

分担研究 三次元骨強度解析モデルを用いた大腿骨近位部の強度評価に関する研究

分担研究者 別所 雅彦 東京大学医学部附属病院整形外科 特任助教

研究要旨 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という限界がある。大腿骨近位部分の強度の範囲は、ある程度過去の摘出標本からの圧縮試験等で報告されているが、患者固有の大腿骨近位部分の強度は評価できない。本研究では、大腿骨近位部骨折の患者に対して非骨折側の定量的 CT 撮影を行い、定量的 CT 画像を用いた三次元骨強度解析を行い解析の結果と、先行研究の強度試験の結果と比較することによって、本方法の臨床における有用性を評価した。

対象は、女性の大腿骨近位部骨折患者 42 名(平均 83 歳)。受傷後 1 週間以内に定量的 CT を撮像し、非骨折側の三次元解析モデルを作成した。立位条件と 4 つの転倒を模擬した条件を設定した。有限要素法非線形解析を行い、予測骨折荷重を解析した。

結果は、予測骨折荷重の平均は、立位条件 3150 N、転倒条件 1 2270 N、転倒条件 2、1060 N、転倒条件 3 980 N、転倒条件 4 710 N であった。先行研究の実証試験の結果と比較しても矛盾しない結果が得られ、患者から作成した三次元骨強度解析モデルは、実際に強度評価を行うことができると示唆された。

A. 研究目的

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という限界がある。大腿骨近位部分の強度の範囲は、ある程度過去の摘出標本からの圧縮試験等で報告されているが、患者固有の大腿骨近位部分の強度は評価できない。このため、大腿骨近位部分の強度評価を正確に行うことができれば、大腿骨転子部骨折を整復する際に近位骨片に対しどの程度の荷重が加わると大腿骨近位部(大腿骨頸部)にさらに破壊が発生するか危険度の評価が可能となり、骨折整復・固定の制御動作に対して有用な情報となる。本研究では、大腿骨近位部骨折の患者に対

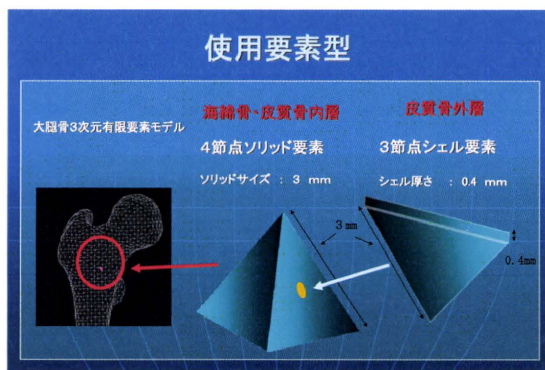
して非骨折側の定量的 CT 撮影を行い、定量的 CT 画像を用いた三次元骨強度解析モデルを作成し、解析の結果と、先行研究の強度試験の結果と比較することによって、本方法の臨床における有用性を評価した。

B. 研究方法

女性の大腿骨近位部骨折患者 42 名(平均 85 歳)。受傷後 1 週間以内に骨量ファントム(B-MAS 200, 京都科学)とともに定量的 CT を撮像(120kv, 150mAs, slice thickness 3 mm, matrix 512×512)を行った。定量的 CT 画像を解析コンピュータに転送し、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、三次元骨強度解析モデルを作成した(図 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。ヤング率は Keyak (1994)ら、および Keller (1994)らの方法により設定した。ポアソン比は、0.4 とした。非骨折側の三次元解析モデルを作成した (Bessho et al., 2007)。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。

(図 1) 使用要素型



骨頭への荷重方向は、前額面において骨軸から  $\gamma$  度、横断面において頸部軸から  $\delta$  度前方方向に傾斜した荷重をかけた。立位を模擬した条件 ( $\gamma$  160 度  $\delta$  0 度)(立位条件 (SC))、転倒を模擬した条件、転倒条件 1 ( $\gamma$  120 度  $\delta$  0 度(FC1))、転倒条件 2 ( $\gamma$  60 度  $\delta$  0 度(FC2))、転倒条件 3 ( $\gamma$  60 度  $\delta$  15 度(FC3))、転倒条件 4 ( $\gamma$  60 度  $\delta$  45 度(FC4))を設定した (図 3)。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

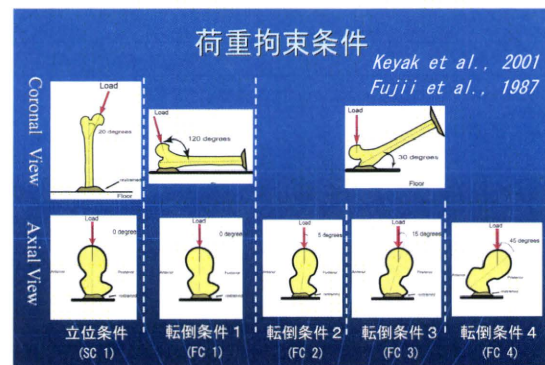
伏応力を超え、かつ最小主歪みが -10000 micro strain 以下の場合(圧潰)をそれぞれ骨折と定義した。1 要素以上の破壊を骨折と定義し、予測骨折荷重を解析した。各荷重拘束条件の相違による強度の相違を比較した。

統計処理は、ピアソンの相関係数、Friedmann 法 Post hoc test に Sheffe 法を用い、有意水準を 0.05 以下とした。

(倫理面での配慮)

CT 撮影に関しては、患者・家族同意の上で撮影を行った。CT データ・解析データは、暗号化を行った。

(図2) 荷重拘束条件



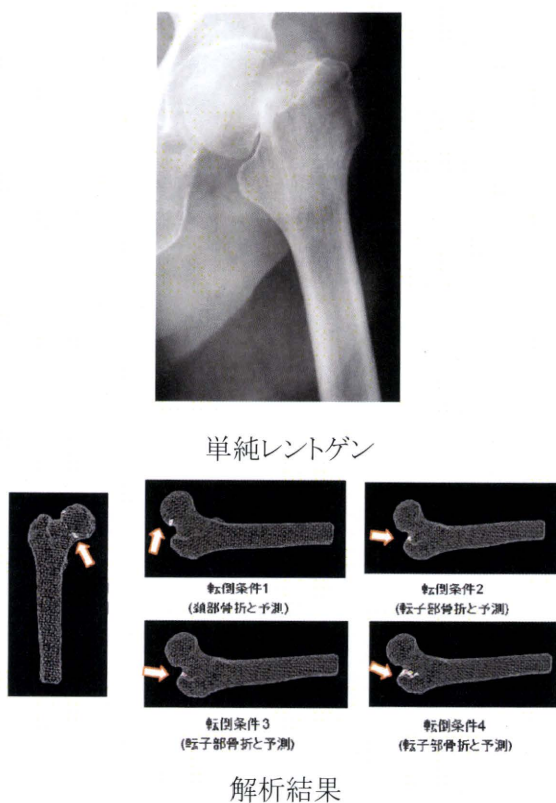
### C. 研究結果

82 歳の大腿骨転子部骨折患者の解析例を提示する (図 3)。

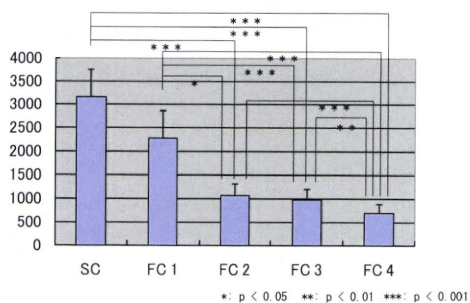
予測骨折荷重は、立位条件 3150 N(標準偏差(SD) 610 N)、転倒条件 1 2270 N(SD 600 N)、転倒条件 2 1060 N(SD 250) 転倒条件 3 980 N (SD 230 N)、転倒条件 4 710 N(SD 174 N)。立位条件の予測骨折荷重は、転倒条件 2、転倒条件 3、転倒条件 4 よりも有意に大きかった (すべて  $p < 0.001$ )。転倒条件 1 での予測骨折荷重は、転倒条件 2、転倒条件 3、転倒条件 4 よりも有意に大きかった

