

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 18 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420080

研究課題名(和文) トライボロジー及びバイオメカニクス解析に基づくすべり転倒抑制フットウェアの開発

研究課題名(英文) Development of footwear for preventing falls due to induced slip based on tribology and biomechanics analysis

研究代表者

山口 健 (Yamaguchi, Takeshi)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：50332515

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、方向転換中にすべりが生じても姿勢回復を容易とし、転倒抑制に効果的なフットウェアの開発を行った。具体的には、健康若年成人を対象として、潤滑剤を塗布した歩行路での方向転換実験を行い、靴の幅(支持基底幅)を側方外側に15mm以上拡大することにより、通常の靴に比べ転倒発生率を50%以上も低減できることを明らかにした。これは、支持基底幅の拡大により、転倒回避のための補償ステップ距離が短くできるためである。以上のことから、支持基底幅の拡大が方向転換中の側方へのすべりによる転倒抑制に有効であることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In this study, we developed footwear that is effective in preventing falls due to induced slip in the lateral direction during turning. Turning gait trial on a slippery floor was conducted with healthy young adult participants wearing normal footwear and BOS (base of support) widened footwear. The results indicated that the BOS widened footwear, in which the BOS was widened more than 15 mm in the lateral direction, reduced the frequency of fall by more than 50% compared with the normal footwear. The kinematic analysis revealed that the BOS widened footwear shortened a length of compensatory stepping to prevent falling after slipping, which resulted in the reduced frequency of fall.

研究分野：トライボロジー

キーワード：転倒 トライボロジー バイオメカニクス 靴 すべり 歩行分析

1. 研究開始当初の背景

わが国の屋内外の転倒事故による死亡者数は年々増加しており、2010年には5,538名に上る。これは交通事故死亡者数(4,863名)を上回る数字であり、社会的に大きな問題となっている。特に高齢者の屋内外での転倒事故は、高齢社会に突入した日本において極めて深刻な問題となっており、その対策が急務の課題となっている。起立、着座、方向転換時などの体位変化時に、すべりやつまずき、よるめきなどをきっかけとして生じる側方への転倒は、大腿骨頸部骨折や股関節部骨折などを引き起こし、高齢者の寝たきりの原因となることが知られている。

研究代表者は、すべりを生じずに歩行するために必要な靴底と床面間の静摩擦係数の値を歩行実験に基づいて明らかにしている。さらに硬質多孔性の炭素粒子を用いて水で濡れた面に対して高摩擦を示すゴム系複合材料を開発し、耐滑靴底材料として実用化に成功している。しかし油で濡れた床面や氷面など、摩擦係数が極めて低い床面ではすべりが生じる可能性が高く、たとえすべりが生じても姿勢制御を容易とし、転倒抑制が可能なフットウェアの開発が望まれている。

立位時に姿勢安定を保つためには、身体質量中心 (COM: center of mass) が足の外縁で囲まれる支持基底 (BOS: base-of-support) 上に位置していることが必要となる。すべりなどの外乱により COM が BOS 外にはずれた場合には、補償ステップ等を行うことで、BOS の位置、サイズを調整し、COM を BOS 上に再度捕獲することにより、バランスを保つ必要がある。高齢者はこの補償ステップを行う能力が低下しており、特に、複雑な側方への補償ステップを行うための(足を交差するような)脚の動きは、高齢者にとって困難を伴うことが多い。方向転換時などに側方へすべりが生じた場合、支持足のすべり距離、すべり速度の増加に伴い COM が BOS 外に移動し、COM と床反力の作用点である圧力中心点 COP (center of pressure) の側方距離の増加とともに転倒モーメントが増加すること、そして、最終的には補償ステップをつくることが困難となり、転倒に至ると考えられる。ここで、あらかじめ側方へ BOS をわずかに拡大させることで、側方へすべりが生じても COM が BOS 内に捕獲されやすく、たとえ COM が BOS の外にはずれたとしても、図1に示されるように COM と COP の距離を小さくできるため、COM に働く転倒方向のモーメントを小さくできると考えられる。その結果、補償ステップなどによる姿勢回復が容易になり、側方バランスを向上させることが可能と考えられる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、前述のトライボロジー及びバイオメカニクス解析によるすべり転倒メカニズムに基づいて、すべりが生じても姿

