

令和元年5月29日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06038

研究課題名(和文) 歩行中のすべり転倒機構の体系的解明に基づく転倒防止性に優れた超耐滑シューズの開発

研究課題名(英文) Development of high slip resistant shoes on the basis of systematic investigation of slip-induced fall mechanism during walking

研究代表者

山口 健 (Yamaguchi, Takeshi)

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：50332515

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、歩行中の靴底と床面間の接線力係数の測定及び動作解析に基づいて、すべり及び転倒防止のためには靴底と床面間に0.4以上の静摩擦係数及び動摩擦係数が必要であること、身体の傾斜角度が小さくなるような歩行がすべりにくく歩行方法であることを明らかにした。また、油で濡れた床面に対しても0.4以上の高い静摩擦係数、動摩擦係数を示す靴底トレッドブロックの形状を実験的に明らかにした。さらに、小型3軸力覚センサを靴底に搭載したセンサシューズを開発し、靴底接地面内における接線力係数分布及び接線力の作用方向を明らかにし、油で濡れた床面においてもすべりが生じにくく、転倒防止性に優れた超耐滑靴底の開発指針を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

屋内外におけるすべりによる転倒事故は、高齢者の寝たきりや労働死傷災害の主要な原因の一つである。本研究の成果は、従来経験的に理解されてきたすべりにくい歩行動作に理論的根拠を与えるものであるとともに、同じく経験的に開発が行われてきた耐滑シューズの開発に定量的な耐滑性評価指針を与えるものであり、すべりによる転倒防止に大きな貢献が期待できるものである。

研究成果の概要(英文)：In this study, the measurement of the traction coefficient between shoe sole and floor during walking indicated that the static and kinetic friction coefficients greater than 0.4 are needed at the shoe-floor interface in order to prevent slip-induced falls. It was also indicated that the gait with a small body lean angle resulted in low traction coefficient, which leads to less slip risk. The shape of shoe tread block which provides the static and kinetic friction coefficients greater than 0.4 over oil-lubricated floor surfaces was found experimentally. In addition, a shoe mounted with miniature tri-axial force sensors was developed and the distribution of required friction coefficient and application direction of friction force in the shoe-floor contact area during walking was investigated. These results will aid in the development of slip-resistant shoe sole over floor surface contaminated with oils.

研究分野：人間工学，トライボロジー，バイオメカニクス

キーワード：すべり 歩行 転倒 耐滑シューズ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

屋内外での転倒事故による死亡者数は年々増加しており、近年では交通事故死亡者数を上回っている。転倒事故が高齢者の寝たきりの主要な要因となっていることや労働死傷災害の主要な原因となっていることなどから、転倒事故防止の対策は喫緊の課題となっている。歩行中の転倒事故の原因として、つまずき、すべり、よるめきなどが挙げられるが、中でもすべりによる転倒事故は全体の40%を占める。すべりによる転倒事故を防止するために、水や油で濡れた床面、路面において優れた耐滑性を有する靴底の開発やすべりにくい歩行動作の解明が望まれているが、すべり転倒機構の解明が十分になされていないため、これらはいずれも経験的に行われてきているのが実態である。

歩行中かかと接地後に、靴底と床面間に生じる接線方向の力  $F_t$  と垂直方向の力  $F_n$  の比である接線力係数 ( $F_t / F_n$ ) が、静摩擦係数 ( $\mu_s$ ) よりも小さい場合には、すべりは生じない。一方、接線力係数が静摩擦係数に到達し、すべりが生じた場合 (図1)、すべり速度、すべり距離の増加に伴い、転倒危険性が高くなる。したがって、すべりによる転倒の危険性を低減するためには、靴底と床面の間には高い動摩擦係数 ( $\mu_k$ ) が必要となる。以上のことから、すべりにくく転倒防止性に優れた靴底には高い静摩擦係数と動摩擦係数が必要であると考えられる。

図1に示されるように、立脚期間(踵接地からつま先離地までの期間)における接線力係数は制動期、推進期にそれぞれ最大値を有する。両期間における接線力係数の最大値は、それぞれの期間においてすべりを抑制するために必要な静摩擦係数 (RCOF: required coefficient of friction) といえる。したがって、様々な歩行における RCOF を明らかにすることで、すべりを抑制するために必要な静摩擦係数の値を明らかにすることができると考えられる。また、すべり発生後の転倒防止のためには、この静摩擦係数の値と同等の動摩擦係数が必要であると考えられる。さらに、RCOF の値が小さな歩行はすべりが生じにくい歩行であり、RCOF と歩行動作の関係を明らかにすることで、すべりにくい歩行方法を明らかにすることができると考えられる。

