

令和 3 年 6 月 11 日現在

機関番号：24303

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K15806

研究課題名(和文)有限要素法を用いた変形足に対する術前評価法の開発 - オーダーメイド手術を目指して -

研究課題名(英文)A finite element model of foot deformity for improving surgical plan

研究代表者

城戸 優充(Kido, Masamitsu)

京都府立医科大学・医学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：30729281

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文):剛体の応力シミュレーションを行う有限要素解析を、扁平足における矯正骨切り術の術前評価に応用し、最適な骨切り方法について予測した。

具体的には扁平足患者のCTデータを元に扁平足モデルを作製し、モデルに対して2つの矯正骨切り術(踵骨切り内方移動術と外側支柱延長術)のシミュレーションを行い、最適な骨切り方法について予測した。Stage 2扁平足1足において骨移動量8mmの踵骨切り内方移動術、骨延長量10mmの外側支柱延長術が最適であると予測した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では有限要素解析を矯正骨切り術の術前評価に応用し、扁平足患者における最適な骨切り方法を予測した。矯正骨切り術の術前評価にはこれまで荷重X線像が用いられていたが、骨切りの部位や方法は術者の感覚や経験に大きく依存しており、客観性に欠けていた。有限要素解析を用いることで、患者に適した骨切り方法を三次元的かつ客観的に検討することができる。また扁平足患者に適切な矯正骨切り術を施行することで、矯正不足による変形の再発、過矯正による逆変形などの合併症を防ぐことができ、患者のQOL改善に貢献することができる。

研究成果の概要(英文):We investigated the effects of the parameters of two corrective osteotomies (medial displacement calcaneal osteotomy(MDCO) and lateral column lengthening(LCL)) via simulated plantar pressures using a finite element(FE) analysis. The appropriate value of the parameters of MDCO and LCL can be detected using simulated FE models.

研究分野：整形外科

キーワード：有限要素解析 扁平足 矯正骨切り術

## 1. 研究開始当初の背景

扁平足は足部アーチ構造が破綻し、足部変形をきたす疾患である。変形が進行すると、疼痛や歩行困難などの症状を呈する。装具療法などの保存療法に抵抗する場合は、手術療法が必要になる。手術療法の一つに、骨を特定の部位で切断し、骨配列を矯正した後、インプラントで固定する「骨切り術」がある。足部変形は患者によって様々であり、変形に応じた骨切り術が望まれる。これまで数多くの骨切り術が報告されているが、生体ではそれぞれの骨切り術について比較することが出来ないため、最適な骨切り部位や方法についてはいまだ確立されていない。

足部は荷重に応じて立体形状が変化するため、足部変形の評価には荷重が最も重要な条件とされている。これまで荷重 X 線像が術前における骨切り量や矯正固定時の角度の指標として用いられてきた。しかしこれは2次元で単一の骨だけを対象とするものであり、多数の骨から構成されている足部における指標としては情報が不足していた。また手術時には荷重による変形を再現することができないため、骨切り量や矯正固定時の角度は術者の感覚や経験に大きく依存しており、客観性に欠けていた。これらの問題から矯正不足による変形の再発、過矯正による逆変形、固定部位の隣接関節障害などの合併症がおこることが課題となっていた。

有限要素解析 (FEA: finite element analysis) は剛体の応力シミュレーションを行う数値解析法の一つである。構造物の情報をもとに有限要素モデルを作製し、コンピューター上で力学的シミュレーションを行うことで、構造物にかかる応力を予測することができる。様々な分野で応用されており、整形外科領域においても新しい知見が得られている。今回、FEAを扁平足の矯正骨切り術に応用することで、患者の変形に適した骨切り方法を3次元のかつ客観的に予測できるのではないかと考えた。

