

## Foot wear 装着下での足部運動解析手法の確立

森ノ宮医療大学 工藤 慎太郎  
(共同研究者) 同 山口 功  
同 堤 真大

### Development for Foot Motion Analysis System with Footwear

by

Shintarou Kudo, Masahiro Tsutsumi  
*Inclusive medical sciences research institute,  
Morinomiya university of medical sciences*  
Isao Yamaguchi  
*Department of Radiological Sciences,  
Morinomiya university of medical sciences*

#### ABSTRACT

The motion of the talonavicular joint in shoes is important for understanding the mechanism of sports injury, but there is no method for analysis under normal shoe stiffness. We examined the motion of the talonavicular joint using the stretch strain sensor (STR) that can measure the motion of the talonavicular joint with shoes on. Fourteen feet of 14 healthy adult males were included in the study. The talonavicular coverage angle (TNCA) was assessed in the sitting and standing positions using X-rays, and the arch strain (AS) was measured in the same postures using an STR. The AS was measured by four attachment methods and the correlation between the AS and changes in TNCA was analysed. The method with the highest correlation was used to examine the changes in the AS waveform of running motion in barefoot and shoe

conditions. The AS condition with a line connecting the medial malleus and navicular, and an inclination of 50 degrees downwards to the floor correlated significantly with changes in TNCA ( $r = 0.60$ ,  $p = 0.02$ ). There was no significant difference in AS during running between with the shoe and without shoe conditions. Therefore, AS measurement by STR might be able to assess the motion of the talonavicular joint during running.

#### キーワード

伸縮性ひずみセンサー, 距舟関節, ランニング, 靴, 足

#### Keyword

Stretch strain sensor, Talonavicular joint, running, shoe, foot

## 要 旨

靴の中での距舟関節の運動はスポーツ障害の発生機序の解明に重要であるが、通常の靴の強度を保った状態での解析手法がない。そこで靴を装着下で計測可能な伸縮性ひずみセンサー (STR) を用いて、距舟関節の運動解析を試みた。健康成人男性14名14足を対象に、X線による距舟関節被覆角 (TNCA) を坐位と立位で計測し、同様の姿勢でSTRを用いてアーチに加わるひずみをアーチストレイン (AS) として計測した。なお、ASの計測は4つの貼付法とTNCAの変化との相関を分析した。最も相関の高い方法で裸足条件と靴条件でのランニング動作のAS波形の変化を検証した。内果と舟状骨を結ぶ線かつ床面に対して50度下方に傾斜をつけて貼付した条件がTNCAの変化と相関が高かった ( $r=0.60, p=0.02$ )。ランニング中のASは靴条件と靴なし条件間に有意差を認めなかった。すなわちSTRによるAS計測によりランニング中、靴を装着した状態でも距舟関節の運動を評価できる可能性がある。

## 緒 言

足部は7つの足根骨と5本の中足骨、14の指節

骨から構成され、複雑な運動を行う。この足部のアライメントや運動に異常が生じると種々のスポーツ障害を惹起すると考えられている<sup>1,2)</sup>。中でも近年の足部運動の解析により足部の中でも特に距舟関節の運動が注目されている<sup>3)</sup>。つまり足部のスポーツ障害の発生と足部運動の関係を検討するためには、距舟関節の運動を解析する必要がある。

足部の運動解析は足部に多数の反射マーカを貼付した multi-segment foot model がよく用いられる<sup>4)</sup>。一方、この手法は足部に反射マーカを貼付する必要があるため、靴を履いた状態では難しい。また反射マーカ貼付部の靴をくり抜くことで反射マーカを貼付した研究もみられる<sup>5,6)</sup>。しかし、靴の剛性が低下するため、実際に靴の中での足部挙動を反映しているかは疑問である。つまり通常の靴の強度を保った状態での距舟関節の運動を解析する手法がない。

