

平成 30 年 5 月 25 日現在

機関番号：20101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26350619

研究課題名(和文) 定量的な組織性状マッピングに基づくヒト骨格筋の可塑性評価と運動療法の基盤形成

研究課題名(英文) Quantified mechanical properties of human skeletal muscle using noninvasive shear wave imaging and development of therapeutic exercise

研究代表者

谷口 圭吾 (TANIGUCHI, KEIGO)

札幌医科大学・保健医療学部・准教授

研究者番号：90381277

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)：骨格筋の機械的な特性を反映する性状の把握は、病態解明や理学療法プログラムの考案に有用である。本研究は最新超音波技術を用いて筋弾性を可視化・定量化し、弾性評価の妥当性や機能的な意義および臨床応用の可能性を検討することを目的とした。その結果、皮膚や筋膜の存在や筋線維の配向が弾性計測に影響を与えることが明らかになった。また、関節運動時の弾性変化を測定することで、筋張力発揮を推定できる可能性および運動療法や外科的治療による筋組織性状の可塑的な変化を評価できることが示された。

研究成果の概要(英文)：We aimed to visualize and quantify muscle elasticity using the innovative ultrasonic technology, and to investigate the validity and functional significance of elasticity evaluation and the possibility of clinical application. As a result, skin and fascia and orientation of muscle fibers could affected elastic measurement. In addition, it was shown that the measurement of muscle stiffness during joint movement would estimate change in individual muscle force and muscle responses to therapeutic intervention and surgical treatment of musculoskeletal injuries may be evaluated.

研究分野：生体機能評価学

キーワード：骨格筋 粘弾性 理学療法 リハビリテーション バイオメカニクス 医用イメージング

1. 研究開始当初の背景

リハビリテーションを展開するうえで、骨格筋の形態や機能のみならず、組織性状といった筋の機械的特性の可塑性解明とその定量評価法の確立は、運動機能障害の病態解明や早期発見に加え、効果的な運動療法の基盤構築に不可欠である。近年、筆者は生体組織の弾性特性の高精度な絶対定量が可能な最新超音波技術を駆使し、ヒト生体の筋組織における剪断弾性係数の直接的な評価の可能性を検討してきた。しかし、以下のような問題を抱えていた。骨格筋の性状評価は、標的筋内の筋腹部位といった局所レベルに留まっており、筋内の不均一性は検討できていない。剪断波に基づく筋弾性計測の測定原理を考慮すると、皮膚組織の影響を無視できない可能性や伝播する波と筋線維の方向が一致していない為に羽状筋の弾性を捉えられていない可能性がある。これまでに生体に多く在る羽状筋を対象として、組織性状を捉える事の機能的意義の探索は不十分であった。また、筋組織の弾性特性に及ぼす疾病および運動の影響に関して十分に解明されていない現状であった。

2. 研究の目的

本研究では、ヒト骨格筋の組織性状における可塑性を解明すること、筋弾性の定量評価法の確立および運動療法の基盤形成に向けて、以下の点を目的とした。

(1) ヒト生体・屍体の羽状筋の弾性特性を可視化・定量し、筋弾性計測の妥当性を検証する。

(2) 関節角度や関節トルクと羽状筋の剪断弾性係数の関連性を分析し、超高速超音波法を用いた筋性状評価の機能的意義を明らかにする。

(3) 筋骨格系の疾病や運動療法による筋組織性状の可塑的な変化を観察し、筋弾性評価法の臨床的有用性を検討する。

3. 研究の方法

(1) 筋組織の機械的特性を定量する超音波せん断波エラストグラフィ技術を用い、筋弾性評価の妥当性を明らかにした。ヒト生体と類似した性状が保持される Thiel 法固定遺体を研究資料とし、皮膚や筋膜および筋束角度が弾性計測に与える影響を分析した。筋組織弾性の測定は、音響放射圧を用いて關心領域に微小な変位を起こさせ、その際に発生する剪断波を超高速なフレームレートでキャプチャーする先駆的技術を用いる。計測は剪断波の伝播速度、ヤング率および剪断弾性率を求めて直接的に弾性特性を定量し、カラーマップ画像でリアルタイムに表示した。

