

令和 6 年 5 月 18 日現在

機関番号：32686

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K11532

研究課題名（和文）有限要素解析を用いた接地シミュレーションによる足部内部で生じる力学現象の解明

研究課題名（英文）Elucidation of the mechanical phenomena occurring inside the foot through ground contact simulation using finite element analysis

研究代表者

石井 秀幸（ISHII, Hideyuki）

立教大学・スポーツウエルネス学部・准教授

研究者番号：40534730

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、医用画像から抽出した足部表面、骨、アキレス腱の3次元形状データを用いるとともに、靭帯、腱、足底腱膜、皮膚をモデル化し、足部の内部構造を考慮した有限要素モデルを作成した。有限要素解析結果を実験結果と比較することによって、有限要素モデルの妥当性を検討した。今後は、有限要素モデルの妥当性確認および修正をさらに進める。その後、材料特性などを変化させて接地のシミュレーションを行い、骨の挙動とそこで生じる力学現象に及ぼす影響を明らかにする。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究を推進することで、着地および走行動作における接地中の足部内部で生じる力学現象を明らかにできる可能性がある。さらに材料特性などの変化が、着地衝撃応答や走行動作に影響を及ぼすメカニズムを検討することも可能である。これらの結果は、外傷・障害発生予防、パフォーマンス向上、製品開発に寄与する可能性があるという点で意義のあるものと考えられる。また、スポーツバイオメカニクス分野では工学的手法を用いた研究が非常に少ないため、本研究で作成される有限要素モデルおよび得られる結果は、足部の研究のみならず、スポーツバイオメカニクス分野の発展に貢献するものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we utilized three-dimensional geometries of the foot surface, bone, and Achilles tendon extracted from medical images, and modeled ligaments, tendons, plantar fascia, and skin to construct a finite element model accounting for the internal structure of the foot. The validity of the finite element model was examined by comparing the finite element analysis results with the experimental results.

We will further advance the validation and modification of the finite element model. Thereafter, a simulation with ground contact by altering the material properties and other factors will be conducted to identify the effects on bone behavior and the resultant mechanical phenomena.

研究分野：スポーツバイオメカニクス

キーワード：バイオメカニクス スポーツ工学 有限要素解析 接地 足部内挙動 医用画像 形状抽出 シミュレーション

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

身体を支持する足はスポーツ動作だけでなく日常生活をする上でも重要な役割を果たすため、足の外傷・障害はスポーツ活動や生活の質に大きな影響を及ぼす。足部は、他の身体部位と比較して数多くの骨、靭帯、筋および軟部組織によって構成されており、複雑な骨配列によって力学的に優れた構造をなしている。歩行、走行、着地、その他スポーツ動作において、足関節荷重や地面反力が作用する接地中に、骨配列構造に機能的な変形を生じさせ、足部はこれらの大きな力を受けながらも動作を遂行させていると言われている。足部における具体的な外傷・障害として、Jones 骨折、後脛骨筋腱機能不全症、扁平足障害、足底筋膜炎、足関節捻挫などが挙げられ、これらの外傷・障害が人々の健康維持・増進や競技力向上の妨げとなっているが、外傷・障害の発生メカニズムや動作への影響には未解明な点がある。

接地中における足部の骨の挙動およびその機能について検討するためには、動的状態かつ3次元での解析が必要である。動作の接地中における足部の骨の挙動を明らかにするだけでも新たな知見となるが、挙動の情報だけでは接地中に生じる力学現象を解明することはできない。足部内部で生じる現象を力学的に検討するための方法として、有限要素解析が有用であると考えられる。先行研究では、有限要素解析を用いて静的な接地中の足底圧分布、足部の骨の応力分布などを検討した研究がみられる (Chen et al., 2015; Guo et al., 2018)。しかしながら動作の接地中における足部の挙動について、動的かつ3次元的な実測と比較して有限要素モデルの妥当性を検証した上で、解析した研究はみられない。よって、衝撃力が足部に作用する着地やスポーツ動作における接地中の足部内部で生じる力学現象については、未解明な部分が多い。

本研究は、有限要素モデルを用いて、動作の接地中における足部の骨の挙動とともに、足部内部で生じる力学現象を明らかにしようとするものである。有限要素解析においては、実現象を表現することが重要であるが、有限要素モデルの妥当性検証が不十分と思われる研究も多くみられるのが現状である。本研究では、動作の接地中における足部の挙動について、動的かつ3次元的な実測と比較して有限要素モデルの妥当性を検証した上で、接地のシミュレーションを行うという点も特長である。

