

令和 3 年 6 月 14 日現在

機関番号：33910

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04034

研究課題名(和文) 整形外科治療支援のためのMS-FE解析法の開発に関する研究

研究課題名(英文) Development of a Musculoskeletal Finite Element Analysis Method for Supporting Orthopedic Treatment

研究代表者

安達 和彦 (Adachi, Kazuhiko)

中部大学・工学部・教授

研究者番号：30243322

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では2段階の手順で構成される新しいMS-FE解析方法を開発した。開発手法の第1ステップでは逆動的解析による筋骨格解析で関節反力と筋力を推定し、第2ステップで有限要素解析により骨応力分布を求める。骨接合術が大腿骨頸部骨折の治療に広く使用されているが、術後の2次骨折の原因を明らかにするために開発手法を大腿骨近位部の力学解析に適用した。歩行運動を模擬する動的荷重条件と変位境界条件を与えられることが開発手法の主な特徴である。開発手法による解析の結果、大腿骨近位部の応力分布の時間変化が可視化でき、術後リハビリテーション期間中の転子下骨折の潜在的な原因が局所の応力集中であることを示唆した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

我が国における大腿骨近位部骨折の発症者数は2007年で約15万人と報告され、高齢者人口の今後の増加に伴って患者数がさらに増加すると予想される。大腿骨近位部骨折に対する外科的治療法では整復後にインプラントで固定する骨接合術が多く用いられるが、術後リハビリテーション中あるいは日常生活復帰後に、インプラント周囲骨折や骨頭穿破など力学的要因を示唆する合併症の報告がある。本研究課題で開発したMS-FE解析方法を用いることで大腿骨近位部骨折治療の術後予測が可能となり、インプラント周囲骨折等合併症発症リスクの定量的評価につながる。

研究成果の概要(英文)：In this study, we proposed a novel musculoskeletal finite element (MS-FE) analysis method which consists of 2 step procedure; in the 1st step, MS analysis beased on the inverse dynamic analysis for estimating the dynamic loading, and then FE analysis for obtaining the bone stress distribution in the 2nd step. Osteosynthesis with fixations is widely used for femoral neck fracture treatment. In order to reveal the potential cause of the postoperative fracture for proximal femur osteosynthesis, we applied the proposed method to the proximal femur biomechanics analysis. The dynamic loading and boundary conditions for simulating the gait motion are the major technical advantages of the proposed method comparing with the conventional static FE analysis. The simulation results successfully demonstrated the detailed time dependent stress distribution and excessive local stress concentration that is the potential cause of sub-trochanteric fractures during postoperative rehabilitation period.

研究分野：機械力学，バイオメカニクス

キーワード：有限要素解析 筋骨格モデル 骨接合術 インプラント 動力学解析 骨折リスク評価 歩行解析 臨床バイオメカニクス

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

骨粗鬆症を患う高齢者は、転倒時の腰部打撲など外力の作用で大腿骨の頸部や転子部他の股関節周りのいわゆる大腿骨近位部を骨折することがある。日本における大腿骨近位部骨折の発症者数は2007年で約15万人と報告され、高齢者人口の今後の増加に伴って患者数がさらに増加すると予想される(日本整形外科学会他、「大腿骨頸部/転子部骨折診療ガイドライン」、改訂第2版,(2011), 南江堂)。大腿骨近位部骨折に対する外科的治療法では、骨折部のずれ(転位)が小さい症例に対して、整復してインプラントで固定する外科的治療(骨接合術)が行われることが多い。インプラント固定では、手術時の侵襲が少なく強固な固定が得られることが利点とされる一方で、術後リハビリテーション中あるいは日常生活復帰後に、インプラント周囲骨折、骨頭穿破(カットアウト)など力学的要因を示唆する合併症の報告がある。術後合併症の発症は、術後の患者の早期離床を妨げるだけでなく、結果として歩行機能の回復を大きく妨げることから、術後QOL(Quality of Life)に重大な影響を及ぼす。しかし、力学的要因が示唆されるこれら術後合併症の発生メカニズムは十分に解明されていない。その理由の一つとして、個々の臨床症例は骨折の様態や適用した術式が異なるだけでなく、性別・年齢・体格・歩き方などが異なり、症例比較検討の際に条件をそろえることが困難であることが指摘できる。一方、工学的手法である有限要素解析は、比較対象以外の条件を同一に設定して力学的な検討を行うことができることから、インプラント周囲骨折等合併症発症リスクの定量的評価において有用な手法と位置付けられるようになると考えられる。

