

厚生科学研究費補助金

21世紀型医療開拓推進研究事業

大腿骨頸部骨折の発生機序と予防に用する研究

平成13年度 総括・分担研究報告書

主任研究者 中村孝志

平成14(2002)年 4月

目 次

I. 総括研究報告書	
大腿骨頸部骨折の発生機序と予防に用する研究	1
主任研究者 中村孝志	
II. 分担研究報告	
1. コンピュータグラフィックスを用いた転倒場面の3次元解析	7
主任研究者 中村孝志	
研究協力者 神先秀人	
2. 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	18
-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	
3. 転倒メカニズムの研究	22
分担研究者 岡 正典	
4. 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	25
分担研究者 速水 尚	
III. 研究成果の刊行に関する一覧表	35
IV. 研究成果の刊行物・別刷	37

I. 総括研究報告書

大腿骨頸部骨折の発生機序と予防に用いる研究

主任研究者 中村孝志 京都大学医学部整形外科教授

高齢者の転倒と大腿骨頸部骨折の発症メカニズムとの相関性をその運動特性と巨視的・微視的な大腿骨の力学的強度の観点から検索した。その結果、以下の知見を得た。①疫学的調査の結果、側方・後方への転倒を機転とする大腿骨頸部骨折の多くは外側骨折型を誘発する。転倒など大きな外力が作用しない場合でも大腿骨頸部骨折は発生し、この場合はほとんど内側骨折型となることがわかった。②本研究で試作した転倒装置を用いて転倒挙動を解析した結果、前方への転倒時には骨盤周囲への衝撃を避けるために、反射的な上肢運動を行うことなどが知られた。③外・内側骨折型の発生機序の違いは、転倒方向と大腿骨頸部の骨密度分布の違いに依存している可能性を示した。④ μ CTを用いて骨梁構造の構造脆弱性を評価した結果、正常と骨粗鬆症海綿骨の間には骨折機構の顕著な違いがあることを指摘した。

分担研究者

原田 敦

国立療養所中部病院整形外科・医長

岡正典

京都市身体障害者リハビリテーションセンター・所長

速水尚

近畿大学工学部・助教授

A. 研究目的

高齢社会となった我が国では、骨粗鬆症が増加し、これによる骨折対策が重要な医療課題となっている。中でも、大腿骨頸部骨折は侵襲がおおきく、治療だけでなく、骨折に起因して生じる老人性痴呆や寝たきりの合併を起こし易く、ケアにかかる社会負担が社会問題ともなっている。活力ある豊かな長寿社会を創造するには、大腿骨頸部骨折の効果的な治療と予防が不可欠である。骨粗鬆症の問題は、易骨折性の発現およびそれによる実際の骨折の発症と予後である。高齢者の骨折にあっては第一に骨折予防を目的に、個々人の易骨折性を指摘する必要がある。すなわち、患者にカスタマイズされた運動処方を与えたりヒッププロテクターなどの装着を勧めたりする指導を行う必要がある。そこで本研究では、高齢者の転倒と大腿骨頸部骨折の発症メカニズムとの相関性を、高齢者の運動特性と巨視的・微視的な大腿骨の力学的強度などの観点から検索して、トータルに大腿骨頸部骨折の予防方策を提案することを目的とする。

B. 研究方法

実際に大腿骨頸部骨折を受傷して、25病院を受診した264症例を疫学的に調査した。すなわち、受傷機転、転倒理由、転倒方向や打撲部位などをアンケート調査し、これら骨折要因と骨折型との相関分析をはじめ各種の統計的検討を行った。さらに、骨粗鬆症外来における患者を対象に、ヒッププロテクターの受容程度も調査して、その問題点の分析と骨折予防指導に必要な各種の要因を分析する試みを行った。

大腿骨頸部骨折に関するこれまでの研究では、被験者の転倒動作が意図的・作為的であり、その結果としての挙動分析結果は、実際の挙動との整合性の観点で問題があった。そこでより自然な転倒状態を再現して転倒メカニズムを解明するために、新しい機械機構を組み込んだ転倒装置を設計・試作した。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た。

DEXA骨密度測定装置で、屍体大腿骨標本の骨密度を調べた。骨密度は、大腿骨頸部、Ward三角、大転子部、さらに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に領域を分けて測定した。そして、頸部と頸部近位端部の上半部と下半部の骨密度の比をそれぞれ計算した。また、大腿骨頸部に異なった3方向の落錘実験を実施して、荷

重方向と骨折型の関係を検索した。

海綿骨の破壊動態を μ CT 装置を併用して観察するシステムを構築した。人工股関節置換術で摘出し大腿骨頭部の海綿骨の圧縮およびせん断変形挙動を μ CT 装置で観察した。また、この変形挙動をコンピュータシミュレーションして、応力とひずみ分布を3次元的に解析する試みを行った。

(倫理面への配慮)