( $p < 0.05$ ,  $p < 0.001$ ,  $p < 0.001$ ) (図4)。立位荷重では、全例頸部骨折が予測され、転倒条件1を除く転倒条件では転子部骨折が予測されました。転倒条件1では、予測骨折型と実際の対側骨折型に関連が認められました( $p < 0.05$ ) (図5)

(図3) 予測骨折荷重・部位(白矢印の部分は、予測骨折部位)



(図4) 平均予測骨折荷重



(図5) 予測骨折型と対側の骨折型の比較

荷重拘束条件 予測骨折型	SC		FC 1		FC 2		FC 3		FC 4	
	S	T	S	T	S	T	S	T	S	T
頸部内側骨折患者 (20人)	20	0	16	4	0	20	0	20	0	20
転子部骨折患者 (22人)	22	0	4	18	0	22	0	22	0	22

S: sub-capital region, T: Trochanteric region

(図6) 各予測骨折荷重の相関性

	SC	FC1	FC2	FC3	FC4
SC	-	0.467**	0.615***	0.614***	0.631***
FC1	0.467**	-	0.586***	0.584***	0.463**
FC2	0.615***	0.586***	-	0.894***	0.728***
FC3	0.614***	0.584***	0.894***	-	0.861***
FC4	0.631***	0.463**	0.728***	0.861***	-

\*\*  $p < 0.01$ .  
\*\*\*  $p < 0.001$ .

#### D. 考察

藤井ら(1987)は、Singh分類II~IIIの骨粗鬆がある解剖用大腿骨に対して荷重方向を変えて各2検体ずつ計6検体行った結果を報告した。それぞれ、立位荷重は2400 N、側方転倒条件(本条件では、転倒条件2)では1400 N、後側方転倒条件(本条件では、転倒条件4)では700 Nであった。立位条件、側方・後側方条件の順に強度は低下する傾向にあった。

Eksteinら(2002)の報告によれば、男女合わせた平均80歳の解剖用cadaverの大腿骨の垂直圧縮荷重の強度の平均3460 Nであった。

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。

#### E. 結論

三次元骨強度解析モデルを用いた大腿骨近位部の強度評価は臨床においても有用であると示唆された。

患者から実際に撮影したCT画像より作成した有限要素モデルは、実際の骨強度を反映していると考えられる。

F. 研究発表

1.論文発表

Bessho, Masahiko; Ohnishi, Isao; Kaneko, Masako; Matsumoto, Takuya; Ohashi, Satoru; Tobita, Kenji; Nakamura, Kozo, CT-based finite element method for predicting the strength of the proximal femur in patients with postmenopausal osteoporosis - Evaluation of inter- and intra-observer reliabilities and reproducibility -, Transactions Vol. 36, p2275, ORS 2011 Annual Meeting, Long Beach, CA, 2011

2.学会発表

(発表誌名巻号・頁・発行年等も記入)

別所雅彦、大西五三男、金子雅子、大橋暁、飛田 健治、中村耕三、定量的CT画像を用いた大腿骨近位部の骨強度評価 - 有限要素法による予測骨強度と大腿骨頸部の骨密度による大腿骨近位部骨折の識別力についての検討 - Osteoporosis Japan p190, 18 巻, 増刊 1 号 p190, 2010

金子雅子、大西五三男、別所雅彦、大橋暁、飛田 健治、中村耕三、CT 有限要素法による大腿骨近位部の骨強度評価 - 年齢別骨強度値の作成と大腿骨近位部骨強度値に影響する因子の解析 - Osteoporosis Japan, p190, Osteoporosis Japan 18 巻 増刊 1 号, 2010

別所雅彦、大西五三男、松本卓也、金子雅子、大橋暁、飛田健治、松山順太郎、中村耕三、定量的 CT を用いた有限要素法による大腿骨近位部の予測骨強度と大腿骨頸部の骨密度による大腿骨近位部骨折の

G. 知的財産権の出願・登録状況

(予定を含む。)

1.特許取得

なし

2.実用新案登録

なし

3.その他

なし

## 低侵襲・高精度骨折整復・治療支援システムの開発に関する研究

### 低侵襲・高精度骨折整復・治療支援システムに関する開発

分担研究者 大橋 暁 東京大学医学部附属病院整形外科 特任助教

**研究要旨** 本研究は骨強度・骨折のリスクを非侵襲且つ高精度に定量評価できる診断装置の開発を行うことを目的とする。人体に非侵襲であるエコーを利用し、骨強度判定を行う装置を開発した。この手法（ET法;echo tracking）は成人の脛骨では高い測定精度が得られた。

本年度は骨折症例において骨癒合を評価するためET法を用い骨折部の経時測定を行った。測定の結果、手術療法・保存療法を行ったいずれの症例においても、非侵襲に骨折部の剛性を定量評価可能であった。

#### A. 研究目的

研究の目標は、さまざまな病態における骨強度・骨折のリスクを非侵襲且つ高精度に定量評価できる診断装置の開発を行うことを目的とする。

#### B. 研究方法

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。非侵襲な生体計測法として超音波に着想したが、超音波Bモード画像における測定対象物の距離の測定精度は超音波の波長に依存するため数百 $\mu\text{m}$ が精度となる。そこで、高精度な測定が可能な超音波ET（Echo Tracking）法を用いた。ET法は、組織からのRF（Radio Frequency）エコー信号の位相を検出して、超音波の波長以下の精度で組織の微小変位を計測する技術である。我々は、骨の微小変位計測を可能とするため、さらにRF信号を骨に特化する処理を行い2.6 $\mu\text{m}$ と高精

度な測定を可能とした。また、ET計測を同時複数点で行うことで、骨の併進成分をキャンセルして変形のみを検出するET計測システムを開発し臨床応用した。

本年度は骨折症例において経時測定を行った。測定対象は8名9肢で（男5女3）で治療の内訳は保存療法が2例2肢、手術症例は6例7肢（髄内釘：3例4肢、プレート：1例1肢、腸骨移植とスクリュー：1例1肢、創外固定：1例1肢）であった。測定期間は平均26.2週（8～60週）で測定回数は平均6.7回（3～10回）であった。いずれの測定も健常者での測定手順に従い固定・荷重・測定を実施した。初回の測定時にはB画像により骨折部位を特定し、近位若しくは遠位の骨折断端より30mm程度の健常皮質骨部を荷重点とし、骨折近位と遠位の皮質骨部にそれぞれプローブを設置した。また、金属プレートによる内固定治療を行っている症例では、荷重点・近遠位の測定点いずれも金属プレート上に設置し荷重によるプレートの変形角の検出を試みた。骨軸上に設置された荷重点・近遠位

