

令和 5 年 6 月 11 日現在

機関番号：33919

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K19362

研究課題名（和文）腱鞘炎発症メカニズム解明のための生体内力学シミュレータの開発

研究課題名（英文）Development of the biomechanical simulation system for the analysis of the mechanism of injury for tenosynovitis

研究代表者

横田 紘季（Yokota, Hiroki）

名城大学・理工学部・助教

研究者番号：50815876

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、ヒト解剖体を用いた軟部組織の力学計測や、筋骨格系モデルによる有限要素シミュレーションを用いた医工学領域からのアプローチによって、腱鞘炎の発症メカニズムを解明するための生体内力学シミュレーションシステムの開発を行った。ヒト解剖体前腕部における筋および腱の引張試験を行い、材料特性を明らかにすることで、有限要素シミュレーションの材料パラメータを決定した。構築した前腕部筋骨格モデルを用いたシミュレーション解析では、手関節運動や筋収縮と共に長母指外転筋腱の負荷が増大し、ドケルバン病の炎症部位と一致することが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、ヒト解剖体を用いた力学試験や有限要素シミュレーションによって、前腕部腱鞘炎に関する力学的負荷を解析可能な筋骨格シミュレーションシステムを構築した。シミュレーション解析より、筋収縮運動によって腱部負荷が増大した箇所と、実際の症例における炎症部位が一致することが示され、これにより、様々な症例における力学的発生メカニズムの解明や、疾患の危険因子となる動作を予測可能であることが示唆された。さらに、将来的に症状改善のためのリハビリ指針の提案や、治療に有効な専用装具の開発などの医工連携分野への展開の可能性を示すことができた。

研究成果の概要（英文）：In this study, we developed a biomechanical simulation system to elucidate the mechanism of tendinopathy by using mechanical measurements of soft tissues on cadaveric specimens and a finite element musculoskeletal model from the field of medical engineering. The material parameters for the finite element simulation were determined by conducting tensile tests of muscles and tendons in cadaveric forearms. Simulation analysis using the constructed musculoskeletal model showed that the load on the abductor pollicis longus tendon increased with wrist joint motion and forearm muscle contraction, consistent with the site of inflammation in de Quervain's tenosynovitis.

研究分野：バイオメカニクス

キーワード：筋骨格モデル 解剖体 有限要素シミュレーション 腱鞘炎

1. 研究開始当初の背景

前腕部の腱鞘炎は、手で道具を操る人間にとって宿命的な病気であり、日常生活と密接に関連する疾患である。ドケルバン病やインターセクション症候群などに代表される腱鞘炎は、スポーツやデスクワークなどの機械的反復刺激により、手首の腱と周囲の軟部組織との摩擦によって炎症を生じるものである。また腱鞘炎は難治性に移行しやすく、慢性化した場合にはステロイド注射や手術療法などの治療が必要となる。21世紀の現代、ライフスタイルの劇的な変化により、これらの疾患が数多く蔓延しており、「新現代病」とも呼ばれ社会的な問題となっている。前腕部腱鞘炎に関して、MRI による疾患評価や疫学調査、治療効果の比較といった研究は多くなされているが、疾患原因となる生体内の力学現象の定量化は進んでいない。これは、人体の手関節および前腕部構造が極めて複雑であり、センサーによる力学計測や、工学的モデル化による組織間相互作用力の推定が困難なためである。腱鞘炎の予防と治療のためには、筋や腱などの軟部組織に関する生体内現象の定量化が重要であり、力学的な負荷による発生メカニズムの解明が望まれている。

2. 研究の目的

本研究ではヒト解剖体を用いた軟部組織の力学計測や、筋骨格系モデルによる有限要素シミュレーションを用いた医工学領域からのアプローチによって、腱鞘炎の発症メカニズムを解明するための「生体内力学シミュレーションシステム」の開発を目指す。第一段階として、ヒト解剖体前腕部における筋・腱の引張試験を行い、材料特性を明らかにすることで、後述する有限要素シミュレーションの材料パラメータを決定する。第二段階として、ヒト前腕部の骨や筋、腱などを 3D モデル化し、有限要素法を適用することにより、手関節運動や筋収縮、軟部組織の変形挙動を解析可能な筋骨格シミュレーションシステムを構築する。本システムにより運動時における腱部の変形や負荷量の定量化を狙う。また筋収縮については、生体内で起こる能動的な筋収縮現象を再現するため、異方性材料を熱収縮させることで、筋腹の膨張を伴う能動的な張力の発揮様式を表現した。

