

厚生科学研究費補助金

効果的医療技術の確立推進臨床研究事業

大腿骨頸部骨折の発生機序と予防に用する研究

平成14年度 総括・分担研究報告書

主任研究者 中村孝志

平成15(2003)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	転倒による骨折リスク解析とヒッププロテクター効果の検討	5
	分担研究者 原田 敦	
2	転倒メカニズムの研究	8
	分担研究者 岡 正典	
3	転倒場面の運動および力学的解析	13
	分担研究者 坪山直生	
	研究協力者 神先秀人	
	研究協力者 南角 学	
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	33
	分担研究者 速水 尚	
III	研究成果の刊行に関する一覧表	41
IV	研究成果の刊行物・別刷	43

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 京都大学大学院医学研究科整形外科教授

高齢者の転倒挙動および転倒時の防御運動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。また、転倒に伴う衝撃力の減衰により大腿骨頸部骨折を防止しようとするヒッププロテクターの効果についても検討した。その結果、以下の知見を得た。①本研究で試作した転倒装置を用いて、転倒の仕方と特徴的な防御反応を分析した。その結果、斜後方と側方転倒で大腿外側への衝撃接地を避けきれないことがわかった。すなわち、これら High-risk Fall であることを指摘した。②これら High-risk Fall 時の衝撃力の大きさは 400~450kg、体重の 7~8 倍程度と推測され、形態因子や筋活動の影響を受けることが示唆された。③ヒッププロテクターは硬性と軟性タイプが市販されている。このうち、硬性タイプにある程度の外力減衰効果かみられたが、効果のないタイプもあった。④ μ CT を用いて骨梁構造の構造脆弱性を評価した結果、同じ骨粗鬆海綿骨でも荷重の作用方向に依存してせん断挙動とせん断抵抗が大きく異なることがわかった。

分担研究者 岡正典
京都市身障者リハビリセンター
センター長
原田 敦
国立療養所中部病院整形外科
医長
坪山直生
京都大学医療技術短期大学部
教授
速水尚
近畿大学工学部
助教授

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している

B 研究方法

ジャンプスタート式の新しい転倒装置を製作して、自然な転倒状態を再現して転倒メカニズムを解明した。優れた運動能力を持つ 12 人の男性被検者（平均年齢 38 歳）を依頼して、後方、後斜方、側方、前斜方、前方の各方向に転倒させた。そして、この挙動を毎秒 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。

これとは別に、健康成人 25 名（男性 14 例、女性 11 例）、平均年齢 24.8 ± 4.9 歳を被検者に、床反力計に向かって自発的な転倒を行わせ、接地時の衝撃力、股関節屈曲角度および大腿直筋と中殿筋の筋電図を測定した。

ハーチャル人体有限要素モデルとして開発された THUMS (Total Human Model for Safety) を用いて、股関節屈曲、膝伸展位で初速 3m/s で衝撃方向を変化させながら剛壁に衝突させたときの大腿骨頸部及び骨盤における初期打撲節点と、主応力及び主歪みを計算して、衝撃方向による骨折リスク変化を観察した。

前年度開発した μ CT によって骨梁構造の 3 次元変形動態を測定できるシステムを用いて、骨粗鬆海

A 研究目的

前年度に引き続き、高齢社会となった我が国が抱える問題である骨粗鬆症と、それによる大腿骨頸部骨折の予防に関する検討をハイオメカニクスの展開した。

大腿骨頸部骨折の約 90% は転倒が原因で発生すると言われている。そこで、転倒を防止するために、患者にカスタマイズされた運動処方を与えたり、たとえ転倒しても大腿骨頸部骨折に至らないようにする装具、すなわち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ことは重要である。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

綿骨のせん断挙動を検討した。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個体の大腿骨頭主圧縮骨梁群から採取した海綿骨に垂直および45°斜方方向の2種類の方向からせん断荷重を与えて、荷重方向による骨粗鬆および正常海綿骨の変形動態の違いを検索した

(倫理面への配慮)

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 製作した転倒装置によって、各方向への転倒挙動を検討した結果、次のような特徴を認めた
①前方への転倒では、両膝に続いて手と腹部をほぼ同時に接地した。②側方への転倒では、膝伸展位の場合に膝と大転子を同時に接地するが、膝屈曲位になれる時には、両膝に続いて手と大転子を同時に接地した。③後方への転倒では、常に坐骨結節-手-背部の順に接地した。④斜前方への転倒では、片膝に続いて手と大腿外側が同時に接地して、膝と手を使って防御姿勢をとった。⑤斜後方への転倒では、大転子が最初に接地し、防御反応はほとんど見られなかった
- 2 斜後方と側方転倒の一部では大腿外側への衝撃接地を避けきれず、これらが最も危険な転倒といえることができる。しかし、側方転倒でも運動能力のすぐれた被験者は膝を屈曲して大転子より先に膝を接地して衝撃をさけることができた
- 3 転倒時における衝撃力(対体重比)は、男性では側方が平均 4.4 ± 0.6 、後側方が 4.7 ± 0.5 、後方が 6.2 ± 1.3 で、女性では側方が 4.7 ± 0.6 、後側方が 5.1 ± 0.6 、後方が 5.3 ± 0.9 であった
- 4 衝撃時の股関節屈曲角度は男性の側方ハターンでは平均約40°、後側方および後方ハターンでは平均50~65°と側方ハターンが少し小さい値を示した。一方女性では全てのハターンで平均70°前後であった。また、いずれのハターンでも女性の方が屈曲角度が大きい傾向が

みられた

- 5 衝撃時に接地部に生じる応力を有限要素解析した。最大主応力は、坐骨が初期打撲節点である15°と30°の条件では、骨盤と大腿骨頸部では同等であるか、共に低い値であった
- 6 これに対して、大転子部が初期打撲節点である45°以降は大腿骨頸部で急激な上昇が見られ、特に60°や75°の条件では、大腿骨頸部内側で最大値を示したが、90°では代わって骨頭下後下方部で最大値を示した
- 7 各種プロテクター効果の検討では、応力集中部位の変化はほぼ見られなかった。硬性タイプは、大腿骨頸部基部上方の最大主応力や最大主歪みを25%程減少させており、ある程度の外力減衰効果がみられた
- 8 μ CTにより海綿骨に対する荷重の作用方向がせん断抵抗に及ぼす影響を検討した。大腿骨近位の主圧縮骨梁群に対して垂直にせん断力が作用したとき、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
- 9 主圧縮骨梁群に対して45°斜方からせん断力が作用したとき、亀裂が板状骨梁の中を3次元的に進展して海綿骨は破壊した。このような破壊挙動は、垂直方向に剪断力が作用した場合の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

