

厚生科学研究費補助金（21世紀型医療開拓推進研究事業）  
分担研究報告書

転倒による大腿骨頸部骨折発生リスクに関する生体力学的解析  
-骨折型決定への骨頭への荷重方向、骨密度および骨密度分布の関与について-

分担研究者 原田 敦 国立療養所中部病院 整形外科医長

大腿骨頸部骨折の代表的骨折型（外側骨折と内側骨折）の決定因子を解明する目的で、保存大腿骨 34 本を用い、実験的に大腿骨頸部骨折を作成し、骨頭への荷重方向、大腿骨頸部の骨密度及び骨密度分布との関連性について検討した。荷重方向の検討では、後方荷重で内側骨折が、前方及び頸部軸荷重で外側骨折が生じた。また、大腿骨近位各部位の骨密度値は両骨折型間で差はみられなかったが、骨密度分布では、内側骨折は、外側骨折に比べ、頸部近位端の下半部に対する上半部の骨密度比が低かった。大腿骨頸部骨折の骨折型は転倒方向と大腿骨頸部の骨密度分布が関与して決まっている可能性が示された。

A. 研究目的

大腿骨頸部骨折の発生メカニズムを明らかにすることは、その予防策の大きな根拠となる。強度の低下した骨に転倒荷重が加わって生じる場合が本骨折のほとんどを占めることは、多くの大規模疫学調査で明らかにされたところである。

しかし、骨強度低下と荷重がどのような条件の時に骨折が起こるのかについてはまだ十分に解明はされておらず、特に骨折型に関与する条件については詳細な検討はなされていない。

そこで本研究では、大腿骨頸部骨折の骨折型がどのように決まるのかについて解析した。大腿骨頸部骨折には、頸部近位に骨折線が生じる内側骨折と頸部遠位に骨折線が生じる外側骨折とに大きく分類され、臨床的にそれぞれ治療法や予後が異なる。骨折型を決定する要因には、大腿骨近位部の骨密度や形態などの個体固有の要因および、荷重方向などの転倒関連要因が挙げられる。

我々は、大腿骨頸部骨折の代表的な骨折型（外側骨折と内側骨折）の決定に関与する因子を解明するために、保存大腿骨 34 本を用い、

転倒を模擬した試験器によって実験的に大腿骨頸部骨折を作成し、大腿骨近位部骨密度及び骨密度分布、骨頭への荷重方向との関連性について検討した。

B. 研究方法

Lunar 社製、Dual energy X-ray absorptiometry(DPX)を用い、ルチーンの計測部位である大腿骨頸部、Ward 三角、大転子部の骨密度を測定した。さらに Lunar 社より提供された Hip Axis Length プログラムを用い、大腿骨頸部上半分と下半分の 2 部位と頸部近位端部上半部と下半部の骨密度を測定した。

また、骨密度分布に関しては、頸部と頸部近位端部の上半部と下半部の骨密度の比（頸部-U/L、頸部近位端部-U/L）をそれぞれ計算した。

骨折実験は、骨頭を上方にし、軸写面で、鉛直軸が頸部軸に対し、前方 15~20°（前方荷重：11 本）、0°（頸部軸荷重：10 本）、後方 15~20°（後方荷重：13 本）に荷重条件を設定し、骨幹部を強固に固定した後、骨頭へ 8.4kg の重錘を落下させた。骨折が生じるまで重錘の高さを 25mm ずつ上げていった。さ

らに、15本においては、高速度ビデオカメラ撮影を行い、骨折発生の状況を詳細に観察した。

#### (倫理面への配慮)

本研究は国立療養所中部病院の倫理規定に従い、当院倫理委員会の承諾を得た。

#### C. 研究結果

骨折実験の結果、外側骨折 21 例（前方荷重 8 例、頸部軸荷重 8 例、後方荷重 5 例）と内側骨折 13 例（前方荷重 3 例、頸部軸荷重 2 例、後方荷重 8 例）生じ、前方及び頸部軸荷重で外側骨折が、後方荷重で内側骨折が有意に生じた ( $p < 0.05$ )。

測定可能であった 31 例の骨密度及び骨密度比は、両骨折型間で各部位の骨密度の絶対値は差がなかったが、頸部近位端部-U/L は外側骨折 18 例  $0.64 \pm 0.11$  に対し、内側骨折 13 例では  $0.55 \pm 0.12$  と有意に低かった ( $p < 0.05$ )。

高速度ビデオカメラで撮影した 15 本の骨折の起始部を観察すると、内側骨折は頸部近位端部上方で 2 例確認できた。外側骨折は前方荷重で頸部遠位部後方陥凹部に 3 例、頸部軸および後方荷重で、頸部遠位部上方にそれぞれ 5 例と 1 例確認できた。

#### D. 考察

転倒方向と骨折型の関連について、本研究により、後方荷重で内側骨折が、前方及び頸部軸荷重で外側骨折が生じることが示唆された。荷重方向を実際の転倒様態で考察すると、後方荷重は真横に転倒し大転子部のやや前方を打撲する場合に該当すると考えられる。これに対し、前方荷重は大転子部の後方を打撲するように、後側方へ転倒した場合が該当すると考えられる。このように転倒方向及び転倒時の股関節肢位が本骨折型決定に深く関与している可能性があることが明らかになった。

また、骨密度と骨折型の関連については、両骨折型において各部位の骨密度値に差はな

かったが、内側骨折は、外側骨折より頸部近位端部-U/L が 14%ほど低かった。元々大腿骨頸部の骨密度は一様ではなく、立位荷重に抗しうる構造を備えるため、下半部の方が上半部より骨密度値が高くなっている。しかし、その比率には個体差が大きくそれが骨折型に影響する可能性は前から指摘されていた。我々の検討では、頸部全体の比率ではなく、頸部近位端の比率が内側骨折に影響することが見出された。このことより、骨折型決定には、大腿骨頸部近位端部の骨密度分布の影響が看過できないと考えられた。

この大腿骨頸部近位端部の骨密度分布の内側骨折発生への関与について、別の観点からの証拠として、高速度ビデオによる観察で内側骨折 2 例では、いずれも頸部近位端部上方より骨の破断が始まっていることがあげられる。この部位は頸部から骨頭へ移行する部分で解剖学的に断面積が急速変化するため、応力集中が生じやすい形態的特徴を有している。そこに頸部の同一横断面に骨密度分布差、すなわち、強度の差が存在すると、骨組織破断が強度の低い部分から始まることは容易に理解できる。つまり、頸部近位端部-U/L が低い症例では、転倒時の応力が頸部近位端部上方に集中しやすく、それゆえビデオで見られたように同部より骨折が開始進展していくという可能性が高いと考えられた。

