

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：20101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18K10715

研究課題名（和文）剪断波イメージングによる次世代の筋メカニクス可塑性評価の開発と運動療法の基盤創出

研究課題名（英文）Quantitative assessment of muscle mechanics 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・教授

研究者番号：90381277

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：ヒト骨格筋の機械的な特性を反映する筋性状、筋メカニクスの把握は、運動機能障害の病態解明や高度な理学療法プログラムの考案に不可欠である。本研究は最新超音波イメージングを用いて筋の力学特性を可視化・定量化し、粘弾性評価の妥当性や機能的な意義を検討することを目的とした。その結果、筋弾性は関節受動トルクや筋実質の力学的ストレスと強く関連することが明らかになった。また、ストレッチングが筋組織の粘弾性に与える影響を調査することで、筋メカニクス評価の臨床的有用性や運動療法の基盤形成につながる知見が示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、筋弾性の生体力学的な意義を解明し、臨床現場での活用が期待できる次世代の筋弾性評価法の有用性と高度なリハビリテーションの実践に重要な筋メカニクスの可塑性を多角的に明らかにした。骨格筋の性状を表す機械的特性、即ち筋メカニクスの定量評価は運動療法の基盤構築や運動機能障害の病態解明に寄与する。

研究成果の概要（英文）：Understanding muscle mechanics, which reflects the mechanical properties of human skeletal muscle, is essential for elucidating the pathophysiology of movement dysfunction and advanced physiotherapy programs. The purpose of this study was to visualize and quantify the mechanical properties of muscle using the innovative ultrasound imaging, and to examine the validity and functional significance of viscoelasticity assessment. The results revealed that muscle elasticity is strongly related to joint passive torque and mechanical stress in human muscle. In addition, by investigating the effects of stretching on viscoelasticity of muscle tissue, findings were presented that could lead to the clinical usefulness of muscle mechanics assessment and form the basis of exercise therapy.

研究分野：理学療法評価学

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

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

加齢や疾病が骨格筋の形態や機能に著明な変化をもたらすことは認知されているが、筋組織の性状(物性)に及ぼす影響は、临床上、主に触診で得る定性的な理解に留まっており、この方法論上の制約により不明な点が多い。一方、病変で生じる組織の硬化に代表される性状の変化は、形態学的な変化の前から発現することが明らかになっている。したがって骨格筋の形態や機能のみならず、性状を表す機械的な特性、筋メカニクスの可塑性解明と定量評価法の確立は、高度なリハビリテーションの展開に不可欠である。

これまでは筋メカニクスの指標となる組織弾性を超音波剪断波イメージングによって可視化定量し、その評価が運動療法の考案や運動機能障害の病態解明に有効であることを確認しつつも、筋の弾性、筋スティフネスが主にコラーゲン含量の多い筋内の結合組織に影響されており、前述の剪断波イメージングによって得られたヒト骨格筋の組織弾性を規定する因子は未だ特定できていない。本来、骨格筋は不均一な構造をもつ粘弾性体であるが、現在のイメージングは弾性の定量的評価に留まり、筋組織特有の方向依存性や周波数依存性を考慮した筋メカニクスの包括的な可塑性評価に至っていない現状であった。

### 2. 研究の目的

本研究では、筋組織が本来もつ不均一な粘弾性体という特徴および音響放射圧法による弾性計測特有の課題を踏まえ、以下の点を目的とした。

- (1) 超音波剪断波イメージング技術を用いて筋弾性の規定因子を検証し生体力学的な意義を解明する。
- (2) 音響放射圧法を応用した臨床現場での活用が期待できる汎用性と定量性の高い次世代の筋弾性評価法の有用性を検討する。
- (3) 筋組織固有の異方性や粘性を含む筋メカニクスの可塑性を多角的に明らかにする。

### 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、ヒト大腿直筋や長内転筋を対象に筋スティフネスと筋伸長に伴う受動張力の関係性を検討した。対象筋の近位・遠位腱を切離して取り出し、力学試験装置を利用した漸増負荷の伸長課題を行い、筋の近位・中央・遠位のスティフネスをせん断波エラストグラフィで測定した。

(2) 筋弾性の局在特性と関節受動トルクの関係性を分析するため、膝関節の他動的屈曲運動時の膝伸展トルクおよび大腿直筋の弾性率を記録した。また、献体を対象に皮膚および深筋膜が大腿直筋の弾性に与える影響を検討した。超音波せん断波イメージングを用いて筋弾性を筋の近位部、中央部、遠位部で測定した。

(3) 外的圧迫が等尺性収縮時の筋弾性に及ぼす影響を検討した。若年健常人の腓腹筋内側頭を対象とし、膝伸展  $0^\circ$  で足関節中間位での等尺性底屈運動を最大随意収縮の 0%、20%、40%、60%で実施した。装着条件は装着無し、下腿スリーブ装着の 2 条件とした。

