)。患側脛骨では135kgf (抜釘後1ヶ月)、265kgf (抜釘後4ヶ月)、300kgf (抜釘後8ヶ月)であった。骨折部位は、抜釘後1ヶ月と4ヶ月では骨欠損部であり、抜釘後8ヶ月では、脛骨近位部であった。

最小主ひずみ分布

100kgf 荷重時の脛骨中央矢状断面における最小主ひずみ分布を Fig.5 に示す。近位部海綿骨部および骨欠損部においてひずみ量が健側に比し患側が高かった。3000 $\mu\epsilon$ を超える赤の領域が全体的に経時的に減少していた。患側脛骨骨欠損部において最小主ひずみ絶対値の最大値が3000 $\mu\epsilon$ を超えたのは、40kgf (抜釘後1ヶ月)、85kgf (抜釘後4ヶ月)、125kgf (抜釘後8ヶ月)であった。これらの結果をもとに、患者の部分荷重を40kgfを超えない荷重より段階的に開始した。全荷重開始後4ヶ

月 (抜釘後12ヶ月) の現時点で再骨折等は起こっていない。

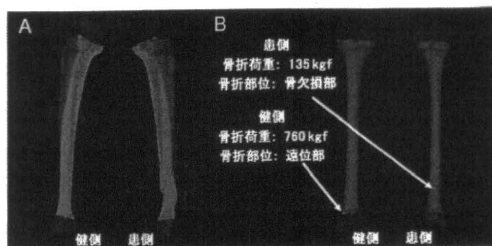


Fig. 4 A 100kgf 荷重時の変形図 (側面像、10倍表示)
B 骨折荷重と骨折部位 (抜釘後1ヶ月、後面像)

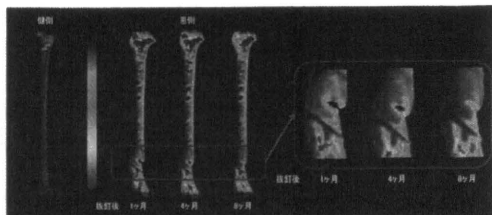


Fig. 5 100kgf 荷重時の最小主ひずみ分布
(左: 健側脛骨全長、右: 患側脛骨全長および遠位拡大図)

考察

Frost⁴⁾は、1000~3000 $\mu\epsilon$ のひずみが骨量を増加させる至適ひずみ量 mild overload window であり、3000 $\mu\epsilon$ を超えるひずみ量は overload であるとしている。今回、下腿創外固定後の荷重量決定にCT/有限要素法解析を用いたが、予測骨折荷重のみならず至適ひずみ量より荷重量を決定することも可能である本法は有用であると考え

結論

CTデータを基にした患者固有有限要素法解析モデルにて創外固定除去後の患者下腿骨の構造解析を非線形解析にて行い、予測骨折荷重および至適ひずみ量を与える荷重上限値を求めた。患側は健側に比べていずれも低値を示したが、経過と共に増大した。結果を基に部分荷重を開始した。

文献

- 1) Bessho M, et al. J Biomech. 2007.
- 2) Keyak JH, et al. J Biomech. 1998.
- 3) Keller TS. J Biomech. 1994.
- 4) Frost HM, Bone Miner. 1992.

第83巻

第2号

日本整形外科学會雜誌

NIPPON SEIKEIGEKAGAKKAI ZASSHI

The Journal of
the Japanese Orthopaedic Association

Vol. 83 No. 2 February 2009

Proceedings of the 82nd Annual Meeting
of the Japanese Orthopaedic Association



日整会誌

社団法人 日本整形外科学会

J. Jpn. Orthop. Assoc.

1-Pol-99

CT/有限要素法解析による腰椎椎体骨強度に対する
ラロキシフェンの効果

石橋 英明¹ 大西 五三男² 松本 卓也² 別所 雅彦²
中村 耕三²

【目的】ラロキシフェンは椎体骨折の発生率を半減するが、骨密度増強効果はビスフォスフォネートに比べて低く、ラロキシフェンの治療効果は骨密度に反映されにくい。一方、CT/有限要素法解析は正確に椎体骨強度を評価できると考えられている。われわれはこの方法を用いて、ラロキシフェンの骨強度に対する効果を調べ、骨密度および骨代謝マーカーの変化とともに検討した。

【方法】対象は、ラロキシフェン(60 mg/日)を処方された原発性骨粗鬆症女性患者9例(平均年齢65.7歳)である。内服開始前、6カ月後、12カ月後にCT/有限要素法による腰椎椎体骨強度(L2)、DEXAによる腰椎骨密度(L2およびL2-4)、尿中NTx、血中骨型アルカリフォスファターゼ(BAP)を測定した。CT/有限要素法解析による骨強度評価は、定量的CTのDICOMデータから三次元骨強度解析モデルを作成し、推定圧縮骨強度をkg単位で算出した。骨強度、骨密度および骨代謝マーカーの変化率を算出し、骨強度および骨密度の変化率を比較した。