## 2. 研究の目的

FEAを扁平足に対する矯正骨切り術に応用し、患者の変形に適した骨切り方法を3次元のかつ客観的に割り出す新しい術前評価法を開発することを目的とした。

## 3. 研究の方法

### ・扁平足モデルの作製

有症状扁平足患者 (Johnson & Myerson 分類 stage2, 38歳男性, 身長 168cm, 体重 62kg, BMI 22.0kg/m<sup>2</sup>) の右足を対象とした。当科が作製した足部荷重装置を用いて CT 撮影を行った。3D再構成ソフトウェア (Mimics, Materialise Inc., Leuven, Belgium) を用いて、撮影した CT 画像の右足関節以遠の骨と軟部組織の表面データを抽出した。抽出したデータを有限要素ソフトウェア (Abaqus/CAE 6.14-1, Dassault Systems Simulia Corp., Providence, RI, USA) に取り込み、28個の骨と軟部組織を作製した。靭帯、足底腱膜、アキレス腱を作製して骨に付加し、他の軟部組織と合わせて扁平足モデルを作製した。作製したモデルに対して (1) 扁平足モデルの妥当性の確認、(2) 矯正骨切り術における最適な骨切り方法の検討を行った。

### (1) 扁平足モデルの妥当性の確認

扁平足モデルに対して体重 1/2 の荷重シミュレーションを行い、足底圧を計算した。荷重シミュレーションで得られた足底圧を圧力分布計測システム (Emed-M system, novel.de., Munich, Germany) で計測した実測の足底圧と比較し、モデルの妥当性を評価した。

### (2) 各矯正骨切り術における最適な骨切り方法の検討

扁平足モデルの妥当性を確認した上で、モデルに対して踵骨骨切り内方移動術 (MDCO: medial displacement calcaneal osteotomy) と外側支柱延長術 (LCL: lateral column lengthening) のシミュレーションを行い、適切な骨切り方法について検討した。

#### ・MDCOのシミュレーション方法

踵骨後方を骨切りし、後方骨片を内方に移動させる骨切り術を行った。骨切り位置、骨切り角度、骨移動量を MDCO の骨切りパラメーターとして設定した (図 1)。各骨切りパラメーターが足底圧に与える影響を調べ、本患者における最適な MDCO について検討した。

#### ・LCLのシミュレーション方法

踵立方関節の近位部で踵骨を骨切りし、骨切り部位にくさび状の骨片を挿入して外側支柱を延長させる Evans 法で骨切り術を行った。骨延長量を LCL の骨切りパラメーターとして設定した (図 1)。各骨延長量が足底圧に与える影響を調べ、本患者における最適な LCL について検討した。

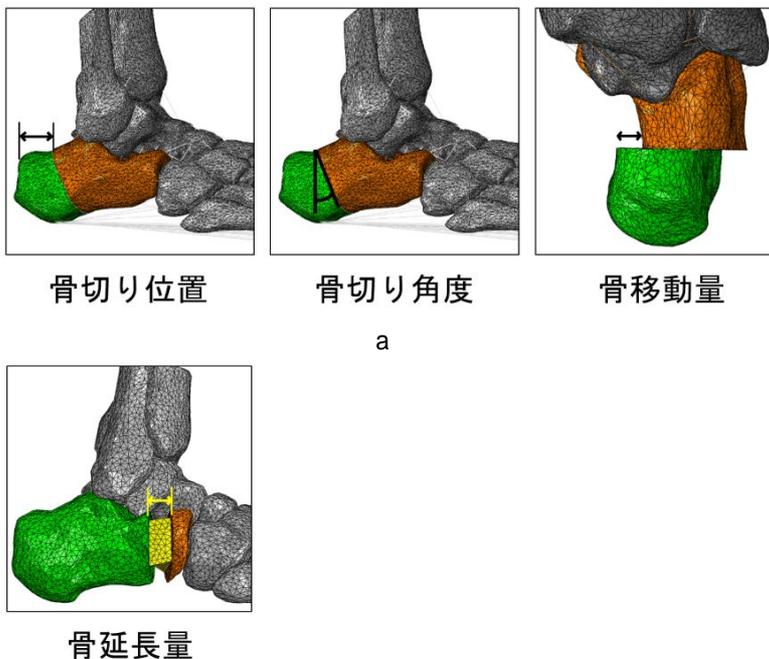


図 1. 骨切りパラメーター. a. MDCO における骨切りパラメーター. b. LCL における骨切りパラメーター.