これまでの検討から、転倒による荷重条件の相違と大腿骨頸部近位端部の骨密度分布が骨折型決定に関与することが明らかになったが、これらは相互に関連せず、独立した因子であり、予防の観点からみると別々の対策が必要と思われる。

転倒方向が大腿骨頸部骨折の重要なリスクファクターであることは、多くの研究者の指摘するところであるが、本研究でも側方転倒が内側骨折、後側方転倒が外側骨折に直結するリスクの高い転倒であることが示され、

この方向の転倒を避けることが一つの予防策として重要な意義を持つと考えられる。さらに如何に転倒しないかという転倒予防指導が行われるのに加えて、転倒した場合の防御動作、身のかわし方の指導もなされるべきであろう。

どちらの骨折型にしても骨折が始まる部位は比較的限られていることが高速度ビデオカメラによる観察で明らかになった。つまり、内側骨折における頸部近位端部上方と外側骨折における頸部遠位端部上方及び後方である。この3部位が力学的な弱点であって、大腿骨頸部骨折の起始部となっていることは、骨強度の局所的増強を図るときの目標もこの3部位になることを示唆する。今後、種々の方法で本骨折の予防が考えられるとき、これらの部位が有力な補強対象部位となると考えられる。

#### E. 結論

大腿骨頸部骨折の2つの骨折型（外側骨折と内側骨折）の決定因子を解明する目的で、保存大腿骨34本を用い、実験的に大腿骨頸部骨折を作成し、大腿骨近位部骨密度及び骨密度分布、骨頭への荷重方向との関連性について検討した。

荷重方向の検討では、後方荷重で内側骨折が、前方及び頸部軸荷重で外側骨折が生じた。また、骨密度分布の検討では、内側骨折は、外側骨折より頸部近位端部-U/Lが低かった。

以上より、頸部近位端部の骨密度分布の個体差と転倒時の荷重方向が大腿骨頸部骨折骨折型を決定する可能性が示唆された。

#### F. 健康危険因子

特に報告すべき危険情報はなし。

#### G. 研究発表

##### 1. 論文発表

1. Atsushi Harada, Masashi Mizuno, Marie Takemura, Haruhiko Tokuda, Hiroyasu Okuizumi, Naoakira Niino. Hip fracture

prevention trial using hip protectors in Japanese nursing homes. *Osteoporos Int* : 2001, 12:215-221.

2. Marie Takemura, Atsushi Harada, Masashi Mizuno, Yoshiji Yamada. Relationship between osteoprotegerin/osteoclastogenesis inhibitory factor concentration in synovial fluid and disease severity in individuals with osteoarthritis of the knee. *Metabolism* : 2001, 50: 1-2.

3. Yoshiji Yamada, Akimitsu Miyauchi, Yasuyuki Takagi, Masashi Mizuno, Atsushi Harada. Association of the C-509 → T polymorphism, alone or in combination with the T869 → C polymorphism, of the transforming growth factor- $\beta$ 1 gene with bone mineral density and genetic susceptibility to osteoporosis in Japanese women. *J Mol Med*: 2001, 79: 149-156.

4. Mitsuhiro Kamiya, Atsushi Harada, Masashi Mizuno, Hisashi Iwata, Yoshiji Yamada. Association between a polymorphism of the transforming growth factor- $\beta$ 1 gene and genetic susceptibility to ossification of the posterior longitudinal ligament in Japanese patients. *Spine*: 2001, 26: 1264-1266.

5. Atsushi Harada. Prevention of fractures caused by falls in elderly persons. *JMAJ*: 2001, 44: 306-311.

6. Atsushi Harada. Mechanism of hip fracture and its prevention by a hip protector. Basic and clinical aspects of osteoporosis. *Life Science*, 2001, 19-24.

##### 2. 学会発表

1. M Mizuno, A Harada, M Takemura, H Okuizumi, E Tanaka, S Yamamoto. Determinants of Hip Fracture Type-Effects of Bone Mineral Density (BMD), BMD distribution, and Load

Condition-. Twenty-Third Annual Meeting of the  
American Society for Bone and Mineral Research.

2001.10.14

2. 原田敦、水野雅士、鈴木健司、竹村真里枝。  
大腿骨頸部骨折の Body Composition の検討。  
第 74 回日本整形外科学会学術集会。

2001.4.21.

3. 原田敦、ヒッププロテクターによる大腿骨  
頸部骨折の予防。第 3 回日本骨粗鬆症学会。

2001.9.14.

4. 水野雅士、竹村真里枝、鈴木健司、原田敦、  
奥泉宏康、田中英一、山本創太、石口恒男。  
大腿骨頸部骨折骨折型の決定因子（第 2 報）  
—骨密度及び骨密度分布、荷重方向の関与に  
ついての検討— 第 3 回日本骨粗鬆症学会。

2001.9.14

5. 水野雅士、松井康素、竹村真里枝、鈴木健  
司、原田敦、奥泉宏康、田中英一、山本創太、  
石垣武男。 大腿骨頸部骨折骨折型の決定因  
子（第 3 報）—骨密度及び骨密度分布、荷重  
方向の関与についての検討— 第 28 回日本  
臨床バイオメカニクス学会。 2001.11.16

H. 知的財産権の出願・登録状況（予定を含  
む）

該当するものなし。

班友 水野雅士 国立療養所中部病院 整形  
外科

厚生科学研究費補助金（21世紀型医療開拓推進研究事業）  
分担研究報告書

転倒メカニズムの研究

分担研究者 岡 正典 京都市身体障害者リハビリテーションセンター附属病院所長

大腿骨頸部骨折の主因といわれる転倒機序を視覚的、力学的に研究してきた。特に最新の動作解析によって前、側、後方への転倒のパターン分析と大転子周辺に加わる応力を検討した。しかし、上記の研究における転倒は多分に被験者の作為的、意図的動作によっていたため、本研究ではより自然な転倒によって転倒機序を解明することを主目的とした。被験者の立つ台を滑らせる転倒装置を製作し、各方向に確実に転倒させることが可能になったので、転倒のパターンを分析している。

A. 研究目的

転倒させた被験者の三次元画像解析により転倒を分析、分類しようとしてきたが、転倒が多分に作為的、意図的であったのでより自然な転倒によってそのメカニズムを解明する目的で本研究を行った。

