

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月23日現在

機関番号：32672

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K13005

研究課題名(和文)足底圧分布変化の空間的・経時的定量化による歩・走動作の安定性を評価する試み

研究課題名(英文)Plantar pressure patterns and medial longitudinal arch deformation during gait in elementary school children

研究代表者

船渡 和男 (Funato, Kazuo)

日本体育大学・体育学部・教授

研究者番号：60181442

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：小学生児童について、自由歩行時の足部内側縦アーチ構造の変形にちて足底圧パターンと併せて検討した。被験者は小学校女子児童1年生(21名)と6年生(24名)とし、self-paced speed walkingを対象動作とした。足部に添付した解剖学的ランドマークからアーチ角度、アーチ高およびアーチ長の変化を定量化した。歩行動作において、小学校1年生、6年生ともに接地約75%の地面反力の第2ピーク出現時に、アーチ角度、アーチ高およびアーチ長の変化が最大となった。1年生と6年生の比較では絶対量では6年生が大きな値を示したが、体重あたりの地面反力および足長あたりのアーチ高やアーチ長は同等であった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

足底圧・床反力の変化と動作を同時に分析するシステムを構築することで、足底圧分布の時間的な変化と動作の変動の因果関係を検討することができる。特に幼児や加齢あるいは臨床的観点から、歩・走行動作の不安定性について評価し、かつ改善のためには足圧分布の変容を意識する介入研究に発展できると考えている。このような観点からバイオメカニクス研究のみならず、医療、リハビリ、スポーツ分野へと様々な分野への応用することができると考えられる。「足裏感覚=スキル(技術)」の観点から、足底部位での荷重を可視化することによって、安定した動作やスポーツパフォーマンスからみて合目的な動きづくりなどの指導に貢献できる。

研究成果の概要(英文)：Medial longitudinal arch (MLA) play as spring-like action during gait. MLA deformation due to growth have not been clarified. This study was to clarify MLA deformation as well as plantar pressure patterns during gait in elementary school girls. Ground reaction force (GRF), MLA angle and height of 45 female elementary girls (1st and 6th grade) at preferred speed were investigated with a highspeed video and an Emed q-100 pedography platform. MLA angle was calculated as the angle between the first metatarsal head, the navicular tuberosity and the medial calcaneus. MLA height was calculated as the perpendicular distance between the navicular tuberosity and a horizontal line of 1st metatarsal head. MLA height decreased from heel contact and increased after heel rise, on the other hand MLA angle increased. Large deformation in MLA was observed around 75% stance phase, where maximum GRF in forefoot was indicated.

研究分野：健康・スポーツ科学

キーワード：足底圧 歩行 小学生児童 足アーチ

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

人間の歩・走行動作において、足底部は特に重要な役割を果たし、体重を支えると同時に身体運動で発生する大きな床反力や圧力を受けている。特に歩行に関する研究では、足底圧の分布から、病的診断や、高齢者の転倒予防など多くの情報が発信されており、足部に関する運動学的分析は、医療やリハビリ研究(Clinical Gait Analysis)分野においてニーズが高まってきている (Turner D.E. ら 2008, Scott G. ら, 2007)。しかし足底部の圧力分布は定性的観察に依存していることが多い。D.E. Lieberman, ら (Nature, 2010) は、衝撃を緩衝させる靴の機能は本来の人間が有する足底の固有受容感覚、足底筋あるいはアーチなどの機能を退化させていることを示唆している。本研究では人間の歩・走行中の足底圧、床反力および身体重心の動きの変動性を測定することにより、繰り返し運動の周期性を乱す要因について検討した。

2. 研究の目的

本研究の目的は、小学生女子児童1年生と6年生について、足部形状変化と歩行中の足部アーチ構造の変化を歩行動作中の地面反力との関係から明らかにすることにより、発育発達に伴う歩行時の足部アーチ構造と機能の変化を推察することとした。