我々は伸縮性ひずみセンサー (Stretch strain sensor, C-stretch バンドー化学, 兵庫, 日本) (以下STRとする) を足部に貼付することで、後足部に対する前足部の背屈、外がえし運動を反映することを明らかにし、足部のサポーター装着時の足部挙動の調査を行った<sup>7,8)</sup>。すなわち、STRを

用いることで、靴の中での距舟関節の運動を解析できれば、より距舟関節の運動を制御できるFootwearの開発や運動療法の開発に発展する可能性がある。

本研究の目的は靴を装着した状態で計測可能なSTRを用いて、距舟関節の運動の解析手法を開発することとした。上記目的を達成するために以下の2つの実験を行った。実験1は距舟関節の内転運動を反映するSTRの貼付方法を検証する。実験2では実験1で検証した方法を用いて、靴を履いた条件と裸足条件での走行中のSTRを比較し、靴を装着した条件でも計測可能なことを示す。

## 1. 実験

### 1.1 実験1 距舟関節の内外転運動を反映するSTRの貼付方法の検証

#### 1.1.1 方法

対象は健康成人男性14名14足(年齢 $44.6 \pm 8.0$ 歳,身長 $1.72 \pm 0.06$  m,体重 $73.4 \pm 13.4$  kg)とした。除外基準は現在、足部・足関節に疼痛を有するもの、過去に足部・足関節に対する手術の既往のあるものとした。本研究は森ノ宮医療大学学術研究委員会倫理審査部会の承認を得て実施した(承認番号2021-081)。なお、対象者には本研究の趣旨を説明し同意を得た。

4か所の足部ストレインの計測には、STRを用いた。非荷重位で足部内側に4つのパターンでSTRを貼付した(図1)。Pattern1は舟状骨と載距突起を結ぶ線上に貼付する。Pattern2は内側楔状骨と載距突起を結ぶ線上に貼付する。Pattern3は舟状骨と内果を結ぶ線上、Pattern4は内側楔状骨と内果を結ぶ線上に貼付した。またPattern1と2は距舟関節の運動軸に平行になるように床面に対して約40度上方に傾斜をつけ、Pattern3と4は運動軸に直交するように床面に対して約50度下方に傾斜をつけて貼付した。

STRを貼付した状態で足底面を床面に接地した

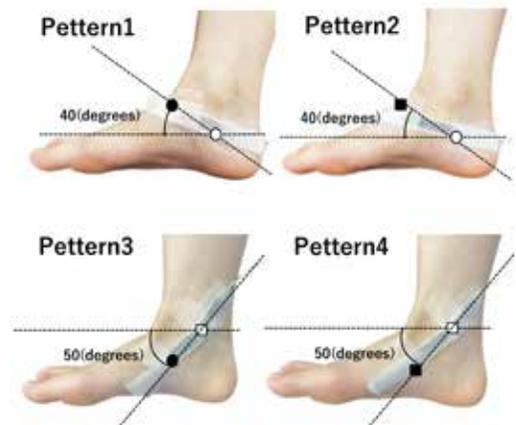


図1 STR貼付方法

4つのSTRの貼付方法を示す

●: 舟状骨, ○: 載距突起, ■: 内側楔状骨, □: 内果

坐位に対する立位の足部ストレインを立位アーチストレインと定義した。

1名の診療放射線技師により距舟関節の水平面上のアライメント(骨配列)をX線撮影装置(キャノンメディカルシステムズ社製のMRAD-A325)を用いて撮像した。撮像肢位は足底を床に触れた端坐位(膝関節90°屈曲位,足関節底背屈中間位)と安静立位の2条件とした。入射角を背側へ20°傾斜させたAnterior- Posterior像(AP像)を撮影した。撮影条件は管電圧を50kV,管電流を100mA, mAs値は0.025,撮影距離は150cmとした<sup>9)</sup>。撮影した画像をもとに、距骨頭の内外側関節縁を結ぶ線と舟状骨関節の内外側縁を結んだ線が成すTalonavicular coverage angle (TNCA)をImage J (version 1.52; National Institutes of Health, Bethesda, MD, USA)を用いて計測した(図2)。また、非荷重位から荷重に伴うTNCAの変化量をTalonavicular coverage angle Excursion (TNCA-E)と定義した。