勢回復を容易とし、側方へのすべり転倒抑制効果を有するフットウェアを開発することである。

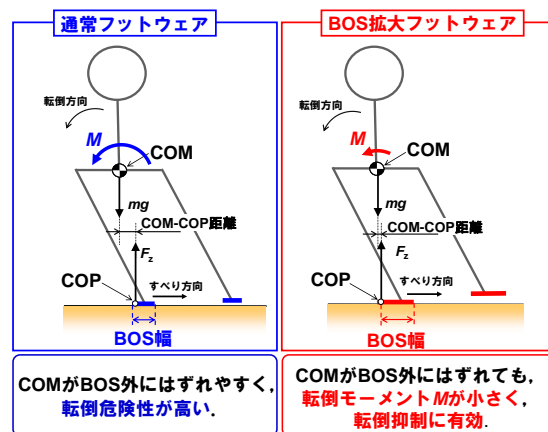


図1 BOS 幅の拡大により期待される転倒抑制効果のメカニズム

3. 研究の方法

(1) 歩行実験

本研究では、オーバーシューに発泡スチロール製の BOS 幅拡大部を接着し、その上から靴を履かせる(図2)ことで、BOS 拡大幅の異なる2種類の BOS 幅拡大フットウェアを作製した。BOS 幅の拡大量はそれぞれ側方内側に 10mm, 20mm (Wide-A), 側方外側に 15mm, 30mm (Wide-B) である。

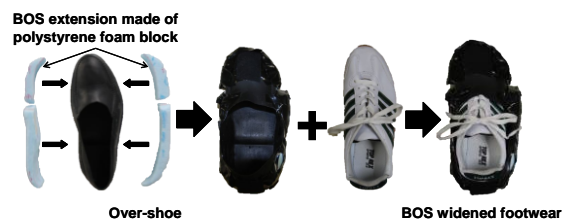


図2 BOS 幅拡大フットウェア

本研究の実験には、健常若年男性 32 名 (21.8±1.6yrs, 172.3±5.2cm, 64.0±6.9kg) が参加した。

実験は三次元動作解析装置を用い、被験者に取り付けられた赤外線反射マーカの各時刻における三次元位置座標を検出した。また、フォースプレートにより、靴底に作用する床反力の3軸方向成分及び床反力の作用点である圧力中心点 COP を計測した。

実験は通常のフットウェア及び BOS 幅拡大フットウェアの計3種類のフットウェアについて行われた。被験者には、直線歩行後プラスチックシートで液体洗剤を挟み込んだシート上での、左足及び右足を軸足とした右側 60°の方向への「方向転換」(図3)を行なうよう指示した。方向転換実験は、安全性を考慮して、被験者にハーネスを装着して行った。また、各フットウェアのつま先、かかと部に取り付けた赤外線反射マーカの位置座標から歩行速度、歩幅、歩隔を計測した。転倒発生の有無は、ハーネスに取り付けたロ

ードセルに加わる荷重に基づいて判定した。得られたデータの差の検定には、有意水準5%のもとで繰返しのある一元配置分散分析を用いた。

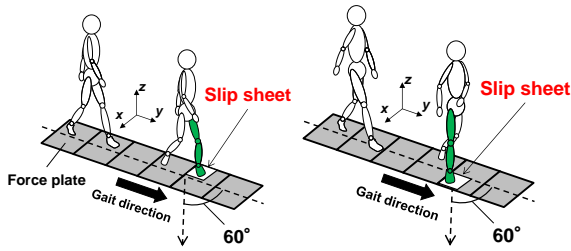


図3 方向転換実験の概略図

(2) 運動力学解析

(1)の実験によって得られた床反力データ、身体マーカーデータに基づいて、図4に示される倒立振りモデルに基づき、すべり期間における足セグメントの回転角度、補償ステップ距離の推定を行った。

