

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24500666

研究課題名(和文) 定量的データに基づくプラスチック短下肢装具機能の分析・評価

研究課題名(英文) Analysis and evaluation of plastic ankle foot orthosis (PAFO) based on quantitative data

研究代表者

北山 一郎 (KITAYAMA, Ichiro)

近畿大学・生物理工学部・准教授

研究者番号：80426535

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、健常者および装具使用者の歩行データから得られた装具にかかる荷重データをもとに、取得した装具の3次元形状データと有限要素解析ソフトを用いて、装具にかかる応力や変形を分析した。初めに、被験者の歩行中に装具にかかる力を装具脛脛部分に設置した6軸力覚センサを用いて健常者と装具使用者のデータを測定した。測定の結果、装具前後方向の荷重が健常者と装具使用者で異なることが分かり、同データが評価指標となる可能性が見出された。ついで、スキャナで獲得した装具形状に対し同データを外力として加えた有限要素解析を実施した。さらに、同手法を用いて装具をトリミングしたときの応力集中や変形などの状態を分析した。

研究成果の概要(英文)：This study reports on an analysis of the deformation and stress on an orthosis using its 3D shape data and finite element analysis software. The analysis is based on orthosis load data obtained from ambulatory data of healthy participants and orthosis users. First, the forces acting on an orthosis during ambulation of participants were measured using a six-axis force torque sensor installed in the calf section. The data revealed that there is a significant difference in anterior-posterior loads, which may be an important evaluation index of orthotic ambulation, between orthosis users and healthy participants. These data were applied as an external force to the orthosis shape obtained using a scanner and subjected to finite element analysis. Then, we analyze stress concentrations and deformations of orthoses modified by trimming when a given load was applied to them.

研究分野：人間医工学、日本リハビリテーション科学・福祉工学

キーワード：短下肢装具 プラスチック短下肢装具 歩行分析 シミュレーション 有限要素解析

### 1. 研究開始当初の背景

国民生活基礎調査によると、高齢者が要介護となる要因は、脳卒中が約 26% で最も多い。また、その脳卒中に処方される最も一般的な福祉用具が短下肢装具であり、その多くが後面支柱付プラスチック短下肢装具（プラスチック AFO, PAFO）である。しかし、数多く処方されているプラスチック AFO については、数多くの文献があるものの、歩行をどの程度支援し、また、どの程度制限しているのかといった力学的な状態が、装具を装着した状態で調べられた文献は国内のみならず海外においてもないと考えられる。プラスチック AFO の研究に求められることは、“装具がどの程度使用者の歩行を支援しているか（必要のない力が掛かっている場合は制限しているのか）” という点と、“処方した装具が適する機能を発揮する設計になっているのか” である。前者については、人体が装具から受けている力を測定することから始まるが、装具装着状態で力学的データが取得された例がないので、装具単独あるいはダミーの足による装具の研究を実施せざるを得ない状況にある。また、後者については、プラスチック AFO をトリミングすることで形状の変化させたとき、装具の歩行支援状況がどのように変化するかを調べる必要があるが、これも同様に装着状態で力学的特性が調べる方法がないため、前者と同じく試験機を用いた力学的特性と装着状態で歩行分析結果の関連性を定性的に類推するしかない現状にある。

### 2. 研究の目的

近年高齢者が多数発症する脳卒中片麻痺者の多くにプラスチック短下肢装具が処方されているが、上記背景にもあるように装具がどの程度使用者の歩行を支援あるいは制限しているかについて、使用者の歩行時の力学的データから分析・評価した研究は国際的にもほとんど見ることはできない。本研究では、プラスチック短下肢装具内部に小形の 6 軸力覚センサを組込むことで、装具に生じる力学的データを取得し、さらに、装具の形状を変化（トリミング）させた場合、力学的データにどのような差異が見られるかを分析することで、使用者に適する装具の処方に役立てること、さらには、歩行を支援する新たな装具開発の基礎データを得ることを目的とする。

