

令和 6 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K11330

研究課題名（和文）ダイナミックな運動における筋線維長変化の推定方法の確立

研究課題名（英文）Developing a methodology for the estimation of muscle fiber length during dynamic movement

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） 3,300,000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動きは、腱組織の弾性により複雑であり、関節角度などの外部情報から推定するのは困難です。本研究の目的は、関節角度などから筋線維の長さ変化を推定する方法を確立することでした。方法の確立には至りませんでした。運動中の筋腱複合体のスティッフネス（剛性）を測定することで、筋線維の動きを定性的に理解できる可能性が示されました。特に、ホッピングのようなダイナミックな運動では下腿三頭筋の筋線維長変化が関節角度変化と異なり、筋腱複合体のスティッフネスが有用な指標となる可能性が示唆されました。

研究成果の学術的意義や社会的意義

筋線維が発揮できる力は筋線維の収縮速度に依存するため、運動中の筋線維の挙動を理解することは重要です。本研究の結果は、関節角度など身体外部から観察できる情報から、運動中の筋線維の長さ変化を定性的に理解できることを示唆します。これは、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ます。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ります。

研究成果の概要（英文）：The movement of muscle fibers during dynamic exercise is complicated by the elasticity of tendon tissue and is difficult to estimate from external information such as joint angles. The purpose of this study was to establish a method for estimating length changes of muscle fibers from joint angles and other information. Although we were not able to establish a method, we demonstrated the possibility of qualitatively understanding the movement of muscle fibers by measuring the stiffness of the muscle-tendon complex during exercise. In particular, this study suggested that the triceps muscle fiber length change differs from joint angle change during dynamic movements such as hopping, suggesting that the stiffness of the muscle-tendon complex may be a useful indicator.

研究分野：バイオメカニクス

キーワード：筋線維長 超音波測定器 筋腱複合体 Hillモデル バイオメカニクス

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。

1. 研究開始当初の背景  
 走行や跳躍におけるパフォーマンス向上のためには、身体の力学的エネルギーを高める必要がある。そのためには、筋線維が収縮する際に大きな張力を発揮しなければならない。筋線維の最大発揮張力の主な決定要因として、筋線維自体の長さや収縮速度がある。従って、運動中の筋線維の長さや収縮速度の変化を知ることは、運動のパフォーマンス向上のために非常に重要と考えられる。

運動中の筋線維長変化をBモード超音波法により実測する手法が20年ほど前に確立された (Fukunaga et al., 1997)。当初は、等尺性や等速性筋収縮など、筋力計に被験者を固定した条件で行われたが、近年の装置の性能の向上により、歩行や走行中など自然な運動条件で行われるようになった (Farris and Sawicki, 2012)。しかし、超音波法の短所として、被験筋に超音波診断装置のプロープを固

定する必要があるため、同時に複数の筋から測定することが困難なことなどが挙げられる。その一方で、Hill モデルなどの筋-腱複合体のモデルを仮定し、動作分析や順ダイナミクスのシミュレーションと組み合わせることで運動中の収縮要素 (筋線維) の長さ変化を推定する研究が行われており、歩行、走行などに適用されている (Neptune and Sasaki, 2005)。この手法には、安静時の筋線維長や腱組織の弾性定数などの解剖学的なパラメータが分かれば、複数の筋に同時に適用出来るという利点がある。しかしながら、推定した筋線維長変化を実測値と比較した研究は見当たらない。

申請者は、これまでに、周期的な足関節の底背屈運動において、下腿三頭筋の筋線維の長さ変化と筋-腱複合体全長の変化 (関節角度変化) の位相差が運動周波数に大きく依存することを明らかにした (Takeshita et al., 2006)。運動周波数が低い時には、筋線維と筋-腱複合体の長さが同位相で変化したが、両者の位相差は運動周波数と共に徐々に大きくなった (図1A)。このような挙動は、上述の筋線維長推定や筋骨格系のシミュレーションで用いられている収縮要素と弾性要素のみを考慮した従来の Hill モデルでは説明できない (図 1B)。これは、既存のモデルでは運動中の筋線維の長さ変化が正しく推定出来ない運動条件があることを示唆している。申請者らが対象とした周期的な底背屈運動に関しては、線形の粘性要素を筋-腱複合体のモデルに加えることにより、実験でみられるような筋線維と筋-腱複合体の位相差の運動周波数依存性を説明することができた (図 1C)。しかし、用いられた動作