(4) 超音波せん断波イメージング技術を用いて、ヒト骨格筋の粘弾性に及ぼす静的なストレッチの影響を検討した。対象は健常若年男性の腓腹筋内側頭や長内転筋とした。運動課題は他動的な足関節最大背屈位を 5 分間保持する静的なストレッチ運動とした。筋縦断面の筋束を分析の関心領域とし、運動介入の前後および施行後 5、10、15、20 分後に、粘性に関連するせん断波の周波数分散性、スティフネスに関連する弾性率を測定した。

### 4. 研究成果

(1) 筋弾性の局在特性と関節受動トルクの関係性を検討することを目的に、膝関節の他動的屈曲運動時の膝伸展トルクおよび大腿直筋の弾性率を記録した。その結果、筋弾性は交互作用(角度×筋内部位)がみられ、膝深屈曲位で近位部が中央・遠位部よりも有意に高値を示すことから、膝屈曲に伴い生じる受動張力は筋内で不均一となる可能性が明らかとなった。さらに、弾性-トルク関係は有意な正の相関 ( $r=0.89-0.96$ ) を認めたため、膝伸展受動トルクは大腿直筋の力学的なストレスと強く関連することが示唆された。

(2) ヒト大腿直筋を対象に筋スティフネスと筋伸長に伴う受動張力の関係性を検討した。固定遺体から対象筋の近位・遠位腱を切離して取り出し、力学試験装置を利用した漸増負荷の伸長課題を行い、筋の近位・中央・遠位のスティフネスをせん断波エラストグラフィで測定した。その結果、3 部位全てで回帰式は有意であり、正の相関関係を認めた。決定係数は近位部で 0.97、中央部で 0.95、遠位部で 0.80 と強い直線関係がみられた。この知見から剪断波を用いた筋弾性率の定量から受動張力を推定評価できる可能性が示唆された。

(3) 超音波せん断波イメージング技術を用いて、ヒト骨格筋の粘性に及ぼす静的なストレッチングの影響を検討した。対象は健康若年男性の腓腹筋内側頭とした。運動課題は他動的な足関節最大背屈位を5分間保持する静的なストレッチ運動とした。筋縦断面の筋束を分析の関心領域とし、運動介入の前後および施行後5, 10, 15, 20分後に、粘性に関連するせん断波の周波数分散性、スティフネスに関連する弾性率を測定した。その結果、腓腹筋の弾性率は運動前(106 kPa)に比して、運動直後(78 kPa)に低減(-26%)が認められ、20分後まで有意に低値を示した。一方、周波数分散性は運動前(36 m/s/kHz)に比して、運動直後(26 m/s/kHz)に最も低減(-25%)するが、15分以降は有意な差を認めなかった。静的なストレッチングは筋スティフネスのみならず、筋組織の粘性にも即時的な効果をもたらす可能性が示唆された。これらの知見は剪断波イメージングを用いた筋メカニクス評価の臨床的有用性の解明に繋がる基盤になりうると考える。

(4) 献体を対象に皮膚および深筋膜が大腿直筋の弾性に与える影響を検討した。超音波せん断波イメージングを用いて筋弾性を筋の近位部、中央部、遠位部で測定した。その結果、いずれの部位、組織処理下においても、膝屈曲に伴い筋弾性率は増加した。膝120°位における皮膚有および皮膚剥離条件の平均弾性は、生体での報告と同様に近位部が高値を示す一方、深筋膜の剥離によって弾性は低下し、3部位とも同程度の値となった。したがって深筋膜が筋弾性変化の不均一性に関与する可能性が示唆された。

(5) 静的ストレッチングが内転筋群の筋スティフネスに及ぼす急性効果を検討した。対象は健康成人男性とし、ストレッチングは股屈曲0°および膝屈曲90°における股関節最大外転位にて1分間×5セット実施した。ストレッチング介入前後の最大股関節外転角度および他動的な外転0°から40°までの弾性率を計測した。その結果、介入後の最大外転角度は、介入前と比較して有意に増加した(+6.9%)。長内転筋は交互作用を認め、外転40°にて介入後の弾性率(19.4kPa)は介入前(24.4kPa)と比較して有意に低下した(-20.4%)。一方、薄筋、大内転筋は、有意な交互作用および時間の主効果を認めなかった。今回の股関節外転ストレッチングは、最大外転角度を増大させ、長内転筋の受動的なスティフネスを低下させる一方、薄筋および大内転筋には影響を与えないことが示された。

