

<p>P1311</p>	<p>Analysis of the stress distribution at the Pin-bone interface of external fixation using a patient specific CT-CAD-based finite-element method</p>	<p>Ohashi, S.; Ohnishi, I.; Bessho, M.; Matsuyama, J.; Matsumoto, T.; Nakamura, K.</p>
<p>Pin loosening is one of the major complications of external fixation and assumed to occur at the site of stress concentration. The purpose of this study was to evaluate stress distribution on pins and the surrounding bone fixed with a unilateral external fixator using an originally developed CT-CAD-based finite-element method (FEM).</p> <p>After obtaining bilateral femoral CT images (120kV, 150mA, continuous 3.0 mm thick slices, 0.45 mm pixels, 512 by 512 matrixes) of the 32-year-old male patient with malunion of the left femur as well as CAD data of a unilateral external fixator, a patient specific FEM model of the mid-shaft fracture of the contra-lateral femur stabilized by the external fixator was built by creating a 21 mm defect at the mid-shaft of the femur. The bone area in the model was meshed with 2~24 mm tetrahedron elements and three nodal-point shell elements with a thickness of 0.4 mm were applied for the bone surface. Both elements contained heterogeneous linear isotropic material properties calculated from the Hounsfield unit values.</p> <p>The configuration of the fixator shaft was simplified and simulated using CAD data of a cylinder with a length of 300 mm and a diameter of 30 mm. The pins were also assumed as cylinders with a diameter of 6mm. After a fixator-pin construct was created and meshed with 2~24 mm tetrahedron elements, it was incorporated into the FEM model of the fracture fragments so that it bridged the fracture.</p> <p>Young's modulus was assigned as that of SUS316L stainless steel for the fixator shaft and that of Ti6Al4V titanium alloy for the pins. In order to simulate the contact interfacial characteristics between the pin and the bone, node-on-node gap spring elements were generated on the interface nodes. A load of 500 N was applied on the femoral head with the distal femur fully constrained to investigate stress distribution of both the bone and the pins. The average numbers of elements and nodes were 80,000 and 480,000, respectively, and the CPU time was four hours.</p> <p>The high stress concentration was seen at the pin insertion site of the cortical bone away from the fracture. The stress direction of the pin surface at the insertion sites was tensile along with pin axes in the pins away from the fracture and compressive in the pins close to the fracture. These results were compatible with those of the previous studies that conducted mechanical testing. In conclusion, this patient specific CT-CAD-based FEM may be useful to preoperatively plan the placement of the screws and the fixator as well as to optimize the design of the external fixation devices to minimize stress concentration at the pin-bone interface.</p>		

大腿骨近位部の強度評価について

—CT/有限要素法・QCTによる
薬剤効果判定への応用について

別所雅彦

[共同演者]大西五三男, 松本卓也, 大橋 暁, 中村耕三
東京大学医学部整形外科



骨粗鬆症の定義は2000年のNHF会議において「骨強度の低下により骨折危険性が増加した状態」と改定され、骨強度が重視されるようになった。骨強度には、骨密度のほかに骨質という概念が加わっており、骨密度よりも精度のよい強度評価法が待たれている。そこで当院では、CT/有限要素法を応用して、基礎的かつ臨床的な検討をさまざまに行っている。今回われわれは、薬剤効果判定の試みとして、少数例ながら大腿骨近位部の強度評価を検討した。

1……対象・方法

対象：未治療の骨粗鬆症患者3例(いずれも女性、平均年齢75歳)を対象とし、おのおのにロキシフェン(60 mg/日)とアスパラギン酸カルシ

ウム(400 mg/日)、およびアルファカルシドール(1.0 μg/日)の投与を行い、投与前と投与6カ月後の比較を検討した。

方法：評価項目としては、大腿骨近位部骨密度分布(定量的CT法)、大腿骨頸部骨密度(DXA法)、ならびに予測骨折強度と50 kgf 負荷時最小主応力(CT/有限要素法)を検討した。なお、CT/有限要素法は図1に示す手順・要領で解析を行った。

2……結果

骨密度：DXA法によって測定された頸部骨密度は、投与前後の比較において、症例Aで0.32%の増加、症例Bで1.66%の増加、症例Cでは0.16%の減少を示した(3例平均0.6%増加)。骨密度の増加は、主に主圧縮骨梁、もしくは主引張

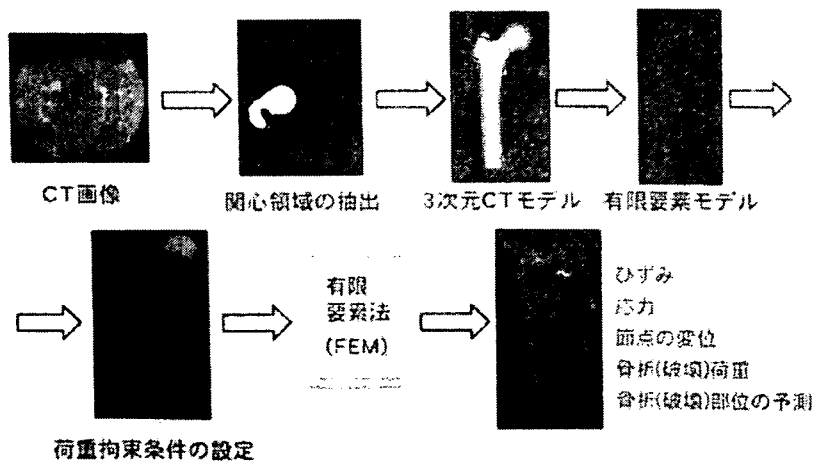


図1 CT/有限要素法の解析手順

表1 治療に伴う予測骨折強度の変化(CT/有限要素法)

症例	立位 (kgf)			FEM(転倒) (kgf)		
	初回時	半年後	増減率	初回時	半年後	増減率
症例A	330	340	3.03%	140	145	3.57%
症例B	380	385	1.32%	120	120	0.00%
症例C	430	430	0.00%	190	190	0.00%

平均 1.4%

平均 1.2%



初回時

半年後

図2 骨密度分布(QCT)

青い部分が最小主応力の絶対値が大きい部分。

最小主応力分布(CT/FEM)

立位条件

最小主応力分布(CT/FEM)

転倒条件



初回時

半年後



初回時

半年後

図3 最小主応力分布の変化(症例A)

骨梁を中心に認められた(図2)。

予測骨折強度: CT/有限要素法にて測定された予測骨折強度は、立位を模擬した条件下で3例平均1.4%の増加、転倒模擬条件下で同平均1.2%の増加を示した(表1)。この変化は、DXA法による骨密度変化よりも大きい傾向にあった。

50 kgf 負荷時最小主応力: 最小主応力の絶対値は、経過とともに減少する傾向にあった(図3)。すなわち、治療の効果として、応力に分散の生じた可能性が示唆された。

まとめ

諸家の検討から、「必要な部位の骨密度が増加すれば、頸部全体の骨密度がほとんど増加せずとも、強度は著明に改善する」と考察されている。その可能性が、今回われわれの検討からも示唆された。また、DXA法による骨密度測定ではとらえられない変化を、CT/有限要素法ならば評価可能だと考えられた。