D. 考察

- 1 従来からの転倒の研究は、主として転倒しやすい環境など外的要因と歩行能力などの内的要因を調べたりするFall initiationの研究が殆どであった。これまでヒトが実際に如何に転倒するのかという転倒の経過とメカニズムの核心的な研究は極めて少なかった。転倒挙動を検討した結果、世界で殆ど報告されていなかった、膝を使った防御反応

(Knee action) を明らかにすることかできた

- 2 屈曲した膝を接地することにより大転子への衝撃を避ける反応は、本研究の最も重要な所見であり、頸部骨折予防への新しい運動訓練法の創造に役立つものと思われる Knee action は大転子への衝撃を避ける目的で腹臥位ないしは半側臥位で屈曲した膝により接地する (Soft landing) 防御反応であり、極めて重要な所見と思われる
3. 骨折閾値に関わる衝撃力の大きさそのものは、多くの場合身長や体重、転子果長と相関することかわかった このことは、立位時の身体重心の位置エネルギーが、これらの因子に依存することを考えると容易に理解できる
- 4 衝撃時の股関節屈曲角度は、 $40\sim 70^\circ$ 程度屈曲位をとり、女性の方が大きい傾向があった 内外転に関しては、側方と後側方ハターンでは $10\sim 20^\circ$ 内転位、後方ハターンでは、ほぼ中間位を示すことなどか示唆された
- 5 コンピュータによる転倒シミュレーション解析から、坐骨か初期打撲接点であっても、骨盤骨折と大腿骨頸部骨折のリスクに差はなく、共に低い事が示唆された ところが、大転子部が初期打撲接点となると、大腿骨頸部基部で応力や歪みが上昇し、特に 60° と 75° の条件である大転子部側方へ外力か加わった場合には、大腿骨頸部骨折のリスクが高くなることが予測された。このことから、転倒方向や下肢関節肢位等で決まる外力作用方向は、大腿骨頸部骨折リスクの要因と言える
- 6 仮想ヒッププロテクターの外力減衰効果は硬性タイプで応力を 25% 程減少させた しかし、軟性タイプではほとんど効果かないという結果も得ており、ヒッププロテクターは皆同一の性能ではないという見方を持つ必要かあると考えられた。
- 7 主圧縮骨梁群に垂直にせん断荷重を作用した場合、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、結果的に骨梁の構造の圧密

現象が生じた。試験片は部分的に破壊するだけで、例えば骨粗鬆海綿骨でも骨折は起きにくいものと思われた

- 8 一方、 45° 斜方からせん断荷重か作用した場合、亀裂の進展によるマクロな骨梁構造の破壊とそれによる破片の生成が見られた 生体内ではこのような亀裂の連鎖や破片か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か高い このような連鎖か大腿骨頸部骨折の機序となる可能性か強く示唆された

E 結論

- 1 前方や斜後方など 5 種類の転倒方向について、転倒の仕方と特徴的な防御反応を分析した その結果、斜後方と側方転倒の一部では、大腿外側への衝撃接地を避けきれないことかわかった すなわち、これらか High risk Fall であることを指摘した
- 2 転倒時に接地部位に作用する実際の衝撃力の大きさは $400\sim 450\text{kg}$ 、体重の 7~8 倍程度と推測され、形態因子や筋活動の影響を受けることか示唆された
- 3 バーチャル人体モデルによる転倒シミュレーションでは大腿骨頸部骨折リスクは、大転子部側方へ外力か加わった場合に高くなることか予測された 同モデルによる仮想プロテクター効果の検証では、硬性タイプにある程度の外力減衰効果かみられたか、効果のないタイプもあつた
- 4 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° 斜方の異なつた 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、荷重の作用方向か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つた

F 健康危険情報

認めない

G 研究発表

- 1 論文発表

- 1) Yoshida K Nakamura T Narumiya S et al
Stimulation of bone formation and prevention of bone loss by prostaglandin E EP4 receptor activation Proc Natl Acad Sci U S A 2002 Apr 2 99(7) 4580-5
- 2) Nishimatsu, H Nakamura, T et al The modified Spitzzy shelf operation for patients with dysplasia of the hip A 24-year follow-up study 2002 J Bone Joint Surg Br 84 647-52
- 3) Shimizu M Nakamura T, Hosokawa A et al, Congenic mouse and candidate gene at the Chromosome 13 locus regulating bone density 2002 Mamm Genome 13 335-4
- 4) 坪山直生, 清水基行, 中村孝志, 速水 尚, 岡正典・大腿骨頸部骨折発生機序の調査 Osteoporosis Japan・11, 2003, 印刷中
- 5) 神先秀人, 南角学, 坪山直生, 中村孝志, 島浩人, 岡正典 Computer Graphics による転倒動作の再現と股関節への影響. Osteoporosis Japan・11, 2003, 印刷中
- 6) Tokuda H, Harada A, Hirade K Matsuno H, Ito H Kato K Oiso Y Kozawa O Incadronate amplifies prostaglandin F2 α -induced vascular endothelial growth factor synthesis in osteoblasts Enhancement of MAP kinase activity J Biol Chem, 2003 (in press)
- 7) 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. Osteoporosis Japan 2002, 10 169-171
- 8) 原田敦. ヒッププロテクターによる骨折予防 日本臨床増刊号 骨粗鬆症-最新の成因研究と治療動向 2002 60 605-612
- 9) 原田敦. 装具による骨折予防 骨粗鬆症の予防と治療 長寿科学振興財団 2002 139-145
- 10) 原田敦, 松井康素. 高齢者の転倒と骨折 整形 災害外科 2002 45 715-722
- 11) 原田敦 ヒッププロテクター 転倒しても骨折しない工夫 現代医学 2002, 50 197-201
- 12) 速水尚, 岡正典, 中村孝志, Seebach 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
- 2 学会発表
 - 1) 岡 正典, 島 浩人, 速水 尚, 中村孝志, 神先秀人, 坪山直生, 吉岡照雄 転倒に関する研究 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
 - 2) 南角学, 神先秀人, 坪山直生, 中村孝志. CG による転倒場面の再現と衝撃力 第 57 回日本体力医学会大会. 平成 14 年 9 月 30 日
 - 3) 南角学, 神先秀人, 坪山直生, 中村孝志 転倒動作の CG による再現と股関節への負荷 第 24 回骨 カルニウム代謝研究会 平成 14 年 10 月 25 日
 - 4) 神先秀人, 南角学, 坪山直生, 中村孝志, 島浩人, 岡正典 転倒動作の CG による再現と股関節への影響 第 9 回近畿骨粗鬆症研究会, 平成 15 年 2 月
 - 5) 原田敦 高齢者ヒッププロテクター使用による大腿骨頸部骨折の予防的治療. 第 75 回日本整形外科学会 (シンポジウム) 2002 5 19
 - 6) Harada A Fall mechanics and protection AADO 10th Anniversary 2002 International Symposium 2002 10 6
 - 7) THayami, M Oka, T Nakamura, 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
 - 8) THayami・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
 - 9) 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
 - 10) 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