B. 研究方法

先ず被験者の胸部または背部を強く押すことにより、股被験者の立つ台を急に傾けることにより転倒させようとしたが、ステップを踏んで立ち直り、転倒しないことがわかった。次に、被験者の立つ座布団を突然引っ張ることにより各方向に転倒することがわかった。このことにヒントを得て被験者を立たせた台を自動制御されたスプリングにより滑らせる転倒装置を作製した。この装置により各方向に転倒する被験者の動作を毎秒250コマの超高速ビデオ2台で記録。観察し、最初に接地する身体部位を明らかにし転倒時の四肢の肢位を調べる。特に、大転子を中心とする骨盤周囲の接地に注目して同部位に加わる応力の方向を定め、大腿骨頸部への衝撃応力の計算に役立てる。

（倫理面への配慮）

転倒装置には30cm以上の衝撃吸収の優れたクッションを使用して事故の発生を防ぐのはもちろん、被験者には研究の主旨と方法を十分説明し了解を得て行う。

C. 研究結果

台に立つ位置によって前、側、後、後側方に転倒させることが出来、ほぼ100%に被験者の転倒を観

察することが出来た。前方への転倒時には骨盤周囲への衝撃を避けるための反射的な上肢の運動が見られた。この転倒装置によってより自然な転倒を観察し転倒パターンを分類することが可能になると思われた。

D. 考察

大腿骨頸部骨折の発生機序を解明するには転倒の研究が必要であり、特に最初に接地する身体部位を決めることが重要である。各方向への転倒による特徴的なパターンを解析分類し、骨盤周囲に加わる応力を分析出来ると、大腿骨頸部の応力分析が可能になりこの骨折の発生機序を解明することが出来る。今回作製した転倒装置により転倒ならびに大腿骨頸部骨折のメカニズムを詳細に解明することが可能になると考えられる。

E. 結論

新たに作製した転倒装置により自然な転倒を観察することが可能になり、転倒と大腿骨頸部骨折のメカニズムの研究発表研究に大きく寄与すると思われる。

F. 健康危険情報

認めない。

G. 研究発表

1. 論文発表

- 1) 岡正典 : 骨と材料の界面〔視座〕, 臨床整形外科, 32, 1069, 2000
- 2) 岡正典 : 関節の潤滑機能. 骨と関節, 14,

- 18-20, 2000.
- 3) S.Yoshii, M.Oka, et al. : Bridging a peripheral nerve defect using collagen filaments. *J. Hand Surg.*, 26-A, 52-59, 2001/07/24.
  - 4) 岡正典 : 人工関節軟骨. *日本医事新報*, 3998, 14-36, 2000.
  - 5) 岡正典, 由良茂人 : 人工椎間板の開発. *関節外科*, 20, 100-112, 2001.
  - 6) M.Oka, et al. : How to repair joint surface . *Tissue Engineering for Therapeutic Use 5*. Elsevier, 129-137, 2001/07/24.
  - 7) 岡正典 : 人工骨, 軟骨複合材料による軟骨欠損の修復. *骨・関節・靭帯*, 14, 825-830, 2001.
  - 8) M.Kobayashi, J.Toguchida and M.Oka : Development of the shields for tendon injury repair using Polyvinyl Alcohol-Hydrogel (PVA-H). *J.Appl.Biomater* ,58,344-351 ,2001
  - 9) P.Kumar, M.Oka, J.Toguchida, M.Kobayashi, E.Uchida, T.Nakamura : Role of uppermost superficial surface layer of articular cartilage in the lubrication mechanism of joints. *J.Anatomy* ,199 , 241-250 ,2001
  - 10) 牛尾一康 , 岡正典ほか 4 名 : いぬ大腿骨頭部分的表面置換術における Stress Shielding (第 2 報) *日本臨床バイオメカニクス学会誌*, 22, 261-264, 2001
  - 11) M.Oka : Biomechanics and repair of articular cartilage, *J.Orthop.Sci*6, 448-456, 2001
  - 12) 岡正典 : 人工椎間板. *The Bone*, 15, 487-491, 2001
  - 13) 光成淳司, 岡正典ほか 3 名 : 大腿骨頸部骨折の生力学的研究(第 3 報) *日本臨床バイオメカニクス学会誌*, 22, 265-268, 2001
  - 14) 武田聡, 岡正典ほか 6 名 : ポリフェノールによる関節軟骨保存の研究, *日本臨床バイオメカニクス学会誌*, 22, 11-16, 2001
  - 15) 高木順平, 岡正典ほか 6 名 : bioactive 骨セメント使用における stress shielding の研究(第 2 報) *日本臨床バイオメカニクス学会誌*, 22, 73-77, 2001.
  - 16) M.Ohta ,S.H.Hyon ,M.Oka ,S.Tsutsumi : et.al : Effect of the compression ratio on wear properties of slightly cross-linked ultra-high molecular weight polyethulene, crystallized under uniaxial compression. *Wear*, 250, 145-151, 2001
  - 17) 岡正典 : 新しい生体材料の開発と展開 , 越智隆弘編 先端医療シリーズ 8 : 整形外科, 117-216, 2000, 先端医療技術研
  - 18) 岡正典 : 整形外科における生体材料の進歩, 七川歆次 監修 リウマチ病セミナー, 11, 265-274, 2000
  - 19) 岡正典 : 人工椎間板の開発 , 141-147, 菊池晴彦等 監修 脊椎. : 脊椎外科の最前線, 先端医療技術研究所, 2001
- ## 2. 学会発表
- 1) 速水尚, 岡正典, J.Seebeck, E.Schneider, 中村孝志 : マイクロ CT による骨粗しょう症海綿骨の骨折機構の評価 第 28 回日本臨床バイオメカニクス学会, 大阪, 2001.11.16-17
  - 2) 谷山和弘, 岡正典, 由良茂人, 堤定美, 玄烝然, 速水尚, 中村孝志, : イヌ用人工椎間板の粘弾性特性評価, 第 28 回日本臨床バイオメカニクス学会, 大阪, 2001.11.16-17
  - 3) M.Oka ,K.Ushio,S.Yura,S.H.Hyon,T.Nakamura : Development of an osteo-chondral composite material ,Fourth combined meeting of the Orthop.Res.Society of the USA,Canada,Europe and Japan, Rhodes(Greek) 2001,6,2,
  - 4) M.Oka, K.Ushio, S.Yura, T.Nakamura, J.Toguchida : Synthetic osteo-chondral composite material for the treatment of aseptic necrosis of the femoral head ,SICOT/SIROT annual international meeting ,Paris, 2001.9.1
  - 5) M.Oka : Development of osteo-chondral composite material. ,M.E.Muller Institut

