

学位申請論文

三次元有限要素法による橈骨遠位端骨折発生 メカニズムの解析

獨協医科大学 整形外科学

富沢 一生

要 旨 橈骨遠位端骨折発生メカニズムの研究は、われわれの渉猟し得た範囲では過去にほとんど発表されていない。三次元有限要素法を用いて正常骨と骨粗鬆症骨による骨折を再現し、骨粗鬆症の有無による骨折発生様式の違い、また手関節背屈70°および掌屈70°にて発生した橈骨遠位端骨折を再現し、受傷時の肢位により骨折型の違いをきたすかどうかを解析した。健常成人および骨粗鬆症患者の手関節CT画像より橈尺骨遠位部、手根骨近位列のみの骨モデルを作製し、有限要素法、各モデルの橈尺骨近位部を全方向に拘束し、手根骨近位列を橈骨骨軸方向に沿って近位方向に移動させた。橈骨表面の各部位（要素）のミーゼス相当応力が皮質骨の降伏応力に達した場合を骨折とみなし、赤色で表現した。降伏応力に達した要素のつながりを骨折とみなした。健常人モデルと比較し、骨粗鬆症モデルでは骨折発生部位はより関節面に近い背側皮質であった。また手関節背屈70°モデルでは背側皮質に、手関節掌屈70°モデルでは掌側皮質に最初に骨折が発生した。

Key Words : 橈骨遠位端骨折, 有限要素法, バイオメカニクス, 骨粗鬆症

緒 言

近年、高齢化社会の到来と共に高齢者の橈骨遠位端骨折が増加してきている。骨粗鬆症のある高齢者では壮年者とは骨折様式が異なるのではないかと予想される。しかし、骨粗鬆症の有無による骨折発生様式の違いについての生体力学的研究は過去にない。

本研究の目的は三次元有限要素法を用いて正常骨と骨粗鬆症骨による橈骨遠位端骨折を再現し、骨粗鬆症の有無による骨折発生様式の違いについて解析し、また、異なる手関節の角度による橈骨遠位端骨折を再現し、受傷時の肢位により骨折型に違いをきたすかどうかを解析することである。

対象と方法

1. 三次元骨モデル作製

BMD (Bone Mineral Density) (Discovery® HOLOG-IC Inc. Bedford, MA. USA) 0.670 g/cm²の健常成人32

歳男性およびBMD 0.377 g/cm²の骨粗鬆症を有する76歳女性の右手関節CT (SIEMENS, Co., Ltd., Munchen Germany) をスライス厚1.2 mmで撮影した。手をついたときをシミュレーションするため、手関節の角度は背屈70°および掌屈70°とした (図1)。得られたCT画像より三次元再構築ソフト (Forge®, Studio PON, Co., Ltd. Margarita, CA. USA) を用いて骨モデルを作製した (図2-a)。このままでは後に行う有限要素解析のデータ処理が膨大となるため不必要な骨の部分は削除して、橈尺骨遠位部、手根骨近位列のみの三次元骨モデルとした (図2-b)。