疫学的アンケートや転倒実験における被験者への十分なインフォームドコンセントをはじめ、分担研究報告書に各々記載した通り、本研究で実施する実験・調査等の全てにつき必要十分なインフォームドコンセントと安全措置等を適切に行った。

C. 研究結果

1. 患者アンケート調査の結果、転倒など高エネルギー作用による大腿骨頸部骨折は、外側骨折型を示す場合が多い。
2. また、転倒方向は側方・後方が多く、この場合の打撲部位は大転子部が30%を占めることがわかった。
3. ヒッププロテクターを用いて大腿骨頸部骨折の発生を予防するには、現状のプロテクターの装着性(着心地)の向上と価格の低減を図る必要がある。さらに、骨粗鬆症患者に対して大腿骨頸部骨折の重要性和予後について啓蒙する必要があることが示された。
4. 試作した転倒装置は、転倒方向の可制御性があり、自然な転倒姿勢を再現・解析することができる。転倒時の挙動は、上肢運動とのバランスによって変化し複雑である。しかし、その挙動は、転倒方向別に数種類のパターンに分類できることが示唆された。
5. 屍体大腿骨を用いた骨折実験の結果、前方および頸部軸方向からの衝撃荷重で外側骨折が発生しやすいことを示した。
6. また、後方からの衝撃荷重で内側骨折が有意に多く発生することを示した。
7. 頸部近位部の上部と下部の骨密度比を計算したところ、内側骨折型を生じた骨の骨密度比は外側骨折型のそれに比べて有意に低いことがわかった。
8. 正常と骨粗鬆症海綿骨の骨梁構造のせん断変

形挙動を3次元的に検討した結果、正常海綿骨では、骨梁に亀裂が進展して骨梁骨折に至る挙動が観察された。この破壊機構は、骨梁の剛性が大きいため、骨梁の一部に応力集中が誘発されて破壊が発生する応力破壊であることが示唆された。

9. 一方骨粗鬆症海綿骨では、骨梁構造の剛性が低下するため、正常海綿骨に比べて容易に大変形を生じた。骨梁単体は大きな変形に伴って限界ひずみに達して骨梁破壊に至ることが示された。すなわち、正常海綿骨と骨粗鬆症海綿骨は、その骨折機構が大きく異なることが示された。

D. 考察

本研究は3年計画のプロジェクトであり、本年度はその1年目にあたる。本年度の計画は、骨粗鬆症に起因して発生する大腿骨頸部骨折の発生機序について、骨折要因の選別、転倒装置をはじめとする整形外科バイオメカニクスの実験装置の設計・試作であった。前述の研究結果で示したように、本年度の計画はほぼ予定通りに進捗したと言える。また、次年度への研究に向けて、本研究を構成する各々の分担研究も研究活動が続けられており、目的は順調に遂行されつつあると言える。

患者アンケートによる骨折発生状況と屍体大腿骨を用いた骨折実験の結果は、大筋で整合性があることがわかった。今後はこれらの結果に、転倒挙動分析結果を組み込んで、より詳細な解析を行う予定である。

海綿骨における骨密度と骨梁構造がその力学的強度に及ぼす影響の重要性については、周知のことである。しかし、骨粗鬆症海綿骨を対象としたり大腿骨頭頸部骨折の力学的機序との関係で臨床医学的に骨密度や骨梁構造の退行変化を具体的に検討したりした研究は少なく、本研究は意義深い。次年度は、コンピュータシミュレーションによる骨折機構の検討を本格化する予定であり、転倒に伴う衝撃荷重といった巨視的な観点での定量値と骨梁構造の破壊といった微視的な観点での定量値を比較検討しながら、骨粗鬆症性骨折の本質に迫ることが可能であると思われる。

本年度の研究結果は、未だ分担プロジェクト毎に独立したデータを提出しつつある段階である。しか

し、すでに各々の結論が互いに利用できる内容となっていることが確認できた。このことは本研究プロジェクトにとって重要で意義深い。次年度からは、各研究が共通の焦点に向かって効率よく発展していくことができるものと期待される。

E. 結論

1. 本年度の研究は、ほぼ計画通りに進捗した。
2. 疫学的調査の結果と屍体大腿骨を用いた骨折実験には一定の相関性が認められた。今後データ数を増やすなどして、統計的分析精度を向上させることで、巨視的な骨折機構の解明を行い得ると言える。
3. 新しい機械機構を有する転倒装置の試作が完了し、これを用いた転倒実験（本実験）が始まっている。患者アンケートで分析し得ない要因の追求や骨折実験に対するより具体的な実験条件の指摘などに効果を発揮することができるものと期待される。
4. 骨梁構造の3次元変形挙動の解析は世界的にも珍しい。すでに、正常と骨粗鬆症海綿骨のせん断破壊機構が異なることを具体的に示すに至っており、骨粗鬆症性骨折の微視的な機序解明に貢献できると思われる。

