

令和 2 年 6 月 9 日現在

機関番号：32104

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K01515

研究課題名(和文) 重度変形性膝関節症における筋発揮張力と有限要素解析法を用いた新しい歩行解析

研究課題名(英文) A new gait analysis using muscle exertion tension and finite element analysis in severe knee osteoarthritis

研究代表者

深谷 隆史 (FUKAYA, TAKASHI)

つくば国際大学・医療保健学部・教授(移行)

研究者番号：20515580

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では健常者と重度変形性膝関節症患者に筋発揮張力、床反力とCT有限要素解析法を用いた新しい歩行解析を試み、歩行立脚期で最も負荷が生じる荷重応答期を対象として膝関節内側部への力学的負荷について検討した。筋発揮張力と床反力のデータを用いてCT有限要素法により解析した結果、健常者では膝関節内側部に均等に圧縮応力が生じていたが、重度変形性膝関節症患者では膝関節を構成する脛骨の内側縁に圧縮応力が集中していることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の結果は、歩行立脚初期において、正常膝が膝内側関節面全体に圧縮応力を認めたのに対し、重度変形性膝関節症患者では、膝関節の内側縁に高い圧縮応力が集中していたことを明らかにした。本方法により、歩行中の膝関節角度、筋発揮張力、関節間力等のパラメーターを変化させ、変形性膝関節症悪化の要因をシミュレーションすることが可能となった。また、本研究の手法は変形性膝関節症患者の1人1人に対応できるオーダーメイドであり、筋発揮張力や関節角度、力学的負荷の値を変え画像をシミュレーションすることにより、変形の原因を特定し、有効なリハビリテーションを提供することが可能になると考えられる。

研究成果の概要(英文)：we used a newly developed measurement method to calculate knee joint stress with muscle exertion tension and the vertical value of ground reaction force using computed tomography-based finite element method. We also examined which part of medial knee osteoarthritis that patients had the most mechanical load at the loading response phase during walking. The compressive stress distribution to the knee joint was calculated by applying the data of muscle force tension and vertical ground reaction force to the knee joint model created from the CT-FEM. The calculated knee joint compressive stress was taken as the LR phase during the stance phase where the maximum reaction force is exerted by the ground reaction force. From the results of this study, it was found that joint compressive stress on the tibia spreads evenly to the medial tibial condyle in a normal adult man, but it is concentrated on the edge of the medial tibial condyle in patients with severe medial knee osteoarthritis.

研究分野：リハビリテーション科学

キーワード：重度変形性膝関節症 歩行 CT有限要素解析法 筋骨格モデル

1. 研究開始当初の背景

変形性膝関節症患者の力学的な歩行分析では、これまで動作解析装置と床反力計による関節力や関節モーメント、筋電図による筋活動量などの変数を用いた研究が主に行われてきた。申請者らも軽度変形性膝関節症に対しては疼痛や可動域制限などの機能障害により、歩行中の力学的変化や運動学的変化が生じていることを明らかにしてきた。しかし、重症度の高い変形性膝関節症患者に対する歩行分析はほとんど行われていない。重度変形性膝関節症患者における運動特性を把握し、病態理解を進めることは、手術を回避させ、今後の高齢化社会に向けた変形性膝関節症の予防法や有効な運動療法の開発など、リハビリテーションにおいて重要なテーマであると考えられる。

申請者らが行ってきた重度変形性膝関節症の歩行解析に関する研究は、軽症例に比べ歩行中の運動コントロールが困難で、関節構造の破綻により屈曲 - 伸展運動の障害に加え、歩行立脚期における膝関節の外側方向への特徴的な横ぶれ (lateral thrust) が出現し、歩行立脚期中の膝関節の回旋運動が健常者や軽症例と異なるという報告を行ってきた。

しかし、重度変形性膝関節症患者の歩行立脚時の下肢関節の個々の筋発揮張力については考慮しておらず、また、膝関節のどの部分にどれだけの応力集中が集中するのかが不明である。そのため、申請者らは、歩行解析に動作解析装置・床反力計と筋発揮張力のデータを CT 有限要素解析法に融合させることにより、膝関節面に対する応力分布や最大応力時期について詳細に検証できる新しい歩行解析を考案した。

本研究は重度変形性膝関節症患者において、動作解析装置・床反力計に筋発揮張力を算出する専用ソフトを用いて変形性膝関節症患者の歩行中の筋発揮張力を解析する。また、得られた筋発揮張力を CT 有限要素解析法と融合させ、膝関節荷重部分の応力分布部位を同定し、最も負荷が大きくなる時期の運動特性の解析を行い、力学負荷軽減方法を考案する。