の測定点は、初回の測定時に基準点からの距離計測を行い記録した。測定は2~4週程度の間隔で実施される整形外科の受診時に行い、経時的なET変形角度の測定を行い評価した。測定は各5回行い、5回の平均と標準偏差を算出した。受診時には同時にレントゲン撮影も行い、レントゲンとの比較検討を行った。

(倫理面への配慮)

今回の研究で用いられる超音波はすでに臨床で用いられているものと周波数・音圧ともにかかわらず安全性は確立されている。また、検査の際に負荷される荷重は被検者が日常生活において常に受けている荷重より充分小さいものでありこの検査による骨への損傷は無く安全である。

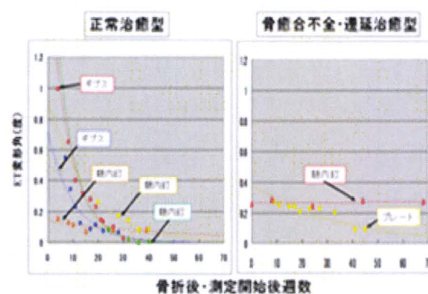
検査に際しては対象者および対象者家族に口頭および文書を用いて説明を行い、十分に理解し同意を得られたもののみを対象とする。また、全研究を通して患者の個人情報情報は公開されない。

### C. 研究結果

測定は全症例において可能であり、荷重に伴う疼痛を含め測定に伴う如何なる合併症は認められなかった。測定に要した平均所要時間は17分であった。また、測定再現性は標準偏差0.011度で%CVでは3%であった。

治癒型と考えられた保存・内固定症例におけるET変形角の経時変化をグラフ化した。これらではET変形角は指数関数的な減少がみられた。

一方、遷延治癒、骨癒合不全型と考えられた症例では変形角度の急激な減少が見られず治癒型とは異なる経過が見られた。



### D. 考察

ET法により、手術療法・保存療法を行つたいずれの症例においても、非侵襲に骨折部の剛性を定量評価可能であった。

### E. 結論

これまでの計測法は創外固定やピンの刺入が必要であり、全く非侵襲に骨強度を評価することが不可能であった。ET計測法は、骨の微小変形を高精度に検出が可能で、骨癒合過程において正常治癒、遷延および癒合不全を判定可能な計測法であるといえる。

### F. 研究発表

#### 2. 学会発表

飛田健治、大西五三男、松本卓也、別所雅彦、金子雅子、中村耕三、低出力超音波パルス治療の骨癒合強度に対する効果 - マイクロCTを用いた仮骨強度予測と点曲げ試験による実測値の比較 -, 第14回超音波骨折治療研究会 2011年 p28

### Ⅲ 研究成果の刊行に関する一覧表

研究成果の刊行に関する一覧表  
【H22. 4. 1～H23. 3. 31】

## 書籍

著者氏名	論文タイトル名	書籍全体の 編集者名	書 籍 名	出版社名	出版地	出版年	ページ
なし							

## 雑誌

発表者氏名	論文タイトル名	発表誌名	巻号	ページ	出版年
松本卓也、大西五三男、別所雅彦、金子雅子、大橋暁、飛田健治、山本哲生、苅田達郎、近藤泰児、中村耕三	CT/有限要素法による骨強度評価の臨床応用 - 癌骨転移例に対する治療方針の検討 -	日本コンピュータ外科学会誌	Vol. 12 No. 3	344-5	2010
大橋暁、大西五三男、松本卓也、別所雅彦、松山順太郎、飛田健治、金子雅子、中村耕三	B-mode超音波メカニカルスキャンを用いた三次元的関節軟骨圧測定 - MRI測定との比較 -	日本コンピュータ外科学会誌	Vol. 12 No. 3	348-9	2010
別所雅彦、大西五三男、松本卓也、金子雅子、大橋暁、飛田健治、松山順太郎、中村耕三	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 - 大腿骨近位部と腰椎の骨強度の相関について -	日本コンピュータ外科学会誌	Vol. 12 No. 3	410-1	2010
道家健仁、中島義和、杉田直彦、光石衛、松本卓也、別所雅彦、大橋暁、飛田健治、金子雅子、大西五三男、佐久間一郎、中村耕三	手術ロボットへの応用を目指した筋骨格モデルに関する研究	日本コンピュータ外科学会誌	Vol. 12 No. 3	408-9	2010
石原良太、鄭常賢、小林英津子、廖洪恩、伊藤孝則、落合正志、伊藤悠平、清徳則雄、別所雅彦、松本卓也、飛田健治、大橋暁、金子雅子、大西五三男、佐久間一郎	Universal-Bar-Link創外固定器を用いた変形骨矯正のための手術ナビゲーションシステムの開発	日本コンピュータ外科学会誌	Vol. 12 No. 3	434-5	2010



齋藤季、中島和義、橋詰博行、杉田直彦、藏元孝一、中島義男、光石衛	SAIを用いた骨統計形状モデルのための対応点設定	日本コンピュータ外科学会誌	Vol.12 No.3	426-7	2010
大西五三男、別所雅彦、松本卓也、金子雅子、今井一博、中村耕三	骨粗鬆症の治療とその評価をどのように行うか 定量的CTを用いた有限要素法による骨強度診断 骨粗鬆症の臨床診断への応用	日本整形外科学会雑誌	84巻3号	S192	2010
別所雅彦、大西五三男、松本卓也、金子雅子、大橋暁、飛田健治、松山順太郎、中村耕三	定量的CTを用いた有限要素法による大腿骨近位部の予測骨強度と大腿骨頸部の骨密度による大腿骨近位部骨折の識別力についての検討	日本整形外科学会雑誌	84巻4号	S469	2010
大橋暁、大西五三男、松本卓也、別所雅彦、金子雅子、飛田健治、松山順太郎、岡崎裕司、佐藤和強、中村耕三	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(会議録/症例報告)	日本整形外科学会雑誌	84巻4号	S539	2010
金子雅子、大西五三男、別所雅彦、松本卓也、大橋暁、飛田健治、中村耕三	CT有限要素法による大腿骨近位部の骨強度評価 年齢別骨強度値の作成と大腿骨近位部骨強度値に影響する因子の解析	日本整形外科学会雑誌	84巻4号	S711	2010
大西五三男、別所雅彦、松本卓也、金子雅子、大橋暁、今井一博、中村耕三	骨粗鬆症における画像診断 有限要素法による骨強度評価の臨床応用	Osteoporosis Japan	18巻2号	192-196	2010
別所雅彦、大西五三男、金子雅子、大橋暁、飛田健治、中村耕三	定量的CT画像を用いた大腿骨近位部の骨強度評価 - 有限要素法による予測骨強度と大腿骨頸部の骨密度による大腿骨近位部骨折の識別力についての検討 -	Osteoporosis Japan	18巻, 増刊1号	p190	2010
金子雅子、大西五三男、別所雅彦、大橋暁、飛田健治、中村耕三	CT有限要素法による大腿骨近位部の骨強度評価 - 年齢別骨強度値の作成と大腿骨近位部骨強度値に影響する因子の解析 -	Osteoporosis Japan,	18巻 増刊1号, 2010	p190	2010
大西五三男	骨粗鬆症診断・治療の新展開 定量的CTを用いた有限要素法による骨強度評価	臨床整形外科	45巻10号	887-892	2010

