

令和 6 年 5 月 11 日現在

機関番号：17201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K11263

研究課題名(和文) 感圧測定システムによる踵腓靭帯の機能解析～靭帯損傷のテーラーメイド予防を目指して

研究課題名(英文) Functional analysis of the calcaneofibular ligament by using pressure sensitive sensor in cadavers

研究代表者

倉岡 晃夫 (KURAOKA, AKIO)

佐賀大学・医学部・教授

研究者番号：30253412

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：近年、緊張した踵腓靭帯(CFL)が腓骨筋腱をリフトアップする現象が報告され、CFLが腓骨筋の作用を補助するテンショナーとして機能する可能性が示唆されている。本研究では6体11肢の解剖体標本と感圧センサを用い、CFLが緊張する肢位における接触圧を計測し、リフトアップ現象の詳細を明らかにすることを目的とした。内がえし0、5、10、15度において、接触圧に相当する平均出力値(mV)は各々 3.1 ± 9.3 、 340.9 ± 437.8 、 1178.6 ± 682.0 、 2063.0 ± 577.7 と増大し、統計学的な有意差が認められた。これらの結果は、内がえしがCFLのテンショナー効果を増強する可能性を示唆している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来、関節の安定化や関節運動の制御を担う靭帯と、筋肉に発生した張力を骨に伝えることで関節運動を担う腱は機能的に独立したものと考えられてきた。CFLによる腓骨筋腱のリフトアップ現象は、靭帯と腱の間に相互作用が存在することを示唆する常識を覆す知見であり、本研究結果はこのリフトアップ現象の詳細を定量的かつ具体的に示した点で意義あるものと考えられる。また今後の展開として、特に生体におけるCFLのテンショナー機能、ひいては足部の運動制御機構の全貌を明らかにすることで、捻挫の後遺症として問題とされる慢性足関節不安定症の病態、あるいは腓骨筋の反応時間が遅延するメカニズム等の解明につながる可能性が考えられる。

研究成果の概要(英文)：Recently, a cadaveric study revealed that the tensed calcaneofibular ligament (CFL) lifts the peroneal tendons. This phenomenon strongly indicates that the CFL acts as a tensioner for effective transmission of contractile activity of the peroneal muscles. The purpose of this study was to investigate changes in the contact pressure between the CFL and peroneal tendons during inversion (Inv) using a pressure sensitive sensor (PSS). In 11 cadaveric ankle specimens, measured mean voltage values (mV) were 3.1 ± 9.3 (Inv 0°), 340.9 ± 437.8 (Inv 5°), 1178.6 ± 682.0 (Inv 10°), and 2063.0 ± 577.7 (Inv 15°), and significant differences were detected between Inv 0° vs 10° , Inv 0° vs 15° , and Inv 5° vs 15° . Since the CFL tenses during Inv and the values can be regarded as actual contact pressure, it was clearly demonstrated that the generated pressure is increased as the ankle joint is more inverted. These results suggest that the Inv enhances the tensioner effect by the CFL on the peroneal tendons.

研究分野：解剖学

キーワード：踵腓靭帯 足部外側靭帯群 臨床解剖学 機能解剖学

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 踵腓靭帯 (CFL, 図1) は、前距腓靭帯および後距腓靭帯とともに足関節外側靭帯群を構成し、距腿関節や距骨下関節の安定化や運動の受動的制御に重要な役割を担っている (Hunt et al., 2018)。

(2) 近年、非接触式 3D デジタイザを用いた機能解剖学的研究から、緊張した CFL が長・短腓骨筋腱 (図1) を外側方向へ有意にリフトアップする相互作用が明らかとなった (Yoshizuka and Kuraoka, 2022)。このリフトアップ現象は、CFL が腓骨筋の効率的な収縮を補助する“テンショナー”として足部の運動制御に関わる可能性を強く示唆しているが、実際に発生している接触圧の程度や肢位の変化に伴う変動は不明である。

(3) 解剖体を用いた機能解剖学的研究では、治具に標本を固定した状態で肢位を変化させ、計測を実施する手法が一般的である。しかし、足部の運動は「背屈・底屈」、「内がえし・外がえし」、「内転・外転」の三方向が定義され複雑であることから、再現性の高い精密計測を行うためにはセッティングに細心の注意を払う必要があり、誤差が生じる可能性を否定できない。

