

図1 Computer Graphics による転倒動作の再現
 A. 側方パターン, B. 後側方パターン, C 後方パターン

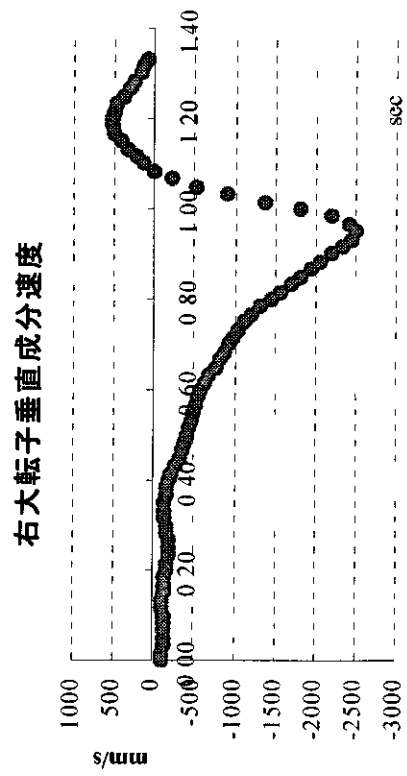
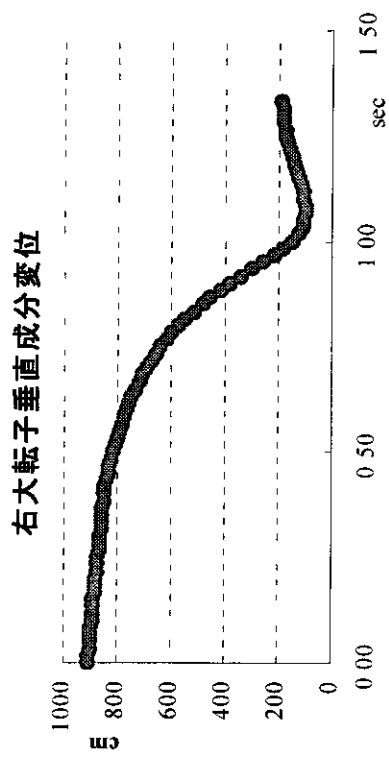


図2 転倒動作時の大転子マーカーの変位と速度

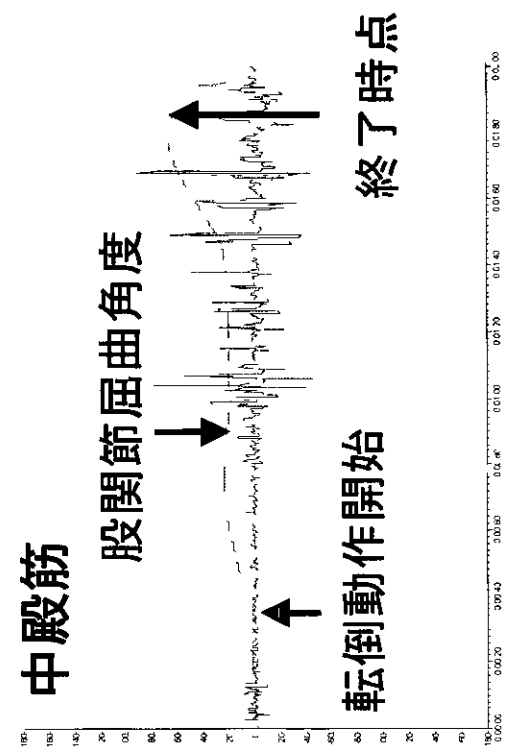
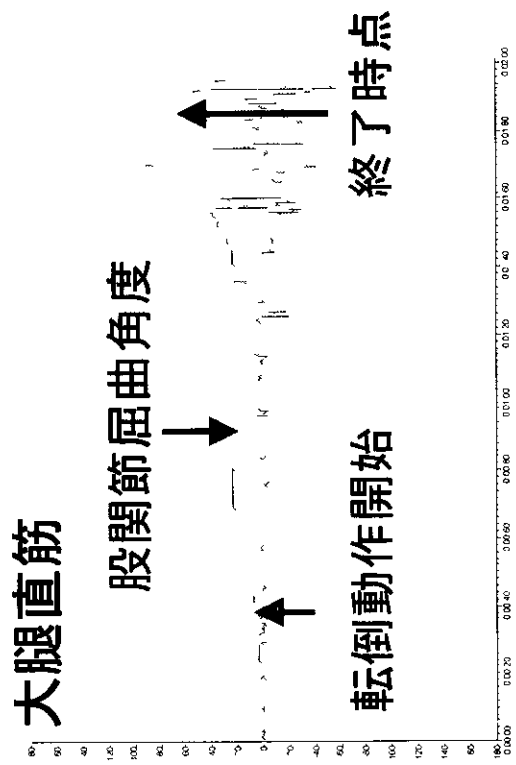