3. 研究の方法

1) 被験者

東京都世田谷区の公立小学校に通う小学生女子児童1年生21名、および同6年生24名の合計45名を測定の対象とした。彼らの身体的特徴は表1に示した。なお測定に先立ち、被験者には諸学校のクラス担任を通じて保護者あてに測定の趣旨や目的およびデータのフィードバックに関する内容を配布し、測定の内容を明記したうえ、同意書の提出を求めた。

表1 計測の対象とした小学生女子児童（1年生；21名、6年生；24名）

	1年生		6年生		p-value
	Mean	SD	Mean	SD	
年齢(yrs)	7.3	0.6	12.2	0.4	<.0001
身長(cm)	120.5	4.7	150.6	6.3	<.0001
体重(kg)	23.7	3.6	43.3	7.4	<.0001

2) 足部形状の三次元計測および歩行中のアーチ構造の計測



図1a 歩行動作中の足底圧計測



図1b 立位時の三次元足型計測

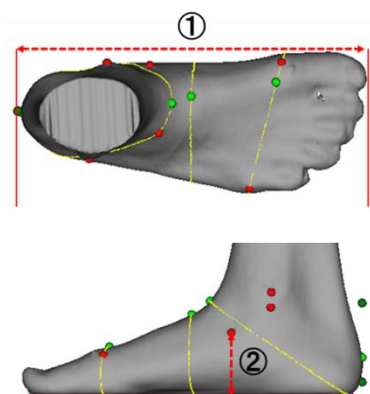


図2 足のランドマーク点

- ①足長
- ②舟状骨点高

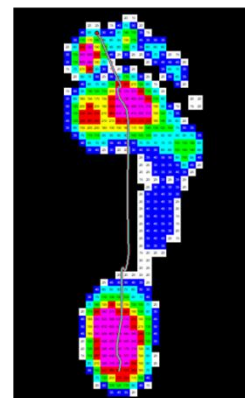


図3 歩行中の足底圧分布

3次元足形状計測装置 (INFOOT, IWare Lab., Japan) を用いて、両脚立ち立位時の足部三次元画像を取得した。足部のランドマークは解剖学ポイントに基づき、舟状骨、第一中足骨頭および踵骨内足部とした。

歩行動作は普段の自分の歩くスピードおよび部動作 (self-speed normal walking) とし、側部から毎秒 240 コマでハイスピードビデオ撮影 (GC-LJ20B, JVC Inc.) を行った。撮影された画像から足部のランドマーク点の二次元座標をデジタル化した (Frame-DIAS V, DHK Inc.)。足部の各ランドマーク点の座標から①アーチ角度、②アーチ高、③アーチ長を算出した。

### 3) 足底機材および妥当性・正確性の検討

本研究は、足底を解剖学計測点から区分を行うために、三次元モーションキャプチャーシステム (VICON MX20, Oxford Metrics Ltd)、フォースプレート (Kistler, 600×900 Switzerland)、足底圧計 (Rs scan international, Belgium) をトリガーシステムを用いて同期する。統合システムの精度を検証するために、VICON のマーカー座標位置、フォースプレート足圧中心 (COP) 位置座標、足圧計の COP 位置座標、3 測定機間の測定誤差を明らかにする。

### 4) 足底区分方法

本研究は、モーションキャプチャーシステムから得られたマーカー座標位置を足底圧計の座標に投射し、足底を解剖学計測点から区分する。足部の解剖学的計測点は M.C. Carson et al., (2001)、足底区分方法は J. Stebbinset et al., (2006) を参考に、足底部位を 5 部位に区分する。ランドマーク位置、区分の例は図 3 に示す。

## 4. 研究成果

### 1) 結果

#### 1) 足部形状の比較

表 2 は、1 年生と 6 年生の足部形状を示す。1 年生から 6 年生では発育に伴い足長は約 39mm、舟状骨点高は 6.2mm それぞれ大きくなり、両者とも有意な差異が認められた。一方両者の比として舟状骨高を足長で正規化した場合、1 年生から 6 年生では有意差は認められなかった。