【結果および考察】開始時の平均椎体骨強度は298.8 kgであった。6カ月後および12カ月後の骨強度の増加率は21.8+/-17.5%および16.0+/-17.5%で、両時点ともに有意に増加していた。一方、6カ月後および12カ月後の骨密度増加率は、L2-4は1.8+/-3.8%および2.2+/-3.0%、L2は1.4+/-4.9%および2.2+/-4.9%で増加傾向にはあったが有意な増加はなかった。6カ月後における尿中NTxおよびBAPの変化率は-19.4+/-33.9%および-10.4+/-33.8%で、開始前に比べて低下していた。ただし尿中NTxは2例において増加しており、尿中NTxが減少した例、つまりラロキシフェンによる骨吸収抑制効果が確認された7症例においては、6カ月後の骨強度の増加率は30.1+/-11.9%とさらに高値を示した。

【結語】CT/有限要素法解析による腰椎椎体骨強度は、ラロキシフェンの6カ月間および12カ月間の内服により有意に増加し、骨密度より変化率は大きかった。この方法を用いた骨強度評価は、ラロキシフェンの骨折予防効果を骨密度より鋭敏に検出できる可能性がある。

¹(医)伊奈病院整形 ²東大大学院整形

1-Pol-100

骨粗鬆症性脊椎に対するラロキシフェンによる治療効果の無作為前向き研究 —有限要素法を用いた骨強度解析—

石井 千春¹ 金谷 幸一¹ 島本 周二¹ 南郷 脩史²
伊東 昌子³ 加藤 義治¹

【目的】骨強度の評価方法として、有限要素法(FEM)の有用性が報告されている。本研究では脊椎海綿骨に対するラロキシフェンの治療効果をFEMにより検討した。

【対象および方法】対象は未治療の原発性骨粗鬆症女性13例で、C群:アルファカルシドール0.5 μg+Ca 800 mg 6例(平均77歳)と、ラロキシフェン60 mgを加えたR群:7例(平均72歳)に振り分けた。治療前と治療1年後に腰椎X-P、DXA法による腰椎骨密度(BMD)、腰椎MDCT(Multi-Detector Row Computed Tomography)、骨代謝マーカー(BAP、尿中NTx)、Ca調節因子(i-PTH)を検討した。MDCTデータより投与前後の椎体の位置合わせをした後海綿骨部分を抽出し、FEM解析でBMC/TV、破壊荷重、弾性定数、応力分布につき検討した。統計解析はMann Whitney U検定およびpaired t検定を行った。

【結果】新規椎体骨折はC群に1例、追跡椎体の圧潰はなかった。各計測値の治療前平均値では尿中NTx(C群70.03、R群49.01 nmol BCE/mmol)以外は有意差を認めなかった。治療前後の平均変化率はBMD:C群-0.33%、R群4.99%、BAP:C群-2.81%、R群-18.54%、尿中NTx:C群-20.03%、R群-15.44%、i-PTH:C群-20.36%、R群-10.92%、BMC/TV:C群-11.61%、R群10.42%、破壊荷重:C群-6.61%、R群4.45%、弾性定数:C群-16.31%、R群15.19%であった。骨代謝回転は両群で低下していたが、BMD、BMC/TV、破壊荷重、弾性定数はR群のみで増加していた。BMDとBMC/TVはR群のみ治療前後で有意差を認めた。またBMC/TVは治療前後の変化率で両群間に有意差を認めた。

【考察】MDCT/FEMでの値はDXA法より詳細な変化をとらえることができる。FEMでは破壊荷重の増大、弾性定数の増加など骨強度の改善傾向がみられ、作成モデルではR群において負荷に対して有効な骨梁が増加し、応力が分散している所見が認められた。ラロキシフェンは椎体の骨密度増加と骨折リスクを低下させることが指摘されているが、今回の所見は、ラロキシフェンの海綿骨に対する骨質を改善するような治療効果の特徴を示唆している可能性がある。

¹東女医大整形 ²ラットクシステムエンジニアリング株式会社
³長崎大学医学部・歯学部付属病院放射線部

1-Pol-101

CT非線形有限要素法を用いた大腿骨近位部と腰椎の骨強度評価について

別所 雅彦 大西 五三男 松本 卓也 大橋 暁
金子 雅子 飛田 健治 松山 順太郎 中村 耕三

【目的】CT/有限要素法(FEM)による骨強度評価は、臨床では主に大腿骨と腰椎で行われてきているが、大腿骨と腰椎を同一施設で同一の解析ソフトウェアを用い強度予測を行っている報告はわれわれ以外にはない。CT/FEMは解析等に時間が必要なため、多くの患者で複数部位の評価を行うためには限界がある。本研究の目的は、骨粗鬆症患者の大腿骨と腰椎をCT/FEMで骨折荷重予測し、先行研究の実証試験と比較し臨床での有用性検討すること、互いの予測骨折荷重の相関性を評価し、CT/FEMが代表的な一部位を測定することによって他部位の強度評価を行うことのできるかどうか検討した。

