

令和 4 年 6 月 6 日現在

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2019～2021

課題番号：19K24281

研究課題名(和文)共振に基づいた反動動作の理解

研究課題名(英文)Understanding stretch-shortening cycle from the view point of resonance

研究代表者

竹下 大介 (Takeshita, Daisuke)

東京大学・大学院総合文化研究科・准教授

研究者番号：60847060

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：ダイナミックな運動中の筋線維の振る舞いは、腱組織の弾性のために非常に複雑となり関節角度のような外部からの情報からの推定が困難である。本研究では、バネ-質量系の強制振動に基づいた理論がホッピングのような接地と離地を繰り返すダイナミックな運動において、下腿筋線維動態を説明出来るかを検証した。その結果、接地中に等尺性、短縮性から伸張、伸張から短縮などのパターンが見られ、強制振動に基づいた理論と定性的に一致し、理論の妥当性が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は「身体のパネを活かす」ことを力学の強制振動の観点から説明しようとする試みであり、得られた知見は腱の弾性を活かすために最適な接地時間があることを示唆する。これは、伸張-短縮サイクルと呼ばれる、走行やホッピングなどにおいて重要であり、身体を効率良く動かすにはどのようにすれば良いのかといった知見につながるものと考えられる。また、体育教育、スポーツ指導、リハビリテーションなどの分野において基礎的な知識となることが期待される。

研究成果の概要(英文)：The behavior of muscle fibers during dynamic movements can be very complex due to the elasticity of tendon tissue. Therefore, it is difficult to estimate from external information such as joint angles. This study tested whether a theory based on forced oscillation of the mass-spring system can explain muscle fiber dynamics of the triceps surae muscle during hopping. The results showed isometric, shortening to stretching, stretching to shortening contraction of the muscle fibers, which were qualitatively consistent with the theory based on forced oscillation, suggesting the validity of the theory.

研究分野：バイオメカニクス

キーワード：筋-腱複合体 共振 伸張-短縮サイクル

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

共振とは物体がその固有振動数に近い外力を受けるときに生じ、物体が大きく振動する現象である。申請者はこれまでに周期的な足関節の底背屈運動中において、3ヘルツ程度の運動時に下腿三頭筋の筋線維の長さ変化が筋-腱複合体全長の変化(関節角度変

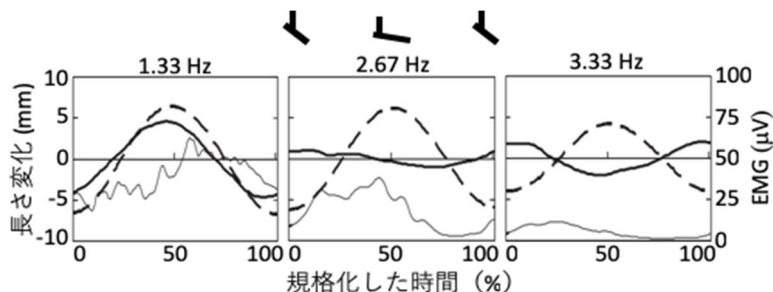


図 1: 運動中に見られる共振。立位における周期的な足底背屈運動時の下腿三頭筋の筋-腱複合体全長(破線)、Bモード超音波法で実測した筋線維長(実線)、筋放電(細線、ローパスフィルタで処理)の変化。この被験者では2.7Hzで共振が起きている。図は(Takeshita et al. 2006を改変)

化)に比べて非常に小さくなり、共振が起きていることを明らかにした(図1中)。また、運動周波数が共振時より低い時には、筋線維と筋-腱複合体が同位相で変化したが(図1左)、両者の位相差は運動周波数と共に大きくなり、運動周波数が共振時より高い時には、両者は逆位相で変化した(図1右)。これらの筋線維長変化の運動周波数に対する依存性は、強制振動というバネがついた重りに周期的な外力を与える系により説明できることを明らかにした。また、筋線維と筋-腱複合体の位相差が運動周波数と共に徐々に大きくなるという挙動は、バイオメカニクスのシミュレーションでよく用いられている従来の筋骨格系モデルでは説明できず、筋-腱複合体全体に並列な粘性要素を考慮することにより説明できることが明らかになった。本研究では、筋-腱複合体のモデルに粘性要素を考慮し、運動中の筋線維のダイナミクスを定量する。

