

令和元年6月11日現在

機関番号：34315

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K13009

研究課題名(和文)筋腱複合体の長さ変化実測に基づく、弾性および粘性が発揮筋力に与える影響の解明

研究課題名(英文) Examination of the Influence of elasticity and viscosity on the force production based on the direct length measurements

研究代表者

福谷 充輝 (Fukutani, Atsuki)

立命館大学・スポーツ健康科学部・助教

研究者番号：80722644

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：これまでの多くの研究によって、筋や腱に蓄積された弾性エネルギーが身体運動パフォーマンスに關与していると提唱されている。しかし、これらの研究の多くは、筋や腱の長さ変化を直接測っているわけではないという問題があり、測定の結果がエネルギー保存の法則から逸脱しているものも散見される。この現状を踏まえ、本研究では、筋もしくは腱の長さ変化をダイレクトに計測した上での力学応答計測を行った。筋を対象とした実験においては、腱組織を含まない単一の筋細胞を用いて計測を行い、収縮中の筋は長さ変化(伸長)に応じた筋力を発揮するが、その力の一部は失われるという粘弾性を有することが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

我々ヒト生体の身体運動は、骨格筋が発揮した力によって生み出される。したがって、身体運動を生成するメカニズムを把握するためには、骨格筋の収縮特性を明らかにする必要がある。骨格筋を構成する筋および腱は粘弾性を有しており、長さ変化に応じた力が発生する。本研究では、筋の粘弾性のもととなっている結合したクロスブリッジ、タイチンの力生成メカニズムを検証し、これらが、stretch-shortening cycleという反動動作による筋力増強効果の一部を担っていることを見出した。

研究成果の概要(英文)：It is widely suggested that the elastic energy stored in the muscle and tendon contributes to the performance of human movements. However, most studies did not measure their length changes directly, and results of some studies violate the law of the conservation of energy. Taken these into account, we performed the mechanical testing with the direct length measurements of muscles and/or tendons. We found from the muscle mechanical testing that elastic energy stored in the muscle can be used during the subsequent shortening phase but the part of stored energy is dissipated as heat, indicating that muscles show viscoelastic property.

研究分野：バイオメカニクス

キーワード：アクチン ミオシン タイチン クロスブリッジ サルコメア

1. 研究開始当初の背景

(1) 全ての身体運動は、筋が発揮した力が腱を介して骨に伝わることで生じる。したがって、筋および腱の動態を詳細に観察することは、日常動作やスポーツ動作の成り立ちを理解する上で重要であり、これまでに多くの研究が行われている (Roberts et al.1997, Ishikawa et al. 2005)。その結果、腱の伸び縮みによる弾性エネルギーの利用が重要な役割を果たすことが示唆されている。しかしながら、これまでの研究はいずれも腱の長さを実測しておらず、全体の長さ (図 1 の ) と筋の長さ (図 1 の ) から、腱の長さ変化 (図 1 の a と b を足し合わせたもの) を推定するにとどまっている。研究代表者は、この推定手法の問題点を指摘していること (Fukutani et al. 2014, Fukutani 2014)、さらには、これまでの推定手法によって得られた知見は、腱の材料特性からは考えにくい値 (10-15%のひずみ) (Hoffen et al. 2012) も散見される現状を踏まえ、身体運動における腱の意義は、実測データにより再検証する必要がある。

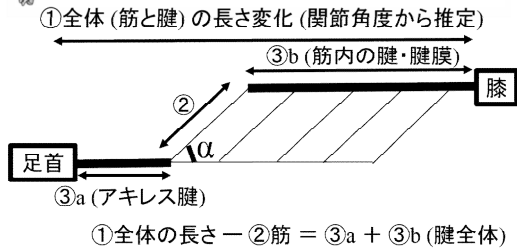
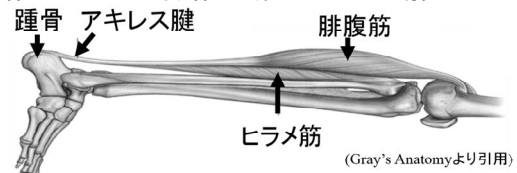


図 1. 腱の長さ変化推定のコンセプト

(2) また、これまでは筋や腱の伸長量のみから弾性エネルギーの重要性が議論されているが、「伸長量」という指標は、「弾性エネルギーの蓄積量」を示す指標であり、蓄積した弾性エネルギーは、必ずしもその後の動作時に利用されるわけではない。なぜならば、物体の粘り (粘性) が強ければ、蓄積した弾性エネルギーが内部摩擦により消失してしまうからである。つまり、伸長量 (蓄積した弾性エネルギー) だけでなく粘性 (散逸してしまった弾性エネルギー) の影響も考慮しなければ、弾性エネルギーの発揮筋力への貢献を決定づけることは出来ない。