- fur Biomechanik ,Bern Universitat,  
2001 June 8 ( Prof.Hunziker)
- 6) M.Oka,S,H.Hyon,K.Ushio : Synthtic  
osteo-chondral composite material for the  
treatment of aseptic necrosis of the  
femoral head . Center for Joint  
Preservation and Reconstruction ,Sinai  
Hospital of Baltimore (Prof.M.Mont) ,  
2001.8.29
  - 7) 速水尚,岡正典,玄丞休 ,中村孝志,谷山  
和弘 : PVA-H 型人工椎間板のせん断及  
び曲げ疲労強度,第23回バイオマテリアル  
学会,京都,2001.10.22
  - 8) 速水尚,岡正典,玄丞休 ,中村孝志,松村  
和明,西浦淳 : 射出成型したPVA-Hの  
クリープ特性,第23回バイオマテリアル学  
会,京都,2001.10.22
  - 9) T. Hayami, M.Oka, T.Nakamura,  
E.Schneider: The difference in  
progression of osteoporosis decide the  
mode of femoral neck fracture.18<sup>th</sup>  
Congress of international Society of  
Biomechanics ,Zurich ,2001.7.9
  - 10) 岡正典 : 関節軟骨 ; biomechanics か  
ら biomaterial へ. 第50回東日本整形外科・  
災害外科学会 (,特別講演) 熱海,  
2001.10.11
  - 11) 岡正典 : 関節軟骨 ; バイオメカニクスか  
らバイオマテリアルへ,浜松整形外科外科医  
会,浜松,2001.11.7
  - 12) 岡正典 : 関節軟骨の修復 ,東京,21世紀の  
人工臓器と再生医療,(日本高分子学会)  
2001.2.8

海綿骨の構造脆弱性と大腿骨頸部骨折の発症機序に関する研究

分担研究者 速水 尚 近畿大学工学部助教授

本分担研究は、大腿骨頸部や腰椎の大部分を構成する海綿骨の力学的強度に関して、骨粗鬆症によるどのような骨梁構造の退行変化が易骨折性を誘発するのかを調べることを目的としている。骨梁構造は非常に複雑であり、その破壊力学的特性を詳しく調査するには、従来の生体力学的手法では限界がある。そこで本年度は、骨梁構造の骨形態計測学的特徴を明確にしつつ、その形態が示す一般的力学強度と靱性および変形挙動を可視化して分析するシステムの開発に主眼をおいた。開発したシステムを用いて、正常および骨粗鬆症患者海綿骨の破壊動態を観察した。その結果、骨粗鬆症海綿骨では骨粗鬆症で細化した骨梁が外力によって主に引張と曲げ変形を容易に生じて、その変形量が限界に達して破壊の起点を生じることを明らかにした。一方正常骨梁構造では、変形に対する抵抗が大きく、破壊は骨梁の限界応力に達したとき発生することがわかった。

A. 研究目的

我が国においては、閉経後女性と高齢者に発症する退行期骨粗鬆症（以後、骨粗鬆症）が大きな問題となっている。すなわち、近年骨粗鬆症に起因する大腿骨頸部骨折患者が急増しており、骨折治療のみならず骨折後に続発する場合は多い痴呆症状などの医療・介護に関わる経費の急増は社会問題と化している。ここに、高齢者の骨折予防が我が国の重要な課題のひとつとなっている理由がある。

海綿骨の機械的特性は、骨梁構造の形態（以後、構造形態）によって変化する。このことは、骨密度だけを規準とする骨折リスク判定方法の判定精度を低下させる原因となる。すなわち、臨床現場ではX線や超音波を利用した骨密度診断装置を用いて、骨密度値から骨折リスクを判定するのが一般的である。ところが、その測定結果には、年齢や体重を考慮してもなお骨折群と非骨折群間に有意差がない場合がある。そのため、骨折リスクは骨密度の減少のみならず、構造形態の退行変化を原因とする構造脆弱性も考慮しつつ判定されるべきであるといえる。しかし、構造形態といわゆる骨強度の関係には未知の点が多いため、構造形態が骨強度に及ぼす影響についてのコンセンサスはほとんど得られていないのが現状である。

海綿骨のせん断挙動は、圧縮挙動とともに海綿骨が主体となって構成される体幹骨の骨折機序と強く関係する。にもかかわらず、海綿骨のせん断強さな

ど、せん断に関する機械的特性を検討した報告は非常に少ない。

本分担研究では、まず、CT撮影を行いながら海綿骨のせん断実験を行い得る装置を試作した。また、海綿骨の亀裂進展挙動を観察できる骨靱性測定システムも試作した。そして、これらのシステムの妥当性を評価すると共に、予備実験として、ヒト正常海綿骨と骨粗鬆症で構造形態に変化を生じた海綿骨のせん断挙動を比較的に検討した。

B. 研究方法

本研究グループが従来から行ってきた骨粗鬆症骨の生体力学的特性に関する経験を集積・分析して、3次元に骨梁構造の破壊動態を同定する方法論を議論した。また、従来骨強度は引張や圧縮強さと言った一般的な強度特性で評価されてきたが、骨折すなわち破壊の観点からは、靱性と言われる概念の導入が必要であとの結論に達した。そこで、海綿骨の破壊動態を $\mu$ CT装置と併用して観察するシステムと靱性を評価する実験システムの設計・開発を行った。これらの方法論は、スイス連邦の研究者を代表とする欧州の研究者達が先駆的に検討してきている。本研究のような時限研究課題を効率的に進捗させるために、現地での調査や特定の研究施設へ出向いて研究ノウハウを取得することにした。そして、予備の実験として、ヒト正常および骨粗鬆化海綿骨の3次元変形動態を観測した。

（倫理面への配慮）



大腿骨頸部骨折患者の治療にあたっては、十分なインフォームドコンセントを行った。また、人工骨頭置換術後の大腿骨頭の一部を本実験の試験片として使用する旨の説明と承諾を適正に行った。また、我々研究者はヘルシンキ宣言の意義を復習し遵守した。

### C. 研究結果

(1)  $\mu$ CT を測定しつつ海綿骨のせん断および圧縮変形挙動を準動的に観察する装置システムの設計開発を行った。図 1 にその設計図(組立図)を示す。

(2) 海綿骨の亀裂進展挙動を観察する装置システムの設計開発を行った。図 2 にその設計図(組立図)を示す。

(3) 上記項目(1)で製作したシステムを用いて、ヒト正常および骨粗鬆化海綿骨を用いた実験を実施した。

図 3 は図 1 の装置主要部分の概略図であり、試験片のせん断機構を示す。試験片底がせん断パンチとダイス孔の直径差でせん断される。パンチを断続的に押し込み、その都度関心領域を  $\mu$ CT で撮影した。