3. 研究の方法

(1) ヒト解剖体を用いた筋・腱の力学評価

ヒト解剖体を対象に、前腕の伸筋群である長母指外転筋 (APL)、短母指伸筋 (EPB)、長橈側手根伸筋 (ECRL)、短橈側手根伸筋 (ECRB)、総指伸筋 (ED)、示指伸筋 (EI)、小指伸筋 (EDM)、尺側手根伸筋 (ECU)、長母指伸筋 (EPL) を採取し、引張試験を行うことで、有限要素シミュレーションで用いるモデルの材料パラメータを算出した。採取した筋と腱は水分を多く含むため、引張試験機と試験片の間にサンドペーパーを挟むことで筋や腱が滑らないように固定した。また、試験片は初期長さ 10 mm となるようにトリミングし、引張速度を 1.0 mm/s として試験を行った。

(2) 筋骨格有限要素モデルの構築

本研究では前腕部の力学解析に有限要素法 (Workbench 2021 R1, ANSYS Inc, USA) を用いた。構築した前腕モデルを図 1 に示す。モデルは尺骨、橈骨、上腕骨遠位部の骨と、APL、EPB、EPL、ECRL、ECRB、ED、EDM、EI、ECU の筋、腱から構成される。また、骨や腱、筋などは線形材料を適用した。モデル形状は BodyParts3D を参考にし、材料パラメータは引張試験の結果と既往研究を参考に決定した。構築した前腕部筋骨格モデルでは、手関節の掌屈・背屈・橈屈・尺屈に加え、前腕部の回内・回外を組み合わせた複合肢位と、各筋の膨張を伴う張力発揮様式を表現可能である。

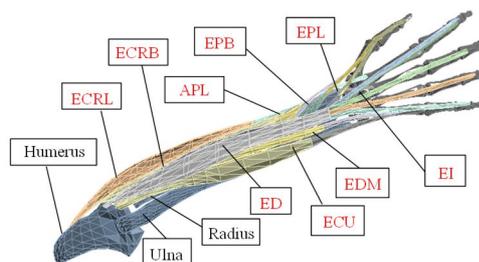


図 1 前腕部の筋骨格有限要素モデル

筋肉は収縮する際、収縮方向に対して垂直な方向に膨張する性質がある。その筋の挙動について、材料に直交異方性平均線膨張係数を適用することで表現する。図 2 のように各筋の長軸方向 (図内 y 方向) に負の線膨張係数を、短軸方向 (図内 xz 方向) に正の線膨張係数を適用することで、筋に熱荷重を加えた際、y 方向には収縮が、xz 方向には膨張が生じ、筋収縮を表現できる。また、それぞれの線膨張係数の比率を調整することで、体積を一定に保ち、生体構造に近い挙動を再現した。

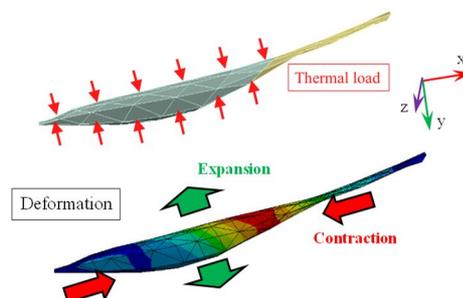


図 2 熱荷重による筋収縮の様子

本研究では、構築した各筋部を等尺性に熱収縮させることで、腱部に加わる応力やひずみ量を定量化する。また、上腕骨端を固定端として支持し、各腱部の腱鞘によって動きが制限される部分については局所座標系を定義して y 方向のみ変位可能な拘束条件を与えた。

4. 研究成果

(1) 前腕部伸筋群のヤング率測定

図 3 に筋線維部および腱部の引張試験の結果を示す。図 3 より、試験片ごとに力学特性が大きく異なることが確認できる。また、全体を通して筋線維部より腱部の剛性が高い結果となった。それぞれの試験片において、線形弾性領域の近似曲線を算出し、それらの傾きからヤング率を算出した。