2. 研究の目的

本研究は重度変形性膝関節症患者に対し、動作解析装置・床反力計を用いた歩行解析を行い、同時に下肢関節の筋発揮張力の解析を行う。それらのデータと CT 有限要素解析法を融合させ、膝関節面の応力分布を解析し、下肢関節の動的な可動性や力学的負荷の特徴を把握する。これにより歩行中の力学的負荷の軽減方法を明らかにすることができる。具体的には以下のことを明らかにする。

- 1) 変形性膝関節症患者および健常者における下肢関節に付着する個々の筋に対して歩行中の筋発揮張力を算出し、筋発揮の違いによる変形性膝関節症患者の特性を明らかにする。
- 2) CT 画像により得られた有限要素解析の結果と歩行解析の結果を融合させ、歩行中の最大応力分布時期と部位の同定を行い、その際の下肢関節の運動特性を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 研究 1: 申請者らはこれまで変形性膝関節症患者に対して動作解析装置 (Vicon nexus、赤外線カメラ 8 台) と床反力計 (Kistler 社製) を用いて歩行を測定し、人体を剛体とみなしたモデルにより分析してきた。本研究では、これら動作解析装置と床反力計のデータとともに、下肢関節の個々の筋発揮張力について、筋発揮張力を算出する専用ソフト (ANYBODY) を利用し、歩行中の筋の発揮張力を検証し歩行立脚期中の関節運動に関わる筋の筋発揮張力を算出する。

対象は健常者、変形性膝関節症の診断を受け KL 分類 Grade1 もしくは 2 と判断された症例 (軽症例: 軽度変形性膝関節症) Grade3 もしくは 4 と判断された症例 (重症例: 重度変形性膝関節症) の 3 群とした。測定にはモーションキャプチャシステムと床反力計を用い、赤外線反射マーカの貼付は Plug in gait の下肢モデルを利用した。モーションキャプチャシステムより得られた C3D ファイルから筋骨格モデリングシステム (Any Body Modeling Soft) を用いて歩行立脚期における膝周囲筋の筋活動を求めた。求めた筋活動は膝伸筋群として大腿直筋、内側広筋、外側広筋、中間広筋、膝屈筋群として大腿二頭筋、半腱様筋、半膜様筋の計 7 筋とした。

(2) 研究 2: 本研究では研究 1 で行った筋骨格モデリングシステムによる解析に加え、CT 画像による有限要素解析手法を利用することで膝関節荷重部分の応力分布部位を同定し、最も負荷が大きくなる時期の運動特性の解析を行う。本研究は健常者と重度変形性膝関節症患者に対して歩行解析によって得られた角度データ、床反力、筋発揮張力を CT 有限要素解析法により作成された膝関節モデルに適用することで、膝関節への圧縮応力分布を計算した。圧縮応力の計算領域は歩行立脚期で最も膝関節への負荷が大きくなる立脚初期の荷重応答期とした。

4. 研究成果

研究 1:

3 群の歩行立脚期における膝関節角度変化は図 1 のように健常者群(normal)と軽度変形性膝関節症群(early)では歩行周期 60%の立脚期までは大きな差はないが、60%以降の遊脚期では健常者群の膝関節屈曲角度が大きくなる傾向を示した。また、重度変形性膝関節症群では歩行立脚期の 20%までの膝関節屈曲角度が小さく、いわゆる歩行立脚期の double knee action の消失が確認された。

また、筋骨格モデルを利用した筋発揮張力の検証では、図 2、3 に示すように 3 群ともに膝伸筋群では立脚初期に外側広筋(VL)が、膝屈筋群では大腿二頭筋(BF)が優位に発揮される傾向を示した。また立脚後期では膝伸筋群の大腿直筋(RF)が作用していた。重度変形性膝関節症群では立脚初期の膝伸筋群の作用は小さく、健常者群及び軽度変形性膝関節症群と異なり膝屈筋群が伸筋群に比べ筋発揮が大きかった。また、健常者群に比べると軽度変形性膝関節症群及び重度変形性膝関節症群の膝屈筋群の活動が立脚初期から延長していた。

