

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：20101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K09208

研究課題名(和文) 足関節捻挫後遺症における静電容量型センサ素子を用いた関節不安定性定量評価

研究課題名(英文) Quantitative assessment of joint instability using a capacitive sensor for ankle sprains

研究代表者

寺本 篤史(Teramoto, Atsushi)

札幌医科大学・医学部・教授

研究者番号：20404642

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)：基礎研究では、静電容量型センサを装着して前方引き出しテストによる前方引き出し量を計測した。前距腓靭帯損傷、踵腓靭帯損傷モデルを作製し、同計測を行った。検者内相関係数0.949～0.966、3検者間級内相関係数0.815と高い精度での定量評価が可能であった。臨床では、足関節不安定症患者を対象に静電容量型センサによる不安定性評価を行った。同時にストレスレントゲン撮影を行った。Pearson相関係数0.843 ( $p < 0.001$ , 95%信頼区間 0.65-0.93)と高い相関関係が証明された。靭帯修復術を行った結果、センサによる前方引き出し量は10.5mmから4.6mmに改善した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

静電容量型センサ素子による足関節不安定症評価をThiel法固定人体標本を用いた基礎研究と、患者による臨床研究と同時に行った。その結果から、静電容量型センサ素子による足関節不安定性の定量評価の精度が高いことが学術的に証明され、英語論文掲載にいたった。臨床応用も開始され、静電容量型センサ素子が足関節不安定症評価として安全で容易かつ、正確な診断ツールとして期待できるようになった。

研究成果の概要(英文)：In a biomechanics study using cadavers, a capacitance-type sensor was attached to the ankle, and the amount of anterior drawer in an anterior drawer test was measured. Anterior talofibular ligament and calcaneofibular ligament injury models were created and the same measurements were performed. The intra-examiner correlation coefficient was 0.949-0.966, and the intraclass correlation coefficient between three examiners was 0.815. Clinically, ankle instability was evaluated using capacitance-type sensor in patients. Stress X-rays were taken using the Telos device to apply anterior drawer stress. A Pearson correlation coefficient of 0.843 ( $p < 0.001$ , 95% CI 0.65-0.93) was obtained, proving a high correlation between stress X-rays and the capacitance sensor. After alateral ankle ligament repair, the anterior drawer amount measured by the capacitance sensor improved from 10.5 mm preoperatively to 4.6 mm postoperatively.

研究分野：整形外科、スポーツ医学

キーワード：足関節捻挫 足関節外側靭帯損傷 足関節不安定症 静電容量型センサ素子 定量的評価

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

足関節捻挫は最も頻度の高い外傷であり、スポーツ活動のみならず日常生活動作においても受傷の機会が多い。足関節捻挫に伴う足関節外側靭帯損傷は保存治療で治癒することがある一方で、約 20%の確率で陳旧性となり、捻挫を繰り返し、足関節捻挫後遺症になると報告されている。

足関節捻挫後遺症の中で問題になる症状は足関節不安定症である。足関節不安定症は足関節痛や不安定感、スポーツ活動制限などの支障を来し、治療が必要となる。理学療法や装具などの保存治療に加え、靭帯修復術や靭帯再建術などの手術治療が必要になることがある。治療選択は不安定性の程度によって決定されるが、既存の評価法では足関節不安定性の評価が十分には行えない。

既存の評価法である徒手的不安定性評価は不安定性の有無を確認する上で重要な検査であるが、定量的評価が不能である。ストレスレントゲン撮影は距骨傾斜角や前方引き出し量を計測することで定量的評価が可能であるが、放射線被曝の問題やストレスに伴う疼痛や症状悪化のリスクを伴う。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、静電容量型センサ素子による足関節不安定性の定量的評価を実現することである。本研究で用いる静電容量型センサ素子はエラストマーフィルム絶縁層と、ナノカーボンからなる伸縮性導電層の積層体で構成されているひずみセンサである。センサ自身の伸長で電極間距離と面積が変化し、それに伴って増加する静電容量値を捉えることで、伸長量を正確に計測することが可能である。この静電容量型センサ素子を用いて足関節不安定性を定量的に評価することができれば、安全で容易かつ、正確な診断につながることを期待される。