(2) 健常成人男性を対象とし、被験筋は下腿三頭筋や内転筋をはじめとした下肢筋とした。足関節や股関節の他動運動および自動運動を実施することで、羽状筋の伸長特性（受動張力）や活動特性（活動張力）と組織弾性との関係性を分析した。

(3) 筋弾性に及ぼす運動療法および病態の影響を検証し、組織性状の可塑的な変化を調査した。運動療法はストレッチングをおこない、試行前後の比較と経時変化を検討する。また、病態が筋弾性に及ぼす影響は、膝関節術後症例やアキレス腱断裂症例を対象に弾性計測を行い、患側と健側および健常者を比較検討した。

4. 研究成果

(1) 超音波せん断波エラストグラフィ法による筋組織弾性の定量的な臨床評価法の確立に向けて、羽状筋の腓腹筋を対象に弾性計測の妥当性検証を進めた。筋線維に対して超音波プローブが角度を呈した状態と平行な状態の2条件で比較した結果、角度のある状態で筋弾性が10%程度高くなることが明らかとなった。また、皮膚や筋膜の除去の前後で筋の弾性を観察した結果、除去後に筋弾性が顕著に減少することが確認された。これらの知見により、超音波技術を用いた骨格筋

の定量的な弾性評価を実施する場合には、筋線維の配列状態や筋実質の表層に介在する皮膚等の影響を考慮する必要のあることが示唆された。

(2) 運動療法で頻繁に施行される下腿筋群のストレッチングの介入効果を検討した結果、関節柔軟性の増加は安静時筋弾性の低下に起因することが明らかになった。一方、その低下現象は20分以内に消失することが明らかとなった。関節可動性と筋弾性の関係は、足関節の他動的な背屈角度と腓腹筋の安静時弾性との相関分析により検討した。その結果、背屈角度と腓腹筋の弾性係数との間には負の相関関係(-0.74 ~ -0.67)にあることが明らかとなった。このことから、安静時の筋スティフネスが低いほど関節柔軟性は高い可能性のあることが示された。

(3) 筋弾性に及ぼす股関節・足関節角度の影響をみた検討では、股関節角度の変化に伴って筋スティフネスは筋間で異なるパターンが示され、運動動作時に損傷の多い股伸展域で長内転筋に発生する力学的なストレスは大内転筋よりも高いこと、筋収縮時の腓腹筋の弾性は足関節底屈角度の増加に伴い顕著に減少するが、ヒラメ筋は足関節角度にあまり左右されず、深い底屈時にも発揮張力が保持されることが推察された。

(4) 骨格筋の受動的な弾性特性に不均一性が存在するかを検討した。その結果、大腿直筋では股関節0°、90°条件とも膝関節の屈曲運動時で近位部が中央部、遠位部よりも有意に高値を示した。膝屈曲位に伴う受動的な弾性増加は部位間で異なるパターンを示すことから大腿直筋の受動張力には筋内部位差が存在する可能性が示唆された。

(5) サッカー競技において筋損傷に関係する長内転筋、大腿二頭筋、下腿三頭筋における筋スティフネスの特徴を検討した。その結果、長内転筋の弾性は伸長位で左が有意に高値を示し、一方で他の筋では左右差を認

めなかった。長内転筋の他筋と異なる力学的特性は競技に特徴的な内転筋損傷の発生メカニズムと関連している可能性がある。

(6) 股関節屈曲角度が股屈曲運動における長内転筋の収縮時弾性に及ぼす影響を検討した。その結果、股関節屈曲運動に伴う筋弾性は、股関節角度の影響を大きく受け、伸展20°～屈曲20°でより高値を示した。このことから、股関節屈曲運動に伴う長内転筋の力学的ストレスは伸展域～浅屈曲域で高くなる可能性が示唆された。本知見はスポーツ動作における筋損傷メカニズムを解明するための基盤情報になりうると思われる。