図3 転倒動作時の筋電図

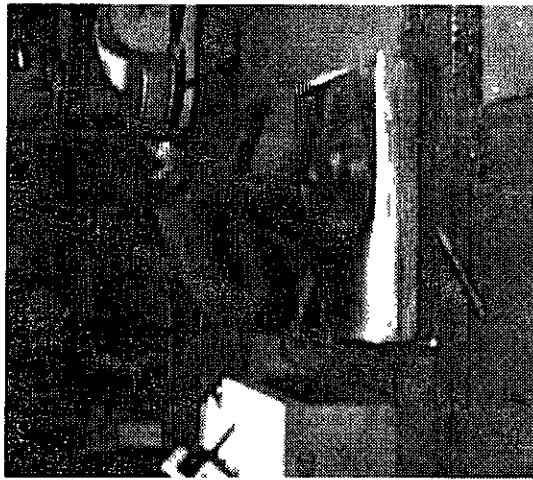


図4 飛び降り動作実験場面

A: フォースプレート上に敷いた厚さ13cmのマットへの飛び降り動作

B: フォースプレートへの直接の飛び降り動作

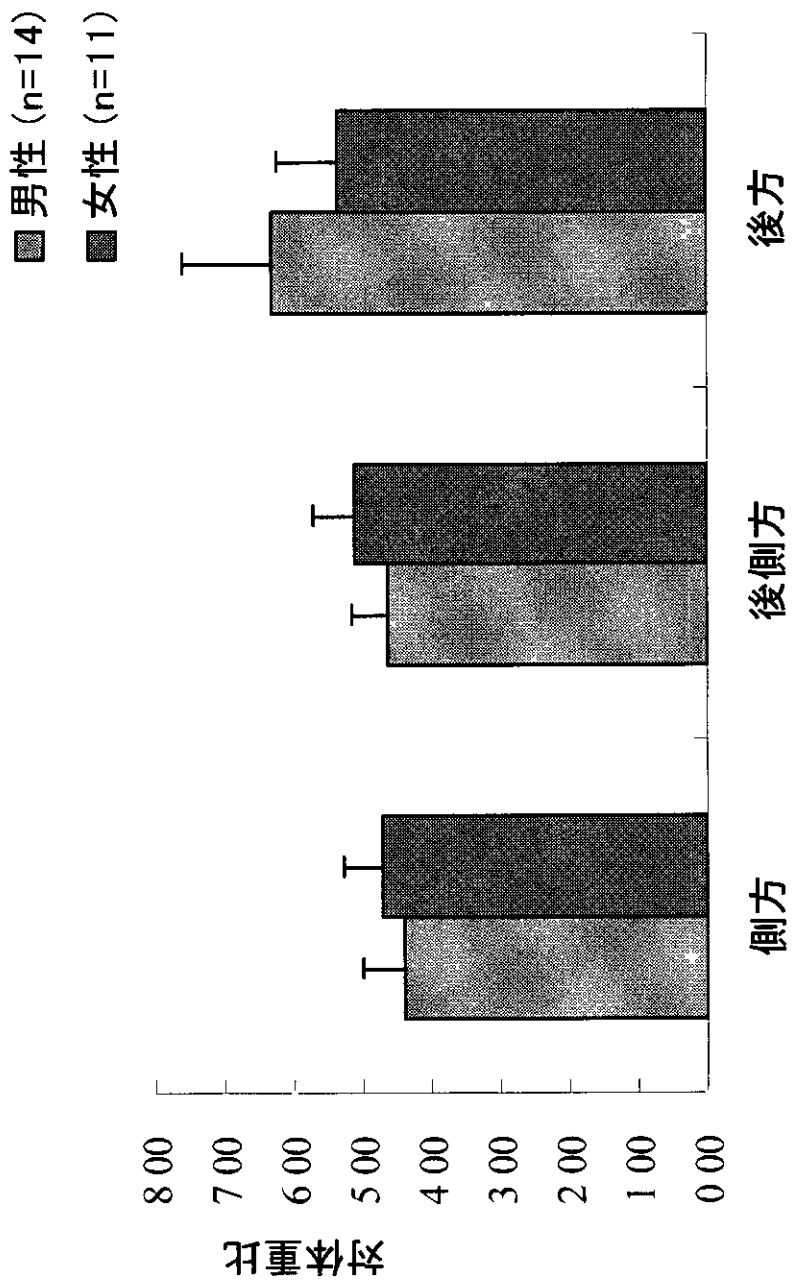


図5 各転倒方向における最大床反力(対体重比)の比較

		垂直床反力最大値 (kg)		
		側方	後側方	後方
男性 (n=14)	体重	0.52	0.61*	0.36
	身長	0.55*	0.39	0.28
	転子果長	0.55*	0.44	0.46
女性 (n=11)	体重	0.79**	0.79**	0.71*
	身長	0.65*	0.61*	0.72*
	転子果長	0.72*	0.65*	0.88***
男女合計 (n=25)	体重	0.62***	0.65***	0.67***
	身長	0.60**	0.52**	0.67***
	転子果長	0.64***	0.59**	0.71***