CT/有限要素法による脊椎椎体の 圧縮強度解析

—骨粗鬆症治療効果判定への応用

松本卓也

[共同演者]大西五三男, 別所雅彦, 大橋 暁, 中村耕三
東京大学医学部整形外科



近年, 骨脆弱性に関与する因子として, 骨密度の低下だけではなく骨質の低下も重要とされ, 「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。一方, 骨粗鬆症などにおける従来の治療効果判定は, X線写真, 骨密度, 骨代謝マーカー, および新規骨折発生抑制によって行われており, これでは骨強度評価が不可能であった。そこでわれわれは, 臨床用CTに有限要素法(finite element method; FEM)を応用した“CT/有限要素法”を考案した。有限要素法とは, 構造解析の最も一般的なテクニックとして知られており, 解析対象となる物体を, 三角形や四角形あるいは六面体などの「要素」に分割して計算する方法である(図1)。新鮮死体標本での実証荷重試験からは, 本法にて脊椎椎体強度, および骨折部位を精度よく予測できる可能性が示された。そして今回, われわれは少数例ながら本法を骨粗鬆症患者に適用し, ラロキシフェン投与下での治療効果判定を試みた。

……対象・方法

対象症例は, 未治療の原発性骨粗鬆症患者の3例, ともに女性で平均年齢は75歳であった。おのおのにラロキシフェン(60 mg/日)による治療を施行し, 投薬開始前と投薬開始後6カ月時点において, DXA法(骨密度)ならびにCT/有限要素法(骨強度)での評価を比較検討した。

2……結果

生化学検査値: 血清NTX値は, 症例aで12.8%減少, 症例bで24.3%減少, 症例cでは17.6%の減少を認めた。

CT解析結果: DXA法(骨密度)ならびにCT/有限要素法(骨強度)による測定結果は, 症例aとbで増加, 症例cでは減少を示した(図2)。両法とも治療効果をパラレルに反映していたが, DXA法よりもCT/有限要素法のほうがより大きな変化率を呈していた。

まとめ

CT/有限要素法による骨強度解析は, 薬物加療の効果をDXA法よりも感受性高く検出できる可能性が浮上した。骨密度の増加に比し, 骨強度解析値が大きく変化した背景には, 皮質骨シール近傍の骨密度増加が関係するものと考えられる。以上のことから, CT/有限要素法による骨強度解析は, 骨粗鬆症の治療効果判定にて有用性が期待される。

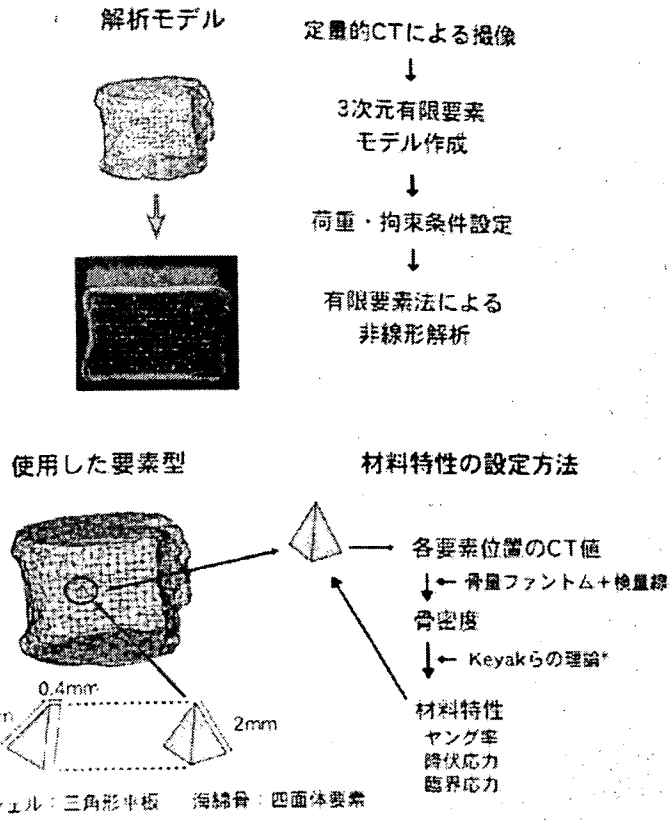


図1 CT/有限要素法の概略

* : Keyak JH et al : J Biomech 31 : 125-133, 1998

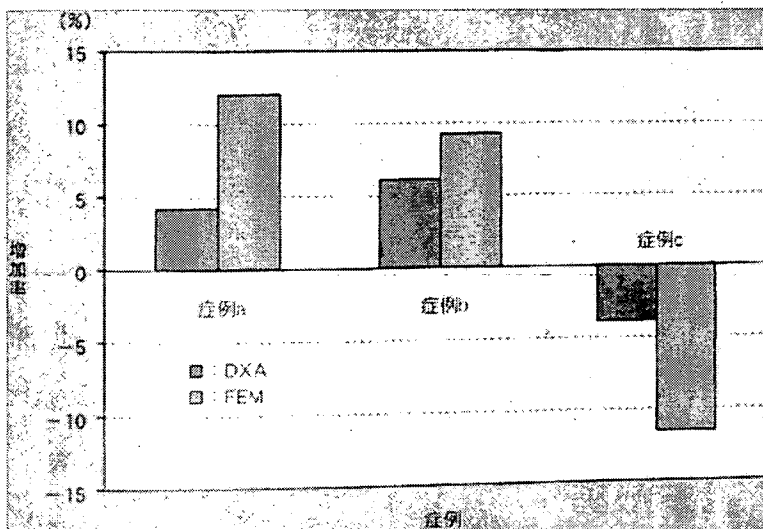


図2 両法における増加率(変化率)の比較

CT/有限要素法による骨粗鬆症治療薬の効果判定

今井一博¹⁾ 大西五三男²⁾ 山本精三¹⁾
中村耕三²⁾

はじめに

高齢化社会に伴い骨粗鬆症患者が増大している。骨粗鬆症の治療効果判定は従来X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。骨粗鬆症治療の最終的な目標は骨折予防である。骨折危険度には骨脆弱性と転倒などの外傷があるが、近年、骨脆弱性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。骨粗鬆症患者の骨強度評価法として、骨生検を行っての骨形態計測・マイクロCT、高解像度CT、MRIなどがある。

臨床用CTと有限要素法(finite element model: FEM)を利用したCT/有限要素法により、脊椎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¹⁾。有限要素法は構造物の数値解析法で、実際に強度試験を行うことなく骨強度および骨力学特性を評価できる。本研究ではCT/有限要素法が骨粗鬆症治療薬の効果判定に有用かを検討した。

1 CT/有限要素法による椎体強度解析法

CT/有限要素法にはさまざまな報告があるが、本研究で使用するCT/有限要素法の特徴と

して、4面体要素を用いて複雑な骨の曲面形状を構築、非線形解析により椎体の弾塑性を表現、海綿骨と皮質骨を区別、脆性材料に用いられる理論を使用、骨折の定義が明確、あげられる。

対象者の脊椎を骨量ファントムとともに定量的CT(QCT)で撮影し、QCTのDICOMデータから椎体部分を三次元有限要素モデル(MECHANICAL FINDER)により構築した。1辺が2mmの4面体要素で海綿骨、1辺が2mm・厚さ0.4mmの3角形平板要素で皮質シェルを構築した。骨は不均質材料として、海綿骨の重量密度はファントム基準物質のCT値からの検量線法により各要素に対応するCT値から算出した。ポアソン比は0.4、海綿骨のヤング率および降伏応力はKeyakら²⁾の方法により設定した。皮質シェルのヤング率は10GPaに設定した。

椎体に対する荷重は単軸圧縮荷重として椎体圧縮強度を解析した。解析は非線形解析として応力緩和係数は0.05に設定した。また臨界応力/降伏応力比を0.8に設定した。要素破壊の条件として引張側は最大主応力>臨界応力のときにクラックを生じて破壊、圧縮側はDrucker-Prager相当応力 \geq 降伏応力で降伏し、さらに最小主ひずみ値 $\leq -10000 \mu\epsilon$ で圧壊と定義した。1要素が破壊(クラックまたは圧壊)したときを骨折と定義して、その時の荷重値を椎体強度解

Assessment of Therapeutic Effects of Osteoporosis Using CT Based Finite Element Model

Kazuhiro Inai : Department of Orthopaedic Surgery, Tokyo Metropolitan Geriatric Medical Center, et al.