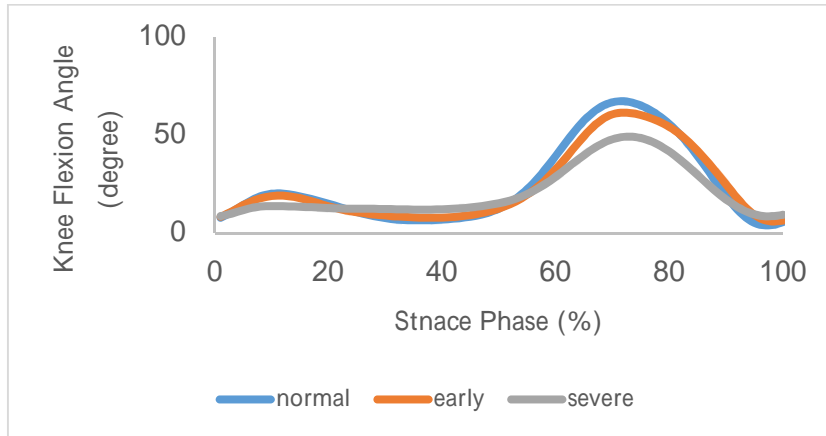


図 1：歩行周期における膝関節屈曲 伸展角度変化

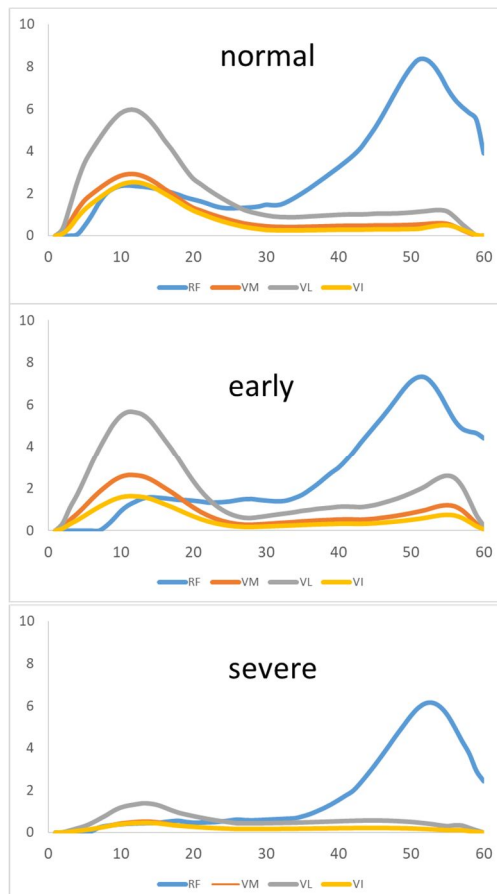


図 2：歩行立脚期の膝関節伸筋群の筋発揮張力

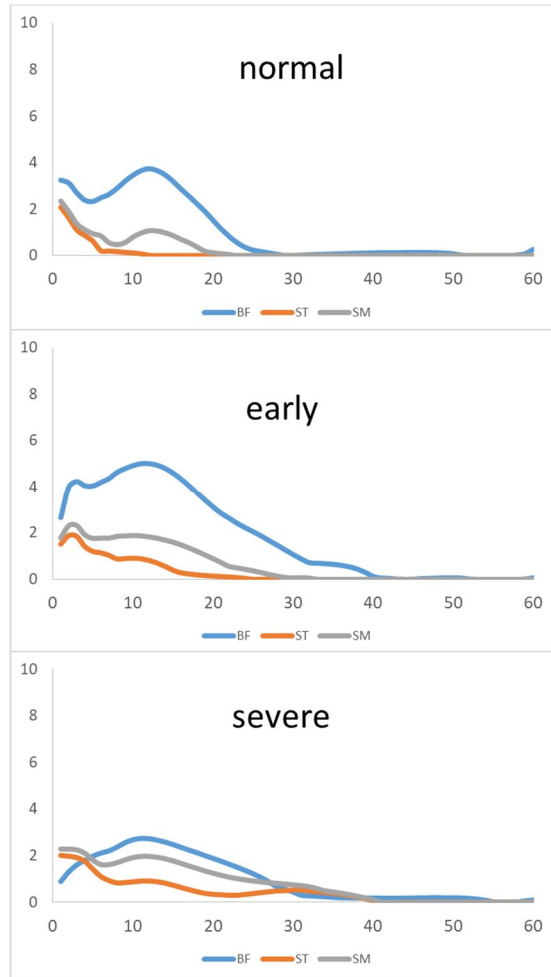


図 3：歩行立脚期の膝関節屈筋群の筋発揮張力

研究 2：

健常者（NA）と重度変形性膝関節症患者（OA）の歩行立脚期の荷重応答期における膝関節伸展筋群と屈筋群の筋発揮張力を図 4 に示す。荷重応答期の筋発揮張力について膝関節伸展筋群は重度変形性膝関節症患者で非常に小さい値を示し、屈筋群でも筋発揮張力は小さくなる傾向を示した。また、健常者では膝関節面への圧縮応力は大腿骨内側顆で大きくなり、さらに脛骨関節面では内側の辺縁に圧縮応力が集中する結果となった（図 5）。

