

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 24 日現在

機関番号：24303

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26860404

研究課題名(和文) 足部疾患に対する有限要素法の応用 - 新しい装具療法の開発 -

研究課題名(英文) Application of finite element method in flat foot deformity

研究代表者

今井 寛 (Imai, Kan)

京都府立医科大学・医学(系)研究科(研究院)・兼任助教

研究者番号：60719839

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：これまで存在しなかった、正確に腱や靭帯を再現した足部・足関節の有限要素モデルを扁平足を用いて確立した。本研究の成果をConf Proc IEEE Eng Med Biol Soc. に発表した。扁平足の手術方法として外側支柱延長術や踵骨隆起内側移動術があるが、扁平足の手術を行うことで足部の応力分布がどのように変化するか、適切な骨切り部位や移動量がどの程度かを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Despite being a very common foot deformity, flatfoot is one of the least understood orthopaedic problems, and the opinions regarding its optimal treatment vary widely. We reported that an FE model of a flatfoot is proposed that is based on CT measurements. Surface meshes of the bones and soft tissue were generated from CT images and then simplified to reduce the node density. A total of 62 ligaments, 9 tendons, and the plantar fascia were modeled manually. Volume meshes of the different components were generated and combined to form the completed flatfoot model. A dynamic FE formulation was derived, and a balanced standing simulation was performed. The model was validated by comparing stress distribution results from the simulation to experimental data. Lateral column lengthening or medial displacement calcaneal osteotomy was performed in patients with flat foot deformity. We cleared that the change of the stress distribution compared between before and after surgery using FE model.

研究分野：バイオメカニクス

キーワード：有限要素 足部・足関節 扁平足

### 1. 研究開始当初の背景

関節リウマチ (RA) は国内患者数が 100 万人に達する全身性炎症性疾患である。そのうち、約 90% の症例で足部に愁訴があったと報告される。RA における足部変形は様々であるが、縦アーチの低下、前足部外転および後足部外反、すなわち外反扁平足変形 (図 1) が主な変形である。変形が進行すると歩行不能となり、日常生活動作 (ADL) の低下や転倒リスクの増加につながるため、進行予防やその治療は喫緊の課題である。しかし、その進行のメカニズムには不明な点が多く、変形の形態や程度も様々であり、諸家らの示す治療方針も多岐にわたる。特に保存的治療では、アーチを支持する足底板による装具療法が一般的であるが、その効果はバイオメカニクスを中心とした科学的な裏付けに乏しく、作製方法にも標準的なものやガイドラインは存在しない。

近年、剛体の応力シミュレーションである有限要素法 (FEA) を用いて健全足モデルを作製することで、荷重時の応力集中を解析する報告が散見される。しかし、足根骨間には軟部組織が複雑に関係しており、FEA におけるパラメータ設定 (境界条件) には一定の見解がない。また、骨形態が異なるとされる扁平足などの変形足モデルに FEA を応用した報告は皆無である。

申請者らは、足部 CT 荷重装置を開発し (城戸, 今井ら: 日足外会誌 2011), 扁平足患者において荷重による骨回転量変化を調べ、健全足とはその荷重応答が異なることを 3 次元的に解明した (Kido, Imai, et al: Clin Biomech 2013) (図 2)。以上の知見から、われわれの研究手法を FEA に応用し、荷重時と非荷重時の足根骨モデルの 3 次元的な応力集中変化を調べ、その差分を求めることで、FEA で必要な軟部組織の境界条件を逆算的に推察できるという着想に至った。本法は、健全足はもちろん変形足にも応用することが可能である。最終的には RA 変形足の病態を明らかにして、コンピュータ上で RA 変形足における荷重応答をシミュレーションし、保存的治療に汎用されている足底板の最適な素材、形状を検証することができる。われわれは、変形足の病態を荷重によるバイオメカニクスから解明することで、エビデンスのある新しい装具療法を開発することが可能になると確信した。

### 2. 研究の目的

申請者は、足部 CT 荷重装置を用いて、扁平足は荷重による骨回転量が後足部で増大することを見いだした (Kido, Imai, et al: Foot Ankle Int 2011)。しかし、関節リウマチ (RA) の変形足における病態は不明である。そこで、剛体の応力シミュレーションを可能にする有限要素法 (FEA) と、これまでの研究成果を組み合わせることで RA における変形足の病態解明につながると考えた。