大西五三男	脊椎・脊髄のバイオメカニクス 椎骨(椎体)の力学的特性 骨密度と椎体骨折の力学解析	脊椎脊髄ジャーナル	23巻8号	785-789	2010
大西五三男	【ロコモティブシンドローム 高齢社会における運動器障害の予防】 運動器医療の応用研究 有限要素法による骨粗鬆症(骨強度)評価	治療学	44巻7号	778-781	2010
大西五三男	最新用語解説 臨床(第31回) 三次元有限要素法	骨粗鬆症治療	9巻2号	181-184	2010
大西五三男	【運動と骨II】 基礎骨のバイオメカニクス(有限要素法も含めて)	THE BONE	24巻2号	143-150	2010
飛田健治、大西五三男、松本卓也、別所雅彦、金子雅子、中村耕三	低出力超音波パルス治療の骨癒合強度に対する効果 - マイクロCTを用いた仮骨強度予測と4点曲げ試験による実測値の比較 -	超音波骨折治療研究会	14巻	28	2011
Isao Ohnishi, Takuya Matsumoto, Masahiko Bessho, Satoru Ohashi, Kenji Tobita, Masako Kaneko, and K Nakamura.	Navigated unilateral external fixation system for deformity correction incorporating preoperative surgical simulation and intraoperative laser guidance.	J Biomech	43, suppl. 1	S71	2010
Ohashi, Satoru; Ohnishi, Isao; Bessho, Masahiko; Tobita, Kenji; Kaneko, Masako; Matsumoto, Takuya; Matsuyama, Junntaro; Nakamura, Kozo	Measurement of Articular Cartilage Thickness Using a 3D Image Reconstructed from B-mode Ultrasonography Mechanical Scans -Comparison with MRI-derived Data-	Transactions of 2011 Annual Meeting of the Orthopaedic Research Society	Vol. 36	473	2011
Tobita, Kenji; Ohnishi, Isao; Matsumoto, Takuya; Ohashi, Satoru; Bessho, Masahiko; Kaneko, Masako; Nakamura, Kozo	Effect of low-intensity pulsed ultrasound stimulation on callus remodeling in a gap healing model - Evaluation by bone morphometry using 3-dimensional quantitative micro computed tomography -	Transactions of 2011 Annual Meeting of the Orthopaedic Research Society	Vol. 36	1503	2011

Bessho, Masahiko ; Ohnishi, Isao; Kaneko, Masako; Matsumoto, Taku ya; Ohashi, Satoru; Tobita, Kenji; Nakamura, Kozo	CT-based finite element method for predicting the strength of the proximal femur in patients with postmenopausal osteoporosis - Evaluation of inter- and intra-observer reliabilities and reproducibility -	Transactions of 2011 Annual Meeting of the Orthopaedic Research Society	Vol. 36	2275	2011
Tobita, K; Ohnishi, I; Matsumoto, T; Ohashi, S; Bessho, M; Kaneko M; Matsuyama, J; Nakamura, K.	Effect of low-intensity pulsed ultrasound stimulation on gap healing in a rabbit osteotomy model evaluated by quantitative micro computed tomography-based 3-dimensional cross-sectional moment and cross-sectional moment of inertia	Transactions of 11th Congress of the European Federation of National Associations of Orthopaedics and Traumatology	11	F91	2010
Bessho, M., Ohnishi, I., Matsumoto, T., Kaneko, M., Ohashi, S., Tobita, K., Nakamura, K	Strength index by quantitative computed tomography-based finite element method offers higher discriminatory power for hip fracture than areal bone mineral density of the femoral neck	Transactions of 11th Congress of the European Federation of National Associations of Orthopaedics and Traumatology	11	P285	2010
Satoru Ohashi, Isao Ohnishi, Takuya Matsumoto, Masahiko Bessho, Kenji Tobita, Masako Kaneko, Jun-taro Matsuyama, Kozo Nakamura	Evaluation of the Accuracy of Articular Cartilage Thickness Measurement by Conventional and Real-time Spatial Compound Ultrasonography	Transactions of 11th Congress of the European Federation of National Associations of Orthopaedics and Traumatology	11	P180	2010
Tobita, K; Ohnishi, I; Matsumoto, T; Ohashi, S; Bessho, M; Kaneko M; Matsuyama, J; Nakamura, K	Effect of low-intensity pulsed ultrasound stimulation on callus remodeling in a gap healing model - Evaluation by bone morphometry using 3-dimensional quantitative micro computed tomography -	Transactions of 11th Congress of the European Federation of National Associations of Orthopaedics and Traumatology	11	F91	2010

Kaneko M., Ohnishi I., Bessho M., Matsumoto T., Ohashi, S., Tobita K., Nakamura K.	Prediction of proximal femur strength by a quantitative computed tomography-based finite element method - Creation of predicted strength data of the proximal femur according to age range in a normal population and analysis of risk factors for hip fracture-	Transactions of 11th Congress of the European Federation of National Associations of Orthopaedics and Traumatology	11	F446	2010
Matsumoto T., Ohnishi I., Bessho M., Kaneko, M., Ohashi, S., Tobita K., Nakamura K.	Analysis of lag screw bone interface mechanics using a patient-specific finite element method	Transactions of 11th Congress of the European Federation of National Associations of Orthopaedics and Traumatology	11	P157	2010
Sanghyun Joung, Hongen Liao, E. Kobayashi, M. Mitsui, Y. Nakajima, N. Sugano, M. Bessho, S. Ohashi, T. Matsumoto, I. Ohnishi, I. Sakuma	Hazard analysis of fracture-reduction robot and its application to safety design of fracture-reduction assisting robotic system	IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2010	3-7 May 2010	1554 - 1561	2010
S. Joung, T. Doke, E. Kobayashi, Y. Nakajima, N. Sugano, M. Bessho, I. Ohnishi, I. Sakuma	Effects of femur shaft fracture type on robotic assisted fracture reduction	10 <sup>th</sup> Annual Meeting of CAOS-International	June 16-19, 2010	282-285	2010
S. Joung, H. Liao, E. Kobayashi, Y. Nakajima, M. Mitsui, N. Sugano, I. Ohnishi, I. Sakuma	User interface for decision of intended movement and its application to fracture-reduction assistance robotic system	International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery (CARS) 2010		262-263	2010
石原良太, 鄭常賢, 小林英津子, 大西五三男, 佐久間一郎	Universal-Bar-Link創外固定器の位置姿勢誘導システムの開発	第22回バイオエンジニアリング講演会講演集		130	2010

## IV 研究成果の刊行物・印刷

# 日本コンピュータ外科学会誌

Journal of Japan Society of Computer Aided Surgery

第19回日本コンピュータ外科学会大会特集号

*Special Number / 19th Annual Congress of Japan Society of  
Computer Aided Surgery*

会 期：2010年11月2日(火)・3日(水・祝)・4日(木)  
会 場：九州大学医学部 百年講堂 福岡市東区馬出3-1-1  
大会長：橋爪 誠 九州大学大学院医学研究院 先端医療医学講座

■ 特別企画

特別講演 / キーノートレクチャー  
シンポジウム

1. 医療技術立国へ向けて～日本発の医療機器の実用化への課題
2. 医療機器におけるトランスレーショナル・リサーチの現状

パネルディスカッション

消化器・脳外科・耳鼻科・整形外科領域におけるCAS

第9回日本コンピュータ外科学会教育セミナー  
ランチョンセミナー

■ 一般演題 (口演 / ポスター発表)

