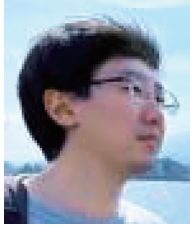


[研究助成 (A)]

ヒトの変性膝関節症を考慮した運動学習モデルの開発

2251004

研究代表者
(助成金受領者)

弘前大学 理工学研究科

助教 王 森 形

共同研究者

埼玉県立大学

准教授

小 栢 進 也

[研究の目的]

変形性膝関節症（膝 OA）は、高齢化社会の進行に伴い患者数が増加している代表的な運動器疾患であり、国内では約 3000 万人が罹患していると推定されている。膝 OA では、関節軟骨や半月板の変性、関節不安定性、疼痛などが生じ、歩行能力の低下を引き起こす。その結果、生活の質（QOL）の低下だけでなく、介護負担や医療費増加など、社会的にも大きな問題となっている。従来の研究では、膝 OA を関節局所の変性疾患として捉えることが多く、骨や軟骨などの構造的変化に着目した解析が主流であった。しかし近年では、膝 OA 患者において筋活動パターンや歩行動作が健常者と異なることが報告されており、関節変性だけでなく、神経制御機構そのものが変化している可能性が示唆されている。すなわち、膝関節構造の変化に対して、脳神経系や脊髄神経系が適応的に再編成され、新たな運動遂行則を獲得している可能性があるが、その詳細なメカニズムは未だ十分に解明されていない。

本研究の目的は、変形性膝関節症に伴う関節構造変化が神経制御機構および歩行運動生成に与える影響を、神経・筋骨格・関節モデルにより数理的に解明することである。具体的には、膝 OA の関節変性を再現した有限要素筋骨格モデルに対し、筋シナジー理論を導入することで、関節構造変化に適応した歩行動作の学習過

程をコンピュータ上で再現した。さらに、筋活動、筋シナジー、関節運動、感覚フィードバックの相互作用を解析することで、膝 OA 進行に伴う神経回路再編成の特徴や、代償動作発生のメカニズムを明らかにすることを目指した。また、モーションキャプチャ、床反力計などによる実験データとの比較検証を行うことで、モデルの妥当性を評価した。本研究成果は、膝 OA 患者に対する新たなリハビリテーション支援技術、運動機能改善手法、支援機器設計への応用が期待され、人間と機械の調和に基づく次世代医療・福祉技術基盤の構築に貢献することを目的としている。

[研究の内容、成果]

本研究では、変形性膝関節症（膝 OA）に伴う関節構造変化が神経制御機構および歩行運動生成に与える影響を明らかにすることを目的として、筋シナジーを統合した神経・筋骨格・関節モデルの開発を行った。膝 OA は、関節軟骨や半月板の摩耗、骨変形、関節不安定性などを伴う代表的な運動器疾患であり、歩行能力や日常生活動作の低下を引き起こす。しかし従来の研究では、膝関節局所の構造変化に着目した解析が中心であり、関節変性に対して神経制御機構がどのように適応・再編成されるかについては十分に解明されていなかった。そこで本研究では、関節系と神経系の相互作用を統合的に

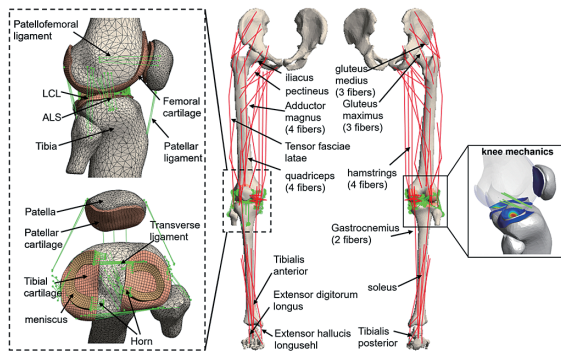


図1 下肢の筋骨格モデル

評価可能なシミュレーション基盤の構築を目指した。

まず、膝 OA 患者の MRI 画像を基に、関節軟骨や半月板の摩耗・変形を反映可能な有限要素筋骨格モデルを構築した（図1）。膝関節の幾何学的特徴を反映するため、画像特徴点抽出技術および FFD（Free-Form Deformation）を用いて、標準筋骨格モデルを膝 OA 進行度に応じて変形させる手法を導入した。これにより、膝 OA の重症度分類である KL 分類（Kellgren-Lawrence 分類）に対応した関節構造モデルの再現を可能とした。また、関節接触、軟骨変形、半月板応力などの生体力学的状態を計算可能な有限要素解析を行った。

