

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 14 日現在

機関番号：24303

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21500411

研究課題名（和文）足部疾患に対する 3 次元動態解析法の確立－足部疾患患者の歩行改善を目指して－

研究課題名（英文）Establishment of a method to analyze three-dimensional kinematics for foot and ankle diseases -an effort to change for the better ambulation of patients-

研究代表者

徳永 大作（TOKUNAGA DAISAKU）

京都府立医科大学・医学研究科・准教授（併任）

研究者番号：90343409

研究成果の概要（和文）：足部疾患における病態解明には、その複雑な立体構造の 3 次元的な荷重応答を把握することが重要である。健康足および扁平足の足部荷重前後の CT 画像データを 3 次元的に再構築し、荷重に対する内側縦アーチ各骨（第 1 中足骨、楔状骨、舟状骨、距骨、踵骨）・関節の骨回転量を定量的に比較した。総回転量は、距舟関節、距踵関節、距腿関節、第 1 足根中足関節、楔舟関節の順に大きく、すべて健康足に対し扁平足で有意に大きかった。（198/200 字）

研究成果の概要（英文）：To elucidate a mechanism of a foot disease, it is important to comprehend the load response of its complicated structure three-dimensionally. We quantitatively evaluated the bone rotation of each joint in the medial longitudinal arch (MLA) (first metatarsal bone, cuneiforms, navicular, talus, and calcaneus) and compare the load response in normal feet to that in flat feet while using the reconstructive three dimensional (3D) CT image data during weightbearing. The total relative rotations were significantly larger in the flatfoot in comparison with the healthy foot in all MLA joints, and the largest rotation was observed in the talonavicular joint, followed in order by talocalcaneal joint, tibiotalar joint, first tarsometatarsal joint, and cuneonavicular joint.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：外科学

科研費の分科・細目：整形外科学

キーワード：生物・生体工学、シミュレーション工学

1. 研究開始当初の背景

足部及び足関節は荷重関節であるため、荷重によって足根骨および各関節がどのように変位するのか精緻に理解することが、足部および足関節疾患の解明および治療に重要である。X 線を用いた報告なども存在するが、複雑な足根骨を生体内で正確に計測する方法としては CT がより有用である。立位では

CT を撮像することは不可能であるため、これまでに CT に用いる足部荷重装置に関する様々な試みが報告されてきた。しかし仰臥位もしくは座位において膝伸展位で撮像すると、荷重をかけると膝が屈曲してしまう問題点があった。

扁平足は、後足部が外反し、前足部が外転する足部の形態学的病態を示し、後脛骨筋腱

機能不全やスプリング靭帯などの支持組織の破綻がその原因とされている。これまでに、屍体足を用いてそれら支持組織を切断した扁平足モデルを作製し、荷重時の足根骨の変位を骨マーカーで評価する研究が行われており、扁平足モデルは正常足モデルに比して、多数の関節において有意な変位を及ぼしていることが報告されている。生体内における扁平足・各足根骨の荷重応答についての研究は X 線、CT などを用いたものがいくつか存在するが、一般的な解剖軸において荷重時と非荷重時で足根骨がどのように変位するか 3 次元的な詳細を示した報告はなかった。

連携研究者である井上らは CT から得られた 2 次元画像を 3 次元に再構築し、前後屈における頸椎椎間関節における生体内動態解析などを報告してきた。

2. 研究の目的

作製したカスタムメイド足部荷重装置（膝屈曲位）を用い、健常足および扁平足の足部荷重 CT 画像データを 3 次元的に再構築することで、荷重に対する内側縦アーチ各関節の骨回転量を定量的に評価し、比較することである。