* p<0.05, ** p<0.01, *** p<0.005,

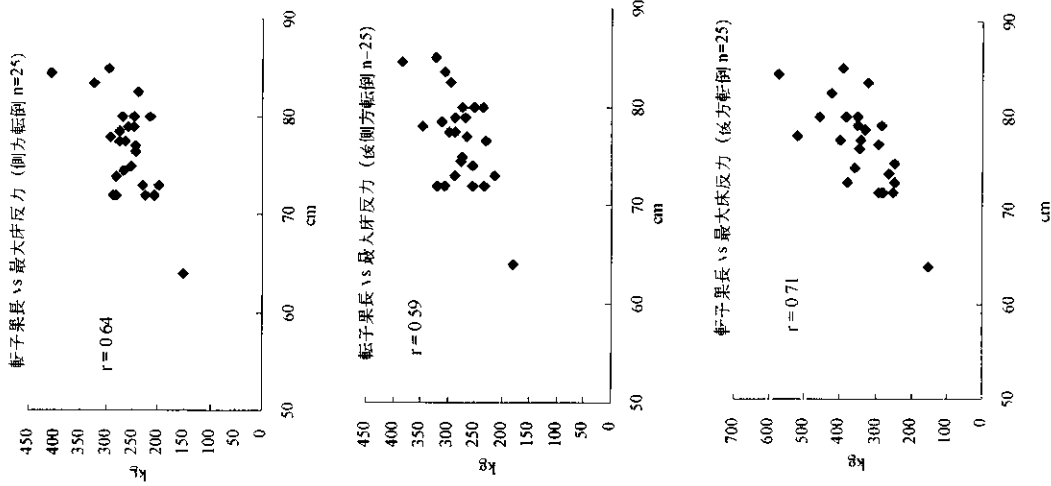


図6 形態因子と転倒時垂直床反力最大値との相関

側方パターン



45度後側方パターン



大転子
大転子からの接地が
認められなかった1例

図7 衝撃部位の観察 (側方及び45度後側方パターン)

側方パターンの1例以外は全て大転子を強打していた

後方パターンで大転子を強打した1例

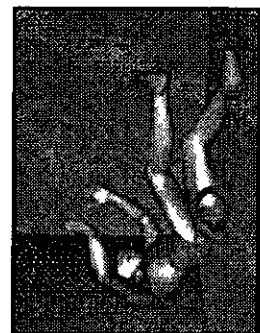
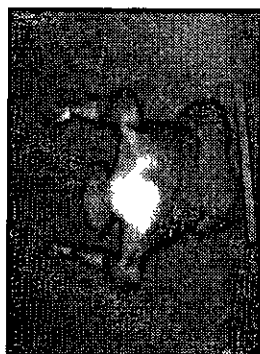
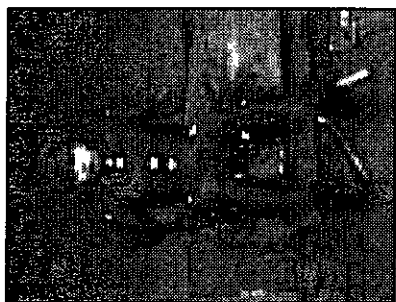


図8 衝撃部位の観察 (後方パターン)