変形性膝関節症（膝 OA）に伴う関節構造変化が、歩行運動および神経制御機構に与える影響を明らかにすることを目的として、図2に示すような神経・筋骨格・関節統合解析基盤を構築した。従来の膝 OA 研究では、X 線画像や MRI 画像を用いた形態学的評価、あるいは歩行時の関節角度や関節モーメントなどの運動学・動力学的評価が主流であった。しかし、ヒトの歩行運動は神経系、筋系、骨格系、関節系が相互作用しながら形成されるため、関節局所のみを評価するだけでは、膝 OA 患者特有の歩行障害や代償動作の本質的理解には限界がある。そこで本研究では、歩行計測、逆運動学解析、逆動力学解析、筋力推定、膝関節接触解析、筋シナジー解析を統合することで、膝 OA 進行に伴う運動機能低下の力学的・神経学的メカ

ニズムを総合的に解析した。

まず、歩行時のヒト運動を高精度に取得するため、光学式モーションキャプチャシステムおよび床反力計を用いた三次元動作計測を実施した。被験者の骨盤、大腿、下腿、足部に反射マーカーを貼付し、歩行中のマーカー位置を計測した。また、床反力計を用いて歩行中に地面から作用する反力を取得した。得られたマーカー座標データに対して逆運動学解析を行い、股関節、膝関節、足関節の三次元関節角度を算出した。さらに、床反力および身体節段の位置、速度、加速度情報を用いた逆動力学解析により、歩行周期中に各関節へ作用する関節モーメントを求めた。これにより、膝 OA 患者における歩行中の関節運動学的特徴および関節負荷特性を定量化した。

次に、算出された関節モーメントを基に筋力推定解析を行った。ヒトの関節運動は多数の筋が協調して生成しているため、単純な力学方程式のみでは各筋力を一意に決定することができない。本研究では、筋張力の総和や筋活動コストを最小化する最適化計算を用いて、歩行中の各筋の筋力を推定した。これにより、大腿四頭筋、ハムストリングスなど、歩行中に重要な役割を果たす筋群の活動状態を評価した。また、膝 OA 患者では、関節安定性を補償するために筋活動パターンが変化する可能性があり、特に膝周囲筋の共同収縮増加や、荷重応答期における筋活動タイミングの変化などが確認された。

さらに、本研究では筋骨格解析に膝関節接触解析を統合した。推定された筋力および関節反力を入力条件として、膝関節有限要素モデルを用いた関節接触解析を実施した。有限要素モデルでは、大腿骨、脛骨、関節軟骨、半月板などを再現し、歩行中の接触圧力、軟骨変形、半月板応力などを計算した。特に、膝 OA では内側コンパートメントへの荷重集中や半月板負荷増加が病態進行と関連しているため、本解析を通じて膝関節内部の局所的力学環境を評価し

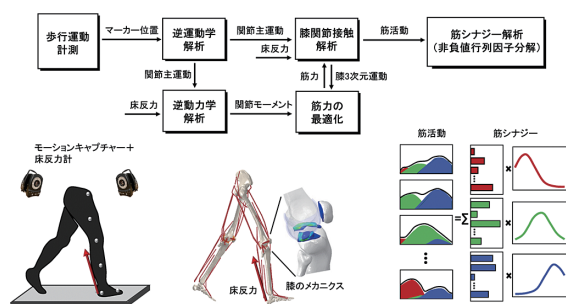


図2 筋シナジー解析

た。その結果、膝 OA 患者では歩行中に内側軟骨接触応力が増加する傾向が確認され、関節構造変化に伴う力学的負荷集中が示唆された。また、筋活動変化によって関節接触状態も変化することから、神経制御と関節負荷が密接に関連していることが明らかとなった。

本研究では筋シナジー解析を導入し、神経制御機構の評価を行った。筋シナジーとは、多数の筋活動を少数の協調活動パターンとして表現する概念であり、中枢神経系が運動を効率的に制御するための基本単位と考えられている。本研究では、推定された筋活動に対して非負値行列因子分解（NMF）を適用し、筋シナジーの抽出を行った。図2に示すように、複数筋の活動波形は、いくつかの筋シナジーとその時間的活動パターンの組み合わせとして再構成できる。本解析により、膝 OA 患者では健常者と比較して筋シナジー構造が変化し、一部の筋シナジーが統合・簡略化される傾向が確認された。また、膝 OA 進行に伴い、筋シナジーの活動タイミングが変化することで、関節安定化を目的とした代償的神経制御戦略が形成されている可能性が示唆された。

