

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 12 日現在

機関番号：32689

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2012～2013

課題番号：24800065

研究課題名(和文) 子どもを対象にした運動中における下腿三頭筋筋腱複合体の動態の定量

研究課題名(英文) In-vivo measurement on the triceps surae muscle-tendon unit behavior during ankle joint movement: comparison between adults and children

研究代表者

岩沼 聡一郎 (Iwanuma, Soichiro)

早稲田大学・スポーツ科学学術院・助手

研究者番号：70634369

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,900,000円、(間接経費) 570,000円

研究成果の概要(和文)：人間が二足で歩く時や走る時に足首を曲げ伸ばしし、最終的に地面を蹴って前へ進む。この動きにはふくらはぎにある下腿三頭筋が主として貢献する。下腿三頭筋腱はかかとに停止しており、足部の動きと連動することが予想された。また、かかとは小児期に痛みが生じやすい部位であるが、力学的な知見は極めて乏しい。そこで、小児の足部の構造、動き、下腿三頭筋腱の動きとの関係を検討し、基礎的知見を得ることを目的とした。その結果、小児のほうが成人と比べて、足部は変形しやすく、足首を曲げ伸ばした時の下腿三頭筋腱の動きは小さいことが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：In humans, the most common daily movements are walking and running. The plantar flexor muscles and the foot arch contribute to braking and propulsion in these movements. The triceps surae muscle-tendon unit (TS-MTU), which is the main contributor to the plantar flexion, inserts on the calcaneus. Thus, it was expected that the TS-MTU would interact with the foot arch. In adolescents, although heel pain is one of the most major complaints, the mechanism of development of the pain is still unclear. In order to accumulate fundamental knowledge of the mechanism, the present study determined the structure and behavior of the foot, and interaction between foot arch and the TS-MTU in adolescents and adults. As a result, 1) the foot in adolescents was more compliant than that in adults, 2) the TS-MTU length change during ankle joint movement was smaller in adolescents than in adults.

研究分野：社会科学

科研費の分科・細目：スポーツ科学

キーワード：筋腱複合体 足アーチ 筋腱相互作用 発育発達

### 1. 研究開始当初の背景

人間が歩く時や走る時、足部が地面を蹴り、移動運動のための推進力を生み出す。そのような足首の動き(足関節底屈動作)には、ふくらはぎにある下腿三頭筋が主として貢献する。下腿三頭筋はアキレス腱とともに筋腱複合体(MTU)という機能的ユニットを構成する。このMTUは足部後部(かかと)に停止するため、足首の曲げ伸ばしに伴い、かかとが近位-遠位方向に移動することでMTUは伸び縮みする。筋は長さによって発揮できる力の大きさが変化するが、下腿三頭筋は足首の曲げ伸ばしに伴ってその長さを変え、発揮し得る力も変化する。

骨が先行して発育し、筋や腱の発育が後追いとなる思春期では、MTUが引き伸ばされた(過緊張)状態になり、かかとの痛み(踵骨骨端症)を発症することが多い。しかしながら、この時期の子どものMTUに関する研究は稀であり、メカニズム解明や方策の検討には基礎的知見の蓄積が必要であった。

子どものMTUに関する研究を進めるためにはいくつかの研究上の課題があった。その一つは、MTU長変化を推定する式に関する課題である。足首の曲げ伸ばし(足関節角度)とMTU長変化の関係は、これまでに屍体を用いた研究によって示され、足関節の動きからMTUの伸び縮みを推定する、という式が示されてきた(Grieve et al., 1978; Hawkins & Hull, 1990)。しかし、最近、人間生体を対象に調べた報告者らの研究(Iwanuma et al., 2011a)によると、足関節角度変化から推定したMTU長変化と、その際に実際に計測したMTU長変化は一致せず、特に地面を蹴るような力(足関節底屈トルク)を発揮した時には、その差が顕著である。既存の推定式を用い推定したアキレス腱の伸びは、実測値の4倍も過大評価される(Iwanuma et al., 2011b)。既存のMTU長推定式は、妥当性に欠き、MTU内の筋・腱のはたらきを解釈する上で障壁となっている。既存の推定式で得られたMTU長変化が実測値と一致しない理由は、推定式で足部の変形を考慮していないためである(岩沼ら, 2010)。そこで、生体計測に基づき、足部の変形を考慮したMTU長変化の推定式の作成に取り組む必要があった。