### 3. 研究の方法

【対象】足関節捻挫を受傷しその後不安定感を主訴として、札幌医科大学附属病院を受診した患者を対象とする。計 50 症例を予定とし、患者の年齢・性別は問わない。本研究は札幌医科大学附属病院臨床研究審査委員会の承認を得ている。また、Thiel 法固定人体標本は本学白菊会への献体を用いる。標本から切り出した足・足関節 10 体を用いる。こちらも札幌医科大学倫理委員会の承認を得ている。

【方法】患者の診察において徒手検査を行い、足関節不安定性（前方引き出し、内がえし）を評価する。同時に静電容量型センサ素子を装着したサポーターを装着し、前方引き出し量と内がえし量を計測する。さらに、テロスデバイスを用いてレントゲン撮影室で前方引き出しストレスと内がえしストレスを加えてのストレスレントゲン撮影を行う。

Thiel 法固定人体標本においては正常足関節に静電容量型センサ素子を装着したサポーターを装着し、徒手検査と同様に前方引き出し量と内がえし量を計測する。三次元電磁場センサーを用いて、同徒手検査における前方引き出し量と内がえし量も計測する。三次元電磁場センサーは実験における磁場空間内で脛骨と距骨の三次元位置座標を経時的に記録できるため、任意の距離と角度を三次元的に計測可能である。その後、前距腓靭帯損傷モデル、踵腓靭帯損傷モデルを作製し、同検査と計測を行う。

【評価】患者においては静電容量型センサ素子で計測された前方引き出し量、内がえし量とストレスレントゲンで計測された同計測値を比較検討する。Thiel 法固定人体標本においても同様に静電容量型センサ素子と三次元電磁場センサーの計測値を比較検討する。またいずれの計測も 3 名の独立した検者が行い、検者間信頼性も評価する。本研究の結果から、静電容量型センサ素子による足関節不安定性の定量的評価が可能となり、ストレスレントゲンや三次元電磁場センサーによる計測と同等以上の精度が得られることで、徒手検査において安全で容易かつ、正確な診断が可能になることが期待される。

### 4. 研究成果

研究期間全体を通して、静電容量型センサ素子による足関節不安定性の定量的評価を行うことが可能となった。Thiel 法固定遺体の足・足関節 5 体を用いたバイオメカニクス研究では、正常足関節に静電容量型センサ素子を装着したサポーターを装着し、前方引き出しテストにおける

前方引き出し量を計測した。その後、前距腓靭帯損傷モデル、踵腓靭帯損傷モデルを作製し、同計測を行った。その結果、検者内相関係数 0.949~0.966 (図1)、3検者間級内相関係数 0.815 (図2) と高い精度での定量的評価が可能であることを証明した。

