

大腿骨骨頸部転倒骨折の有限要素解析とヒップパッドの 効果予測に関する研究

学位論文内容の要旨

高齢者は骨粗鬆症によって骨強度が低下すると、軽微な外力でも骨折の危険性が高くなる。大腿骨頸部骨折を引き起こすと歩行不能になり、長期の臥床を強いられ、高齢者の場合はそのまま寝たきりとなる可能性が高い。また、大腿骨頸部骨折の治療にかかる医療費は手術・入院費を含めて一人 80～200 万かかるといわれており、経済的負担も大きい。現在、高齢化が急速に進む我が国では、大腿骨頸部骨折の患者数が年々急激に増加しており、大腿骨頸部骨折の効果的な予防策が早急に求められている。

大腿骨頸部骨折の予防を行うにはまず骨折の危険因子を明確にする必要がある。近年、臨床用 X 線 CT 画像から作成した骨構造の有限要素モデルによる力学シミュレーションから骨折の危険性を予測する研究が多く行われるようになった。骨構造は層板構造の皮質骨と網目構造の海綿骨に分けられ、両者の力学的性質は異なるため、分離してモデル化する必要がある。特に、海綿骨に比べて弾性率の高い皮質骨の形状は骨構造の応力解析に大きく影響する。しかし、これまでの研究では皮質骨領域を明確に決定し、解析を行った例はない。そこで、本研究ではまず CT 画像から皮質骨領域を決定する手法を開発した。本手法をウシ大腿骨の CT 画像に適用し、実際の骨断面と皮質骨厚を比較した結果、平均 1 ピクセル以内の誤差で皮質骨領域を決定できた。さらに本手法を用いて 20 代健常者 3 名のヒト大腿骨近位部の有限要素モデルを作成し、大腿骨頸部骨折の危険性の高い転倒時と日常的な荷重状態である立位時の応力状態を比較した。その結果、転倒時と立位時で負荷荷重を一定にしても転倒時の相当応力の平均値は立位時よりも 2～2.5 倍高くなった。このことから、大腿骨は日常的に骨頭部から受ける力には構造的に強く、一方で転倒時に大転子部から受ける力には構造的に弱い。ため、転倒骨折防止には大転子部にかかる力を低減する必要があることが示された。

大腿骨頸部骨折の予防法には現在、筋力トレーニングなどの運動療法や骨塩量の低下を防ぐ薬物療法、直接外力を低減するヒップパッドの装着などがある。特に、骨粗鬆症患者の骨折防止には転倒時に大転子部にかかる衝撃外力を分散吸収するヒップパッドが有効とされる。そのためには、24 時間の装着が望ましく、装着感の良さ悪しが装着率の重要因子となる。そこで、著者らの研究グループでは高い衝撃緩和効果と装着感の良さを兼ね備えた新たなヒップパッド(エアセル状ヒップパッド)を

開発した。このヒップパッドはセル内の空気とスポンジで衝撃を吸収するため、比較的高い衝撃緩和効果が期待できる。また、横臥時にヒップパッド上に体重をあずけると、セル内部の空気が抜けて潰れる構造のため、就寝時の装着違和感が改善される。本研究ではエアセル状ヒップパッドの衝撃緩和効果と骨折防止効果を重り落下式の衝撃試験によって確認した。骨折防止効果の確認にはヒト大腿骨標本を用いた。衝撃試験の結果から、エアセル状ヒップパッドは平均衝撃荷重を 50~70 % 低減し、特に衝撃エネルギーが低いほどその効果が高くなることがわかった。また、ヒト大腿骨を用いた衝撃試験から、骨折はヒップパッドのなしの場合で発生し、ヒップパッドの骨折防止効果が確認できた。本論文は全 6 章から構成されており、各章の概要は以下の通りである。

第 1 章では、本論文の総括的な序論として、研究の背景および目的について述べる。

第 2 章では、まず、大腿骨の形態的特長および各部の名称を解剖学に基づいて説明する。さらに、大腿骨頸部骨折の現状として、その発生原因、治療法、予防法について示す。

第 3 章では、骨構造の有限要素モデリングに必要となる臨床用 CT 画像からの皮質骨領域決定法について述べる。さらに、本手法を抽出したウシ大腿骨の CT 画像に適用し、実際に切り出した骨断面と皮質骨厚を比較した結果から、本手法の有効性について述べる。

第 4 章では、ヒト大腿骨の有限要素モデリングと転倒骨折の有限要素解析について述べる。そのためにも、第 3 章で示した皮質骨領域決定法を生体内のヒト大腿骨の CT 画像データに適用するための問題点と改善方法を示す。さらに本手法とボクセルメッシュ法からヒト大腿骨の有限要素モデルを作成する方法を示す。また、骨折の危険性の高い転倒時と日常動作である立位時を想定した解析結果から、転倒骨折の危険因子を明らかにし、骨折防止に必要な要素を考察する。

第 5 章では、転倒骨折の防止に有効であるヒップパッドの効果予測について述べる。そのためにも、現在市販されているヒップパッドと本研究グループで新たに開発したエアセル状ヒップパッドの構造や特性について説明する。さらに、ヒップパッドの衝撃緩和効果および骨折防止効果を実験的に調べ、エアセル状ヒップパッドの有効性について考察する。

