

原 著

## 糖尿病患者の足底圧の再現と 歩行様式別の歩行指導の検討

吉田耕治<sup>\*1,2</sup> 國安勝司<sup>\*3</sup> 松本晋輔<sup>\*4</sup>

### 要 約

糖尿病患者では、足関節背屈可動域制限と関連した歩行時最大足底圧の異常から生じる足潰瘍が下肢切断原因の1つとなる。本研究では、糖尿病患者に類似した足底圧の再現と歩行指導によって足底圧が軽減するか検討を行った。22名の健常成人に対して、通常の歩行と独自に作成した短下肢装具を用いた歩行を実施した。4種類の歩行指導を行い、歩行時足底圧の変化を検討した。糖尿病患者に類似した足底圧が再現可能であった。歩行指導の結果、前足部外側の足底圧上昇に対して、蹴り出しを抑えた歩行とそろえ型歩行において有意に足底圧が軽減した。歩行時足底圧の上昇に関して、歩行指導は有効であることが示された。

### 1. 緒言

糖尿病とはインスリンの作用不足による高血糖を主徴とする代謝異常であり、特有の合併症を引き起こす最も日常的な慢性疾患といわれている<sup>1)</sup>。世界中のどこかで、糖尿病による慢性合併症の影響により、30秒に1つの下肢が切断されていると報告され、糖尿病における足潰瘍が下肢切断の原因となるといわれている<sup>2)</sup>。足潰瘍のリスク因子として、歩行時の足底圧異常が挙げられている<sup>3)</sup>。さらに、足底圧異常が生じる要因として糖尿病患者における足関節の背屈可動域制限が関連しているといわれている<sup>4)</sup>。糖尿病足病患者における足潰瘍は、足背にも生じるが足底潰瘍が全体の50%以上を占めると報告されている<sup>5)</sup>。足底潰瘍の好発部位としては、母趾・1.5中足骨部・中足部・踵部の足底面といわれている<sup>6)</sup>。糖尿病患者の下肢切断の予防を考える上で歩行時足底圧の異常は、考慮すべき重要な項目である。先述したように、糖尿病足病患者と下肢切断には深い関係性がある。そして、下肢切断を予防するためには、糖尿病足潰瘍に非常に関係性の深い、歩行時の異常な足底圧を是正する必要がある。しかし、具体的な

歩行指導の方法は不明確な現状である。

そこで、本研究では歩行時の足底圧を軽減させる歩行指導の方法を確立することを目的とした。このため、独自に作成した短下肢装具により糖尿病患者に類似した足関節背屈可動域制限と歩行時の足底圧が再現可能か検討した。その後4種類の歩行指導を実践し、足底圧軽減効果を検証した。この歩行指導方法が確立することにより、下肢切断率の軽減・糖尿病患者の Quality of life の向上に貢献することが可能となると考える。

### 2. 方法

#### 2.1 対象者

対象は健常成人男性22名とした。全例糖尿病、脂質異常症など代謝疾患や腰部・下肢の整形外科的既往のないことを確認した。また、足底の知覚異常、槌趾、鷲趾等の足部変形や著明な筋萎縮も認められなかった。平均年齢は27.1歳±3.8歳であった。対象肢はすべて右下肢とした。本研究は川崎医療福祉大学倫理委員会での承認を得て実施した（承認番号16-057）。

\*1 川崎医科大学附属病院 リハビリテーションセンター

\*2 神戸大学大学院 リハビリテーション科学領域

\*3 川崎医療福祉大学 リハビリテーション学部

\*4 専門学校川崎リハビリテーション学院 理学療法学科

（連絡先）吉田耕治 〒701-0192 倉敷市松島577 川崎医科大学附属病院

E-mail : pt.yoshida@hp.kawasaki-m.ac.jp

## 2.2 方法

### 2.2.1 評価項目

全対象者の年齢、身長、体重、BMI、歩行時足底圧の最大値を評価した（表1）。

表1 対象者の属性

n=22	
年齢（歳）	27.1±3.8
身長（cm）	171.5±5.9
体重（kg）	66.8±7.9
BMI(kg/m <sup>2</sup> )	22.7±2.1
mean ± SD	