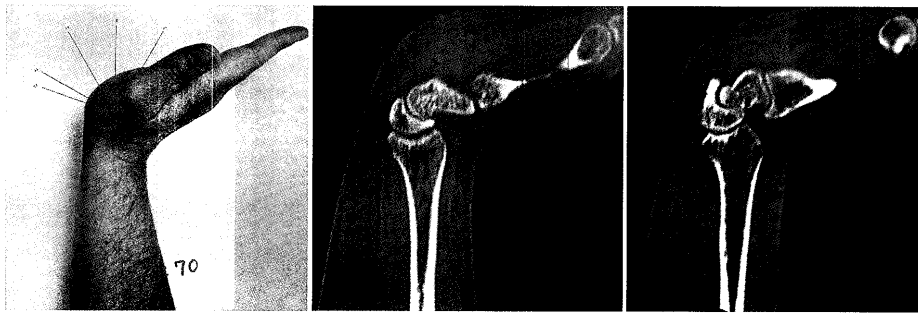
2. 三次元有限要素モデル作製

得られた三次元骨モデルを元に、有限要素からなる三次元モデルを作製した。橈骨は皮質骨および海綿骨に分け、皮質骨の物性値はCT値からCarterら¹⁾の式より算出し、ヤング率16 GPa, ポアソン比0.3とした (図3-a)。さらに、海綿骨は健常骨と骨粗鬆骨それぞれすべてのCT画像に2 mm × 2 mmのグリッドをおき、解析ソフト (Scion Image® Scion, Co., Ltd. Maryland, Washington, D.C. USA) を使用してグリッド各領域のCT値から骨梁の密度を計算した。この骨梁の密度を元に、海綿骨を高密度部 (図3-b)、中密度部 (図3-c)、低密度 (図3-d)

平成18年11月1日受付, 平成18年12月20日受理

別刷請求先: 富沢一生

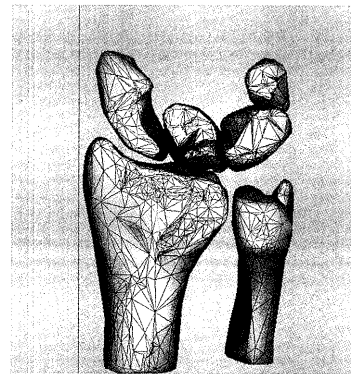
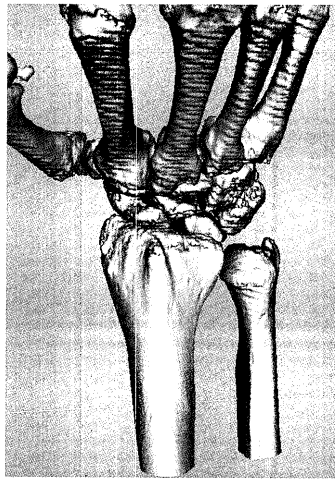
〒321-0293 栃木県下都賀郡壬生町北小林880
獨協医科大学 整形外科学



a **b** **c**

図 1

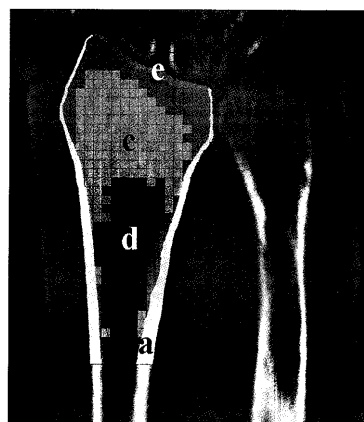
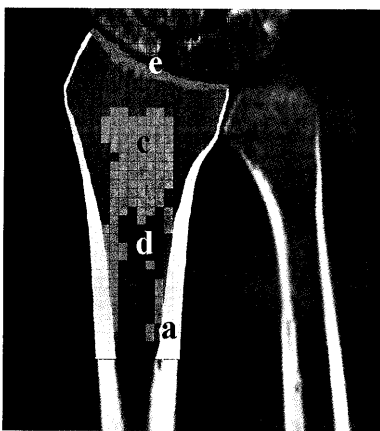
- a: 手関節背屈70°位
- b: 健康成人男性手関節背屈70°CT像
- c: 骨粗鬆症女性手関節背屈70°CT像



a **b**

図 2

- a: 三次元骨モデル (健康成人手関節背屈70°)
- b: 橈尺骨遠位部, 手根骨近位列のみとした三次元骨モデル.