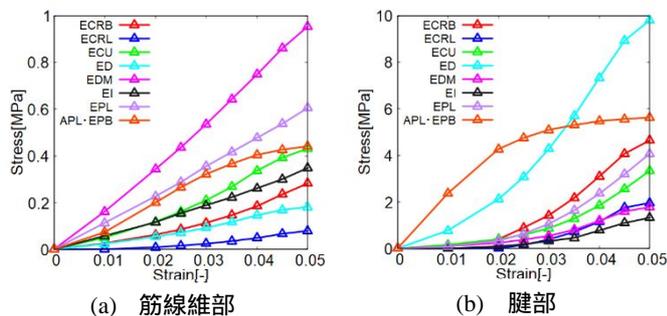


図 3 ヒト解剖体を用いた引張試験結果

(2) 等尺性収縮時における腱部負荷量の定量化

本研究では、日常的な筋収縮運動を想定し、各筋が持つ最大収縮力の 1/3 の張力となるように熱荷重を加え、等尺性収縮時に発生する各腱部にかかる最大応力を解析した。ここで、各筋の最大収縮力は解剖体を用いて計測した生理学的筋横断面積を基に決定している。シミュレーション結果を図 4 に示す。図 4 より、橈骨を横断するように走行する APL 腱が最大値を示し、逆に橈骨に対して並行に走行する EI 腱が最小値を示す結果となった。APL 腱はドケルバン病の炎症部位であり、日常的な筋収縮によっても負荷が増大することが示唆されたといえる。また、APL 腱の負荷増大と共に ECRL および ECRB の腱部にかかる最大応力が増大することが確認された。これは、APL と ECRL, ECRB の腱が互いに接触することでそれぞれの応力が大きくなったと考えられる。APL 腱とそれに相互作用力が発生した部位の応力分布を図 5 に示す。図 5 より、APL, EPB について、ECRL, ECRB と交差する位置において応力増大傾向が確認された。すなわち、筋収縮時に APL は EPB, ECRL, ECRB のそれぞれと相互作用を起こし、摩擦により発生する接触力によって交差部位に負荷が発生すると予想される。この腱交叉部位での腱鞘炎はインターセクション症候群と呼ばれており、実際の炎症部位と一致することが示された。

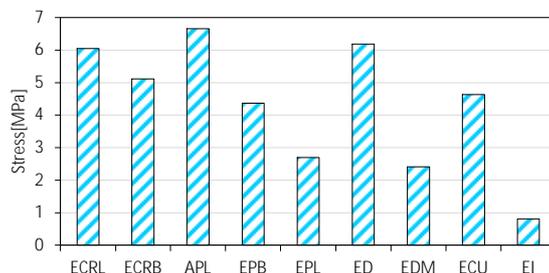


図 4 各腱における最大応力

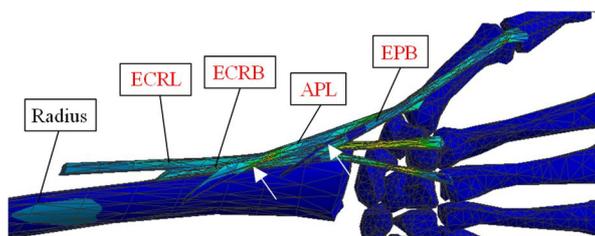


図 5 APL 腱周囲における応力分布

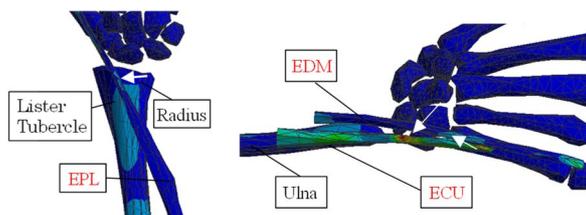


図 6 EPL および ECU 腱周囲における応力分布

次に、EPL, ECU に関する応力分布を図 6 に示す。図 6(a)より、EPL 腱と接する Lister 結節周囲に応力が発生していることが確認できる。すなわち橈骨の隆起部である Lister 結節に腱が回り込むように接触することで EPL 腱に負荷がかかり、応力が増大したと考えられる。実際の症例においても、EPL 腱が Lister 結節部で機械的摩擦を受けることにより、長母指伸筋腱断裂へと移行することが報告されており、本シミュレーションにおいても同様の負荷傾向が示されたといえる。

また、ECU に関する応力分布を図 6(b)に示す。図 6(b)より、尺骨茎状突起と ECU 腱との接触領域に応力集中が確認できる。この結果より、ECU の筋緊張によって尺骨茎状突起周囲と腱が強く接触し、それが繰り返されることで接触部に炎症が起こると考えられる。尺側手根伸筋腱の腱鞘炎は手首を酷使用するスポーツで頻発する疾患であり、本シミュレーションにおいても実際の負荷部位と一致する結果となった。

本研究では、腱部の炎症性疾患の発生機序について、有限要素法を用いた生体シミュレーションを行うことで、前腕筋群の相互作用や、筋収縮を考慮した際の腱部相当応力を求めた。今後の課題としては、モデルの詳細化や、手関節における様々な動きを考慮した解析を行い、腱部への負荷を定量化することが挙げられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 田澤卓, 大塚俊, 畑山直之, 内藤宗和, 大島成通, 横田紘季
2. 発表標題 肩関節周囲組織の力学特性を考慮した解剖学的動力学モデルの開発
3. 学会等名 日本機械学会東海支部第 71 期講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤辰哉, 内藤宗和, 横田紘季
2. 発表標題 前腕筋群の相互作用を考慮した有限要素シミュレーションによる腱鞘炎発生機序の解明
3. 学会等名 日本機械学会東海学生会 第54回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2023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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------