II. 分担研究報告

厚生科学研究費補助金（効果的医療技術の確立推進臨床研究事業）
分担研究報告書

転倒による骨折リスク解析とヒッププロテクター効果の検討

分担研究者 原田 敦 国立療養所中部病院 整形外科医長

人体有限要素モデルを用いて転倒シミュレーションを施行し、衝撃方向による骨折リスク変化を観察し、次に仮想ヒッププロテクター4種（硬性及び軟性各2種）の効果を検討した。大転子部側方への衝撃により頸部基部の応力及び歪みが高値を示し、大腿骨頸部骨折リスクは大転子部側方へ外力が加わった場合に高くなることか予測された。大転子部側方への衝撃による仮想ヒッププロテクター効果は、硬性タイプでは、大腿骨頸部基部上方の最大主応力及び主歪みをある程度低下させた。実際のヒッププロテクター製品による衝撃試験でも力学的性能に製品間格差がみられた。

A. 研究目的

高齢者の股関節周囲の骨折には、大腿骨頸部骨折や骨盤の恥坐骨骨折などが挙げられるが、中でも大腿骨頸部骨折は、その後の歩行能力などの身体的自立を大きく損なって介護度を悪化させ、QOLを著しく低下させることに加え、治療と介護に必要な経費費用が嵩むなど、重大な医療問題となっている。従って、本骨折の発生メカニズムを解明し、それに基づいていっそう効果的な予防手段を講ずることは高齢化社会の進展を迎えた現在、大変に重要である。

大腿骨頸部骨折の発生機序に関しては転倒の関与が注目されている。多くの疫学調査において、本骨折の発生原因について、強度の低下した骨に転倒荷重が加わって生じる場合がほとんどを占めることが明らかにされている。

しかし、転倒かどのような条件下で本骨折を発生させるのかについては不明の点が多く、なかでも重要と考えられる転倒方向、すなわち荷重方向が大腿骨頸部骨折に及ぼす影響に

ついては、まだ十分に解明はされていない。さらに荷重減衰による大腿骨頸部骨折予防手段として注目されているヒッププロテクターの力学的効果も転倒方向を考慮した詳細な検討はなされていない。そこで本研究では、自動車衝突障害の人体有限要素モデルとして開発された THUMS (Total Human Model for Safety) を用い、転倒方向の及ぼす大腿骨頸部骨折と骨盤骨折のリスクへの影響について検討した。次いでその検討で高リスクと考えられた転倒方向におけるヒッププロテクター効果を同モデルで解析した。さらに国内で実際に販売され、使われ

ているヒッププロテクター製品間の力学的性能を衝撃試験で比較した。

B. 研究方法

豊田中央研究所により自動車衝突安全のためのバーチャル人体有限要素モデルとして開発された THUMS (Total Human Model for Safety) を用いた。サイズは18才から74才までのアメリカ人(母集団)に於ける、平均的な男性で、身長175cm、体重77kgである。また、骨の材料特性は、主に山田ら(京都府立医大)の文献を用い、日本人の20才から40才の特性である。

このモデルを用いて次のような転倒シミュレーションを施行した。すなわち、股関節屈曲、膝伸展位で初速3m/sで衝撃方向を変化させながら剛壁に衝突させたときの大腿骨頸部及び骨盤における初期打撲節点と、主応力及び主歪みの最大及び最小値とその要素を出力し、衝撃方向による骨折リスク変化を観察した。

次ぎに初期打撲節点が大転子部で、大腿骨頸部内側や骨頭下部において最大主応力が上昇した側方転倒(正面から見た荷重方向が45°から90°)の16ケースについて、大転子部を覆う大きさ(縦160mm、横130mm)で厚さ(10mm)で高さ(30mm)の充実型ドーム状構造を持つ仮想ヒッププロテクターを作成した。プロテクターの素材を硬性のレンソ(ヤング率2942Mpa)とポリプロピレン(同1470Mpa)、軟性の低密度ポリエステル(ヤング率127Mpa)とシリコンゲル(同0.37Mpa)の4種類に変化させて大転子部に装着し、リスクの高い方向における転倒シミュレーション

ョンを行い、仮想プロテクターの効果を計算した。

さらに我が国で使われている実際のヒッププロテクターの性能比較のために、現在販売中の3製品と2年前まで販売されていた1製品を付属の下着に入れて、レジ加工したマネキンの大転子部に装着し、正面から見た荷重方向が90°の側方転倒に該当する荷重方向で落錘式衝撃試験器によって、立位からの転倒に相当する衝撃力を加えて荷重を10回ずつ計測し、ヒッププロテクターなしの場合と比較した。

(倫理面への配慮)

本研究はコンピュータシミュレーションと非生体材料の試験が主要内容で倫理的な問題を含まない。

C 研究結果

THUMSによる転倒シミュレーション結果をみると、初期打撲節点は、正面から見た荷重方向を真下(0°)から真横(90°)に準じ15°ずつ変化させると、0°で仙骨下方、15°及び30°で坐骨、45°から90°では、大転子部やや後方から大転子部側方、大転子部やや前方へと順次変化した。

最大主応力は、坐骨が初期打撲節点である15°と30°の条件では、骨盤と大腿骨頸部では同等であるか、共に低い値であった。これに対して、大転子部が初期打撲節点である45°以降は大腿骨頸部で急激な上昇が見られ、特に60°や75°の条件では、大腿骨頸部内側で最大値を示したが、90°では代わって骨頭下後下方部で最大値を示した。最大主歪みは、30°を除くと最大主応力と同様の定性傾向を示した。すなわち、30°の条件では、骨盤より大腿骨頸部で高かったか、その値は高くなかった。