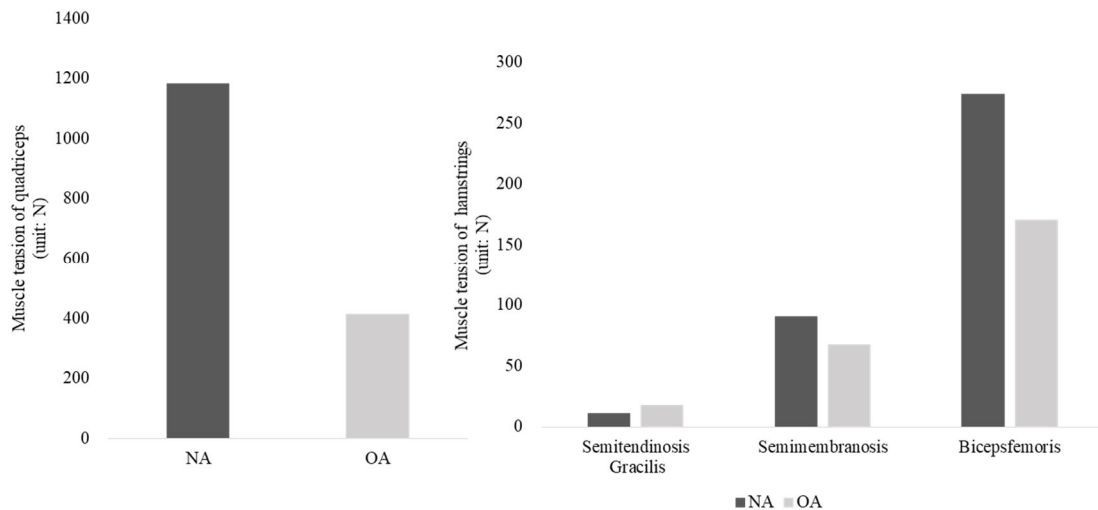


図 4：歩行立脚期の荷重応答期における膝伸展筋群と屈筋群の筋発揮張力

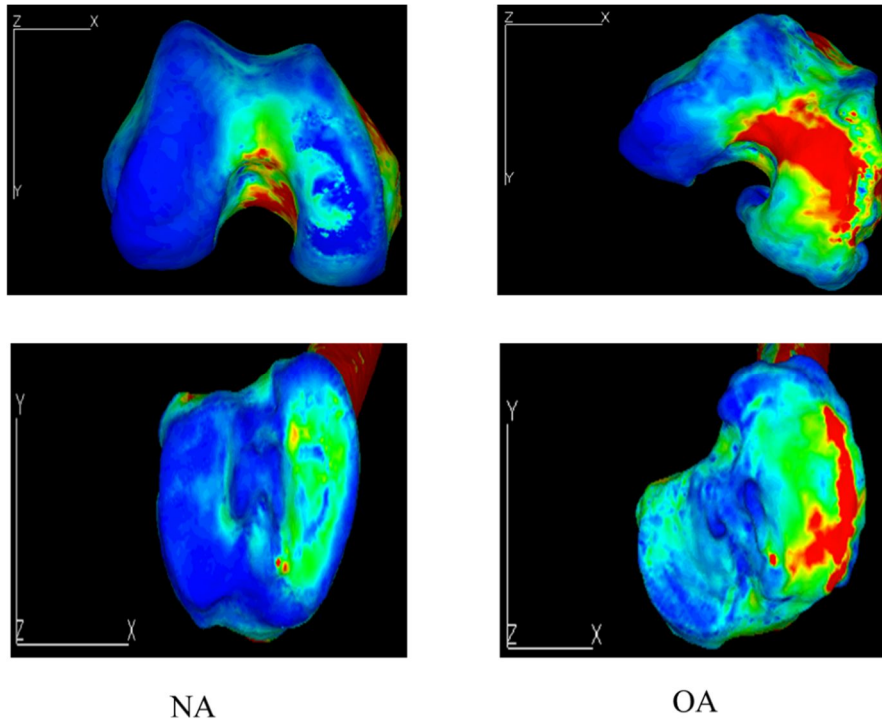


図 5：荷重応答期における膝関節の圧縮応力分布（上段：大腿骨関節面 下段：脛骨関節面）

本研究では、歩行時の動作解析と筋発揮張力のデータを CT 有限要素解析法に組み込み関節面に発生する応力分布をシミュレーションできる新しい歩行解析方法を開発した。これにより、歩行の荷重応答期における関節面の応力集中部分・強度が明らかとなり、変形性膝関節症に進行する要因を明らかにすることが可能になる。本方法による歩行解析は患者 1 人 1 人に対応できるオーダーメイドであり、筋発揮張力や関節角度、床反力などを変え画像をシミュレーションすることにより、変形の原因を特定し、有効なりハビリテーションを提供することができると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 5件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Takashi Fukaya, Hirotaka Mutsuzaki, Wataru Nakano, Koichi Mori	4. 巻 27
2. 論文標題 Characteristics of lower limb movement in the frontal plane during the stance phase in patients with different severity knee osteoarthritis	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Orthopaedic Surgery	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1177/2309499019848085	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Takashi Fukaya, Hirotaka Mutsuzaki, Koichi Mori	4. 巻 55
2. 論文標題 Influence of Pain on Knee Joint Movement and Moment during the Stance Phase in Patients with Severe Bilateral Knee Osteoarthritis: A Pilot Study	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Medicina	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.3390/medicina55120756	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Kunihiro Watanabe, Hirotaka Mutsuzaki, Takashi Fukaya, Toshiyuki Aoyama, Syuichi Nakajima, Norio Sekine, Koichi Mori	4. 巻 56
2. 論文標題 Development of a Knee Joint CT-FEM Model in Load Response of the Stance Phase During Walking Using Muscle Exertion, Motion Analysis, and Ground Reaction Force Data	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Medicina	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.3390/medicina56020056 - 29 Jan 2020	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 深谷隆史、六崎裕高、森浩一	4. 巻 38
2. 論文標題 変形性膝関節症患者の歩行片脚支持期における膝関節運動と関節間力垂直成分の関係	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 臨床バイオメカニクス	6. 最初と最後の頁 165～170
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

1. 著者名 Takashi Fukaya, Hirotaka Mutsuzaki, Wataru Nakano, Koichi Mori	4. 巻 14