## Correlation coefficient of Intra-investigator

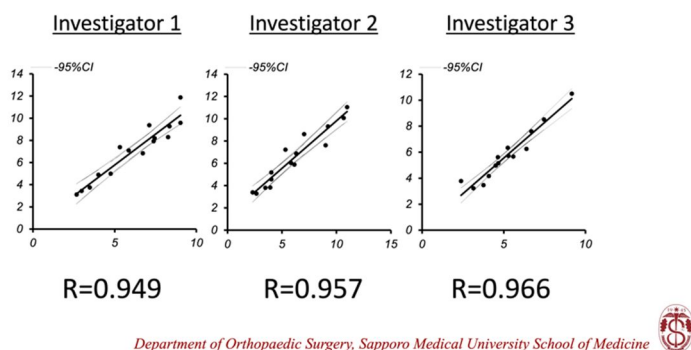


図1 前方引き出し量の検者内相関係数

## Anterior drawer distance

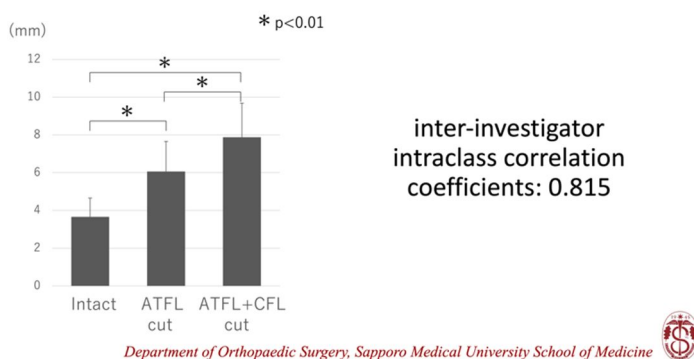


図2 各条件での前方引き出し量と3検者間級内相関係数

臨床では、陳旧性足関節外側靭帯損傷によって足関節不安定感を主訴とした患者 22 例を対象として静電容量型センサ素子による足関節不安定性評価を行った。同時に、テロスデバイスを用いてレントゲン撮影室で前方引き出しストレスと内がえしストレスを加えてのストレスレントゲン撮影を行った。その結果、Pearson 相関係数 0.843 (図3、 $p < 0.001$ , 95%信頼区間 0.65-0.93) とストレスレントゲンと静電容量型センサ素子の高い相関関係が証明された。

## Scatterplot of anterior drawer displacement measured by the sensor and on X-rays

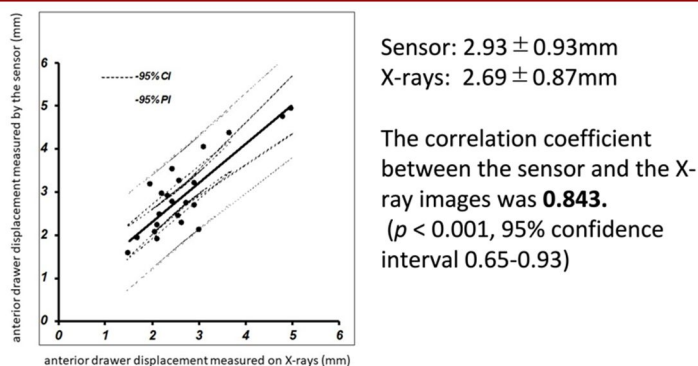


図3 ストレスレントゲンと静電容量型センサ素子による計測との相関関係

また、鏡視下足関節外側靭帯修復術を行った結果、足関節不安定感は全例で改善または消失し、静電容量型センサ素子による前方引き出し量は術前 10.5mm から術後 4.6mm に改善した（図 4）。さらには、研修医と専門医の間で前方引き出し量の計測誤差が生じにくい supported anterior drawer test (ADT)を開発し、その精度評価を行った。

## Objective assessment of instability

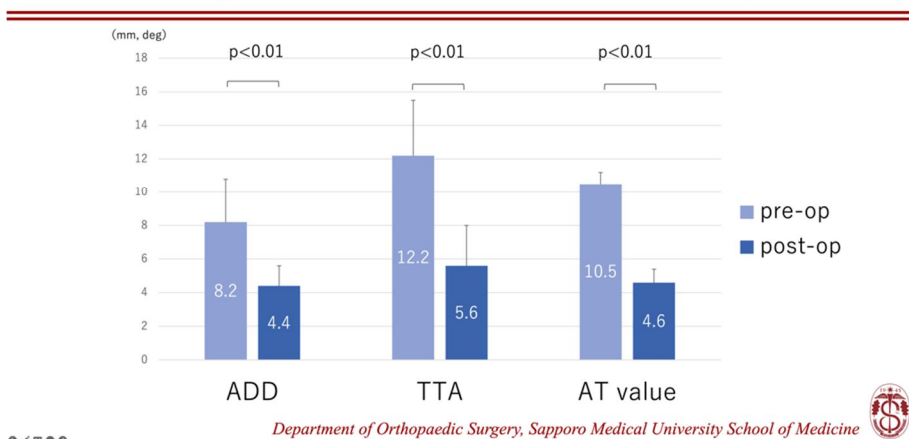


図 4 鏡視下足関節外側靭帯修復術の術前後前方引き出し量 (AT value)