最小主応力と最小主歪みは同様の定性傾向を示し、坐骨が初期打撲節点である15°と30°の条件では、骨盤と大腿骨頸部では同等で共に低い値であったか、大転子部が初期打撲節点である45°以降は大腿骨頸部で急激な上昇が見られた。特に60°や75°の条件では、大腿骨頸部基部上方で最大の値を示した。

次に、各種仮想プロテクター効果の検討では、応力集中部位の変化はほぼ見られなかった。また、本研究の解析から大腿骨頸部骨折のリスクが高い75°の条件の結果をみると、硬性タイプは、大腿骨頸部基部上方の最大主応力や最大主歪みを25%程減少させており、ある程度の外力減衰効果がみられ

た。

ヒッププロテクターの実際の製品の衝撃試験では、ヒッププロテクターなしのコントロールにおける平均大転子荷重は、落錘高50mm、100mm、150mmで、それぞれ3922N、5380N、6312Nであったのに対して、A社硬性製品では862N(コントロールの22%)、1234N(23%)、1611N(26%)、B社硬性製品では684N(17%)、1664N(31%)、2634N(42%)、さらにC社軟性製品では1118N(29%)、2675N(50%)、3485N(55%)、D社軟性製品では1919N(49%)、3188N(59%)、4082N(65%)であった。総じて硬性製品の方が荷重減衰能は優れていた。

D 考察

THUMSを用いた転倒シミュレーションによる解析結果から、坐骨が初期打撲接点であっても、骨盤骨折と大腿骨頸部骨折のリスクに差はなく、共に低い事か示唆された。ところが、大転子部が初期打撲接点となると、大腿骨頸部基部で応力や歪みが上昇し、特に60°と75°の条件である大転子部側方へ外力が加わった場合には、大腿骨頸部骨折のリスクが高くなることが予測された。このことから、転倒方向や下肢関節肢位等で決まる外力作用方向は、大腿骨頸部骨折リスクの要因と言える。さらに側方転倒のうち床面に対して上体が転子部より15°から30°高くなった姿勢での衝突が危険であり、そのような落下における大転子部打撲領域か、ヒッププロテクター等で保護されるべき部位と考えられた。

ただし、これまでに述べた結果は、平均的アメリカ人男性の体格に成人日本人の組織材料特性を使用したモデルのものであり、実際の高齢日本女性とは基礎的条件が異なっているための相違には無視できない部分かあると思われる。我が国の大腿骨頸部骨折発生数は80才代女性が最多であり、今後この層の条件を備えたTHUMSを構築して、その点を検討する必要がある。

THUMSによる解析では、仮想ヒッププロテクターの外力減衰効果は硬性タイプで応力を25%程減少させており、Hayesらによる多種製品を用いた力学試験における一部の製品の結果とほぼ一致していた。しかし、軟性タイプではほとんど効果がないという結果も得ており、ヒッププロテクターは皆同一の性能ではないという見方を持つ必要があると考えられた。

このような差は、素材だけでなく、充実型や中空型などのデザインや厚みを変えることで大きくなると思われた。

仮想ヒッププロテクターの効果に何えた製品間の力学性能格差は、我が国で使用されている4種類の製品比較でいっそう明らかになった。立位転倒で大転子に加わると6300Nを高齢女性の大腿骨頸部骨折閾値とされる3200N以下に減少できたのは、硬性の2製品だけであった。ただし、このような力学的性能差は、そのまま製品の総合評価に直結する訳ではない。一般に力学的性能は受け入れやすさと反比例する傾向があることを忘れてはいけない。最も力学的性能に優れたA社硬性製品が早々と市場撤退した事実は、それを示唆するものかもしれない。いずれにしても、ヒッププロテクターという名称で括られる製品が千差万別であり、そのことを良く知った上で受け入れやすさと力学性能のバランスを考慮しながら、使用を勧める必要があると考えられる。

E. 結論

バーチャル人体モデルによる転倒シミュレーションでは大腿骨頸部骨折リスクは、大転子部側方へ外力が加わった場合に高くなることか予測された。同モデルによる仮想プロテクター効果の検証では、硬性タイプにある程度の外力減衰効果かみられたか、効果のないタイプもあった。実際のヒッププロテクター製品による比較試験でも製品間の力学性能格差が存在した。

F 健康危険情報

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) Tokuda H, Harada A, Hirade K, Matsuno H, Ito H, Kato K, Oiso Y, Kozawa O Incadronate amplifies prostaglandin F₂ α -induced vascular endothelial growth factor synthesis in osteoblasts Enhancement of MAP kinase activity J Biol Chem, 2003, (in press).
- 2) 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 Osteoporosis Japan 2002, 10

169-171

- 3) 原田敦 ヒッププロテクターによる骨折予防 日本臨床増刊号 骨粗鬆症-最新の成因研究と治療動向, 2002, 60 605-612
- 4) 原田敦 装具による骨折予防 骨粗鬆症の予防と治療 長寿科学振興財団 2002, 139-145
- 5) 原田敦、松井康素 高齢者の転倒と骨折 整形 災害外科 2002 45 715-722
- 6) 原田敦 ヒッププロテクター 転倒しても骨折しない工夫 現代医学 2002 50 197-201

2 学会発表

- 1) 原田敦 高齢者ヒッププロテクター使用による大腿骨頸部骨折の予防的治療 第75回日本整形外科学会(シンポジウム) 2002 5 19
- 2) Harada A Fall mechanics and protection AADO 10th Anniversary 2002 International Symposium 2002 10 6

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。

厚生科学研究費補助金（効果的医療技術の確立推進臨床研究事業）
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長

研究要旨 大腿骨頸部骨折の約 90%は転倒が原因で発生すると言われている一方、転倒の 1%にしか頸部骨折は生じないとされる。そのため、最も危険な転倒 (High-risk Fall) とは何かを明らかにしなければならない。本分担研究では、従来の被験者の作為的・意図的動作が混入する転倒実験を改良して、より自然な転倒によって転倒機序を解明することを目的に新しい転倒装置を設計・製作した。本年度はこの装置による転倒実験を本格的に実施して、転倒のパターンを分析した。その結果、これまでに明らかにされてきた手・腕による転倒時防御反応に加えて、膝を使った防御反応が起こることが明らかになった。この事実は、今後転倒予防教室などでの新しい運動プログラムを考えるのに有意義な資料となる。