さらに、筋シナジー解析結果と膝関節接触解析結果を統合することで、神経制御変化と関節力学環境との関係性を検討した。その結果、筋シナジー変化による筋力分配の違いが、膝関節内接触応力分布に影響を与えることが確認された。特に、膝周囲筋の共同収縮増加は関節安定性向上に寄与する一方で、関節接触力増加を招く可能性があり、膝 OA 進行の一因となる可

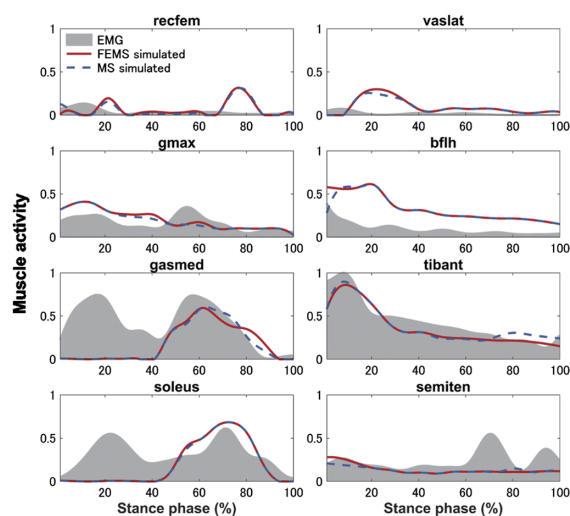


図3 歩行における下肢の筋活動性

能性が示唆された。これは、膝 OA における「関節構造変化—神経制御変化—関節負荷変化」の相互作用メカニズムを示す重要な知見である。

図3は、図は、歩行立脚期における主要下肢筋の筋活動パターンについて、実測筋電図（EMG）と、本研究で開発した有限要素筋骨格モデル（FEMS simulated）、および従来型筋骨格モデル（MS simulated）によるシミュレーション結果を比較したものである。横軸は歩行立脚期（0～100%）、縦軸は正規化した筋活動量を示している。灰色領域は被験者群における実測 EMG の平均値およびばらつきを示し、赤線は本研究モデル、青破線は従来型モデルの推定結果を示している。対象筋は、大腿直筋（recfem）、外側広筋（vaslat）、大殿筋（gmax）、大腿二頭筋長頭（bflh）、腓腹筋内側頭（gasmed）、前脛骨筋（tibant）、ヒラメ筋（soleus）、半腱様筋（semiten）であり、歩行中の下肢の運動、関節安定化に重要な役割を担う筋群である。

結果より、本研究で構築した有限要素筋骨格モデルは、従来型筋骨格モデルと比較して、実測 EMG に近い筋活動パターンを再現できることが確認された。特に、立脚初期から中期にかけての筋活動タイミングや活動量において、本研究モデルの推定結果は実測 EMG と良好に一

致していた。これは、本研究モデルが単なる剛体リンク構造ではなく、関節軟骨、半月板、接触力学などを考慮した有限要素解析を統合しているため、筋力推定時に関節内部の力学状態をより適切に反映できたことが要因と考えられる。

前脛骨筋 (tibant) では、立脚初期における活動ピークが実測 EMG とよく一致していた。前脛骨筋は踵接地直後に足関節底屈を制御し、足部接地を安定化させる役割を担う筋である。本研究モデルでは、この初期接地時の筋活動が良好に再現されており、歩行開始時の足関節制御メカニズムを適切に表現できていると考えられる。一方、従来型モデルでは時間や活動量にずれがみられ、筋活動の立ち上がりを十分に再現できていなかった。ヒラメ筋 (soleus) および腓腹筋内側頭 (gasmed) では、立脚後期における活動増加が分かった。これらの筋は立脚中期において足関節底屈モーメントを発生させ、身体を前方へ推進する重要な役割を持つ。本研究モデルでは、立脚後期の筋活動ピークが実測 EMG と比較的良好に一致しており、特に筋活動ピーク時期や活動持続時間が適切に再現されていた。一方、従来型モデルでは筋活動ピークが過大あるいは過小評価される傾向がみられ、歩行推進期の力学的再現性に限界があることが示唆された。これは、有限要素モデルによる関節接触状態の考慮が、筋力推定結果に影響を与えているためと考えられる。

また、大腿直筋 (rectfem) および外側広筋 (vaslat) では、立脚初期の荷重応答期において筋活動が増加していた。これらの筋は膝関節伸展に関与し、荷重支持および膝折れ防止に重要な役割を果たす。本研究モデルでは、実測 EMG に近い活動タイミングが確認された一方、一部の被験者では活動量のばらつきも存在した。これは、歩行速度、筋力、関節安定性などの個人差に加え、表面筋電図特有のクロストークやノイズの影響も含まれている可能性がある。しかし、全体として本研究モデルは膝伸展