【方法】対象は、女性の原発性骨粗鬆症患者40名(平均70.1歳)の右大腿骨と第2腰椎とした。倫理委員会の承認のもと患者の同意を得て、大腿骨近位部と第2腰椎のQCT撮影を行い、三次元解析モデルを作成した(Bessho et al. 2007, Imai et al. 2006)。荷重拘束条件は、大腿骨近位部に対して立位を模擬した条件と転倒を模擬した条件、第2腰椎は単軸圧縮を模擬した条件を設定した。各荷重拘束条件による強度を比較し相関性を検討した。Pearson's testを用い、有意水準を0.05以下とした。

【結果】立位条件・転倒条件における予測骨折荷重平均はそれぞれ、3910 N、1290 Nであった。第2腰椎の予測骨折荷重平均は、3010 Nであった。立位条件と第2腰椎の予測骨折荷重の相関性は $r=0.472$ ($p=0.0018$)、転倒条件と第2腰椎の予測骨折荷重の相関性は認められなかった($p=0.10$)。立位条件と転倒条件の予測骨折荷重の相関性は $r=0.647$ ($p<0.001$)であった。

【考察・結論】本研究の予測骨折荷重値と大腿骨・腰椎の圧縮試験を行った先行研究(McBroom et al. 1985, Eckstein et al. 2002)とそれと比較して、値に矛盾はなく、本法は臨床に応用可能であると考えられた。また、腰椎と大腿骨には相関性が認められ、大腿骨近位部の立位条件の骨折荷重予測のみで、腰椎の骨折リスク・転倒条件での予測骨折荷重が評価可能であることが示唆された。

東大整形

1-Pol-102

骨強度評価法を用いた閉経後女性における椎体骨折リスクおよびアレンドロネート効果の評価

今井 一博¹ 大西 五三男² 山本 精三³ 中村 耕三²

【目的】骨強度評価法であるCT/有限要素法を用いて、1)椎体骨折リスク、2)アレンドロネート(ALN)効果を評価し、DXAによる骨密度(BMD)と比較検討した。

【対象・方法】第2腰椎(L2)に骨折などの病変がない閉経後女性を対象として、CT/有限要素法によりL2を解析した。1)外傷性椎体骨折既往者を除外した104人(平均年齢71.3歳：椎体骨折なし75人、非外傷性椎体骨折29人)に対して非外傷性椎体骨折を判別する椎体強度値(VSI: vertebral strength index)を求め、ロジスティック回帰分析(年齢・体重を補正)にて骨折リスクのオッズ比を求めた。2)骨粗鬆症に対しALNを12カ月以上投与した33人(平均年齢76.5歳)において薬剤効果を評価した。

【結果】1)骨折判別VSIは1.95 kN(感度75.9%・特異度78.7%)で体重の3.94倍に相当した。ROC曲線下面積は0.822で、有意にBMD(面積0.713, $p=0.0010$)より高かった。1標準偏差の変化量に対するオッズ比はVSIが6.71($p<0.0001$)、BMDが1.83($p=0.0238$)であった。2)ALN投与前と比較した変化率は3カ月でVSIが+10.2%、6カ月でVSIが+16.7%、BMDが+3.7%、12カ月でVSIが+26.9%、BMDが+7.5%であった。投与3カ月でのVSI変化率と尿中NTx変化率は相関がなく($r=0.295$, $p=0.0955$)、投与12カ月でのVSI変化率とBMD変化率には弱い相関($r=0.481$, $p=0.0046$)があった。CT/有限要素法による骨力学特性分析では、薬剤投与前に圧縮ひずみが著しく骨折が生じやすい領域に投与後に圧縮ひずみの減少がみられた。また投与12カ月で、骨密度が椎体中央部で8.3%($p=0.0013$)増加に対し皮質辺縁部で13.6%($p=0.0004$)増加と、皮質近傍優位に薬剤効果がみられた。

【考察】CT/有限要素法によるVSIが骨折リスク予測因子として有用であることが示唆された。ALN効果の評価において、VSIは骨密度に加え密度分布を評価できるが骨代謝を評価できないと考えられた。ALN効果として、皮質近傍の密度が増加するような骨基質分布の変化が生じ、圧縮応力の集中が軽減して圧縮ひずみ分布が改善し、椎体強度が増加したと考えられた。