これらの研究実績は日本整形外科学会や日本足の外科学会、American Orthopaedic Foot & Ankle Society などの国内外学会において発表し、Foot and Ankle International や Orthopaedic Journal of Sports Medicine といった英文雑誌に掲載された。

### 引用文献

Quantitative Evaluation of Ankle Instability Using a Capacitance-Type Strain Sensor.  
Teramoto A, Iba K, Murahashi Y, Shoji H, Hirota K, Kawai M, Ikeda Y, Imamura R, Kamiya T, Watanabe K, Yamashita T.  
Foot Ankle Int. 2021 Aug;42(8):1074-1080.

Effect of Accelerated Rehabilitation on Early Return to Sport After Arthroscopic Ankle Lateral Ligament Repair.  
Teramoto A, Murahashi Y, Takahashi K, Watanabe K, Yamashita T.  
Orthop J Sports Med. 2022 Sep 13;10(9):23259671221121676.

High reproducibility of a novel supported anterior drawer test for diagnosing ankle instability.  
Murahashi Y, Teramoto A, Takahashi K, Okada Y, Okimura S, Imamura R, Kawai M, Watanabe K, Yamashita T.  
BMC Musculoskelet Disord. 2023 Feb 27;24(1):148.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Murahashi Y, Teramoto A, Takahashi K, Okada Y, Okimura S, Imamura R, Kawai M, Watanabe K, Yamashita T	4. 巻 Feb 27;24(1)
2. 論文標題 High reproducibility of a novel supported anterior drawer test for diagnosing ankle instability	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 BMC Musculoskelet Disord	6. 最初と最後の頁 148
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s12891-023-06246-8	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 -

1. 著者名 Sakakibara Yuzuru, Teramoto Atsushi, Takagi Tetsuya, Yamakawa Satoshi, Shoji Hiroaki, Okada Yohei, Kobayashi Takuma, Kamiya Tomoaki, Fujimiya Mineko, Fujie Hiromichi, Watanabe Kota, Yamashita Toshihiko	4. 巻 43
2. 論文標題 Effects of the Ankle Flexion Angle During Anterior Talofibular Ligament Reconstruction on Ankle Kinematics, Laxity, and In Situ Forces of the Reconstructed Graft	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Foot & Ankle International	6. 最初と最後の頁 725 ~ 732
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1177/10711007211069327	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

1. 著者名 Teramoto Atsushi, Murahashi Yasutaka, Takahashi Katsunori, Watanabe Kota, Yamashita Toshihiko	4. 巻 10
2. 論文標題 Effect of Accelerated Rehabilitation on Early Return to Sport After Arthroscopic Ankle Lateral Ligament Repair	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Orthopaedic Journal of Sports Medicine	6. 最初と最後の頁 2.32597E+14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1177/23259671221121676	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 -

1. 著者名 堀田 和志, 寺本 篤史, 村橋 靖崇, 高橋 克典, 渡邊 耕太, 山下 敏彦	4. 巻 43
2. 論文標題 電容量型センサ素子を用いた歩行と足関節運動における前距腓靭帯の仮想伸長量.	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本足の外科学会雑誌	6. 最初と最後の頁 74-77
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

1. 著者名 寺本篤史:	4. 巻 102
2. 論文標題 足の鏡視下手術で使用できる最新のデバイス.	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 整形外科最小侵襲手術ジャーナル	6. 最初と最後の頁 34-41
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス 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 -