図4(a)において、床面に対する足セグメントの側方への回転角度 θ_d は以下の式で表される。

$$\theta_d = \cos^{-1} \left(\frac{z_{\text{foot}}}{\sqrt{(x_{\text{foot}})^2 + (y_{\text{foot}})^2 + (z_{\text{foot}})^2}} \right) \quad (1)$$

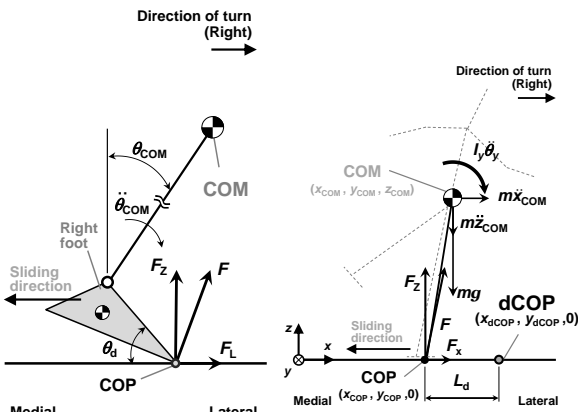
また、COMに作用する角加速度 $\ddot{\theta}_{\text{COM}}$ は以下の式で与えられる。

$$\ddot{\theta}_{\text{COM}} = \frac{d^2 \theta_{\text{COM}}}{dt^2} \quad (2)$$

図4(b)において、目標COPをdCOP(x_{dCOP} , y_{dCOP} , 0)とすると、歩行中のCOMに作用するモーメントの釣り合いから、COMに作用するモーメントがゼロとなるCOPとして、以下の式で算出される。

$$x_{\text{dCOP}} = x_{\text{COM}} - \frac{F_x}{F_z} z_{\text{COM}} \quad (3)$$

$$y_{\text{dCOP}} = y_{\text{COM}} - \frac{F_y}{F_z} z_{\text{COM}} \quad (4)$$



(a) 足セグメントの回転角度

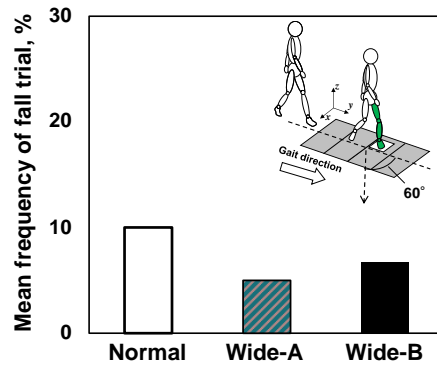
(b) 目標 COP

図4 解析モデル

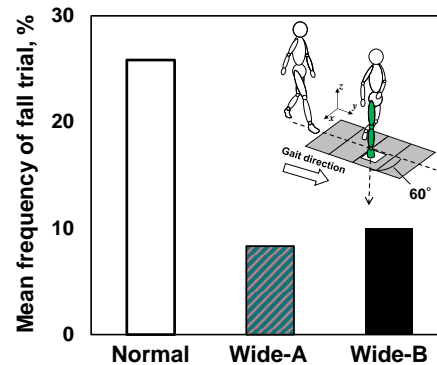
4. 研究成果

(1) 側方へのすべり転倒抑制に効果的な好適 BOS 拡大量の解明

本研究で行なった右への方向転換動作において、すべりが生じたとき、左足を軸足とした場合には側方内側の BOS 拡大部が、右足を軸足とした場合には側方外側の BOS 拡大部が転倒抑制効果を示すと考えられる。図5(a), (b)に左足、右足をそれぞれ軸足とした場合の方向転換時の転倒発生率を示す。図5(a)より、左足を軸足とした場合、内側に BOS 幅を拡大することにより転倒発生率がわずかに減少する傾向を示すが、転倒発生率の平均値にはフットウェア間に統計的に有意な差はみられなかった($p > 0.05$)。一方、図5(b)より、右足を軸足とした場合、側方外側に BOS 幅を拡大することにより転倒発生率を大幅に低減できる($p < 0.05$)。特に、側方外側に BOS 幅を 15mm 拡大することにより、通常フットウェアと比較して転倒発生率をおよそ 68% 低減できる($p < 0.05$)。