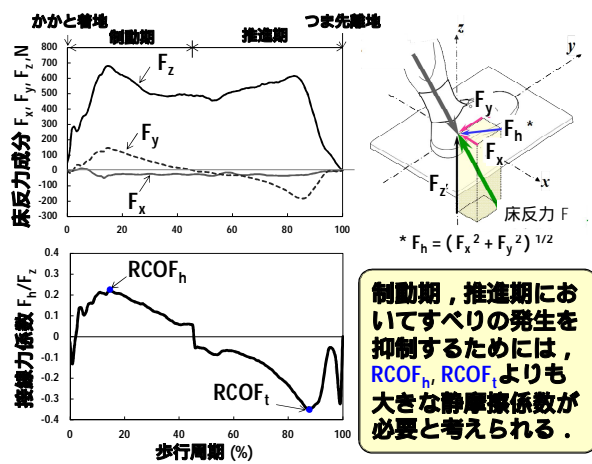


図1 立脚期間における接線力係数の変化

2. 研究の目的

本研究の目的は、以下の3点を行うことである。

- (1) 直線歩行、方向転換における RCOF の値を明らかにし、すべりの発生及び転倒防止に必要な靴底/床面間の静摩擦係数・動摩擦係数を明らかにする。
- (2) 歩行実験と運動力学解析により、RCOF と歩行動作の関係を明らかにすることで、すべりにくい歩行方法に関する知見を得る。
- (3) 歩行中の靴底面内の接線力作用方向を考慮し、油で濡れた床面に対して(1)で得られた静摩擦係数・動摩擦係数の耐滑基準値を満たす超耐滑シューズを開発する。

3. 研究の方法

- (1) すべりの発生及び転倒防止に必要な靴底/床面間の静摩擦係数・動摩擦係数の解明
 

健康成人16名(男性8名、女性8名)を、歩行実験の被験者として募集した。10mの歩行路の中央にフォースプレートを設置し、床反力を計測するとともに、8台の赤外線カメラにより、被験者の身体に取り付けた赤外線反射マーカの位置を計測した。被験者には、直線歩行、右方向への90°の方向転換(軸足:右足及び左足)を3水準の歩行速度(遅い、普通、速い)で行うよう指示した。このとき、方向転換はフォースプレート上で行うよう指示した。床反力の作用点(COP: center of pressure)を計測するとともに、被験者に取り付けたマーカの位置座標から身体質量中心(COM: center of mass)を算出した。また、床反力の水平成分と垂直成分の比から接線力係数を求め、制動期間及び推進期における接線力係数の最大値を必要摩擦係数(RCOF: required coefficient of friction)として求めた。得られたRCOFの値から、すべり発生及び転倒防止に必要な静・動摩擦係数を明らかにした。
- (2) すべりにくい歩行方法の解明
 

歩行中の身体をCOMとCOPからなる倒立振り子として運動を近似する。COM周りのモーメントの式から、靴底と床面間の接線力係数は、COMとCOPを結ぶ直線が垂線となす角度 $\theta$ の正接( $\tan\theta$ )とCOM周りのモーメントに起因する項の和で表すことができる。歩行実験で得られたCOM座標、COP座標を用いてRCOFに与える各項の影響を明らかにすることで、すべりにくい歩行動作を明らかにした。
- (3) 高摩擦ゴムブロック形状の解明
 

矩形のゴム片(NBR)をベースとなる硬質ゴムプレートに配置した試験片を作製し、現有の

直動往復すべり摩擦試験システムを用いて、油で濡らした平滑なステンレス板に対する摩擦係数を明らかにした。ゴム片の幅(3 mm)、長さ(25 mm)、ゴム片の間隔(2 mm)は一定として、厚さ  $h$  を 1 mm ~ 5 mm に 1 mm ずつ変化させて実験を行った(図 2(a))。また、ゴム片の長手方向とすべり方向のなす角度(すべり角度)を  $0^\circ \sim 90^\circ$  に変化させて実験を行った(図 2(b))。さらに、ガラス板を相手材とした摩擦試験と接触面観察により、ゴム試験片のゴム片の厚さ、ゴム片の配置(すべり方向に対する角度)と接触面積の関係を明らかにする。さらに、摩擦トルクに起因するゴムの変形に着目し、高摩擦ゴムブロックパターン設計の設計指針を明らかにした。