大腿骨近位部の応力状態を力学的に検討するため、有限要素法を用いたバイオメカニクス解析が従来から数多く行われているが、そのほとんどが静止立位状態を模擬して単純化した荷重条件および境界条件の下での静解析となっている。術後に患者が静止立位姿勢で長時間活動することは考えにくく、歩行補助具を用いながら歩行動作を行うことが多いと考えられる。

大腿骨近位部に対する力学解析において被験者固有の解析モデルの必要性は従来から指摘され、骨形状だけでなくCT値に基づく被験者固有の材料物性を解析モデルに導入する研究が進められている。境界条件と荷重条件については被験者固有の条件の導入が試みられているものの、静解析が大半となっている。被験者固有の荷重条件と境界条件の例として、歩行中の代表姿勢や最大荷重値を抽出し、その時点で静止状態での解析を行うことにより、歩行状態を近似的に模擬した有限要素解析が報告されているが、静解析であることに変わりはない。これらの研究では、例えば被験者固有の大腿骨近位部モデルの遠位端を固定境界条件とし、人工骨頭ステムの剛性分布が皮質骨応力分布に及ぼす影響の考察(A.A.Oshkour, et al., *Proc. Inst. Mech. Eng., Part H: J. of Eng. Med.*, 227(1), (2013), pp.3-17)、骨密度分布の個人差(A.Vahdati, et. al., *J. of Mech. Behavior of Biomed. Mater.*, 30, (2014), pp.244-252)と若年者の股関節頸部の形状形成(P.Yadav, et. al., *J. of Biomech.*, 49(9), (2016), pp.1613-1619)に及ぼす股関節反力と筋力の影響を考察し、歩行中の股関節反力と筋力を荷重条件として与えることの重要性を指摘している。Vahdatiらは、筋骨格モデルを用いて逆動力学解析から求めた被験者固有の筋力が荷重条件として骨密度分布の個人差に大きく影響することを指摘している。しかし、VahdatiらとYadavらの解析はいずれも境界条件と荷重条件が時不変の静解析であり、Oshkourらの解析は境界条件が時不変で荷重条件が時変となる解析である。

2. 研究の目的

本研究課題では、逆動力学解析と有限要素解析を組み合わせることによって運動時の骨格系に生じる動的応力分布の経時変化を可視化する新しい解析方法であるMS-FE解析法(Muscular Skeletal-Finite Element解析法)を開発し、特に大腿骨近位部のバイオメカニクス解析に適用することで大腿骨近位部骨折の整形外科治療支援を目的とする。本研究課題の遂行により、骨接合術後の治療骨を対象として歩行時の大腿骨近位部の応力分布の経時変化の可視化が実現できる。下肢関節部バイオメカニクス解析や合併症発症メカニズム解析など本研究課題を含む関連分野における研究対象の一覧を表1に示す。

表1 関連研究分野における本研究課題の対象および既存研究での主な研究対象(○)

| 対象とする関節          |         | 股関節                   |                       | 膝関節                   |                 |
|------------------|---------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------|
|                  |         | 人工関節<br>・ゆるみ<br>・周囲骨折 | 骨接合術<br>・ゆるみ<br>・周囲骨折 | 人工関節<br>・ゆるみ<br>・周囲骨折 | 膝蓋骨脱臼<br>・メカニズム |
| 解<br>析<br>手<br>法 | 運動学解析   |                       |                       |                       | ○               |
|                  | FEM静解析  | ○                     | ○                     | ○                     |                 |
|                  | FEM動解析  |                       | ○                     |                       |                 |
|                  | MS-FE解析 |                       | 本研究課題                 | ○                     |                 |