¹東芝病院スポーツ整形 ²東大大学院整形 ³虎の門病院整形

1-P01-103

CT 有限要素法による大腿骨近位部の骨強度評価—骨強度基準値作成に関する予備的研究—

金子 雅子¹ 大西 五三男¹ 別所 雅彦¹ 松本 卓也¹
大橋 暁¹ 飛田 健治¹ 中村 耕三¹ 林 直人²

【目的】定量的 CT データをもとにした有限要素法を用いて、骨の形態や構造、局所の力学特性を加味した骨強度の正確な定量予測が可能となってきた。現状では強度値に関して年齢別の基準値が皆無である。今後、本法を臨床で実用化のため、基準値に関する年齢別データが必須である。本研究は、検診目的で撮像およびデータ保存された PET-CT の DICOM Data を用い、有限要素法解析により、検診者における骨強度値の年齢別分布の作成を試みた。

【対象と方法】東大病院検診部で検診をした 40 歳以上の男性 175 名(平均 54.8 歳 40-87 歳)、女性 80 名(平均 60.5 歳 41-82 歳)を対象とし、除外基準に当てはまる患者は除外した。検診のため PET-CT で撮像した後に記録・保存された右大腿骨近位部の DICOM Data を用い、三次元有限要素モデルを作成、同時に撮像された骨量ファントムのデータを利用した。荷重拘束条件を立位条件と転倒条件の 2 条件で、非線形解析を行った。得られた骨強度値の各年齢における分布図の作成、検討を行った。

【考察、結論】大腿骨近位部の骨強度値分布に男性は、立位条件では年齢に対し $y = -29.514 \times + 9155.8$ 相関係数 $R^2 = 0.0534$ の回帰直線 ($p = 0.0021$) の減少があった。転倒条件においては年齢に対して $y = -2.4228 \times + 2352.6$ 相関係数 $R^2 = 0.0026$ の回帰直線 ($p = 0.4996$) の減少があった。女性は立位条件では年齢に対し $y = -46.462 \times + 8380.6$ $R^2 = 0.1477$ の回帰直線 ($p = 0.0004$) の減少があった。転倒条件においても年齢に対して $y = -11.211 \times + 2565.7$ $R^2 = 0.1218$ の回帰直線 ($p = 0.0015$) の減少があった。骨強度値は、男性では立位条件、女性では立位条件、転倒条件で年齢と有意な相関を認めた。検定はピアソンの相関係数を用いた。今後、骨粗鬆症患者、大腿骨近位部骨折の患者に対し、同様の解析を行っていくことにより、骨折リスクの予測に有用であると考えられる。従来の検査法 (DXA, QUS) との比較を行い、相関性の解析を行っていくことで、骨密度と骨強度との相関性の解析に有用であると考えられる。

¹東大整形 ²東大病院 22 世紀医療センターコンピュータ画像診断学/予防医学講座

1-P01-104

Subtraction 法を用いた骨粗鬆症腰椎経時的評価の試み

馬渡 太郎 三浦 裕正 岩本 幸英

【目的】骨代謝動態を明らかにする手法として、テトラサイクリン、カルセイン等の薬物を用いて骨を経時的に標識し、組織切片を作成して顕微鏡下に観察する方法が古くから行われてきた。この手法では、mineral formation rate など、貴重な骨動態に関する情報が得られるが、二次元的観察であり、組織切片作成時のある程度の破壊は不可避であること、顕微鏡下の観察であるため対象物のサイズに制限があること、などの問題点が挙げられる。われわれは経時的に臨床用 CT を用いて撮像した骨情報を三次元的に重ね合わせ、差分演算 (subtraction) を行うことで、骨の増加および減少を可視化することを想起した。

【方法】骨粗鬆症患者の第三腰椎全体を同意を得て臨床用 QCT を用いて平面分解能 352 micron にて撮像した。経時的に撮像した同一患者の第三腰椎を三次元的に superimpose し、その差分データを作成する。すると、{(endpoint)-(baseline)} で添加された骨が、また {(baseline)-(endpoint)} で消失した骨が算出される。これに識別色をつけ、元のデータ上に overlay 表示させた。

【結果】骨粗鬆症症例では、海綿骨領域を中心として明らかな骨減少が生じている様子が観察され、添加された骨は少なかった。それと比較すると、alendronate 投与症例では、減少した骨は肉眼的に明らかに少なく、添加された骨は多かった。

【考察】骨粗鬆症症例の椎体においては、内部構造は必ずしも均質ではないことが報告されており、力学的強度に寄与していることが推察されるが、その詳細は経時的骨動態についてはよくわかっていない。superimpose する際に骨表面を輪郭を指標とせざるを得ない点や、分解能の限界、superimpose する際の誤差、被爆などの問題があるが、本方法は閉経後骨粗鬆症や二次性骨粗鬆症における骨動態の精査や、薬物治療の効果判定の 1 つの手段として、有用ではないかと考えられた。