### 2.2.2 評価の実施方法

足底圧の測定には、足底圧分布計測装置 footscan®（RS scan 社製）を用い歩行時最大足底圧を比較した。サンプリング周波数は300Hzとした。プレート寸法は578mm×418mm×12mm、センサ数4096個、2センサ/cm<sup>2</sup>、計測圧範囲は1~127N/cm<sup>2</sup>。足底圧は図のように足部を10区画に分けて計測を行った（図1）。

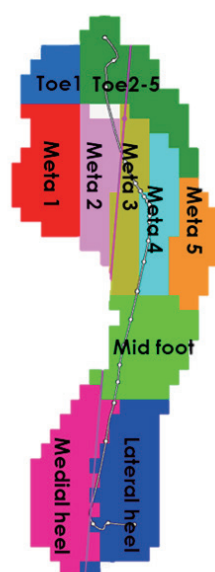


図1 足底の区画割り

足底を10区画に分けて計測

計測環境に関しては、先行研究<sup>7)</sup>を参考に足底圧分布計測装置のプレート表面を、歩行路と同じ高さになるように、厚みのある板を使用し全長4mの歩行路を作製した。歩行時は一点を注視して、視線の位置を一定となるように設定した（図2）。



図2 計測環境

歩行時は前方の目印を注視

糖尿病患者に類似した足関節背屈制限を設ける際に使用する短下肢装具は義肢装具士により作製された。仕様は両側金属支柱付きで、足関節背屈角度調整を可能とするために足継ぎ手はダブルクレンザックとし、装具の重量は1kgであった（図3a）。装具の足底は足底圧計測に干渉しないように、足底を覆わない仕様とした（図3b）。装具のサイズは3サイズ用意し、さらに装具の内張りにて各被検者の形態に応じてサイズを調整し、可能な限りフィッティングを高めた。歩行時の足関節背屈制限は、先行研究<sup>8)</sup>をもとに立位で設定した。足関節背屈角度は5°とした（図4）。

研究の第一段階として、糖尿病患者を想定した歩行時足底圧を再現可能か検証するために歩行の条件は①裸足での自由歩行と②足関節背屈制限装具（背屈5°）を使用した自由歩行（以下、背屈制限歩行）の比較とした。第二段階として、歩行指導の方法として先行研究で用いられている、蹴り出しを抑えた歩行<sup>9)</sup>とそろえ型歩行<sup>10)</sup>と低速歩行<sup>11)</sup>を加え、歩行様式による歩行時足底圧の変化を検証するために①背屈制限歩行、②蹴り出しを抑えた歩行、③そろえ型歩行、④低速歩行の4条件で歩行時足底圧を計測した。足底圧分布計測装置にて足底圧を計測する際は、Bus & Lange<sup>12)</sup>らの報告を基に3-step protocolを用いた。3-step protocolとはスタート位置より、3歩目で足底圧分布計測装置のプレートを踏む方法である。各歩行条件下にてそれぞれ4回歩行を行った。