本研究の目的は、足部 CT 荷重装置と FEA を用いて、足根骨の 3 次元的な荷重応答を調べ、RA による変形足の病態を解明し、治療に結びつけることである。計画している研究項目は、FEA で必要な軟部組織の境界条件を、荷重と非荷重時の健全足 CT データから逆算的に推測すること、変形足に应用すること、変形足における応力集中を改善する装具療法を開発すること、である。

### 3. 研究の方法

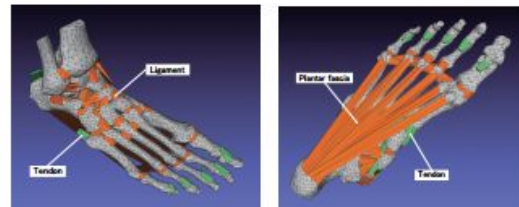
#### FEA における軟部組織のパラメータ (境界条件) の研究

##### 臨床情報および画像の収集

扁平足症例において、足部荷重装置を用いて荷重した状態および非荷重の状態での足・足関節の CT 画像を撮像する。

FEA を用いた足根骨モデルの作製、応力集中の計算

得られた CT 画像を 3 次元立体画像再構築ソフト (Mimics, Materialise Inc, Ann Arbor, MI, USA: 購入済) に取込み、骨ごとの 3 次元画像モデルを作製する。次に汎用非線形有限要素解析プログラム (Abaqus, Simulia, Tokyo, Japan: 設備備品費で購入予定) を用いて足部 FEA モデルを作製する。足部 FEA モデル上で荷重にともなう各足根骨間における応力分布を計算する。



##### 軟部組織のパラメータの研究

荷重時および非荷重時の足部 FEA モデルにおける応力集中を比較することで、仮定した軟部組織 (関節軟骨, 靭帯, アキレス腱など) の境界条件の最適値を求める。

#### 変形足モデルにおける手術前後の応力分布の変化の比較

3 次元画像モデルを用いて扁平足における一般的な手術方法を行ったモデルを作製し、各関節における荷重分布を解析し、術前後での応力分布の変化を明らかにする。また、健全足と比較することで、各関節における骨変形および軟部組織変性の進行を明らかにする。

手術シミュレーションを行ったモデルの作製

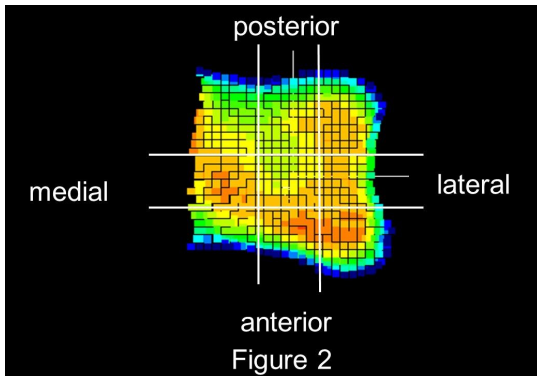
3 次元骨モデルを用いて、一般的な術式を行った後のモデルを作製する。骨切りの位置や変位量を変えてどのように応力が変わるかを検討する

FEA を用いた足根骨モデルの作製、応力集中の計算

同様の方法で足部 FEA モデルを作製する。足部 FEA モデル上で荷重にともなう各足根骨間関節における応力分布を計算する。

### 3次元再構築画像を用いた足関節底背屈における足関節裂隙の変化

健常ボランティア 10 例 20 足（男性 6 例，女性 4 例，平均年齢 28.2 歳）を対象とした。中間位，最大底背屈位で足関節 CT を撮像し，3 次元再構築画像を作製した。足関節を内果，天蓋部，外果に分割し，関節間距離を計測した。天蓋部を前中後および内中外の 9 領域に分割し，それぞれの関節間距離（JSW）を計測した。中間位に対する最大底屈位および背屈位の変化率を算出し，統計学的に検討した。