### 3. 研究の方法

開発した MS-FE 解析法は 2 段階で解析を行う。第 1 段階 (STEP1) では筋骨格モデルを用いて逆動力学解析を行い、人体運動時の時系列の筋力と関節反力を計算する。続いて第 2 段階 (STEP2) では、解析対象となる治療骨の有限要素モデルに対して、第 1 段階で推定した筋力と関節反力を時変の荷重条件として設定し、第 1 段階の逆動力学解析で入力とした骨格系の運動に基づいて治療骨に時変の変位境界条件を設定する。開発した MS-FE 解析法は、第 2 段階での有限要素解析における荷重条件と境界条件 (拘束条件) に、第 1 段階で推定した時変の筋力と関節反力、および第 1 段階で入力した骨の運動をそれぞれ用いることで動解析を実現できることが特徴となる。MS-FE 解析法による大腿骨近位部骨折治療骨の動解析の流れを図 1 に示す。

以下では、大腿骨頸部骨折に対する骨接合術を対象として、健常骨とインプラントで固定した治療骨に対する MS-FE 解析について述べる。

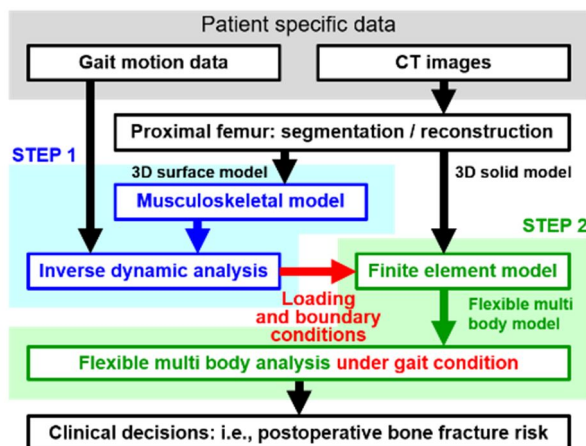


図 1 MS-FE解析法による大腿骨近位部骨折治療骨の動解析

#### 3. 1 第 1 段階 (STEP1)

健常骨の有限要素モデルおよびインプラント (本研究課題では Dual SC Screw, DSCS) で固定した治療骨の有限要素モデルに設定する荷重条件は、歩行時の股関節反力と股関節周りの筋力の時刻歴波形とする。歩行時の股関節反力と股関節周りの筋力の時刻歴波形は、剛体リンク (骨) と線要素 (筋肉) を組み合わせた下肢の筋骨格モデルに関節角度データと床反力データを入力して逆動力学解析することにより推定する。以下に荷重条件設定のための筋骨格解析について説明する。

筋骨格モデルは高齢女性の下肢を想定し、大腿部、下腿部、足部に相当する剛体リンクの質量、慣性モーメント、重心位置などの特性値に文献値を採用した。他の研究文献を参照し、歩行中に大腿骨近位部に直接筋力の影響を及ぼす膝より上部の代表的な筋として、腸骨筋、中殿筋、大腿直筋、外側広筋、大腿二頭筋、内転筋、大腿筋膜張筋、大殿筋の計 8 種類を選定した。選定した個々の筋に対して起始および停止の位置は、共同研究者の整形外科医の指導の下、付着範囲のおおよその中心部となるようにそれぞれ一つの点で指定し、起始および停止の 2 点間を結ぶ一本の直線で近似してそれぞれの筋をモデル化した。取り扱いを簡単にするため、筋は収縮力のみ発生するものとし、伸長方向には力が発生しないものとした。膝下の筋力で発生する合力である関節周りのモーメントとして、膝関節トルクと足首関節トルクを仮想的に考慮した。

逆動力学解析では文献で公表されている関節角度データと床反力データを用いた。筋骨格モデルに、関節角度から推定した歩行中の骨の重心位置、速度、加速度、および床反力を入力し、下肢の関節反力、関節モーメント、筋力を逆動力学解析により推定した。筋骨格モデルでは、「各筋に生じる負荷が最も少ない状態が望ましい筋力の発揮状態である」と仮定し、筋応力の二乗和を最小化する最適化問題を定式化し、歩行一周期での時刻歴の関節反力、関節モーメント、筋力を算出した。

