

## [研究助成 (C)]

## ヒト疾走中のアキレス腱 最大 Strain を医工計測から予測する

2257012

研究代表者  
(助成金受領者)

共同研究者

筑波大学  
大学院人間総合科学学術院

筑波大学体育系

博士後期課程 /  
日本学術振興会  
特別研究員

助教

藤 森 俊 秀

佐 渡 夏 紀

## [研究の目的]

アキレス腱の断裂は、スポーツにおける疾走動作中に突発的に発生し、受傷以前のレベルでの競技復帰が難しい傷害としてスポーツ競技者から恐れられている。本研究は腱断裂の発生要因と考えられている腱 Strain (腱の歪み) を、競技者本人を対象とした医科学計測によって予測可能にする試みである。

アキレス腱は下腿三頭筋と踵骨を結んでいる、ヒト生体で最も大きな腱組織である。腱組織はバネのように力に応じて引き伸ばされて、力が解放されると縮む、バネのような特性を持っている。様々なスポーツ競技で用いられる疾走動作では接地している足を蹴り出す時に、アキレス腱に最大で体重の8倍から10倍もの張力が作用し、大きく引き伸ばされていると推定されており、疾走動作の「要」といえる。アキレス腱断裂を代表とする腱障害は疾走中に好発し、競技者の30%が腱障害を経験する (Kujala et al., 2005)、手術・リハビリ後も完全には受傷前の状態には戻らず、選手生命に影響すること多いため、受傷の可能性を予測し断裂を予防可能になることが望まれている (図1)。

Cadaver や動物の摘出腱を用いた引張試験から、腱組織は張力に応じて引き伸ばされ、腱の Strain がある閾値 (例えば8%) を超えたときに腱が断裂することが示されてきた (Robi et al., 2013) (図2)。そこで我々は、疾走動作中

のアキレス腱の Strain を非侵襲的に撮影することができれば、アキレス腱断裂の危険性を予測できるようになる可能性があると考えた。

アキレス腱は生体の内部に位置しているため、外部から目で観察することができない。生きているヒトのアキレス腱を生体内から摘出せず、非侵襲的に Strain を観察する手法として、MRI を用いた手法や超音波 B モード画像を用いた手法が用いられてきた。しかしながら、MRI では狭い MR 装置内でしか観察できない、超音波法では超音波診断装置と研究対象者が数 m のケーブルで接続されているため自由に動き回ることができないなどの問題点があり、疾走動作をはじめとする移動を伴うダイナミックな



図1 アキレス腱の概要

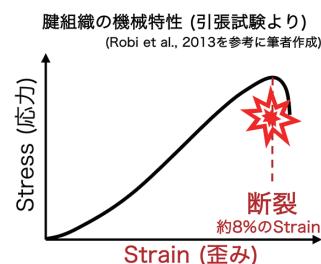


図2 腱の Stress-Strain 関係

運動中の観察は技術的に実施不可能であった。したがって、疾走中のアキレス腱がどの局面でどれだけ歪むのか、歪みにどれだけ個人差があるのかはこれまでブラックボックスとなってきた。

我々は、このような技術的な問題点を解決する方法として、ポータブルかつ無線の超音波画像装置を用いた実験系の確立に取り組んだ。この手法の確率によって、疾走中の競技者のアキレス腱 Strain の観察をすることが可能になり、さらに各競技者の筋腱複合体の特性の計測を組み合わせることによって、疾走中のアキレス腱 Strain を事前に予測できるのではないかと考えた。疾走実験を可能とした本研究を手始めに、アキレス腱 Strain の定量とその要因が特定されれば、傷害発生機序の解明につながる知見が得られ、更に本研究をもとにした前向き研究が実施できれば、将来的には競技者個々人の傷害リスクを評価できるようになると期待できる。

## [研究の内容、成果]

本研究は主に2つの実験から構成される。実験Ⅰでは各競技者の腱の力学特性を定量するための生体計測を行い、実験Ⅱでは各競技者の疾走動作中のアキレス腱の Strain を定量するための実験を行った。

### ①研究対象者

本研究には、陸上競技 男子短距離走競技者 15 名（年齢：21.3 ± 1.6 歳，身長 174.4 ± 6.2 cm，身体質量 69.9 ± 6.7 kg）が研究対象者として参加した。研究対象者の競技記録は、100 m 走の自己ベスト記録 11.21 ± 0.42 秒，100 m 走のシーズンベスト記録 11.33 ± 0.56 であり大学全国大会出場レベルから大学一般レベルの競技者が参加した。

傷害歴が研究結果に影響しないよう、研究参加の除外条件としてアキレス腱断裂歴がないこと、実験日から過去 6 ヶ月間に下肢の傷害歴が

ないことを設定し、15 名すべての研究対象者が除外条件に当てはまらなかった。

研究対象者には研究参加前に文章を用いて研究の説明をしたうえ、書面で同意をとった。なお、本研究はヘルシンキ宣言に則って実施され、ヒトを対象とする筑波大学の研究倫理委員会の許可のもと実施した（倫理番号 体 023-106）。

### ②実験Ⅰ

すべての研究対象者は 30 分以上のウォーミングアップを各自で実施した後に実験に参加した。ウォーミングアップの後、Fujimori and Sado (2025) と類似の方法を用いて、各研究対象者のアキレス腱剛性（アキレス腱の機械的な伸びにくさ）を計測した。