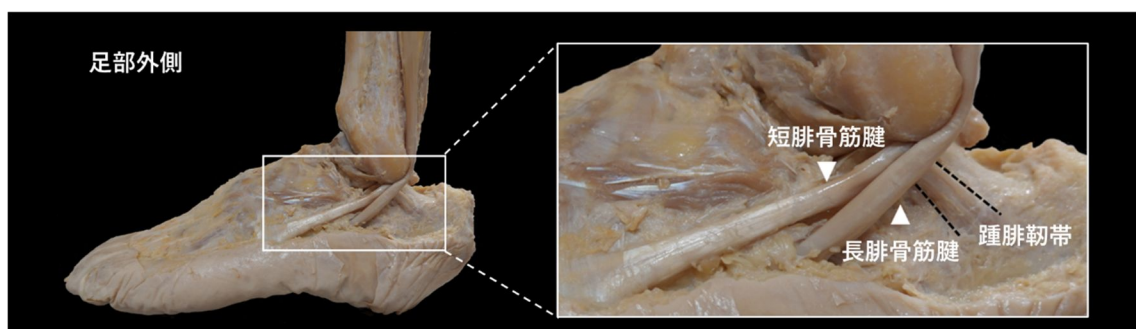


図1 足部外側の踵腓靭帯と長・短腓骨筋腱

2. 研究の目的

本研究では感圧センサを用い、解剖体の肢位変化に伴って生じる CFL と短腓骨筋腱の間の接触圧の変動を定量的に計測することで、リフトアップ現象の詳細を明らかにすることを目的とした。また、生体の動作解析研究において豊富な使用実績がある慣性センサを標本固定治具に代えて用いることで、関節角度の精密な 3 軸モニタリングが可能となり、より高精度な解析結果が期待される。

3. 研究の方法

[対象]

佐賀大学医学部の系統解剖学実習に供された 9 体 18 肢 (男性 8 体・女性 1 体) につき事前評価を行い、除外基準 (足部の外傷や手術の痕跡、足底部の変形、腓骨筋腱の伸展性低下) をもって試料の適否を判断した。その結果、6 体 11 肢 (男性 5 体・女性 1 体、死亡時平均年齢 81 ± 6 歳) を計測対象とした。

本研究の実施にあたっては、事前に佐賀大学医学部倫理委員会の承認を得ている (承認番号: R3-10)。

[標本作製]

解剖実習では下腿と足部の皮膚・皮下組織・深部筋膜が除去され、CFL を含む足関節外側・内側靭帯と長・短腓骨筋および腱は intact な状態であった。解剖体の膝関節を離断した後、まず長・短腓骨筋と腱、外側靭帯である前距腓靭帯、CFL、後距腓靭帯、そして内側靭帯である三角靭帯を精密に剖出した。次に足関節・足部の関節可動性 (底屈 10 度、内がえし 15 度) を確保するため、関節周辺組織を除去し、後距腓靭帯と三角靭帯の一部を切離した。

[実験準備 (図2)]

CFL と短腓骨筋腱の間に、円形シート状 (直径 10 mm、厚さ 0.21 mm) の感圧センサ (キャノン化成, 茨城) を挿入した。また、標本の正確な関節角度をリアルタイムに可視化するため、3 軸性のワイヤレス慣性センサ (WaveTrack; Cometa srl, Milan, Italy) を下腿前面と中足部にテープで固定した。



図2 感圧センサおよび慣性センサの設置方法

[計測方法]

底屈10度かつ内外転0度の条件下で、内がえし0度、5度、10度、15度における感圧センサ出力値をサンプリング周波数64Hzにて記録した。計測は各肢位につき5秒以上行い、得られた320データの平均値を代表値とした上で、下記の換算式を用いて電圧値を算出した。

$$\text{センサ出力値} / 1024 \times 3.3 \times 1000 = \text{電圧値 (mV)}$$

[統計学的解析]

すべての統計学的解析にはR software version 4.3.0 (R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria)を使用し、有意水準は $P = 0.05$ とした。また、データの再現性を確認するために、3標本については計測完了後に全てのセンサを再設置し、2回目の計測を実施した。Shapiro-Wilk検定にてデータ分布の正規性を確認した後、級内相関係数(ICC)を算出し、値が0.50未満を“poor”、0.50~0.75を“moderate”、0.75~0.90を“good”、0.90を超えた際は“excellent”と判断した(Koo and Li, 2016)。

4. 研究成果

(1)内がえし0、5、10、15度の電圧値は、各々 3.1 ± 9.3 mV、 340.9 ± 437.8 mV、 1178.6 ± 682.0 mV、 2063.0 ± 577.7 mVであり、Friedman Testを用いた分散分析にて有意差($P < 0.001$)が認められた。

(2)Steel-Dwass testを用いた多重比較では、内がえし0度と5度の間を除いて電圧値の有意な増加が認められた($P < 0.05 \sim 0.001$, 図3)。

(3)センサ出力値の再現性に関して、検者内信頼性を示すICC(1,1)は0.9003であり、“excellent”と判定された。

(4)[考察]

計測された電圧値は、CFLと短腓骨筋腱の間の接触圧に相当する。したがって上記の結果は、内がえし角度の増加に伴って、CFLが長・短腓骨筋腱をより強くリフトアップすることを示している。このことは、不整地歩行において急激な内がえしを強いられ、足部の速やかなコントロールが必要となった場合、腓骨筋腱のテンションが高まり迅速な姿勢制御をもたらしめている可能性を示唆する。

また、感圧センサと慣性センサの両者を用いた本研究手法が、高い再現性を示すことも確認された。

(5)[本研究の位置づけ・インパクト]