F. 健康危険情報

認めない。

G. 研究発表

1. 論文発表

- 1) 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.* 2001, 54(4): 501-8
- 2) H. Ito, H. Akiyama, H. Iguchi, K. Iyama, M. Miyamoto, K. Osawa, T. Nakamura: Molecular cloning and biological activity of a novel lysyl oxydase-related gene expressed in cartilage. *J. Biol. Chem.* 2001, 276(26): 24023-9

- 3) 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.* 2001, 11(1-2): 93-103
- 4) S. Yoshii, M. Oka, et al. : Bridging a peripheral nerve defect using collagen filaments. *J. Hand Surg.*, 26-A, 52-59, 2001.
- 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.
- 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) M. Oka : Biomechanics and repair of articular cartilage. *J. Orthop. Sci*6, 448-456, 2001
- 11) 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
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 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- β 1 gene with bone mineral density and genetic susceptibility to osteoporosis in Japanese women. *J Mol Med*: 2001, 79: 149-156.
- 15) Mitsuhiro Kamiya, Atsushi Harada, Masashi Mizuno, Hisashi Iwata, Yoshiji Yamada. Association between a polymorphism of the transforming growth factor- β 1 gene and genetic susceptibility to ossification of the posterior longitudinal ligament in Japanese patients. *Spine*: 2001, 26: 1264-1266.
- 16) Atsushi Harada. Prevention of fractures caused by falls in elderly persons. *JMAJ*: 2001, 44: 306-311.
- 17) Atsushi Harada. Mechanism of hip fracture and its prevention by a hip protector. Basic and clinical aspects of osteoporosis. *Life Science*, 2001, 19-24.
- 18) 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
2. 学会発表
- 1) 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,
- 2) 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
- 3) M.Oka : Development of osteo-chondral composite material .,M.E.Muller Institut fur Biomechanik ,Bern Universitat, 2001 June 8 (Prof.Hunziker)
- 4) 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
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 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
- 10) 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

- 11) 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
- 12) 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

II. 分担研究報告

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

コンピュータグラフィックスを用いた転倒場面の3次元解析

主任研究者 中村孝志 京都大学医学部整形外科教授
研究協力者 神先秀人 京都大学医学部附属病院理学療法部技官

転倒動作における大腿骨の運動様式ならびに衝撃時に受ける力の方向と大腿骨頸部の位置関係を検討するために、健常成人10例を対象に転倒実験を施行した。実験方法は3次元動作解析装置ならびに床反力計を用い、側方、45°後側方、後方の3方向への転倒を試行し、体表面上に貼りつけた28点のマーカ位置と各肢節の長さ、周径をもとにコンピュータグラフィックス(CG)上に転倒運動を再現させた。同時に、各転倒における衝撃期の最大床反力値を測定した。CGの利点として、任意の視点からの観察が可能で、従来のスティックピクチャーと比較して歩行を視覚的に捉えやすい点、マーカ位置の3次元座標や床反力データを加えることにより各肢節の運動学的分析や運動力学的分析を同期して行なうことが可能であることなどが挙げられた。衝撃期最大床反力は13cmの厚いマットへの転倒であるにもかかわらず、体重の4~5倍の高い値を示した。

A. 研究目的

大腿骨頸部骨折の骨折機序解明のためには、転倒動作における大腿骨の運動様式や衝撃時に受ける力の方向と大腿骨頸部位置関係を明らかにする必要がある。それらを検討するため、本年度は健常成人を対象に転倒実験を施行し、転倒動作のコンピュータグラフィックス(CG)作成を試みるとともに、転倒における衝撃期の床反力値を測定した。

B. 研究方法

対象は本研究の趣旨、目的に同意した形態異常や運動器疾患を有しない成人男女各5名である。男性の年齢は20歳から29歳で平均年齢は22.8±3.6歳であった。体重と身長はそれぞれ、平均58.6±3.8kg、170.2±5.1cmであった。女性5例で年齢が21歳から27歳、平均年齢は53.2歳であり、体重、身長の平均は53.9±4.6kgと160.4±1.5cmであった。

被験者の体表面に28点のマーカ位置を貼り

つけ、床反力計(BERTEC社製)上に置いた厚さ13cmのマットに向かい自発的な転倒を行わせた。転倒方向は側方、45°後側方、後方(右足を半歩前方に踏み出した肢位)の3通りのパターンで、運動様式を4台のCCDカメラで構成される3次元動作解析装置(住友金属社製GATAL-ITS-60)にて測定した。各被験者とも各パターンについて5回の試行を行い、床反力への接地が良好で、CCDカメラによるマーカ位置の検出が比較的容易な3回の試行を分析対象とした。サンプリング周波数は床反力データが240Hz、3次元解析データが60Hzである。28点のマーカ位置とZatsiorskyの方法に基づく人体計測値(各肢節長と周径)からCGによる人体モデルを作成し、転倒運動を再現させた。図1及び図2に計測場面を示す。

C. 研究結果

図3は側方への転倒場面をビデオ撮影した

映像中の3コマである。計測したパラメータを使用して、スティックピクチャーにて再現したものを図4に、CG表示したものを図5に示す。同方向の転倒動作をCG上で視点を変え、左前下方から観察したものを図6に示す。図7は後方パターン映像とCG表示、図8は斜め後方転倒時に床反力が最大値をとる時の再生画面とCG表示（下方から観察）である。