後方パターンでは、1例を除いて大転子が

らの接地は認められなかった

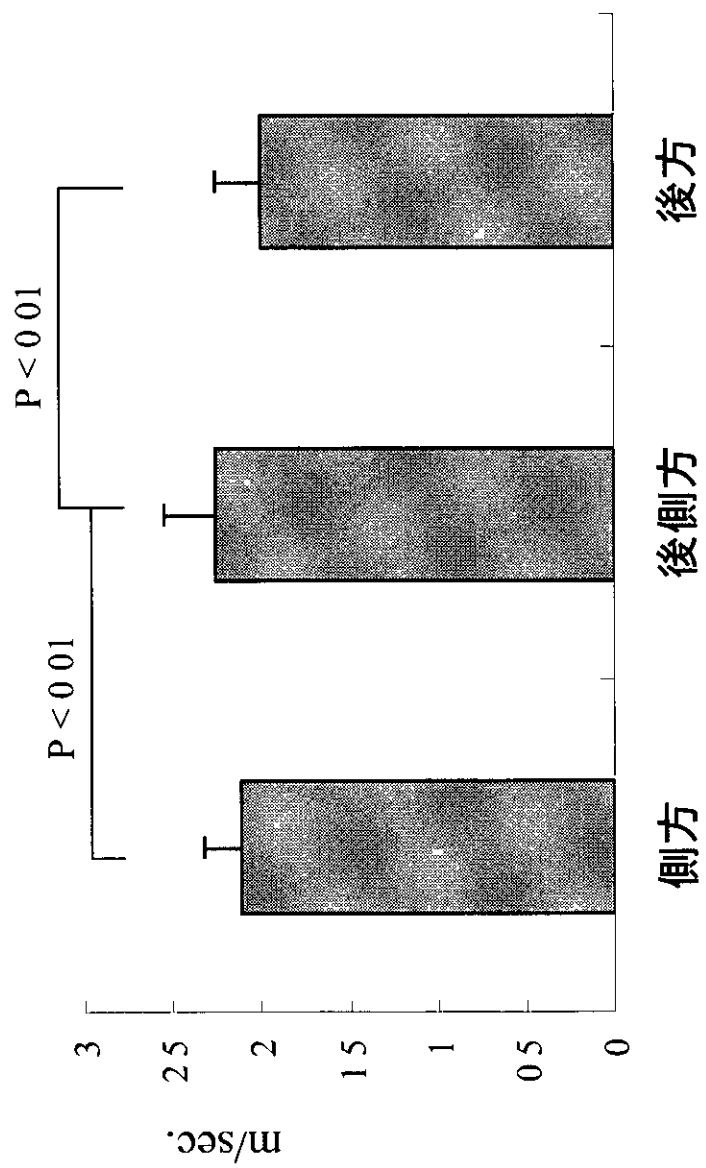
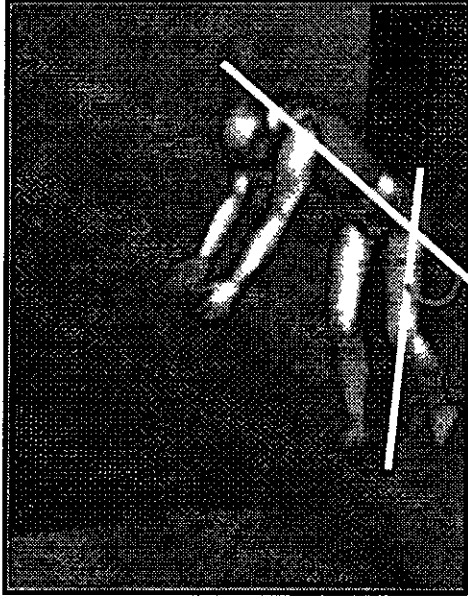
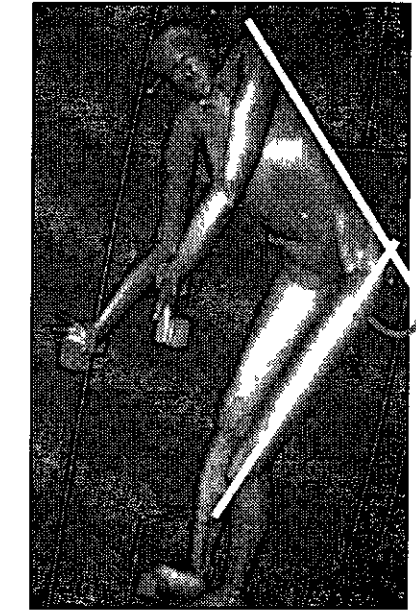


図9 各転倒方向における大転子マーカ—最大速度の比較



側方パターン



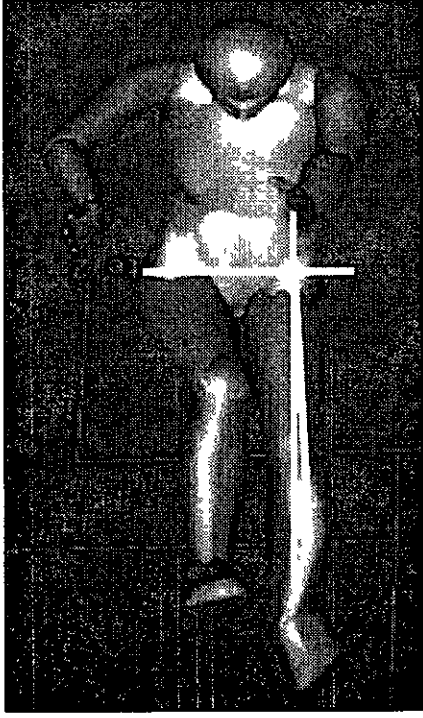
後方パターン

	男性	女性
側方・	40.5 ± 17.1°	71.0 ± 11.6°
後側方	61.2 ± 16.6°	68.4 ± 8.8°
後方・	53.8 ± 11.7°	70.0 ± 15.4°

図10 衝撃時の股関節屈曲角



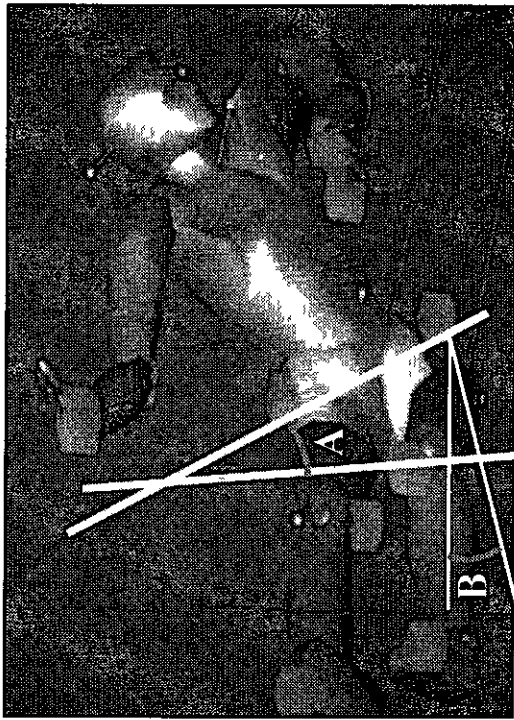
側方パターン



後方パターン

	男性	女性
側方:	130 ± 71° (内転)	193 ± 106° (内転)
後側方	112 ± 70°	208 ± 97°
後方:	-2.2 ± 78° (外転)	52 ± 87°