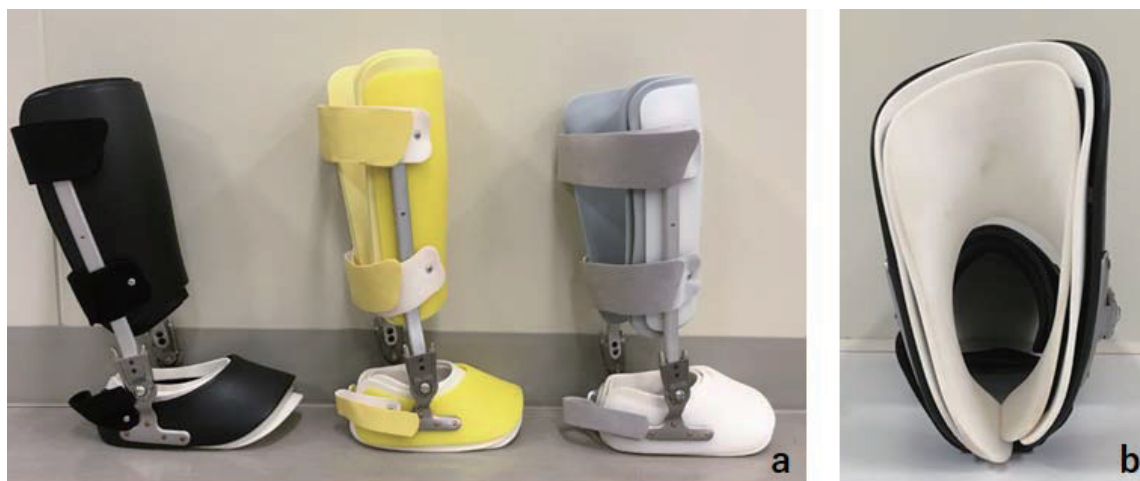


図3 短下肢装具

a：異なる3サイズの装具

b：装具足底は計測に影響を与えないために足底を覆わないように作製



図4 短下肢装具の背屈角度調整方法

### 3. 結果

#### 3.1 歩行時最大足底圧の違い

歩行時最大足底圧は裸足歩行にて4趾中足骨部(以下, Meta4)は $9.0 \pm 2.1 \text{ N/cm}^2$ , 5趾中足骨部(以下, Meta5)は $5.0 \pm 1.9 \text{ N/cm}^2$ であった。背屈制限歩行では Meta4は $11.9 \pm 4.0 \text{ N/cm}^2$ , Meta5は $7.3 \pm 2.1 \text{ N/cm}^2$ と背屈制限歩行にて最大足底圧が有意に上昇した。

また、足趾領域では裸足歩行にて第1趾(以下, Toe1)は $6.3 \pm 2.3 \text{ N/cm}^2$ , 第2-5趾(以下, Toe2-5)は $2.0 \pm 1.2 \text{ N/cm}^2$ , 背屈制限歩行にて Toe1は $3.5 \pm 1.8 \text{ N/cm}^2$ , Toe2-5は $3.5 \pm 1.2 \text{ N/cm}^2$ と裸足歩行にて歩行時最大足底圧が有意に上昇する結果となった(表2)。その他の部位に関しては、統計学的に有意な差は認められなかった。

#### 2.2.3 統計学的解析

統計学的解析には IBM 社製 SPSS Statistics Ver.24 を用いた。各歩行条件における歩行時最大足底圧の4回の平均値を解析に用いた。Shapiro-Wilk 検定で正規性の検定を行った後、ウィルコクソンの符号順位検定を行い裸足での歩行と背屈制限歩行の歩行時最大足底圧の比較を行った。有意水準は5%未満とした。次に、裸足歩行と背屈制限歩行で、糖尿病足病変患者に類似した足底圧が再現可能であった足底の部位に関して、Bonferroni 法による多重比較法にて背屈制限歩行、そろえ型歩行、蹴り出しを抑制した歩行、低速での歩行における歩行時最大足底圧を比較した。有意水準は5%未満とした。

表2 裸足歩行と背屈制限歩行時の歩行時最大足底圧の比較

	歩行時最大足底圧 (N/cm <sup>2</sup> )		
	裸足	背屈5度制限	p値
Toe1	$6.3 \pm 2.3$	$3.5 \pm 1.8$	$p < 0.05$
Toe2-5	$2.0 \pm 1.2$	$3.5 \pm 1.2$	$p < 0.05$
Meta1	$7.5 \pm 2.4$	$8.4 \pm 3.2$	N.S.
Meta2	$12.9 \pm 2.2$	$12.4 \pm 3.0$	N.S.
Meta3	$12.5 \pm 2.6$	$12.2 \pm 3.0$	N.S.
Meta4	$9.0 \pm 2.1$	$11.9 \pm 4.0$	$p < 0.05$
Meta5	$5.0 \pm 1.9$	$7.3 \pm 2.1$	$p < 0.05$
Midfoot	$4.1 \pm 1.7$	$4.1 \pm 1.6$	N.S.
Heel Medial	$14.2 \pm 1.9$	$12.9 \pm 1.8$	N.S.
Heel Lateral	$12.4 \pm 2.6$	$12.5 \pm 2.7$	N.S.

mean  $\pm$  SD

ウィルコクソンの符号付順位検定



表3 歩行様式別の歩行時最大足底圧の比較

歩行時最大足底圧 (N/cm <sup>2</sup> )				
	足背屈5度制限	けり出し抑制	そろえ型	低速
Meta4	12.0 ± 4.0	10.0 ± 3.4	8.7 ± 2.7	10.9 ± 3.4
Meta5	7.3 ± 2.0	6.0 ± 2.2	5.9 ± 2.1	7.3 ± 2.7
mean ± SD				*P<0.05
多重比較 (Bonferroni法)				