Pattern1~4の立位アーチストレインはフリードマン検定を用い、事後検定にはボンフェローニ法を用いた。またTNCA-EとPattern1~4の立位アーチストレインの関係をスピアマンの順位相関係数を用いて比較検討した。統計解析にはすべ



図2 Talonavicular coverage angle  
右足を背側から見たX線写真を示す  
各写真の右上に撮像肢位を示す

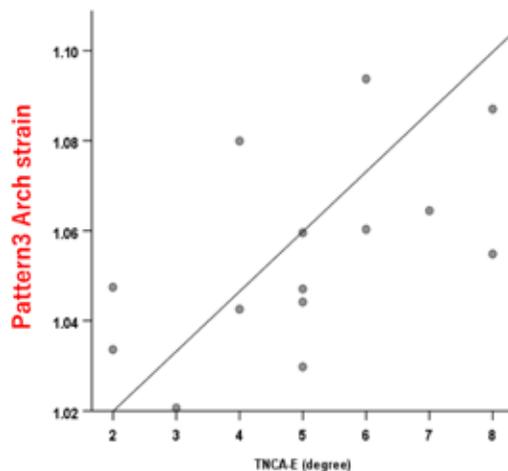


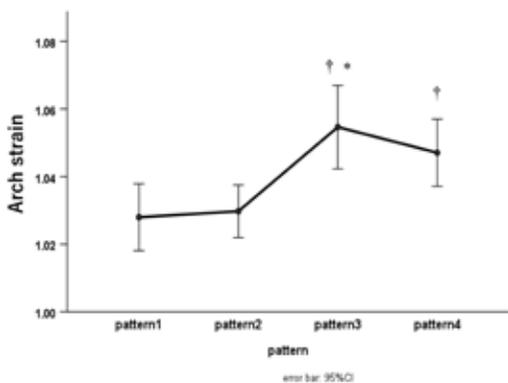
図4 TNCA-Eとpattern3の関係

てIBM SPSS Statistics version 21 (IBM, Armonk, NY, USA) を使用した。

1. 1. 2 結果

1. 1. 2. 1 STR貼付方法による立位アーチストレインの違い

Pattern1の立位アーチストレインは中央値1.03 (25%-75% : 1.01-1.06), Pattern2 は 1.03 (1.01-1.04), Pattern3は1.05 (;1.04-1.07), Pattern4は1.05 (1.03-1.06) でパターン1はその他3Patternと比較して有意差を認めた(図3)。



† :difference with pattern1 \* :difference with pattern2

図3 STR貼付パターンによるアーチストレインの違い

1. 1. 2. 2 立位アーチストレインとX線評価との相関関係

Pattern3の立位アーチストレインはTNCA-Eと有意な正の相関関係を認めた ( $r=0.60, p=0.02$ ,

power=0.73) (図4)。一方、その他の条件はTNCA-Eと有意な相関関係を認めなかった。(pattern1: $r=0.07, p=0.80$ , pattern2: $r=0.13, p=0.65$ , pattern4: $r=0.35, p=0.22$ )

1. 2 実験2 靴を履いた条件と裸足条件での走行中のアーチストレインの検討

1. 2. 1 方法

対象は健康成人男性8名8足(年齢 $21.9 \pm 1.6$ 歳, 身長 $1.69 \pm 0.06$  m, 体重 $61.3 \pm 6.7$  kg)とした。除外基準は現在、足部・足関節に疼痛を有するもの、過去に足部・足関節に対する手術の既往のあるものとした。本研究は森ノ宮医療大学学術研究委員会倫理審査部会の承認を得て実施した(承認番号2021-081)。なお、対象者には本研究の趣旨を説明し同意を得た。