A **B**

- 図 3 橈骨断面図. Aは健康成人男性モデル,
Bは骨粗鬆症女性モデル
- a: 皮質骨部
 - b: 海綿骨高密度部
 - c: 海綿骨中密度部
 - d: 海綿骨低密度部
 - e: 軟骨下骨部

表1 骨, 軟骨, 靭帯の要素タイプと物性値

	Element Type	Young's modules (E : MPa)	Poisson's ratio
Bone	10 no de solid	※	0.3
Cartilage	10 no de solid	10.35	0.4
Ligament	cable	Nonlinear	

※ Carterらの式より算出

の3つのエリアに分割した。各エリアのヤング率をCarterら¹⁾の式を用いてCT値から算出し、高密度部1800 MPa, 中密度部720 MPa, 低密度部345 MPaのヤング率からなる海綿骨三層構造のモデルとした²⁾。また、軟骨下骨はヤング率3000 MPaとし(図3-e)、ポアソン比は皮質骨, 海綿骨, 軟骨下骨のすべてを0.3とした。手根骨近位列および尺骨は海綿骨部の無い皮質骨のソリッドモデルとし、ヤング率16 GPa, ポアソン比0.3とした。橈骨手根関節の軟骨部は0.5 mmの薄シェル要素で作成し、破断しないものとした。

骨, 軟骨, 靭帯の各物性値はRoggeら³⁾の値を参考とした(表1)。靭帯は断裂しないものみなしケーブル要素を使用し, Helmut⁴⁾, Nagaoら⁵⁾のデータを元にモデルに付帯させた。出来上がった健全成人モデルは要素数56622, 節点数13274であり(図4-a, b), 骨粗鬆症モデルは要素数51760, 節点数12940であった(図4-c, d)。各要素間は面一面接触とした。

3. 三次元有限要素解析

有限要素解析には解析ソフトANSYS LS-DYNA[®] 10.0 (ANSYS Inc, Canonsburg PA, USA)を使用し, 非線形解析を行った。解析方法は各モデルの橈尺骨近位部を全方向に拘束し, 手根骨近位列を橈骨骨軸方向に沿って近位方向へ変位させ橈骨関節面に衝突させた。衝突速度は転倒の瞬間をシミュレーションするため, 1.3 mの高さから自由落下したときの床面衝突速度(5.05 m/sec)とした。橈骨表面の各部位(要素)のミーゼス相当応力が皮質骨の降伏応力約110 MPa^{6,7)}に達した場合を骨折とみなし, 赤色で表現した。そして, 降伏応力に達した要素のつながりを骨折とみなした。健全成人手関節70°背屈モデルと掌屈70°モデル, 骨粗鬆症手関節背屈70°モデルと掌屈70°モデルについて有限要素解析を行った。

結 果

作製した各モデルにおけるシミュレーションの結果, 健全成人手関節背屈70°モデルでは最初に降伏応力に達

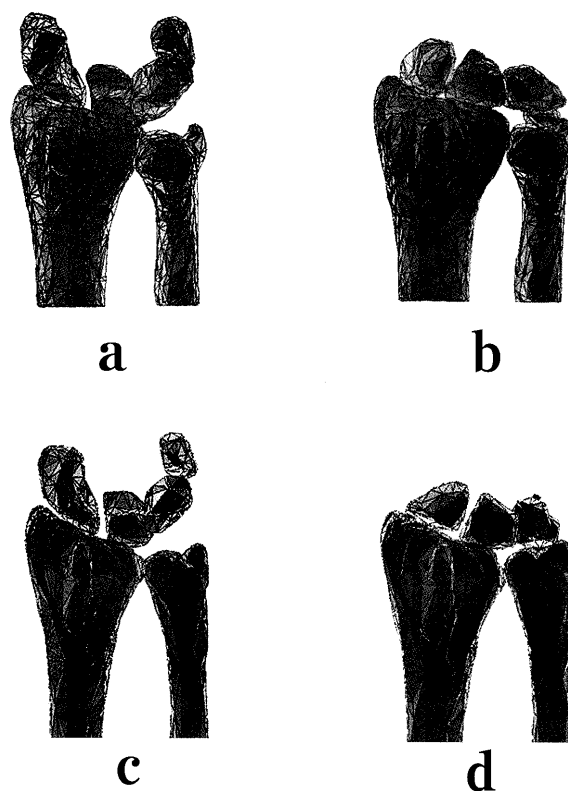


図4 有限要素モデル

- a: 健全成人男性手関節背屈70°モデル
- b: 健全成人男性手関節掌屈70°モデル
- c: 骨粗鬆症女性手関節背屈70°モデル
- d: 骨粗鬆症女性手関節掌屈70°モデル