実験Ⅰでは超音波画像装置・足関節底屈トルク計・モーションキャプチャを用いて実験が実施された（図 3）。

実験中、研究対象者はトルク計が取り付けられたベット上にうつ伏せになり、足関節と身体を固定された。その状態で、足関節底屈トルクを努力度 0% から 100% まで徐々に発生させ、その時の関節トルクが計測される。また、その際に生体内部でアキレス腱が引き伸ばされていく様子を、トルク計と同期した超音波画像装置を用いて取得する。取得された足関節底屈トルクを各研究対象者のアキレス腱モーメントアームで除すことによってアキレス腱にかかる張力を推定した。アキレス腱の張力とアキレス腱の伸長のデータを用いて、アキレス腱剛性を算出する（図 4）。

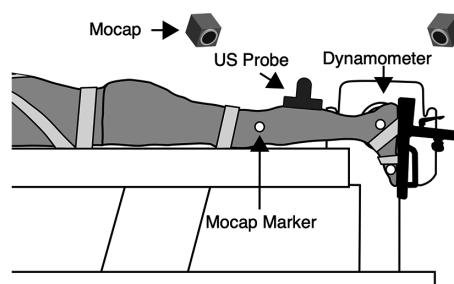


図 3 実験Ⅰの実験設定

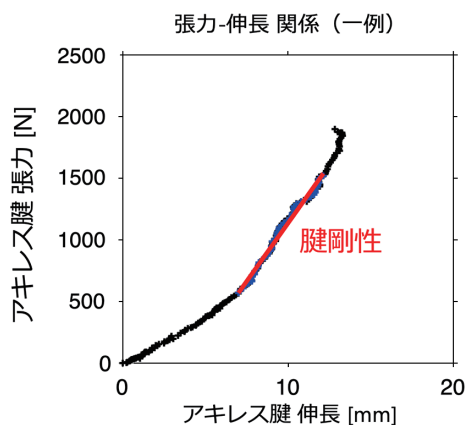


図4 腱の力-伸長関係の一例



図6 無線化した超音波画像装置を装着した研究対象者



図5 実験Ⅱの実験設定

### ③実験Ⅱ

実験Ⅱでは、全力疾走動作中のアキレス腱 Strain を測定した。実験は陸上競技の公式大会で使用されるものと同じ素材のサーフェスで構成した仮設の屋内走路にて実施した（図5）。

無線化した超音波画像装置（Telemed 社、60 mm プローブ、サンプリングレート 152 Hz）を用いて生体内部でのアキレス腱の挙動を取得、モーションキャプチャ（Vicon Motion Systems 社、サンプリングレート 250 Hz）を用いて下肢の関節運動を取得、地面反力計（Kistler 社、サンプリングレート 1000 Hz）を用いて地面から足部に作用する力を取得した。

無線化した超音波画像装置は、研究対象者が背中に背負うように身体に密着させて固定し、疾走動作の邪魔にならないよう調整した（図6）。

得られた超音波画像データから、疾走動作中のアキレス腱の伸長動態を分析した。超音波画

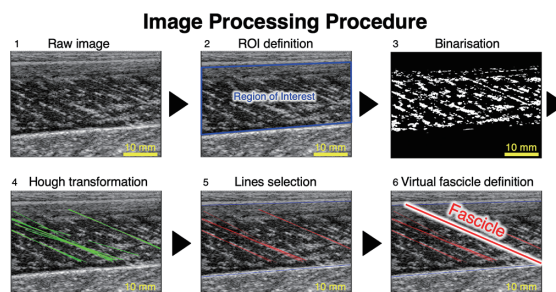


図7 超音波画像の分析手法

像は、152 フレーム / 秒の高フレームレートで取得したため、手作業での分析には莫大な時間がかかり、進めることが困難であった。この問題を解決するために、Hough 変換を用いた、半自動分析プログラムの作成を行い、現在分析を進めている（図7）。

### [要約と今後の展望]

ヒト疾走中のアキレス腱 最大 Strain を医工計測によって予測するシステムの確立を最終目標に、本研究では全力疾走動作中のアキレス腱—内側腓腹筋の筋腱動態をハイスピード超音波画像装置によって捉えること、さらに各個人のアキレス腱の力学特性を計測し、アキレス腱の伸びにくさが疾走動作中のアキレス腱 Strain に及ぼす影響の検証を目指した。

本研究では2つの実験を実施した。I では生体計測によって、短距離走競技者、個々人のアキレス腱の力学特性を計測した。

実験Ⅱでは全力疾走中に各競技者の生体内部でアキレス腱が歪んでいく様子を、無線化した超音波画像装置によって捉えることに成功した。

今後、実験Ⅰと実験Ⅱを組み合わせた分析を進め、個々人のアキレス腱の特性や動作の特性が疾走動作中の腱 Strain の決定要因となりうるのか検証を進めていく。将来的には本研究で確立した手法をもとに、非侵襲的な医科学計測をトレーニング現場・競技現場で実施し、アキレス腱のコンディションのモニタリング、さらに

はアキレス腱断裂のリスクの評価を行っていき、より多くの競技者がアキレス腱断裂の不安から解放され競技を楽しめるように、貢献していきたい。

[成果の発表、論文など]

Power exertion of gastrocnemius fascicle and tendon in running at different speeds: a pilot study. Toshihide Fujimori, Tempei Tominaga, Takeshi Edagawa, Natsuki Sado, 30th Congress of the International Society of Biomechanics, Stockholm, 2025.