1. 著者名 Teramoto A, Iba K, Murahashi Y, Shoji H, Hirota K, Kawai M, Ikeda Y, Imamura R, Kamiya T, Watanabe K, Yamashita T.	4. 巻 Aug;42(8)
2. 論文標題 Quantitative Evaluation of Ankle Instability Using a Capacitance-Type Strain Sensor.	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Foot Ankle Int.	6. 最初と最後の頁 1074-1080
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1177/1071100721996714.	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

1. 著者名 Teramoto A, Iba K, Watanabe K, Kamiya T, Okada Y, Yamashita T.	4. 巻 26
2. 論文標題 Symptomatic ossicle lesion at the anterior tip of the medial malleolus in soccer players.	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 J Orthop Sci.	6. 最初と最後の頁 1069-1073.
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jos.2020.09.008.	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

1. 著者名 寺本篤史, 藤江裕道, 榊原醸, 小路弘晃, 渡邊耕太, 山下敏彦	4. 巻 64
2. 論文標題 ロボットシステムの足関節バイオメカニクス研究への応用	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 整・災外	6. 最初と最後の頁 579-584
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス 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 -

1. 著者名 寺本篤史	4. 巻 64
2. 論文標題 足関節不安定性の定量評価デバイス	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 整・災外	6. 最初と最後の頁 897-899
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス 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 -

〔学会発表〕 計10件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Teramoto A
2. 発表標題 Quantitative evaluation of chronic lateral ankle instability (Guest Nation program)
3. 学会等名 The 67th Annual Congress of the Korean Orthopaedic Association (KOA) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 寺本篤史 村橋靖崇 高橋克典 山下敏彦 渡邊耕太
2. 発表標題 足関節外側不安定症 (CLAI) の診断
3. 学会等名 第96回日本整形外科学会学術総会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 寺本篤史 村橋靖崇 山下敏彦 渡邊耕太
2. 発表標題 ATメジャーによる足関節不安定性の定量評価
3. 学会等名 第51回日本関節病学会学術集会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 寺本篤史 村橋靖崇 榎原醸 高橋克典 森勇太 渡邊耕太
2. 発表標題 足関節捻挫のバイオメカニクス
3. 学会等名 第50回日本臨床バイオメカニクス学会学術集会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 寺本篤史
2. 発表標題 スポーツ整形外科における足・足関節の診療イノベーション
3. 学会等名 日本スポーツ整形外科学会 (JSOA) 2023 特別講演 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 寺本篤史
2. 発表標題 基礎からわかる足関節鏡視下靭帯修復術
3. 学会等名 第34回日本臨床スポーツ医学会学術集会 教育研修講演 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Teramoto A, Murahashi Y, Takahashi K, Watanabe K, Yamashita T
2. 発表標題 Clinical outcomes of arthroscopic ankle lateral ligament repair with accelerated rehabilitation
3. 学会等名 American Orthopaedic Foot and Ankle Society (AOFAS) Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 Murahashi Y, Teramoto A, Takahashi K, Watanabe K, Yamashita T.
2. 発表標題 High Reproducibility of a Novel Fixed Anterior Drawer Test for Diagnosing Ankle Instability.
3. 学会等名 American Orthopaedic Foot and Ankle Society (AOFAS) Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Teramoto A
2. 発表標題 Capacitance-type strain sensor for quantitative evaluation of ankle instability
3. 学会等名 German Congress of Orthopaedics and Traumatology (DKOU 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 寺本篤史 村橋靖崇 高橋克典 山下敏彦 河合誠 渡邊耕太
2. 発表標題 Accelerated Rehabilitationを行った鏡視下足関節外側靭帯修復術
3. 学会等名 第14回日本関節鏡・膝・スポーツ整形外科学会 (JOSKAS) ・第48回日本整形外科スポーツ医学会学術集会 (JOSSM)
4. 発表年 2022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
---------	---------------------------	-----------------------	----

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