

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：22701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25462378

研究課題名(和文) 骨密度と筋力を考慮した有限要素法解析による変形性股関節症の進行予測と術後評価

研究課題名(英文) Evaluation of disease progression and surgical effect for hip osteoarthritis using finite element analysis with consideration of muscle activity and bone mineral density

研究代表者

稲葉 裕 (INABA, Yutaka)

横浜市立大学・附属病院・准教授

研究者番号：40336574

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、VICON MXを用いた歩行・動作解析より得られたC3Dファイルデータを筋・骨格モデルシミュレーションソフトウェアであるAnyBody Modeling Systemに取り込む手法の開発を行った。これにより、歩行中の筋肉活動を評価できるようになった。まず健康ボランティアに対する検査で歩行中の筋活動評価の有用性について確認した。その後の変形性股関節症患者に対する検討では、患側の中殿筋の歩行中の筋活動は著明に低下し、その低下を代償するように小殿筋の筋活動が上昇しており、変形性股関節症患者の病態に応じた筋活動評価が可能であることが示唆された。

研究成果の概要(英文)：In this study, we measured the gait motion of healthy subjects and hip osteoarthritis patients with markers attached to their whole body using a motion capture system and developed patient-specific musculoskeletal models using the AnyBody Modeling System to assess the lower extremity muscle forces during walking.

The results in healthy volunteers showed that the change in the gluteus medius was significant and corresponded to the change in the adduction/abduction moments due to a slight torso list between the subjects, suggesting that the proposed method was useful to evaluate the patient-specific muscle forces.

In patients with hip osteoarthritis, forces of the gluteus medius decreased and other muscles compensated, indicating that the proposed method could predict the mechanism of change involving the balance of active muscles in the presence of osteoarthritis.

研究分野：整形外科

キーワード：歩行解析 筋活動計測

1. 研究開始当初の背景

わが国における変形性股関節症は、寛骨臼形成不全を伴う二次性の股関節症が大多数であり、寛骨臼形成不全による股関節の不安定性と、荷重部における力学的ストレスの集中が発症および進行の原因となる。このため、股関節にかかる応力分布を知ることが重要である。近年では、CT 値から骨密度分布を推定し、ヤング率分布へと変換することで個体による骨密度の違いを加味した有限要素法解析により、患者ごとの骨形態と骨密度を考慮した応力解析が施行できる。本解析法は、骨に一律の材料特性を与えて解析する従来の有限要素法解析と比較して、患者ごとの骨密度の違いを反映させた材料特性を与えて解析することができるため patient-specific な解析法であり、患者ごとの骨質を考慮したより詳細な解析が可能である。本研究責任者である稲葉らは、本解析手法を用いて変形性股関節症の応力解析、人工股関節全置換術 (THA) 後の応力解析を行ってきた。その結果、変形性股関節症患者では骨形態に応じて、股関節にかかる応力の分布や大きさの違いが観察され、また THA 後の応力解析では大腿骨周囲に作用する相当応力と DEXA 法を用いた骨密度の経年的変化は関連した。しかしこれらの解析では、股関節周囲筋の作用に関するシミュレーションについては、筋力の作用方向と大きさを一律とすることしかできない。股関節周囲筋力は、股関節症の発症・進行や、THA 後の応力に影響を及ぼす重要な因子の一つであるため、股関節周囲筋力についても患者ごとの違いを加味して解析する必要があるが、現在では患者ごとの股関節周囲筋力を定量化して、さらにその結果を有限要素法解析に反映させることは困難である。

近年開発された AnyBody™ Modeling System (ANYBODY Technology 社) は個々の筋・腱の弾性エネルギー、括抗筋力、その他動作中の人体における様々な部分に作用する力を計算できるソフトウェアである(図1)。

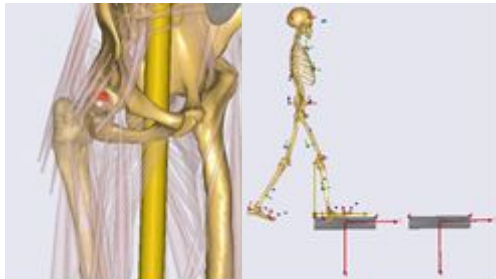


図 1. AnyBody™ の THA モデルと歩行モデル

AnyBody™ は、理論的には VICON MX (三次元動作分析装置、INTER REHA CO., LTD) による歩行・動作解析の C3D データを読み込むことができるため、歩行解析より得られた患者ごとの筋力情報を評価できる可能性が

ある。また AnyBody™ は有限要素解析ソフトへ同期させることも可能であるため、患者個々の筋力特性や動的要素を含んだ応力解析が施行できる可能性がある。

本研究では、患者個々の骨形態と骨密度を考慮した有限要素法解析と、患者個々の筋肉活動評価を反映させたシミュレーションを開発することで、より patient-specific な病態把握を行うとともに、患者個々の股関節症進行予測を行うことを目的とする。また THA 後の解析を行うことにより、患者ごとの詳細な術後評価を行うことも目的とする。