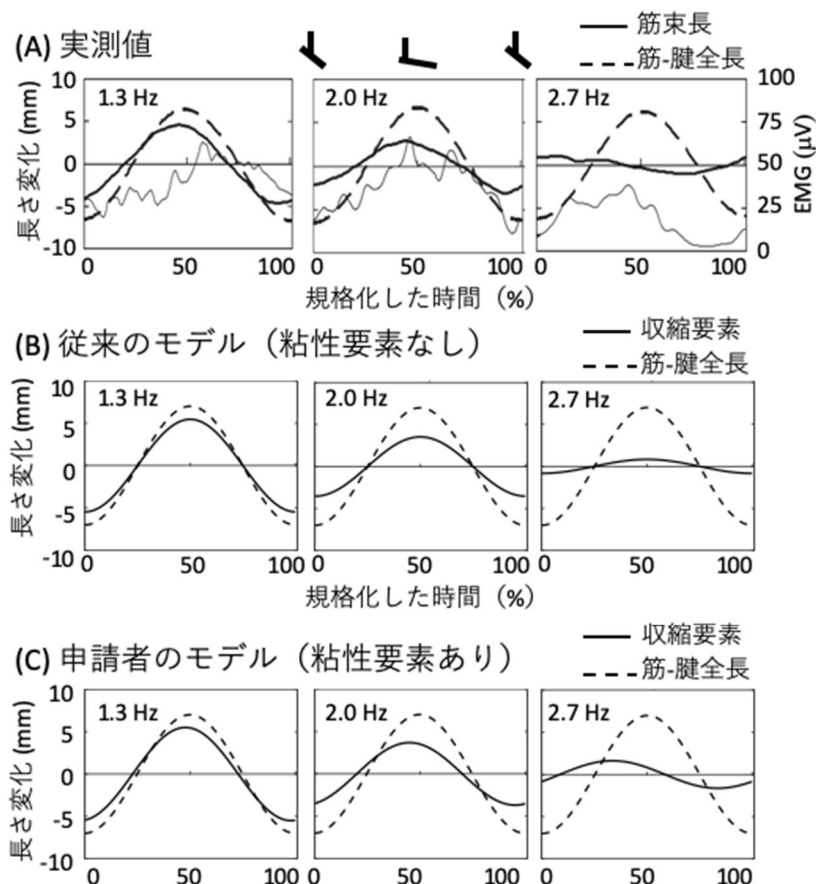


図 1 : 運動中の筋線維長変化の実測値と推定値の比較。A) 立位における周期的な足底背屈運動時の下腿三頭筋の筋-腱複合体全長 (破線)、Bモード超音波法で実測した筋線維長 (実線)、筋放電 (細線、ローパスフィルタで処理) の変化。B) 筋-腱複合体を収縮要素と直列弾性要素によりモデル化した場合に得られる収縮要素と筋-腱複合体の長さ変化。C) 粘性要素をB)のモデルに加えた場合に得られる収縮要素と筋-腱複合体の長さ変化。A)は Takeshita et al. (2006)を改変。

は関節可動域の小さな周期的な単関節運動であり、関節可動域が大きな素早い運動においては、粘性要素の非線形性が筋線維動態に大きな影響を与える可能性がある。実際、摘出した筋線維の粘性に非線形性が存在することが報告されている (Meyer et al., 2011)。そこで、**「動的な運動における筋線維長変化の推定は、従来の筋-腱複合体のモデルでは不十分であり、非線形の粘性要素を考慮する必要がある」**を本研究の核心をなす「問い」とし、**実測値とモデルに基づく推定値を比較することで検証する。**

近年、筋-腱複合体のパラメータと走行のパフォーマンス等との相関関係が報告されている (Kubo et al., 2015)。運動中の筋線維長変化推定においても、個々人のパラメータを考慮することで精度の向上につながると予想される。そこで、本研究では様々な運動条件下の筋線維長変化を正確に推定するための筋-腱複合体モデルを構築するために、個々人のパラメータを簡便に推定するための手法を確立する。

## 2. 研究の目的

本研究では、逆ダイナミクスと筋-腱複合体のモデルを用いた運動中の筋線維長変化の推定において、以下を目的とする。

- A) 超音波法を用いて実測した筋線維長変化と比較することで、既存のモデルの適用限界を明らかにすること
- B) より正確な推定のために新たなモデルを構築すること
- C) 推定に必要な個々人のパラメータを取得する簡便な方法を開発すること