各転倒での最大床反力値を体重にて補正しグラフに示したものが図9である。転倒時の最大床反力値は13cmの厚いマットへの転倒であるにもかかわらず、体重の約4~5倍の高い値を示した。

D. 考察

ビデオ録画による撮影と比較して、3次元解析の有用な点は、第1に人体をモデル化することで、転倒動作をあらゆる角度から観察することが可能になることである。しかし、歩行解析などにしばしば用いられるスティックピクチャー表示では、上下方向からの観察時などスティックが重なり合って各肢節間の位置関係を把握することが非常に困難な場合が多い。本法では本格的な人体モデルを作成することにより、どの方向からの視点においても容易に各肢節間の位置関係を把握することができる点が大きな特徴であるといえる。

第2にマーカーの空間座標から、身体各部の運動学的因子（位置、速度、加速度）や肢節間の位置関係（関節角度など）が算出でき、さらに身体計測値等を加えることで、肢体の重心位置やエネルギーデータなど種々の運動力学的なパラメータを算出することも可能である。

次年度においてこれらのパラメータを算出し、本研究目的である転倒動作における大腿骨の運動様式ならびに衝撃時に受ける力の方向と大腿骨頸部位置関係について検討を加

えていきたい。

E. 結論

転倒動作のCG表示を試みた。CG表示により転倒動作を任意の視点より観察することが可能になり、転倒時のより正確なパターン分析が可能になった。これらの観察と、3次元解析データや床反力データを組み合わせることにより、転倒動作における大腿骨の運動様式や衝撃時に受ける力の方向と大腿骨頸部の位置関係についてさらに詳細な分析が可能になると考えられた。

F. 健康危険因子

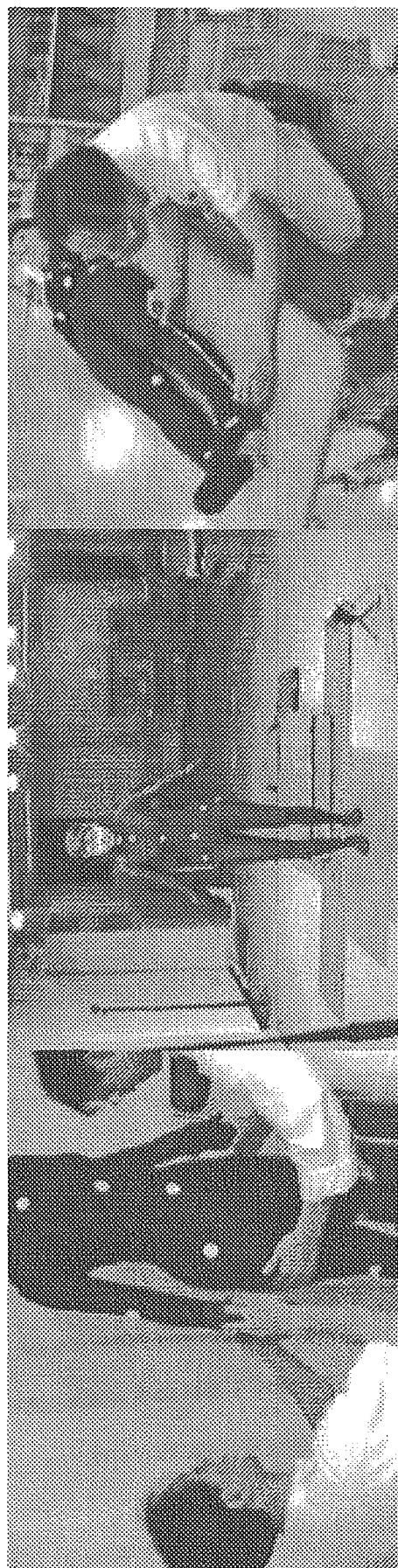
本実験を施行するに当たり、転倒による骨折の危険性を回避するため13cmの厚いマットを使用し、開始前に転倒練習を何度も繰り返した。また、対象者を1)運動器疾患などを有しない健康成人、2)年齢30歳以下、3)Body Mass Index (BMI) 25未満の肥満でない者に限定した。

転倒実験により股関節など下肢に痛みを訴えた被験者はいなかったが、体幹や頸部に筋肉痛を訴えた者が数例みられた。それらの痛みは2日以内に消失した。すなわち、慣れない動作を繰り返したことによる頸部筋群等の筋疲労が原因と考えられ、転倒の衝撃による影響は認められなかった。

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



(1) マーカー貼り付け

(2) 転倒動作計測

(3) 身体計測

図1 計測場面

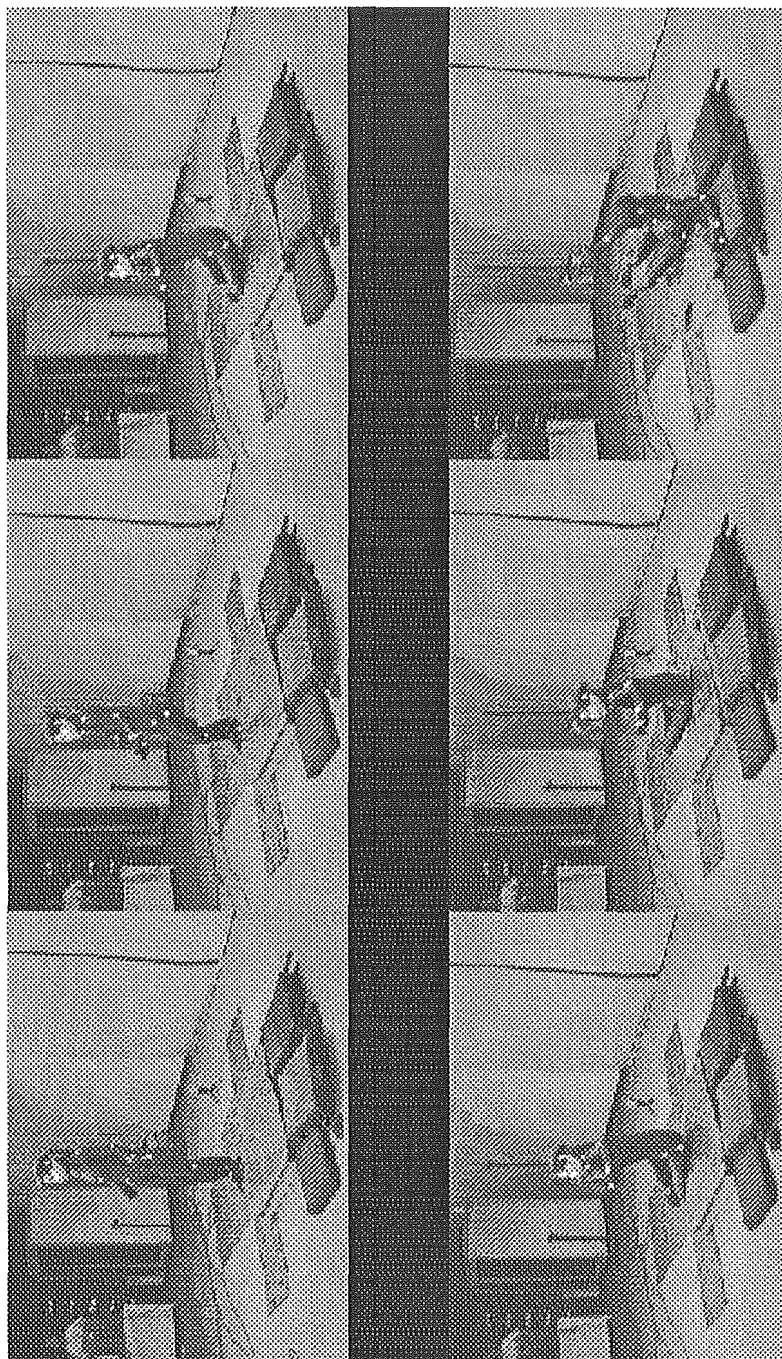


図2 転倒動作の計測場面

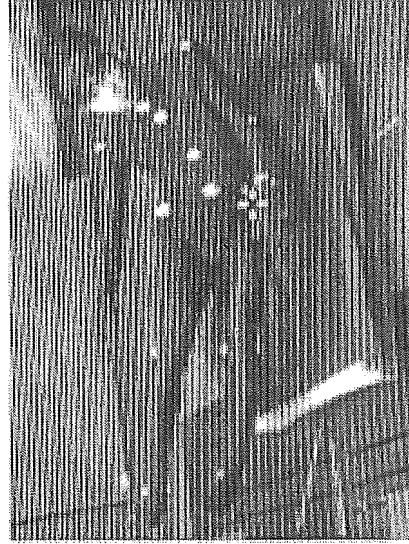
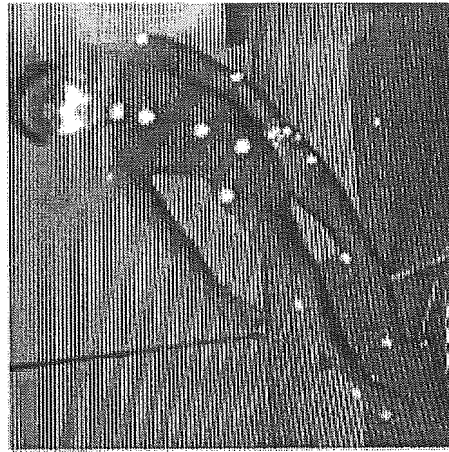
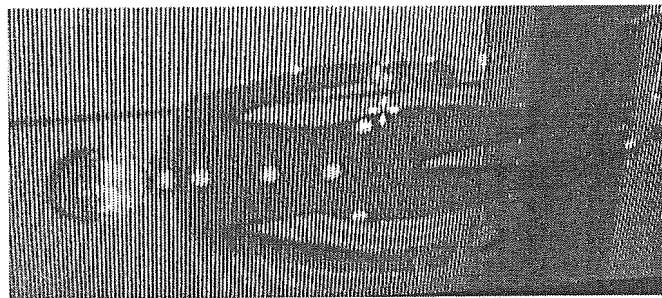