2. 研究の目的

(1) そこで本研究では、筋や腱を伸長させたときの長さ変化を直接的に計測し、その時の力応答を計測することで、弾性および粘性が発揮筋力に与える影響を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 本研究では、筋を主な対象とした実験と、腱を主な対象とした実験を行った。筋を対象とした実験では、筋線維のみしか含まない単一の筋細胞を用いることで、腱の影響を完全に排除した実験系を採用した。ウサギの大腰筋を摘出し、化学的、物理的処理にて単一の筋細胞を単離し、この単一の筋線維を筋力計とモーターに接合した。筋収縮は、筋線維を浸した水溶液中にカルシウムイオンを加えることによって誘発した。収縮中に、正弦波状の高周波振動を与えて、その時の筋力応答を計測した (図 2)。

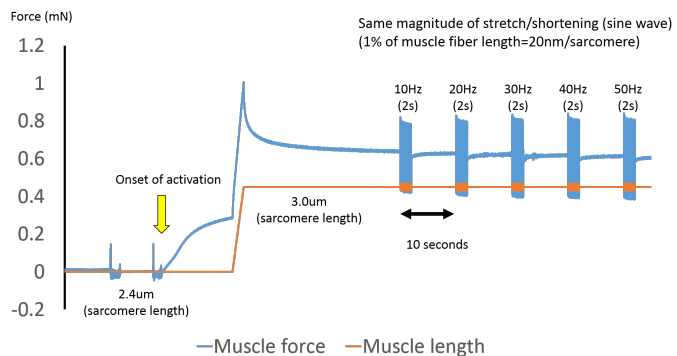


図 2. 筋を対象とした実験の例

(2) 腱を対象とした実験では、ラットのヒラメ筋を対象に、ラットを麻酔科にてヒラメ筋をアイソレートし、モーターを組み込んだ筋力計に固定した (図 3)。電気刺激によって筋収縮を誘発し、その時のアキレス腱の長さ変化を、アキレス腱の上空に配置した実体顕微鏡にて撮像し、筋力応答に対するアキレス腱の長さ変化を直接的に計測した。

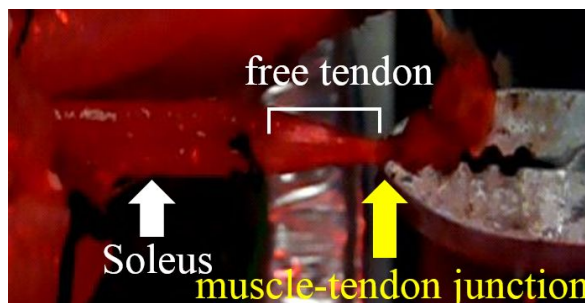


図 3. 腱を対象とした実験の例

## 4. 研究成果

(1) 筋を対象とした実験においては、筋収縮中に正弦波状の高周波振動を与えたときの筋力応答を計測した。仮に筋が完全な弾性体であれば、長さ変化量によって発揮筋力応答が決まるはずである。しかしながら、振動の周波数を増大させると、一定の長さ変化量にもかかわらず、発揮筋力の変化は大きくなった(図4)。これは、速度の関数である粘性の影響が存在することを示している。加えて、振動の周波数を増大させていくと、長さ変化と筋力応答の位相がずれていった。筋が完全な弾性体であるならば、この位相ずれは生じず、長さ変化と筋力変化の位相が完全に一致するはずであるため、本分析で得られた結果も、筋は粘性を有することを支持するものである。すなわち、筋は弾性だけでなく粘性も有しており、筋を引き伸ばしたときに得られた弾性エネルギーがその後の短縮時にすべて利用されるわけではないということが明らかとなった。今後は、粘性の影響も加味した上で、筋に蓄積した弾性エネルギーの意義を検証していく必要がある。