さらに、既存のMTU長変化の推定式は、成人屍体による実験に基づいており、推定式作成において子どもが対象に含まれていなかった。子どもは、成人と比べて単に体格が小さいということではなく、発育段階によって身体を構成する骨の長さの比率が変化する(Roche, 1974)。また、子どもの結合組織(靭帯や腱組織)は成人より伸びやすいという点を踏まえると、多数の結合組織で構成される足部は、子どものほうが成人よりも変形しやすいと予想される。子どものMTU長変化も推定できる式を作成するためには、これらの点も考慮に入れる必要がある。

また、運動中の足部の変形とMTU長変化の

関係を示した研究は皆無であった。運動中にどの伸びが制限されているかを明らかにすることは、踵骨骨端症への対策を検討する際に有益な情報となり得る。

### 2. 研究の目的

(1) 子どもの足部形状、足部の変形とMTU長変化の関係を示すこと

(2) 子どもから成人までの幅広い年代において、足部の変形を考慮してMTU長変化を推定可能な式を作成すること

(3) 子どもにおける運動中の足部変形とMTU長変化の関係を示すこと

### 3. 研究の方法

(1) 子どもの足部形状、足部の変形とMTU長変化の関係(実験1)

小学生、中学生、成人男性を対象に、足部領域の矢状面断層像を磁気共鳴撮像法により取得した。撮像は足関節底屈20°から背屈10°までの範囲で10°ごとに実施した。得られた画像から、前足部、後足部の長さをそれぞれ計測し、足長に対する比率を算出した。中足骨前方点と距骨前方点を結ぶ線分を前方部、距骨前方点と踵骨隆起を結ぶ線分を後方部と定義し、それぞれの方位を計測した。また、それらのなす角を足アーチ角とし、試行時の足アーチ角変化を計測した。これらの項目を年代間で比較し、子どもの足部形状およびその変形の特徴を示した。また、試行時の踵骨隆起の近位-遠位方向における移動を計測し、MTU長変化とした。MTU長変化を決定する幾何学的因子である、後方部の長さ、後方部の方位変化、距骨前方点の近位-遠位方向での変位の3点も計測した。

(2) 足部の変形を考慮したMTU長変化の推定式の作成(実験2)

これまでに報告者が取り貯めてきた成人のMTU長変化に関するデータと、実験1で取得する子どものデータを合わせ、MTU長変化を決定する因子について回帰分析等の統計手法を用いて検討した。また、Bland-Altman分析による妥当性の検証も行った。

(3) 子どもにおける運動中の足部変形とMTU長変化の関係(実験3)

実験1、2で得られた結果は静的な状態に限定された結果であることから、より応用的な観点に立ち、動的な状態(カーフレイズ: 踵の上げ下げ運動)での下腿三頭筋のMTUと足部の動態を検討した。対象は中学生および成人男性とした。皮膚上に反射マーカを貼付し、運動中の挙動を高速ビデオカメラで撮像した。専用ソフトウェアを用いて、各マーカの座標値を算出した。足アーチ角の変化やMTU長変化の定義は、実験1と同様とした。加えて、ふくらはぎに超音波診断装置のプロープを貼付し、下腿三頭筋内の筋束・腱膜の挙動も計測した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 子どもの足部形状、足部の変形と MTU 長変化の関係 (実験 1)

足長は小学生、中学生、成人の順で大きかった。足長に対する前足部長の割合は小学生、中学生で同程度 (43%) であったが、成人ではそれより高い割合 (45%) を示した。一方、足長に対する後足部長の割合は、対象としたすべての年代で同程度であった (小学生: 40%、中学生: 40%、成人: 41%)。