する部位はLister結節よりやや近位の背側皮質であり(図5-a), 健全成人手関節掌屈70°モデルでは最初に降伏応力に達する部位は掌側皮質であった(図5-b)。骨粗鬆症手関節背屈70°モデルでは最初に降伏応力に達する部位は関節面近くの背側皮質であり(図5-c), 骨粗鬆症手関節掌屈70°モデルでは健全成人モデルに比べ関節面近くの掌側皮質に降伏応力に達する部位を認めた(図5-d)。また, 骨折発生までの時間は健全成人モデルに比べ, 骨粗鬆症モデルではより短い時間で骨折が発生していた(図6)。

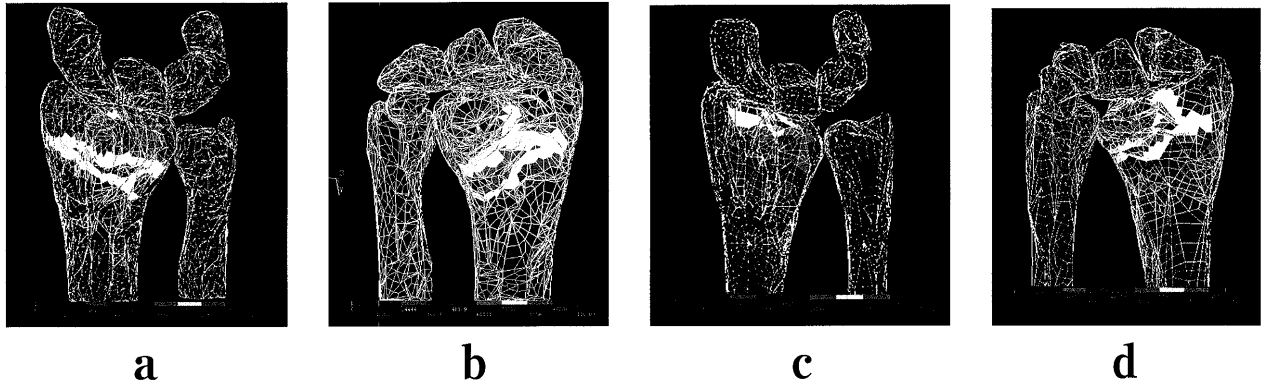


図5 有限要素解析結果. 骨折部位は赤色で表現されている.
 a: 健康成人男性手関節背屈70°モデル (背側から見た図)
 b: 健康成人男性手関節掌屈70°モデル (掌側から見た図)
 c: 骨粗鬆症女性手関節背屈70°モデル (背側から見た図)
 d: 骨粗鬆症女性手関節掌屈70°モデル (掌側から見た図)