(7) アキレス腱縫合術後の症例検討では、収縮時の筋スティフネスは術後、腱スティフネスよりも早期に健側と同程度となったが、足関節底屈トルクは一樣に患側で小さい傾向にあった。したがって、アキレス腱縫合術後の発揮トルク低下は必ずしも筋の収縮能不全と一致するとは言えず、足関節底屈機能の把握には腱組織の力学特性も含めた包括的な評価を実施することが望ましい可能性がある。

(8) 臨床応用の有用性を探る目的で、膝関節術後症例における大腿四頭筋弾性の定量評価を試みた。その結果、膝関節術後患者では安静時における患側の筋弾性は健側と比較して差がみられないものの、大腿四頭筋の随意的な収縮時は患側の弾性が健側より有意に低値を示し、患側の筋は健側の35～60%に相当していた。このことは手術時の組織侵襲が起因となって生じる筋の収縮能低下を反映する可能性がある。超音波エラストグラフィ技術の応用によって運動制約の強い術後早期においても、弾性計測に基づき発揮筋力の程度を推定できる画期的な臨床評価ツールとなりうることが予想された。

(9) 前十字靭帯再建術後症例を対象に膝蓋腱採取後の受動的な腱弾性変化を検討した結果、健側および患側の腱内外側部は、

膝関節屈曲に伴い弾性率の増大がみられたものの、患側の中央部は屈曲に伴う明らかな弾性変化を認めなかった。したがって腱採取部の力学特性は、術後6ヶ月では回復しない可能性がある。このような患側における膝蓋腱の弾性分布が健側と異なったことは、術後早期における腱組織での力学負荷の不均衡を示唆し、術後合併症の病態に関する基礎的知見になると推察された。

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10件)

1. Kinugasa R, Taniguchi K, Yamamura N, Fujimiya M, Katayose M, Takagi S, Edgerton VR, Sinha S. A Multi-modality Approach Towards Elucidation of the Mechanism for Human Achilles Tendon Bending During Passive Ankle Rotation. *Sci Rep*. 2018, 8: 4319. DOI:10.1038/s41598-018-22661-7 査読有
2. 菊川大輔, 谷口圭吾, 加藤拓也, 片寄正樹: 股関節屈曲運動時における長内転筋の筋スティフネスに及ぼす股関節屈曲角度の影響. *日本基礎理学療法学雑誌*. 2017, 20: 60-68. 査読有
3. 小林匠, 谷口圭吾, 加藤拓也, 金谷耕平, 片寄正樹. 足関節底屈角度変化が下腿三頭筋の動的筋弾性に及ぼす影響. *日本整形外科超音波学会誌*. 2017, 28: 56-61. 査読有
4. 加藤拓也, 谷口圭吾, 佐保泰明, 池田祐真, 金谷耕平, 片寄正樹. 股関節角度が長内転筋および大内転筋の受動的な弾性率に及ぼす影響. *日本整形外科超音波学会誌*. 2017, 28: 34-42. 査読有
5. 谷口圭吾: 【筋メカニクス研究の最前線】超高速超音波イメージングによる筋組織性状の可視化. *日本基礎理学療法学雑誌*. 2016, 19: 17-24. 査読無
6. Yoshitake Y, Miyamoto N, Taniguchi K, Katayose M, Kanehisa H: The skin acts to maintain muscle shear modulus. *Ultrasound in Med & Biol*. 2016, 42: 674-682. DOI:10.1016/j.ultrasmedbio.2015.11.022 査読有
7. 谷口圭吾, 加藤拓也, 野崎修平, 河合誠, 片寄正樹, 山下敏彦: 超音波エラストグラフィによる筋硬度評価. *整形・災害外科*. 2016, 59: 211-215. 査読無
8. 谷口圭吾: 【骨格筋研究の最前線】超音波エラストグラフィによる筋組織弾性の可視化. *トレーニング科学*. 2015, 26: 51-60. 査読無
9. Taniguchi K, Shinohara M, Nozaki S, Katayose, M. Acute decrease in the stiffness of resting muscle belly due to static stretching. *Scand J Med Sci Sports*. 2015, 25: 32-40. DOI:10.1111/sms.12146 査読有
10. 谷口圭吾. Ultrasound shear wave elastographyによる筋硬度評価. *Sportsmedicine*. 2014, 26: 20-26. 査読無