### 3. 研究の方法

開発した装具歩行の力学的計測システムを用いて、健常者（5 名）および装具使用者（2 名）の歩行中に装具にかかる荷重の時系列データを取得する。ついでそのデータを使用して、装具の変形状態や応力分布の状態について、有限要素解析ソフトウェア（ANSYS）を用いて分析・評価する。分析にあたっては、スキャナを用いた装具の 3 次元形状データ（装具形状データ）を活用する。

また、CAD 上に取り込まれた装具形状データをトリミングした新たな装具形状データに対し、実験により得られた力学データを負荷した際の、応力集中や装具の変形状態を得ることでトリミングの影響を調べる。

装具歩行の力学的計測システムとしての計測用 PAFO は、図 1 に示すように脛脛部で上下に分割し、上部と下部の間で 6 軸力覚センサだけが接触するように組み込んでいる。分割することで PAFO の元の系とは正確には異なるが、装具の構造物としての機能をほぼ乱すことのない脛脛上部後方にセンサを設置することでこの問題を回避している。

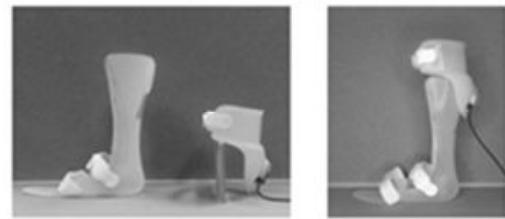


図 1. 測定用プラスチック短下肢装具

装具が被験者の歩行をどの程度支援あるいは制限しているかをリアルタイムで計測するために、靴底に 2 点、装具内に 1 点の 6 軸力覚センサを設置し、また足関節に作用する力を計測するために 1 軸ロードセルを設置し計測を行った。図 2 にシステムの概略図を示す。

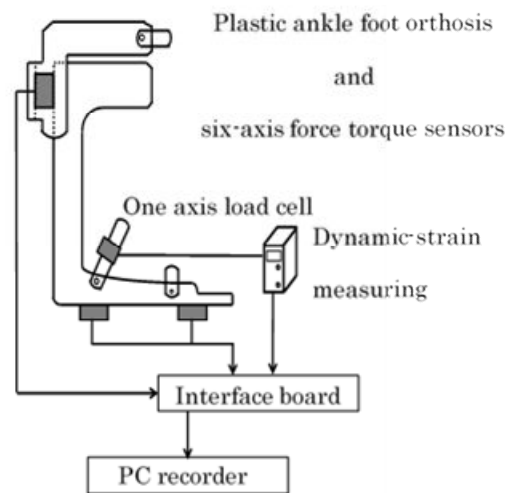


図 2. 装具歩行計測システム

靴底の踵とつま先 2 点に設置した 6 軸力覚センサ（ATI 社 Mini45）により、歩行時の立脚相・遊脚相を識別する。また同時に脛脛部の 6 軸力覚センサによって歩行中装具が受ける外力を計測する。さらに足関節ベルト部に設置した 1 軸ロードセル（東洋測器社 MC-20L）により、足関節の曲げ伸ばしに伴うベルトにかかる力も計測する。図 3 にこれら全てを被験者に装着した様子を示す。