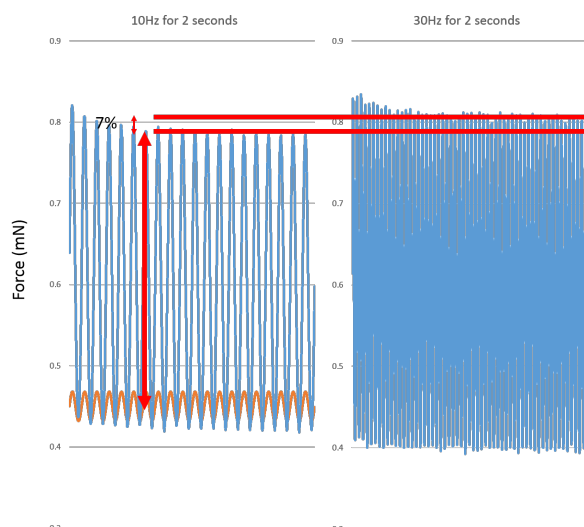


図4. 正弦波上の高周波振動時の筋力応答

(2) 腱を対象とした実験においては、等尺性収縮、短縮性収縮、伸張性収縮といった様々な収縮様式において、力発揮中のアキレス腱の長さ変化を実体顕微鏡下にて計測しようと試みたが、アキレス腱の長さ変化が非常に小さく、定量的に計測することは困難であった。この結果は、より測定精度を高めた実験系によって再検証する必要があるものの、力発揮中には腱が10%程度伸長するといった従来の考えは過大評価なのではないかという研究代表者の仮説を支持するものであり、一定の成果は得られたと考えている。また、本実験で観察された微小なアキレス腱の伸長は、等尺性収縮、短縮性収縮、伸張性収縮といった、明確に発揮筋力の大きさが異なる収縮様式のいずれにおいても、同程度生じているような傾向があった。本来、物質の伸長(蓄積する弾性エネルギー)は、物体に大きな力が加わった時に大きくなるはずであり、上記の収縮様式であれば伸張性収縮において伸長量が最大になるはずである。しかしながら、現状の観察結果からではそのような傾向が認められなかったため、本実験で観察された微小なアキレス腱の伸長は、筋収縮前にたるんでいた筋腱複合体が筋収縮によって引き伸ばされたことによって生じた可能性も考えられる。もしそうであれば、この時に観察されたアキレス腱の伸長量に応じた弾性エネルギーが蓄積されるというコンセプトを考え直す必要があるため、より測定精度を高めた実験系により、腱伸長の実態把握を進めていく必要がある。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計6件)

1. [Fukutani A](#), Shimoho K, Isaka T, Isometric preactivation before active lengthening increases residual force enhancement, *Scand J Med Sci Sports*, 査読あり, 2019, (印刷中), doi: 10.1111/sms.13454
2. [Fukutani A](#), Herzog W, Residual Force Enhancement Is Attenuated in a Shortening Magnitude-dependent Manner, *Med Sci Sports Exerc*, 査読あり, 2018, 50(10), 2007-2014, doi: 10.1249/MSS.0000000000001670
3. [Fukutani A](#), Herzog W, Residual Force Enhancement is Preserved for Conditions of Reduced Contractile Force, *Med Sci Sports Exerc*, 査読あり, 2018, 50(6), 1186-1191, doi: 10.1249/MSS.0000000000001563
4. [Fukutani A](#), Joumaa V, Herzog W, Influence of residual force enhancement and elongation of attached cross-bridges on stretch-shortening cycle in skinned muscle fibers, *Physiol Rep*, 査読あり, 2017, 5(22), pii: e13477. doi: 10.14814/phy2.13477
5. [Fukutani A](#), Misaki J, Isaka T, Force Depression in Plantar Flexors Exists Equally in Plantar Flexed and Dorsiflexed Regions, *Front Physiol*, 査読あり, 2017, 24;8:183, doi: 10.3389/fphys.2017.00183
6. [Fukutani A](#), Misaki J, Isaka T, Influence of Joint Angle on Residual Force Enhancement in Human Plantar Flexors, *Front Physiol*, 査読あり, 2017, 24;8:234, doi: 10.3389/fphys.2017.00234

〔学会発表〕(計4件)

1. Fukutani A, Herzog W, Residual force enhancement is attenuated by shortening in a magnitude-dependent manner, 62nd Annual Meeting Biophysical Society, 2018
2. Fukutani A, Herzog W, Relationship between residual force enhancement and muscle fatigue, 41st Annual Meeting of the American Society of Biomechanics, 2017
3. Fukutani A, Joumaa V, Herzog W, Influence of residual force enhancement and elongation of attached cross bridges on the stretch-shortening cycle, 26th Congress of the International Society of Biomechanics, 2017
4. 福谷充輝、御前純、伊坂忠夫、Influence of active state and residual force enhancement on the increase in joint torque by stretch-shortening cycle、第24回日本バイオメカニクス学会、2016

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：長野 明紀

ローマ字氏名：(Akinori Nagano)

所属研究機関名：立命館大学

部局名：スポーツ健康科学部

職名：教授

研究者番号(8桁)：30392054

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、研究者個人に帰属されます。