2. 研究の目的

強制振動の理論に基づく力学的に有利な反動動作の運動条件と、神経生理学的に有利な条件は異なると予想される。例えば、共振時には外力のする単位時間あたりの仕事量が最大になることが知られていると共に、筋線維の収縮速度が小さくなり力-速度関係の点から有利であるため、共振時には反動動作のパフォーマンスの向上が期待される。その一方で、筋線維長変化が関節角度変化に対し非常に小さくなるため、反動動作の遂行において重要と考えられている伸張反射の貢献は小さくなると考えられる。また、運動の動作が固有振動数よりも速い場合には、速度-力関係からは不利な状況にあるが、筋線維長変化は大きくなるため、伸長反射を誘発しやすい状況になると予想される。本研究の目的は、ホッピングなどのダイナミックな運動において、逆ダイナミクス、Ia線維の活動を選択的に誘発する振動刺激を用いた疲労実験、筋骨格系と神経系のシミュレーションを遂行することで、運動の動作速度とパフォーマンス、筋線維のダイナミクス、伸張反射の貢献度がどのように関係しているかを明らかにすることとした。

3. 研究の方法

コロナ禍による入構規制、コロナ禍での授業実施における学内業務の増大などにより研究の進捗が遅れが生じたため、まず研究の第一段階として、ダイナミックな運動中における筋線維長変化の予測を数理モデルで行い、その結果を実験的に検証した。

数理モデルを用いた予測

ホッピング中の被験者の重心と下腿筋-腱複合体の挙動とを幾何学的な仮定をすることで、接地中の筋-腱複合体の長さ変化が従う運動方程式を立て、逆問題を解くことにより筋線維の挙動を

シミュレートした。このモデルにおいて、筋線維の長さ変化が全くないものと仮定するとバネ-質量系に帰着する。バネ-質量系の接地時間から接地時間を系統的に変えた場合の筋線維長変化を次の方法で求めた。まず、与えられた接地時間に従うように下腿筋-腱複合体全長の変化正弦波状に定める。そして、その解を筋-腱複合体の微分方程式に代入することで筋線維長変化を求めた。

超音波診断装置を用いた筋線維長の実測

被験者に 2 ヘルツから 3.5 ヘルツの跳躍周期でホッピングを行わせ、超音波診断装置を用いて B モードでの超音波画像を腓腹筋内側頭から 65 ヘルツのフレームレートで取得し、Matlab で作成したスクリプトを用いて筋線維長（筋束長）を計測した。関節角度変化はモーションキャプチャーを用いて計測した。

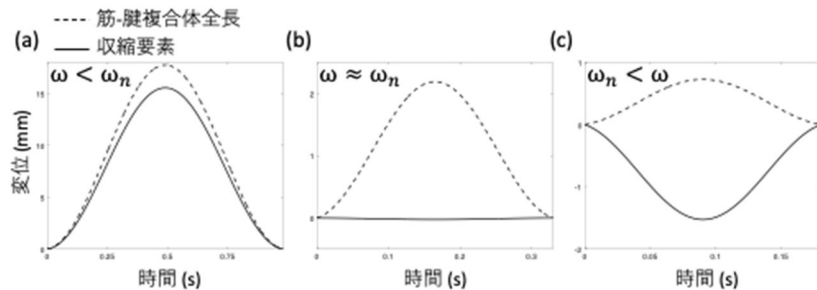


図 2：接地時間が異なる場合の筋-腱複合体の振舞い

(a)-(c)：接地中の収縮要素（実線）と筋-腱複合体（破線）の長さ変化。接地時の重心速度(v_0)が0.1 m/sの条件で接地時間を変えた結果を示している。(a)：接地時間がバネ-質量系の固有周期よりも長い場合。収縮要素と筋-腱複合体の長さ変化がほぼ等しくなる。(b)：接地時間がバネ-質量系の固有周期に近い場合。収縮要素の長さ変化が筋-腱複合体の長さ変化に比べて非常に小さくなる。(c)：接地時間がバネ-質量系の固有周期よりも短い場合。収縮要素の長さ変化が筋-腱複合体の長さ変化よりも大きくなる。両者が逆位相で変化している。

4. 研究成果

数理モデル

ホッピング中の被験者の重心と下腿筋-腱複合体の挙動とを幾何学的な仮定をすることで、接地中の筋-腱複合体が従う運動方程式を立て、これを数値的に解くことにより筋線維の挙動をシミュレートした。図 3 に結果の例を示す。筋-腱複合体の長さ変化の時間スケールが、バネと重りだけの系の固有振動数に相当する周期に近い場合($\approx \omega_n$) 収縮要素の長さ変化は筋-腱複合体の長さ変化に比べて非常に小さく