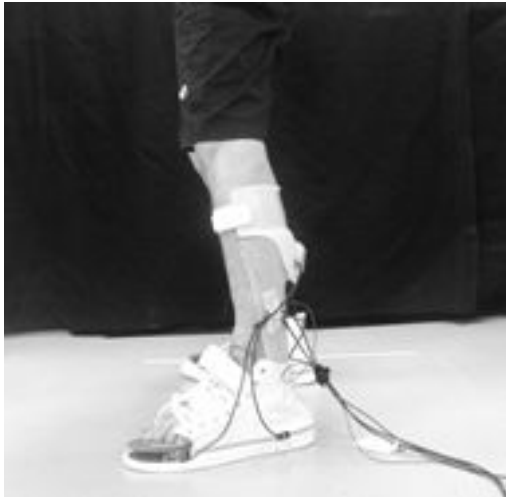


図3 装具歩行計測システムの装着図

なお、対象被験者の左片麻痺患者2名と健常者5名については、近畿大学生物理工学部生命倫理委員会の承認(承認番号H26-1-002)を受け、被験者には事前に書面と口頭で研究の目的および内容を十分説明し、同意の上署名を頂き計測を行った。被験者のうち、片麻痺患者Aは中程度の症状であり、片麻痺患者Bは比較的重度の症状であった。今回は被験者の症状を考慮し、歩幅や歩行速度の定量的な指定を行わず、被験者の感覚に依存する速度で無理のないように複数回ずつ計測を行った。また比較を行う対象の健常者5名は全員男性であり、(年齢  $29.6 \pm 14.2$  歳 体重  $67.4 \pm 11.0$ kg; 平均  $\pm$  標準偏差)も同様に計測用 PAFO 装着の上、歩幅や歩行速度を変えてそれぞれ10回ずつ歩行実験を行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) 装具にかかる荷重成分の分析

得られたデータにおいて、特徴的な結果の例として、図4、図5、図6に健常者、中程度片麻痺者(被験者A)、やや重度片麻痺者(被験者B)の順で、立脚中に装具前後方向にかかる荷重(装具を身体が後ろに押す力を正、前に引張る力を負とした値)を示す。それぞれの力の値は体重で除し、また1立脚相時間で正規化する処理を行っている。

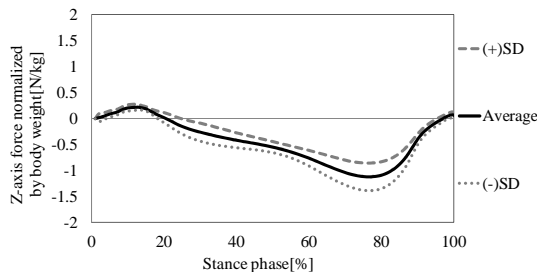


図4 健常者の前後方向荷重

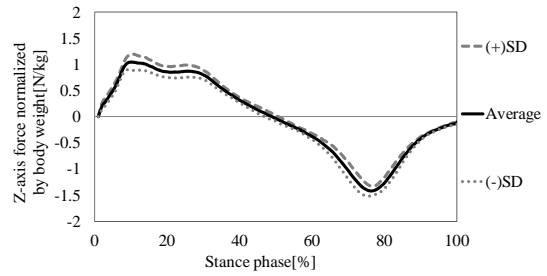


図5 被験者Aの前後方向荷重

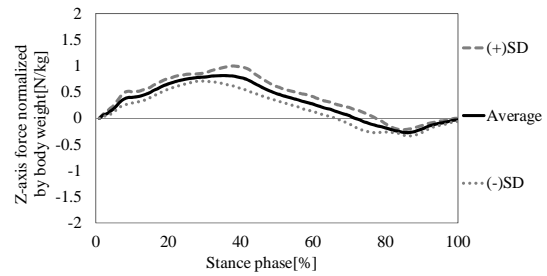


図6 被験者B(やや重度)の前後方向荷重

これらのデータに対し、立脚相初期の正方向の第1ピークと立脚相後期の負方向の第2ピークを指標としたデータを比較すると、被験者A、Bともにt検定により5%有意水準で有意な差が見られ、健常者と被験者との間で荷重データに差があることが観測された。これらを含むデータの詳細は、下記の雑誌論文に詳細が記されている。同データを含む装具にかかる荷重データから、下記雑誌論文の および に記載の主な知見は以下のとおりである。