### 3.2 歩行様式別の歩行時最大足底圧の違い

次に、糖尿病患者の足底圧を再現可能であった Meta4, Meta5において、①背屈制限歩行、②蹴り出しを抑えた歩行、③そろえ型歩行、④低速歩行での歩行を比較した。その結果を表3に示す。Meta4領域においては背屈制限歩行と比較し、けり出しを抑えた歩行とそろえ型歩行が、Meta5領域においてはそろえ型歩行が歩行時最大足底圧を有意に低下させる結果となった。

### 4. 考察

本研究では健常成人に対して、短下肢装具を用いて糖尿病患者に類似した足底圧を再現し、糖尿病患者の歩行時最大足底圧を軽減するための歩行様式の検討を行った。その結果、短下肢装具を用いて糖尿病患者に類似した足底圧を再現する検討においては、裸足歩行に比べ、足関節背屈制限が生じると、前足部外側にあたる Meta4・5において歩行時最大足底圧が有意に上昇する結果となった。足底潰瘍の好発部位としては、1-5中足骨部の底面と報告されている<sup>6)</sup>。本研究においても、前足部外側に相当する Meta4・5において歩行時最大足底圧が有意に上昇する結果となった。これは歩行時の足関節機能と関連があると考えられる。足関節は歩行時の荷重応答期から立脚後期にかけて、足圧中心の移動により足関節の背屈が生じる。この際、足底と床との接触面は荷重応答期～立脚後期にかけて踵～母趾へと変化していく<sup>13)</sup>。この時、足関節に背屈制限が生じると、足圧中心の前方への移動が阻害され、受動的な足関節背屈が生じず床との接触面積も母趾へ移動しない。本研究における足関節背屈制限では、この足関節機能の制限により、足圧中心が Meta4・5領域に存在している間に前足部外側で荷重をしながら地面を蹴り、立脚後期に至った。このため、前足部外側にあたる Meta4・Meta5領域において最大足底圧が上昇したと考える。また、足趾領域にあたる Toe1, Toe2-5においては背屈制限歩行に比べ、裸足歩行の方が有意に足底圧を上昇させる結果となった。これは、足関節背屈5度制限により、足圧中心

が足趾まで移動する前に遊脚相に移行したことを裏付けていると考える。以上より、本研究において健常者成人に足関節背屈制限を設けることによって、糖尿病患者に類似した前足部における歩行時最大足底圧の上昇を再現することが可能であった。

次に、糖尿病患者に類似した歩行時最大足底圧を再現することが出来た Meta4・Meta5領域に対して歩行様式別に歩行時最大足底圧の比較を行った。その結果 Meta4領域においては足関節背屈制限歩行と比較し、けり出しを抑えた歩行とそろえ型歩行が、Meta5領域においては、そろえ型歩行が歩行時最大足底圧を有意に低下させる結果となった。

Meta 4領域において、けり出しを抑えた歩行が、背屈制限歩行と比較し歩行時最大足底圧が低下したのは、立脚相後期に下腿三頭筋による足関節底屈運動よりも、股関節の屈曲筋力による下肢の振り出しを用いたためだと考える<sup>9)</sup>。結果的に下腿三頭筋によるプッシュオフ時の前足部の床を蹴り出す力が軽減したために歩行時足底圧が低下したと考える。

Meta 4・5領域においてそろえ型歩行により歩行時最大足底圧が軽減した理由は足関節背屈制限歩行と比較し、そろえ型歩行時に立脚を通して足底の全面が接地していることが考えられる。また、筋電図を用いた先行研究<sup>10)</sup>では、立脚相後期に足関節を底屈する下腿三頭筋の筋活動よりも股関節屈曲筋の活動が高いと報告されている。よって、前足部で床を蹴りだす力が軽減したために歩行時足底圧が低下したと考える。

### 5. 結語

Meta4・Meta5領域の歩行時足底圧の軽減にはけり出しを抑えた歩行と、そろえ型歩行が有効であった。よって、糖尿病足病変患者に対する歩行時最大足底圧の軽減方法の一手段として有用であることが示された。今回は一側の足関節背屈制限のみとしたため、今後は両側の足関節背屈制限を設けて、より糖尿病患者に類似した状況での歩行指導の方法を検討していく必要がある。

## 謝 辞

本研究の実施にあたりご指導を頂きました菅野稔先生、岡田裕先生に感謝申し上げます。また、研究実施にあたりご協力を頂きました川崎医科大学附属病院リハビリテーションセンターのスタッフの皆さまに感謝申し上げます。