表 2 1 年生と 6 年生の足部形状の比較

	1 年生 (n=21)		6 年生 (n=24)		p-value
	Mean	SD	Mean	SD	
足長 (mm)	188.0	10.6	227.4	8.4	<.0001
舟状骨点高 (mm)	29.0	6.0	35.2	4.7	<.0001
舟状骨点高/足長	0.15	0.03	0.15	0.02	n.s.

n.s.:no significant, \*:p<0.05, \*\*:p<0.01, \*\*\*:p<0.001

#### 2) 歩行動作の空時間変数の比較

表 3 は、1 年生と 6 年生の歩行中の時空間変数の比較を示した。歩行速度は 1 年生が 1.10m/秒 (66m/分) であったのに対して、6 年生では 1.29m/秒 (77.4m/分) と増加が認められた。この増加は主としてストライド長あるいはステップ長の増加によってもたらされていることが示された。一方、ステップ頻度は 1 年生より 6 年生で少なくなり (2.2 から 2.07 ステップ/秒)、この頻度の低下は立脚時間 (0.54 秒から 0.58 秒) 及びスイング時間 (0.37 秒から 0.39 秒) の延長によってもたらされていることが示された。

表 3 1 年生と 6 年生の歩行中の歩容の比較

	1 年生 (n=21)		6 年生 (n=24)		p-value
	Mean	SD	Mean	SD	
ストライド長 (m)	1.00	0.10	1.25	0.09	<.0001
ストライド時間 (sec)	0.91	0.05	0.97	0.07	<0.01
ステップ頻度	2.20	0.12	2.07	0.14	<0.01
立脚時間 (sec)	0.54	0.04	0.58	0.05	<0.01
速度 (m/s)	1.10	0.14	1.29	0.14	<.0001
ステップ長 (m)	0.50	0.05	0.62	0.04	<.0001
ステップ時間 (ms)	0.46	0.02	0.49	0.03	<0.01

n.s.:no significant, \*:p<0.05, \*\*:p<0.01, \*\*\*:p<0.001

### 3) 歩行動作中の地面反力の比較

図4左は、1年生と6年生における歩行中の足部全体の地面反力の比較を示した。横軸は立脚期を100%として正規化した。絶対値での地面反力を両群で比べると、6年生の方が1年生よりも有意に高い値を示すが、地面反力の対体重値は、立脚期の94~98% (push-off 時) では、6年生が大きな値を示すのに対して、それ以外のスタンス時には両群に差は見られなかった。また、両群ともに地面反力の1つ目のピークは立脚期の20%付近、2つ目のピークは踵が上がる75%付近でみられた。