Key words : Finite element model, Osteoporosis, Therapeutic effect, Bone mechanics

¹⁾ 東京都老人医療センター整形外科 ²⁾ 東京大学医学部整形外科

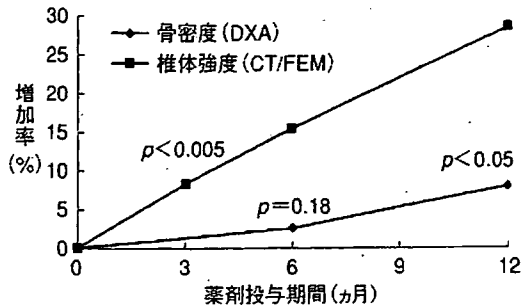


図1 DXAによる骨密度およびCT/有限要素法による椎体強度の平均増加率(12例)
統計解析は薬剤投与前と投与後をWilcoxon signed-ranks testにて比較

析値とした。

2 対象および方法

60歳以上の歩行可能な原発性骨粗鬆症の女性で、骨代謝・骨強度に影響を及ぼす可能性がある既往歴・薬剤歴がなく、服薬時に立位あるいは座位を30分以上保てる受診者を対象とした。

倫理委員会の承認のもと患者の同意を得て、無作為割付にてアレンドロネート(5mg/日)単独投与群と、アレンドロネート(5mg/日)+活性型ビタミンD(0.5 μg/日)併用投与群に分けた。単純X線画像にて胸腰椎骨折の有無を確認し、第2腰椎に骨折がなければ第2腰椎のQCTを撮影した。第2腰椎に骨折がある場合には、骨折がない椎体を隣接椎から第1腰椎、第3腰椎、第12胸椎の順に1椎体を選択してQCTを撮影した。QCTから上記のCT/有限要素法(MECHANICAL FINDER)により椎体強度解析値を算出した。また二重エネルギーX線吸収測定法(DXA, Lunar DPX-IQ)により第2~4腰椎の骨密度(正面)を測定した。CT/有限要素法は薬剤投与前および投与開始後3・6・12ヵ月時に、DXAは薬剤投与前および投与開始後6・12ヵ月時に行った。また薬剤投与前および投与開始後3ヵ月時に尿中I型コラーゲン架橋N-テロペプチド(NTX)を測定した。薬剤投与前および投与開始後12ヵ月時に身長を測定し、投与前

に比較して1cm以上の身長低下がある際には新規骨折発生を疑い、胸腰椎の単純X線検査を行った。薬剤治療の経過中に薬剤による副作用が生じた症例、薬剤継続ができなかった症例、QCT・DXA検査を希望しなかった症例は除外した。アレンドロネート投与群は7名(65~81歳、平均76歳)、アレンドロネート+活性型ビタミンD投与群は5名(63~79歳、平均74歳)であった。

3 結果

対象者12名中、新規骨折発生例はなかった。アレンドロネート単独投与群とアレンドロネート+活性型ビタミンD併用投与群をあわせた12名全体のCT/有限要素法による椎体強度平均増加率は、投与期間3ヵ月で8.3%、6ヵ月で15.2%、12ヵ月で28.4%であった。一方、DXAによる骨密度平均増加率は6ヵ月で2.6%、12ヵ月で7.9%であった。投与前に比較して椎体強度は投与開始後3ヵ月で有意($p < 0.005$, Wilcoxon signed-ranks test)に増加していた。骨密度は投与開始後6ヵ月では有意差がなかった($p = 0.18$)が、12ヵ月で有意に($p < 0.05$)増加していた。尿中NTXは投与開始後3ヵ月で52.8%と有意に($p < 0.005$)減少していた(図1)。

4 考察

本研究で骨粗鬆症治療薬として使用したアレンドロネートは骨吸収抑制剤であり、投与開始後2~3年で骨密度の増加^{3~9)}および新規骨折発生の抑制^{5~9)}が得られることが報告されている。しかし臨床の場では投与開始後1年内の、より早期に薬剤治療効果を知りたいという要求がある。CT/有限要素法による椎体強度は、骨密度より早期の投与開始後3ヵ月で骨粗鬆症治療薬の効果判定に有用であった。

本研究での対象者12症例中9例は骨密度・椎体強度解析値ともに薬剤投与前に比較して投与開始後12ヵ月で増加していたが、2例が骨密度変化なし・椎体強度増加、1例が骨密度低下・椎体強度変化なしと、3症例に骨密度と椎体強

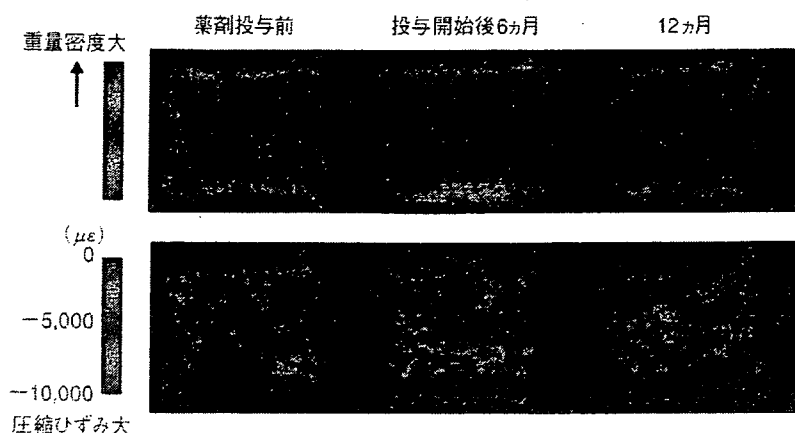


図2 74歳女性, アレンドロネート単独投与に伴う第2腰椎の重量密度および最小主ひずみ分布の変化

度解析値の解離がみられていた。

CT/有限要素法は骨強度だけではなく、骨力学特性を評価することが可能である。アレンドロネート投与開始6ヵ月でDXAによる骨密度が-0.9%低下に対しCT/有限要素法による椎体強度が33.3%増加、12ヵ月で骨密度が-0.3%低下に対し椎体強度が59.3%増加と、骨密度と椎体強度が解離した症例では、皮質シェルと隣接する海綿骨内の重量密度増加がみられ、最小主ひずみ分布で薬剤投与前では圧縮ひずみが著しく骨折が生じやすい領域に薬剤投与後では圧縮ひずみの減少がみられていた(図2)。