A 研究目的

大腿骨頸部骨折（以下、頸部骨折）全国的発症数は年間約 9 万例と推定され、年々その数は増加しつつある。頸部骨折の約 90%は転倒が原因で発生すると言われている一方、転倒の 1%にしか頸部骨折は生じないとされ、最も危険な転倒、すなわち High-risk Fall とは何かを明らかにしなければならない。

転倒しやすい要因に関する疫学的な研究は極めて多い。しかし、従来の研究は殆どが Fall initiation の研究であり、ヒトが実際に如何に転倒し、身体のどの部位を衝撃接地し、頸部骨折を生じないためのいかなる防御反応が見られるかという研究、すなわち Fall descent と Impact に関する研究は極めて少ない。そこで、本分担研究では、被験者により自然な転倒を起こさせて、転倒メカニズムと転倒後の防御姿勢に関して分析・解明することを目的とした。

B. 研究方法

図 1 は前年度に製作した転倒実験装置を示す。まず、この装置の安全性を繰り返し検討して、転倒マットの改良など適正な実験が行えるように整備を完了した。また、被験者に対する実験趣旨と安全対策など必要な処置を十分な時間をかけて実施した。

この装置を用いて、被験者を後方、後斜方、側方、前斜方、前方の各方向に転倒させた。本実験では、実験中の骨折の危険を無くすため、優れた運動能力を持つ 12 人の男性被験者（平均年齢 38 歳）を依頼した。転倒挙動は、撮影速度 250 フレーム毎秒の超高速デジタルビデオカメラ 2 台を用いて、被験者の正面ならびに側面より転倒の開始から接地までの全転倒経過（約 0.5 秒）を全て記録した。

被験者には、つま先（左右）、踵（左右）、外

果（左右）、膝関節外側部（左右）、大転子（左右）、上前腸骨棘（左右）、肩峰（左右）、肘関節（左右）、手関節（左右）、頭頂に反射マーカーを取り付けた。そして、3次元DLT法によって各マーカーの3次元座標を算出し、5点微分法により速度を算出した。

（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った。

C 研究結果

転倒誘発装置の台のピーク速度は、 1.509 ± 0.041 m/sで、台の移動開始後 0.545 ± 0.010 sでピーク速度に達していた（平均値±標準偏差）。

図2に前向への転倒挙動を超高速度ビデオで記録した一例を示す。全転倒経過の超高速度ビデオの撮像数は120フレームを超えることもあり、その分析は最初に接地する体の部位、特に下肢外側、大転子に注目して分析した。その結果、前方への転倒では全例で両膝—手—腹部の順に接地し、大腿外側を強打することはなかった。

各方向への転倒挙動をまとめると、次の通りであった。

前方への転倒では、両膝に続いて手と腹部をほぼ同時に接地した。

側方への転倒では、膝伸展位の場合に膝と大転子を同時に接地するが、膝屈曲位になれる時には、両膝に続いて手と大転子を同時に接地した。

後方への転倒では、常に坐骨結節—手—背部の順に接地した。

斜前方への転倒では、片膝に続いて手と大腿外側が同時に接地して、膝と手を使って防御姿勢をとった。

斜後方への転倒では、大転子が最初に接地し、

防御反応はほとんど見られなかった。

図3は2名の被験者を例として、後方への転倒中における大転子部の速度変化を示す。同図に示すように、被験者によって速度変化のパターンは異なった。しかし、接地直前に最大速度を示すことは全例に共通しており、この最大値が衝撃力の大きさの目安となる。また、転倒台の速度変化は、被験者に関わりなく一定の変化パターンと一定の速度値を示しており、不随転倒動作を起こさせる装置として、適当であることを示している。

以上の分析から、防御反応とはすなわち、大腿外側（大転子）を直接または衝撃接地しないための手および膝を使った動作であると言える。前方、後方と斜前方への転倒においては、被験者は手、膝、坐骨結節（尻餅）の接地によって大転子への衝撃を避けていることがわかった。

斜後方と側方転倒の一部では大腿外側への衝撃接地を避けきれず、これらが最も危険な転倒といえることができる。しかし、側方転倒でも運動能力のすぐれた被験者は膝を屈曲して大転子より先に膝を接地して衝撃をさけることができた。

D 考察

従来からの転倒の研究は、主として転倒しやすい環境など外的要因と歩行能力などの内的要因を調べたりするFall initiationの研究が殆どであった。これらの研究ももちろん重要であるか、これまでヒトが実際に如何に転倒するのかという転倒の経過とメカニズムの核心的な研究は極めて少なかった。

Hsiaoら（J Biomech, Vol 31 1998）は頸部骨折を生じないための防御反応動作の分析に力を注ぎ、手を使った防御（Wrist action）の重要性を強調した。

本研究でも、手を使った防御反応の重要なことを確認したか、世界で殆ど報告されていないか

った、膝を使った防御反応 (Knee action) を明らかにすることができた。屈曲した膝を接地することにより大転子への衝撃を避ける反応は、本研究の最も重要な所見であり、頸部骨折予防への新しい運動訓練法の創造に役立つものと思われる。Knee action は大転子への衝撃を避ける目的で腹臥位ないしは半側臥位で屈曲した膝により接地する (Soft landing) 防御反応であり、極めて重要な所見と思われる。

E 結論

本論文では、骨粗鬆症を原因とする頸部骨折を防止する方策を検討する研究の一環として、High-Risk-Fall とは何かを明らかにしようと試みた。その結果、次の知見を得た。

- (1) 前方や斜後方など5種類の転倒方向について、転倒の仕方と特徴的な防御反応を分析した。その結果、斜後方と側方転倒の一部では、大腿外側への衝撃接地を避けきれなかったことがわかった。すなわち、これらが High-risk Fall であることを指摘した。
- (2) 転倒時に膝を使った防御反応が起きることを明らかにした。すなわち、膝を屈曲させて接地することにより、大転子への衝撃を避ける反応が起きることを指摘した。この反応はこれまで指摘されておらず、頸部骨折予防への新しい運動訓練法の創造に役立つと思われる。

(3)

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, 島 浩人, 速水 尚, 中村孝志, 神先秀人, 坪山直生, 吉岡照雄. 転倒の研究. 日本臨床バイオメカニクス学会誌・24, 投稿中・2003