## — 1年生      - - - 6年生

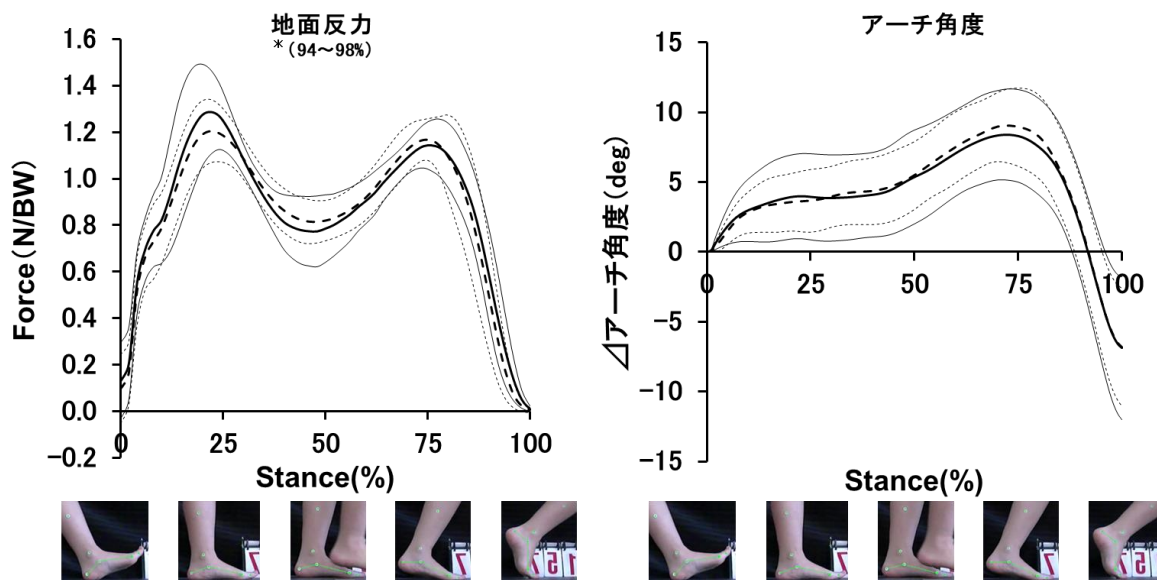


図4 1年生と6年生における歩行中の地面反力鉛直成分およびアーチ角度変化の比較

### 4) 歩行動作中の足部アーチ構造の変化

図4右には歩行時の接地中のアーチ角度の変化を示した。アーチ角度は接地時から増加する傾向を示し、スタンス相の約75%時に最も大きくなる(アーチが広がる)傾向を示し、その後離地時にかけてアーチ角度は急激に小さくなる傾向を示した。アーチ角度の変化量において、1年生と6年生では有意な差はみられなかった。

アーチ高の変化においては、絶対値では接地約75%時に6年生で大きくなる傾向がみられたが、対足長では1,6年生では違いはみられなかった。一方アーチ長においては、絶対値では接地時全般にわたって6年生が大きな値を示し、対足長においても6年生において変化が大きくなる傾向を示した。

### 2) 考察

足部形状のアーチ構造を定量化する試みとしては、様々な静的測定が普及している。その中でBrodyによって最初に報告されたNavicular Drop Test (NDT; 舟状骨陥没テスト)として知られる方法は最も広く使用される試験の一つである。そこでは足部アーチの評価方法として、座位の状態です底をリラックス状態で床に接したときの距骨下関節中立位置で舟状骨点高を求め、次に立位になって時点での同一から高さの低下量を求める手法である。しかしながらこのような立位時の静的な舟状骨高の変化は、歩行のような動的動きの中でのアーチの変化を評価するには限界があることが報告されており、動的動作中のアーチ構造の評価が必要である。足部アーチの動的評価を行った先行研究では、歩行中の最大地面反力時に舟状骨高が低下することが報告されている。本研究ではこのような背景から歩行中のアーチ構造の変化をキネマティクスからとらえると同時に、地面反力も同期計測してアーチ構造の変化との関連性を検討した。小学生女子児童1年生および6年生とも、法動作中の立脚期後期で、地面反力の第2ピーク、アーチ角度の増加およびアーチ高の低下がみられた。本研究結果は歩行中の地面反力のピーク時付近で舟状骨高の下降が最大となるとしたJay M. D. et al. (2009)の方向と一致するところであった。このような構造的変化は、歩行中の立脚初期ではアーチにエネルギーを吸収し、中期にエネルギー貯蓄そして後期にエネルギーを放出するという、推進レバーの役割を果たしていることが推察される (Lauren W. et al., 2018)。

小学校女子児童1年生と6年生の足部形状とアーチ構造の変化を比較したところ、6年生では足長や舟状骨点高は1年生と比較して大きな値を示したが、両者の比である足長当たりの舟状骨点高は、0.15と両者は同地を示した。また歩行動作中の地面反力、アーチ角度、アーチ高