[学会発表] (計12件)

1. 佐保泰明, 谷口圭吾, 加藤拓也, 笹原潤, 片寄正樹. サッカー選手における股関節内転筋のスティフネスの特徴. 第28回日本臨床スポーツ医学会. 国立オリンピック記念青少年総合センター(東京). 2017.11.18.
2. 野宮杏奈, 小林匠, 谷口圭吾, 金谷耕平. 下腿三頭筋ストレッチングと温熱療法の併用が腓腹筋の筋硬度に及ぼす影響. 第29回日本整形外科超音波学会. ステーションコンファレンス東京(東京). 2017.7.1.

3. 谷口圭吾：【先端的計測手法によるバイオメカニクス研究の新たな可能性】剪断波エラストグラフィによる筋組織の弾性評価. 第43回日本臨床バイオメカニクス学会. 北海道立道民活動センターかでの2・7 (札幌) . 2016. 10. 8.
 4. 河合誠, 谷口圭吾, 鈴木智之, 片寄正樹, 渡邊耕太, 山下敏彦：BTB採取後の膝蓋腱弾性の定量評価. 第43回日本臨床バイオメカニクス学会. 北海道立道民活動センターかでの2・7 (札幌) . 2016. 10. 8.
 5. 谷口圭吾, 河合誠, 加藤拓也, 片寄正樹：アキレス腱縫合術後症例における腱・腓腹筋の組織弾性の経時変化. 第71回日本体力医学会. いわて県民情報交流センター (盛岡) . 2016. 9. 24.
 6. 谷口圭吾：【ストレッチングの理論と実際】筋硬度からみたストレッチングの有効性. 第65回東日本整形災害外科学会. ザ・プリンス箱根芦ノ湖 (箱根) . 2016. 9. 22.
 7. 谷口圭吾：超音波エラストグラフィが拓く骨格筋評価の新たな世界. 第66回北海道理学療法士学術大会. 旭川市民文化会館 (旭川) . 2015. 11. 1.
 8. 谷口圭吾：【筋メカニクス研究の最前線】超高速超音波イメージングによる筋組織性状の可視化. 第2回日本基礎理学療法学会・日本基礎理学療法学会第20回学術大会合同学会. 神奈川県立保健福祉大学 (横須賀) . 2015. 11. 15.
 9. Taniguchi K, Nozaki S, Katayose M：Resting muscle stiffness measured with ultrasound shear-wave elastography after static stretching. World Confederation for Physical Therapy Congress 2015. Suntec Singapore Convention & Exhibition Centre (Singapore) . 2015. 5. 4.
 10. 谷口圭吾, 加藤拓也, 衣笠竜太, 藤宮峯子, 片寄正樹：腱弾性の空間分布に及ぼす体表組織の影響. 第70回日本体力医学会. 和歌山県民文化会館 (和歌山) . 2015. 9. 18.
 11. 谷口圭吾, 野崎修平, 片寄正樹：筋組織の剪断弾性に及ぼすストレッチングの急性効果. 第69回日本体力医学会. 長崎大学 (長崎) . 2014. 9. 21.
 12. 谷口圭吾, 金谷耕平, 片寄正樹：剪断波エラストグラフィを用いたストレッチング時の下腿筋スティフネスの定量. 第26回日本整形外科超音波学会 ブリーゼプラザ (大阪) . 2014. 7. 5.
- 〔図書〕 (計 1 件)
1. 谷口圭吾, 加藤拓也：検査評価総論, 2 . 医用画像エコー(エラストグラフィ). スポーツ理学療法プラクティス. 文光堂, 東京. p2-11, 2017.
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
谷口 圭吾 (TANIGUCHI, Keigo)
札幌医科大学・保健医療学部・准教授
研究者番号：90381277
 - (2) 研究分担者
なし
 - (3) 連携研究者
なし