#### 3. 2 第 2 段階 (STEP2)

高齢女性の下肢の匿名化 CT 画像データから寛骨および大腿骨近位部を三次元再構成し、CT 画像データの位置情報に基づいて寛骨および大腿骨近位部を体内と同じ相対位置関係を保つように組み合わせ、寛骨臼と大腿骨頭の間を全て軟骨と仮定し、健常骨の三次元形状モデルを作成した。ただし、寛骨臼部の内面形状は骨頭中心と同一中心の球面形状とした。次に大腿骨頸部骨折のモデルとして、Pauwels による分類の II 型を想定し、大腿骨近位部の三次元モデルの頸部に正面像にて水平面に対して 50 deg の角度をなす平面を構成して骨折面のモデルとした。寛骨、骨折面をモデル化した大腿骨近位部および軟骨の各モデルに、インプラント DSCS の三次元モデルを組み合わせることで骨接合術後の治療骨の三次元形状モデルを作成した。その際にインプラントは整形外科医の指導の下、大腿骨近位部の至適位置に刺入した。続いて三次元形状モデルを 4 節点四面体一次要素で分割し、図 2 に示す治療骨の三次元有限要素モデルを構築した。

寛骨, 大腿骨近位部および軟骨の材料特性は均質等方線形弾性体を仮定し, ヤング率は文献値を部位毎に設定した。骨密度は Keyak の換算式を用いてヤング率から推定した。本研究課題では図2に示したように左寛骨全体をモデル化したので, 寛骨については寛骨臼部とその周囲は均質等方線形弾性体とし, 頭側および内側の部分は剛体とし空間に固定した。一方, インプラント DSCS については, 剛体とした。

健全骨の有限要素モデルと治療骨の有限要素モデルの荷重条件には3.1の第1段階で述べた方法により推定した股関節反力, 股関節付近の4つの筋力(中殿筋, 大殿筋, 内転筋, 大腿筋膜張筋)の時刻歴(歩行周期で正規化)および重力を与えた。筋力は以下に述べる方法により, 大きさおよび方向が時間変化する荷重条件として設定した。まず, 各筋の起始位置と停止位置に相当する有限要素モデル上のそれぞれ一節点を「コネクタ要素」と呼ばれる要素を用いて相互に結合した。筋をモデル化したコネクタ要素の有限要素モデル上での配置を図3に示す。筋の広がりを近似的に考慮できるように, 中殿筋は3本, 大殿筋は2本, 内転筋は2本のコネクタ要素でそれぞれモデル化した。一方, 大腿筋膜張筋は1本のコネクタ要素でモデル化した。図4に示した歩行一周期の筋力を歩行時の大腿骨近位部の屈曲・伸展運動に同期させてコネクタ要素の走行方向に発生させることで, 歩行時の筋力に相当する荷重条件を健全骨モデルおよび治療骨モデルに与えた。筋を複数のコネクタ要素でモデル化した中殿筋, 大殿筋, 内転筋については, 図4に示した筋力を個々のコネクタ要素に等配分した。