走行中のアーチストレインの計測には、STRを用い実験1のPattern3の方法で貼付した。また測定側の踵部に同期した圧力センサーを貼付し、踵接地を同定した。

各種センサーを貼付した状態で、裸足条件と靴下と靴を装着した条件で、トレッドミル上にて、時速8kmのランニング動作を記録した。記録周波数は100Hzとして、得られた波形は7区間の移動

平均を算出し平滑化した。静止立位の足部ストレインにより標準化し、10ランニングサイクル中のアーチストレインを加算平均し、走行中のアーチストレインとして算出した。

また靴の有無による走行中のアーチストレインの時系列における変化を検討するため、対応のあるt検定のstatistical parametric mapping (SPM)を実施した。SPMはMatlab (R2020a; MathWorks Inc)を用い、オープンソースとして公開されているSPM code (www.spm1d.org)を利用した。統計学的有意水準は95%とした。

### 1. 2. 2 結果 走行中のアーチストレインと靴の影響

走行中のアーチストレインは立脚期に上昇し、遊脚期に減少する単峰性を示した。ピークはランニングサイクルの30~40%付近であった。靴条件と裸足条件のアーチストレインを図5に示す。どちらも裸足条件と同様の波形パターンを示し、靴条件が靴なし条件と比べ高値を示していた。しかしSPM解析の結果、いずれのタイミングにおいても条件間に有意差を認めなかった。

## 2. 考 察

本研究の仮説はSTRにより靴を装着した状態でも距舟関節の挙動を計測できるであった。本研究の結果、Pattern3の貼付方法が、立ち上がり時の距舟関節の外転運動を反映した。その手法によりランニング中の立脚期にSTRが伸長されること、さらに靴を履いた状態でも同様の計測ができることが明らかになった。つまり、本研究はSTRにより、靴を装着した状態でもランニング中の距舟関節の運動を評価できることを示した。

距舟関節の内外転運動の運動軸は足底面に対して約40度の背側に傾きをもつと報告されている<sup>10)</sup>。本研究でのPattern3の貼付方法は内果から舟状骨に向かって、運動軸に直交するように貼付している。そのためPattern3の貼付方法が最も立ち上がり動作中の距舟関節の外転運動を反映したと考えられた。

本研究のランニング中のSTRでの解析においては、ランニングサイクルの40%付近でピークを迎えた可能性がある(図5)。ランニング中の距舟関節の運動を評価した研究は少ない。Arndotら