九大大学院整形

第 83 卷

第 3 号

日本整形外科学會雜誌

NIPPON SEIKEIGEKAGAKKAI ZASSHI

The Journal of the Japanese Orthopaedic Association

Vol. 83 No. 3 March 2009

Proceedings of the 82nd Annual Meeting
of the Japanese Orthopaedic Association



日 整 会 誌

社団法人 日本整形外科学会

J. Jpn. Orthop. Assoc.

2-Po2-94

Universal-Bar-Link 創外固定器を用いた変形矯正における固定器設置位置・角度の誤差許容範囲の検討

大橋 暁 大西 五三男 松本 卓也 飛田 健治
別所 雅彦 松山 順太郎 金子 雅子 中村 耕三

【背景】われわれは、骨延長・変形矯正のための新規の片持ち式創外固定器である Universal-Bar-Link 創外固定器 (UBL) を開発した。この創外固定器は、変形骨が仮想球中心を中心とした球運動を行うことで角度矯正を、また、カーボンシャフトに沿って移動することで骨延長を実現するものである。そのため、変形骨の変形中心と仮想球中心位置が一致すること、mechanical axis に対してカーボンシャフトを平行に配置すること、以上の2点について UBL を設置する際に正確に行うことが重要である。本研究では UBL の position と posture の許容される設置誤差を本創外固定器専用開発したナビゲーションソフトにてシミュレーションし検討した。

【方法】変形骨モデルに対して CORA を算出し、理想的に UBL 創外固定器を取付けた状態で正常骨を参照しながら整復シミュレーションを行い (NL)、整復後の mechanical lateral distal femoral angle (mLDFA), lateral proximal femoral angle (LPFA) を測定した。また、UBL 設置の位置を三次元空間上 6 方向にそれぞれ 5 mm ずつ偏位させた整復シミュレーション (Position)、UBL 設置の姿勢を正面像・側面像において 5° 傾けた整復シミュレーション (Posture) を NL と同様に行い、mLDFA, LPFA を測定し NL の測定値との差をそれぞれ算出した。

【結果】Position と NL の差の絶対値 (平均±標準偏差) は、mLDFA : $0.18 \pm 0.12^\circ$ (最小 0.05° , 最大 0.35°)、LPFA : $0.18 \pm 0.13^\circ$ (最小 0.06° , 最大 0.36°) であった。また、Posture と NL の差の絶対値は、mLDFA : $1.46 \pm 0.67^\circ$ (最小 0.69° , 最大 1.93°)、LPFA : $0.51 \pm 0.08^\circ$ (最小 0.46° , 最大 0.60°) であった。

【考察】Paley らの報告では mLDFA, LPFA は正常値がともに $85^\circ\text{--}90^\circ$ であり、±約 2° の残存角度は許容されると考えられる。今回の結果から、UBL の目標からの設置位置・角度誤差はそれぞれ 5 mm・5° 以内であれば臨床的に許容範囲内であると考えられた。この許容範囲は手術において比較的容易に達成できるものであり、UBL は臨床的に十分有用であると考えられる。

東大大学院整形

2-Po2-95

創外固定器で治療した下肢長管骨のインピーダンス値の検討

吉田 隆司 金 郁喆 岡 佳伸 山田 尚武
琴浦 義浩 久保 俊一

【目的】下肢長管骨の骨成熟過程における電気抵抗値 (インピーダンス値 : Z 値) の経時変化と、治療法の違いによる Z 値の変化、および大腿骨と脛骨の単位抵抗値について検討した。

【対象および方法】対象は 9 例 11 肢 (男 4 女 5, 右 8 左 3, 大腿骨 4 脛骨 7) で、平均年齢は 22.2 歳 (11-58 歳) であった。用いた創外固定器は EBI 社製 6, Orthofix 2, Ilizarov 2 (絶縁処置), TSF 1 肢で、アライメント矯正を 5, 脚延長を 4, 固定のみを 2 肢に施行した。Z 値の計測は、治療部位を挟んだ最短の近位と遠位 2 本の鋼線を用いた。病態が症例ごとに異なるため、初回測定値を基準とし、最終値と最高値の上昇率、および矯正や延長の終了時から抜釘までの期間を 1 とした際の最高値に達する病期を算出し検討した。また、鋼線間距離と Z 値から算出された単位距離あたりの抵抗値について大腿骨と脛骨間を比較検討した。統計学的検索には Mann-Whitney U test を用いた。

【結果】10 肢の Z 値は骨成熟過程で上昇し、8 肢の最終値は基準値より上昇していた。最高値は、 1.22 ± 0.23 (平均値±標準偏差) 倍に有意に上昇し ($p < 0.01$)、病期は固定期間の 0.69 ± 0.27 であった。治療法の違いでは、最高値が固定 > 脚延長 > 矯正の順に高く、その最高値の病期は矯正 < 脚延長 < 固定で遅い傾向にあった。大腿骨の単位抵抗値は 39.3 ± 10.5 、脛骨は $66.8 \pm 21.3 \Omega/\text{cm}$ であった ($p < 0.059$)。