3. 研究の方法

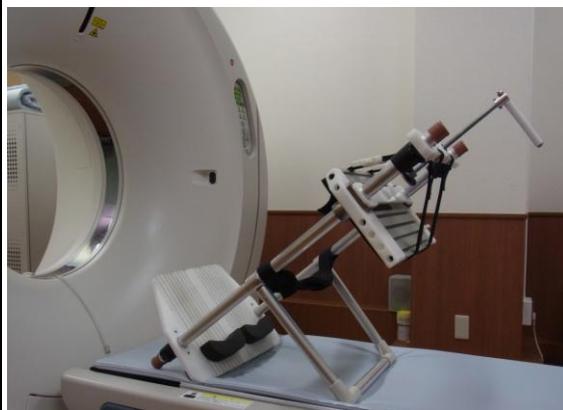
研究プロトコルの IRB 承認を全てに得た。書面による説明と同意を得た健常ボランティア 11 人 21 足（男性 7 人、女性 4 人；年齢平均 35.1 歳）および扁平足 13 人 25 足（男性 5 人、女性 8 人；年齢平均 36.2 歳）を対象とした。2 名の整形外科専門医が臨床所見および荷重時 X 線画像上、扁平足と診断した。

荷重をシミュレーションするため、作製したカスタムメイド足部荷重装置を使用した（図 1）。装置は、フットプレート、荷重部分プレート、支柱の 3 つの主要なコンポーネントから成る。患者を CT 台に仰臥位とし、股関節 50° 屈曲位、膝関節 90° 屈曲位、足関節中間位とした。素材には CT 撮像時のアーチファクトが少ないジュラルミン（アルミ合金）と、ポリアセタールを使用した。アルミ合金と足との距離を 5mm 以上とるように装置を設計することでアーチファクトによる影響を防いだ。フットプレートにはラインがプリントされており、踵・第 2 趾軸を設定する補助となった。荷重部分が軸方向の支柱をスライドし、荷重する。体重計を荷重部分プレートの膝上部に設置した。体重計は 136kg まで耐え、100g 刻みで調整でき、測定値は ±200g までの精度があった。体重計上部に付いている万力によって力が両膝部から加えられた。結果として体重の 100% まで負荷をモニタリングできた。患者の快適性のため、荷重部分の両膝部側にクッション材を取り付けた。平均足底荷重値は、負荷量 0% では

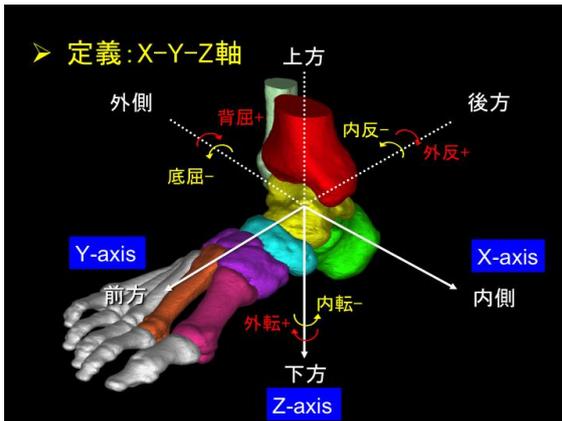
5.7±2.6%，100%では 99.4±11.6%であった。

0.5mm 厚の CT 画像を距腿関節の近位 5cm から足底まで撮影した。CT は東芝社製 Aquilion CX64（0.5sec×0.5mm×64 列、120kV×45mA、volume EC、512×512 matrix）を使用した。両足部を非荷重位、続いて荷重位で撮像した。荷重位では、モニタリングされた荷重値が平衡状態に達した後、約 6 秒間でデータを収集した。