(6) 献体を対象に長内転筋に0gから600gまで重錘負荷を加え、せん断波エラストグラフィを用いて筋の近位、中央、遠位部で弾性率を計測した。その結果、筋弾性率と伸長負荷の関係は、いずれの部位においても有意に強い線形関係を示した(決定係数、近位;0.989, 中央;0.986, 遠位;0.983)。弾性増加率と筋重量は、有意に強い負の相関関係を認めた( $r = -0.729$ )。同様に弾性増加率と筋断面積も中等度の負の相関関係を認めた( $r = -0.413$ )。筋弾性の定量により筋の張力変化を推定評価でき、弾性-力関係の傾きに相当する弾性増加率は、形態特性に関連することが明らかとなった。

(7) 外的圧迫が等尺性収縮時の筋弾性に及ぼす影響を検討した。若年健康人の腓腹筋内側頭を対象とし、膝伸展0°で足関節中間位での等尺性底屈運動を最大随意収縮(MVC)の0%, 20%, 40%, 60%で実施した。装着条件は装着無し、下腿スリーブ装着の2条件とした。筋縦断面の筋束を関心領域に弾性率を測定した結果、筋弾性は収縮強度と装着条件の交互作用を認めた( $P < 0.05$ )。スリーブ装着時の弾性率は装着なし条件と比較し、安静時(0%)では差を認めないものの、20%(減少率:-5.1%), 40%(減少率:-10.7%), 60%MVC(減少率:-16.3%)において低値を示した。したがって骨格筋の外的圧迫は筋収縮に伴う弾性増加を抑制することから筋の力学ストレスを緩和する可能性が示唆された。

(8) 足関節角度の変化と静的ストレッチングがヒト生体における腓腹筋内側頭の弾性および粘性に与える影響を調査した。対象は若年健康人とし、被検筋は腓腹筋内側頭とした。剪断波エラストグラフィ搭載超音波装置を用いて下腿長の近位30%における長軸像で撮像した。肢位は腹臥位で股、膝関節は伸展0°とした。足角度の操作はダイナモメーターを使用し、他動的に底屈30°、底屈15°、背屈0°でそれぞれ保持した。静的ストレッチングでは他動的に足背屈最終域を1分間保持する課題を5回実施した。その結果、弾性は交互作用および角度の主効果を認め、背屈0°でストレッチング後の弾性が14.2%有意な低下を示した。粘性では交互作用および時間の主効果はみられず、角度の主効果のみが認められた。角度要因の検討として、弾性では角度変化に伴い弾性は増加し、各角度間で有意な差を認めた。一方、粘性では底屈30°と15°の間には差を認めず、背屈0°が底屈30°と15°よりも有意に高値を示した。筋弾性は足背屈に伴い弾性が増加し、筋伸長位でストレッチング効果が確認された。一方、粘性では有意なストレッチング効果がみられず、足角度変化による影響も弾性と一部異なった。剪断波エラストグラフィで得られる弾性と粘性はそれぞれ筋の異なる力学的性質を評価しており、粘性は静的ストレッチングによる変化が少ない可能性が示唆された。これらの知見は剪断波イメージングを用いた筋メカニクス評価の臨床的有用性の解明と運動療法の基盤形成に繋がると思われる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Kodesho T, Kato T, Nakao G, Yokoyama Y, Saito Y, Watanabe K, Ohsaki Y, Katayose M, Taniguchi K	4. 巻 -
2. 論文標題 Effects of Superficial Tissue and Intermuscular Connections on Rectus Femoris Muscle Shear Modulus Heterogeneity	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 J Ultrasound	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) 10.1007/s40477-022-00769-x	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 Kato T, Taniguchi K, Kodesho T, Nakao G, Yokoyama Y, Saito Y, Katayose M	4. 巻 35
2. 論文標題 Adductor longus: An anatomical study to better understand groin pain	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Clin Anat	6. 最初と最後の頁 867-872
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/ca.23881	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 Yokoyama Y, Kodesho T, Kato T, Nakao G, Saito Y, Taniguchi K	4. 巻 5
2. 論文標題 Effect of chest mobilization on intercostal muscle stiffness	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Curr Res Physiol	6. 最初と最後の頁 429-435
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.crphys.2022.10.002	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 -

1. 著者名 Kato T, Taniguchi K, Kikukawa D, Kodesho T, Katayose M	4. 巻 56
2. 論文標題 Effect of hip flexion angle on stiffness of the adductor longus muscle during isometric hip flexion	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 J Electromyogr Kinesiol	6. 最初と最後の頁 102493
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jelekin.2020.102493	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 Kodesho T, Taniguchi K, Kato T, Mizoguchi S, Yamakoshi Y, Watanabe K, Fujimiya M, Katayose M	4. 巻 48
2. 論文標題 Relationship between shear elastic modulus and passive force of the human rectus femoris at multiple sites: a Thiel soft-embalmed cadaver study	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 J Med Ultrason	6. 最初と最後の頁 115 - 121
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10396-020-01076-w	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 Kodesho T, Taniguchi K, Kato T, Katayose M	4. 巻 121
2. 論文標題 Intramuscular differences in shear modulus of the rectus femoris muscle during passive knee flexion	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Eur J Appl Physiol	6. 最初と最後の頁 1441 - 1449
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00421-021-04644-1	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 -