図11 衝撃時の股関節外転-内転角



	男性	女性
側方・	23.8 ± 23.7° (外旋)	14.3 ± 14.6° (外旋)
後側方・	20.9 ± 17.1°	0.6 ± 12.5°
後方・	17.7 ± 17.0°	7.6 ± 12.2°

図12 衝撃時の股関節内旋-外旋角 (A-B)

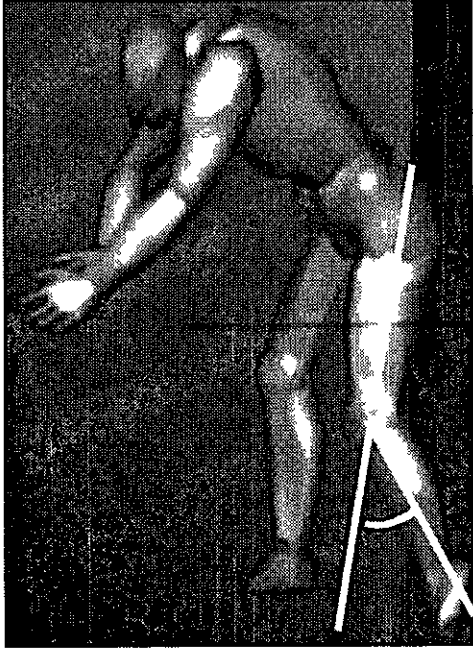


男性

側方 30.5 ± 23.9°

後側方 40.2 ± 21.6°

後方 34.6 ± 10.7°



女性

51.9 ± 17.9°

42.4 ± 15.4°

54.8 ± 17.9°

図13 衝撃時の膝関節屈曲角度

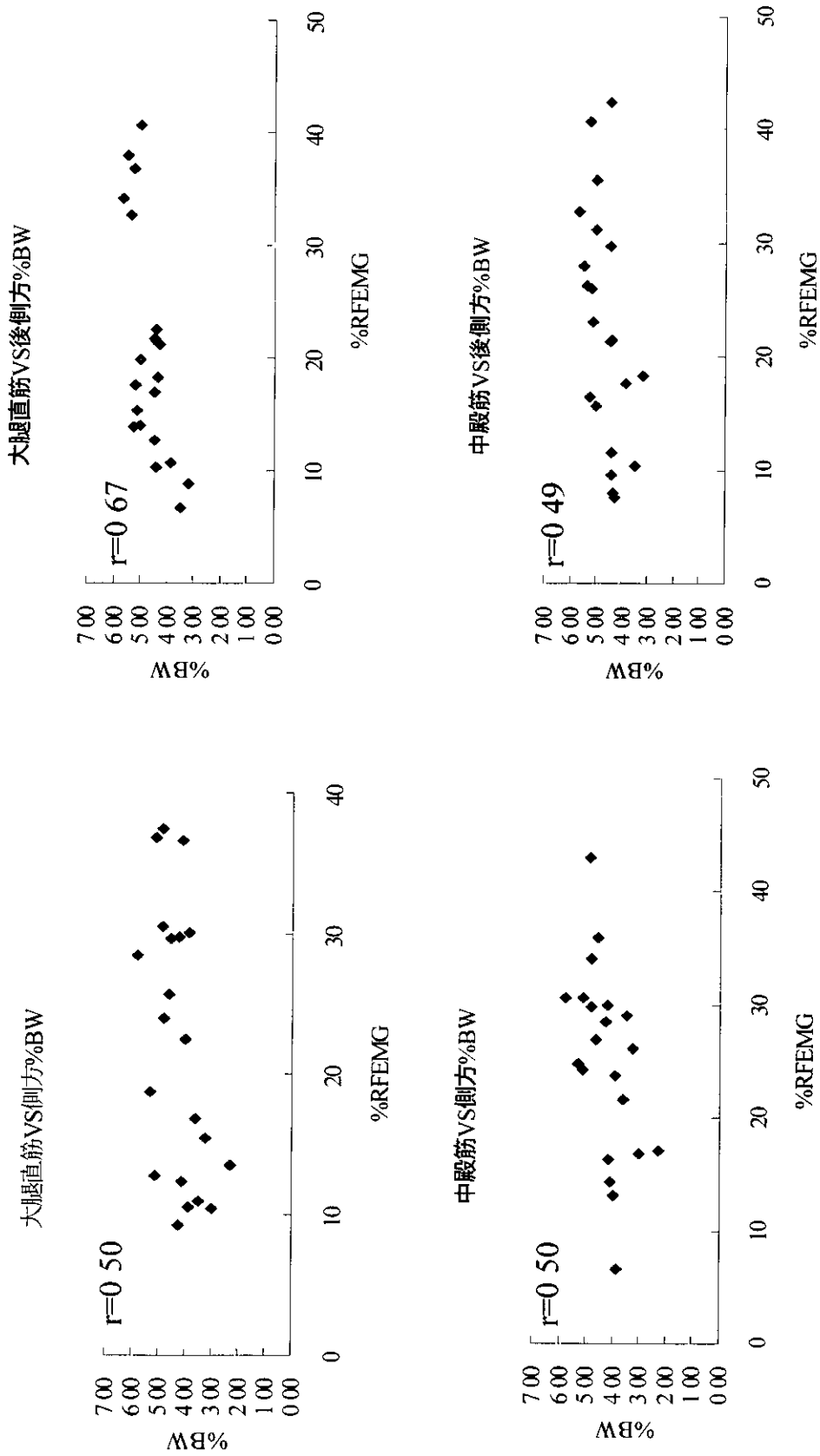


図14 筋活動と衝撃力との相関関係

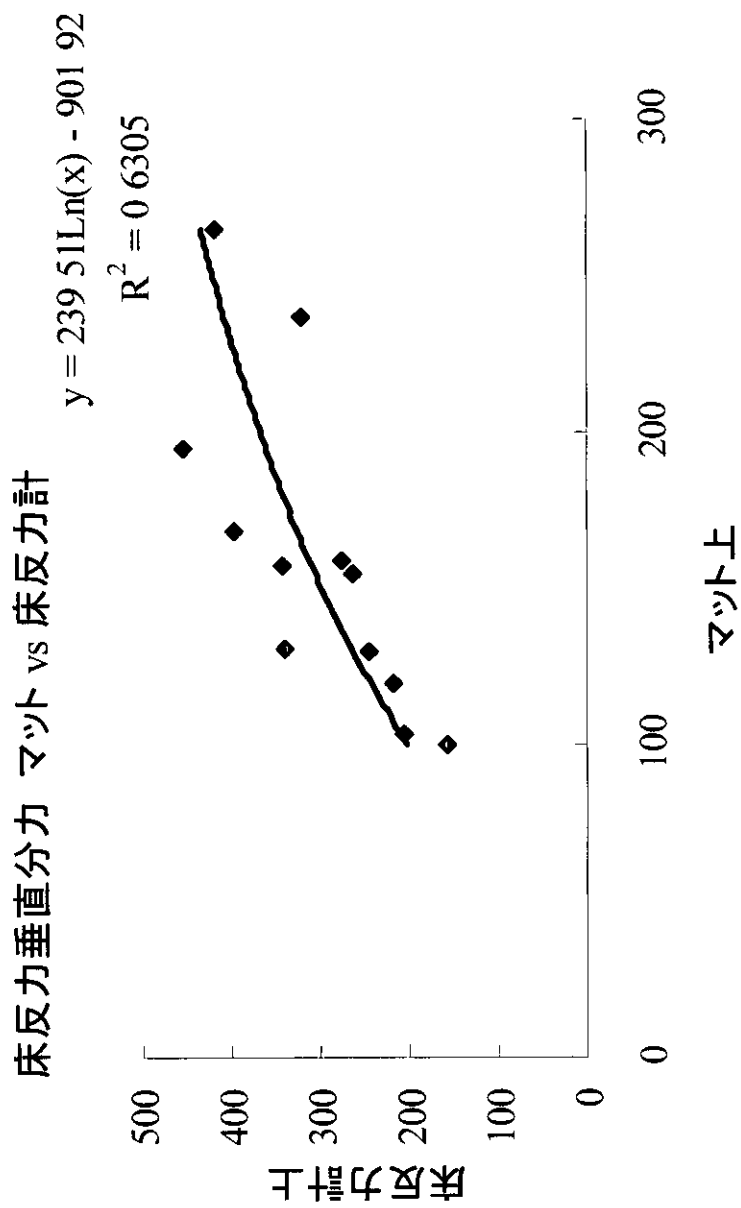


図15 マット上に飛び降りた時と床反力計上に直接飛び降りた時との衝撃力の相関

		マット上測定値 (kg)	推定値 (kg)	(体重比)
側方	男性	271.8	440.6	7.1
	女性	246.6	417.3	8.0
後側方	男性	288.6	454.9	7.3
	女性	267.8	437.0	8.4
後方	男性	391.9	528.2	8.5
	女性	279.4	447.1	8.6

図16 転倒時衝撃力の予測値

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。一般に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困難である。前年度では、骨梁構造の3次元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。本年度は、骨粗鬆症を原因とした大腿骨頸部骨折患者から摘出した大腿骨頭海綿骨を多数収集した。また、中年期男性の解剖屍体から摘出した大腿骨頭海綿骨も対照材料として収集した。そして、前年度に開発を終えた測定システムを用いて、骨粗鬆海綿骨と正常海綿骨のせん断変形挙動の違いを検討した。また、変形挙動の違いを一般の医家らに視覚的に理解させるために、通常静止画像としてしか表現できないCT像を動画として表現する技法を考案した。

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が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か、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

と、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。

本年度の本分担研究では、骨粗鬆症によって大腿骨頸部骨折を生じた海綿骨を使用して海綿骨の変形および亀裂進展挙動を3次元的に観察した。また、対照材料としてヒト正常海綿骨の同挙動も測定して、両者を比較検討した。