図3 転倒動作のビデオ再生画像

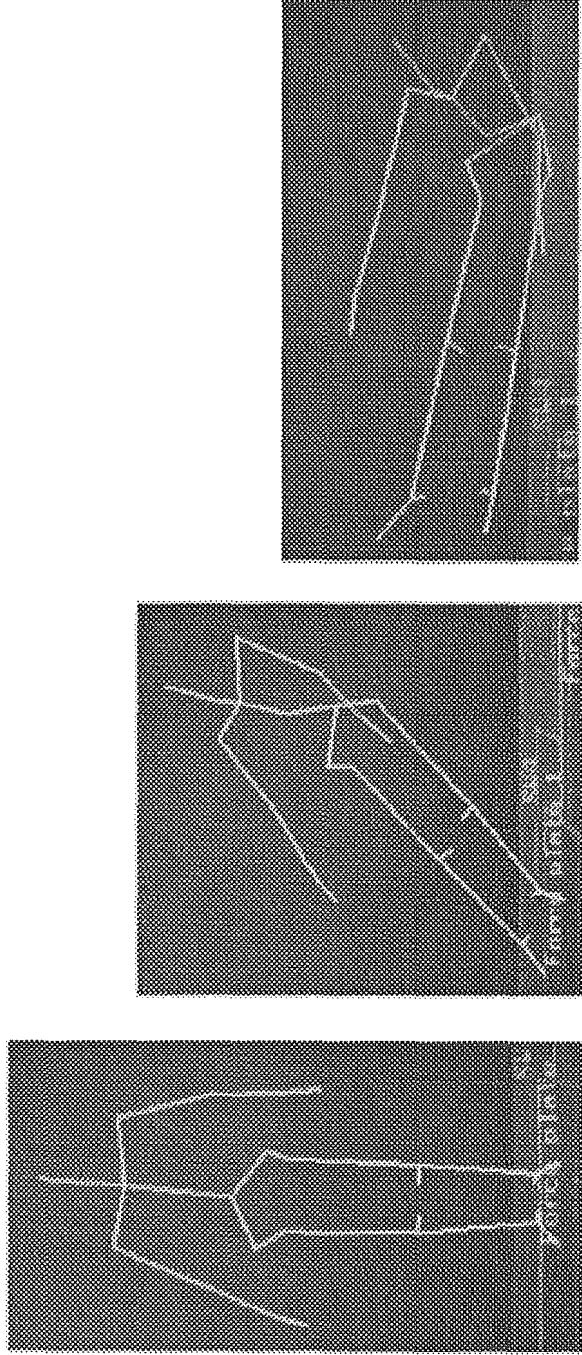


図4 スティックピクチャーによる転倒動作の再現

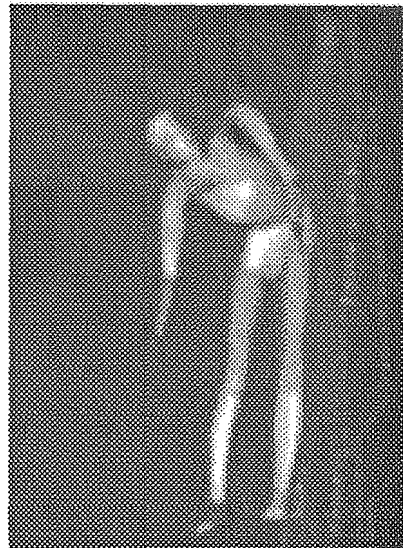
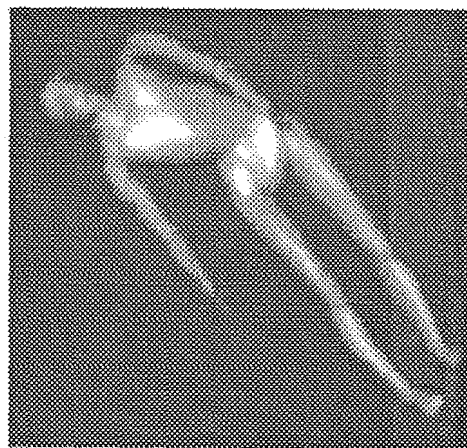
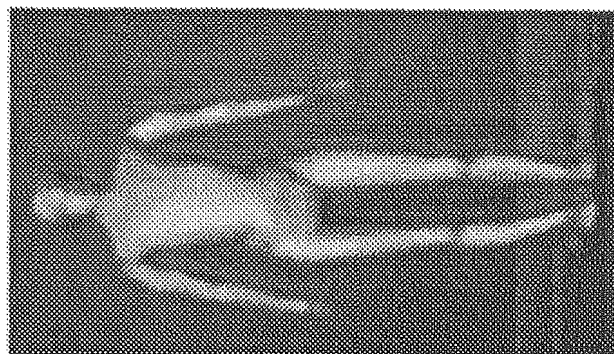