〔学会発表〕 計16件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 加藤拓也, 谷口圭吾, 小出所大樹, 中尾学人, 横山祐, 齋藤佑平, 片寄正樹
2. 発表標題 関節運動に伴う股関節内転筋群の力学的な特性評価
3. 学会等名 第3回日本運動器理学療法超音波フォーラム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kodesho T, Taniguchi K, Yamagata K, Kato T, Nakao G, Yokoyama Y, Saito Y, Fukuyo C, Katayose M
2. 発表標題 Does external compression of skeletal muscle with a support belt reduce passive muscle elongation stress?
3. 学会等名 2022 ACSM Annual Meeting & World Congresses (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Nakao G, Taniguchi K, Kato T, Kodesho T, Yokoyama Y, Saito Y, Katayose M
2. 発表標題 Relationship between shear elastic modulus and passive force in human hamstring muscles: a Thiel soft-embalmed cadaver study
3. 学会等名 2022 Congress of the International Society of Electrophysiology and Kinesiology (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中尾学人, 谷口圭吾, 加藤拓也, 小出所大樹, 横山祐, 斎藤佑平, 片寄正樹
2. 発表標題 ハムストリングス各筋における筋弾性変化と筋重量および筋横断面積の関係
3. 学会等名 第33回日本臨床スポーツ医学会学術集会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 谷口圭吾, 小出所大樹, 飯田尚哉, 片寄正樹
2. 発表標題 画像評価から診る運動器のスティフネスと力学ストレスの関係性
3. 学会等名 第76回日本体力医学会大会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 谷口 圭吾
2. 発表標題 超音波せん断波を用いた骨格筋の弾性評価と臨床応用の可能性
3. 学会等名 日本超音波骨軟組織学会第41回東日本支部学術集会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kodesho T, Taniguchi K, Kato T, Katayose M
2. 発表標題 Intramuscular difference in mechanical properties of rectus femoris muscle and muscle stiffness-passive knee extension torque relationship during passive knee flexion: An ultrasound shear wave elastography study
3. 学会等名 XXIII Congress of the International Society of Electrophysiology and Kinesiology (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kato T, Taniguchi K, Kikukawa D, Kodesho T, Katayose M
2. 発表標題 Effect of hip flexion angle on the stiffness of the adductor longus muscle during isometric hip flexion and extension
3. 学会等名 XXIII Congress of the International Society of Electrophysiology and Kinesiology (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小出所大樹, 谷口圭吾, 加藤拓也, 藤宮峯子, 片寄正樹
2. 発表標題 皮膚および深筋膜が大腿直筋の弾性率に与える影響 - 筋内部位差に着目して -
3. 学会等名 第75回日本体力医学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 加藤拓也, 谷口圭吾, 小出所大樹, 渡邊耕太, 片寄正樹, 山下敏彦
2. 発表標題 静的ストレッチングが股関節内転筋群の筋スティフネスに及ぼす急性効果
3. 学会等名 第34回日本整形外科学会基礎学術集会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 谷口圭吾, 小出所大樹, 加藤拓也, 小林匠, 金谷耕平, 片寄正樹
2. 発表標題 静的ストレッチングが骨格筋の粘性に及ぼす影響
3. 学会等名 第31回日本整形外科超音波学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 谷口圭吾
2. 発表標題 【運動器疾患に対するエラストグラフィの新たな展開】せん断波エラストグラフィによる骨格筋の定量的な画像評価
3. 学会等名 第31回日本整形外科超音波学会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小出所大樹, 谷口圭吾, 溝口照悟, 神谷智昭, 寺本篤史, 渡邊耕太, 藤宮峯子, 片寄正樹, 山下敏彦
2. 発表標題 超音波せん断波エラストグラフィを用いたヒト大腿直筋の受動張力評価の妥当性検証 - Thiel法固定屍体を用いた検討 -
3. 学会等名 第34回日本整形外科学会基礎学術集会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 谷口圭吾
2. 発表標題 エラストグラフィによる筋バイオメカニクス研究の可能性
3. 学会等名 日本超音波骨軟組織学会第39回東日本支部学術集会（招待講演）
4. 発表年 2020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
研究協力者	小出所 大樹  (Kodesho Taiki)		
研究協力者	加藤 拓也  (Kato Takuya)		
研究協力者	中尾 学人  (Nakao Gakuto)		

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