従来、関節の安定化や関節運動の制御を担う靭帯と、筋肉に発生した張力を骨に伝えることで関節運動を担う腱は機能的に独立したものと考えられてきた。CFLによる腓骨筋腱のリフトアップ現象は、靭帯と腱の間に相互作用が存在することを示唆する常識を覆す知見であり、本研究成果はこのリフトアップ現象の詳細を定量的かつ具体的に示した点で意義あるものと考えられる。

今後の展開として、特に生体におけるCFLのテンショナー機能、ひいては足部の運動制御機構の全貌を明らかにすることで、捻挫の後遺症として問題と

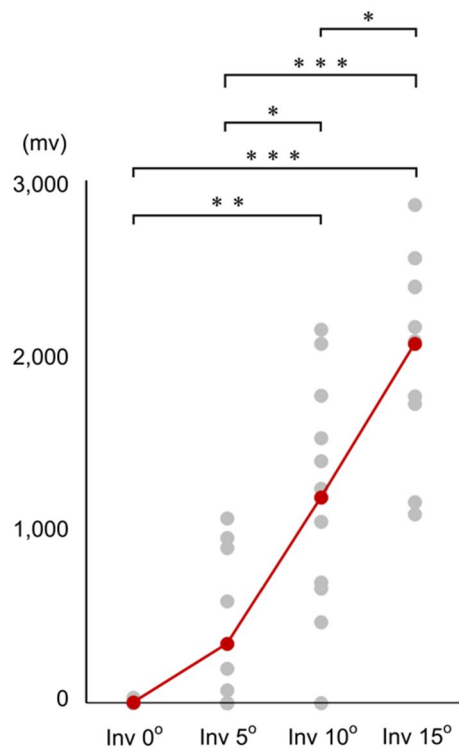


図3 内がえし角度の増加に伴う接触圧(電圧値)の変動

灰色と赤色のサークルは、各標本における電圧値と平均値を各々示す。内がえし0度と5度の間を除いて、すべての平均値間に有意差が認められた。

Inv, Inversion (内がえし)。

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$

される慢性足関節不安定症の病態、あるいは腓骨筋の反応時間が遅延するメカニズムの解明につながる可能性が考えられる。また、リハビリテーション医学における長・短腓骨筋に最適なトレーニング理論の開発、スポーツ分野におけるエクササイズ理論の発展など、幅広い領域への貢献も期待される。

<引用文献>

- (1) Hunt KJ, Pereira H, Kelley J, Anderson N, Fuld R, Baldini T, Kumparatana P, D'Hooghe P (2019) The Role of calcaneofibular ligament injury in ankle instability: Implications for surgical management. *Am J Sports Med* 47:431–437.
- (2) Yoshizuka H, Kuraoka A (2022) Calcaneofibular ligament may act as a tensioner of peroneal tendons as revealed by a contactless three-dimensional scan system on cadavers. *Sci Rep* 12:16650.
- (3) Koo TK, Li MY (2016) A Guideline of Selecting and Reporting Intraclass Correlation Coefficients for Reliability Research. *J Chiropr Med* 15:155-63.

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 Yoshizuka H, Kuraoka A	4. 巻 12
2. 論文標題 Calcaneofibular ligament may act as a tensioner of peroneal tendons as revealed by a contactless three dimensional scan system on cadavers	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 16650
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-022-21115-5	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5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 吉塚久記、柴田健太郎、倉岡晃夫
2. 発表標題 長・短腓骨筋腱は緊張した踵腓靭帯によりリフトアップされる：解剖体を用いた機能解析
3. 学会等名 第5回日本リハビリテーション医学会秋季学術集会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉塚久記、中尾優太郎、倉岡晃夫
2. 発表標題 踵腓靭帯の走行角度の違いが機能に及ぼす影響：伸縮性ひずみセンサと慣性センサを用いた機能解剖学的研究
3. 学会等名 第6回日本リハビリテーション医学会秋季学術集会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中尾優太郎、吉塚久記、浅見豊子、倉岡晃夫
2. 発表標題 足関節前方引き出しテストの肢位条件に関する機能解剖学的研究：慣性センサと伸縮性ひずみセンサを用いて
3. 学会等名 日本解剖学会第78回九州支部学術集会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yoshizuka H, Nakao Y, Kuraoka A
2. 発表標題 Inversion enhances tensioner effect by the calcaneofibular ligament: A pilot study using pressure sensitive sensor on cadavers
3. 学会等名 Asian Confederation of Physical Therapy Congress 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中尾優太郎、吉塚久記、倉岡晃夫
2. 発表標題 内がえしは踵腓靭帯のテンショナー効果を増強する～感圧センサによる解剖体の機能解析～
3. 学会等名 第129回日本解剖学会総会・全国学術集会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔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
研究 分担者	吉塚 久記 (YOSHIZUKA HISAYOSHI) (00879942)	福岡国際医療福祉大学・医療学部・講師 (37130)	

	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 協力者	中尾 優太郎 (NAKAO YUTARO)		

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
---------	---------