2. 研究の目的

(1) VICON による歩行解析と AnyBody™ の同期による患者ごとの筋肉活動評価：

VICON による歩行解析より得られた C3D ファイルのデータを AnyBody™ 内の歩行解析モデルに挿入し、歩行解析により得られたマーカーのデータを基に歩行モデルの筋骨格系を最適化して、患者個々の筋力の大きさや作用方向を解析する。これにより変形性股関節症や THA が股関節周囲筋力に与える影響を評価することが可能となる。また変形性股関節症の病期や骨形態が股関節周囲筋力に及ぼす影響や、THA の設置位置が筋力に与える影響などが評価できる。

(2) 患者ごとの筋力特性を与えた有限要素解析による応力解析とリモデリングシミュレーション：

AnyBody™ Modeling System で解析した患者ごとの筋力特性を与えた有限要素法解析を行うことで、より patient-specific な解析が可能となる。患者ごとの骨形態、骨密度、筋力を反映させた解析により、変形性股関節症の進行予測や、THA の新しい術後評価が可能になると考える。

3. 研究の方法

(1) VICON MX を用いた歩行・動作解析により得られた解析データを C3D ファイルとして出力する。この歩行・動作解析により得られた C3D ファイルを AnyBody™ Modeling System に同期させて歩行モデルの筋骨格系を最適化することにより、患者ごとの筋力、筋肉作用方向などの筋肉活動評価を行う。

本検討では、まず健常ボランティアによる計測を行い、本手法の妥当性について検討する。健常ボランティアでの妥当性が検証できたうえで、変形性股関節症患者に対する検討を行う。

(2) Mechanical Finder ver. 6.0® (計算力学研究センター社) を使用する。CT から骨盤および大腿骨の 3 次元モデルを作成し、要素分割は正 4 面体、要素素数は約 600,000 とする。大腿骨および骨盤のヤング率は Keyak の関係式に準じて CT 値より規定し、ポアソン比は 0.40 とする。関節軟骨のヤング率は 10.35、ポア

ソン比は0.40とする。このモデルに対して得られた患者ごとの筋肉活動評価を反映させた patient-specific な有限要素法解析を行う。この有限要素法解析では患者ごとの骨密度も反映させた解析を行うため、患者ごとの骨形態、骨密度、筋力のすべてを反映させた新しい有限要素法解析となる。

4. 研究成果

(1) 健常ボランティアの検討

健常被験者 2 名の歩行動作中の筋力推定結果として、両被験者の歩行周期における歩行姿勢および、発揮される筋力に比例する膨らみとして可視化した筋活動の傾向を図 2 に示す。

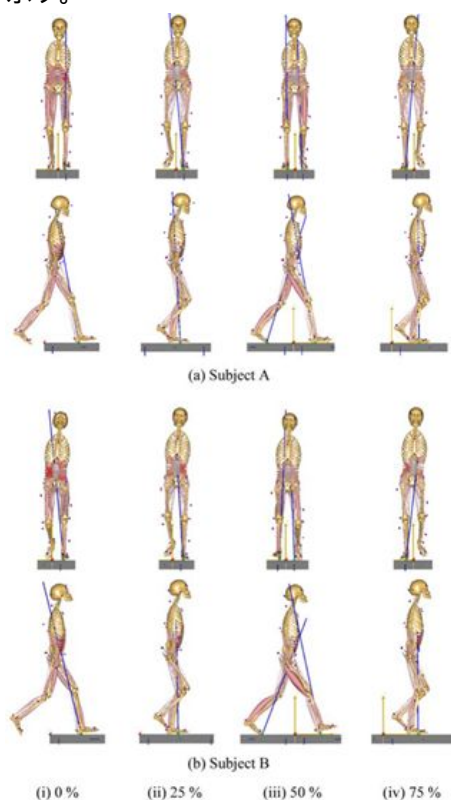


図 2 各歩行周期における筋活動変化

また、歩行周期における被験者間の筋活動の比較の例として、中殿筋の筋力および内転・外転モーメントの変化を図 3 にそれぞれ示す。まず、図 3(a) (上段) より歩行周期 5% から 45%、45%から 85%の立脚相において両被験者ともに中殿筋の筋力が大きく変化していることがわかる。これは中殿筋が骨盤と大腿骨をつなぐ筋であり、立脚相において筋力の発揮により骨盤と大腿骨の相対位置を保つ役割を担っていることから妥当な結果であると考えられる。図 3(a)の中殿筋の筋力変化は、図 3(b) (下段) の両下肢の内転・外転モーメントの大小関係と対応しており、発生した内転モーメントに対し股関節を外転させる働きを持つ中殿筋が筋力を発揮した結果であると理解することができる。次に右下肢と左下肢の中殿筋力に着目すると被験者 A では両下肢の筋力に大きな差がないが、