薬剤効果として、皮質シェル近傍の重量密度が増加するような骨基質分布の変化が起こり、圧縮応力の集中が軽減して最小主ひずみ分布が改善し、椎体強度が増加したと考えられ、DXAによる骨密度でとらえられない薬剤効果をCT/有限要素法で評価できる可能性が示唆された。

CT/有限要素法は骨密度に加え、ジオメトリ(geometry)、骨基質分布を含めて評価することが可能である。一方、CTの空間分解能に依存して骨微細構造や皮質骨の詳細な評価、マイクロダメージ(microdamage)の評価には限界があり、また骨代謝を評価することができない。さらに、DXAやpQCTに比較して放射線被曝量が多い点が検討すべき課題である。

おわりに

骨粗鬆症患者に対するアレンドロネート投与で、CT/有限要素法による椎体強度は、DXAによる骨密度より早期の投与開始後3ヵ月で薬剤効果を反映していた。薬剤効果として、骨密度増加だけではなく、骨基質分布の改善、骨折が生じやすい領域の最小主ひずみ分布の改善がみられていた。CT/有限要素法は、骨強度・骨力学特性の評価が可能という点で、骨粗鬆症治療薬の効果判定に有用と考えられる。

文 献

- 1) Imai K, Ohnishi I, Bessho M, Nakamura K. Nonlinear finite element model predicts vertebral bone strength and fracture site. *Spine* 2006;31:1789-94.
- 2) Keyak JH, Rossi SA, Jones KA, Skinner HB. Prediction of femoral fracture load using automated finite element modeling. *J Biomech* 1998;31:125-33.
- 3) Tucci JR, Tonino RP, Emkey RD, Peverly CA, Kher U, Santora AC, 2nd. Effect of three years of oral alendronate treatment in postmenopausal women with osteoporosis. *Am J Med* 1996;101:488-501.
- 4) Devogelaer JP, Broll H, Correa-Rotter R, Cumming DC, De Deuchaisnes CN, Geusens P, et al. Oral alendronate induces progressive increases in bone mass of the spine, hip, and total body over 3 years in postmenopausal women with osteoporosis. *Bone* 1996;18:141-50.

- 5) Black DM, Cummings SR, Karpf DB, Cauley JA, Thompson DE, Nevitt MC, et al: Fracture Intervention Trial Research Group. Randomised trial of effect of alendronate on risk of fracture in women with existing vertebral fractures. *Lancet* 1996;348:1535-41.
- 6) Liberman UA, Weiss SR, Broll J, Minne HW, Quan H, Bell NH, et al: The Alendronate Phase III Osteoporosis Treatment Study Group. Effect of oral alendronate on bone mineral density and the incidence of fractures in postmenopausal osteoporosis. *N Engl J Med* 1995;333:1437-43.
- 7) Cummings SR, Black DM, Thompson DE, Applegate WB, Barrett-Connor E, Musliner TA, et al. Effect of alendronate on risk of fracture in women with low bone density but without vertebral fractures: results from the Fracture Intervention Trial. *JAMA* 1998;280:2077-82.
- 8) Pols HA, Felsenberg D, Hanley DA, Stepan J, Munoz-Torres M, Wilkin TJ, et al: Fosamax International Trial Study Group. Multinational, placebo-controlled, randomized trial of the effects of alendronate on bone density and fracture risk in postmenopausal women with low bone mass: results of the FOSIT study. *Osteoporos Int* 1999;9:461-8.
- 9) Ensrud KE, Black DM, Palermo L, Bauer DC, Barrett-Connor E, Quandt SA, et al. Treatment with alendronate prevents fractures in women at highest risk: results from the Fracture Intervention Trial. *Arch Intern Med* 1997;157:2617-24.

P1-03

MIPO 法による大腿骨骨幹部骨折に対する治療経験

Clinical Experience of minimally invasive plate osteosynthesis for Femoral Shaft Fracture

大分岡病院整形外科

○清水 啓

【目的】 大腿骨の重度弯曲変形例など大腿骨骨幹部骨折に対しネイルが使用困難な場合がある。今回少ない経験ではあるがこのような症例に MIPO 法を試みたので報告する。

【症例】 Case 1: 12 歳女。骨端線未閉鎖、AO 分類 32A3 の左大腿骨骨幹部骨折。Case 2: 82 歳女。AO32A2 の左大腿骨骨幹部骨折。大腿骨の前彎と外彎変形が顕著で通常のネイル挿入が不可能であった。

【手術手技】 仰臥位にて牽引手術台を使用し骨折部の短縮転位を整復しておく。予定プレート (C-1: Synthes Narrow DCP, C-2: Broad LCP) を X 線イメージ下にテンプレートし皮切位置を決定。トンネルを作成。プレート挿入し K 鋼線にて仮固定。整復は Joy Stick 法と Reduction Screw にて行い、皮質骨スクリュー固定を行った。

【結果】 C-1 は 3 週で杖歩行可能となり約 2 ヶ月で骨癒合が得られた。C-2 では自立杖歩行には 3 ヶ月を要したが、術後 6 ヶ月で術前と同レベルの ADL に回復し骨癒合が得られている。

【考察】 大腿骨骨幹部骨折に対する MIPO 法の報告は少なくその手技は確立していない。AO では創外固定器を用いて施行しているが、短縮と回旋転位の整復が難しいと思われる。直達牽引にて短縮転位を整復した後に種々の Indirect Reduction Technique を用いる方法は有用であった。

P1-04

CT・CAD/有限要素法解析を用いた創外固定ピン応力の検討 —非対称ピンプロフィールはピンと骨の界面における応力集中を軽減する—

Stress analysis of the external fixator pin cluster using a patient specific CT-CAD/FEM —Asymmetrical pin thread profile can reduce pin-bone interface stress concentration—

東京大学医学部整形外科

○大橋 暁、大西五三男、別所 雅彦、松本 卓也、松山順太郎、中村 耕三

創外固定ピン刺入部の応力を検討するため、患者 CT データを基に有限要素法解析を行った。大腿骨骨折患者に対して撮影した CT 画像の非骨折側大腿骨のデータを元に骨幹部中央を骨折部として骨折モデルを作成し、固定ピン 4 本を大腿骨に刺入し支柱により架橋する構造を CAD data を基に創外固定モデルとして作成した。骨表面には 3 節点シェル要素を、骨内部、創外固定器およびピンには 4 節点ソリッド要素を使用し大腿骨骨幹部骨折創外固定有限要素モデルを作成した。骨は不均質材料とし材料特性を各要素の位置に対応する CT 値から個々に算出した。大腿骨頭より機能軸方向へ荷重を加え大腿骨遠位端を完全拘束し弾性解析を行った。最近位および最遠位のピン (アウトターピン) には引張優位な応力が、骨折部に近接するピン (インナーピン) には圧縮優位な応力がピン刺入部に存在した。全てのピンにスレッド形状が対称のピン ($\beta = \gamma = 22.5^\circ$) を用いたモデル (対称ピンモデル) とアウトターピンに type A ピン ($\beta = 40^\circ$, $\gamma = 5^\circ$)、インナーピンに type B ($\beta = 5^\circ$, $\gamma = 40^\circ$) の非対称ピンをそれぞれ用いたモデル (非対称ピンモデル) について弾性解析を行った。ピン刺入部の最大相当応力が対称ピンモデルよりも非対称ピンモデルの方が低下していた。非対称ピンを最適位置に刺入することで個々のピンおよび創外固定全体の骨折固定力が向上すると考えられる。