ロボット・マニピュレータ / 内視鏡 / 脳神経外科 / 耳鼻科・頭頸部外科  
セグメンテーション / ナビゲーション / VR・トレーニング・シミュレーション  
消化器外科 / 胎児外科 / 整形外科 / 手術機器・デバイス / その他

協賛学会

精密工学会, 日本医用画像工学会, 日本医療機器学会, 日本機械学会, 日本生体医工学会,  
日本ロボット学会, ライフサポート学会

2010 Nov.  
Vol.12 No.3

10(XVII)-72

# CT/有限要素法による骨強度評価の臨床応用

## —癌骨転移例に対する治療方針の検討—

○松本卓也<sup>a)</sup> 大西五三男<sup>b)</sup> 別所雅彦<sup>b)</sup> 金子雅子<sup>b)</sup> 大橋暁<sup>b)</sup>

飛田健治<sup>b)</sup> 山本哲生<sup>a)</sup> 荻田達郎<sup>a)</sup> 近藤泰児<sup>a)</sup> 中村耕三<sup>b)</sup>

a)多摩総合医療センター整形外科

b)東京大学 整形外科

### Clinical Application of a CT Based Nonlinear Finite Element Method

#### —Clinical Management of a Patient with Metastatic Bone Disease—

Takuya Matsumoto<sup>a)</sup>, Isao Ohnishi<sup>b)</sup>, Masahiko Bessho<sup>b)</sup>, Masako Kaneko<sup>b)</sup>, Satoru Ohashi<sup>b)</sup>

Kenji Tobita<sup>b)</sup>, Tetsuo Yamamoto<sup>a)</sup>, Tatsuro Karita<sup>a)</sup>, Taiji Kondoh<sup>a)</sup>, Kozo Nakamura<sup>b)</sup>

a) Department of Orthopaedic Surgery, Tokyo Metropolitan Tama Medical Center, Tokyo

b) Department of Orthopaedic Surgery, University of Tokyo, Tokyo,

Abstract: Pathological fractures due to metastatic bone diseases are caused by fragility at the metastatic lesion. Surgical intervention by stabilizing is taken into consideration to prevent such fractures when a patient seems to be at high fracture risk. Thus, accurate assessment of bone strength is required. Bessho et al. reported 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 the femur with metastatic bone disease, by which the treatment modality of the patient was decided. After treatment, the patient have had no occurrence of fracture within the follow up period.

Key words: Finite element method, Malignant Bone Disease, Bone strength

#### 【背景・目的】

骨は肺や肝とともに癌転移を来し易い臓器であり、骨転移をきたすと骨の脆弱性による疼痛、病的骨折などにより著しいADL低下を引き起こす。一方、根治は困難で、延命と疼痛の改善、ADLの維持が治療目的となる。

癌骨転移より下肢長幹骨に生じた病的骨折は立位・歩行のためには骨折部の強固な固定が不可欠だが、全身状態不良でベッド臥床者でも骨接合により看護や介護が容易となるため手術療法を選択する場合もあり、病的骨折の可能性が高い場合は予防的に内固定術を行うことがある。癌骨転移に対する治療法の決定に際して、全身状態やADL、骨脆弱性、予後など非常に多くの複雑な要因を有しているので治療法を決定に難渋することがあり、病的骨折の予防的手術は議論の余地があるため個々の患者において定量的な骨折リスクの評価が必要不可欠である。

本研究の目的は、高精度かつ高再現性の3次元骨強度解析法であるCT/有限要素法<sup>1)</sup>を用いて癌骨転移に患者に骨強度評価を行い、骨折リスクを評価して治療方針を決定する事である。

#### 【症例と方法】

症例は運動後の背部痛が改善せず、下肢筋力低下が生じたため当院紹介受診。精査により前立腺癌の骨転移による胸椎圧迫骨折があり、骨シンチグラフィ(図1)上、胸椎だけでなく、肋骨、大腿骨など多発の骨転移が見られた74歳男性。特に右大腿骨は転子部骨幹部に転移がみられ(図2)、ベッドからの移乗でも骨折のリスクが懸念されたためCT/有限要素法で解析を行った。

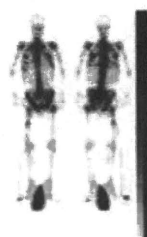


図1 骨シンチグラフィー  
胸椎、肋骨、大腿骨と多  
発の集積像が見られる



図2 股関節レントゲン  
右大腿骨骨幹部に骨透  
亮像が見られる

CT/有限要素法の解析は大腿骨全長を骨量ファントム(B-MAS200,株式会社京都科学)とともに1ミリ厚で撮影し定量的CT dicom dataを取得。画像上で閾値処理をして解析対象となる癌転移巣のある大腿骨全長を抽出し3次元構築。患者固有の解析モデルを作成した。有限要素モデルは海綿骨が2ミリの正四面体要素、皮質骨外層が1辺2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Keyak<sup>2)</sup>, Keller<sup>3)</sup>らの理論に基づき材料特性に変換。

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、非線形解析を行った。評価項目は骨密度分布を基にした腫瘍の分布の評価、有限要素解析による最小主ひずみ、相当応力の分布、予測骨折荷重骨折部位を基にした骨折リスクの4項目で、上記評価より病的骨折の予防的手術の適応について検討した。

【結果】



図3 骨密度分布

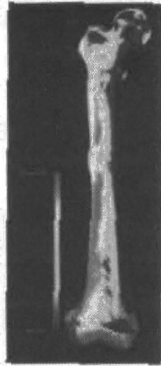


図4 最小主ひずみ分布

骨密度分布

図3に示すように骨幹部外側中央のだけでなくCalcarから小転子下部にかけての内側皮質骨の骨密度が低下して主引張骨梁に沿った骨密度は断続しており、骨転移巣であると考えられる。

最小主ひずみ

図4に示すように主圧縮骨梁からCalcarを經由して小転子下部の内側皮質骨にかけての強い圧縮ひずみがみられる。骨幹部の転移巣にかかるひずみは少ない。

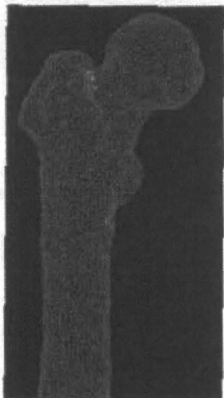


図5 相当応力分布 (120kgf 荷重時)

図6 予測骨折部位 大腿骨頸部基部頭側に予測骨折部がある

相当応力

主圧縮骨梁からCalcarを經由し骨幹部内側を通る応力分布。骨幹部の骨転移部以遠の応力はあまり大きくない(図5)。

予測骨折荷重、骨折部位

予測骨折部位は大腿骨頸部基部の頭側であり、予測骨折荷重220kgfであった。(図6)

骨折リスク評価、治療方針

- 体重58kgの約3.8倍の予測骨折荷重
- 通常歩行には耐えうる荷重量である
- 骨幹部転移巣の応力・ひずみは小さい
- 大腿骨骨幹部骨折より頸部骨折がリスク

と判断し、予防的手術は行わず、放射線療法を選択、大腿骨骨頭から骨幹部転移巣の範囲に計30Gyの照射を行い、歩行訓練を開始した。

【考察】

一般的には照射や化学療法、ホルモン療法が有効な転移癌では非手術的治療法が選択される。しかし、非手術療法、特に放射線照射後の病的骨折では、骨折部の骨癒合が期待できないだけでなく、照射野にある軟部組織にも侵襲が加わるため手術創の癒合不全や感染のリスクが高くなる。よって加療前の状態で骨折リスクが十分に高い場合は骨折予防のための手術適応があると考えられる。