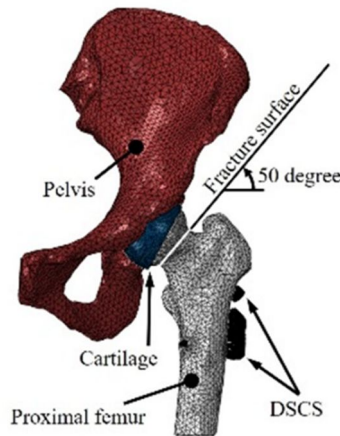


図2 大腿骨近位部骨折治療骨の三次元有限要素モデル

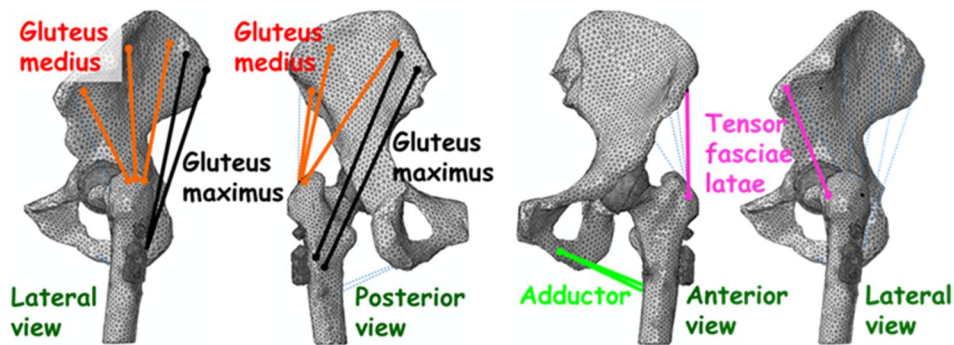


図3 三次元有限要素モデル上での筋のモデル化

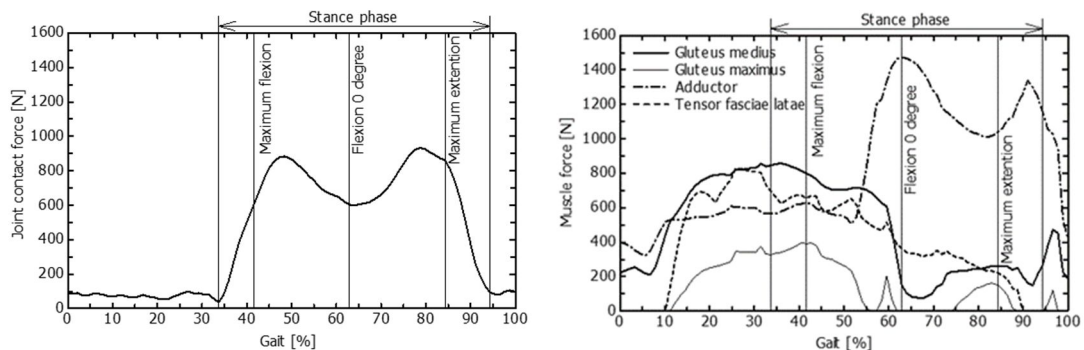


図4 第1段階で求めた股関節反力(左)と筋力(右)

#### 4. 研究成果

開発した MS-FE 解析により、有限要素解析において歩行中の骨盤（寛骨）に対する大腿骨近位部の屈曲・伸展運動を再現した動解析が実現でき、歩行一周期内の時々刻々の寛骨臼部、大腿骨近位部の皮質骨および海綿骨、軟骨の応力分布が骨内部も含めて可視化できるようになった。MS-FE 解析によって得られる大腿骨近位部皮質骨表面のミーゼス応力の分布を治療骨の三次元有限要素モデルについて図5に、健常骨の三次元有限要素モデルについて図6にそれぞれ示す。

図5と図6に示す応力分布図は、歩行一周期内で連続した応力解析の一部として得られた。歩行動作下での大腿骨近位部の時々刻々のミーゼス応力分布の変化が可視化でき、術後骨折リスク評価の観点から皮質骨の応力集中について以下に考察する。歩行一周期内で健常骨モデルの皮質骨応力に対して明らかに治療骨モデルの皮質骨応力が大きくなる箇所は、大腿骨外側皮質骨のインプラント刺入部周囲、インプラントのプレート部を転子下で固定する皮質骨スクリュー穴周囲、頸部骨折面となった。大腿骨外側皮質骨のインプラント刺入部周囲の応力値の上昇は、近位の刺入部周囲の方が遠位の刺入部周囲よりも大きく、50 MPa を超えるミーゼス応力値が計算された。皮質骨スクリュー穴周囲についても外側および内側の皮質骨で 50 MPa を超えるミーゼス応力値が計算された。頸部骨折面についても、ミーゼス応力値は 50 MPa を超え、最大屈曲位では頸部内側の骨折面で、最大伸展位では頸部外側の骨折面で応力値の上昇が顕著となり、歩行動作による大腿骨近位部の屈曲・伸展運動に同期して骨折面での応力値の分布が移り変わった。以上の解析結果は、術後の歩行動作において、例えば、大腿骨近位部外側皮質骨のインプラント刺入部周囲の術後骨折リスクを評価する際に有用となることが示唆される。