1-C-03

CT/有限要素法による骨強度評価 —薬剤投与による大腿骨近位部の強度の変化について—

Prediction of the strength of the proximal femur by the QCT and the CT/Finite element method

東京大学医学部整形外科

○別所 雅彦^{べつしよ まさひこ}, 大西五三男, 松本 卓也,
大橋 暁, 飛田 健治, 中村 耕三

【目的】CT/有限要素法を用いて、骨粗鬆症治療薬投与により大腿骨近位部の強度変化を評価した。

【対象と方法】対象は原発性骨粗鬆症の女性患者9名(平均62歳)で、リセドロネート(2.5mg/day)を内服させた。倫理委員会の承認のもと患者の同意を得て、内服開始時と内服12ヶ月後に大腿骨近位部の定量的CT撮影と、DXA撮影を行った。定量的CT画像(QCT)から、3次元骨強度解析モデルを作成した。解析モデルに対する荷重・拘束条件は、立位を模擬した条件と転倒を模擬した条件とした。内服開始時と1年後の予測骨強度評価と、DXA法による頸部の骨密度の比較をおこなった。また、QCTによる大腿骨近位部の冠状断の骨密度分布の変化の検討を行った。

【結果】内服開始後12ヶ月で予測骨強度の増加率は、立位条件では53%、転倒条件では48%増加した。骨密度の変化は、頸部では1.9%、転子部では2.9%増加した。骨強度増加率と骨密度増加率は、明らかに相関性はみられなかった($p = 0.53 \sim 0.36$)。骨密度分布をみると、骨密度の増加は、主圧縮骨梁や頸部基部付近に増加する傾向にあった。

【考察、結論】DXA法と比較すると増加率が大きく、骨強度の変化をDXA法よりも感受性が高く検出できる可能性がある。DXA法では、骨密度分布の変化による骨強度の変化を検出することが困難であると考えられた。

1-C-04

大腿骨頸部骨折の鑑別診断

Differential diagnosis of the femoral neck fracture

¹明野中央病院整形外科, ²大分大学医学部整形外科

○中村英次郎^{なかにら えいじろう}¹, 池田 真一²

【はじめに】高齢者で急性に股関節周辺の痛みを訴え歩行困難になったという患者が来院した場合、まず大腿骨頸部骨折を考えるのは当然である。しかしレントゲンで明らかな骨折を認めないばかりか、MRIでも不顕性骨折を認めないことがある。我々はこのような場合の鑑別診断として、若干の経験を得たので報告する。

【対象】2005年1月より2007年1月までの2年間に、大腿骨頸部骨折及び転子部骨折を112例経験したが、レントゲンやMRI等にて精査した結果、大腿骨頸部骨折及び転子下骨折がはっきりしない所謂疑い病名11例も経験した。これらの症例について臨床的検討を行った。

【結果】大腿骨頸部骨折及び転子下骨折疑い病名が見ついたのちの精査で、新たな診断に至ったものは、1. 恥、坐骨骨折:5例, 2. 閉鎖孔ヘルニア:2例, 3. 転移性骨腫瘍:1例, 4. 臀部血腫:1例, 大腿骨頭壊死症:1例, 5. 不明:1例であった。いずれも急性の疼痛発症で歩行困難となり救急車にて来院したものであった。理学所見は大腿骨頸部骨折と酷似しており、初診時には診断し得ず経過観察入院中に確定診断を得た。

【考察】恥、坐骨骨折は非常にわかりにくい症例があり、レントゲンで両股関節を比較し疑わしい時はCTをオーダーする必要がある。閉鎖孔ヘルニアは稀な疾患ではあるが高齢者に多く、閉鎖神経刺激症状が大腿骨頸部骨折との痛みと酷似しており注意を要する。

1-A-23

CT/有限要素法による大腿骨外傷後骨欠損例の骨強度評価

Evaluation of bone strength of the femur in patients with a posttraumatic large defect using a CT based nonlinear finite element method

東京大学医学部整形外科

○松本 卓也, 大西五三男, 別所 雅彦,
大橋 暁, 飛田 健治, 中村 耕三

【目的】骨癒合後の骨強度の正確な評価は、後療法における荷重量決定に重要であるが、その決定に重要な骨強度評価は今なおX線写真による定性的評価に依存しており、重度外傷後の骨欠損・変形治療例では荷重量決定に難渋するケースが多い。X線による骨強度予測が困難であった大腿骨骨折後の高度骨欠損例に対し、後療法における荷重量の管理を有限要素法解析による強度予測の結果もとに行った。本法が有用であったので報告する。

【対象と方法】症例は40歳男性、大腿骨開放骨折を含む多発外傷後、大腿骨骨髓炎となり、骨癒合が得られたものの重度の骨欠損を生じた。大腿骨全長を2ミリ厚で撮影したCTデータより解析対象となる大腿骨を抽出し患者固有の解析モデルを作成。片脚起立を模擬した荷重拘束条件で非線形解析を行い、予測骨折荷重を算出した。Bergmann (2001) らの報告を基に後療法における荷重負荷量を決定した。結果・考察受傷後8ヶ月時での予測骨折荷重は100kgfであり部分荷重量を40kgfと設定。1年後再検、予測骨折荷重は300kgfとなり全荷重可とした。予測骨折荷重以下で部分荷重を行うことにより、部分荷重量設定に苦慮する症例でも再骨折することなく全荷重まで荷重量を増やすことができた。本方法は部分荷重量設定に有用であり、今後症例を増やし有用性をさらに検討したい。

1-A-24

鎖骨骨折に施行したLCP (Locking Compression Plate) が折損した1症例

Post operative broken Locking Compression Plate for clavicle fracture

守口生野記念病院整形外科

○田村 隆典, 辻野 才男, 塩見 英典

【はじめに】ここ最近の傾向としてLCPが骨折治療において幅広く用いられるようになってきた。今回我々は鎖骨骨折に対して施行したLCPが術後折損した症例を経験したので報告する。【症例】35歳、男性、バイクによる交通事故にて右肩痛を主訴に当院救急搬送される。搬送時現症は右鎖骨部中心とした激しい疼痛、腫脹を認める。右上肢における神経学的所見はなく、レントゲン上右鎖骨骨幹部骨折 (3 part) を診断し、入院後3日目に観血的骨接合を施行した。手術はシンセス社製LCP リコンプレート3.5 (7穴) にて骨接合した。術後1ヶ月2週後に着替えを行うとき右鎖骨部に礫音を伴う疼痛出現し外来再診され、レントゲンにてプレート折損を診断する。翌日、プレート抜去と再固定術ならびに腸骨骨移植術を施行した。現在術後2ヶ月目であるが外来リハビリ加療中である。再手術時所見としては骨折部に一部仮骨形成認められるものの折損したプレート直下にはそれが認められていなかった。感染所見は認められなかった。取り出されたプレートは、ベンディング部の隣のスクリュー孔で折損し、肉眼所見上、捻りの所見はなかった。

【考察】LCPはプレートとスクリュー間との固定が強固になされるため、そのため骨折部直上部のプレートに応力が集中したことが折損の原因の一つと考える。LCPの使用にあたって、骨折部位、骨折系を考慮し、適応に十分注意する必要がある。