装具にかかる荷重は、いずれの被験者ともに立脚相初期に後方荷重が最大となり、踵部離床時に前方荷重が最大となる。

前者の荷重は健常者では比較的小さく、装具使用者では大きな値となり、後者の荷重は健常者で大きく、装具使用者では小さい値であった。

なお、その傾向は比較的重度の被験者(装具使用者)の方が軽度の被験者より顕著であった。

健常者のデータでは、それらの荷重は、歩行速度(ケータンス)が変わってもあまり変化がない一方、歩幅が変わると変化が大きいことが観察された。

装具使用者において立脚相初期で大きな値となっていることは、使用者においては麻痺側への体重負荷時に装具が荷重を受けることで歩行を支援しているのではないかと考えられる。

一方、立脚相後期の踵部離床時に健常者で大きな前方荷重が得られていることは、健常な被験者の前方推進動作を装具が妨げているのではないかと考えられる。しかし、装具使用者ではこの値は小さいことから、その影響はそれほど大きくないのではないかと考

えられる。

装具が受ける最大垂直荷重は体重の 3%程度であり、免荷の効果はあまり多くないと考えられる。

上記のように装具にかかる荷重の内、前後方向荷重が最大の値を示し、被験者に対応した変化のある波形が得られることから、前後方向荷重は装具の評価指標（パラメータ）としては最も有効なものと考えられる。

### (2) 装具にかかる最大荷重ベクトルの分析

上記実験で得た被験者 A のデータから最大底屈荷重点は、装具脛脛部に設置したセンサの中心から上方に 59.8 (mm)、内側に 11.7 (mm) の部位に  $(F_x, F_y, F_z) = (20.2[N], -2.85[N], 67.2[N])$  の力が生じていることが分かった。ここでの最大荷重は、それぞれのベクトルの成分の平方和の最大値と定義した。同じく、被験者 B の歩行分析結果の最大底屈荷重点は、装具脛脛部に設置したセンサの中心から上方に 60.8 (mm)、内側に 14.9 (mm) の部位に  $(F_x, F_y, F_z) = (29.8[N], -8.39[N], 47.9[N])$  の力が生じていることが分かった。

### (3) 測定データに基づく有限要素解析

装具の 3 次元データは、図 7 に示すスキャナで獲得した。同手法は装具の変形した状態での 3 次元データも獲得できるため、装具の変形量も測定できる。



図 7 装具形状データの取得

はじめに、有限要素解析の有効性の確認のため、装具におもりをかけて変形量を測定したデータと有限要素解析による変形量との比較を実施した。その結果、図 8 に示すように、有限要素線形解析、有限要素非線形解析（以下では非線形解析を使用した）ともに、ほぼ実験値とシミュレーション値が一致することを確認した。

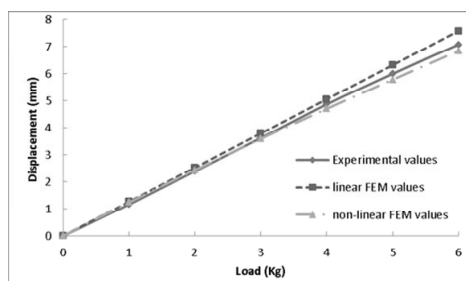


図 8 各荷重負荷時の装具の変位の実測値と有限要素線形解析および有限要素非線形解析結果の比較

この結果を受けて上記(2)で得た被験者 B の最大荷重データを同被験者使用装具の 3 次元形状データに加えた時の相当応力分布を図 9 に、変位量を図 10 に示す。

結果より、片麻痺患者 A, B 共に（下記学会発表は論文投稿査読中、その論文の結果より被験者 A でも同様の結果が観測された）装具の内果部に高い応力集中があり、また、装具外果部、装具内側下部等に応力が集中していることが分かった。また、変位量が大きい部位は装具内側上部であり、外側方向に偏心しながら変形していることも確認できた。また、片麻痺患者 B は症状が比較的軽度であることから、装具の足部第 1 中足骨頭内側部、足部第 5 中足骨頭外側部に応力が比較的大きくかかっており、装具にいわゆるもたれているような状態であることが図 9 よりわかる。このように従来観察できなかった事項を今回の研究で知ることができた。