足関節底背屈時の足アーチ角の変化は小学生と中学生で同程度 ( $9.8^\circ$ ) であったが、成人 ( $4.9^\circ$ ) ではその変化が小さかった。また、足アーチ角は足部の前足部と後足部のそれぞれの方位によって決定される。そこで、足関節底背屈時の両部位の方位変化を年代間で比較したところ、前足部では年代差が見られなかった一方で、後足部では成人 ( $22.6^\circ$ )、中学生 ( $19.5^\circ$ )、小学生 ( $16.7^\circ$ ) の順で方位変化が大きかった。

足アーチは多数の結合組織 (靭帯や腱組織) によって構成されることから、それらの伸びにくさ (stiffness) は足アーチの変形しにくさの決定要因となりうる。一般的に、他部位の結合組織の伸びにくさは、子どもより成人のほうが高く、人間に限らず他種の動物でも同様の報告がなされている (Nakagawa et al., 1996; O'Brien et al., 2010; Woo et al., 1990)。つまり、足関節底背屈時の足アーチ角の変化のしにくさに年代差が見られたことは、足アーチを構成する結合組織における伸びにくさの年代差が関与したと考えられる。

一方、足関節底背屈時の下腿三頭筋の MTU 長変化 (体格差を考慮するため、下腿長で正規化) は、成人 ( $4.9\%$ ) が小学生 ( $3.6\%$ ) および中学生 ( $4.1\%$ ) より顕著に大きかった (図 1)。下腿三頭筋の MTU は後足部の骨 (踵骨隆起) に停止することから、その長さ変化は、後足部長、後足部の方位変化、距骨前方点 (踵骨隆起 (後方点) と反対側の点) の変位によって、幾何学的に決定される。先にも述べたとおり、後足部長は絶対値が年代間で異なるものの相対値では年代差が見られず、後足部の方位変化は年代が上がるにつれて小さかった。後足部の前方点には大きな差が見られなかったことを踏まえ、相対的な下腿三頭筋の MTU 長変化における年代差は、後足部の方位変化における年代差が関与していることが示された。加えて、足関節底背屈時の足アーチ角の変化における年代差は、主として後足部の方位変化における年代差であることから、足アーチ角の変化と下腿三頭筋の MTU 長変化は密接に関連することが考えられた。

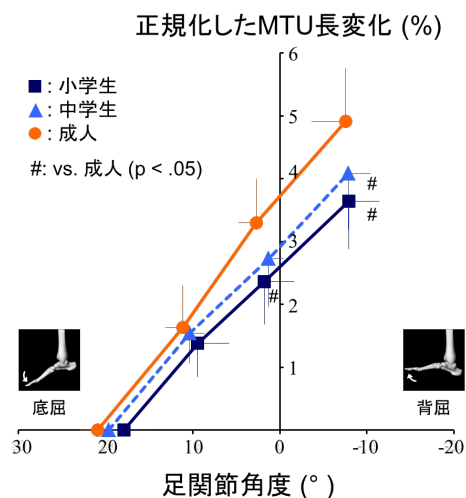


図 1 各年代の正規化した MTU 長変化

##### (2) 足部の変形を考慮した MTU 長変化の推定式の作成 (実験 2)

下腿三頭筋の MTU 長変化は、前述のとおり、後足部長、後足部の方位変化、距骨前方点の変位によって幾何学的に決められる。そこで、それらのパラメータを独立変数とし、MTU 長変化を従属変数として、ステップワイズ法による回帰分析を行なった。その結果、後足部の方位変化と後足部長が予測変数として選択された。後足部の方位変化は足アーチを構成する結合組織の伸びにくさという材質的な特性に関与することが実験 1 によって示唆されており、MTU 長変化は形態的な変化 (発育) のみならず、機能的な変化 (発達) と深く関わっていることが明らかとなった。

また、MTU 長推定式の妥当性検証を行なった。その結果、妥当性群と交差妥当性群の間に有意差が認められなかった。Bland-Altman 分析を行なったところ、加算誤差は認められなかったが、比例誤差が見られた。しかしながら、人間の日常的な動作における足関節可動域を考慮した場合、その推定誤差は測定誤差に埋もれるほどの微小な誤差であり、その比例誤差は無視できると考えられる。

