

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：32702

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25350828

研究課題名(和文) 関節の動きを増幅する屈曲点の出現メカニズムとその機能的意義

研究課題名(英文) The mechanism causing tendon curvature and its functional role

研究代表者

衣笠 竜太 (Kinugasa, Ryuta)

神奈川大学・人間科学部・准教授

研究者番号：10409378

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：アキレス腱屈曲点を出現させるメカニズムとその機能的意義は解明されていない。そのため、受動的足底屈動作中におけるヒトアキレス腱の屈曲点出現の解剖学的構造とメカニズム解明を目的とした。アキレス腱は、Kager's fat pad剥離に伴って座屈したが、腹側への曲率は保持されていた。しかしながら、Kager's fat padの位置に樹脂を入れると、腹側への曲率は消失した。腱のステイフネスやコラーゲン線維は腱の長軸方向に対して均一な分布であった。つまり、アキレス腱の構造自体が屈曲点をもたらす要因であった。屈曲点によるlength gainは腱の弾性よりも力学的効果によってもたらされていた。

研究成果の概要(英文)：Both the mechanism causing tendon curvature and its role remains unknown, to elucidate which the objective of this study was to investigate the anatomical structure and mechanisms that could possible cause the bending of the Achilles tendon during human ankle passive rotation. Removal of the Kager's fat pad in Thiel-embalmed cadavers produced tendon buckles where there is the location of the Kager's fat pad, but the tendon curvature was preserved. Such curvature disappeared when stiff plastic material was implanted instead of the Kager's fat pad. Tendon stiffness and collagen fiber distributed homogeneously with respect to the line of the tendon at the location of bending. Therefore, the structure of the Achilles tendon itself causes the bending. When the location of tendon bending was closer to the ankle center of rotation, the calcaneus excursion was amplified relative to the Achilles tendon length change due to the mechanical effect at the ankle rather than tendon elasticity.

研究分野：筋生理学

キーワード：Thiel法未固定解剖体 位相コントラストイメージング 受動的収縮 ヒト アキレス腱

1. 研究開始当初の背景

人間の筋肉といえば、勤勉で働きもののイメージだが、関節運動という現象に限って言えば、意外と怠惰なのかもしれない。例えば、筋線維束(以下、筋束と略す)は最大で15 mmしか短縮できないが、骨は35 mmも動くからである(筋束は腱膜と腱を介して骨と附着している)(Magnaris et al. 2000)。このことから、怠け者の筋肉に代わり、陰に隠れながら勤勉に働く“何か”が存在していることになる。申請者はここ数年間、この“何か”の存在を明らかにするための研究を推進してきた。

研究代表者は、前々回の基盤研究(C)「加齢に伴う筋腱複合体の形態・力学特性の変化」(平成20~22年度)と前回の若手研究(B)「高齢者の足関節底屈・背屈の動作不全のメカニズム解明」(平成23~24年度)の両課題を通じて、筋と腱の基本的な性質として、いくつかの新しい生理学的な知見を得ている。まず、筋束の動きが最も効率良く腱膜の動きに変換されるため、浅部腱膜が筋束の起始として筋束の端を固定し、深部腱膜が筋束の停止として筋束のもう一方の端を振り子のように動かしていることを明らかにした(Kinugasa et al. 2008)。その結果、筋束が腱膜に対して斜めに配向している羽状筋では、深部腱膜の動きが筋束の動きを上回ることになる(Azizi et al. 2008; Gans 1982)。その際、ある一つの腱膜だけでなく、別の筋束を停止させている隣の腱膜について、隣り合う腱膜同士が同一のタイミングで動くことで、筋末端部を最も大きく動かすことができる(Kinugasa et al. 2013)。さらに、筋束の長さ変化は筋体積を一定に保つため、筋の断面を卵型に変形させ(Kinugasa et al. 2012)、筋束は矢状面からみて前後方向に湾曲する結果、筋束の停止と腱膜との接地面積が増え、筋の動きを増幅している可能性がある。また、高齢者の特徴として、筋の動きの絶対量が小さい上、筋の動きを腱膜の動きに増幅するシステムを有していないため、腱膜の動きが小さくなり、足底動作の可動範囲が狭くなっていた。

これらの研究成果は、3編の原著論文(投稿中のもも含む)と1編の著書その他、国際バイオメカニクス学会での若手研究者賞のノミネート、アメリカスポーツ医学会での研究賞の受賞、国際実験動物学会での招待講演として国際的にも高い評価を受けている。

ここまでの研究成果は目覚ましいものであったが、以下の3つの問題を抱えている。

【問題1】前項の腱膜の作用は筋束の動きをわずか2~7 mm増幅するのに留まっており、増幅システムのメカニズム全容を説明することはできない。

【問題2】別の増幅作用として、屈曲点が挙げられる。屈曲点は腱の湾曲具合に応じて出現し、少ない腱の動きで骨を大きく動かす役割を果たしている可能性が示唆されている。しかしながら、屈曲点に関する研究はHodgson達の一つしかない。また、この研究は数理モ

デルベースでの検証に留まっており、ヒト生体で屈曲点の増幅効果が生じるのか、屈曲点の出現がどのような機構で起こっているのか、屈曲点の機能的意義は何なのか、については不明である。

【問題3】研究代表者の過去の研究成果は、主に筋と腱の力学的特性の知見の蓄積に限定されており、関節の動きといったbehaviorをもたらず階層の現象と結びついていない。そのため、実用化できるレベルに至っていない。

2. 研究の目的

上記の問題を解決するためには、関節の動きを引き起こしている屈曲点に着眼するしかない。そこで本研究は、以下の2点を明らかにすることを目的とする。

アキレス腱の屈曲点の出現するメカニズムを明らかにする。

上記を達成するため、(I) MRIによる屈曲点の出現部位の同定、(II) MRIによる屈曲点付近の筋組織と脂肪組織の変位、(III) 人体解剖によるヒラメ筋遠位端の剥離に伴う屈曲点出現部位の変化、(IV) 光学顕微鏡によるアキレス腱の膠原線維の配向性、をそれぞれ検証する。

アキレス腱の屈曲点のもつ機能的意義を明らかにする。

上記を達成するため、(V) 数理モデルを用いて屈曲点の有無が力と速度に及ぼす影響、(VI) 屈曲点のないカエルを用いて、屈曲点の有無(屈曲点を人工的に出現させる場合と屈曲点がない場合)が関節の動作速度に与える影響、をそれぞれ検証する。

3. 研究の方法

(1) MRIによる実験

10名の健常被験者が参加した。屈曲点の出現部位の同定には、1.5テスラのMRスキャナー(GEメディカルシステムズ社製)と a repetition time/echo time/flip angle of 13.3 ms/7.5 ms/20°, a 3-mm slice thickness, a 290-Hz receiver bandwidth/pixel, a 128 × 256 matrix size, a 160 × 320-mm field of view, two averages の位相コントラスト法の撮影パラメータを用いた。得られた画像から、アキレス腱上に20点の関心領域を設定した。アキレス腱の関心領域(i)の曲率(k)は以下の式によって算出した。

$$k_i = \frac{2\|(p_{i+1}-p_i) \times (p_{i-1}-p_i)\|}{\|p_{i+1}-p_i\| \|p_{i-1}-p_i\| \|p_{i+1}-p_{i-1}\|}$$

p_i 、 p_{i-1} 、 p_{i+1} は関心領域の位置ベクトルで隣り合う関心領域であった(Kinugasa et al. 2016)。

(2) 屍体を用いた実験

Thiel 法未固定解剖体 12 体の 20 肢を用いた。超音波診断装置（日立アロカメディカル社製）を用いて、6 条件下（切除なし、皮膚表面の剥離、Kager's fat pad の剥離、剥離した Kager's fat pad の位置への樹脂の挿入、ヒラメ筋遠位端の剥離、ヒラメ筋遠位の剥離）におけるアキレス腱の座標値を求め、上記の式で曲率を算出した。

アキレス腱と腱膜の HE 染色標本を作成した。光学顕微鏡（ニコン社製）と OrientationJ (<http://bigwww.epfl.ch/demo/orientation/>) ソフトを用いて、コラーゲン線維の配向性を測定した。

(3) 数理モデルによる検討

屈曲点の有無が力と速度に及ぼす影響については、Csapo et al. 2013 で明らかにされたため、ここでは、屈曲点の有無が length gain に及ぼす影響、および length gain が mechanical effect によるものか腱の弾性によるものかを明らかにするため、Hodgson et al. 2006 のモデルに以下の数理モデルを実装した。

The distance from the obstruction to the Achilles tendon insertion on the calcaneus is defined as

d

$$= \sqrt{(x - x_p)^2 + (y_p - y)^2}$$

where x_p and y_p are the x and y coordinates of the obstruction, respectively. The distance from the myotendinous junction (MTJ) to the obstruction is defined as

$$d_1 = \sqrt{(x_p - x_m)^2 + (y_p - y_m)^2}$$

where x_m and y_m are the x and y coordinates of the MTJ, respectively.

The straight ($l_{straight}$) and curved (l_{curved}) lines of the Achilles tendon length are defined as follows.

$$l_{straight} = \sqrt{(x - x_m)^2 + (y_m - y)^2}$$

$$l_{curved} = d + d_1$$

The position of Achilles tendon insertion on the calcaneus are displaced on the arc of radius M where centered on the COR (0,0) for each 1 mm increment in the Achilles tendon length until 20 mm. Length gain (g_L) is the ratio between vertical displacement of the calcaneus and change in length of the Achilles tendon and calculated as

$$g_L = \frac{(y_{+i} - y)}{(d_{+i} - d)}$$

where $(y_{+i} - y)$ is the change in y coordinate of insertion on the calcaneus which calculated by

adjacent node (y_{+i}) minus at a given node (y), and $(d_{+i} - d)$ is the change in length of the Achilles tendon which calculated by adjacent length (d_{+i}) minus at a given length (d), respectively.

4. 研究成果

アキレス腱の曲率は、足底屈位において背

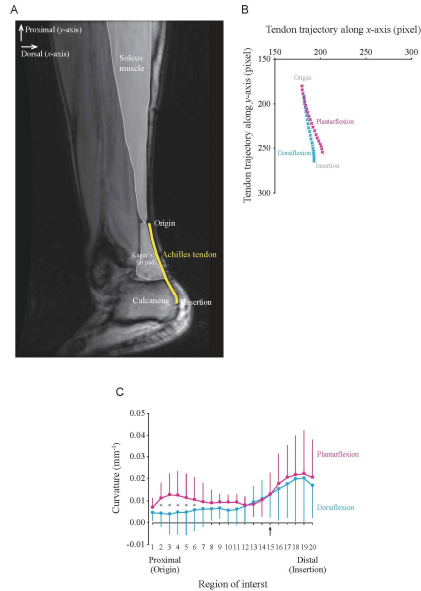


図 1. アキレス腱の曲率の定量.

屈位よりも近位側（関心領域 2-6）で有意に高値であった（図 1）。

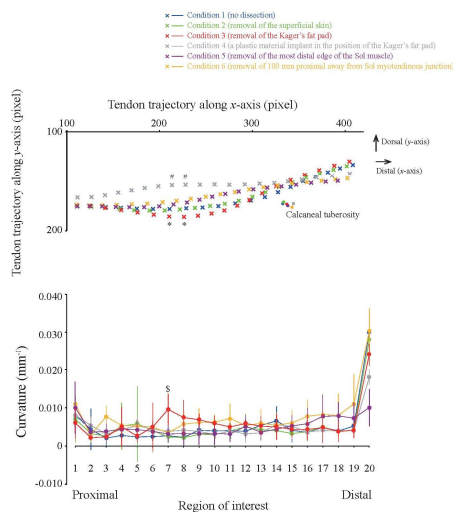


図 2. アキレス腱曲率の 6 条件間での比較.

屍体を用いた剥離実験の結果、アキレス腱の曲率は、Kager's fat pad 剥離後（条件 3）に他の条件間よりも有意に高かった（図 2）。しかしながら、この場合、腹側への曲率は保持されていた。また、Kager's fat pad 位置への樹脂の挿入により、アキレス腱が逆方向に変形した。

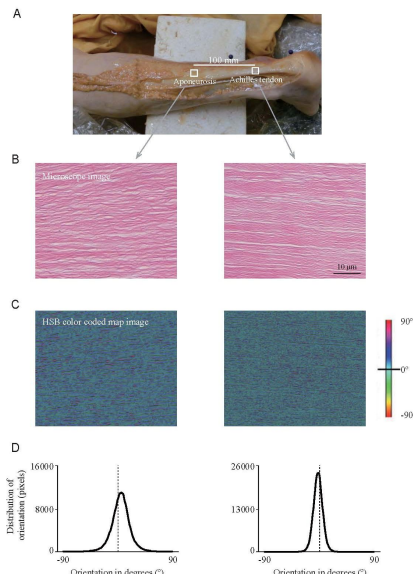


図3. コラーゲン線維の配向性 .

アキレス腱と腱膜のコラーゲン線維は、長軸方向に対して 2.4 ± 1.6 度、 2.4 ± 1.7 度しか傾いていなかった(図3)。このことから、コラーゲン線維は腱の長軸方向に対してほぼ均一に分布していることが伺える。

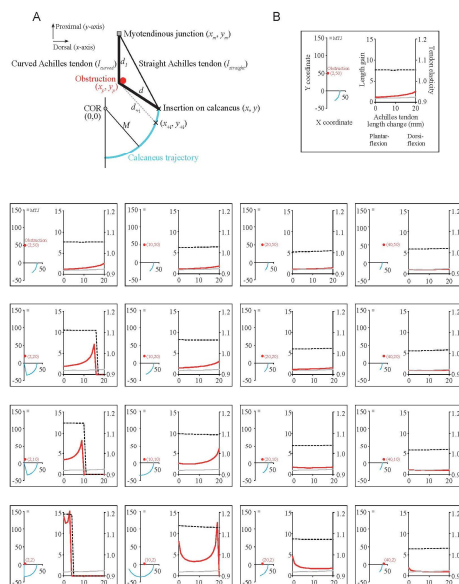


図4. 屈曲点が length gain に及ぼす影響 .

屈曲点が足関節の回転中心に近づけば近づくほど、length gain が大きくなるのが分かった。その際、tendon elasticity の大きさは最大で 1.2 程度であり、length gain の値よりも大きく下回ることから、length gain は tendon elasticity の影響よりも mechanical effect の影響が大きいことが伺える。

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5件)

1. Ryuta Kinugasa, Naoto Yamamura, Shantanu Sinha, Shu Takagi. Influence of Intramuscular Fiber Orientation on the Achilles Tendon Curvature using Three-dimensional Finite Element Modelling of Contracting Skeletal Muscle. *Journal of Biomechanics* 49 (14): 3592-3595, 2016.10.
2. Usha Sinha, Vadim Malis, Robert Csapo, Ali Moghadassi, Ryuta Kinugasa, Shantanu Sinha. Age-related differences in strain rate tensor of the medial gastrocnemius muscle during passive plantarflexion and active isometric contraction using velocity encoded MR imaging: Potential index of lateral force transmission. *Magnetic Resonance in Medicine* 73 (5): 1852-1863, 2015.05.
3. Toshiaki Oda, Takayuki Hisano, Dean C. Hay, Ryuta Kinugasa, Naoto Yamamura, Hideo Yokota, Shu Takagi. Anatomical geometry and thickness of aponeuroses in human cadaver triceps surae muscles. *Advanced Biomedical Engineering* 4: 12-15, 2015.01.
4. Naoto Yamamura, Luis J. Alves, Toshiaki Oda, Ryuta Kinugasa, Shu Takagi. Effect of tendon stiffness on the generated force at the Achilles tendon - 3D Finite Element Simulation of a Human Triceps Surae Muscle during Isometric Contraction. *Journal of Biomechanical Science and Engineering* 9: 13-00294, 2014.12.
5. Robert Csapo, John A. Hodgson, Ryuta Kinugasa, V. Reggie Edgerton, Shantanu Sinha. Ankle morphology amplifies calcaneus movement relative to triceps surae muscle shortening. *Journal of Applied Physiology* 115 (4): 468-473, 2013.08.

(学会発表)(計6件)

1. 小田俊明, 久野峻幸, 衣笠竜太: 腱膜の stiffness が筋腱複合体の力発揮特性ならびに変形に及ぼす影響 - 有限要素シミュレーション -. 第 29 回日本トレーニング科学学会大会 (桐蔭横浜大学@横浜市, 平成 28 年 10 月 29 日)
2. 衣笠竜太, 谷口圭吾, 藤宮峯子, 片寄正樹: アキレス腱が曲がるワケ. 第 70 回日本体力医学会 (和歌山県民文化会館・ホテルアバローム紀の国@和歌山市, 平成 27 年 9 月 18 日)
3. 谷口圭吾, 加藤拓也, 衣笠竜太, 藤宮峯子, 片寄正樹: 腱弾性の空間分布に及ぼす体表組織の影響. 第 70 回日本体力医学会 (和歌山県民文化会館/ホテルアバローム紀の国@和歌山市, 平成 27 年 9 月 18 日)

4. **Ryuta Kinugasa**, John A. Hodgson, V. Reggie Edgerton, Shantanu Sinha: Uncover the identity of obstruction on the Achilles tendon. 4th Congress of the International Foot and Ankle Biomechanics Community (Busan, Korea, April 9 and 10, 2014)
5. **Ryuta Kinugasa**: How can the muscle be organized to accomplish tendon displacement at the calcaneus that are similar to the muscle fiber length? In Symposium "Muscle-Tendon Interactions". The Society of Experimental Biology Annual Main Meeting 2013, Valencia, Spain, July 4, 2013.
6. **Ryuta Kinugasa**, Masaki Ishikawa, Naoto Yamamura, **Keigo Taniguchi**, Mineko Fujimiya, Masaki Katayose, V. Reggie Edgerton, Shantanu Sinha: True identity to move the foot quickly. 18th annual Congress of the European College of Sport Science (Barcelona, Spain, June 29, 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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

衣笠 竜太 (KINUGASA, Ryuta)
神奈川大学・人間科学部・准教授
研究者番号：10409378

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

谷口 圭吾 (TANIGUCHI, Keigo)
札幌医科大学・保健医療学部・講師
研究者番号：90381277

(4) 研究協力者

()