第 6 章は、本研究で得られた成果を総括するとともに、今後の課題と展望を示し結論とする。

以上より、本研究では CT 画像から皮質骨領域を決定する方法を示し、ヒト大腿骨近位部の有限要素モデルを作成した。さらに、大腿骨の応力解析から転倒時の骨折の危険因子を示した。また、大腿骨頸部骨折の効果的な予防策として新たに開発したエアセル状ヒップパッドの骨折防止効果を重り落下式衝撃試験から確認した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 但 野 茂
副 査 教 授 池 川 昌 弘
副 査 教 授 小 林 幸 徳
副 査 教 授 山 本 克 之 (情報科学研究科)

学位論文題名

大腿骨骨頸部転倒骨折の有限要素解析とヒップパッドの 効果予測に関する研究

高齢者は骨粗鬆症によって骨強度が低下すると、軽微な外力でも骨折の危険性が高くなる。大腿骨頸部骨折を引き起こすと、歩行不能になり、長期の臥床を強いられる。高齢者の場合はそのまま寝たきりとなる可能性が高い。また、大腿骨頸部骨折の治療にかかる医療費は手術・入院費を含めて一人 80-200 万円前後かかるといわれており、経済的負担も大きい。高齢化が急速に進むわが国では、大腿骨頸部骨折の高齢者患者数が急激に増加しており、大腿骨頸部骨折の効果的な予防策が早急に求められている。

大腿骨頸部骨折の予防をバイオメカニクスのとらえるには、まず骨折の危険因子を明確にする必要がある。近年、臨床用 X 線 CT 画像から作成した骨構造の有限要素モデルによる力学シミュレーションから骨折の危険性を予測する研究が多く行われるようになった。骨構造は層板構造の皮質骨と網目構造の海綿骨に分けられる。両者の力学的性質が大きく異なるため、それらを精度よく分離してモデル化する必要がある。特に、海綿骨に比べて弾性率が高いため、皮質骨の形状は骨構造全体の応力解析に大きく影響する。しかし、これまでの研究では皮質骨領域を精度良く抽出し解析を行った例はほとんどない。そこで、本研究ではまず CT 画像から皮質骨領域を決定する手法を開発した。本手法をウシ大腿骨の CT 画像に適用し、実際の骨断面と皮質骨厚を比較した結果、平均 1 ピクセル以内の誤差で皮質骨領域を決定できた。さらに本手法を用いて 20 代健常者 3 名のヒト大腿骨近位部の有限要素モデルを作成し、大腿骨頸部骨折の危険性の高い転倒時と日常的な荷重状態である立位時の応力状態を比較した。その結果、転倒時と立位時で負荷荷重を一定にしても転倒時の相当応力の平均値は立位時よりも 2~2.5 倍高くなった。このことから、大腿骨は日常的に骨頭部から受ける力には構造的に強く、一方で転倒時に大転子部から受ける力には構造的に弱いため、転倒骨折防止には大転子部にかかる力を低減する必要があることが示された。

大腿骨頸部骨折の臨床的予防法には現在、筋力トレーニングなどの運動療法や骨塩量の低下を防ぐ薬物療法、直接外力を低減するヒップパッドの装着などが用いられている。特に骨粗鬆症患者の骨折防止には、転倒時に大転子部にかかる衝撃外力を分散吸収するヒップパッドが有効とされる。そのためには 24 時間の装着が望ましく、装着感の良し悪しが装着率の重要因子となる。そこで、

著者らの研究グループでは高い衝撃緩和効果と装着感の良さを兼ね備えた新たなヒップパッド(エアセル状ヒップパッド)を開発した。このヒップパッドはセル内の空気とスポンジで衝撃を吸収するため、比較的高い衝撃緩和効果が期待できる。また、横臥時にヒップパッド上に体重をあずけると、セル内部の空気が抜けて潰れる構造のため、就寝時の装着違和感が改善される。本研究ではエアセル状ヒップパッドの衝撃緩和効果と骨折防止効果を重り落下式の衝撃試験によって確認した。骨折防止効果の確認にはヒト大腿骨標本を用いた。衝撃試験の結果から、エアセル状ヒップパッドは平均衝撃荷重を50-70パーセント低減し、特に衝撃エネルギーが低いほどその効果が高くなることがわかった。また、ヒト大腿骨を用いた衝撃試験から、骨折はヒップパッドのなしの場合で発生し、ヒップパッドの骨折防止効果が確認できた。

これを要するに、著者はCT画像から皮質骨領域を決定する方法を示すとともに、ヒト大腿骨近位部の有限要素モデルを作成し精度の良い応力解析が実現された。大腿骨の応力解析から転倒時の骨折の危険因子が整理された。さらに、新たに開発されたエアセル状ヒップパッドが大腿骨頸部骨折防止に有効であることを転倒を想定した衝撃試験によって確認した。これらの成果は、医療福祉工学や人間機械システムデザイン学の発展に寄与するところ大である。よって、著者は北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格があるもとの認める。