2. 論文標題 Smoothness of the knee joint movement during the stance phase in patients with severe knee osteoarthritis	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Asia-Pacific Journal of Sports Medicine, Arthroscopy, Rehabilitation and Technology	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.asmart.2018.08.002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Takashi Fukaya, Hirotaka Mutsuzaki, Koichi Mori	4. 巻 16
2. 論文標題 Relations between external moment and movement of the knee joint during the stance phase in patients with severe knee osteoarthritis	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Orthopaedics	6. 最初と最後の頁 101-104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.jor.2018.12.014	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計5件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Takashi Fukaya, Hirotaka Mutsuzaki, Koichi Mori
2. 発表標題 Analysis of hip and knee joint kinematics in the horizontal plane after total knee arthroplasty
3. 学会等名 International Society of Physical and Rehabilitation Medicine (Kobe, Japan) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 深谷隆史、六崎裕高、森浩一
2. 発表標題 変形性膝関節症患者の歩行立脚期における膝周囲筋の筋活動の違い：筋骨格モデリングシステムによる検討
3. 学会等名 第45回日本臨床バイオメカニクス学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takashi Fukaya, Hirotaka Mutsuzaki, Koichi Mori
2. 発表標題 Influence of knee joint kinematics and external moments on joint load during the stance phases in severe knee osteoarthritis
3. 学会等名 International Society of Physical and Rehabilitation Medicine (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 深谷隆史、六崎裕高、岩本浩二、青山敏之、大久保知幸、森浩一
2. 発表標題 変形性膝関節症患者の歩行片脚支持期における膝関節運動と力学的負荷の関係 - 重症度の違いから -
3. 学会等名 第43回日本臨床バイオメカニクス学会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Takashi Fukaya, Hirotaka Mutsuzaki, Toshiyuki Aoyama, Koji Iwamoto, Tomoyuki Okubo, Koichi Mori
2. 発表標題 Comparison of kinematics data between mild and severe knee osteoarthritis during the walking cycle
3. 学会等名 Orthopaedic Research Society 2017 Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	六崎 裕高 (Mutsuzaki Hirotaka) (50550927)	茨城県立医療大学・保健医療学部・教授 (22101)	