2 学会発表

- 1) 岡 正典, 島 浩人, 速水 尚, 中村孝志, 神先秀人, 坪山直生, 吉岡照雄. 転倒に関する研究・第 29 回日本臨床ハイオメカニクス学会・千葉・平成 14 年 9 月 29 日
- 2) 神先秀人, 南角学, 坪山直生, 中村孝志, 島浩人, 岡正典・転倒動作の CG による再現と股関節への影響・第 9 回近畿骨粗鬆症研究会 平成 15 年 2 月

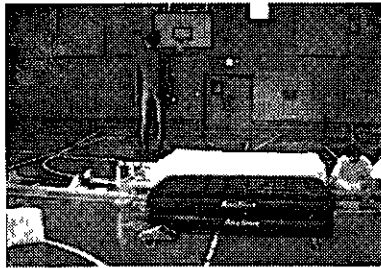
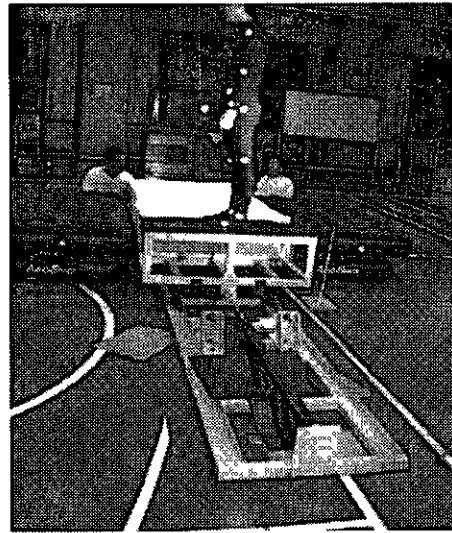
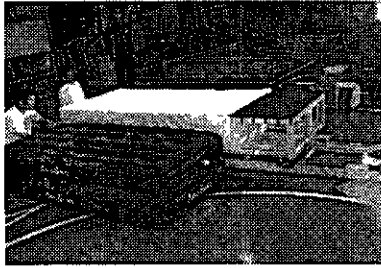


図1 転倒装置

被験者が立つ台を強いスプリングによって突然滑走させるシャンプスタート機構を備えており、被験者を厚さ 30cm の衝撃吸収マットの上に自然に近い状態で転倒させることかてきる

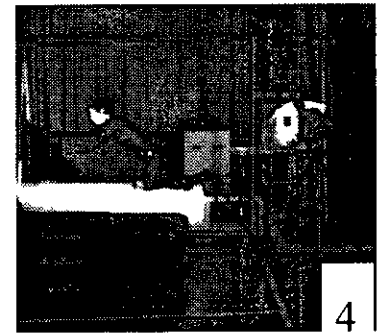
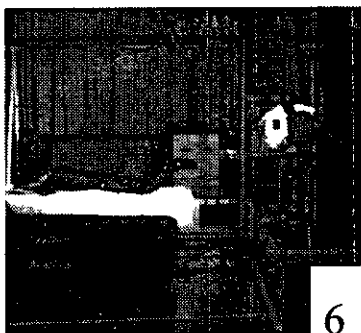
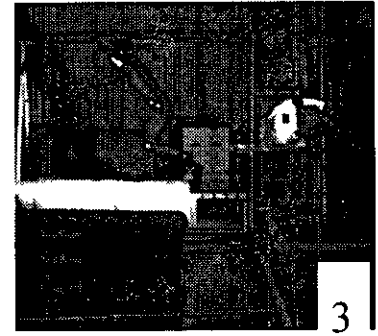
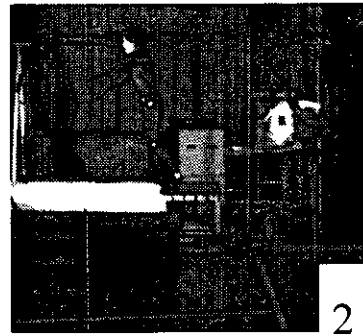
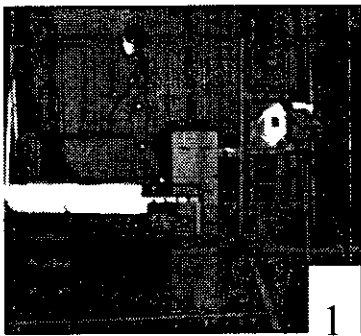


図2 超高速ヒテオカメラによる前方への転倒挙動の撮影例

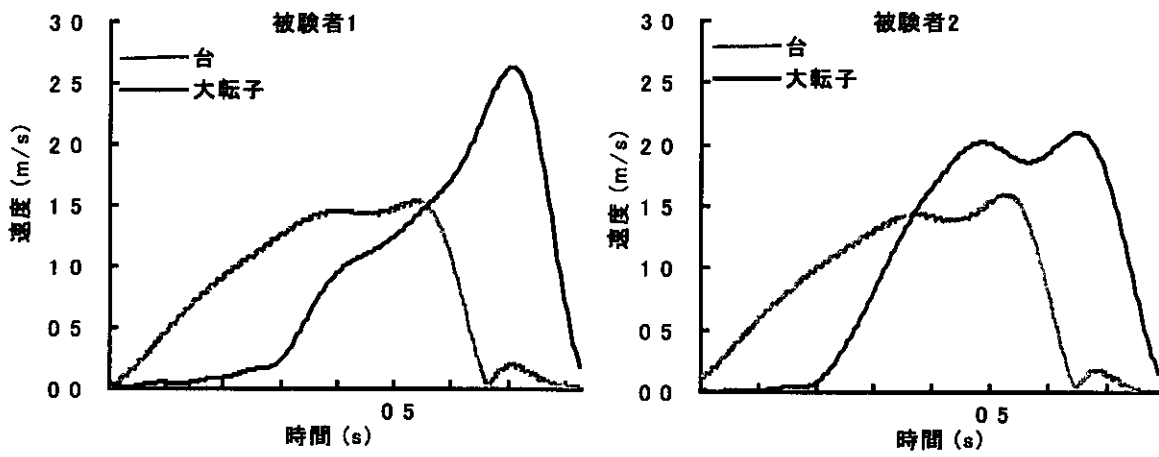


図 3 後方への転倒動作中における転倒台と大転子の速度変化 転倒台の移動開始時を時刻0とした

転倒場面の運動および力学的解析

分担研究者	坪山直生	京都大学医療技術短期大学部教授
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
研究協力者	南角 学	京都大学医学部附属病院理学療法部技官