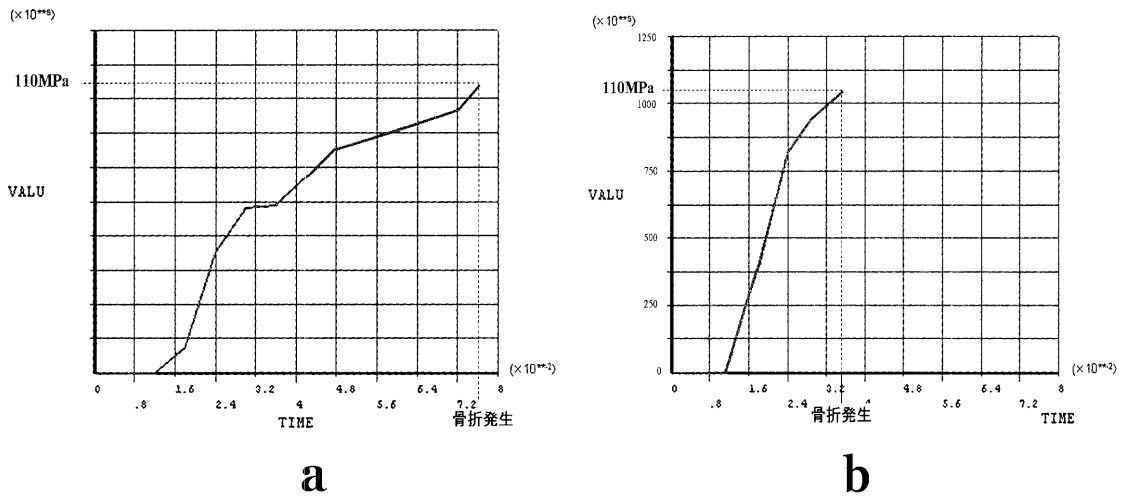


図6 相当応力と骨折発生までの時間との関係 (解析時間—相当応力グラフ).
 a: 健康成人男性モデル
 b: 骨粗鬆症女性モデル

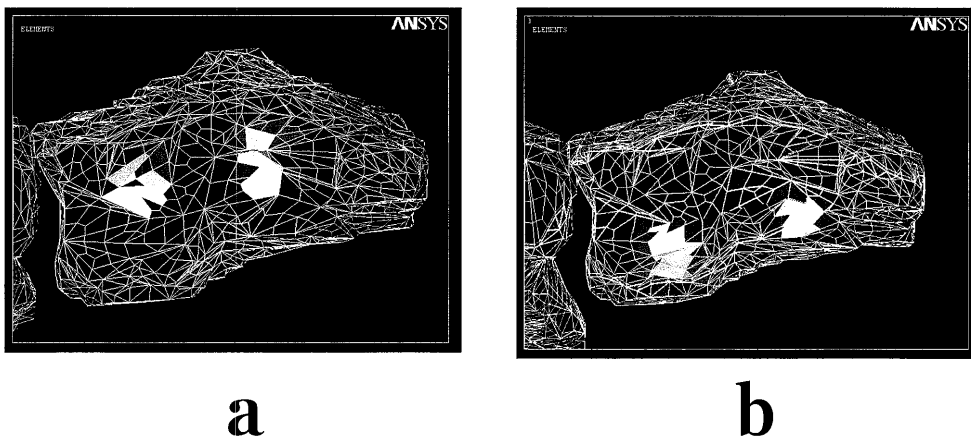


図7 関節面応力分布
 a: 手関節背屈70°モデル
 b: 手関節掌屈70°モデル

また、健常成人モデルの月状骨、舟状骨の橈骨関節面最大接触部(図7)をみると、背屈70°では関節面背側に手根骨の接触面があり、掌屈70°では関節面掌側に、より手根骨の接触面があった。

考 察

われわれは以前より、日常診療において健常者に比較し骨粗鬆症患者の橈骨遠位端骨折はより関節面に近く、また、骨折型も関節内骨折になり易いことに注目していた。さらに、橈骨の横断面において骨皮質の割合が多い小児ではより骨幹部に近い部位での骨折が多いことにも気付いていた。そこで、われわれは骨質の違いにより骨折発生部位が変わるのではないかと予想した。

われわれの渉猟し得た範囲では橈骨遠位端骨折発生メカニズムの研究は過去にほとんど行われていない。Lillら⁸⁾は新鮮屍体手関節118体を用いて手関節背屈70°、橈屈10°にて骨軸に沿って近位方向に荷重し、骨折を再現する実験を行っている。その結果、ほとんどがColles骨折を発生していた。