2. 研究の目的

本研究では、着地および走行動作における接地中の足部内部で生じる力学現象を再現できる有限要素モデルを構築する。妥当性を検証した有限要素モデルを用いて行う有限要素解析結果から、接地中の足部内部で生じる力学現象を解明する。さらに、このモデルを用いて、着地および走行動作における接地のシミュレーションを行い、腱の牽引や腱などの材料特性の違いが足部の骨の挙動とそこで生じる力学現象に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。これにより、腱を牽引する筋の収縮力や加齢による腱の材料特性の変化が、着地衝撃応答や走行動作に影響を及ぼすメカニズムを検討することができる可能性があると考えられる。

3. 研究の方法

(1) 足部の医用画像撮影と形状データ抽出

被験者は下肢に重篤な外傷・障害の既往歴のない健康な成人男性 1 名とし、静的仰臥位での足部を CT および MRI で撮影した。3次元画像データ変換ソフトウェア Simpleware (Simpleware 社) を用い、CT 画像 (図 1a) から足部表面、骨の 3次元形状データ (図 2a) を、また MRI 画像 (図 1b) からアキレス腱の 3次元形状データ (図 2b) を抽出した。

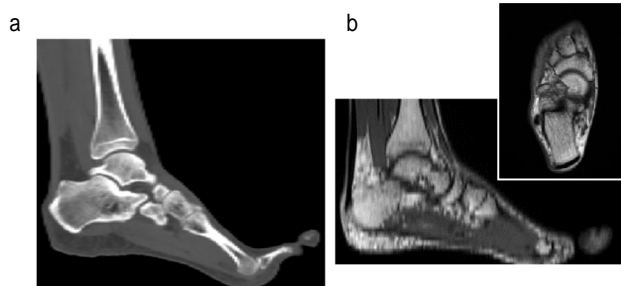


図 1 足部の(a)CT 画像および(b)MRI 画像

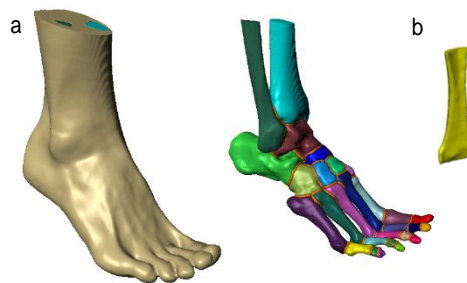


図 2 医用画像から抽出した(a)足部表面と骨および(b)アキレス腱の3次元形状

(2) 着地および走行動作の接地局面の計測と動作解析

医用画像撮影と同一の被験者の足部の解剖学的特徴点に直径 4mm の反射マーカを貼付し(図 3), 台上から裸足での片脚着地および走行を行わせた. 各動作の接地局面における足部の動きを, 8 台のカメラで構成される光学式モーションキャプチャシステム (Vicon 社) を用いて, サンプル周波数 200 Hz で撮影した(図 4). 接地中の地面反力データをフォースプレート (Kistler 社) を用いて 1000 Hz で計測した.



図 3 反射マーカの貼付位置

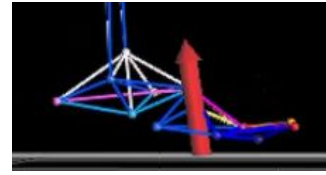


図 4 モーションキャプチャシステムでの動作計測

モーションキャプチャシステムで取得した着地および走行動作の接地局面における足部各点の位置座標や地面反力データから, 有限要素モデルの配置, 初期条件, 荷重データ, 妥当性確認などに用いるための足部の運動学および運動力学データを算出した.

(3) 有限要素モデルの作成

内部構造を考慮した足部の有限要素モデルを作成するために, 医用画像から抽出した足部表面, 骨, アキレス腱の 3 次元形状データを有限要素解析ソフトウェア Abaqus (Dassault Systèmes 社 / 本研究費で年間ライセンスを延長購入) にインポートした. これらの形状を用いて軟骨と軟組織の形状を作成し, さらに靭帯, 腱, 足底腱膜, 皮膚をモデル化した. 有限要素モデルの各部位には個別の材料特性を割り当てるとともに, 摩擦の定義, 荷重の定義などを行った. 着地および走行動作の実験の接地直前における足部の位置・姿勢に足部モデルを配置し, 初期条件を与えて, 接地局面の有限要素解析を行った. なお, 解析ソルバーには, Abaqus を使用した.