およびアーチ長は明らかに6年生が大きな値を示すにもかかわらず、相対的変量つまり体重あたりの地面反力、足長で正規化したアーチ高およびアーチ長においては、6年生と1年生において違いは見られなかった。このことは、ヒトのアーチ構造は6歳までにほぼ完成するとする知見(Steffen M. et al., 2011)報告されていることからことから、小学校1年生でアーチが形成されていることが示唆された。同様に通常方向動作中の足部アーチ機能の役割もすでに6歳児においては備わっていると示唆することができる。ヒトの基本的移動手段である歩行動作、特に今回扱ったself-paced walkingでは、足部アーチ構造と機能の変化は、接地時のエネルギー吸収およびpush-off時のエネルギー放出という点で効率的に動作が遂行できるよう、すでにその機能を果たしていることが推定される。

歩行動作の発育発達を表3に示した歩行中の時価空間変数の比較からみると、自由歩行の速度は1年生1.10m/秒から6年生は1.29m/秒と約17.3%の増加がみられた。この増加はステップ長(0.50mから0.62mの24%の増加をみるものの、ステップ頻度では2.20s/秒から2.07s/秒へと5.9%の減少を示している。このことは6年生の身長が1年生から24.9%増加していることが、同率のステップ長を増加させていることになる。同様に脚長の増加によるステップ頻度の低下を示すものである。ステップ頻度の低下は、1ストライド中の立脚時間とスイング時間の延長によってもたらされる。6年生では1年生に比べてストライド時間は6.6%の増加(6年生では0.97秒から1年生で0.91秒)、立脚時間は7.4%の増加(6年生では0.58秒から1年生で0.54秒)そしてスイング時間は5.4%の増加(6年生では0.039秒から1年生で0.37秒)を示した。従って発育に伴うステップ頻度の低下は、スイング時間より立脚時間の延長によってもたらされていることが示される。この接地時間の延長は歩行の推進力を得るために立脚期後半の時間延長によるものと推察される。

本研究は、足底圧・床反力の変化と動作を同時に分析するシステムを構築することで、足底圧分布の時間的な変化と動作の変動の因果関係を検討することができると考えた。特に幼児や加齢あるいは臨床的観点から、歩・走行動作の不安定性について評価し、かつ改善のためには足底圧分布の変容を意識する介入研究に発展できると考えている。このような観点から本研究は、バイオメカニクス研究のみならず、医療、リハビリ、スポーツ分野へと様々な分野への応用することができると考えられる。「足裏感覚=スキル(技術)」と考えて、足底部位での荷重を選択的に変化させることによって、安定した動作やスポーツパフォーマンスからみて合目的な動きづくりへと改善されることに貢献できると考えている。このような発想から本研究の着想に至った。人間の基本的な動作である「歩行」は殆どが無意識的に遂行される運動であるが、ステップサイクル毎の時間的、空間的パラメーターを測ってみると、一定スピードであっても変動していることが、これまで多くの研究で報告されている。また近年では、発育発達に伴って幼児期や高齢者ではステップサイクルの周期性が乱れ、転倒を引き起こしやすい要因を作っていることが指摘されている。

一方スポーツ現場のコーチ、指導者は、選手へのコーチング、アドバイス、技術(スキル)指導を行う際に、「足裏の感覚」などを表現として用い、指導を行うことがある。スポーツなどにおける再現性の高い動作を習得するためには、“いつ”“どこで”“どのくらい”の調整を行うかという足底圧のステレオタイプ化が要因となっていることが考えられる。このような選手の感覚をフィードバックして、指導に活かす試みは殆どなされていないのが現状と言える。幼少期や加齢に伴う不安定歩行の改善に向けて、歩く動作の技術(スキル)分析から足底の感覚を定量化することによって足底圧の有効なフィードバックを行うことによって、安定した動作への改善につながるのではないかと考えてきた。そのために正常および異常歩行動作中の足底圧・荷重分布、床反力及び身体重心を中心とするキネマティクス変数を捉えることによって、不安定な動作を招来する力の原因(kinetic cause)を探ることを、将来の課題として考えている。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 5 件)