本邦では多数の新鮮屍体を用いた生体力学研究はほとんど不可能である。そこで、生体により近似させた三次元骨モデルによる有限要素法を用いた生体力学解析を試みた。最初に、Lillらと同様のモデルを三次元骨モデルとして作成して有限要素解析を行った^{9,10)}。その結果は彼らの屍体モデルのものと同一であった。また、Osada et al.¹¹⁾の報告した屍体を用いた橈骨遠位端骨折モデルによる掌側プレートの生体力学試験を三次元骨モデルを使用した有限要素法にて再現を試み、屍体での力学試験と同様の結果を得ることが出来た^{12,13)}。以上の2つの実験よりわれわれの手法の確からしさが確認された。

そこで、三次元有限要素法による橈骨遠位端骨折発生の解析を、骨密度の違うモデルおよびそれぞれ手関節角度の違う計4モデルにて行った。解析ではモデルの橈尺骨近位端を拘束し、転倒の瞬間をシミュレーションするため1.3 mの高さから自由落下したときの床面衝突速度(5.05 m/sec)で手根骨近位列を橈骨骨軸に沿って近位方向へ変位させ橈骨関節面に衝突させた。両モデルに同一条件の荷重を加えたが、健常骨と比較し骨粗鬆症骨における骨折は関節面により近い部位で発生していた。また、解析時間—相当応力グラフ(図6)より骨折発生までの時間は骨粗鬆症骨においてより短く、より容易に骨折が起こり易いと思われた。そこで、モデルのCT(図1, 図3)より皮質骨の厚さの違いを比較したところその違いは顕著であった。また、海綿骨の分布(図3)を見ると、健常骨と比較し骨粗鬆症骨では分布様式が異なっていた。すなわち、骨粗鬆症骨では高密度の海綿骨は関節面の

近くのみ分布しており、全体的に荷重を支える柱(骨梁)が少なかった。このため、手関節にかかった応力は皮質骨が厚くなる橈骨遠位骨幹端部まで伝わりにくいと考えられた。これらが骨粗鬆症で関節面近くに骨折が起きる原因ではないかと推測された。骨粗鬆症では皮質骨の菲薄化ならびに骨梁構造の脆弱化により力学的強度の低下をきたしているが、今回の解析でさらにその構造の変化により、易骨折性や骨折発生部位の違いを明らかに出来た。また、高齢者ではより低エネルギーで関節内骨折が発生しているのではないかと予想される。

また、月状骨、舟状骨の橈骨関節面最大接触部(図7)をみると、背屈70°では関節面背側に手根骨の接触面があり、掌屈70°では関節面掌側に、より手根骨の接触面があった。よって、背屈70°では背側皮質に、掌屈70°では掌側皮質にはじめに骨折が起こるのは橈骨手根関節の接触部の違いが影響していると考えられる。

本解析はCTから作製した骨モデルを有限要素法解析に使用した。骨形状および内部構造をCT画像より抽出したが、靭帯や軟骨はCTでは撮影できないため、文献より作製している。実際の骨折ではその他の軟部組織などさらに複雑な要素が関与していると思われる。また、解析を単純化するため受傷時の荷重ベクトルを橈骨骨軸に平行としたが、実際は個々の症例により異なるであろう。生体と同じモデルを作製するのは限界があるが、今回の解析では骨の内部構造の違いおよび橈骨手根関節の接触部位の違いによる応力伝達過程の違いが明らかになり、骨折発生部位の違いを再現できたと考える。

近年、有限要素法を用いたバイオメカニクスの研究が盛んに行われるようになってきた。そのほとんどは静解析であり、動きの中での生体にかかる応力を解析するのは困難であった。そこでわれわれは動解析を行うことにより問題を解決することとした。しかし、動解析を行うためには解析用の大容量のコンピュータが必要となる。また、より生体に近いモデルを作ろうとすればその要素数も増加し、解析に莫大な時間がかかってしまう。そのためわれわれは解析用のパソコンを自作し、モデルの要素数をなるべく抑えるためすべてのCT画像から余分な部分を取り除く作業を行い、さらに軟部組織はなるべく単純な形で再現した。結果、各モデルとも数時間での解析が可能となった。今後、モデル作製の効率化を考え、また、コンピュータ技術の発展が進めばさらに複雑な解析が可能になると期待できる。