Mirels<sup>4</sup>は病的骨折のない四肢骨転移例について、

①部位(上肢、下肢、大腿骨転子部)、②疼痛(軽微、中等度、高度でADL制限)、③X線所見(造骨性、混合性、溶骨性)、④サイズ(骨径の1/3以下、1/3-2/3、2/3以上)の4項目について各項目3点、計12点満点で評価し、8点以上では病的骨折を生じる確率が高いので予防的に内固定術を施行することを推奨している。本症例を点数化すると①下肢・大腿骨転子部で②軽度の疼痛③溶骨性病変④骨形の2/3以上で10点であり、予防的手術の適応があると言えるが、CT/有限要素法による予測骨折荷重は220kgfで歩行時に掛かるといわれる体重の3倍以上あることから非手術療法を選択し、病的骨折を起こすことなく経過している。

本研究のlimitationは以下2点が挙げられる。

第1点は、材料特性の変換はKeyak<sup>3</sup>、Keller<sup>2</sup>らの理論に基づいているが、これは骨転移のない標本から得られた結果である。骨転移のある標本の材料特性を検討したKaneko<sup>5</sup>らは骨転移によりヤング率と圧縮強度の減少が見られるが引張強度は変わらないと報告し、既存の材料特性の換算式を利用した骨折リスク評価は有用であるとも報告しており、本法による癌骨転移に対する骨強度解析は、骨転移のない標本を用いた別所<sup>1</sup>らの報告のような精度が得られない可能性があるものの有用であると考えられる。

第2に放射線照射は晩期の骨壊死や放射線骨炎による骨の脆弱化を生じるので癌の浸潤とは関係なく、将来骨強度が下がる可能性がある<sup>6</sup>。よって存命中の病的骨折を予防するには、照射前の予測骨折荷重を、生命予後と照射後の骨脆弱性を考慮した上で手術適応の有無について評価すべきであることである。

結語

CT/有限要素法による骨強度予測を行ない、癌骨転移の治療法の選択を行った。今後症例を増やし経過観察を行い、病的骨折に対するリスク評価の精度を高めていくべきである。

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. Mirels H. *Clin Orthop*, 1989;249:256-64.
5. Kaneko T. *Med. Eng. Phys.* 2003;23:445-54
6. Hatano H. *Breast Cancer*. 2004;11:313-17.



## 10(XVII)-74 B-mode超音波メカニカルスキャンを用いた三次元的関節軟骨厚測定-MRI測定との比較-

○大橋 暁<sup>a</sup>, 大西 五三男<sup>a</sup>, 松本 卓也<sup>a</sup>, 別所 雅彦<sup>a</sup>, 松山 順太郎<sup>a</sup>, 飛田 健治<sup>a</sup>, 金子 雅子<sup>a</sup>, 中村 耕三<sup>a</sup>

<sup>a</sup> 東京大学医学部整形外科

### Measurement of Articular Cartilage Thickness Using a 3D Image Reconstructed from B-mode Ultrasonography Mechanical Scans -Comparison with MRI-derived Data-

S. Ohashi<sup>a</sup>, I. Ohnishi<sup>a</sup>, T. Matsumoto<sup>a</sup>, M. Bessho<sup>a</sup>, M. Kaneko<sup>a</sup>, K. Tobita<sup>a</sup>, J.

Matsuyama<sup>a</sup>, K. Nakamura<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Department of Orthopaedic Surgery, University of Tokyo, Tokyo, Japan

**Abstract:** The purpose of this study was to develop a method to measure 3D articular cartilage thickness at the femoral condyle using B-mode ultrasonography (US) and to compare results with 3D measurements using MRI to clarify the feasibility of US in clinical evaluations of articular cartilage. The medial surface of the right knees of subjects comprised of 2 healthy male volunteers (age, 37 and 59 years) and 2 male patients with knee osteoarthritis (age, 73 and 81 years) were scanned using the B-mode ultrasound probe with the knee flexed at 120 degree. The range of the angle of probe rotation for the arm was 0-80 degree and the US B-mode images (total, 101 images) were acquired every 0.8 degree. MR images of the knees were also acquired using the sequence previously described. 3D models of medial femoral condyle articular cartilage from both US and MRI images were created. Cartilage thickness was determined at 400 points 1 mm apart from one another in the US model (Tc-US) and the MRI model (Tc-MRI). Tc-US correlated significantly with Tc-MRI in all participants ( $p < 0.001$ , each). Our results show that, like MRI, Tc-US measurement using 3D models also allow accurate measurement of Tc, in both healthy individuals and patients with osteoarthritis.

**Key words:** Ultrasonography, Osteoarthritis, Articular cartilage, Knee

**背景および目的** 変形性関節症が進行すると関節軟骨は変性後摩耗する。関節軟骨を映像化し三次元的に評価する方法はMRI画像を用いた手法により研究が行われている[1, 2]が、MRI撮像は一般的に高価であり、また長い撮像時間を要するなどの問題点を有する。一方、過去に超音波B-mode画像を用いて関節軟骨を二次元的に定量評価した研究はある[3, 4]が、臨床用超音波診断装置を用いて三次元的に評価した先行研究はこれまでにない。本研究において、関節軟骨診断用超音波プローブスキャナーを作製し、超音波軟骨B-mode画像を取得し、画像データを基に関節軟骨三次元表面形状モデルを作成、MRI画像を基に作成した関節軟骨三次元表面形状モデルとの関節軟骨厚測定値の比較を行うことで測定値精度評価を行い、超音波B-mode画像を用いた三次元的関節軟骨評価法の有用性を評価した。

**対象と方法** ボランティア2名(37歳・59歳男性)、変形性膝関節症2名(73歳・81歳男性)を対象に以下の撮像を行った。超音波撮像機器およびリニアプローブにはそれぞれProsound- $\alpha$ 10およびUST-5412(アロカ株式会社、東京都三鷹市)を用いプローブスキャナーを

作成した(Fig 1)。一定の回転半径をもったレールに沿って、プローブが移動し一定間隔角度で超音波画像を取得する機構となっている。膝関節を約120°屈曲位にて設置した(Fig 2)。撮像条件はTissue Harmonic, 5MHz、解像度:横420 pixel×縦468 pixel、pixel size: 0.0855 mm x 0.0855 mmとした。また、スライス画像間の角度は0.796°、スライス枚数は101枚とした。空間的角度位置情報は、プローブスキャナーの回転軸に設置されているエンコーダにより算出し、各スライス画像にこれらの情報を付与した。これらのデータを専用で作成した画像ソフトを用いて、各スライス画像を三次元的に配列した(Fig 3A, B)。画像データを画像処理ソフトMimics(Materialise, Leuven, Belgium)を用い関節軟骨領域を各スライスにおいてLivewire法[5]を用いて抽出した後、三次元関節軟骨モデルを作成した(Fig 4A, B)。