被験者 B ではそれらの差が顕著であり個体間で差が見られる。この傾向について歩行時の姿勢の変化が筋力に与える影響を検討する。図 2 の各被験者の前方の歩行動作の観察により被験者 A の体幹の傾きは小さいのに対し被験者 B の体幹は常に左側に傾いている。被験者 B は明確な股関節疾患の病歴のない健常者であるが、右立脚時に骨盤が遊脚側に沈下し体幹が左側へ傾斜する軽微な Trendelenburg 歩行を示しているように見える。この体幹の傾きを代償するために被験者 B では体幹が傾いた方向と反対側の中殿筋が大きな筋力を発揮することにより歩行姿勢を維持していると考えられる。以上より、股関節周囲筋は歩行姿勢と密接に関連し、歩行姿勢を維持する上で重要な役割を担うとともに本筋力推定手法が個別別の特徴的な歩行姿勢を反映した筋力推定に有用であることが示されたと考える。

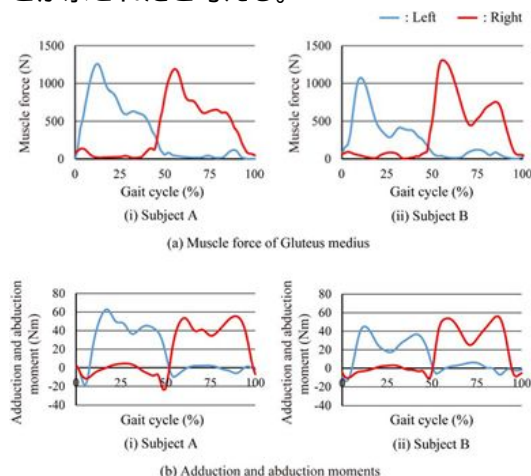


図 3 歩行周期における中殿筋力と股関節内転/外転モーメント

変形性股関節患者での検討

変形性股関節患者 2 名での検討結果を図 4 に示す。

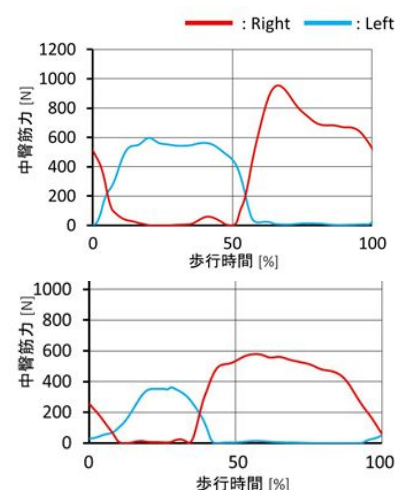


図 4 歩行周期における中殿筋力

上段：68 歳、女性、左変形性股関節症
下段：71 歳、女性、左変形性股関節症

2名の症例ともに歩行中の中殿筋力は患側で健側に比べて弱く、図4下段の症例では患側中殿筋の活動する歩行時間も短縮していた。本症例では著明な Trendelenburg 歩行を示していた。また中殿筋力を50%に減じた重症化モデルでは、小殿筋筋力は2症例ともに健側に比べて患側で高く、中殿筋の筋力低下を代償しているかのような結果であった(図5)。