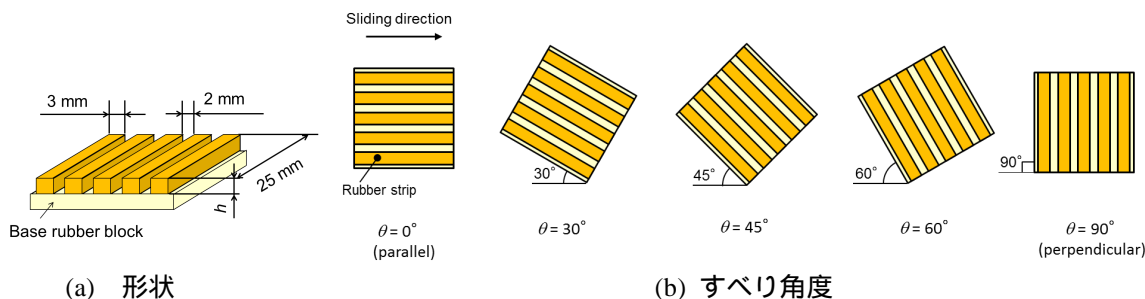


図 2 ゴムブロック試験片の形状とすべり角度

(4) 靴底面内の接線力作用方向の解明

小型 3 軸力覚センサを靴底に搭載したセンサシューズを開発し、直線歩行中に靴底面内に作用する垂直方向、水平方向の床反力ベクトル分布を明らかにした。さらに、垂直方向、水平方向の床反力の比から接線力係数及び各センサ位置での接線力係数の最大値である必要摩擦係数の靴底面内分布を求めた。

4. 研究成果

(1) すべりの発生及び転倒防止に必要な靴底/床面間の静摩擦係数・動摩擦係数の解明

歩行実験の結果、踏込期間では、左足を軸足とする  $90^\circ$  右方向への方向転換(ステップターン)において歩行速度が速い場合に、最も高い必要摩擦係数( $RCOF = 0.31 \pm 0.03$ )を示した(図 3(a))。一方、踏切り期間では、踏込期間と同様に、左足を軸足とする  $90^\circ$  右方向への方向転換(ステップターン)において歩行速度が速い場合に、最も高い  $RCOF$  ( $0.37 \pm 0.04$ )を示すことが分かった(図 3(b))。よって、すべりを生じないためには靴底と床面間には 0.4 以上の静摩擦係数が必要であるといえる。また、静摩擦係数よりも動摩擦係数は小さい場合には急滑りとなり、転倒しやすくなることから、動摩擦係数についても 0.4 以上の値が必要といえる。以上のことから、すべりの発生及び転倒防止に必要な靴底/床面間の静摩擦係数・動摩擦係数は 0.4 以上である。

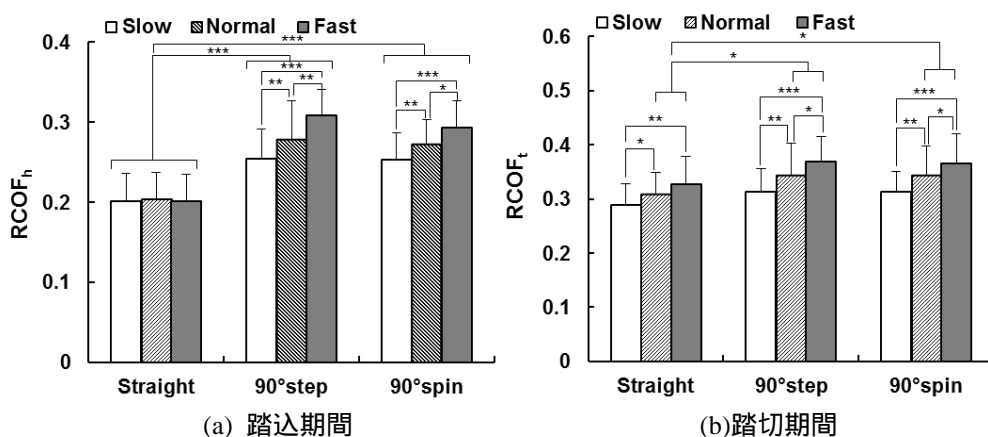


図 3 各歩行条件における必要摩擦係数 (\*  $p < 0.05$ , \*\*  $p < 0.01$ , and \*\*\*  $p < 0.001$ )