B 研究方法

まず、前年度に開発した μ CTを測定しなから海綿骨の変形動態を測定するシステムを用いて、大腿骨頭海綿骨のせん断変形挙動を観察した。

前年度では、ヒト腰椎海綿骨を用いてシステムの妥当性を検索する予備実験を完了していた。本年度は、骨粗鬆症によって実際に大腿骨頸部骨折を生じた78～93歳女性12個体の大腿骨頭海綿骨を使用した。また、対照材料として53～64歳男性3個体の同海綿骨を使用した。これら試験片に対してせん断動態を3次元的に測定するとともに、せん断抵抗（せん断強さ）を測定してハイオメカニカルな評価も行い、標記課題の本格的検討を行った。

研究分担者の原田が行った検討では、大腿骨頸部骨折形態は荷重の作用方向に強く依存することか示された。これは骨粗鬆症が特定の方向に配向する骨梁を強く萎縮するからであると推定される。すなわち、骨粗鬆症が骨梁構造の構造異方性を顕著化させ、一定の方向に構造脆弱性を誘発した結果だと推察される。このことは本分担研究の重要な課題のひ

とつである。そこで、大腿骨近位の海綿骨に発達する主圧縮骨梁群に注目した。主圧縮骨梁群は大腿骨頸部の力学的強度を左右する重要な骨梁群である。本実験では、試験片として、主圧縮骨梁群から採取した海綿骨を用いた。試験片の軸は主圧縮骨梁群に対して垂直(以後、垂直試験片)および45°斜方(以後、45°試験片)として、この方向からせん断力を作用した場合の変形挙動を検索した。

また、形態学的に複雑な骨梁構造の変形と亀裂進展挙動をいかにわかりやすく表現するかは、研究結果の公表と利用の観点からも重要である。本研究では、骨粗鬆と正常海綿骨の変形挙動を3次元アニメーションによって視覚的に比較して、各々の亀裂進展や破壊挙動を比較的検討できるようにした(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) 前年度に開発した μ 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改良を行った。大腿骨頭海綿骨のせん断強度は例え骨粗鬆症に罹患していても比較的強かった。そのため、実験装置の強度に問題が発生した。そこで図1に示すように、試験管材料を以前の透明硬質樹脂からアルミニウムに変更し、荷重検出器も適正な仕様のもに変更した。

(2) ヒト大腿骨頭を用いて、正常および骨粗鬆海綿骨によるせん断実験を実施した。実験装置の駆動機構などについては、前年度分担報告書に詳しいので省略する。

図2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。同図にはせん断ハンチを書き加えている。

図3は前年度に測定した正常海綿骨の変形挙動を示す。この2次元像から破壊部分のみを抽出し、3次元イメージとして再構築を試みた。図4はその結果を示す。図の数字はせん断ハンチの降下量を示す。図4はフレームショット図であるが、コンピュータ

上では動画として表現することに成功した。板状骨梁に亀裂が進展し、破壊した骨梁が振れながら切断されていく様子がよくわかり、データの開示・説明に極めて有利であることが示された。

この手法を大腿骨頭の海綿骨にも適用した。図5は垂直試験片のせん断動態を示す。同図は試験片全体の縦断面を示す。せん断ハンチ降下量10mmの矢印が示すように、骨梁はハンチ辺縁部でせん断された。図6はこの状態を3次元の動画に再構築した結果である。主圧縮骨梁群を構成する板状骨梁は、図の左右方向に配向している。ハンチ底部と接する板状骨梁は典型的なせん断過程により分断された。しかし、この破壊は下方の横骨梁には伝播しなかった。板状骨梁のせん断によって部分的な剛性が失われ、海綿骨の空孔が押しつぶされたが、それは次の板状骨梁に達するまでであった。すなわち骨梁破壊の連鎖が認められず、板状骨梁のせん断に始まった破壊は局所的な損傷として留まったと言える。

図7は45°試験片のせん断動態を示す。板状骨梁が45°斜方に配向しているのかわかる。せん断ハンチ降下量0.5mmの矢印が示すように、骨梁に図にほぼ垂直な方向に亀裂が発生した。図8は図7の破壊部分を3次元動画に構築した結果である。亀裂は板状骨梁の中を3次元的に進展して海綿骨が破壊に至る挙動が見て取れた。また、亀裂は必ずしも空孔間を進展するのではないことがわかった。このような破壊挙動は、図5と図6で示した破壊挙動とは明らかに異なる。すなわち、骨粗鬆海綿骨でも荷重の作用方向が異なると破壊挙動が異なる。

また、せん断強度は垂直試験片42N、45°試験片30Nと異なり同じ骨粗鬆海綿骨でも破壊様式の違いによってせん断抵抗が異なることが示された。正常海綿骨の垂直試験片のせん断強度は平均95Nであり骨粗鬆骨の2倍以上の強度を示した。

3次元有限要素法により、骨梁構造内部の応力分布を計算した。垂直試験片と45°試験片では応力分布は大きく異なり、骨梁構造形態に依存した応力分布の特徴が示された(カラー表示でないと理解し難いのも、図は省略する)。例えば、垂直試験片においては、板状骨梁間を垂直に継いでスパーサーとして支える棒状骨梁に、周囲に比較して大きな応力が発生した。またそれは棒状骨梁全体に分布した。一方45°試験片では、亀裂発生部に大きな引張応力が

