

学位の審査結果の要旨

申請者氏名 池 裕之

横浜市立大学運動器病態学専攻

審査員

主査 横浜市立大学大学院医学研究科 井上 登美夫 教授

副査 横浜市立大学大学院医学研究科 青木 一郎 教授

副査 横浜市立大学大学院医学研究科 横田 俊平 教授

学位論文名： Comparison between mechanical stress and bone mineral density in the femur after total hip arthroplasty by using subject-specific finite element analyses

(人工股関節置換術後の大腿骨における患者個別有限要素解析を用いたメカニカルストレスと骨密度の比較)

本論文は、人工股関節全置換術後の大腿骨における骨密度低下に着目し、力学的環境の変化と関連する骨リモデリングを、DEXA 法により測定した骨密度と有限要素解析による相当応力およびひずみエネルギー密度を比較検討することによって検討している。その結果、人工股関節全置換術後に相当応力およびひずみエネルギー密度が大腿骨近位部において低下しており、骨密度低下と相当応力変化との間に有意な相関関係を認めた。今後、これらの骨リモデリングにおける作用をさらに解明していくことにより、骨リモデリング制御機構の解明に繋がると考えられた。

審査にあたり以上のような論文内容の説明が行われた後、以下のような質疑応答が行われた。

まず横田俊平副査より以下の質問がなされた。

1. ステムの形状や挿入位置は術後の骨折部位と関連するのか？
2. 本研究の結果をふまえて、どのような対処により骨密度低下の軽減が可能となるのか。
3. ステムを中空状にすることにより骨にかかる応力は変化するのか？

以上の質問に対し、以下の回答がなされた。

1. ステムの形状、挿入位置によって、固定される部位が異なるため、転倒などによって力がかかる部位や方向が異なり、骨折部位も変わってくると考えられる。
2. 大腿骨近位への生理的な荷重伝達を目的としてショートステムや表面置換型人工股関節全置換術が開発されている。しかしながら、ショートステムでは内反位、外反位設置になる可能性、初期固定性が低下する可能性がある。また、表面置換型人工股関節全置換術では金属イオンの問題がある。将来的には、有限要素解析によって応力遮蔽が低減されるようなステムの開発ができればと考えている。
3. ステムの弾性率を低下させることを目的として、スロット形状としてステム遠位を中空状にすることはある。ステムの弾性率が低下することで、大腿骨への応力伝達は変化すると考えられる。

次に、青木一郎副査より以下の質問がなされた。

1. 応力とひずみエネルギーの違いは？
2. 大腿骨にはどのような方向で力がかかっているのか？
3. 本研究の荷重拘束条件と実際に大腿骨にかかる力は同じなのか？
4. 研究1では相当応力とひずみエネルギー密度を検討しているが研究2, 3でひずみエネルギー密度を測定していない理由はなぜか？

以上の質問に対し、以下の回答がなされた。

1. 応力は単位面積あたりの内力であり、ひずみは単位長さあたりの変位量である。また、ひずみエネルギー密度は単位体積あたりに蓄えられるひずみエネルギーである。
2. 本研究では大腿骨遠位を完全拘束とし、大腿骨軸の15°近位内側より骨頭部に2400Nの圧縮荷重を、大腿骨軸の20°遠位外側より大転子部に1200Nの引張り荷重を作用させている。この条件は片脚立位を想定している。歩行時には経時的に荷重方向、力の大きさが変化するが、本研究では歩行時における検討はしていない。
3. 体内に挿入したステムを用いて股関節にかかる力を計測した文献を基に設定している。症例により体重等が異なるので、今後は症例ごとに荷重拘束条件を検討したい。
4. 研究1では相当応力とひずみエネルギー密度のどちらが骨密度変化と相関するかを検討し、相当応力において有意な相関関係を認めた。この結果を基に、研究2, 3では相当応力について検討した。

最後に、主査として以下の質問を行った。

1. 研究1, 2, 3と分かれているが、網羅的に行ったのか？
2. 研究の対象疾患を変形性関節症に限定した理由は？
3. CT画像から有限要素解析を行っているが、CTでのボクセルと有限要素モデルの形状はどのようにしているか？
4. 症例によって相当応力分布が異なっているように見えるが、なぜか？
5. 応力の計測はどのようにしているのか？
6. 研究3の結果からSL PLUSスタンダードシステムの方が良いと考えるのか？

以上の質問に対し、以下の回答がなされた。

1. 研究 1 では相当応力とひずみエネルギー密度のどちらが骨密度変化と相関するかを検討し、相当応力において有意な相関関係を認めた。その結果を基にして、研究 2 では大腿骨における相当応力の経時的変化を、研究 3 ではステムのデザイン変更における相当応力の変化について検討した。
2. 人工股関節全置換術の原疾患として変形性股関節症が多いこと、また患者背景をできる限り揃えるために、変形性股関節症を対象疾患とした。
3. ボクセルデータを要素として骨の形状とするのではなく、CT 画像より骨の輪郭を抽出し 3 次元モデルを構築してから四面体によるメッシュ分割を行った。
4. 結果ではステム前後面に対して平行な中央部断面像を表示している。荷重もステム頸部と平行になる方向で設定しているが、症例により大腿骨においてらせん状に力が伝達していることがある。しかしながら、大腿骨近位において相当応力が低下するという結果は共通している。
5. Gruen の zone ごとに大腿骨 7 ヲ所において半径 3mm の球に収まる要素を抽出し、相当応力平均値およびひずみエネルギー密度平均値を測定した。
6. SL-PLUS ステムでは大腿骨近位外側において骨密度が保たれており、この点においては MIA ステムより良好な結果である。近位外側部分の形状変更は大転子部の骨温存および術中骨折のリスク低減を目的としており、術中操作性は MIA ステムにおいて向上している。臨床評価、X 線評価も行っているが、現時点において MIA ステムは SL-PLUS ステムと同等の成績であると考えている。

その他幾つかの本研究に関する質問がなされたが、いずれにおいても適切な回答がなされた。

以上の審査の結果、本研究は人工股関節全置換術後における骨密度低下と相当応力の低下の関連性を示したものであり、今後の骨リモデリング制御機構の解明の一助となるものと思われた。また、申請者は本学位論文の内容を中心に幅広い質問に的確に回答し、この課題について深い理解と洞察力を持っていると判断した。以上より本研究は博士（医学）の学位に値するものと判定された。