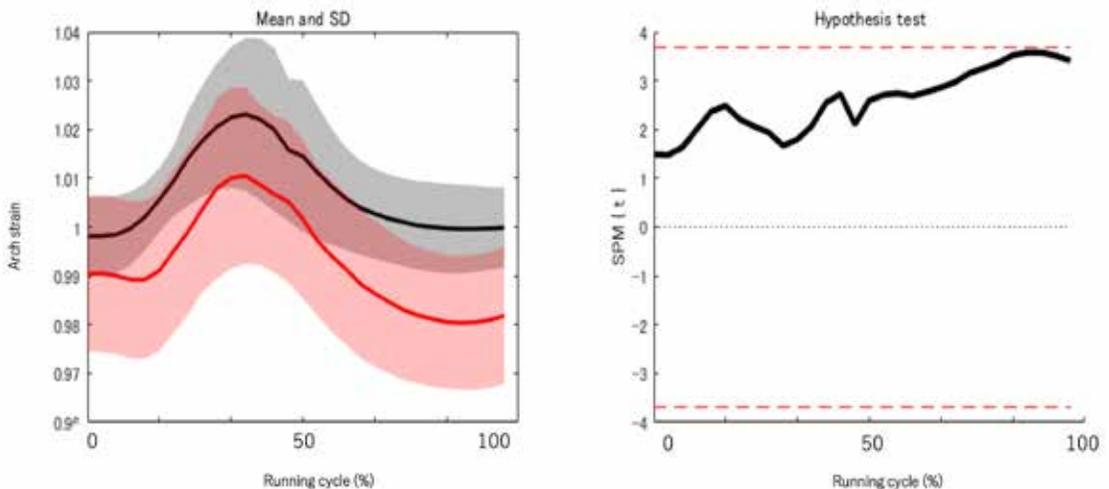


図5 ランニング中のアーチストレインの靴の有無による違い

左:縦軸はアーチストレイン、横軸はランニングサイクルを示す。黒実線は靴条件、赤実線は靴なし条件のアーチストレインを示す。灰色の領域と赤の領域はそれぞれ、標準偏差の2倍を示す。  
右:縦軸はSPM値、横軸はランニングサイクルを示す。黒実線が赤点線の範囲内は有意差なし、赤点線の範囲外は有意差有と判定する。今回は黒実線が赤点線の範囲を超えることがないため、いずれのタイミングにおいても有意差はなかった。

の骨ピンマーカを足根骨に刺すことで足根骨間の運動を解析した研究では、距舟関節は前額面上での運動が大きく、次いで水平面上の運動が大きいことを示し、多くの被験者において立脚期の20～50%で外がえし運動が増加し40～60%で外転運動がピークを迎えることを報告している<sup>11)</sup>。アーチストレインは距舟関節の外転のほかに、外がえし、背屈の運動を反映する可能性がある。一方、従来の三次元動作解析の手法では足部内のセグメント間の三次元運動を3つの運動軸の回転運動に変換して表現している。そのため先行研究におけるランニングサイクル中の外転運動のピークと一致しない結果になったと考えた。

走行中のアーチストレインは靴の装着の有無で優位さを認めなかった。靴を履いた状態での変化についてCampbellら<sup>12)</sup>は歩行中の足関節の運動では靴を履くことで踵接地後の背屈角度を減少させること、ピークの外がえし角度を減少させると報告している。一方、McHenryら<sup>13)</sup>は靴を履くと歩行中の踵接地時の距腿関節の背屈角度の増加と距骨下関節の底屈角度の増加などの歩行中の運動学の変化と歩行速度とストライド長の増加を報告している。またランニングにおいては、靴を履くと立脚期の50%付近では第1MTP関節の伸展角度が増加し、90～100%付近では減少し、靴はMTP関節の運動を制限するとの報告もある<sup>14)</sup>。さらにSuら<sup>15)</sup>はランニングの立脚期の20～60%で踵骨に対する中足骨の外がえし運動が減少するとしている。いずれも、底背屈方向や外がえし/内がえし方向の運動が変化することは示しているが、水平面上の内/外転運動について、変化を示した報告はない。そのため、距舟関節の水平面上の運動をより反映する走行中のアーチストレインは、靴を履いた条件と裸足条件で有意差を認めなかったと考えた。

距骨には反射マーカを貼付できないため、距舟関節の運動を三次元動作解析で計測することは難

しい。近年では2D-3D レジストレーション法により、歩行中の距舟関節の運動を評価した研究がある<sup>16)</sup>が、ランニング中の解析は時間分解能の問題からほとんど行われていない。また、骨ピンマーカやFluoroscopyを用いた研究は被験者への侵襲が大きいことを考えると本研究で用いたSTRは足部運動を非侵襲性に計測する手法として有用なツールと考えられる。

本研究の限界は2つある。走行時の距舟関節の挙動は十分に明らかではない。そのため、走行中のアーチストレインが距舟関節の挙動を示しているかを検討するためには、走行時のアーチストレインとMulti-segment foot modelとの比較も含めて、妥当性を検証したい。2つ目に対象者が健康者に限られており、病的な足部を有する人の走行データを検証できていない。今後、異常な足部のデータを追加することで、ストレッチセンサーの有用性を検証していく必要がある。