発生した 垂直試験片に比べて、応力の分布状況は単純で、応力の集中傾向が強いと言える。

D 考察

μ CT 試験管の強度不足など不測の事態に見舞われはしたが、迅速に対処することができ、実験手順の確立と適正な結果を得ることができた。

骨粗鬆症による頸部骨折の発生頻度は年間9万例と言われている。この内のほとんどは転倒など外力の作用で頸部骨折を生じている。しかし転倒したからといって必ずしも骨折する訳ではないのも事実である。この理由の一つとして、骨粗鬆症による骨梁構造の構造脆弱性の程度（構造形態かどのように退行変化するか）とそれに作用する荷重の方向が挙げられる。一定の方向に特に強度が弱く、転倒などでこの方向に一致する荷重ベクトルが作用すると頸部骨折に至る場合が多いのではないかと考える。

図6に示した垂直試験片では、板状骨梁のせん断が最大剪断力42Nを伴って発生した。いわゆるマクロな亀裂は観察されず、このせん断破壊によって構造の剛性が部分的に失われ、さらなる負荷を支持するために棒状骨梁が支持機能を代行したと考える。しかし棒状骨梁は骨粗鬆症によって強く萎縮しており、ほとんど抵抗することなく座屈していった。この間に空孔が押しつぶされることになったが、図6のごとく破壊は空孔の圧縮に留まり、試験片底面に面する骨梁構造には全く変形が及ばなかった。この破壊は骨梁構造を部分的に圧密したこととなり、圧密後はむしろ部分的な剛性を大きくする結果となって、それ以上の損傷を底面の骨梁構造に与えなくなったと推察される。

一方、図8に示した45試験片では、マクロな亀裂を伴い、骨梁構造の破壊が見られた。亀裂は板状骨梁にあいた一つの空孔辺縁部に発生して骨梁内部を3次元的に進展した。このときの最大せん断力は30Nであり、垂直試験片に比べて小さい荷重で破壊した。図8の観察と有限要素法解析の結果から、亀裂は引張荷重によって発生したと考えられる。亀裂の進展に伴って、破片となる小さな骨梁構造が試験片本体から分離され、タイス孔に落ちていった。すなわち、生体内ではこのような亀裂の連鎖や破片が別の部位と接触して力を伝達することによって新たな破壊起点が発生することによる破壊の連鎖が生じ

る可能性が高い。このような連鎖が大腿骨頸部骨折の機序となる可能性が強く示唆された。

E 結論

- (1) μ CTを測定しながら、準動的に骨梁構造の変形動態を測定することができるシステムを開発して、その3次元的な破壊挙動を可視化して表現する技術を確立した。また、3次元動画による検討か、骨粗鬆海綿骨の破壊機構と大腿骨頸部骨折の発生機序を解明するために、有効な手段であることを確認した。
- (2) 大腿骨近位に発達する主圧縮骨梁群は、大腿骨頸部骨折の発生と強く関係すると思われる。そこでこの骨梁群に対して垂直と45°斜方の異なった2方向からせん断荷重を作用させて各々の挙動を観察した。同じ骨粗鬆海綿骨でも、荷重の作用方向が異なると変形挙動のみならずせん断抵抗も異なることかわかった。
- (3) 垂直試験片の結果から、主圧縮骨梁群に垂直にせん断荷重が作用する場合には、例え部分的な骨梁の損傷が生じて、それは伝播連鎖して骨折にまで結びつくことは少ないのではないかと推察された。
- (4) 一方、主圧縮骨梁群に対して斜方からせん断荷重が作用する場合には、垂直に作用する場合に比べてせん断抵抗が小さくなる傾向が認められた。これは破壊様式が異なるためである。すなわち、斜方からのせん断荷重では、板状骨梁に亀裂が発生して、それが容易に伝播して破片を発生する。同時に破片は隣り合う別の構造に接触して力を作用しそこでふた蛇尾新しい破壊の起点が生じる。ここからも新たな破壊が発生する。このような破壊器の連鎖が大きな破壊すなわち大腿骨頸部骨折に結びつくことか示唆された。

F 健康危険情報

認めない

G 研究発表

1. 論文発表

- 1) 速水尚, 岡正典, 中村孝志, Seeback Schneider マイクロ CT による骨粗鬆化骨梁構造のせん断破壊挙動の評価 日本臨床バイオメカニクス学会誌 23, 113-118 2002
——外(1論文投稿中)——

2. 学会発表

- 1) THavami, MOka, TNakamura, Schneider Structural fragility mechanism in human osteoporotic trabecular bone The 13th Conference of European Society of Biomechanics Wroclaw 平成14年9月2日
- 2) THavami Micro CT-guided assessment of shearing fracture of human osteoporotic trabecular bone AO Osteoporosis Group Conference Davos・平成14年9月7日
- 3) 速水尚, 岡正典, 中村孝志, 坪山直生・骨粗鬆症による易骨折性と構造脆弱性の関係 第17回日本整形外科学会基礎学術集会・青森・平成14年11月11日
- 4) 速水尚・岡正典, 中村孝志, 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2報) 第29回日本臨床バイオメカニクス学会 千葉 平成14年9月29日