【考察】固定や延長例など仮骨形成が大きい症例では上昇率が高く、後期に最高値になる傾向があったのに対し、アライメント矯正では仮骨形成が小さく最高値が低い傾向にあった。固定のみが脚延長よりも Z 値の上昇率が高いのは、家兎を用いた実験的研究 (吉田, 日整会基礎, 2008) と同様の結果であった。また、脛骨は大腿骨よりも横径が小さく、周囲軟部組織も少ないため、単位抵抗値が大きくなったと考えた。Z 値が経時的に上昇し最高値に到達した後減少する症例や、上昇率 20% 以上となる症例では、良好な骨成熟過程で創外固定除去可能な症例と考えた。

京府医大大学院運動器機能再生外科学

3-J-S46-3

定量的CTを用いた有限要素法による大腿骨近位部の力学特性・強度の評価

大西 五三男 別所 雅彦 松本 卓也 金子 雅子
中村 耕三

大腿骨近位部骨折のリスクは、画像診断や骨密度測定にて評価され、ある程度リスク予測が可能である (Faulkner KG et al. 1993)。さらに骨密度と形態、例えば大腿骨頸部長や頸部最小断面積を加味すると、骨折リスクをさらに良く予測できる (Cheng XG et al. 1997, Lang TF et al. 1997)。しかし、大腿骨頸部は複雑な形状をしているため、骨密度、骨形態をともに評価しても、骨強度を正確に評価するには限界がある。近年、定量的CTデータをもとにした有限要素法が、骨強度評価方法として用いられるようになったが正確性に問題があった (Keyak JH et al. 1998)。われわれは、定量的CTデータと有限要素法を利用する骨強度の予測評価法を新たに開発し臨床応用した (Bessho M et al. 2007)。本法の正確性を検討するために、新鮮死体標本を用いて、骨折強度の予測と荷重試験による骨折荷重の実験値を比較し、骨折荷重および歪の予測値と実験値は相関係数で0.9以上の高い相関を示し、また回帰直線の傾斜も1に近い高い正確性を示したことはすでに報告した。本法を大腿骨近位部の力学特性評価や強度評価に応用した。荷重・拘束条件の相違によって、大腿骨近位部の応力・歪分布は大きく変化し、その結果、各要素の応力強度比も変化し、骨折リスクの大きい部位も変化することが明らかとなった。また荷重方向の相違によって、大腿骨近位部の骨折強度が大きく異なることが明らかとなった。特に転倒方向が後方に移動するほど、強度の大きな低下があった。これは力学試験によって検討した先行研究 (Pinilla TP, 1996) と矛盾がなかった。骨吸収抑制剤を投与した患者を本法によって経過観察すると、投与後の大腿骨近位部の強度増加は、DXAの増加を上回った。また、骨量の増加は部位により不均一であり、強度を増加する部位に選択的に増加した。

東大大学院整形

3-J-S46-4

薬剤選択と薬物による予防

森 諭史

骨粗鬆症で頻発する脆弱性骨折のひとつである。部骨折は寝たきりの主要原因の1つとなっている。骨折は予防することが重要で、その有効な治療法として薬物療法がある。骨折予防を目的とした薬物については2006年にガイドラインが作製されその中、療開始基準が定められている。50歳以上の男女で骨折を有する場合、脆弱性骨折がない場合でも骨密度でYAM 70%、あるいはYAM 70%以上80%未満のアルコール摂取、現在の喫煙、大腿骨頸部骨折のいずれか1つがあれば薬物治療開始を推奨して治療薬物の選択にあたっては個々の患者の骨粗鬆症リスクに合わせて決定すべきである。既存脊椎骨折患者は既存骨折のない患者よりも骨折リスクが高いような場合には骨折抑制効果としてのエビデンスの高いビスフォスフォネート製剤、SERMなどを第一すべきである。骨密度が低下するほど脊椎骨折の発生頻度が上昇するが、集団レベルで脊椎骨折の発生頻度を調べるNORA studyでは脊椎骨折発生の絶対数が最も多い骨粗鬆症と診断される前の骨減少症レベルの骨密度であることが報告されている。このことは予防治療で骨粗鬆症と診断させる前から行うことが骨折の予防に有効であることを示唆している。

活性型ビタミンDは筋、神経系など骨以外に作用し、大腿骨頸部骨折の発症機転として重要な転倒の回数減少が報告されている。活性型ビタミンDは骨格による骨折予防が期待されている。

聖隷浜松病院骨・関節外科

第83巻

第8号

日本整形外科学會雜誌

NIPPON SEIKEIGEKAGAKKAI ZASSHI

The Journal of
the Japanese Orthopaedic Association

Vol. 83 No. 8 August 2009

Proceedings of the 24th Annual Research Meeting
of the Japanese Orthopaedic Association