結 論

1. 健常成人モデルと比較し、骨粗鬆症モデルによるシミュレーションでは骨折発生部位はより関節面に近

い皮質であった。

2. 手関節背屈70°モデルによるシミュレーションでは背側皮質に、手関節掌屈70°モデルによるシミュレーションでは掌側皮質に最初に骨折が発生した。

謝 辞 稿を終えるにあたり、本研究に対し終始ご指導ご高閲を賜りました獨協医科大学整形外科学教室野原裕教授、早乙女絃一名誉教授に深甚なる感謝の意を表します。直接指導していただきました獨協医科大学整形外科学教室玉井和哉教授、長田伝重助教授、ご協力頂きました整形外科学教室員の皆様に深謝いたします。

本研究の一部は平成17年度獨協医科大学研究助成金の補助の下に行われたことを付記する。

文 献

- 1) Carter DR, Hayes WC. : Bone compressive strength : the influence of density and strain rate. *Science*. 1976 Dec, **10** ; 194 (4270) : 1174-1176.
- 2) Anderson DD, Deshpande BR, Daniel TE et al : A three-dimensional finite element model of the radio-carpal joint : distal radius fracture step-off and stress transfer. *Iowa Orthop J*, **25** : 108-117, 2005.
- 3) Rogge RD, Adams BD, Goel VK. : An analysis of bone stresses and fixation stability using a finite element model of simulated distal radius fractures. *J Hand Surg*, **27A** : 86-92, 2002.
- 4) Helmut F. : *Pernkopf Atlas der topographischen und angewandten Anatomie des Menschen*. 2. Band Brust, Bauch und Extremitäten. 東京, 医学書院, 88-89, 1980.
- 5) Nagao S, Patterson RM, Buford WL Jr, et al : Three-dimensional description of ligamentous attachments around the lunate. *J Hand Surg*, **30A** : 685-692, 2005.
- 6) Ascenzi A, Bonucci E. : Mechanical similarities between alternate osteons and cross-ply laminates. *J Biomech*, **9** : 65-66, 1976.
- 7) Ascenzi A, Benvenuti A, Bonucci E, et al : The tensile properties of single osteonic lamellae : Technical problems and preliminary results. *J Biomech*, **15** : 29-37, 1982.
- 8) Lill CA, Goldhahn J, Albrecht A, et al : Impact of bone density on distal radius fracture patterns and comparison between five different fracture classifications. *J Orthop Trauma*, **17** : 271-278, 2003.
- 9) 富沢一生, 長田伝重, 益崎浩一郎ほか : 橈骨遠位端骨折発生メカニズム—有限要素法による解析—. *日本臨床バイオメカニクス学会誌*, **27** : 123-126, 2006.
- 10) 富沢一生, 長田伝重, 益崎浩一郎ほか : 三次元有限要素法による橈骨遠位端骨折発生メカニズムの解析—骨粗鬆症の有無による骨折発生様式の違い—. *日本手の外科学会雑誌*, **23**, **2** : 14-18, 2006.
- 11) Osada D, Fujita S, Tamai K et al : Biomechanics in Uniaxial Compression of Three Distal Radius Volar Plates. *J Hand Surg*, **29A** : 446-451, 2004.
- 12) 益崎浩一郎, 長田伝重, 富沢一生ほか : 橈骨遠位部三次元骨モデルを用いた有限要素法の試み. *日本手の外科学会雑誌*, **21**, **2** : 21-24, 2004.
- 13) 富沢一生, 長田伝重, 益崎浩一郎ほか : 3次元有限要素法による橈骨遠位掌側ロッキングプレートの遠位ピン最適挿入位置の検討. *日本臨床バイオメカニクス学会誌*, **26** : 159-164, 2005.