1-J-265

CT・CAD/有限要素解析を用いた創外固定ピン—骨インターフェース応力分布の検討—

大橋 暁 大西 五三男 別所 雅彦 松本 卓也
松山 順太郎 中村 耕三

創外固定においてハーフピンの弛みやカットアウト、破損は重大な合併症の1つである。片持ち式創外固定において各刺入位置におけるピン応力を検討するために、患者CTデータを基に大腿骨骨折創外固定モデルを作成し有限要素法解析を行った。大腿骨骨折患者に対し非骨折側の大腿骨骨頭から大腿骨遠位端までCT撮影を行い(120 kV, 150 mA, contiguous 3.0 mm thick slices, 0.45 mm pixels, 512 by 512 matrixes), 骨幹部中央を骨折部として21 mm取り除き、皮質骨外層を3節点シェル要素、海綿骨を4節点ソリッド要素により大腿骨有限要素骨折モデルを作成した。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。また直径6 mmのピンを4本および6本(それぞれ近位遠位2本および3本ずつ)を大腿骨に刺入し、それらを直径30 mmの支柱により架橋する構造をcomputer-aided design(CAD)ソフトにより作成、4節点ソリッド要素により創外固定モデルを作成した。均一材料としてピンにはチタン合金、支柱にはステンレス鋼の材料特性を使用した。大腿骨頭より機能軸方向へ荷重を加え大腿骨遠位端を完全拘束し弾性解析を行った。高い応力集中が骨折部より離れたピン刺入部の皮質骨に見られた。また、骨折部より離れた最近位および最遠位のピンには引張優位な応力が、骨折部に近接するピンには圧縮優位な応力がピン刺入部に存在した。創外固定ではピンの固定位置によって応力の方向や大きさが異なることが考えられる。有限要素法により創外固定のそれぞれピンの応力を予測し、それらに最適なピンを選択することまたは最適位置に刺入することでピン—骨インターフェースの応力集中を最低限とし個々のピンおよび創外固定全体の骨折固定力が向上すると考えられる。

東大大学院整形

超音波エコートラッキング法を用いた骨癒合判定法

東京大学医学部整形外科

松山順太郎・大西五三男・別所 雅彦・大橋 暁・松本 卓也・中村 耕三
アロカ株式会社

酒井 亮一・鈴木 浩之・大塚 利樹・宮坂 好一・原田 烈光

A new method for evaluation of fracture healing by echo tracking

骨癒合判定は今なおX線写真による定性的な方法に依存しているが、最も重要な要件は力学強度の回復を検出することである。本研究の目的は、骨癒合を非侵襲に精確且つ定量的に判定し、創外固定器の抜去時期の決定を可能とする方法を確立することである。骨の荷重に対する変形を定量的に検出し、骨の力学特性を評価することにより骨癒合を評価することが可能である。骨の微小変形の検出を達成するために超音波のエコー信号の位相変化を測定するエコートラッキング (ET) 法を用い、 $2.6\mu\text{m}$ の測定精度で計測可能な診断装置を開発した。本装置を用い、単支柱式創外固定器による下腿延長術を行った患者に対し骨癒合の判定を行った。座位の状態にて、膝上から徒手的に100Nの縦圧縮荷重を加え、延長仮骨部の変形量を測定した。超音波プローブを創外固定器の支柱に固着し、プローブ長軸上の直線4cmの間隔に5点のトラッキングポイントを設け同時計測し、各点の変位

測定から変形量 (ETS) を抽出し定量評価した。対象は軟骨無形成症・軟骨低形成症の4名6肢で平均年齢は16歳であった。骨硬化期間初期より創外固定器抜去まで、2～6週間隔で測定を実施した。測定期間は平均21.2週で測定回数は平均6.1回であった。いずれの症例においてもET測定による変形量 (ETS) は経時的に指数関数的減少を示し、仮骨部の剛性変化を定量検出可能であった。また、創外固定器抜去前の最終測定時には、いずれの症例も500 ETS以下であった。荷重と抜重における荷重・変形量のグラフでは、粘性を示すヒステリシスループが描出され、経時的な粘性の減少が検出可能であった。ET計測により非侵襲に仮骨部の剛性・粘性が検出可能であり骨癒合の進行が定量評価可能であった。今後、創外固定器症例の許容荷重量の決定・抜去時期を判断する診断法として応用可能であると考えられる。

43

CT・CAD/有限要素法解析を用いた創外固定ピン応力の検討 —非対称ピンプロファイルはピンと骨の界面における応力集中を軽減する—

Stress analysis of the external fixator pin cluster using a patient specific CT-CAD/FEM
-Asymmetrical pin thread profile can reduce pin-bone interface stress concentration-

東京大学医学部整形外科

おねし せき

○大橋 暁、大西 五三男、別所 雅彦、松本 卓也、松山 順太郎、中村 耕三

創外固定においてピン刺入部の応力を検討するために、患者CTデータを基に有限要素法解析を行った。大腿骨骨折患者に対し非骨折側大腿骨のCT撮影を行い、骨幹部中央を骨折部として大腿骨骨折有限要素モデルを作成した。骨は不均質材料とし材料特性は各要素の位置に対応するCT値から個々に算出した。固定ピン4本を大腿骨に刺入し支柱により架橋する構造をCAD dataを基に創外固定モデルとして作成した。大腿骨頭より機能軸方向へ荷重を加え大腿骨遠位端を完全拘束し弾性解析を行った。最近位および最遠位のピン(アウターピン)には引張優位な応力が、骨折部に近接するピン(インナーピン)には圧縮優位な応力がピン刺入部に存在した。全てのピンにスレッド形状が対称のピン($\beta = \gamma = 22.5^\circ$)を用いたモデル(対称ピンモデル)とアウターピンにtype Aピン($\beta = 40^\circ$, $\gamma = 5^\circ$)、インナーピンにtype B($\beta = 5^\circ$, $\gamma = 40^\circ$)の非対称ピンをそれぞれ用いたモデル(非対称ピンモデル)について弾性解析を行った。ピン刺入部の最大相当応力が対称ピンモデルよりも非対称ピンモデルの方が低下していた。非対称ピンを最適位置に刺入することで個々のピンおよび創外固定全体の骨折固定力が向上すると考えられる。