健康成人 25 例を対象に転倒実験を施行し、衝撃力の大きさやそれに関わる因子、衝撃時の股関節の運動方向、筋活動に関して検討した。実験方法は 3 次元動作解析装置、床反力計、筋電計、電気角度計を用い、側方、後側方、後方の 3 方向への自発的な転倒を試行させた。各転倒における衝撃期の最大床反力値を測定するとともに、体表面上に貼りつけた 28 点のマーカの空間座標から衝撃時の股関節の運動位置を算出した。衝撃力の大きさは後方転倒が最も高い値を示し、続いて後側方、側方の順であった。しかし、コンピュータグラフィックスによる観察から後方転倒では大腿骨大転子部位を強打しないことが確認された。最もリスクの高い転倒方向は、衝撃力の大きさ、衝撃部位、転倒時の大転子マーカの速度から後側方への転倒であると推測された。実際の衝撃力の大きさは予則式から 400~450kg、体重の 7~8 倍程度と推測され、形態因子や筋活動の影響を受けることが示唆された。

A 研究目的

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ことを目的に、昨年度は 10 名の健康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)の作成を試みた。本年度は、昨年度のデータにさらに 15 名のデータを加えて、衝撃力の大きさや転倒方向による違い、衝撃時の股関節の運動位置に関して詳細な検討を加えた。また、転倒時に膝伸筋群が衝撃力を弱める防御機構として作用することや中殿筋を始めとする股関節周囲筋の筋活動が股関節負荷へ影響を及ぼす可能性が考えられたことから、本年度の 7 名に関しては転倒時の筋活動を測定し、転倒方向との関連や衝撃力への影響を検討した。

B 研究方法

1) 衝撃力および衝撃期の股関節角度の測定
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健康成人 25

名（男性 14 例、女性 11 例）である。男性の年齢は 20 歳から 33 歳で平均年齢は 24.8 ± 4.9 歳であった。体重と身長はそれぞれ、平均 62.8 ± 7.0 kg、 170.0 ± 5.5 cm であった。女性 11 例の年齢は 20 歳から 27 歳、平均年齢は 22.8 ± 2.4 歳であり、体重、身長の平均は 52.1 ± 5.1 kg と 159.8 ± 5.9 cm であった。

被験者に 28 点の反射マーカを付け、床反力計(BERTEC 社製)上に敷いた厚さ 13cm のマットに向かって自発的な転倒を行わせた。転倒方向は側方、45° 後側方、後方の 3 通りのハターンで、フォースプレート上に張り付けたテープにより転倒の方向付けを行った。また、後方ハターンでは一方の下肢を半歩前方へ踏み出した位置から転倒動作を開始させた。

衝撃力は「転倒時の床反力垂直成分最大値」と定義付け、全例の各々 3 回の試行を分析対象とした。そして、対体重比を求めて転倒方向による差について検討した。

衝撃部位および衝撃期の股関節角度の測定は14例(男性9例, 女性5例)を対象とし, 転倒過程及び衝撃直後までの運動を4台のCCDカメラで構成される三次元動作解析装置(住友金属社製 GATAL-ITS-60)にて測定した。28点のマーカー位置とZatsiorskyの方法に基づく人体計測値からCGによる人体モデルを作成し(図1), 転倒運動を再現させるとともにマーカーの空間座標から衝撃時の股関節の運動位置を算出した(図2)。サンプリング周波数は床反力データが240Hz, 三次元解析データが60Hzである。

2) 転倒時の筋活動

転倒時の筋活動に関しては7名(男性5名, 女性2名)を対象とした。転倒動作時の筋電図ならびに股関節屈曲角度の測定にはBiometrics社製のData LINK(DLK800)を用いた。測定筋は右側の大腿直筋, 中殿筋の2筋とし, 筋電図の導出部位は大腿直筋が下前腸骨棘と膝蓋骨上縁を結ぶ線の中央, 中殿筋が腸骨稜と大転子の中央であり, 各筋の筋線維の走行に並行に電極を貼り付けた。また, 筋電計と同期させて電気角度計を用いて転倒動作における右側の股関節運動の経時的変化を測定した(図3)。

データ分析は, 転倒動作における筋収縮が開始した時点から最大股関節屈曲位までの筋活動を50msec毎の二乗平均平方根(Root Mean Square)により平滑化しサンプリングデータの平均値(以下, RFEMGとする)を求めた。3秒間の最大等尺性収縮を100%として振幅を正規化しそれぞれの%RFEMGを算出した。統計処理には転倒方向と個人差による影響を検討するために二元配置分散分析を用いた。また, 筋活動による転倒時の衝撃力の影響を検討するために転倒動作時の%RFEMGと垂直方向の最大床反力を体重にて除した値との相関係数を求めた。

3) 転倒時衝撃力の予測実験

被験者4名(男女各2例)に, 20cm, 30cm,

40cmの台から転倒実験で使用する床反力計上に敷いた13cmのマットに向かって飛び降り動作を行わせ(図4), 床反力計に直接飛び降りた時との相関を求めた。飛び降り方法が一定になるように, 1) 裸足で飛び降りる, 2) 台から50cm先のマーカーを目標に飛び降り両踵から着地する, 3) 着地後の膝深屈曲を許すことを実験条件とした。各台からの飛び降り動作は各3回試行させ, 床反力垂直分力最大値の平均値を用いて相関および回帰式を導出した。

研究結果

1) 衝撃力および衝撃部位および衝撃期の股関節角度

転倒時における衝撃力(対体重比)は, 男性では側方か平均 44 ± 0.6 , 後側方か 47 ± 0.5 , 後方か 62 ± 1.3 で, 女性では側方か 47 ± 0.6 , 後側方か 51 ± 0.6 , 後方か 53 ± 0.9 であった。男女とも後方転倒が最も高い値を示し, 続いて後側方, 側方の順であった(図5)。統計学的には, 男性では後方転倒か他の方向より高い値を($p < 0.0005$)示し, 女性では側方転倒が他の方向より低い値($p < 0.0005$)を示した。また, 衝撃力(垂直床反力最大値)と形態因子の関係については, 男性では側方転倒時に身長および転子果長と, 後側方転倒時に体重と有意な相関を示し, 女性では全ての方向で体重, 身長, 転子果長と有意な相関を示した(図6)。

衝撃時の接触部位に関してはCGと4台のCCDカメラの映像を用いて観察を行った。側方ハターンと後側方ハターンでは, ほぼ全例が大転子部から接地していたが, 後方ハターンでは, 1例を除き, 大転子からの接地は認められず両殿部で接地していた(図7, 8)。