(a) 左足を軸足とした場合



(b) 右足を軸足とした場合

図5 転倒発生率

(2) BOS 拡大フットウェアによるすべり転倒抑制メカニズム

図6に、すべり期間の床面に対する足セグメントの側方方向の最大回転角度 $\theta_{d,max}$ の平均値を示す。同図より、BOS 拡大フットウェアにおける $\theta_{d,max}$ ($35.3^\circ \pm 15.6^\circ$)は、Normal フットウェアにおける $\theta_{d,max}$ ($44.4^\circ \pm 24.0^\circ$)に比べ、12.2%小さいことが分かった。図7に、すべり期間のCOMに作用する角加速度 $\ddot{\theta}_{\text{COM}}$

の平均値を示す. 同図より, BOS 拡大フットウェアにおける $\dot{\theta}_{COM}$ ($305.6^\circ/s^2 \pm 287.4^\circ/s^2$) は, Normal フットウェアにおける $\dot{\theta}_{COM}$ ($498.0^\circ/s^2 \pm 440.5^\circ/s^2$) に比べ, 38.6%小さいことが分かった. 以上より, BOS 拡大フットウェア着用により, 側方へのすべりが発生した後に, 足セグメントの回転が抑制され, その結果, COM に作用する角加速度が低減されることが分かる.

図8に, すべり期間の目標 COP と COP の最大距離 $L_{d,max}$ の平均値を示す. 同図より, BOS 拡大フットウェアにおける $L_{d,max}$ ($0.28 \text{ m} \pm 0.12 \text{ m}$) は, Normal フットウェアにおける $L_{d,max}$ ($0.39 \text{ m} \pm 0.17 \text{ m}$) に比べ, 26.9%短くなっており, 転倒回避のための補償ステップ距離が短くてすむことが分かる.

図9に, $\theta_{d,max}$ と $L_{d,max}$ の関係を示す. 同図より, BOS 拡大フットウェア着用により, すべりが生じて, 足の回転が抑制され, その結果, 補償ステップ距離を低減させることができる. また, 方向転換時にすべりが生じたときに, $\theta_{d,max}$ が 45° 以下に留めることができれば転倒回避することができ, $\theta_{d,max}$ が 45° より大きい場合でも, 補償ステップ距離が短い場合は転倒を回避することができる.