#### 4. 研究成果

##### (1) 扁平足モデルの妥当性について

扁平足モデルの足底圧は、前足部内側と後足部で高値、前足部外側で低値であり、実測の足底圧と近似していた（図 2）。また扁平足患者の足底圧は前足部内側で高値、前足部外側で低値と報告されており（Hagen, Arch Orthop Trauma Surg, 2020）、本モデルでも同様の傾向を示した。これらのことから、本モデルは足底圧のシミュレーションにおいて妥当性があると判断した。

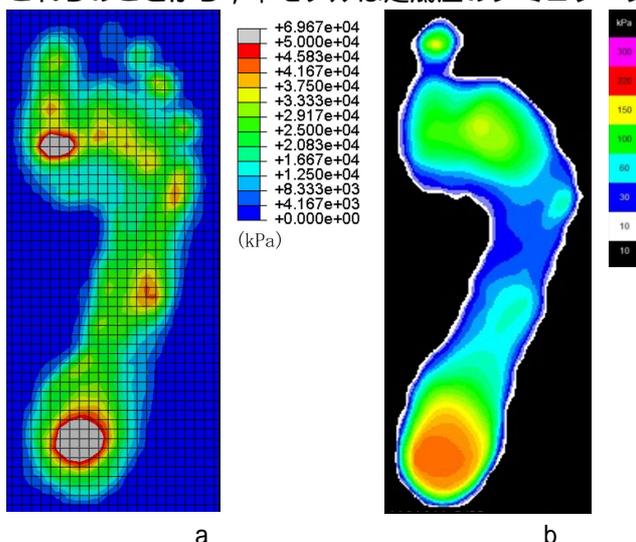


図 2. 扁平足モデルと実測の足底圧の比較. a. 扁平足モデル. b. 実測.

##### (2) 各矯正骨切り術における最適な骨切り方法について

###### ・ MDCO について

骨切り位置と骨切り角度は値を変えても足底圧にほとんど影響を与えなかった。一方で骨移動量は足底圧に影響を与えた。骨移動量の増加に伴い、足底圧は前足部内側で低下し、前足部外側で増加した。骨移動量 8mm の MDCO を行った際に、骨切り術後の足底圧が健常足と最も近似した（図 3）。本患者において骨移動量 8mm の MDCO が適切であることを予測できた。

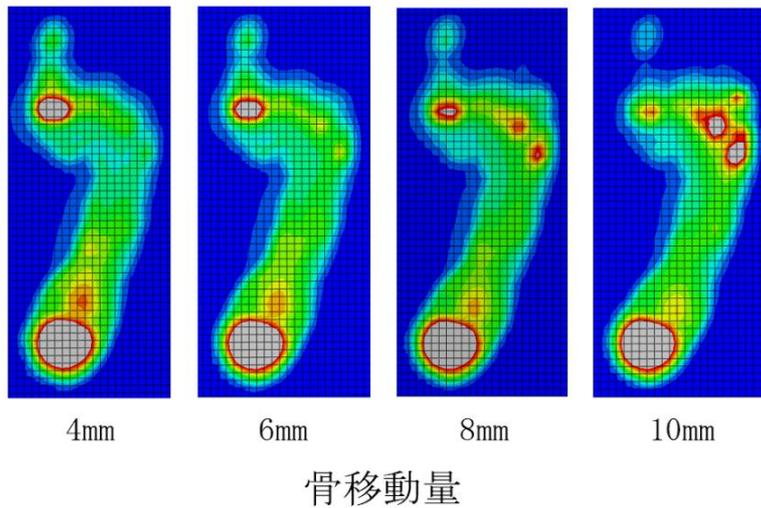


図 3. MDCO のシミュレーション結果の比較.

・ LCL について

骨延長量の増加に伴い、足底圧は前足部内側で低下し、前足部外側で増加した。骨延長量 10mm の LCL を行った際に、骨切り術後の足底圧が健常足と最も近似した (図 4)。本患者において骨延長量 10mm の LCL が適切であることを予測できた。

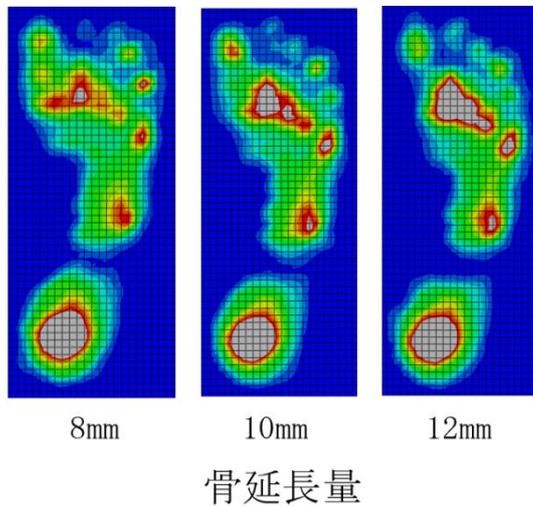


図 4. LCL のシミュレーション結果の比較.