次に超音波撮像による定量評価値の精度を検討するために、過去の研究[2]において軟骨厚測定値の正確性の検証がなされている撮像シークエンス(DESSwe法)にて膝関節MRI撮像を行った(Achieva 3.0T X-series; Philips, Eindhoven, the Netherlands; 512 pixels × 512 pixels; pixel

size, 0.313 mm × 0.313 mm; slice thickness, 0.600 mm; slice gap, 0.291 mm)。MRI 画像 DICOM データを出力し Mimics を用い超音波モデル同様に関節軟骨領域抽出後三次元関節軟骨モデルを作成した (Fig 4C, D)。

超音波および MRI 三次元モデルについて関節軟骨厚をカラーマッピングにて表示し比較した。次に、双方のモデルを位置合わせ後、1mm 間隔で 400 ポイントにおいて関節軟骨厚の測定を行い (Fig 5) 関節軟骨厚測定値をそれぞれ Tc-US, Tc-MRI とした。Tc-US と Tc-MRI について線形回帰解析を行い Pearson 相関係数の算出を行った。有意水準は  $p < 0.05$  とした。

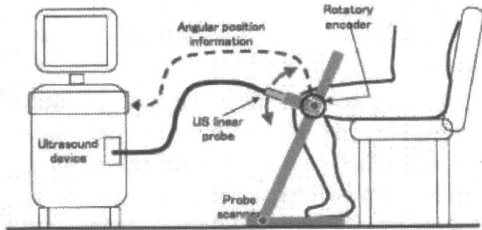


Fig. 1 プローブスキャナー概要図

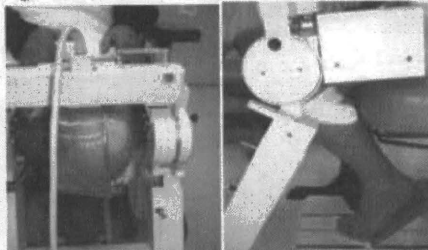


Fig. 2 大腿骨内側顆部撮像風景(左:正面像, 右:側面像)

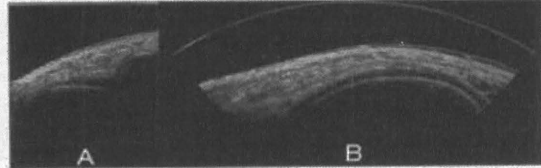


Fig. 3 プローブの動きと画像の配列 (A:撮像超音波画像, B:三次元再構成によって得られた関節軟骨側面画像)



Fig. 4 超音波画像(A)MRI画像(C)より関節軟骨領域を抽出し三次元モデルを作成(B, D)。

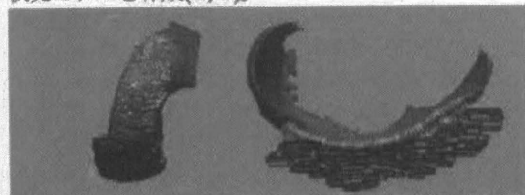


Fig. 5 超音波関節軟骨モデル(茶)と MRI 関節軟骨モデル(青)との位置合わせ (左) および関節軟骨厚測定 (右)

結果 カラーマッピングによる軟骨厚比較では、軟骨の厚い部分や薄い部分の分布に近似性を認めることができた (Fig 6)。Tc-MRI, Tc-US との間には全ての症例において  $p < 0.01$  と有意な相関を認めた (Fig 7)。

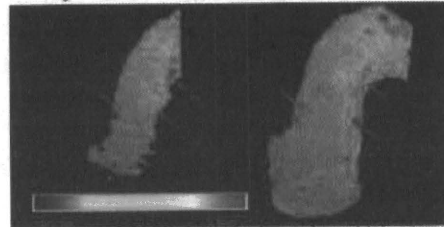


Fig. 6 73 歳男性の超音波モデル (左) と MRI 軟骨モデル (右) における軟骨厚カラーマッピング

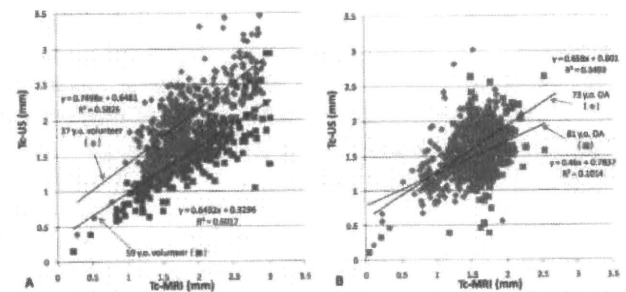


Fig. 7 関節軟骨厚測定値散布図 (左: ボランティア, 右: 変形性関節症患者)

考察 過去に整形外科領域において超音波画像を用いて三次元定量評価を行っている対象はアキレス腱[6]や肩腱板[7]などがあるが、関節軟骨を対象に行っている研究はこれまでにない。過去の研究[8]において MRI による関節軟骨厚測定値の正確性が非常に高いことを考慮すると、今回の結果において超音波画像を用いた三次元モデル作成およびその定量評価値の正確性が高いと考えられた。

結論 開発を行ったプローブスキャナーを用い、健常者・変形性膝関節症患者における大腿骨内側顆部関節軟骨の超音波画像を収集し、三次元関節軟骨モデルを作成、MRI 画像をもとに作成した三次元モデルと関節軟骨厚について比較を行った。健常者・変形性膝関節症患者双方において軟骨厚測定値の有意な相関がみられ、超音波画像を用いた関節軟骨厚三次元測定が臨床的に有用である可能性が高いことが示された。

参考文献

- [1] Eckstein et al. Osteoarthritis Cartilage, 2007; 15: 1326-32
- [2] Eckstein et al. Ann Rheum Dis, 2006; 65: 433-41
- [3] Myers et al. J Rheumatology, 1995; 22: 109-16.
- [4] Burkhard et al. Arthritis & Rheumatism, 2009; 61: 435-41.
- [5] Bowers et al. Osteoarthritis Cartilage, 2008; 16: 1167-73
- [6] Iagnocco et al. Clin Exp Rheumatol, 2009; 27: 547-51
- [7] Kang et al. Skeletal Radiol, 2009; 38: 1063-9
- [8] Burgkart et al. Arthritis & Rheumatism, 2001; 44: 2072-7.

## 10(XXII)-104 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 - 大腿骨近位部と腰椎の骨強度の相関について -

○別所雅彦<sup>a</sup>, 大西五三男<sup>a</sup>, 松本卓也<sup>a</sup>, 金子雅子<sup>a</sup>, 大橋暁<sup>a</sup>, 飛田健治<sup>a</sup>, 松山順太郎, 中村耕三<sup>a</sup>

<sup>a</sup> 東京大学医学部整形外科

### Predicting strengths of the femur and vertebra in patients with postmenopausal osteoporosis by a CT based finite element method - The predicted fracture load of the proximal femur is correlated with that of the lumbar vertebra -

M. Bessho<sup>a</sup>, I. Ohnishi<sup>a</sup>, T. Matsumoto<sup>a</sup>, M. Kaneko<sup>a</sup>, S. Ohashi<sup>a</sup>, K. Tobita<sup>a</sup>, J. Matsuyama and K. Nakamura<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Department of Orthopaedic Surgery, University of Tokyo, Tokyo, Japan

**Abstract:** We focused on a computed tomography-based finite element method (CT/FEM) to quantify structural strength, developing a nonlinear CT/FEM to achieve accurate assessment of strength in the proximal femur and lumbar vertebrae. One of the purposes of the present study was thus to validate our model by comparing predicted fracture loads (PFLs) in our model to fracture loads derived from mechanical testing in previous studies. The other goal was to clarify whether either femoral or vertebral strength in postmenopausal osteoporosis patients is predictable by CT/FEM of only one of the two sites. We thus investigated whether femoral PFL could be utilized to estimate vertebral PFL. Right femur and the second lumbar vertebra (L2) in 40 female patients with postmenopausal osteoporosis (average: 70.1) were evaluated. Axial CT scans of the proximal femur and L2 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 using the software that was developed by the authors. Correlations among PFLs of the femur in stance configuration (SC) and fall onfiguration (FC) and the L2 were investigated. The average PFL of the proximal femur in SC was 3910 N, 1290 N for FC, respectively. The average PFL of L2 was 3010 N. Our results did not contradict these previous studies. PFL in FC may well correlate to vertebral PFL in Japanese women with postmenopausal osteoporosis.