転倒時の大転子マーカーの最大速度は, 側方ハターンが 2.12 ± 0.2 , 後側方か 2.27 ± 0.28 , 後方か 2.0 ± 0.27 m/secと, 後側方ハターンか他のハターンと比較して有意($p < 0.01$)に高

い値を示した(図9)

衝撃時の股関節屈曲角度に関しては「三次元上で肩峰と大腿骨大転子を結ぶ線と大転子および膝外側上顆を結ぶ直線のなす角度」と定義し、それぞれの三次元座標から算出した男性の側方ハターンでは平均が約40°、後側方および後方ハターンで平均50~65°と側方パターンが少し小さい値を示した。一方女性では全てのハターンで平均70°前後とほぼ類似した値を示した。また、いずれのパターンでも女性の方が屈曲角度の大きい傾向がみられた(図10)

股関節内外転角度に関しては、「三次元上で左右の上前腸骨棘を結んだ線と、大転子と膝外側上顆結んだ線のなす角度から90°を引いた角度」を求めた。側方、後側方ハターンにおいては10~20°程度内転していたが、後方パターンでは中間位、または軽度外転位をとっていた(図11)

股関節内外旋は、「左右の上前腸骨棘を結んだ直線と、外側上顆と内側上顆を結んだ直線のなす角度から内転角を引いた角度」を算出した。平均値をみると男性の方が外旋傾向が強く全てのハターンで20°程度外旋位をとり、女性では側方で約15°、後側方で0°となったか、個人差が大きく、計測上の誤差も大きかった(図12)。

膝関節屈曲角は、後側方ハターンでは男女とも平均約40°と同様の値を示したか、側方ハターンでは女性が平均30°、男性が平均50°と比較的大きな差がみられた(図13)

2) 転倒時の筋活動

大腿直筋の%RFEMGは側方で20.0±9.6、後側方で20.7±10.1、後方で27.1±20.0であった。中殿筋の%RFEMGは側方で24.9±8.6、後側方で22.5±10.5、後方で20.1±9.1であった。転倒動作時の筋活動量は分散分析の結果、個人による差は有意に認められたか、各転倒方向による有意差は認められなかった。筋活動と衝撃力(対体重比)の相関関係について

は、大腿直筋で側方 $r=0.50$ ($p<0.05$)、後側方 $r=0.67$ ($p<0.001$)、後方 $r=-0.04$ 、中殿筋で側方 $r=0.51$ ($p<0.05$)、後側方 $r=0.49$ ($p<0.05$)、後方 $r=0.30$ であった(図14)

3) 転倒時衝撃力の予測

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値は0.747と高い相関を示した。対数近似にて得られた回帰式 $Y=239.51\text{Log}_{10}(X)-901.92$ ($R^2=0.63$, 図15)により、転倒時の実際の衝撃力を予測したところ、側方では男性が440.6kg、女性が417.3kg、後側方ではそれぞれ454.9kg、437.0kgであり、対体重比で7~8倍の値を示した(図16)

C 考察

今回の自発的(意図的)転倒実験により、転倒時の衝撃力の大きさに関して、後方、後側方、側方ハターンの順により大きな衝撃力が加わることか示唆された。しかし、転倒時の接触部位の観察から、最も大きな衝撃力がみられた後方転倒では大転子部位を直撃する可能性は非常に少ないということかわかった。また、骨折閾値に関わる衝撃力の大きさそのものは、多くの場合身長や体重、転子果長と相関することがわかった。このことは、立位時の身体重心の位置エネルギーか、これらの因子に依存することを考えると容易に理解できる。

転倒時の大転子マーカの最大速度は、後側方ハターンか最も速かった。

衝撃時の股関節の角度に関しては、測定上の限界や運動学的な定義上の問題、さらに個人差が大きいことなどにより正確な判断は困難であるが、今回の実験から衝撃時の股関節屈曲角度は、40~70°程度屈曲位をとり、女性の方が大きい傾向があること、内外転に関しては、側方と後側方ハターンでは10~20°内転位、後方ハターンでは、ほぼ中間位を示すことなどか示唆された。

転倒動作時における筋活動は転倒方向による有意な差は見られなかったが、側方では中殿筋の活動量が大きく、後方では大腿直筋の活動量が大きくなる傾向を示した。転倒動作時の筋活動と衝撃力の関係については、側方と後側方では、筋活動が大きいほど有意に衝撃力は大きくなるという相関関係が明らかになった。Van den Kroonenbergらは、側方からの自発的な転倒動作においては筋が活動しているときよりも筋肉がリラックスした状態のほうが股関節の衝撃速度は小さくなると報告しており、今回の結果と合致する。筋活動が衝撃力を増す直接の要因である可能性もあるが、転倒中の落下速度が大きいことによる生体反応として筋活動が高まり、結果として衝撃力との間に相関がみられたとの解釈も可能である。転倒時の筋活動と衝撃力の間に何らかの関係があることは明らかであり、さらに詳細な分析が必要である。

D 結論

床反力計および3次元動作解析装置、筋電図を使用して転倒動作の運動および力学的分析を行なった結果、以下の2点が示唆された。

- 1) 転倒時の衝撃力の大きさ、衝撃部位、大転子マーカーの速度から判断して、最もリスクの高い転倒方向は後側方への転倒であると推測された
- 2) 実際の衝撃力の大きさは400~450kg、体重の7~8倍程度と推測され、形態因子や筋活動の影響を受けることが示唆された

E 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35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か、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) 坪山直生, 清水基行, 中村孝志, 速水尚, 岡正典, 大腿骨頸部骨折発生機序の調査. *Osteoporosis Japan* vol 11(3), 2003 掲載予定
- 2) 神先秀人, 南角学, 坪山直生, 中村孝志, 島浩人, 岡正典. *Computer Graphics* による転倒動作の再現と股関節への影響. *Osteoporosis Japan* vol 11(3), 2003 掲載予定

2. 学会発表

- 1) 南角学, 神先秀人, 坪山直生, 中村孝志. CGによる転倒場面の再現と衝撃力. 第57回日本体力医学会大会. 平成14年9月30日
- 2) 南角学, 神先秀人, 坪山直生, 中村孝志. 転倒動作のCGによる再現と股関節への負荷. 第24回骨カルシウム代謝研究会. 平成14年10月25日
- 3) 神先秀人, 南角学, 坪山直生, 中村孝志, 島浩人, 岡正典. 転倒動作のCGによる再現と股関節への影響. 第9回近畿骨粗鬆症研究会, 平成15年2月