(4) 有限要素モデルの妥当性確認

有限要素モデルの妥当性を検討するために, 有限要素解析において接地中の地面反力データおよび足部の運動学データを求める. まず地面反力データについて有限要素解析結果を実験結果と比較することによって, 有限要素モデルの妥当性を検討した. 実現象を表現するように合理的な理由に基づいて有限要素モデルを修正した.

研究期間中に実施した研究内容はここまでであり, 修正によって有限要素モデルは当初と比較して大幅に改善されているが, 最終年度末においても未完了であった.

(5) 今後の研究推進方策

最終年度末において未完了であった有限要素モデルの妥当性確認および有限要素モデルの修正を進める. その後, 妥当性を検証したモデルを用いて行う有限要素解析結果から, 接地中の足部内部で生じる力学現象を検討する.

このモデルを用いて, 腱の牽引, 腱などの材料特性を変化させて着地および走行動作における接地のシミュレーションを行うことにより, これらの要因が足部の骨の挙動とそこで生じる力学現象に及ぼす影響を明らかにする.

4. 研究成果

着地および走行動作の全試技について, モーションキャプチャシステムで取得した接地局面における足部各点の位置座標や地面反力データから, 有限要素モデルの配置, 初期条件, 荷重データ, 妥当性確認などに用いるための足部の運動学および運動力学データを算出した. 具体的には, 接地直前における足部位置・姿勢, 足部質量中心速度, 足部角速度, さらに動作中における足部位置, 地面反力, 圧力中心, 足関節角度, 前足部-後足部間角度, 足関節の関節間力, 関節トルクを算出した. これにより, 着地および走行動作の接地局面における足部の動きを理解する上で有用なデータを得ることができた.

医用画像から抽出した足部表面, 骨, アキレス腱の 3 次元形状データを用いるとともに, 靭帯, 腱, 足底腱膜, 皮膚をモデル化し, 足部の内部構造を考慮した有限要素モデルを作成した(図 5). 有限要素モデルの妥当性確認および有限要素モデルの修正を進め, 接地局面における実現象の再現に近いところまで研究を推進することができた(図 6).



図5 足部の内部構造を考慮した有限要素モデル

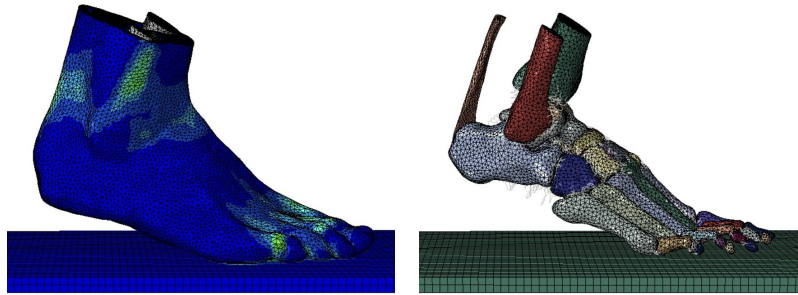


図6 接地局面の有限要素解析の一例

足部の有限要素モデルの作成は難易度が高く困難の連続であったため、申請時の研究計画より遅れたが、いずれの工程も本研究課題の成否に関わる重要な部分であり、研究期間全体を通して研究を着実に進展させることができたと考える。

今後は、有限要素モデルの妥当性確認および有限要素モデルの修正を進める。その後、材料特性などを変化させて接地のシミュレーションを行い、骨の挙動とそこで生じる力学現象に及ぼす影響を明らかにする。

本研究を推進することで、着地および走行動作における接地中の足部内部で生じる力学現象を明らかにできる可能性がある。さらにシミュレーションによって、材料特性などの変化が、着地衝撃応答や走行動作に影響を及ぼすメカニズムを検討することも可能である。これらの結果は、外傷・障害発生予防、パフォーマンス向上、製品開発に寄与する可能性があるという点で意義のあるものと考えられる。

<引用文献>

Chen W.-M. et al.: Plantar pressure relief under the metatarsal heads: therapeutic insole design using three-dimensional finite element model of the foot. *Journal of Biomechanics* 48(4):659-665, 2015

Guo J. et al.: Biomechanical and mechanical behavior of the plantar fascia in macro and micro structures. *Journal of Biomechanics* 76:160-166, 2018

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔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
---------	---------