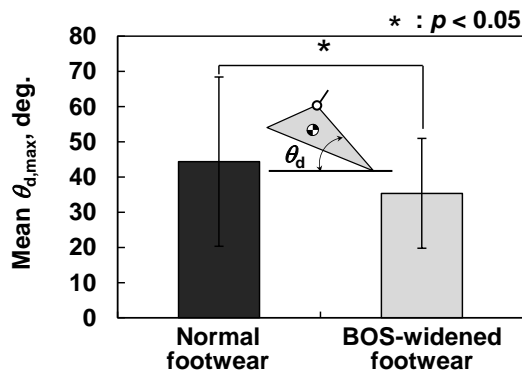


図6 すべり期間の床面に対する足セグメントの側方方向の最大回転角度 $\theta_{d,max}$ の平均値

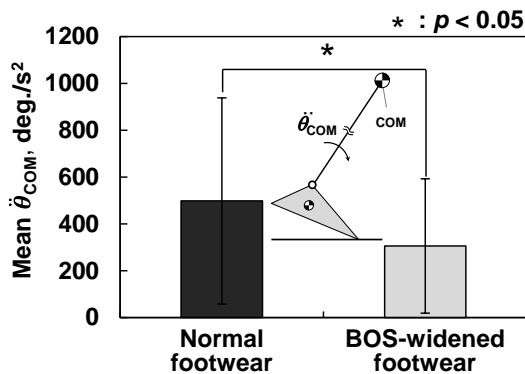


図7 すべり期間の COM に作用する角加速度の平均値

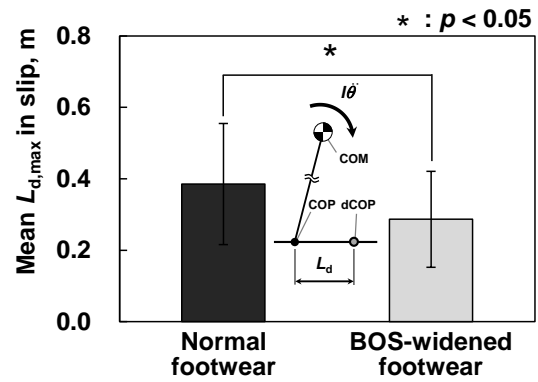


図8 すべり期間の目標 COP と COP の最大距離 $L_{d,max}$ の平均値

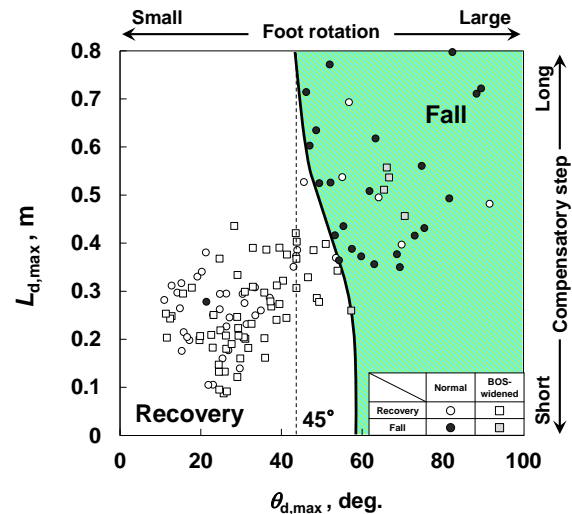


図9 $\theta_{d,max}$ と $L_{d,max}$ の関係

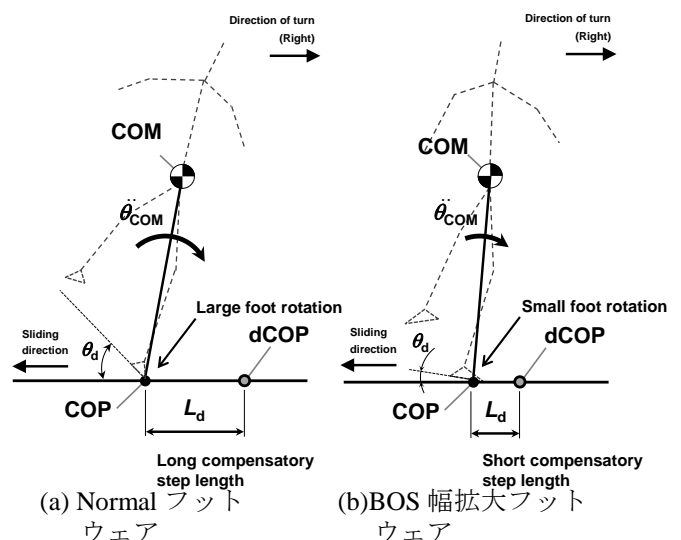


図10 BOS 幅拡大による側方転倒抑制メカニズム

以上のことから, BOS 拡大フットウェアの着用により, 方向転換中に側方にすべりが生じて, 前額面内における足部の回転が抑制され, その結果, COM に作用する角速度を低

減することが出来る。そして、この COM に生じる角速度の低減により、目標 COP と実際の COP の距離が短くなり、補償ステップ距離を短くすることができることが分かった (図 10)。このことにより、BOS を側方に拡大することで、補償ステップが容易となり、その結果、転倒抑制効果が得られたといえる。