### 3. 総括

靴を装着した状態で距舟関節の運動をSTRにより計測する手法を開発した。Pattern3での貼付方法による立位アーチストレインは立ち上がり動作での距舟関節の挙動を反映することが明らかになった。一方、走行中のアーチストレインは靴を装着した条件と同様のパターンになった。しかし走行中のアーチストレインは立脚期に増加するものの、距舟関節の運動を反映しているかは十分に明らかにできなかった。今後、Multi-segment foot modelとの比較を行い、検証を深める必要がある。

### 謝辞

本研究は公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団の研究助成を受けて実施しました。研究を助成していただいた同財団に深謝いたします。また研究を実施するにあたり、多大な協力を頂きました医療法人アレックス尾山台整形外

科の平川佳祐氏のご協力に深謝いたします。

## 文 献

- 1) Bennett J.E. et al., Factors contributing to the development of medial tibial stress syndrome in high school runners., *J. Orthop. Sports Phys. Ther.*, **31** (9), 504-10(2001)
- 2) Williams D.S., 3rd, I.S. McClay, J. Hamill, Arch structure and injury patterns in runners., *Clin. Biomech. (Bristol, Avon.)*, **16** (4), 341-7 (2001)
- 3) Kido M., et al., Load response of the medial longitudinal arch in patients with flatfoot deformity: in vivo 3D study., *Clin. Biomech. (Bristol, Avon.)*, **28** (5), 568-73(2013)
- 4) Leardini A., et al., Multi-segment foot models and their use in clinical populations., *Gait. Posture.*, **69**, 50-59(2019)
- 5) Balsdon M.E.R., C.E. Dombroski, Reliability of a multi-segment foot model in a neutral cushioning shoe during treadmill walking., *J. Foot Ankle Res.*, **11**, 60(2018)
- 6) Halstead J., et al., The feasibility of a modified shoe for multi-segment foot motion analysis: a preliminary study., *J. Foot Ankle Res.*, **9**, 7(2016)
- 7) Kudo S. K. Sakamoto, Influence of a novel elastic foot orthosis in foot motion during locomotion in adults with mild flatfoot., *Gait. Posture.*, **93**, 59-63 (2022)
- 8) Sakamoto K., et al., Validity and reproducibility of foot motion analysis using a stretch strain sensor., *Gait. Posture.*, **86**, 180-185(2021)
- 9) Arunakul M., et al., Tripod index: a new radiographic parameter assessing foot alignment., *Foot Ankle Int.*, **34** (10), 1411-20(2013)
- 10) Nester C.J., A. Findlow, P. Bowker, Scientific approach to the axis of rotation at the midtarsal joint., *J. Am. Podiatr. Med. Assoc.*, **91** (2), 68-73 (2001)
- 11) Arndt A., et al., Intrinsic foot kinematics measured in vivo during the stance phase of slow running., *J. Biomech.*, **40** (12), 2672-8(2007)
- 12) Campbell K.J., et al., Normative rearfoot motion during barefoot and shod walking using biplane fluoroscopy., *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.*, **24** (4), 1402-8(2016)
- 13) McHenry B.D., et al., Sagittal subtalar and talocrural joint assessment between barefoot and shod walking: A fluoroscopic study., *Gait. Posture.*, **72**, 57-61(2019)
- 14) Zhang F., et al., Influence of Shod and Barefoot Running on the In Vivo Kinematics of the First Metatarsophalangeal Joint., *Front Bioeng. Biotechnol.*, **10**, 892760(2022)
- 15) Su W., et al., Effects of Barefoot and Shod on the In Vivo Kinematics of Medial Longitudinal Arch During Running Based on a High-Speed Dual Fluoroscopic Imaging System., *Front Bioeng. Biotechnol.*, **10**, 917675(2022)
- 16) Chen Wang M.D., et al., In vivo kinematic study of the tarsal joints complex based on fluoroscopic 3D-2D registration technique., *Gait. Posture.*, **49**, 54-60(2016)