脛骨および内側縦アーチ各骨（距骨、舟状骨、踵骨、楔状骨、第一中足骨）の、足部荷重および非荷重における CT 画像を digital imaging and communication in medicine (DICOM) フォーマットとし、3 次元立体画像再構築ソフトウェア (Mimics, Materialise Inc., Leuven, Belgium) を用いて再構築した（図 2）。皮質骨を threshold level とした。個々の 3 次元画像情報（point-cloud データ）を構築し、抽出した。連携研究者である井上らが確立した Volume merge method を用いて、6 自由度での、第 1 足根中足関節における楔状骨に対する第 1 中足骨、楔舟関節における舟状骨に対する楔状骨、距舟関節における距骨に対しての舟状骨、距踵関節における距骨に対しての踵骨の回転量を計算した。その後データを解析し、健常足および扁平足における足根骨間の骨移動量を比較した。Z 軸は足関節中心を通り脛骨軸に平行とし、Y 軸は、踵中心と第二中足骨とを結ぶラインを投影したものと平行とした。X 軸は右手の法則に従って Y、Z 軸から決定した。3 軸から coronal XY 平面、sagittal XZ 平面、transverse YZ 平面と定義した（図 2）。骨同士の空間的關係はオイラー角を用いて表現した。過去の屍体足研究の報告に従い外転背屈外反を正とし、内転底屈内反を負とした。また 3 軸の運動の 2 乗平方根の和を総回転量として評価した。統計は unpaired t-test を用いた。結果は、平均値±標準偏差で表記した。p < 0.05 を有意差ありとした。



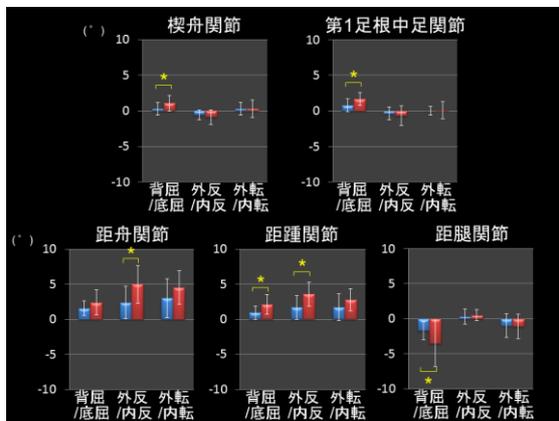
(図 1)



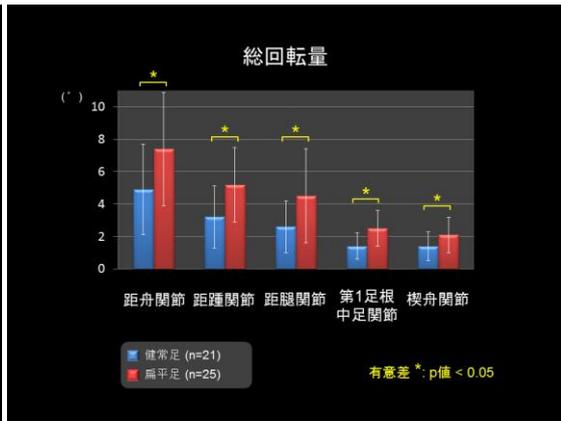
(図 2)

4. 研究成果

健常足に対して扁平足では、第1足根中足関節は有意に1.0°背屈し、楔舟関節は0.9°背屈し、距舟関節は2.3°外反し、距踵関節は1.1°背屈および1.7°外反した(p<0.05)(図3a)。総回転量は、内側縦アーチにおいて距舟関節、距踵関節、第1足根中足関節、楔舟関節の順に大きく、すべて健常足に対し扁平足で有意に大きかった(p<0.05)(図3b)。過去の研究で示唆されていたように、内側縦アーチの三角構造の頂点に位置する距舟関節で、内側縦アーチにおける可動性が最も大きくなった。距舟関節を中心とした保存的および手術的治療の必要性が高いことが考えられた。



(図 3a)



(図 3b)

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 5 件)