日整会誌

社団法人 日本整形外科学会

J. Jpn. Orthop. Assoc.

2-E-5

GFP reporter を用いたマウス骨折治癒過程における woven bone 形成の評価

牛久 智加良¹ Douglas J. Adams²
David W. Rowe³ 斎藤 充¹ 丸毛 啓史¹

【目的】われわれはこれまでに、ラット1型コラーゲン(Col 3.6)およびヒトオステオカルシン(hOC)プロモーター領域を使い、骨芽細胞の分化段階に応じてGFP(Green fluorescence protein)が発現するDual Transgenic(Tg)マウスを作製し、石灰化過程における細胞分化と基質合成の関係について報告してきた。今回、骨折治癒における仮骨の石灰化過程について同モデルを用いて解析したので報告する。

【方法】Col3.6GFPcyan, hOCGFPtpz dual Tg マウス(8週齢)の脛骨に閉鎖式骨折を作製した。骨折後7, 10, 14と30日目に脛骨を回収し蛍光顕微鏡を用いてGFPの発現を観察した。また屠殺前にXylenol orange(XO)を投与し、石灰化評価とHEおよびSafranin O染色による組織学的評価も行った。

【結果】骨折後7日目になると、仮骨部にCol3.6陽性細胞(Col3.6+)に囲まれたXO陽性の膜性骨化によるwoven bone(w/b)を認めた。10日目には、その表面に多くのCol 3.6-hOC両陽性細胞が観察され、w/bはその厚みを増していた。14日目までに軟骨は内軟骨性骨化によるw/bに置換された。この時、仮骨中心部のw/bは主にCol3.6+に囲まれていたのに対し、骨折部、new cortical shellでは主にCol3.6-hOC両陽性細胞に囲まれていた。30日目には、仮骨中心部のw/bは骨髄様組織に置換されたが、骨折部、new cortical shellではその厚みを増していた。

【考察】これまで仮骨石灰化過程は、w/b形成を放射線、組織学的に観察することで評価されてきた。しかしその過程をGFP dual Tgマウスを用いて観察すると、hOC陽性細胞に囲まれたw/bが仮骨部に残存するのにに対し、Col3.6陽性細胞に囲まれたw/bは早期に骨髄様組織に置換されることが明らかとなった。GFPトランスジェニックマウスを用いた骨折モデルでは、分化度の異なる細胞が仮骨石灰化過程に及ぼす影響を時間的に空間的に解析することが可能である。今後、骨折治癒過程に及ぼす薬剤や力学刺激などの影響を評価するモデルとして有用と考えられる。

¹慈恵医大整形 ²Dept. of Orthop. Surg., School of Medicine, Univ. of Connecticut Health Center, Farmington, CT, USA
³Dept. of Reconstructive Sciences, School of Dental Medicine, Univ. of Connecticut Health Center, Farmington, CT, USA

2-E-6

低出力超音波パルス治療の骨癒合リモデリング期に対する効果 —マイクロCTを用いた仮骨の髓腔化・皮質骨化の定量評価—

飛田 健治 大西 五三男 松本 卓也 大橋 暁
別所 雅彦 松山 順太郎 金子 雅子 中村 耕三

【背景】低出力超音波パルス(以下LIPUS)治療の骨癒合への促進効果は臨床・基礎研究から実証されている。マイクロCT(以下 μ CT)は硬組織試料の非侵襲的三次元形態評価ができ、骨折治癒過程の正確な評価が可能である。骨折のリモデリング期は仮骨の皮質骨化と共に髓腔化が起こり、骨癒合強度の回復に非常に重要であるが、これらを μ CTを用いて三次元的に定量評価した先行研究はない。

【目的】LIPUS照射がリモデリング期の仮骨に及ぼす効果を μ CTを用いて評価する。

【材料と方法】21-23週齢、体重約4kgで雄の日本白色家兔を用いた。吸入麻酔下右脛骨の骨切りを行い、2mmのgapを作成し両側式の創外固定を行った。LIPUSの照射/非照射群に分け、観察期間を4および8週とした。LIPUS照射は、術後3日より1週間に6日、吸入麻酔下に20分間行い、非照射群は照射群と同様の条件でダミーの振動子を用いて模擬照射を行った。観察終了後と殺し、仮骨の μ CT撮データを、骨量ファントムで定量化し評価した。対象部位はgapの中心1mmとし200 mg/cm³で2値化した仮骨をendosteal(以下E), intercortical (I), periosteal region (P)の3領域に分け、各領域におけるbone volume(以下BV), bone mineral content(以下BMC), BMC/BVの計測と、三次元的な二次モーメント、慣性モーメントとStress-Strain Index(以下SSI)から骨癒合強度予測を行った。LIPUS照射/非照射群の差の検定にはt検定を行った(有意水準<0.05)。