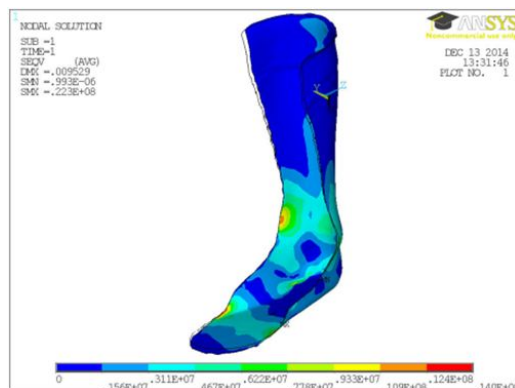


図 9 有限要素解析結果(応力分布:被験者 B)

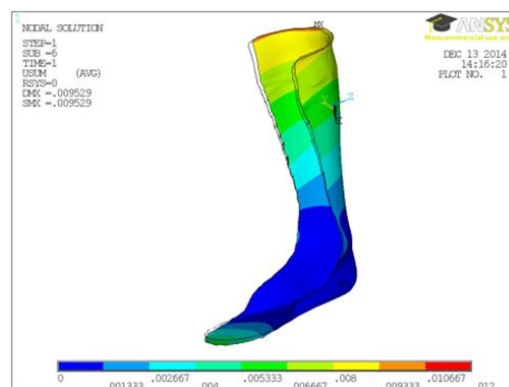


図 10 有限要素解析結果(変位量:被験者 B)

### (4) トリミングの影響の分析

装具のトリミングの例として、図 11 に示すような踵部のくり抜いた分析結果の一部を示す。片麻痺患者 B の立脚初期の荷重ベクトルの大きさが最大となる状況での負荷を加えた際の装具の応力分布図に関し、踵部トリミング 5mm の場合を図 12 左に、踵部トリミング 15mm の場合の図を図 12 右に示す。また、対応する変位図の結果を図 13 に示す。図 12 の応力分布図からは、踵部を大きくト

リミングすることによって、踵部の内外果部、装具内側下部等に応力が集中していることがわかる。更に、踵部周辺部にも応力が集中していることがわかる。また、図 13 の変位図からは、踵部トリミング 5mm のとき、内側上部の最大変位量が 16.0(mm) 生じるのに対して、踵部トリミング 15(mm) のときは内側上部の最大変位量は 22.2(mm) を示し、トリミングの大きさを 5(mm) から 15(mm) に変化させると、変位量が 39% 増加することが予想される。装具支援が必要な片麻痺患者の装具に対して、踵部のトリミングは装具の可撓性を変化させる大きな要因であることが分かる。