(2) すべりにくい歩行方法の解明

上述の歩行実験において推定された COM 位置と床反力の作用点である圧力中心点(COP)を結ぶ直線と垂線のなす角度の正接( $\tan$ )が、必要摩擦係数と高い正の相関(踏込期間  $r = 0.98, p < 0.001$ ; 踏切り期間  $r = 0.94, p < 0.001$ )を示すことが分かった。このことからすべりにくい歩行動作は、この角度を小さくすることができる歩行動作であることが分かった。

### (3) 高摩擦ゴムブロック形状の解明

図4, 図5に, ゴムブロック試験片におけるブロック高さ, すべり角度と静摩擦係数, 動摩擦係数の関係をそれぞれ示す. 同図より, ゴム片の厚さの増加, すべり角度の増加に伴い減少する傾向を示した. また, ゴム片の厚さが2mm, すべり角度が0°の場合に最も高い静摩擦係数(1.39±0.08), 動摩擦係数(1.18±0.08)を示すことが分かった. ゴム片の厚さの減少と, すべり角度の減少は, ゴムブロック端部のたわみ(摩擦トルクに起因するブロック後端部の剥離)を減少させ, その結果相手面との接触面積が確保されることが, ガラス板を相手材料とした摩擦試験, 接触面観察によって明らかになった. これらの結果は, 油で濡れた路面に対して高摩擦を示す, 靴底トレッドの形状及び配置に関する設計指針となり, 有用な結果である.