**Keywords:** Femur, Vertebra, Osteoporosis, Finite element method, Computed tomography.

### 1. 目的

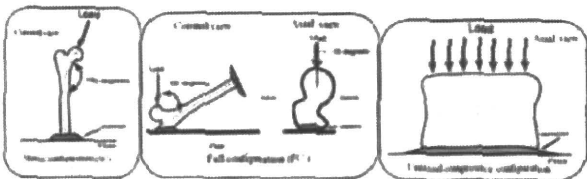
骨粗鬆症が原因による大腿骨近位部骨折や脊椎骨折が近年増加し、社会的な問題となっている。個々の患者の骨折リスクの正確な把握や、それに対応した有効な予防策を確立することは、いっそう重要な意義を持ってきている。大腿骨近位部や腰椎の骨強度の評価方法は、DXA法 (dual energy X-ray absorptiometry) や QCT (Quantitative computed tomography) による骨密度の変化や骨形態計測による方法で評価が行われている。DXA法による評価は、骨強度との相関はあるが、構造的強度評価を行えないという限界がある[1]。我々は構造強度の定量評価が可能なCT/有限要素法(FEM)に着目し、CT/有限要素法による腰椎や大腿骨近位部の強度を正確に評価する方法を確立した[2, 3]。CT/有限要素法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[4-8]。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。また、大腿骨近位部の予測強度評価と腰椎の予測強度評価

は、それぞれ発表施設で解析手法が異なっており、同一施設で同一の解析ソフトウェアを用い、大腿骨近位部と腰椎の強度予測を行っている報告は、我々以外にはない。このため、大腿骨と腰椎の予測骨強度評価の相関性を検討することは困難である。本研究の目的は、骨粗鬆症患者の大腿骨近位部と第2腰椎をCT/FEMを行い、骨折荷重を定量予測し、お互いの予測骨折荷重の相関性を評価し、CT有限要素法が代表的な一部位を測定することによって他部位のリスク評価を行うことのできるかどうか検討を行った。

### 2. 対象と方法

対象は、女性の原発性骨粗鬆症患者40名(平均70.1歳、52~89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、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厚でQCT撮影を行い、第2腰椎を2mm厚でQCT撮影を行った。有限要素法解析ソフトウェアにて右大腿骨のQCT画像から、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[3]。一方、第2腰椎のQCT画像から、海綿骨に2mm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[2]。3次元有限要素モデルを作成した。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、降伏応力および臨界応力はKeyak[9]ら、およびKellar[10]らの方法により設定した。荷重条件は、立位を模擬した条件と、転倒を模擬した条件[11]、第2腰椎は、単軸圧縮を模擬した条件を設定した[2](Fig. 1)。



(Fig. 1) Loading and boundary conditions

大腿骨近位部モデルは、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-10000ustarin以下の場合(圧潰)に破壊(骨折)と定義した[3]。第2腰椎モデルは、1つのソリッド要素の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-10000ustarin以下の場合(圧潰)を破壊(骨折)と定義した[2]。モデルの破壊が起きたときの荷重を予測骨折荷重とした。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。Pearson's testを用い、有意水準を0.05以下とした。

### 3. 結果

大腿骨近位部の立位条件・転倒条件における予測骨折荷重はそれぞれ、3910 N (2830 ~ 5800 N), 標準偏差(SD) 719 N, 1290 N (650 ~ 2030 N), SD 323 Nであった。第2腰椎の予測骨折荷重は、3010 N (910 ~ 4950 N), SD 1110 Nであった。また、大腿骨近位部の立位予測骨折荷重と第2腰椎の予測骨折荷重の相関性は、 $r = 0.472$  ( $p = 0.0018$ )、大腿骨近位部の転倒予測骨折荷重の相関性は、認められなかった ( $p = 0.10$ )。大腿骨の立位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 (Table. 1)。

	Proximal femur	L2
Proximal femur	-	0.647***
L2	0.647***	-

(Table. 1) Correlations (r) of the predicted fracture loads for each loading configurations. (n.s.: not significant, \*\*\*:  $p < 0.001$ , \*\*:  $p < 0.01$ )

### 4. 考察、結語

本研究における大腿骨近位部の立位条件や転倒条件の予測骨折荷重値、第2腰椎の予測骨折荷重値は、先行研究と矛盾していなかった。Ecsteinらの報告では、腰椎の単軸圧縮強度と大腿骨の垂直圧縮強度の相関係数は、 $r = 0.63$ であった、腰椎の単軸圧縮強度と大腿骨の側方圧縮強度の相関係数は、 $r = 0.59$ であった[12]。大腿骨の垂直圧縮強度と側方圧縮強度の相関係数は、 $r = 0.78$ であった。本研究では、腰椎と大腿骨の立位条件での予測骨折荷重の相関性はあったが、腰椎と大腿骨の転倒条件での予測骨折荷重には相関性が認められなかった。本研究の患者は、原発性骨粗鬆症の女性患者のため、特に骨強度が減弱していると考えられる。骨強度が減弱している腰椎と大腿骨立位の相関性は保たれるが、転倒条件の予測骨折荷重は腰椎の予測骨折荷重と独立に変化する可能性があることが示唆された。

本研究では先行研究と比較しとも特に矛盾はなく、臨床でも十分に評価可能であると考えられた。また、本研究では、腰椎と大腿骨には相関性が認められており、大腿骨近位部の立位条件である程度、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はないかと示唆された。ただ、局所的な骨折リスクに関しては、個別に評価すべきであると考えられた。

### 文献

[1] Cody, D.D. et al., J Biomech, 1999. 32(10): p. 1013-20. [2] Imai, K. et al., Spine, 2006. 31(16): p. 1789-94. [3] Bessho, M. et al. J Biomech, 2007. 40(8): p. 1745-53. [4] Cody, D.D. et al. Ann Biomed Eng, 2000. 28(4): p. 408-14. [5] Keaveny, T.M. et al., J Bone Miner Res, 2007. 22(1): p. 149-57. [6] Imai, K. et al., Spine, 2008. 33(1): p. 27-32. [7] Bessho, M. et al., Transaction of 53rd Annual Meeting of the ORS, 2007: p. 1269. [8] Keyak, J.H. et al., Transaction of 54th Annual Meeting of the ORS, 2008: p. 953. [9] Keyak, J.H., et al., J Biomech, 1998. 31(2): p. 125-33. [10] Keller, T.S. J Biomech, 1994. 27(9): p. 1159-68. [11] Keyak, J.H. et al. J Orthop Res, 2001. 19(4): p. 539-44. [12] Eckstein, F. et al., J Bone Miner Res, 2002. 17(1): p. 162-71.