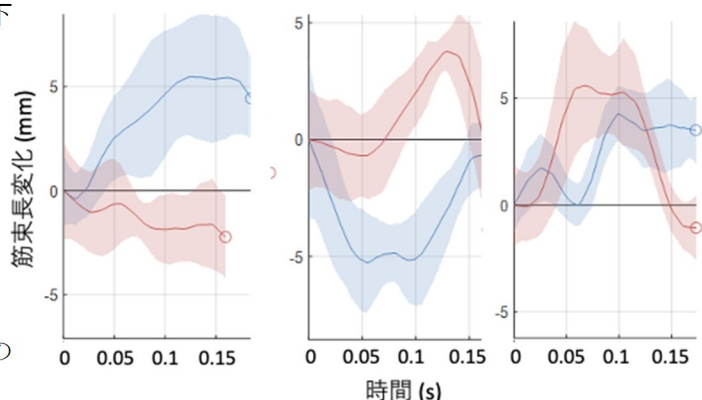


図 3：ホッピング中における腓腹筋内側頭の筋線維長（筋束長）変化

青は接地点を拇指球よりやや後ろに規定したもので、赤はそれよりも3-4 cm 踵より規定したもので、長さ変化は接地からの変化量でしめしてある。等尺に近いもの（左図、赤のプロット）や短縮後伸張されるもの（中図、青のプロット）伸張され短縮するもの（右図、赤のプロット）などが見られ数理モデルと定性的に一致が見られた。

なる（図 2b）。これは、収縮要素が長さ変化しない場合には、筋-腱複合体の振る舞いはバネと重りだけの系に等価であるという直感的な予想と一致しており、共振に似た現象だと考えられる。

$< \omega_n$ の場合は筋-腱複合体と収縮要素の長さ変化が同程度であり、両者が同位相で変化する（図 2 a）。 $> \omega_n$ の場合は収縮要素の長さ変化に対し筋-腱複合体の長さ変化が小さくなるという状況になり、筋線維の速度-力関係から非常に不利となることがわかる（図 2 c）。さらに、両者は逆位相で変化することがわかる。以上の結果から、実際の運動における接地時間を、バネ-質量系の接地時間に一致させることで、収縮要素の長さや速度変化が非常に小さくなり、生理

学的に有利な状況になると推察された。

超音波診断装置を用いた筋線維長の実測

超音波診断装置を用いて、ホッピング中の筋束長変化を計測した。ホッピングの周期を規定して被験者に動作を行わせることで接地速度を変化させた。また、靴底にゴム製の棒を貼付し、その部分で接地するように被験者に教示し、接地点を変化させた。これは、接地点を変えることで上述の数理モデルにおける有効質量が変わり、固有振動数が変わるという予測に基づいている。実験の結果、被験者、接地位置によって、1)等尺性 2)短縮後伸張 3)伸張後短縮といったパターンが接地中の筋線維長(筋束長)変化にみられた。これらの結果は数理モデルの予測と定性的に一致するものであった(図3)。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 平林広, 竹下大介
2. 発表標題 体操競技の平行棒の支持振動における角運動量生成の方略
3. 学会等名 第3回替ひろば（バイオメカニクス研究会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小西 康基, 上野 拓海, 齋藤 壮馬, 秋原 悠, 竹下 大介, 小田 俊明
2. 発表標題 高校生女子長距離走選手の力発揮時の下腿三 頭筋における粘弾性と競技力との関係
3. 学会等名 日本体育・スポーツ・健康学会 日本体育・スポーツ・健康学会第71回大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小田俊明, 上野拓海, 齋藤壮馬, 小西康基, 大沼勇人, 林陵平, 竹下大介
2. 発表標題 陸上競技短距離ならびに中長距離の選手の力発揮時における筋腱複合体の粘弾性
3. 学会等名 第27回日本バイオメカニクス学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 栗山一輝, 深代千之, 吉岡伸輔, 竹下大介
2. 発表標題 腱の弾性特性が反動動作のパフォーマンスに及ぼす影響
3. 学会等名 東京体育学会第11回学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Daisuke Takeshita
2. 発表標題 Resonance in the human musculoskeletal system
3. 学会等名 Distinguished Alumni Lecture, Department of Physics & Astronomy, University of Missouri-St. Louis
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 竹下大介（分担、東京大学身体運動科学研究室 編）	4. 発行年 2022年
2. 出版社 東京大学出版会	5. 総ページ数 256
3. 書名 身体運動・健康科学ベーシック	

1. 著者名 竹下大介（東京大学大学院総合文化研究科身体運動科学研究室 編）	4. 発行年 2020年
2. 出版社 杏林書院	5. 総ページ数 19
3. 書名 力学からみた体のバネの活かし方と機械学習を用いたアプローチ 身体運動科学アドバンスト	

〔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