東京大学医学部整形外科

○松本 卓也、大西 五三男、別所 雅彦、大橋 暁、
飛田 健治、中村 耕三

【目的】骨粗鬆症の評価は主にDXA法が用いられるが、骨強度が定量測定できないという限界がある。第6回本学会において今井らによりCT/有限要素法により椎体の単軸圧縮強度が精確に評価できると報告した。これをふまえ、同方法を応用し日常生活動作における骨強度、すなわち日常生活動作における荷重条件での骨強度評価を行うことを目的とした。【対象と方法】対象は未治療の原発性骨粗鬆症女性患者7名、平均年齢60歳。倫理委員会の承認のもと、患者の同意を得て、第2腰椎の定量的CT撮影を行い、CTデータより有限要素法による強度解析を行った。CT/有限要素法による強度解析は定量的CTのDICOMデータから、3次元骨強度解析モデルを作成した。荷重条件・拘束条件は、椎体上面を垂直圧縮し、椎体下面を完全拘束した単軸圧縮モデル (Imai, 2006)、立位・前屈位における椎体への過重負荷分布 (Pollintine, 2004) を応用した。すなわち立位時には椎体の前方1/3:中央1/3:後方1/3を19:31:41に、前屈時には59:48:38に分配した荷重を椎体上面に、椎体下面を完全拘束した立位荷重、前屈位荷重モデルについて解析を行い、骨強度予測を行った。【結果】予測骨折荷重は単軸圧縮と立位荷重の条件では相関係数0.913、回帰直線の傾き0.924、単軸圧縮と前屈位荷重の条件では相関係数0.863、回帰直線の傾き1.360であった。前屈荷重の予測強度は7例中4例で単軸圧縮予測強度より低く、前屈位での予測骨折荷重が低い症例では、立位/前屈位の予測骨折荷重比が変わらない症例に比べ、前方の皮質骨シェルおよび皮質骨シェル近傍の海綿骨の骨密度が低い傾向にあった。骨折荷重時の最小主ひずみ分布は単軸圧縮に比べ立位荷重では後方に、前屈位荷重では前方に圧縮ひずみ分布が広がる傾向があった。【考察】単軸圧縮における予測強度は立位荷重における予測強度とほぼ同等と考えられた。前屈荷重の予測強度が低い事は、骨粗鬆症における椎体の骨折リスクの評価において、骨密度分布や骨形態などの骨強度だけでなく、椎体に加わる荷重の方向にも依存する事を示しており、骨折が起こりやすい荷重方向を見極め、骨折リスクを考慮した生活指導が出来れば高齢者の骨折予防への一助となりうる。【結論】CT/有限要素法による強度解析を日常生活動作における骨強度評価に応用した。今後は後方要素の考慮など解析モデルの完成度を高め、症例を増やし本法の有用性を検討したい。

東京大学医学部整形外科

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

【目的】高齢者の大腿骨近位部骨折の危険予測は画像診断や骨密度測定にて行われるが、これは骨粗鬆の程度は評価するが、構造的強度を評価できない。大腿骨近位部骨折患者に対し、非骨折側の大腿骨の3次元CT有限要素解析を行い、荷重方向の相違による骨折荷重を検討した。本法が大腿骨近位部骨折の有用な危険予測法となり得るか検討した。【方法】対象は、80歳代の女性の大腿骨近位部骨折患者23名 (平均85.2歳)。受傷後1週間以内に定量的CTを撮像し、非骨折側の3次元解析モデルを作成した。各要素の材料特性は各要素位置に対応するCT値から骨密度を個々に算出し、骨密度に対応する材料特性を割り当てた。荷重拘束条件は、立位を模擬した条件と側方転倒・後側方転倒を模擬した条件を設定した。Newton-Raphson法を用いた荷重増分法による非線形解析を行い、予測骨折荷重を解析した。各荷重拘束条件の相違による強度の相違を比較した。統計処理は、Pearson's test、ANOVA法、Post hoc testにFisher's PLSD法を用いた。有意水準を0.05以下とした。【結果】予測骨折荷重は、立位条件3080N (標準偏差(SD)550N)、側方転倒条件1040N (SD236N)、後側方転倒条件700N (SD167N)であった。立位条件の予測骨折荷重は、側方・後側方転倒条件よりも有意に大きかった ($p < 0.001$)。側方転倒条件での予測骨折荷重は、後側方転倒条件よりも有意に大きかった ($p < 0.001$)。立位条件と側方転倒条件での予測骨折荷重の相関性は、 $r=0.52$ ($p=0.01$)、立位条件と後側方転倒条件では、 $r=0.55$ ($p=0.006$)、側方転倒条件と後側方転倒条件では、 $r=0.67$ ($p < 0.001$)であった。【考察、結論】立位条件よりも側方転倒条件、側方転倒条件よりも後側方転倒条件が骨折危険度を高めた。また、各荷重・拘束条件間の予測骨折荷重の相関は有意であるが、相関性は低かった。大腿骨近位部の骨強度評価は、複数の荷重拘束条件から評価する必要があると示唆された。

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^a、大西 五三男^a、松本 卓也^a、大橋 暁^a
飛田 健治^a、中村 耕三^a

^a 東京大学整形外科

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

M. Bessho^a, I. Ohnishi^a, T. Matsumoto^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 strength 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. Fracture loads of the prediction significantly correlated with those measured ($r = 0.97$).

Key words: Finite element method, Bone strength, Osteoporosis, Fracture load, 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。解析モデルの正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]、主ひずみの実験と解析の結果の相関が、 $r = 0.963$ と高く、主ひずみを正確に評価できることを報告した。今回は、骨折荷重値の実験値と解析値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)。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 (Fig. 2)。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と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。

骨折荷重値の実験値と解析値を比較対照した。統計学的評価は、Pearson の相関係数検定、直線回帰を行い、有意水準を $p < 0.05$ とした。



Fig. 1: Uniaxial compressive loading testing

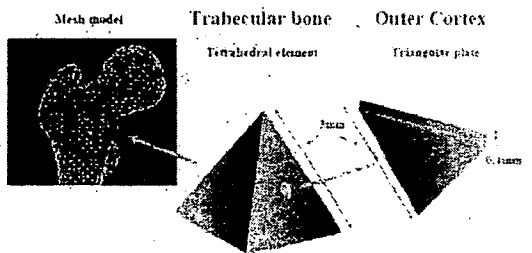


Fig. 2: Used elements

3. 結果

x 軸を解析での予測骨折荷重、y 軸を実験での骨折荷重とした回帰直線は、 $y = 642 + 0.936x$ 、 $r = 0.979$ 、95% 上方信頼限界は 0.920、下方信頼限界は 0.995、 $P < 0.0001$ 、 $SEE = 228 \text{ N}$ であった (Fig. 23)。回帰直線傾きは明らかに 1 と差がなく ($p = 0.75$)、回帰直線の切片も明らかに 0 と差がなかった ($p = 0.08$)。

4. 考察

Keyak ら [5] の非線形解析の研究では、骨折荷重の実験値と解析値の回帰直線 (x 軸を解析での予測骨折荷重、y 軸を実験での骨折荷重) の傾きは 0.77、切片は 1150 N、相関係数は $r = 0.962$ 、95% 信頼区間は 0.899~0.986 と報告していた。また、Cody ら [6] の線形解析の研究では、相関係数は $r = 0.915$ と報告していた。95% 信頼区間は報告されていなかったが、検体数が 26 検体であるため 0.817~0.961 であった。本研究における実験の骨折荷重と予測骨折荷重の相関性は、過去の報告と比べ統計学的に非劣性であると判断できた。しかし、Keyak ら [14] の報告では、回帰直線の傾きは明らかに 1 と差があった ($p < 0.001$) が、我々の解析モデルでは、傾きは明らかに 1 と差がなく回帰直線の傾きは優れていると考えられた。

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/有限要素法による骨ひずみ予測の正確性の検証, 別所雅彦 大西五三男ら, 日本コンピュータ外科学会誌 2006, 8 巻 3 号 Page256-257
- 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., 2001. Improved prediction of proximal femoral fracture load using nonlinear finite element models. *Med Eng Phys* 23, 165-173.
- 6) Cody, D. D., Gross, G. J., Hou, F. J., Spencer, H. J., Goldstein, S. A. and Fyhrie, D. P., 1999. Femoral strength is better predicted by finite element models than QCT and DXA. *J Biomech* 32, 1013-1020.