図5 Computer Graphics による転倒動作の再現

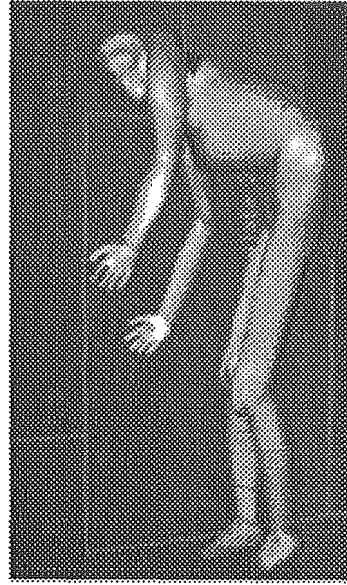
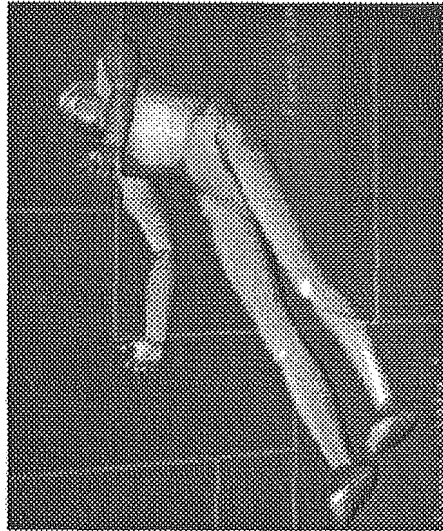
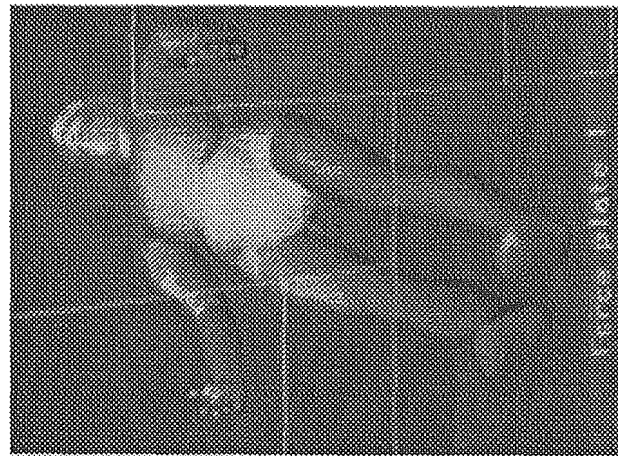


図6 Computer Graphics による転倒動作の再現
(左前下方からの観察)

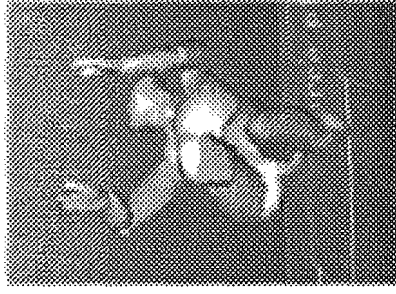
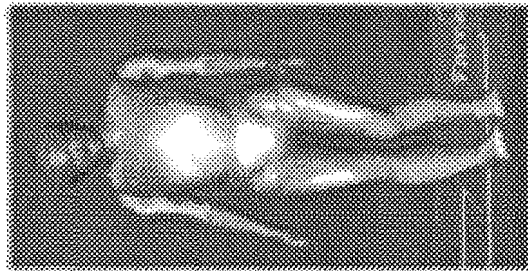
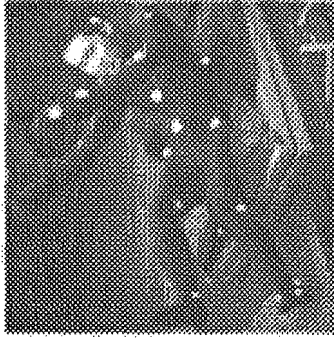
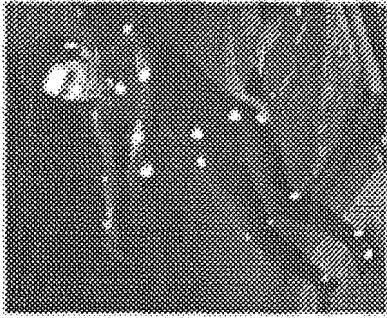
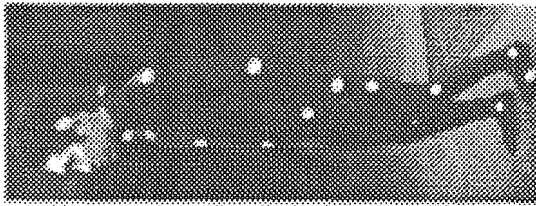