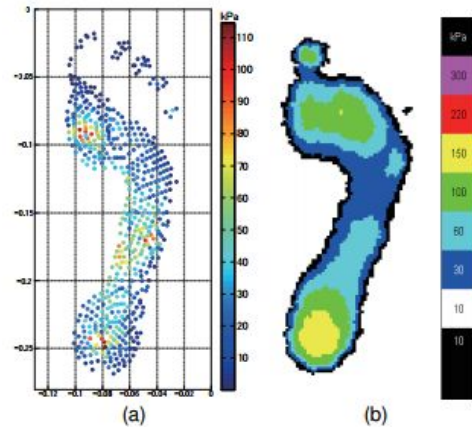
### 扁平足を有する外反母趾の Metatarsus primus elevatus に関する検討

当院の足の外科外来を受診し，単純 X 線画像足部 2 方向を撮像した 74 例 158 足（男性 21 名，女性 53 名，平均年齢 57.4 歳）を対象とした。Meary 角および hallux valgus angle を計測し Group I：扁平足なし，外反母趾なし，Group II：扁平足なし，外反母趾あり，Group III：扁平足あり，外反母趾なし，Group IV：扁平足あり，外反母趾ありの 4 群に分けた。また，Metatarsus primus elevatus (MPE) を計測し，4 群間に差があるかを統計学的に検討した。また，第 1 中足骨 内側楔状骨間の関節角を計測し，MPE が外反母趾もしくは扁平足に使用できるパラメータであるかを評価した。

#### 4. 研究成果

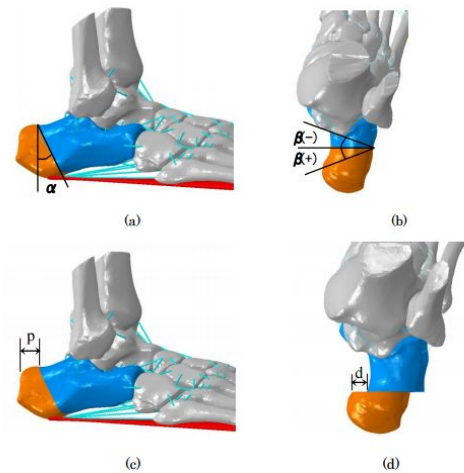
#### FEA における軟部組織のパラメータ（境界条件）の研究

64 の靭帯と 9 本の腱を有限要素モデルに使用した。E-med を用いた足底の面積(a)は有限要素モデルの面積(b)と類似していた。計測データと比較して，後足部の面積が少し大きく，前足部の面積が少し小さかった。第 2-5 趾の領域は有限要素モデルでは計測できなかった。有限要素モデルの圧のピークは 114.6kPa であり，実測値は 165kPa であった。



### 変形足モデルにおける手術前後の応力分布の変化の比較

踵骨隆起内側移動術モデルにおいて，垂直軸に対して 30 度から 45 度まで 5 度刻みに骨切り角度を変化させた。内外反は踵骨の骨軸に対して -12 度から 12 度まで 6 度刻みで骨切り角度を変化させた。骨切り部は踵骨後方から 11.1mm から 26.5mm までの間で 4 つの場所を評価した。移動距離は 4mm から 10mm まで 2mm 刻みで変化させた。AP 角を大きく，踵骨の移動距離を大きくすることで距舟関節の圧力が減少し，内側から外側へ応力が変化することが判明した。



### 3次元再構築画像を用いた足関節底背屈における足関節裂隙の変化

中間位における関節間距離は，天蓋部 2.04 ± 0.29mm，内果 1.70 ± 0.13mm，外果 2.13 ± 0.20mm であった。いずれの部位も背屈，中間位，底屈位の順に関節間距離は大きくなった。中間位に対する背屈および底屈時の変化率は，天蓋部，内果，および外果ともに有意差を認めた。天蓋部を 9 領域に分割した関節間距離の評価では，中央が内側もしくは外側と比較して狭かった。同様に中央が前方もしくは後方と比較して狭かった。中間位に対する底屈位および背屈位の変化率は，中央中央で