CT/有限要素法による骨強度評価の臨床応用 —大腿骨変形治癒例に対する歩行荷重管理—

○松本卓也 大西五三男 別所雅彦 大橋暁 飛田健治 中村耕三
東京大学 整形外科

Clinical Application of a CT Based Nonlinear Finite Element Method

—Weight Bearing Control of Patients with Mal-united Fracture of the Femur—

Takuya Matsumoto, Isao Ohnishi, Masahiko Bessho, Satoru Ohashi, Kenji Tobita, Kozo Nakamura

Department of Orthopaedic Surgery, University of Tokyo, Tokyo.

Abstract: Estimation of bone strength still depends on X-ray findings. Thus, it is quite difficult to predict bone strength in patients with large defect or deformity. Bessho et al. made the precise quantitative evaluation of bone strength of cadaveric femora using a CT based nonlinear finite element method. We applied this method clinically and assessed strength of mal-united femora in 2 patients, thereby controlling the magnitude of weight bearing. Post operative management in these patients was successful without any occurrence of re-fracture in the the follow up period.

Key words: Finite element method, Bone strength, Fracture, weight bearing

背景

骨折後、変形治癒や骨欠損を伴った場合、過度な荷重歩行は再骨折につながるが、不十分な荷重歩行は骨形成に悪影響を及ぼすだけでなく骨萎縮をきたす可能性もあり、ジレンマの中で後療法での荷重決定を迫られる。骨強度の評価は今なおX線写真による定性的評価に依存し、重度外傷後の骨欠損・変形治癒例では荷重量決定に難渋する 경우가多く、精度と再現性をもつ定量的な骨強度予測評価法の開発が必要である。

目的

X線による骨強度予測が困難であった大腿骨骨折後の高度変形治癒例に対し、新鮮死体標本を用いた大腿骨近位部の圧縮強度がCT/有限要素法解析で精度高く評価できた別所ら¹⁾の報告を元に有限要素法解析による強度予測を応用、後療法における荷重量の管理を行った。治療経過中、再骨折することなく骨強度が増加し、本法が有用であったので報告する。

対象と方法

症例は大腿骨開放骨折を含む多発外傷後、変形治癒となった2症例。

症例1 42歳 男性 現病歴交通事故による多発外傷後感染を起こし変形治癒となった。受傷後8ヶ月目、両松葉杖 touch gait で初診 (Fig1 初診時レントゲン)。当科にて保存加療を行い、受傷後1年目と2年目でCT/有限要素法解析を行った。

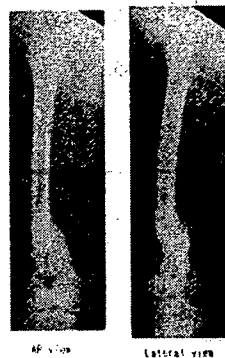


Fig1 初診時レントゲン

CT 有限要素法の解析は大腿骨全長を2ミリ厚で定量的CTデータを取得し、患側大腿骨を3次元構築、患者固有の解析モデルを作成した。立位荷重を模擬した荷重・拘束条件で有限要素法による非線形解析で骨折荷重・部位および、歪みの予測を行った。

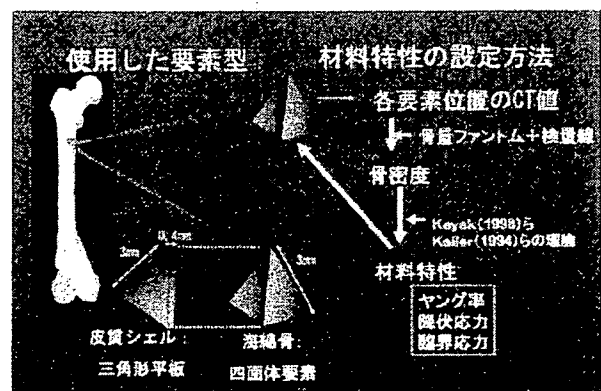


Fig2 要素型・材料特性

モデルは海綿骨が3ミリの正四面体要素、皮質骨外層が3ミリの正三角形のシェル要素で構成、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Keyak¹⁾、Keller²⁾らの理論に基づき材料特性に変換した (Fig2)。

荷重・拘束条件は、骨頭を荷重部とし、機能軸を荷重方向として遠位端を完全拘束した片脚起立を模擬した。非線形解析を行い、予測骨折荷重を算出し、結果をもとに後療法における荷重負荷量を決定した。

経時的評価項目は評価時期を：受傷後 2年目と4年目の2回とし骨折荷重・部位、骨密度、最大・最小主歪み分布を評価、Mechanical Usage Windowを荷重指標にした。

結果

骨折荷重は初回80kgf、2回目は310kgfであった

骨折部近傍の骨密度は皮質骨周囲の骨密度が増加し、最大主歪みが高い領域が減少、最小主歪みが低い領域も減少し、歪みの絶対値が小さくなった。

症例2

交通事故による大腿骨遠位の粉碎開放骨折であった。創外固定器をもちいて固定したが不安定性が残りギプス固定となった。9cmの短縮、40度後方凸の角状変形が残存し、当科初診した。

受傷後3年目と4年目でCT/有限要素法解析を行った。

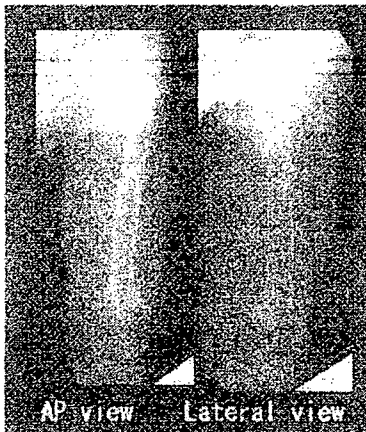


Fig3 初診時レントゲン

結果

骨折荷重は初回100kgf、2回目は250kgfであった

考察

フロスト⁴は1000-3000 μ strainの歪が負荷すると、骨のmodelingにより骨量が増加すると報告した。2症例の50kgf荷重時の予測最大・最小主歪みはTable1のようになっており、経時変化に伴い、骨のmodelingが進み歪みのレベルはmild overload windowからadaptive windowに移行した。

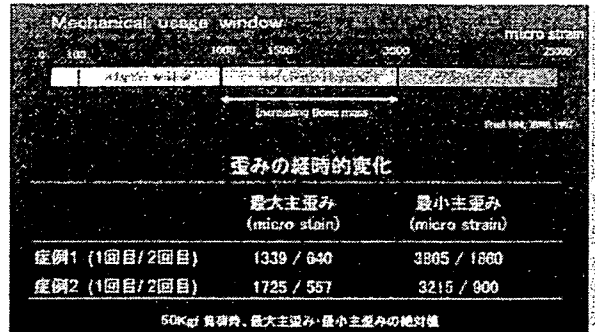


Table1 Mechanical usage window 歪み経時変化

症例1では1回目の解析後に1/3荷重としから2年後にT字杖へ 症例2では1/4荷重から1年後に片フロストランド杖へと荷重量を増加できた。

2症例ともに治療経過で再骨折はなかった。

結語

CT/有限要素法による骨強度予測を行ない、後療法における荷重量決定に有用であった。

文献

1. Bessho M. *J Biomech* 2007;40:1745-53.
2. Keller TS. *J Biomech* 1994;27:1159-68.
3. Keyak JH. *J Biomed Mater Res* 1994;28:1329-36.
4. Frost HM. *J Bone Miner Res* 1997;12:1539-46