## 3. 研究の方法

いわゆる伸張-短縮サイクルを伴う動的な運動の例としてホッピングを対象とした。ピッチを規定したホッピングにおいて、モーションキャプチャ、フォースプレート、超音波診断装置を用いて、身体各セグメントの運動学的情報、地面反力、下腿三頭筋(腓腹筋)の超音波画像をそれぞれ計測した。超音波画像はコンピュータ上でデジタル化し、筋束長と羽状角を算出した。足関節の関節トルクはモーションキャプチャ及びフォースプレートのデータから逆ダイナミクスを用いて算出した。足関節トルクをアキレス腱のモーメントアームで除すことで下腿三頭筋の張力を算出した。

## 4. 研究成果

ホッピング中の筋線維動態はピッチに大きく依存するものであった。低ピッチでは、筋線維長はほぼ一定の長さを示したのに対し、高ピッチでは筋腱複合体が伸張される接地期前半に筋線維が短縮することが明らかになった(図2)。これらの結果は、ホッピングのような動的な運動において、関節角度等の外部からみえる情報では筋線維長変化の推定が難しいことを示唆している。

ホッピング接地中の筋線維の挙動は動作の周期に大きく依存するという結果が、以前に構築した数理モデルと定性的には一致するものの、詳細に関しては一致しないため、線形バネとダッシュポットを組み込んだが解決には至らなかった。また、非線形要素に関しても検討したが特に精度の向上はみられなかった。

代替案として、筋腱複合体を直列弾性要素と収縮要素からモデル化し、実験で算出した筋腱複合体のスティッフネスから直列弾性要素と収縮要素を定量するという方法を取った。ホッピングの動作周波数を大きくした際に筋腱複合体のスティッフネスのスティッフネスが大きくなり、先行研究と同様の結果が得られた。また、直列弾性要素のスティッフネスは動作周波数に依らずほぼ一定となり、腱組織が直列弾性

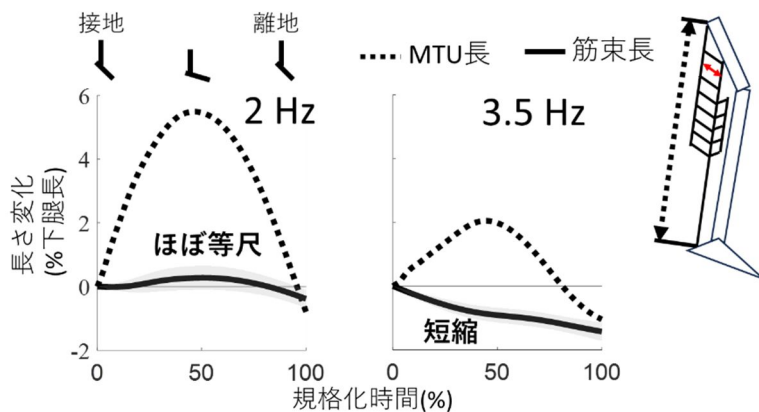


図2: ホッピング接地中における筋腱複合体全長(破線)と筋束長(実線)の変化。

要素の性質を反映していることと矛盾がない結果が得られ方法の妥当性が示唆された。収縮要素に関しては、動作周波数が低い場合はスティッフネスが高く、動作周波数が高い場合はスティッフネスが負となるという結果が得られた。これは、接地期前半に足関節トルクが上昇する局面で筋束が短縮することに起因しており、当初の予想とは大きく異なる結果であった。まとめると、筋線維長変化の推定方法はまだ確立されていないが、筋腱複合体のスティッフネスを求めることで、筋線維の定性的な挙動が推定できる可能性が示唆された。