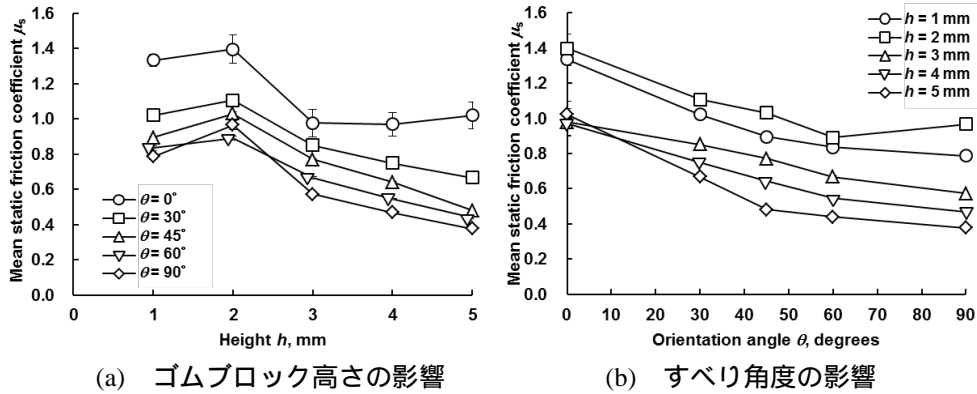


図4 静摩擦係数に及ぼすゴムブロック高さ及びすべり角度の影響

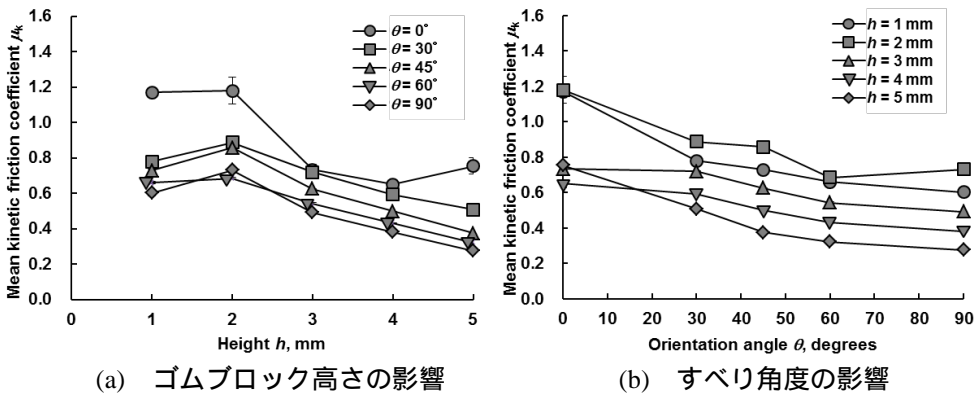


図5 動摩擦係数に及ぼすゴムブロック高さ及びすべり角度の影響

### (4) 靴底面内の接線力作用方向の解明

図6に, 本研究で開発したセンサシューズを示す. また, 図7に, 5名の健常若年成人による直線歩行時各センサ位置における必要摩擦係数を示す. 図7より, 靴底接地面内における各センサ位置での必要摩擦係数は0.4以上の値を超える箇所が多く, また, かかと外足部, つま先部では0.6以上の値となることが分かった. これはフォースプレートを用いた床反力計測から求められる必要摩擦係数よりも大きな値であり, このことから, 靴底接地面内の局所的なすべりを抑制するためには, 0.6以上の高い摩擦係数を示す意匠設計が必要であることが示された. さらに, 接地面内における局所的な水平方向床反力ベクトルから, 特にかかと外側部では側方外側に接線力が生じることが示された.

これらの知見(靴底接地面において高摩擦が必要な箇所及びすべりの方向の解明)に基づいて, 4(3)において示された耐滑性に優れた靴底トレッドを用いることで, 油で濡れた床面においてもすべりが生じにくく, 転倒防止性に優れた超耐滑性シューズの開発が可能となると考えられる.

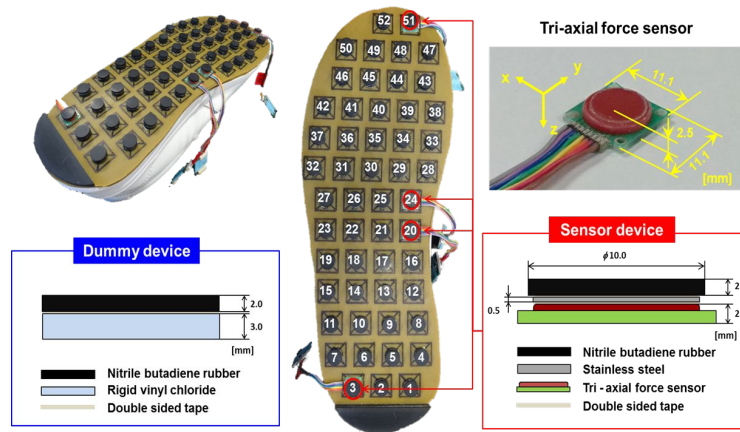


図6 開発されたセンサシューズ

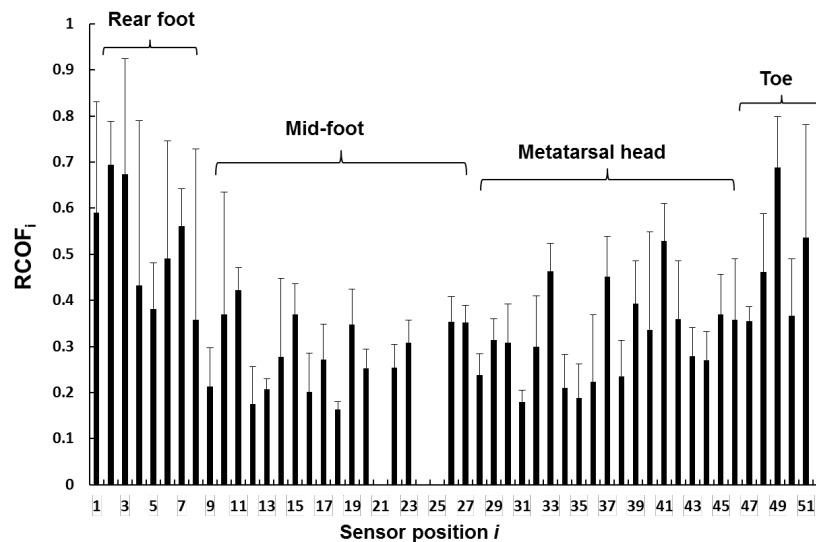


図7 各センサ位置における必要摩擦係数

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計7件)

Takeshi Yamaguchi, Kei Masani, Effects of age-related change in step length and step width on required coefficient of friction during straight walking, *Gait and Posture*, 査読有, 69C, 2019, 195-201.