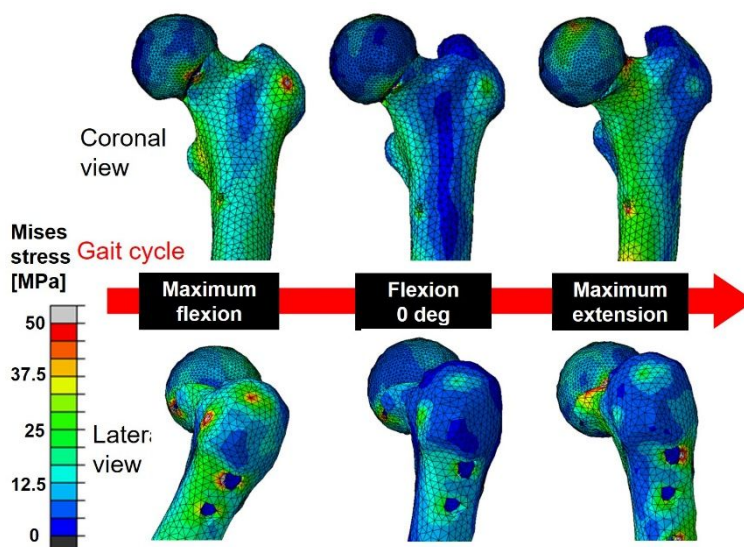


図5 歩行一周期内の代表姿勢での治療骨の大腿骨近位部皮質骨表面のミーゼス応力分布

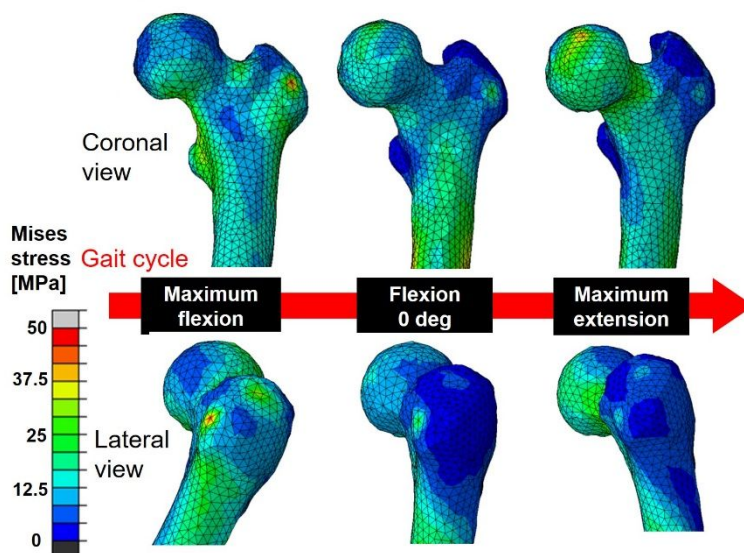


図6 歩行一周期内の代表姿勢での健常骨の大腿骨近位部皮質骨表面のミーゼス応力分布

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

|   |                       |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名<br>中村祐貴子, 魏 綾那, 安達和彦, 野田光昭                         | 4. 巻<br>24            |
| 2. 論文標題<br>被験者固有の三次元有限要素モデルを用いた歩行動作下での大腿骨頸部骨接合術後の再骨折リスク評価 | 5. 発行年<br>2018年       |
| 3. 雑誌名<br>バイオメカニズム  | 6. 最初と最後の頁<br>149-157 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし                            | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難                    | 国際共著<br>-             |

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件）

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Kazuhiko Adachi and Mitsumasa Noda   |
| 2. 発表標題<br>MS-FE Analysis for Dynamically Postoperative Fracture Risk Assessment of Osteosynthesized Proximal Femur |
| 3. 学会等名<br>The 25th Congress of the European Society of Biomechanics (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>野田光昭, 安達和彦                       |
| 2. 発表標題<br>大腿骨頸部骨折後に対する歩行中の筋力を考慮した動的な有限要素解析 |
| 3. 学会等名<br>第46回日本臨床バイオメカニクス学会 (招待講演)        |
| 4. 発表年<br>2019年                             |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>K. Adachi, N. Wi, M. Noda  |
| 2. 発表標題<br>Development of a Musculoskeletal Finite Element Analysis Method for Dynamic Bone Stress Analysis of Proximal Femur |
| 3. 学会等名<br>42nd Annual Meeting of the American Society of Biomechanics (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2018年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>野田光昭, 安達和彦                                       |
| 2. 発表標題<br>ハンソンピンおよびDSCSにより治療した大腿骨頸部骨折例に対する動的有限要素解析による応力の検討 |
| 3. 学会等名<br>第45回日本股関節学会学術集会                                  |
| 4. 発表年<br>2018年   |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

|       | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)    | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号) | 備考 |
|-------|------------------------------|-----------------------|----|
| 研究協力者 | 野田 光昭<br><br>(Noda Mitsuaki) |                       |    |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

|         |         |
|---------|---------|
| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|