図 4 は撮影した CT 像から構築した試験片の 3 次元形状を示す。同図にはせん断パンチを書き加えてある。骨梁の変形動態は、図 4 に示すように、試験片の中心軸を通る縦断面を  $1^\circ$  毎に回転させて得られる CT 画像から評価した。

図 5 は正常海綿骨の変形挙動を示す。写真横の数字は、みかけのせん断変位を示す。亀裂 A が発生した骨梁は、板状骨梁であった。変位が 0.5mm から 0.75mm に増加する間に、亀裂 A は空孔の下縁で発生し、図に向かって左下方向に長さ約 0.9mm に成長した。さらに変位が増加すると、開口部は V 字形に開口していった。これに伴って亀裂 A はさらに直線的に進展した。

図 6 に骨粗鬆症試験片の変形挙動を示す。骨梁構造は、板状骨梁が少なく細い棒状骨梁が多かった。試験片底部は、パンチによってダイスの孔に単純に突出されるように変形した。せん断域においては、せん断域を横切る幾つかの骨梁が曲げられたり引張られたりして破壊した。

### D. 考察

本年度の計画であった新しい実験システムの構

築は、その目的を達することができた。装置の妥当性もほぼ検証を終える段階に達しており、次年度の研究計画に円滑に移行できるものと思われる。

$\mu$ CT を併用した骨梁構造のせん断挙動の観察は、すでに preliminary 実験相を抜け、本実験相に移る早い進捗状況を示している。

図 5, 図 6 に示したように、内部構造を含めた海綿骨の変形挙動を可視化して観察することを可能にした。このような方法によって、ヒト海綿骨のせん断挙動を検討した研究は世界的にも例を見ないと思われる。

正常試験片において、亀裂 A が発生した板状骨梁は、空孔の下方辺縁部を固定端とする片持梁様の構造となっていた。そのため、亀裂 A は、この骨梁がパンチの降下により曲げられたことに起因して発生したと考えられる。

図 6 から、パンチが試験片底部全体を環状にせん断破壊したことは明らかである。この破壊機構として、せん断域にあった骨梁が多発的に破壊し、それが連鎖して試験片の巨視的な破壊に至る過程が考えられる。骨粗鬆症で構造形態が変化すると、骨梁それぞれの変形挙動やひいては骨梁構造の変形挙動も変化する。そのため、骨梁構造が脆弱化した海綿骨は、正常海綿骨とは破壊機構が異なり、その結果としてせん断強さも相当低下することが明らかになった。

### E. 結論

- (1) 2 種類の海綿骨用生体力学試験システムを設計・開発した。これらのシステムを用いた骨粗鬆症海綿骨の力学特性評価方法の妥当性を検証すると共に、本実験相に着手するに至った。
- (2) 骨粗鬆化海綿骨と正常海綿骨のせん断挙動を比較的に検索した結果、両者の破壊機構は異なることが示された。
- (3) 骨粗鬆症では、骨梁構造が退行変化し負荷に対する抵抗(剛性)が減弱することに起因して易骨折性が発現することが示唆された。

### F. 健康危険情報

認めない。

## G. 研究発表

### 1. 論文発表

- 1) 光成淳史, 坂口一彦, 岡正典, 速水尚, 中村孝志・大腿骨頸部骨折の生力学的研究・日本臨床バイオメカニクス学会誌・22, 265-268・2001  
——外(2論文投稿中)——

### 2. 学会発表

- 1) 速水尚, 岡正典, 中村孝志, Schneider・The Difference in Progression of Osteoporosis Decides the Mode of Femoral Neck Fracture・18th International Society of Biomechanics・Zurich・平成13年7月10日
- 2) 速水尚・Deformation and Failure of Osteoporotic Trabecular Bone Under Compression and Shear Loading・AO Osteoporosis Group Conference・Davos・平成13年7月14日
- 3) 速水尚, 岡正典, 中村孝志, Seebach, Schneider・マイクロCTによる骨粗鬆症海綿骨の骨折機構の評価・第28回日本臨床バイオメカニクス学会・大阪・平成13年11月17日
- 4) 速水尚・骨粗鬆症による大腿骨頸部内側骨折のバイオメカニクス・第14回京滋骨粗鬆症研究会・京都・平成13年11月10日