- ① Kan Imai, Kazuya Ikoma, Daisaku Tokunaga, Nozomu Inoue, et al., In vivo three-dimensional analysis of hindfoot kinematics., Foot and Ankle International, 査読有, Vol. 30, 2009, 1094-1100, DOI: 10.3113/FAI.2009.1094
- ② Kan Imai, Kazuya Ikoma, Daisaku Tokunaga, Nozomu Inoue, et al., Features of hindfoot 3D kinetics in flat foot in ankle-joint maximal dorsiflexion and plantarflexion, Journal of Orthopaedic Science, 査読有, Vol. 16, 2011, 638-643, DOI: 10.1007/s00776-011-0103-x
- ③ Masamitsu Kido, Kazuya Ikoma, Daisaku Tokunaga, Nozomu Inoue, et al., Load response of the tarsal bones in patients with flatfoot deformity: in vivo 3D study, Foot and Ankle International, 査読有, Vol. 32, 2011, 1017-1022, DOI: 10.3113/FAI.2011.1017
- ④ 今井寛、生駒和也、徳永大作、井上望、扁平足における後足部の in vivo 3次元動作解析、中部日本整形外科災害外科学会雑誌、査読有、54 巻、2011、1-5、<http://japanlinkcenter.org/JST.JSTAGE/chubu/2011.1>
- ⑤ 城戸優充、生駒和也、徳永大作、井上望、CT 撮像用オリジナル足部荷重装置の精度および再現性に関する検討、日本足の外科学会雑誌、査読有、32 巻、2011、85-88、<http://ci.nii.ac.jp/naid/10029404779>

[学会発表] (計 22 件)

- ① Masamitsu Kido, Kazuya Ikoma, Daisaku Tokunaga, The accuracy and

- reproducibility of the loading device of the foot, 26th Annual Summer Meeting of American Orthopaedics of Foot and Ankle Surgery, 2010年7月8日, Washington D.C., USA
- ② Kan Imai, Kazuya Ikoma, Daisaku Tokunaga, Nozomu Inoue, In vivo three-dimensional analysis of hindfoot kinematics with posterior tibial tendon dysfunction stages II and III, 26th Annual Summer Meeting of American Orthopaedics of Foot and Ankle Surgery, 2010年7月8日, Washington D.C., USA
- ③ Kan Imai, Kazuya Ikoma, Daisaku Tokunaga, Nozomu Inoue, Comparison of the ankle joint space width between normal and flat feet using 3D CT reconstruction images, 7th the meeting of the combined meeting of orthopaedic research society, 2010年10月17日, Kyoto, Japan
- ④ Masamitsu Kido, Kazuya Ikoma, Daisaku Tokunaga, Nozomu Inoue, In vivo 3D analysis of flatfoot deformity using a custom-made loading device, 57th Annual Meeting of Orthopaedic Research Society, 2011年1月13日, Long beach, USA
- ⑤ Kan Imai, Kazuya Ikoma, Daisaku Tokunaga, Nozomu Inoue, The kinematic difference between stages II and III in flatfoot deformity using linear regression analysis, 57th Annual Meeting of Orthopaedic Research Society, 2011年1月13日, Long beach, USA
- ⑥ Masamitsu Kido, Kazuya Ikoma, Daisaku Tokunaga, Nozomu Inoue, Load response of the tarsal bones in patients with flatfoot deformity: in vivo 3D study, 27th Annual Summer Meeting of American Orthopaedics of Foot and Ankle Surgery, 2011年7月15日, Keystone, USA
- ⑦ Kan Imai, Kazuya Ikoma, Daisaku Tokunaga, Nozomu Inoue, In vivo Three-Dimensional Analysis of Hindfoot Kinematics with posterior tibial tendon dysfunction stages II and III, 27th Annual Summer Meeting of American Orthopaedics of Foot and Ankle Surgery, 2011年7月15日, Keystone, USA
- ⑧ Kan Imai, Kazuya Ikoma, Daisaku Tokunaga, Nozomu Inoue, Comparison of the ankle joint space width between normal and flat feet using 3D CT reconstruction images, 19th Annual Meeting of the European Orthopaedic Research Society, 2011年9月1日, Vienna, Austria
- ⑨ Kan Imai, Kazuya Ikoma, Daisaku Tokunaga, Nozomu Inoue, The change of three-dimensional kinematics of the hindfoot with stage II, III, and IV of PTTD, 4th Meeting of International Federation of Foot and Ankle Societies, 2011年9月21日, Nara, Japan
- ⑩ Masamitsu Kido, Kazuya Ikoma, Daisaku Tokunaga, Nozomu Inoue, Load Response of the Tarsal Bones in patients with Flatfoot Deformity: In vivo 3D study, 4th Meeting of International Federation of Foot and Ankle Societies, 2011年9月21日, Nara, Japan
- ⑪ 今井寛, 生駒和也, 徳永大作, 井上望, 扁平足における後足部の生体内3次元骨配置の検討, 第83回日本整形外科学会学術総会, 2010年5月29日, 東京国際フォーラム (東京都)
- ⑫ 生駒和也, 徳永大作, 井上望, 扁平足における後足部の3次元動作解析, 第35回日本足の外科学会, 2010年6月18日, 新公会堂 (奈良県)
- ⑬ 城戸優充, 生駒和也, 徳永大作, 井上望, カスタムメイド荷重装置の精度および再現性について, 第35回日本足の外科学会, 2010年6月18日, 新公会堂 (奈良県)
- ⑭ 今井寛, 生駒和也, 徳永大作, 井上望, 後脛骨筋腱機能不全 stage 2, stage 3 における後足部の in vivo 3次元動作解析, 第35回日本足の外科学会, 2010年6月18日, 新公会堂 (奈良県)
- ⑮ 今井寛, 生駒和也, 徳永大作, 井上望, 後脛骨筋腱機能不全 stage II および III における足関節天蓋部関節裂隙の検討, 第25回日本整形外科学会基礎学術集会, 2010年10月14日, 国際会館 (京都府)
- ⑯ 城戸優充, 生駒和也, 徳永大作, 井上望, オリジナル足部荷重装置の精度および再現性に関する検討, 第25回日本整形外科学会基礎学術集会, 2010年10月14日, 国際会館 (京都府)
- ⑰ 今井寛, 生駒和也, 徳永大作, 井上望, 扁平足における後足部の in vivo 3次元動作解析, 第115回中部日本整形外科学会災害外科学会, 2010年10月19日, ザ・リッツ・カールトン大阪 (大阪府)
- ⑱ 今井寛, 生駒和也, 徳永大作, 井上望, 扁平足における変形の進行予測因子の検討, 第84回日本整形外科学会学術総会, 2011年5月12日, パシフィコ横浜 (神奈川県)
- ⑲ 今井寛, 生駒和也, 徳永大作, 井上望,