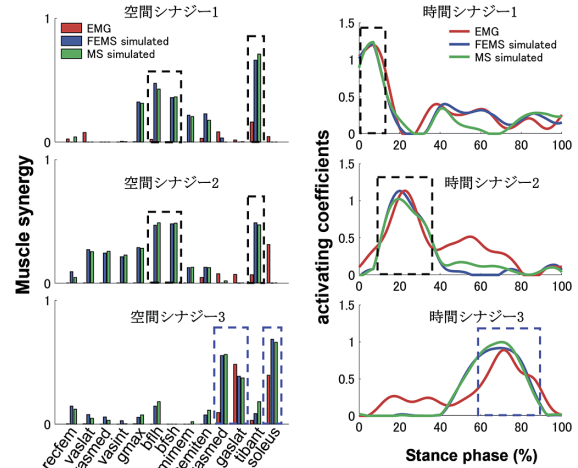


図4 歩行における下肢の筋シナジー

筋群の協調活動を概ね再現していた。

さらに、大腿二頭筋長頭 (bflh) および半腱様筋 (semiten) などのハムストリングス群では、立脚終期から遊脚初期にかけて活動増加がみられた。本研究モデルでは活動傾向自体は再現できているものの、実測 EMG との間に差異も確認された。ハムストリングスは二関節筋であり、股関節および膝関節の双方に影響を与えるため、筋付着位置や筋腱特性、神経制御戦略のわずかな違いが筋活動推定結果に影響しやすい。また、歩行中の共同収縮や個人特有の運動戦略も影響している可能性がある。

図4は、歩行立脚期における筋シナジー解析結果について、実測筋電図 (EMG)、本研究で開発した有限要素筋骨格モデル (FEMS simulated)、および従来型筋骨格モデル (MS simulated) を比較したものである。左側には各筋シナジーにおける空間シナジー (各筋の寄与割合)、右側には時間シナジー (歩行周期中の活動性) が示されている。対象筋は、大腿直筋、外側広筋、大殿筋、大腿二頭筋、前脛骨筋、腓腹筋、ヒラメ筋など、歩行中の主要下肢筋群である。

結果より、本研究で構築した有限要素筋骨格モデルは、従来型筋骨格モデルよりも実測 EMG に近い筋シナジー構造を再現できることが確認された。空間シナジー1では、立脚初期

に活動する大腿二頭筋および前脛骨筋の寄与が大きく、本研究モデルはこれらの筋活動バランスを実測結果に近い形で再現していた。一方、従来型モデルでは一部筋の寄与が過大評価される傾向がみられた。

空間シナジー 2 では、大腿二頭筋および前脛骨筋の協調活動が確認され、本研究モデルは筋活動分布を比較的良好に再現していた。さらに、空間シナジー 3 では、腓腹筋およびヒラメ筋の寄与が大きく、歩行後期の推進動作に関連する筋活動特徴が示された。本研究モデルでは、これらの筋群の活動比率が実測 EMG と近い傾向を示していた。

時間シナジー解析では、本研究モデルは筋活動ピークの発生タイミングや活動持続時間を良好に再現していた。特に、時間シナジー 1 では立脚初期の活動ピーク、時間シナジー 2 では荷重応答期から立脚中期にかけての活動、時間シナジー 3 では立脚後期の推進期に対応する活動が確認された。従来型モデルではピーク時期のずれや活動幅の違いがみられたのに対し、本研

究モデルでは実測 EMG に近い時間変化が得られた。

[成果の発表、論文など]

論文：

1. 王森彤, 長谷和徳, 船戸徹郎, 後十字靱帯断裂が膝関節に及ぼす生体力学的影響を評価するための筋骨格モデルの開発, 臨床バイオメカニクス, 46, 18-25, 2025.
2. S. Wang, I. Fujita, K. Yamauchi, S. Ota, K. Hase, Feature-based modeling of subject-specific lower limb skeletons from medical images, *Biomechanics*, 5(3), 63, 2025.

発表：

1. 櫻井翔, 佐川貢一, 大竹真央, 王森彤, AI 姿勢推定技術に基づく身体動作推定システムの開発, 第 36 回バイオフロンティア講演会 2025 年 12 月 7 日
2. 王森彤, 膝関節の接触挙動を考慮した筋骨格モデル, 日本臨床バイオメカニクス学会第 52 回学術集会 2025 年 11 月 7 日
3. S. Wang, R. Gong, K. Hase, Does anterior cruciate ligament rupture lead to changes in knee joint mechanics distribution? A single framework for the knee finite element musculoskeletal study The XXX Congress of the International Society of Biomechanics 2025 年 7 月 28 日