以上をまとめると、ホッピングのようなダイナミックな運動においては下腿三頭筋の筋線維長変化は関節角度変化と異なることが示唆され、筋線維の振る舞いを理解するのに下腿筋腱複合体のスティッフネスが有用な指標となる可能性が示唆された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 0件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

|   |                 |
|---|-----------------|
| 1. 著者名<br>Hirabayashi H, Takeshita D  | 4. 巻<br>-       |
| 2. 論文標題<br>Inter-joint coordination to minimize angular momentum reduction in backward somersault dismounts at parallel bars. | 5. 発行年<br>2022年 |
| 3. 雑誌名<br>sportsRxiv  | 6. 最初と最後の頁<br>- |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>なし   | 査読の有無<br>無      |
| オープンアクセス<br>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<br>-       |

|  |                 |
|--|-----------------|
| 1. 著者名<br>Kuriyama K, Takeshita D  | 4. 巻<br>-       |
| 2. 論文標題<br>Leg stiffness adjustment during hopping by dynamic interaction between the muscle and tendon of the triceps surae | 5. 発行年<br>2024年 |
| 3. 雑誌名<br>bioRxiv  | 6. 最初と最後の頁<br>- |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1101/2024.04.24.589455   | 査読の有無<br>無      |
| オープンアクセス<br>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<br>-       |

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件／うち国際学会 4件）

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>栗山 一輝, 竹下 大介                                   |
| 2. 発表標題<br>ホッピングの接地中における下腿三頭筋の伸縮が接地時間に及ぼす影響～インパルス応答の観点から～ |
| 3. 学会等名<br>第5回慧ひろば（バイオメカニクス研究会）                           |
| 4. 発表年<br>2023年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Kuriyama K, Takeshita D.  |
| 2. 発表標題<br>The mechanism of leg stiffness adjustment during hopping with different hop frequencies.            |
| 3. 学会等名<br>XXIX Congress of International Society of Biomechanics/XXIX Congress of Japanese Biomechanics（国際学会） |
| 4. 発表年<br>2023年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Kuriyama K, Takeshita D  |
| 2. 発表標題<br>The effect of tendon stiffness on muscle power production during countermovement jump. |
| 3. 学会等名<br>28th Annual Congress of the European College of Sport Science. (国際学会)                  |
| 4. 発表年<br>2023年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Kuriyama K, Takeshita D  |
| 2. 発表標題<br>The mechanism of leg stiffness adjustment during hopping with different hop frequencies.             |
| 3. 学会等名<br>XXIX Congress of International Society of Biomechanics/XXIX Congress of Japanese Biomechanics (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2023年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Kuriyama K, Takeshita D   |
| 2. 発表標題<br>The effect of tendon stiffness on muscle power production during countermovement jump |
| 3. 学会等名<br>28th Annual Congress of the European College of Sport Science (国際学会)                  |
| 4. 発表年<br>2023年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>栗山一輝 竹下大介                                      |
| 2. 発表標題<br>ホッピングの接地中における下腿三頭筋の伸縮が接地時間に及ぼす影響～インパルス応答の観点から～ |
| 3. 学会等名<br>第5回替ひろば(バイオメカニクス研究会)                           |
| 4. 発表年<br>2023年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>栗山 一輝, 竹下 大介                    |
| 2. 発表標題<br>跳躍周期の異なるホッピングにおける身体スティッフネスの調節機序 |
| 3. 学会等名<br>第28回日本バイオメカニクス学会                |
| 4. 発表年<br>2022年                            |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>栗山 一輝, 竹下 大介                 |
| 2. 発表標題<br>反動動作において腱の弾性特性が筋のパワー発揮に及ぼす影響 |
| 3. 学会等名<br>日本体育・スポーツ・健康学会第72回大会         |
| 4. 発表年<br>2022年                         |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>平林 広, 竹下 大介  |
| 2. 発表標題<br>平行棒の後方宙返りおりにおいて身体モデルが実現可能な動作の集合全体における高パフォーマンス実現に必要な動作要素の特定 |
| 3. 学会等名<br>日本体育・スポーツ・健康学会第72回大会                                       |
| 4. 発表年<br>2022年   |

|                                       |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>平林広, 竹下大介                  |
| 2. 発表標題<br>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<br>第3回替ひろば(バイオメカニクス研究会)       |
| 4. 発表年<br>2021年                       |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>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<br>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<br>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<br>2021年                                    |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>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<br>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<br>第27回日本バイオメカニクス学会大会                      |
| 4. 発表年<br>2021年                                    |

〔図書〕 計2件

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

|   |                 |
|---|-----------------|
| 1. 著者名<br>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<br>2020年 |
| 2. 出版社<br>杏林書院                                      | 5. 総ページ数<br>19  |
| 3. 書名<br>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<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(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 |
|---------|---------|