後脛骨筋機能不全 stage 2、3 および 4 に
おける後足部の 3 次元動作解析変化，第
36 回日本足の外科学会，2011 年 9 月 21
日，新公会堂（奈良県）

- ⑳ 城戸優充，生駒和也，徳永大作，井上望，
扁平足における足根骨荷重応答 生体内
3 次元研究，第 36 回日本足の外科学会，
2011 年 9 月 21 日，新公会堂（奈良県）
- 21 城戸優充，生駒和也，徳永大作，井上望，
扁平足における足根骨荷重応答，第 26 回
日本整形外科学会基礎学術集会，2011 年
10 月 20 日，ベイシア文化ホール（群馬
県）
- 22 今井寛，生駒和也，徳永大作，井上望，
扁平足の進行に伴う後足部 3 次元動態の
変化，第 39 回日本関節病学会，2011 年
11 月 13 日，パシフィコ横浜（神奈川県）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

徳永 大作 (TOKUNAGA DAISAKU)

京都府立医科大学・医学研究科・准教授(併
任)

研究者番号：90343409

(2) 研究分担者

生駒 和也 (IKOMA KAZUYA)

京都府立医科大学・医学研究科・助教

研究者番号：50516044

(3) 連携研究者

井上 望 (INOUE NOZOMU)

同志社大学・生命医科学部医工学科・教授

研究者番号：30193600