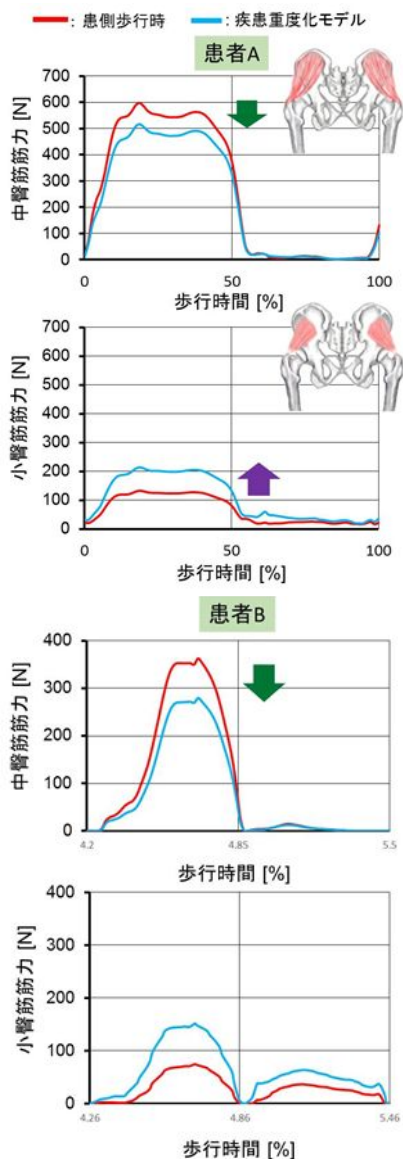


図5 中殿筋力を50%に減じた重症化モデル

(2)有限要素法解析

変形性股関節症患者における有限要素解析モデルでは、骨切り術後で骨切り術前に比べて寛骨臼内の相当応力の有意な低下を認めた(図6)。

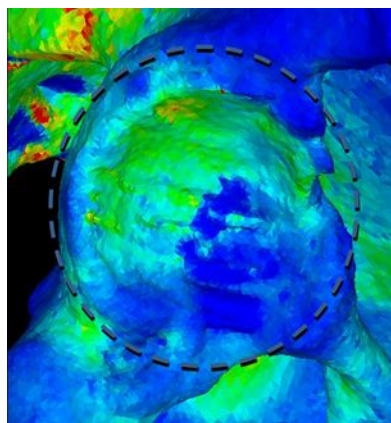
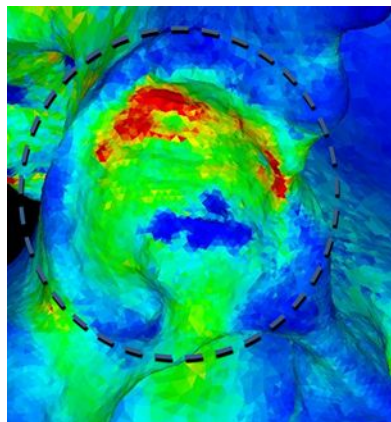


図6 寛骨臼内の相当応力の術後変化
上段：寛骨臼回転骨切り術前
下段：術後

この有限要素モデルにおいて術前後のほかにも疼痛や病期によっても相当応力の違いを確認することができた。

本研究期間では、VICONによる歩行解析とAnyBody™の同期に時間を要し、歩行・動作中の筋活動解析モデルを作成するところまでは可能であったが、その結果である筋力特性を与えた有限要素解析による応力解析とリモデリングシミュレーションまでには至ることができなかった。現在、症例を重ねて、今後、patient-specificな有限要素法解析を予定している。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計4件)

- 1) 田原大輔、澤 弘樹、辻上哲也、百瀬たか子、池 裕之、稲葉 裕：変形性股関節症の歩行における股関節周囲筋力の個別別推定．臨床バイオメカニクス 36: 285-292, 2015 .(査読有)
- 2) Hirata Y, Inaba Y, Kobayashi N, Ike H, Yukizawa Y, Fujimaki H, Tezuka T, Tateishi U, Inoue T, Saito T: Correlation between mechanical stress by finite element analysis and ¹⁸F-fluoride PET uptake in hip

osteoarthritis patients. J Orthop Res 2015; 33 (1): 78-83. (査読有)

- 3) Ike H, Inaba Y, Kobayashi N, Hirata Y, Yukizawa Y, Aoki C, Choe H, Saito T: Comparison between mechanical stress and bone mineral density in the femur after total hip arthroplasty by using subject-specific finite element analyses. Comput Methods Biomech Biomed Engin 2015; 18(10):1056-1065. (査読有)
- 4) Ike H, Inaba Y, Kobayashi N, Yukizawa Y, Hirata Y, Tomioka M, Saito T: Effects of Rotational Acetabular Osteotomy on Hip Joint Stress in Patients with Developmental Dysplasia of the Hip: A Subject-Specific Finite Element Analysis. Bone Joint J 2015; 97B (4): 492-497. (査読有)

〔学会発表〕(計2件)

- 1) 百瀬たか子、稲葉 裕、小林直実、池 裕之、手塚太郎、久保田 聡、川村正樹、齋藤知行：変形性股関節症患者における股関節外転筋力と中殿筋体積および脂肪変性との関連．第30回日本整形外科学会基礎学術集会．富山国際会議場、ANA クラウンプラザホテル富山、富山市民プラザ(富山県富山市)，2015年10月22日．
- 2) 百瀬たか子、稲葉 裕、小林直実、池 裕之、手塚太郎、久保田 聡、川村正樹、齋藤知行：変形性股関節症患者における三次元画像解析ソフトウェアを用いた中殿筋体積と脂肪変性の評価．第88回日本整形外科学会学術集会．神戸ポートピアホテル、神戸国際会議場(兵庫県神戸市)，2015年5月21日．

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

○取得状況(計0件)

6. 研究組織

(1)研究代表者

稲葉 裕 (INABA, Yutaka)
横浜市立大学・附属病院・准教授
研究者番号：40336574

(2)研究分担者

田原大輔 (TAHARA, Daisuke)
龍谷大学・理工学部・講師
研究者番号：20447907

(3)連携研究者

なし