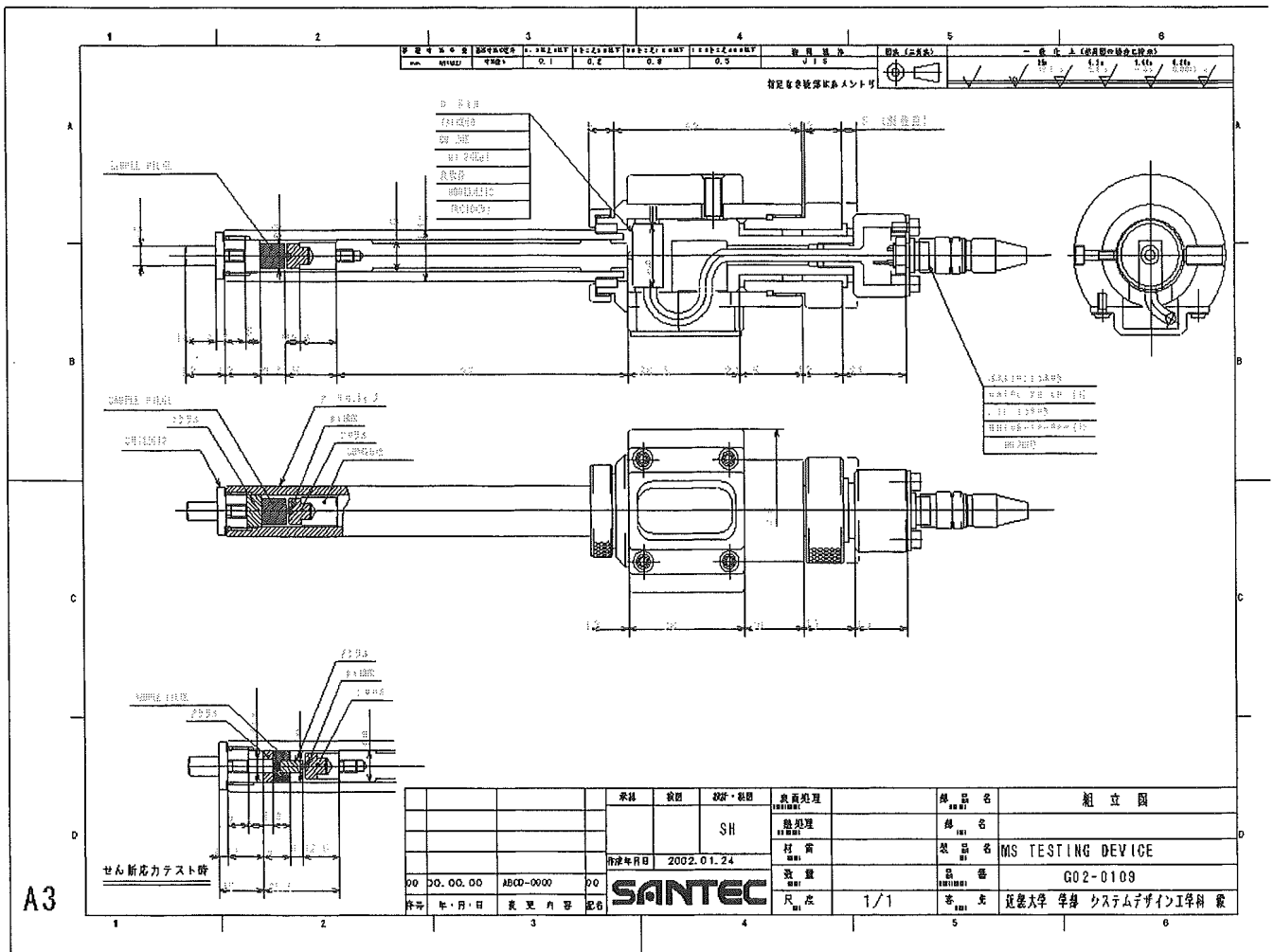


図1 マイクロCT用海綿骨力学試験装置

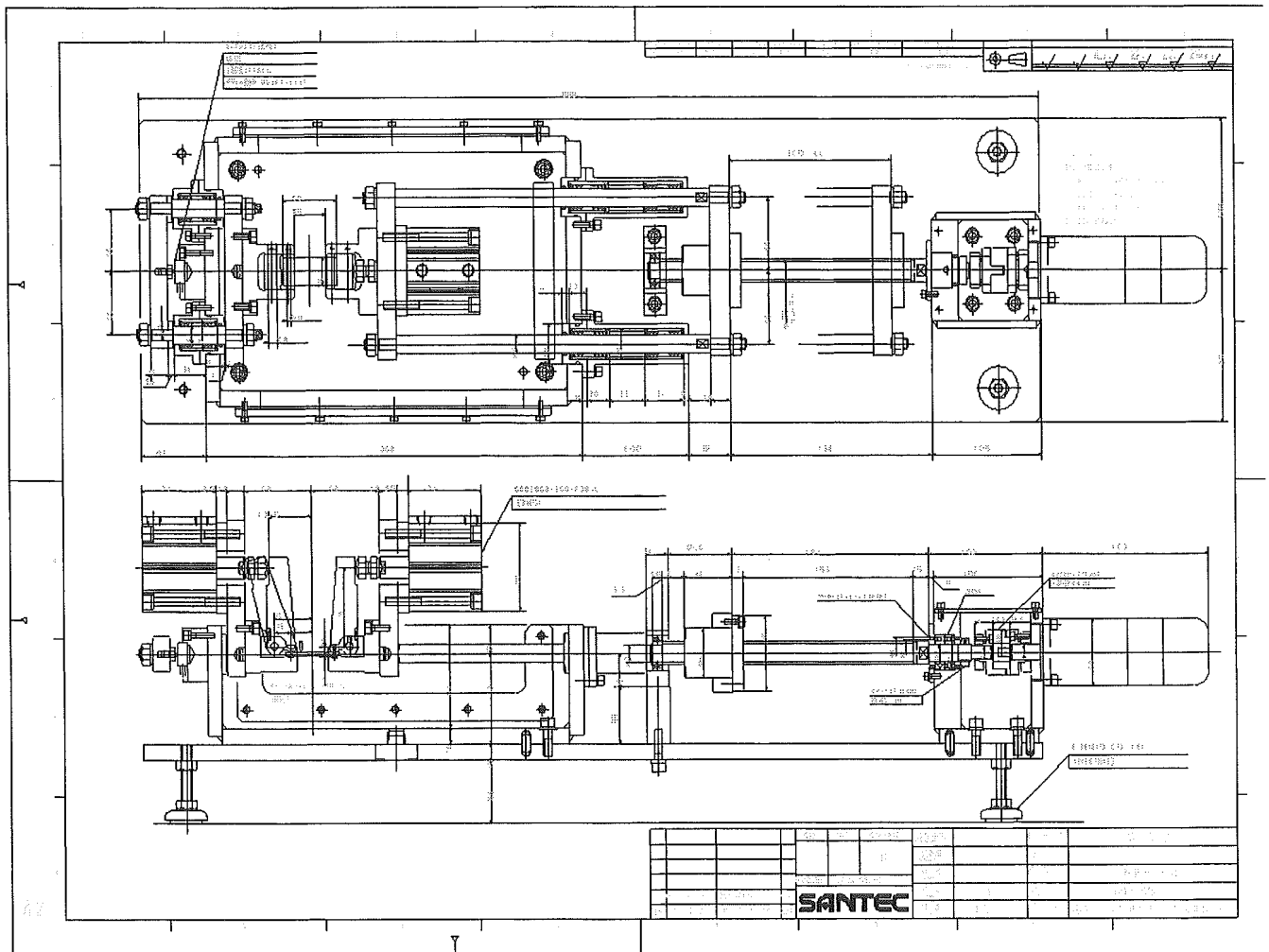


図 2 亀裂進展抵抗測定装置の組立図

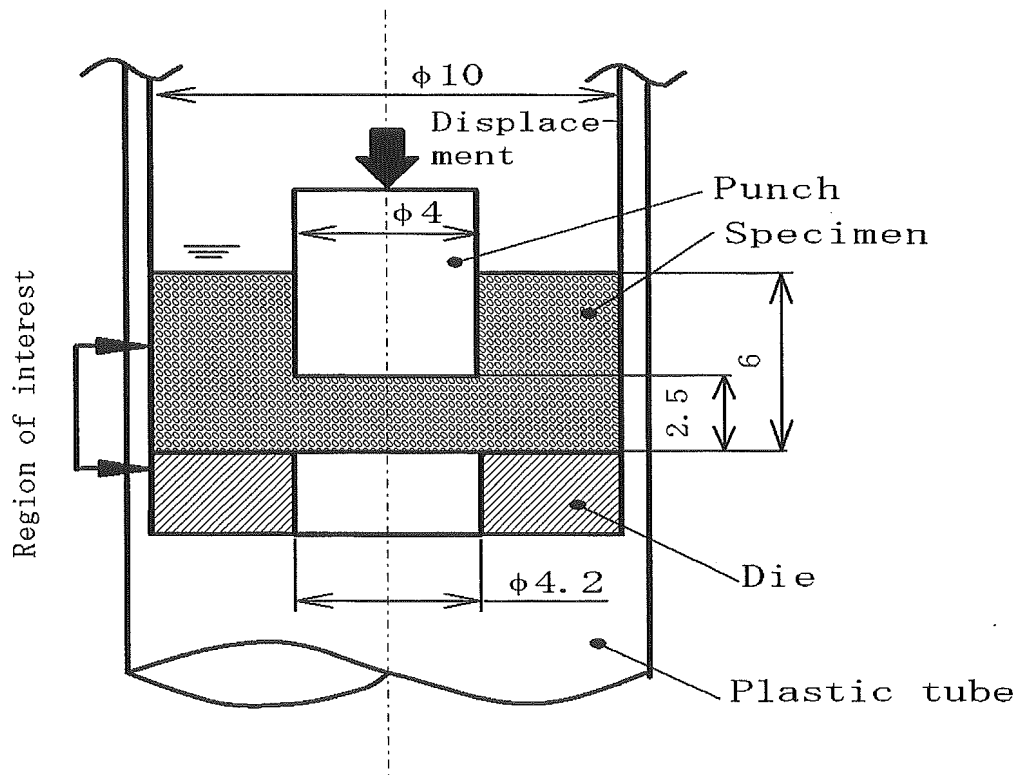


図3 せん断機構の模式図

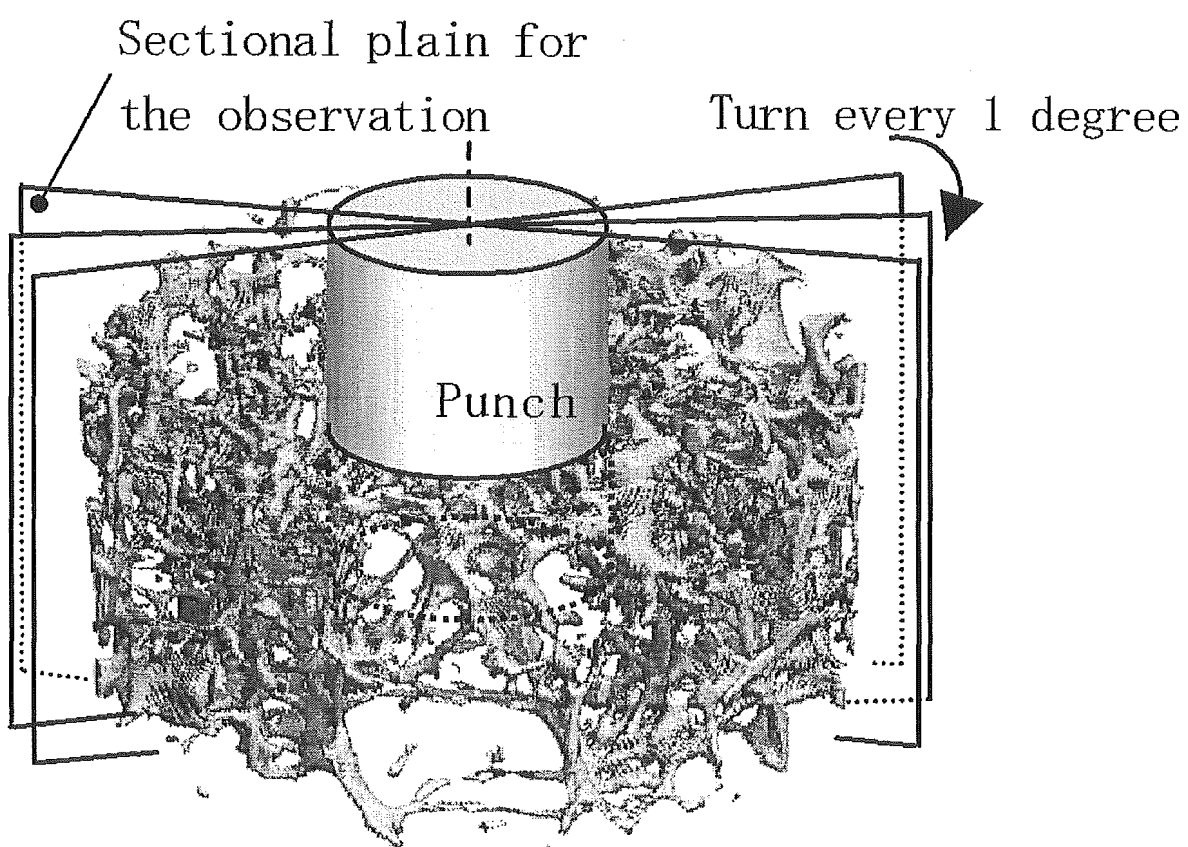


図 4 正常海綿骨の 3 次元骨梁構造と観察断面

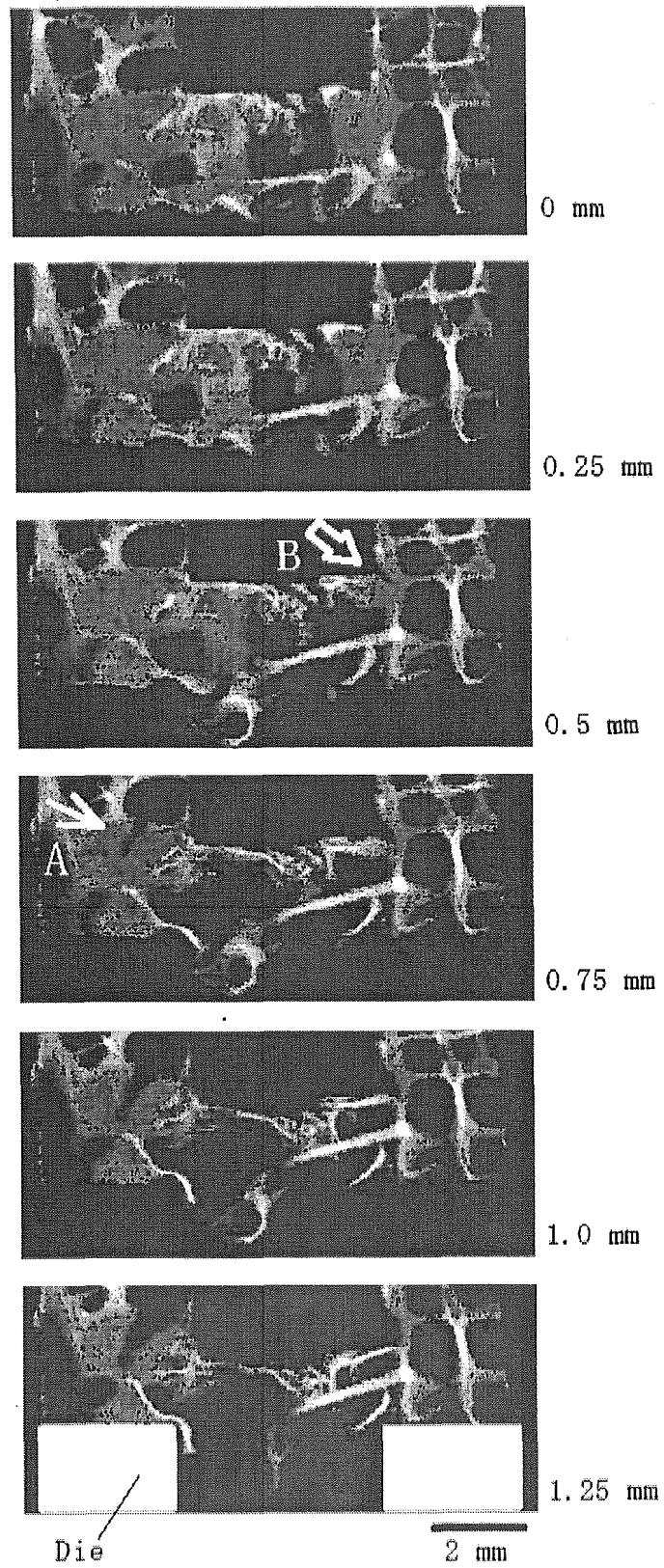
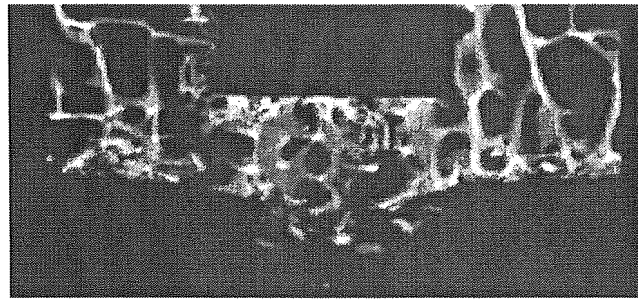
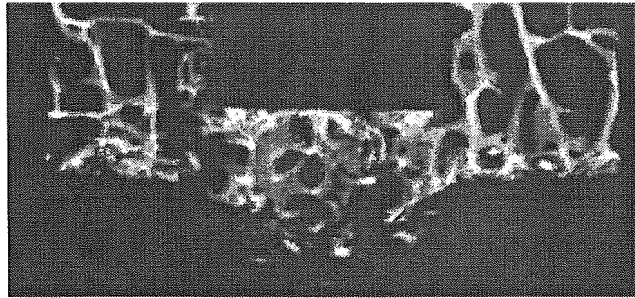


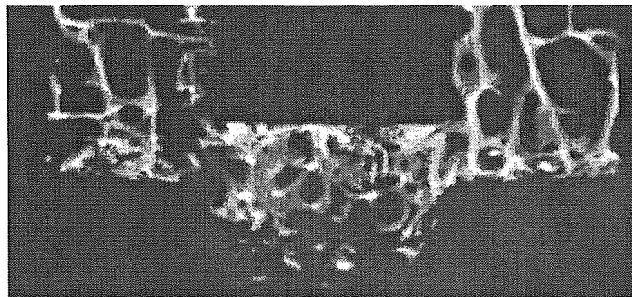
図5 正常海綿骨のせん断挙動（矢印は亀裂を示す）



0.5 mm



0.75mm



1.0 mm

2 mm

図 6 骨粗鬆化海綿骨のせん断挙動



### 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

発表者氏名	論文タイトル名	発表誌名	巻号	ページ	出版年
K. Osawa M. Neo, H. Matsuoka, H. Akiyama, H. Ito, T. Nakamura	Tissue responses around polymethylmethacrylate particles implanted into bone: analysis of expression of bone matrix protein mRNAs by in situ hybridization.	J. Biomed Mater. Res.	54(4)	501-508	2001