は有意差がなかった。一方、前内側、中央中央、後内側では非常に大きな有意差を認めた。

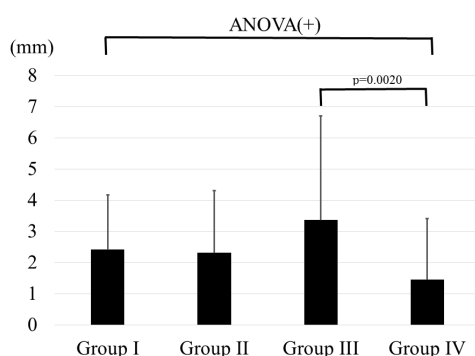
Table 3  
joint space width of nine tibial plafond areas

		lateral	medium	medial
posterior	df	2.07±0.99	1.99±0.73	2.47±0.57
	N	2.09±0.98	1.93±0.94	2.88±0.84
	pf	2.54±0.60	2.57±0.74	3.67±0.64
medium	df	1.83±0.38	1.72±0.39	2.09±0.38
	N	1.86±0.30	1.83±0.38	2.41±0.34
	pf	2.05±0.58	1.73±0.57	2.92±0.73
anterior	df	2.08±0.74	1.94±0.26	2.08±0.32
	N	2.14±0.52	2.10±0.44	2.28±0.96
	pf	2.72±0.62	2.39±0.47	3.67±0.89

mean±S.D.

### 扁平足を有する外反母趾の Metatarsus primus elevatus に関する検討

外反母趾を有する群の MPE は  $1.879 \pm 2.000$ mm、外反母趾のない群の MPE は  $2.578 \pm 2.480$ mm で有意差を認めた ( $p=0.0061$ )。扁平足を有する群の MPE は  $2.183 \pm 2.724$ mm、扁平足のない群の MPE は  $2.374 \pm 1.842$ mm で有意差はなかった ( $p=0.6222$ )。4 群間で比較したところ、MPE はそれぞれ Group I が  $2.425 \pm 1.749$ mm、Group II が  $2.307 \pm 1.989$ mm、Group III が  $3.363 \pm 3.336$ mm、Group IV が  $1.446 \pm 1.961$ mm であった。Group I と Group II との間に有意差はなかった ( $p=0.7925$ )。Group III と Group IV との間に有意差を認めた ( $p=0.0020$ )。各群の内側楔状骨 第 1 中足骨角 (MC -M1A) は、それぞれ  $0.73 \pm 1.04^\circ$ 、 $1.47 \pm 1.66^\circ$ 、 $1.93 \pm 2.32^\circ$ 、 $1.98 \pm 2.44^\circ$  であった。Group I と Group II との間に有意差を認めなかった ( $p=0.025$ )。Group I と Group III および Group IV との間に有意差を認めた ( $p=0.005$ 、 $p=0.003$ )。MC -M1A と MPE との間に相関を認めなかった。



### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計2件)

Imai K, Ikoma K, Kido M, Maki M, Fujiwara H, Arai Y, Oda R, Tokunaga D, Inoue N, Kubo T. Joint space width of the tibiotalar joint in the healthy foot. J Foot Ankle Res. 2015 Jul 3;8:26.査読

有

Wang Z, Imai K, Kido M, Ikoma K, Hirai S. A finite element model of flatfoot (Pes Planus) for improving surgical plan. Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc. 2014;2014:844-7.査読有

[学会発表](計4件)

Imai K, Ikoma K, Inui K, Maki M, Kido M, Hara Y, Kubo T. Metatarsus primus elevatus exact in hallux valgus in pes planus? 6th AFFAS Annual meeting, 2016.11.19-20. Nara, Japan

今井 寛, 生駒和也, 乾 堅太郎, 牧 昌弘, 城戸優充, 原 佑輔, 久保俊一. 扁平足および外反母趾の内側楔状骨-第1中足骨間の不安定性に対する検討. 日本足の外科学会・学術集会. 2016.11.17-18. 奈良 春日野国際フォーラム薨~I・RA・KA~. 奈良

今井 寛, 生駒和也, 城戸優充, 牧 昌弘, 徳本由起子, 原 佑輔, 徳永大作, 久保俊一. 3次元再構築画像を用いた足関節底背屈における足関節裂隙の変化. 日本足の外科学会. 2014.11.13-14, シーガイアコンベンションセンター, 宮崎.

Wang Z, Imai K, Kido M, Ikoma K, Hirai S. A finite element model of flatfoot (Pes Planus) for improving surgical plan. 2014EMBC, 2014.8.26-30., Chicago, USA

[図書](計0件)

[産業財産権]

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

[その他]

ホームページ等  
なし

### 6. 研究組織

(1)研究代表者

今井 寛 (Imai Kan)

京都府立医科大学・医学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号: 60719839

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし

(4)研究協力者

なし