図 2~4 は「外園, 有限要素解析を用いた踵骨骨切り内方移動術における骨切りパラメーターの検討, 日本足の外科学会雑誌 41 巻, Page174-177, 2020 年」「外園, 有限要素解析を用いた外側支柱延長術における骨延長量の検討, 日本足の外科学会雑誌 42 巻, Page 未定, 2021 年」に掲載されている画像と同一であり, 転載に際して著作者, 出版社の了承を得た。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Zhongkui Wang, Masamitsu Kido, Kan Imai, Kazuya Ikoma, Shinichi Hirai	4. 巻 15
2. 論文標題 Towards Patient-Specific Medializing Calcaneal Osteotomy for Adult Flatfoot: A Finite Element Study	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Comput Methods Biomech Biomed Engin.	6. 最初と最後の頁 1, 12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/10255842.2018.1452202.	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 外園泰崇, 城戸優充, 牧 昌弘, 今井 寛, 大橋鈴世, 生駒和也	4. 巻 41
2. 論文標題 有限要素解析を用いた踵骨骨切り内方移動術における骨切りパラメーターの検討	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本足の外科学会雑誌	6. 最初と最後の頁 174, 177
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 外園泰崇, 城戸優充, 牧 昌弘, 今井 寛, 大橋鈴世, 生駒和也, 高橋謙治	4. 巻 -
2. 論文標題 有限要素解析を用いた外側支柱延長術における骨延長量の検討	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本足の外科学会雑誌	6. 最初と最後の頁 -
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 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Sotozono Y, Kido M, Maki M, Imai K, Ohashi S, Wang Z, Hirai S, Ikoma K.
2. 発表標題 Effects of the parameters of medializing calcaneal osteotomy: a finite element analysis.
3. 学会等名 The 7th Scientific Meeting of AFFAS (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 外園泰崇, 生駒和也, 牧 昌弘, 城戸優充, 大橋鈴世, 久保俊一
2. 発表標題 有限要素法を用いた踵骨骨切り内側移動術におけるパラメーターの検討
3. 学会等名 第44回日本足の外科学術集会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 外園泰崇, 生駒和也, 牧 昌弘, 城戸優充, 大橋鈴世, 久保俊一
2. 発表標題 有限要素法を用いた踵骨隆起内側移動術における骨切りパラメーターの検討
3. 学会等名 第34回日本整形外科学会基礎学術総会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 外園泰崇, 生駒和也, 牧 昌弘, 城戸優充, 大橋鈴世, 高橋謙治
2. 発表標題 有限要素解析を用いた外側支柱延長術における骨延長量の検討
3. 学会等名 第45回日本足の外科学術集会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 城戸優充, 生駒和也, 外園泰崇, 今井 寛, 牧 昌弘, 大橋鈴世, 三上靖夫
2. 発表標題 成人期扁平足における有限要素モデルの妥当性評価
3. 学会等名 第57回日本リハビリテーション医学会学術集会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 城戸優充, 生駒和也, 外園泰崇, 原 佑輔, 今井 寛, 牧 昌弘, 大橋鈴世, 高橋謙治
2. 発表標題 足部・足関節の画像解析-画像解析による病態の解明- 成人期扁平足の荷重位三次元的画像解析
3. 学会等名 第93回日本整形外科学会学術総会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

京都府立医科大学 整形外科 足の外科リサーチ <a href="http://www.f.kpu-m.ac.jp/k/orthoped/study/ashi.html">http://www.f.kpu-m.ac.jp/k/orthoped/study/ashi.html</a>
---

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
研究協力者	外園 泰崇  (sotozono yasutaka)	京都府立医科大学・整形外科・大学院生  (24303)	

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