##### (3) 子どもにおける運動中の足部変形と MTU 長変化の関係 (実験 3)

カーフレイズ中、下腿三頭筋の MTU 長と足アーチ角は、成人では連動して変化する傾向が見受けられたが、子ども (中学生) ではそれぞれ独立していた (図 2)。特に成人 ( $13\%$ ) に対して子どもの MTU 長変化 ( $2\%$ ) は顕著に小さかった (下腿長で正規化した相対値)。この結果では、子どものカーフレイズ中に見られる (見かけ上の) 足関節底背屈 (下腿に対する足部全体の底背屈) は、前足部の方位変化に起因する足アーチ角変化が担っていたことを示している。実験 1 でも考察したように、足アーチを構成する結合組織の伸びにくさにおける年代差が関与することが考えられる。だが、そのみならず、動的な試行であった実験 3 では神経筋活動が年代間で

異なっていた可能性がある。足部に停止する筋群は、足部内部の内在筋と、下腿内部に存在する外在筋である。先行研究では、カーフレイズのように反動を伴う動作の一つであるジャンプ動作において、下腿三頭筋の神経筋活動がジャンプパフォーマンスに影響を及ぼすことを示唆している (Hirayama et al., 2012)。本研究ではカーフレイズ中に足部内部に停止する各筋の神経筋活動を評価することは行わなかったため、成人と子どもでMTUの動態が異なった理由について迫ることは難しかった。加えて、足の指(足趾)の方位が足アーチの変形に影響を及ぼすことが示唆されており (Hicks, 1954)、今後の研究では足趾の動態も併せて検討していく必要があると考えられる。

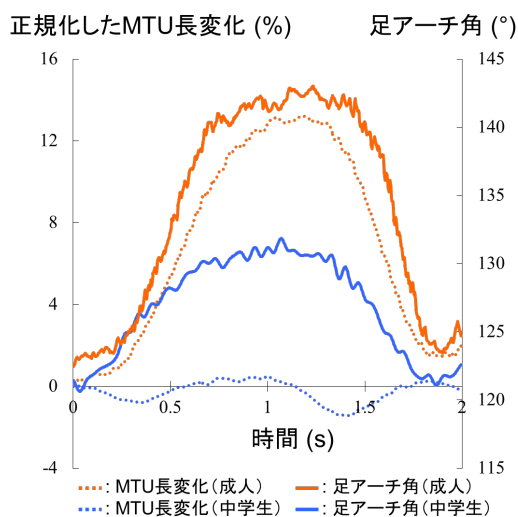


図2 カーフレイズ中のMTU長変化と足アーチ角変化(典型例)

以上より、本研究では次のことが明らかとなった。

1) 足関節底背屈時の下腿三頭筋の筋腱複合体長変化は、体格差を考量してもなお、成人よりも子どものほうが小さい。その要因として、子どものほうが成人と比べて足アーチが変形しやすいことが考えられる。

2) 下腿三頭筋の筋腱複合体長の変化を推定するには、後足部の方位変化と後足部長が重要なパラメータである。

3) ダイナミックな足関節底背屈(カーフレイズ)中における、下腿三頭筋の筋腱複合体の動態は成人と子どもで異なる。

#### 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 0 件)

〔学会発表〕(計 1 件)

Iwanuma S, Hashizume S, Akagi R, Kanehisa H, Yanai T, Kawakami Y. In vivo measurement-based estimation of

the triceps surae muscle-tendon unit length change during ankle joint movements. 18th annual congress of the European College of Sport Science, 査読有, 2013.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

〔その他〕  
ホームページ等  
特になし

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

岩沼 聡一郎 (IWANUMA, Soichiro)  
早稲田大学・スポーツ科学学術院・助手  
研究者番号: 70634369

##### (2) 研究分担者

( )

研究者番号:

##### (3) 連携研究者

( )

研究者番号: