

令和 5 年 6 月 21 日現在

機関番号：32702

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H04009

研究課題名(和文) ヒトの歩行中における足底腱膜の3次元変形動態の解明

研究課題名(英文) Three-dimensional deformation of the plantar aponeurosis during human gait

研究代表者

衣笠 竜太 (Kinugasa, Ryuta)

神奈川大学・人間科学部・教授

研究者番号：10409378

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：ヒトが歩いている時の足底腱膜の変形を明らかにすることが目的であった。1つ目の成果として、MR室内で使用可能な非磁性体の筋力計を用いて、力発揮中の足首の角度を測定したところ、平均9度であり、従来の先行研究の結果よりも小さいことが分かった。2つ目の成果として、静止立位時の足底腱膜のステイフネスを測定したところ、静止立位時の足底腱膜のステイフネスを測定したところ、ヤング率は 64.7 ± 9.4 kPaと推定され、中足趾節関節を背屈させると指数関数的に増加した。3つ目の実験は、足底腱膜に複数の超音波プローブを貼った状態で歩行し、足底腱膜長変化を測定する計画を立てていたが、本実験を実施することができなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義
ヒト足底腱膜に関する定量的な情報は、ヒトの足の詳細なバイオメカニカルモデルの構築に貢献し、足底腱膜の力学的機能と病的メカニズムの理解を深める可能性がある。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study was to clarify the deformation of the plantar tendon membrane while humans walk. The first outcome was to measure the ankle angle during exertion using a non-magnetic force device that can be used in the MR room. The average angle was 9 degrees, which is smaller than the results of previous studies. The second outcome was to determine static plantar tendon stiffness. Plantar tendon stiffness during standing was measured and Young's modulus was estimated to be 64.7 ± 9.4 kPa, which increased exponentially with dorsiflexion of the metatarsophalangeal joint. The third experiment was planned to measure plantar tendon length changes by walking with multiple ultrasound probes affixed to the plantar tendon membrane, but this experiment could not be performed.

研究分野：スポーツ科学

キーワード：足底腱膜

1. 研究開始当初の背景

【本研究の学術的背景】

ヒトの歩行において、下腿三頭筋の活動による足関節の底屈がその推進力の大きな供給源である(Winter 1983)。収縮要素の下腿三頭筋は弾性要素のアキレス腱を介して踵骨に付着している。これまで多くの研究では、アキレス腱から足部に伝達された張力が、そのまま前足部から身体外部へ出力されるという仮定、つまり足部が剛体であるという仮定がなされてきた。しかし、足部は下腿三頭筋の活動に応じて変形するため(Iwanuma ら 2011)、下腿三頭筋の収縮から足関節底屈運動として現れる過程には、足部も直列する弾性要素として関与している可能性がある。

足部には、踵骨から中足骨へ扇形に広がる足底腱膜があり。これが足部縦アーチの主要な弾性要素を担っている(Ker ら 1987)。足底腱膜は歩行や使いすぎなどに伴う機械的負荷の蓄積によって変性し、足底腱膜炎や扁平足などを誘発する恐れがある(Grebing と Coughlin 2004)。毎年 240 万人が扁平足(Pita-Fernandez ら 2017)、毎年 90 万人が足底腱膜炎(熊井 2012)、に罹患する。治療には保存療法が効果的であるが(Davis ら 1994)、数年オーダーの時間がかかることもあり、深刻な社会問題である。このため、「足部縦アーチの弾性が非常に重要である」との仮説が成り立つ。

ヒト屍体の足底腱膜にファイバーケーブルを挿入し、歩行シミュレータを用いて歩行中の足底腱膜張力を実測すると、足底腱膜張力は踵着地から立脚中期にかけて増加し、足離地にかけて低下する(Erdemir ら 2004)。また、光学式マーカをヒト生体の足部体表面に貼り付け、モーションキャプチャを用いて歩行中のマーカ位置座標からアーチ高を推測すると、アーチ高は踵接地から立脚中期にかけて低くなり、足離地にかけて再び高くなる(Bencke ら 2012 他)。これらの結果は、足底腱膜がいわゆる“バネ”のように伸び縮む弾性を有していることを示唆するものであり、上記の仮説を支持している。しかし、ヒト屍体腱の弾性はヒト生体のものよりも柔らかく(Hohmann ら 2018)、歩行シミュレータ使用時の鉛直荷重はヒト生体の時よりも小さくなる(Chao ら 1983)という問題がある。また、モーションキャプチャは体表面のマーカの動きのみを測定しており、内部の足底腱膜の動きを測定していないという問題もある。以上のことから、ヒト屍体腱の研究結果とモーションキャプチャの研究結果が、実際のヒト生体の足底腱膜の変形を十分に模しているかには疑問の余地がある。

歩行中のヒト生体における足底腱膜の変形を直接定量した研究は、その計測の困難さゆえに、今のところ皆無である。Gefen (2003)は、1方向 X 線透視イメージングを用いて、歩行中の足部骨の矢状面内運動を動画撮影し、足底腱膜の長さを踵骨と第一中足骨の動きから“推測”している。その結果、足底腱膜は第一中足骨の接地から離地までの間、伸長し続けることを示し、これは上記の仮説を支持していない。

2. 研究の目的

2 方向低電圧 X 線透視イメージング技術を新たに開発し、ヒトが実際に歩いている時の足底腱膜の 3 次元変形動態を明らかにすることである。X 線透視装置の改良制約により、本研究において使用できなくなった。そのため、MR 装置や超音波画像装置を用いて、足底腱膜の変形動態を明らかにすることを目指した。

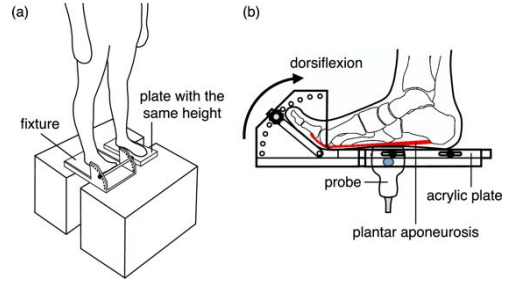
3. 研究の方法

1) MR 用一軸力センサーの開発

一つ目の実験として、MR ガントリー内での静的な筋力発揮を伴う実験を想定し、一軸力センサーを用いた足底屈曲トルクと足関節角度の計測に関する実験を行った。10 名の若年女性を対象に、MRI 用ストラップを付帯したベッドに固定し、一軸力センサーを押しながら等尺性足底屈筋収縮を 0%、20%、40%、60%、80%、100% で行った。モーメントアームは、筋収縮前に定規で測定した。筋収縮中の身体各部位と力センサーのアタッチメントの反射マーカはモーションキャプチャーシステムで撮影した。

2) 静止立位での中足趾節関節変化に伴う足底腱膜のスティフネスの変化

健康な若い男女（各 10 名）を対象に、超音波せん断波エラストグラフィーを用いて、静止立位時の中足趾節関節の受動背屈に伴うせん断波速度の変化を測定した（右図）。



3) 歩行中の足底腱膜長の変化

足裏に複数の超音波プローブを貼った状態で歩行し、足底腱膜長変化を測定するため、プローブ固定具や歩行路を製作した。プローブ固定具は 3D プリンタを用いて 3 つのプローブを直列に並べ、固定具同士はヒンジで連結した。歩行路は 2 枚の地面反力を並列に並べ、プローブ幅程度の間隙を 2 枚の地面反力の間で設けた。通常歩行について、地面反力計 1 枚、地面反力計 2 枚、地面反力計 2 枚+超音波プローブ貼付、の 3 試行で行い、鉛直方向の地面反力を測定した。

4 . 研究成果

1) MR 用一軸力センサーの開発

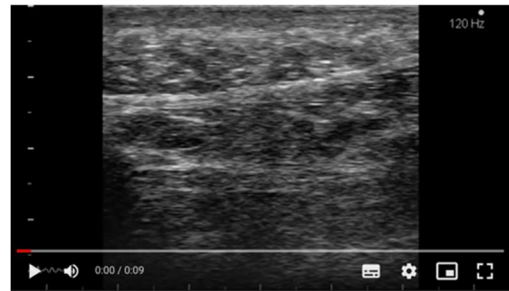
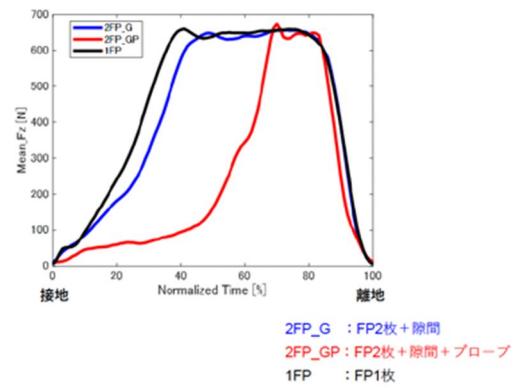
筋収縮中の足首関節角度の変化は平均 9 度未満であった。定規で測定されたモーメントアームの値は、モーションキャプチャーデータから計算された値と同様であった。これらの結果は、MRI 用力センサーと定規によるモーメントアームの測定が足底屈トルク測定に有用であることを示唆している。

2) 静止立位での中足趾節関節変化に伴う足底腱膜のスティフネスの変化

足底腱膜のヤング率は $64.7 \pm 9.4 \text{ kPa}$ と推定され、中足趾節関節の背屈に伴って指数関数的に増加した。また、中足趾節関節を 13.8° 底屈させると足底腱膜は自然長になると推定され、起立時のアーチ圧縮により足底腱膜が伸張することが示された。しかし、本研究では、静止立位時の足底腱膜の自然長での推定された剛性は、無負荷時の剛性よりも有意に大きいことが分かった。このことから、立位時の足底腱膜は伸長と固有筋の活動により硬くなることを示唆している。このような定量的な情報は、ヒトの足の詳細なバイオメカニカルモデルの構築に貢献し、足底腱膜の力学的機能と病的メカニズムの理解を深める可能性がある。

3) 歩行中の足底腱膜長の変化

地面反力計 2 枚と 1 枚での地面反力は類似していたが、地面反力計 2 枚+超音波プローブ貼付でのそれは、大きく異なっていた（右図の上）。これらの結果から、地面反力の波形の違いは、2 枚の地面反力計の間にあるプローブ間隙でなく、超音波プローブを装着していることへの影響だと考えられる。つまり、超音波プローブのことを気にしてしまい、歩行が慎重になっているため、練習すれば、自然な歩行になることが伺えた。歩行中における足底腱膜の真ん中部分の超音波画像については、撮影に成功した（右図の下）。



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Nozaki Shuhei, Kinugasa Ryuta, Yaeshima Katsutoshi, Hashimoto Takeshi, Jinzaki Masahiro, Ogiwara Naomichi	4. 巻 12
2. 論文標題 Quantification of the in vivo stiffness and natural length of the human plantar aponeurosis during quiet standing using ultrasound elastography	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 15707
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-022-20211-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

https://muscle.kanagawa-u.ac.jp/

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
研究分担者	鈴木 崇人 (Suzuki Takahito) (20638960)	神奈川大学・人間科学研究科・研究員 (32702)	
研究分担者	八重嶋 克俊 (Yaeshima Katsutoshi) (50625910)	神奈川大学・人間科学部・非常勤講師 (32702)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究 分 担 者	荻原 直道 (Ogihara Naomichi) (70324605)	東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・教授 (12601)	

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