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 Takeshi Yamaguchi, Kei Masani, Contribution of center of mass-center of pressure angle tangent to the required coefficient of friction in the sagittal plane during straight walking, *Biotribology*, 査読有, 5, 2016, 16-22.
doi:10.1016/j.biotri.2015.12.002
- 2 Takeshi Yamaguchi, Jennifer Hsu, Yue Li, Brian E. Maki, Efficacy of a rubber outsole with a hybrid surface pattern for preventing slips on icy surfaces, *Applied Ergonomics*, 査読有, 51, 2015, 9-17.
doi:10.1016/j.apergo.2015.04.001
- 3 Takeshi Yamaguchi, Kenneth C. Cheng, Sandra M. McKay, Biran E. Maki, Footwear width and balance-recovery reactions: A new approach to improving lateral stability in older adults, *Gerontechnology*, 査読有, 13, 3, 2015, 359-367.
doi:http://dx.doi.org/10.4017/gt.2015.13.3.008.00
- 4 Takeshi Yamaguchi, Kazuo Hokkirigawa, Development of a high slip-resistant footwear outsole using a hybrid rubber surface pattern, *Industrial Health*, 査読有, 52, 5, 2014, 414-423
doi:10.2486/inhealth.2014-0105
- 5 Takeshi Yamaguchi, Masaru Yano, Hiroshi Onodera, Kazuo Hokkirigawa, Kinematics of center of mass and center of pressure predict friction requirement at shoe-floor interface during walking, *Gait and Posture*, 査読有, 38, 2, 2013, 209-214.
doi:10.1016/j.gaitpost.2012.11.007

[学会発表] (計 13 件)

- 1 山口健, 油で濡れた斜面や氷面でもすべりにくい靴底意匠の開発, 第 14 回姿勢と歩行研究会, 2016 年 3 月 12 日, 興和株式会社本社 11 階ホール, 東京
- 2 Takeshi Yamaguchi, Design criteria of rubber tread block with high friction under glycerin lubrication, 19th

Triennial Congress of the International Ergonomics Association, August 9-14, 2015, Melbourne Convention & Exhibition Centre (Melbourne, Australia).

- 3 Takeshi Yamaguchi, Biomechanical analysis of friction requirement between shoe and floor surface during straight walking and turning, 2015 ISPGR World Congress, June 28-9-July 2, 2015, Melia Sevilla Hotel (Seville, Spain).
- 4 山口健, 靴底/床面間の必要摩擦係数に及ぼす歩行速度, 方向転換角度の影響, 日本トライボロジー会議 2015 春東京, 2015 年 5 月 27 日~29 日, 姫路商工会議所, 姫路.
- 5 山口健, 直線歩行と方向転換における靴底/床面間の必要摩擦係数, 第 13 回姿勢と歩行研究会, 2015 年 3 月 14 日, 興和株式会社本社 11 階ホール, 東京.
- 6 山口健, ハイブリッド表面パターンを有するゴム製靴底の氷面に対する耐滑性評価, 日本トライボロジー会議 2014 秋盛岡, 2014 年 11 月 5 日~7 日, アイーナいわて県民情報交流センター, 盛岡.
- 7 Takeshi Yamaguchi, Tribology in human gait: prevention of slips and falls, 7th World Congress of Biomechanics, July 6-11, 2014, John B. Hynes Veterans Memorial Convention Center (Boston, USA).
- 8 Takeshi Yamaguchi, Center of mass - center of pressure angle critically determines required friction at shoe-floor interface during straight walking, 2014 ISPGR World Congress, June 29-July 3, 2014, The Westin Bayshore Hotel (Vancouver, Canada).
- 9 山口健, ハイブリッド表面パターンを用いた超耐滑靴底の開発, 第 12 回姿勢と歩行研究会, 2014 年 3 月 8 日, 興和株式会社本社 11 階ホール, 東京.

[図書] (計 2 件)

- 1 Takeshi Yamaguchi and Kazuo Hokkirigawa, Pan Stanford Publishing Pte Ltd., Hydrated Materials: Applications in Biomedicine and Environment, 2015, 150 (107-143)
- 2 山口健, 堀切川一男, テクノシステム, トライボロジー設計マニュアル (Tribology Design Manual), 2015, 762 (717-722).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山口 健 (YAMAGUCHI, Takeshi)
東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：50332515

(2) 研究分担者

堀切川 一男 (HOKKIRIGAWA, Kazuo)

東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：60173605

柴田 圭 (SHIBATA, Kei)

東北大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：60612398