- ① 相馬満利、柏木 悠、船渡和男：体のかたちの定量化へ向けた相同モデルの可能性。「Kinanthropometry—スポーツ選手の形態計測再考—」, バイオメカニクス研究 23(1) : 45-51, 2019.
- ② 船渡和男, 柏木悠, 山岸道央, 平野智也, 相馬満利, 若槻遼 : 3次元相同モデルを用いた子どもの足部形状の横断的变化。日本教育シューズ助成研究成果報告書, 2018.
- ③ 山崎由紀奈, 柏木 悠, 山岸道央, 船渡和男 : ハムストリングスの筋長変化に伴う膝関節屈曲最大トルク及び筋放電量の変化。体育測定評価研究 18:47-58, 2018.

[学会発表](計 22 件)

- ① 木内聖, 平野智也, 相馬満利, 藤戸靖則, 野澤巧, 榎屋剛, 尹鉉喆, 柏木悠, 船渡和男 : 小学校児童における歩行中の足部アーチ構造の変化と地面反力の関係. 第10回東京体育学会, 2019, 3. (東京大学)
- ② 野澤巧, 平野智也, 藤戸靖則, 木内聖, 相馬満利, 柏木悠, 船渡和男 : 小学校児童における過体重が立位および歩行時の足部形状に及ぼす影響. 第10回東京体育学会, 2019, 3. (東京大学)

- ③ Soma M, Kashiwagi Y, Fujimori T, Wakatsuki R, Funato K : Characteristics of 3-D foot shape in Japanese swimmers by using homologous body model. European College of Sport Science, 2018 July (Dublin, Ireland)
- ④ Mari Soma., Yu Kashiwagi., Hakamada N., Kazuo Funato. : Characteristics of 3-D human body shape in Japanese swimmers by using homologous body model. The 26th Congress of the International Society of Biomechanics, 2017 July (Brisbane, Austria)
- ⑤ 若槻遼, 相馬満利, 柏木悠, 船渡和男 : 異なる荷重条件における足部の 3 次元足形状の違い. 日本体育学会第 68 回大会, 2017, 8. (静岡大学)
- ⑥ 相馬満利, 柏木悠, 袴田智子, 船渡和男 : ジュニア男子器械体操選手における人体形状相同モデルを用いた形態的特徴. 第 30 回身体動作学研究会, 2016, 8. (関西学院大学)
- ⑦ 平野智也, 柏木悠, 小林哲郎, 袴田智子, 船渡和男 : 異なる速度での歩行および走行動作における円滑性と経済性との関係. 日本体育学会第 67 回大会, 2016, 8. (大阪体育大学)

[図書] (計 5 件)

- ① 船渡和男 : 短時間運動が発生させる疲労、格闘技の身体運動量：柔道、疲労と身体運動、宮下充正編著, pp146-151, (株)杏林書院, 2018.
- ② 船渡和男 : 運動器のしくみと働き, 公認スポーツ指導者養成テキスト 共通科目 III, 第 4 章 身体のしくみと働き, pp72-87, (財) 日本体育協会編集, 第 17 刷, 2018.

[その他]

- ① 船渡和男 : 「足育の重要性を学ぼう ―計測データで知る、子供たちの足の現状―」, 東京都世田谷区立東深沢小学校家庭教育学級, 2018. 9. 28.
- ② 船渡和男 (実施代表者) : (独) 日本学術振興会, 2017 ひらめき☆ときめきサイエンス～ようこそ大学の研究室へ～KAKENHI「スポーツを科学的にとらえてみよう～スポーツバイオメカニクスへの招待～」, 日本体育大学, 2017. 12. 23

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名 :

ローマ字氏名 :

所属研究機関名 :

部局名 :

職名 :

研究者番号 (8 桁) :

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名 : 袴田 智子

ローマ字氏名 : HAKAMADA Noriko

研究協力者氏名 : 柏木 悠

ローマ字氏名 : KASHIWAGI Yu

※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、研究者個人に帰属されます。