【結果】4週ではすべての評価項目で有意差が見られなかったが、8週において、LIPUS照射群は非照射群に対してBMC/BVはE, I, P共に有意に高値、BMCはEでは低下しており、I, Pで有意に高値、BVはIで有意に高値であった。また8週では二次モーメント、慣性モーメント、SSI共に有意に高値であった。

【考察】 μ CTを用いて、リモデリング期の仮骨髓腔化・皮質骨化に着目し定量評価した先行研究はない。今回の結果からLIPUSは仮骨の髓腔化・皮質骨化を促進した。またモーメント、SSIの増加からLIPUSは骨強度をより増加させることが示唆された。

東大大学院整形

日本骨粗鬆症学会雑誌
オステオポローシス ジャパン

Vol.17, No.2, 2009

Osteoporosis Japan

- 第10回日本骨粗鬆症学会 特別講演
- 第10回日本骨粗鬆症学会 イブニングワークショップ
QUSの標準化について
- 第10回日本骨粗鬆症学会 シンポジウム2
骨粗鬆症性脊椎骨折の治療
- 第10回日本骨粗鬆症学会 一般演題Highlight
- Osteoporosis Japanセミナー
内科医が診る骨粗鬆症⑤
- 座談会
骨粗鬆症治療におけるエルカトニン使用の意義
- 第4回(平成20年度)リリー研究助成成果報告
- 第9回 東京 骨・カルシウム・ホルモン代謝研究会
- CONTRIBUTION 骨粗鬆症の診断と治療
- 日本骨粗鬆症学会 会員連絡



 LIFE SCIENCE PUBLISHING

CT/有限要素法による椎体骨折リスク およびアレンドロネート効果の評価

今井一博¹⁾ 大西五三男²⁾ 山本精三³⁾
中村耕三²⁾

はじめに

骨粗鬆症の診断および治療効果判定は、従来エックス線写真・骨密度・骨代謝マーカー・新規骨折発生の抑制効果によって行われてきた。骨粗鬆症診療の目標は骨折リスクの評価および骨折の予防である。骨折リスクには骨脆弱化と転倒などの外傷があるが、近年、骨脆弱化には骨密度の低下だけではなく骨質の低下も関与しているとされ、「骨密度」と「骨質」を合わせた「骨強度」が新たな評価方法として注目されている。

有限要素法とは構造物に力が作用した時の反応をシミュレートして強度や力学特性を予測することが可能な解析法である。有限要素法による骨折予測は、おもに大腿骨近位部^{1,2)}および椎体^{3,4)}に対して行われてきた。しかしながら従来の有限要素法は、von Misesの最大剪断ひずみエネルギー説を採用し、0.2%の永久変形を降伏とするなど延性材料に使われる理論を用いているため、脆性材料である骨の破壊を適切に定義することができない、六面体要素を用いているため骨の複雑な曲面形状を構築できない、椎体の薄い皮質シェルを構築できず実際の強度に比較して著しく低く強度を予測する、といった問題があった。

骨強度および骨力学特性の解析に特化した評価法として、臨床用CT(computed tomography)データを使用したCT/有限要素法(MECHANICAL FINDER)が開発された。本法の特徴として、四面体要素を用いて複雑な曲面形状を構築、非線形解析により椎体の弾塑性を表現、海綿骨とは別に皮質シェルを構築、脆性材料に用いる理論を使用、骨折の定義が明確といった点があげられる。このCT/有限要素法により椎体強度および骨折部位を精度よく予測できることが新鮮死体標本での実証荷重試験によって示された⁵⁾。

CT/有限要素法を臨床応用するためには精度と放射線被曝が問題となる。骨梁構造を詳細に解析に反映して精度を向上させるためには、薄いスライス厚で高解像度のCT撮像を行い、細かい有限要素モデルを構築する必要がある。しかし現状の臨床用CT装置では、詳細で高解像度のCT撮像を行うと放射線被曝量が増大し、臨床応用するためには問題となる。有限要素モデルがどの程度のサイズであれば高精度に椎体強度および骨折部位を予測できるかを検証した結果、1mmサイズおよび2mmサイズでは精度が保たれていたが、3mmサイズでは精度が

Assessment of Vertebral Fracture Risk and Alendronate Therapeutic Effects by Computed Tomography Based Nonlinear Finite Element Method in Postmenopausal Women

Kazuhiro Imai : Department of Sports Medicine and Orthopaedic Surgery, Toshiba General Hospital, *et al.*

Key words : 有限要素法, 骨粗鬆症, 骨折リスク, 治療効果

¹⁾ 東芝病院スポーツ整形外科 ²⁾ 東京大学医学部整形外科 ³⁾ 虎ノ門病院整形外科