## 文 献

- 1) 庄嶋伸浩, 門脇孝: 人類の進化と糖尿病. 大平雅美, 石黒友康, 野村卓生編, 糖尿病の理学療法, メジカルビュー社, 東京, 2-20, 2015.
- 2) Boulton AJ, Vileikyte L, Ragnarson-Tennvall G and Apelqvist J: The global burden of diabetic foot disease. *Lancet*, **366**(12), 1719-1724, 2005.
- 3) 日本糖尿病学会編著: 糖尿病診療ガイドライン2016. 南江堂, 東京, 2016.
- 4) Searle A, Spink MJ, Ho A and Chuter VH: Association between ankle equinus and plantar pressures in people with diabetes: A systematic review and meta-analysis. *Clinical Biomechanics*, **43**, 8-14, 2017.
- 5) Prompers L, Huijberts M, Apelqvist J, Jude E, Piaggese A, Bakker K, Edmonds M, Holstein P, Jirkovska A, Mauricio D, Ragnarson Tennvall G, Reike H, Spraul M, Uccioli L, Urbancic V, Van Acker K, van Baal J, van Merode F and Schaper N: High prevalence of ischemia, infection and serious comorbidity in patients with diabetic foot disease in Europe: Baseline results from the Eurodiale study. *Diabetologia*, **50**, 18-25, 2007.
- 6) International working group on the diabetic foot (IWGDF): *Guidance 2015*.  
<http://iwgdf.org/guidelines/summary-guidance-for-the-daily-practice-2015>, 2015. (2019.2.25 確認)
- 7) Oliver Ludwig 著, 月城慶一, ハーゲン愛美訳: 実践に活かす歩行分析—明日から使える観察・計測のポイント—. 医学書院, 東京, 2016.
- 8) 河辺信秀, 廣瀬典子: 健常者における足関節背屈制限が歩行時足底圧へ与える影響—糖尿病足病変の危険因子に関する検討—. 糖尿病, **51**, 879-856, 2008.
- 9) Mueller MJ, Sinacore DR, Hoogstrate S and Daly L: Hip and ankle walking strategies: Effect on peak plantar pressures and implications for neuropathic ulceration. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, **75**, 1196-1200, 1994.
- 10) Brown E and Muller J: A step to gait decrease pressures on the forefoot. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, **28**(3), 139-145, 1998.
- 11) Burnfield M, Few D, Mohamed O and Perry J: The influence of walking speed and footwear on plantar pressures in older adults. *Clinical biomechanics*, **19**, 78-84, 2004.
- 12) Bus SA and Lange A De: A comparison of the 1-step, 2-step, and 3-step protocols for obtaining barefoot plantar pressure data in the diabetic neuropathic foot. *Clinical Biomechanics*, **20**(9), 892-899, 2005.
- 13) Barnet CH and Camb MB: The phases of human gait. *Lancet*, **82**(9), 617-621, 1956.

(令和元年6月4日受理)

## Effects of Gait Training Strategies on Simulated Plantar Pressure of Diabetic Foot

Koji YOSHIDA, Katsushi KUNIYASU and Shinsuke MATSUMOTO

(Accepted Jun. 4, 2019)

**Key words :** plantar pressure, amputation, diabetic foot, ulcer, gait training

### Abstract

The purpose of this study was to reproduce the limited ankle dorsiflexion range of motion (ROM) and plantar pressure during gait similar to diabetic patients by wearing a customized ankle foot orthosis (AFO) and to investigate the effects of gait training strategies on plantar pressure. Twenty-two healthy adults performed gait with and without wearing the AFO restricting ankle dorsiflexion ROM. Four types of gait pattern were performed in the condition of wearing the AFO. Plantar pressure similar to diabetic foot was reproduced. 'Hip and ankle' walking strategy and 'Step to gait' walking strategy significantly reduced forefoot pressure.

Correspondence to : Koji YOSHIDA

Department of Rehabilitation Center

Kawasaki Medical School Hospital

Kurashiki, 701-0192, Japan

E-mail : [pt.yoshida@hp.kawasaki-m.ac.jp](mailto:pt.yoshida@hp.kawasaki-m.ac.jp)

(Kawasaki Medical Welfare Journal Vol.29, No.1, 2019 75–80)