S. Fujibayashi. Y. Senaha, S. Yoshihara, J. Tamura, T. Nakamura	Long-term follow-up study of bioactive bone cement of repairing a segmental defect in a canine femur.	J. Long Term Eff Med Implants	11(1-2)	93-103	2001
M.Kobayashi. J.Toguchida , M.Oka	Development of the shields for tendon injury repair using Polyvinyl Alcohol-Hydrogel(PVA-H)	J.Appl.Biomater.	58	344-351	2001
M.Ohta, S.H.Hyon, M.Oka, S.Tsutsumi	Effect of the compression ratio on wear properties of slightly cross-linked ultra-high molecular weight polyethulene ,crystallized under uniaxial compression	Wear	250	145-151	2001
A. Harada, M.Mizuno, M. Takemura, H. Tokuda, H. Okuizumi, N. Niino	Hip fracture prevention trial using hip protectors in Japanese nursing homes	Osteoporos Int.	12	215-221	2001
Y.Yamada, A.Miyauchi, Y.Takagi, M.Mizuno, A.Harada	Association of the C-509 → T polymorphism, alone or in combination with the T869 → C polymorphism, of the transforming growth factor- $\beta$ 1 gene with bone mineral density and genetic susceptibility to osteoporosis in Japanese women	J. Mol. Med.	79	149-156.	2001
A. Harada	Prevention of fractures caused by falls in elderly persons	JMAJ	44	306-311	2001
A.Harada	Mechanism of hip fracture and its prevention by a hip protector. Basic and clinical aspects of osteoporosis	Life Science		19-24	2001
光成淳史, 坂口一彦, 岡正典, 速水尚, 中村孝志	大腿骨頸部骨折の生力学的研究	日本臨床バイオメカニクス学会誌	22	265-268	2001

20010605

以降P37-P72は雑誌/図書等に掲載された論文となりますので  
P35「研究成果の刊行に関する一覧表」をご参照ください