図7 Computer Graphics による転倒動作の再現

(後方パターン)

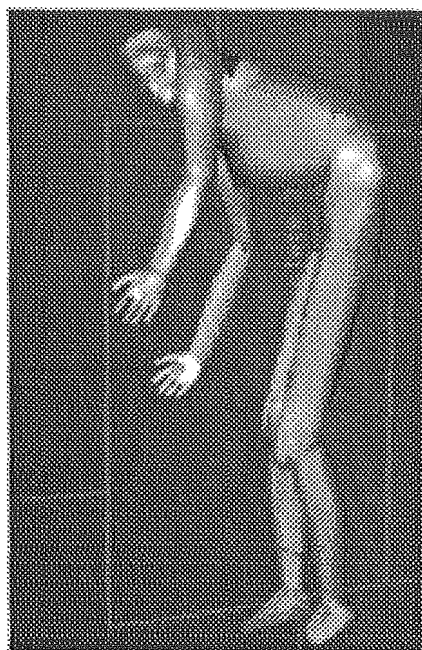


図8 斜め後方衝撃時のCG
(下方からの観察)

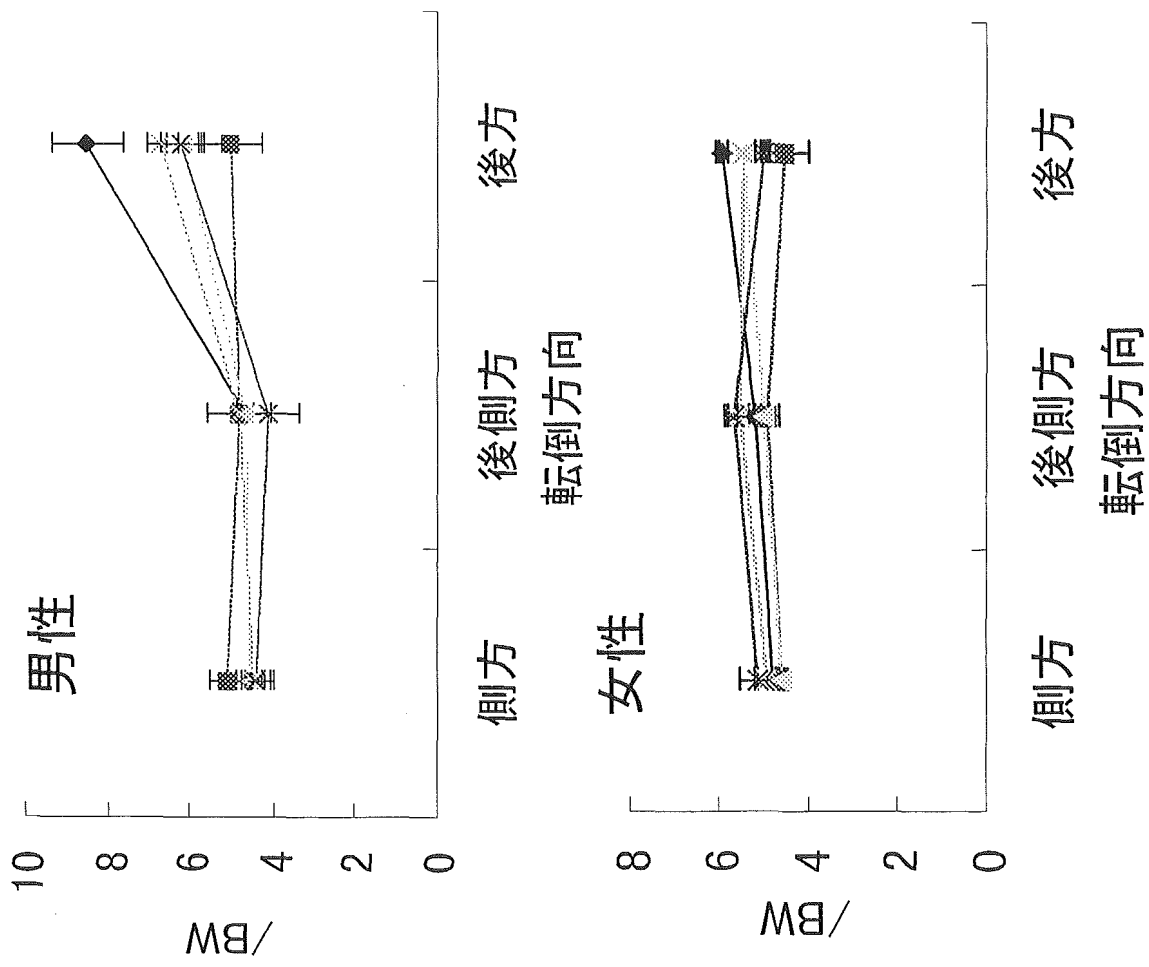


図9 衝撃期の垂直方向床反力最大値(体重で補正)