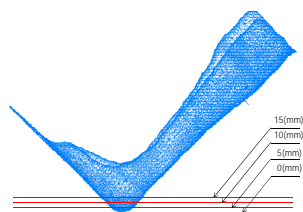


図 11 装具の長軸を 45 度傾けた時の最下端から上方へのトリミングの例

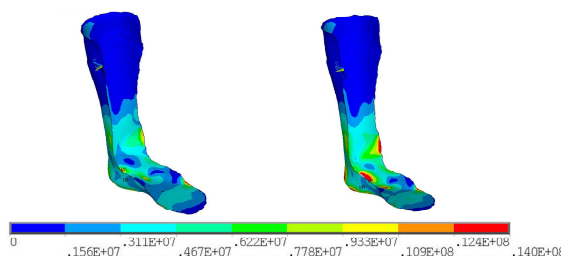


図 12 トリミング 5mm と 15mm の応力分布図

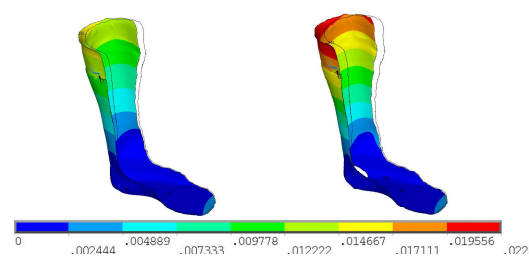


図 13 トリミング 5mm と 15mm の応力分布図

#### (5) 研究成果のまとめ

センサを組込んだ装具を開発することで従来観察されていなかった装具にかかる外力ベクトルの時系列データを得ることができた。

データの分析から、健常者と装具使用者ではデータに違いが観測され、装具は装具使用者の立脚相の安定性に役立っていることが推定された。この結果から、新たな装具には立脚相初期でののしっかりとした安定性と立脚相後期での底屈可動域の現状の装具より多少の可動性を有する装具が歩行においては求められるのではないかと考えられる。

3D スキャナを用いて、装具形状および装具変形状態を知ることができた。

有限要素解析を用いることで、装具のトリミング加工などを実際に実施することなく、装具の応力集中状態や変形状態をシミュレーションすることが可能となった。

スキャナによる装具外形形状データを有限要素解析ソフトに取り込み、トリミングなどの修正を加えて有限要素解析を行う、形状収集、修正、分析の一連のアルゴリズムを完成させた。

#### 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)

齊藤佑典, 北山一郎, 小山秀世, 森本高史, 園部秀樹, プラスチック短下肢装具歩行時の立脚相機能の計測, 実験力学, 査読有, Vol.14, No.1, 2014, 9-15, <http://www.jsem.jp/>  
Ichoro KITAYAMA, Tubasa KAWAUCHI, Ryoji TAKAHATA and Noriyasu HIROKAWA, Kinematic Analysis of Plastic Ankle-Foot Orthosis Using Force Sensors, Journal of JSME (実験力学), 査読有, Vol.13 special Issue, s217-s221, 2013, <http://www.jsem.jp/>

〔学会発表〕(計 6 件)

中野耕助, 北山一郎, 北野将利, 山中 隆, 大政光史, プラスチック短下肢装具使用時の歩行分析データに基づく有限要素解析, 日本機械学会関西支部第 90 期定期総会講演会, 2015 年 3 月 16 日, 京都大学桂キャンパス(京都府京都市)

中野耕助, 北山一郎, 大政光史, 荷重データにもとづく有限要素解析によるプラスチック短下肢装具の分析, 日本臨床バイオメカニクス学会, 2014 年 11 月 22 日, 奈良県新公会堂(奈良県奈良市)

中野耕助, 北山一郎, 北野将利, 山中 隆, 大政光史, プラスチック短下肢装具の有限要素解析, 電気学会知能メカトロニクス専門委員会, 2014 年 7 月 12 日, 高野山宝城院(和歌山県伊都郡高野山)

中野耕助, 北野将利, 山中 隆, 北山一郎, 有限要素法(FEM)を用いたプラスチック短下肢装具の分析, ヒューマンサポートサイエンス学会 2104 年 6 月 28 日, (株)アルトナー江坂ラーニングセンター(大阪府大阪市)

北野将利, 中野耕助, 山中 隆, 北山一郎, 装具装着者歩行中に装具にかかる荷重の分析, ヒューマンサポートサイエンス学会 2104 年 6 月 28 日, (株)アルトナー江坂ラーニングセンター(大阪府大阪市)

齊藤佑典, 中野耕助, 宇崎恭平, 中家都嵩, 北山一郎, 力学的データに基づくプラスチック短下肢装具機能の分析, 日本設計工学会 2013 年度秋季研究発表講演会, 2013 年 10 月 5 日, 名城大学天白キャンパス(愛知県名古屋)

屋市)

〔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

[http://www.waka.kindai.ac.jp/kigyo/works/public/pdf\\_works/works\\_pdf\\_41.pdf](http://www.waka.kindai.ac.jp/kigyo/works/public/pdf_works/works_pdf_41.pdf)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

北山 一郎 (KITAYAMA Ichiro)  
近畿大学生物理工学部 准教授  
研究者番号: 80426535

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし

### (4) 研究協力者

なし