DOI: 10.1016/j.gaitpost.2019.02.005

Takeshi Yamaguchi, Ryosuke Okamoto, Kazuo Hokkirigawa, Kei Masani, Decrease in required coefficient of friction due to smaller lean angle during turning in older adults, *Journal of Biomechanics*, 査読有, 74, 2018, 163-170.

DOI: 10.1016/j.jbiomech.2018.04.038

Takeshi Yamaguchi, Ryo Yamada, Iori Warita, Kei Shibata, Akihito Ohnishi, Atsushi Sugama, Mamoru Hinoshita, Koichi Sakuchi, Seiko Matsukawa, Kazuo Hokkirigawa, Relationship between slip angle in the ramp test and the coefficient of friction values at shoe-floor interface measured with the cart-type friction measurement device, *Bulletin of the JSME Journal of Biomechanical Science and Engineering*, 査読有, 13, 2018, 17-000389.

DOI: 10.1299/jbse.17-00389

Takeshi Yamaguchi, Akito Suzuki, Kazuo Hokkirigawa, Required coefficient of friction in the anteroposterior and mediolateral direction during turning at different walking speeds, *PLoS ONE*, 査読有, 12, 2017, e0179817.

DOI: 10.1371/journal.pone.0179817

Takeshi Yamaguchi, Yu Katsurashima, Kazuo Hokkirigawa, Effect of rubber block height and orientation on the coefficients of friction against smooth steel surface lubricated with glycerol solution, *Tribology International*, 査読有, 110, 2017, 96-102.

DOI: 10.1016/j.triboint.2017.02.015

山口健, 歩行安全性におけるトライボロジー, *トライボロジスト*, 査読有, 62, 2017, 2-9.

10.18914/tribologist.62.01\_3

Takeshi Yamaguchi, Hironari Higuchi, Hiroshi Onodera, Kazuo Hokkirigawa, Kei Masani, Misalignment of the desired and measured center of pressure describes falls caused by slip during turning, PLoS ONE, 査読有,11, 2016, e0155418.

DOI: 10.1371/journal.pone.0155418

〔学会発表〕(計 10 件)

山口健, 加齢に伴う歩幅, 歩隔の変化と足底/床面間の必要摩擦係数の関係, 日本トライボロジー会議 2018 秋伊勢, 2018 年 11 月 7~9 日, シンフォニアテクノロジー響ホール伊勢, 伊勢.

山口健, 歩行におけるつまづき転倒危険性に及ぼす床材/足底間の摩擦係数の影響, LIFE2018, 2018 年 9 月 6 日~8 日, 早稲田大学西早稲田キャンパス, 東京

Takeshi Yamaguchi, Distribution of the local required coefficient of friction in the shoe-floor contact area during straight walking, 20<sup>th</sup> Congress International Ergonomics Association, August 26-30, 2018, FIRENZE FIERA CONGRESS & EXHIBITION CENTER (Florence, Italy).

Takeshi Yamaguchi, Improvement in slip resistance of rubber sole on oil-lubricated surface by controlling height and orientation of tread block, The 6th World Tribology Congress 2017, September 17-22, 2017, Beijing International Convention Center (Beijing, China).

Takeshi Yamaguchi, Effect of ageing on the misalignment of the desired and measured center of pressure during straight walking, 2017 ISPGR World Congress, June 25-June 29, The Westin Fort Lauderdale Beach Resort (Fort Lauderdale, FL, USA).

Takeshi Yamaguchi, Mediolateral and anteroposterior components of required coefficient of friction during turning gait for young and older adults, 2017 ISPGR World Congress. 25-29 June, 2017, The Westin Fort Lauderdale Beach Resort (Fort Lauderdale, FL, USA).

Takeshi Yamaguchi, Shoe sole design for high slip resistance on powder-contaminated floor surface, Slips, Trips, and Falls International Conference 2017, June 15-16, 2017, MaRS Centre (Toronto, Canada).

Takeshi Yamaguchi, Investigating the relationship between slip angle in the ramp test and the Coefficient of Friction (COF) values measured with the cart-type friction measurement devices, Slips, Trips and Falls 2016: The Way Forward, 4-5 October 2016, Farmers & Fletchers (London, England).

Takeshi Yamaguchi, The required coefficient of friction (RCOF) needed to maintain stability when turning versus walking straight, Slips, Trips and Falls 2016: The Way Forward, 4-5 October 2016, Farmers & Fletchers (London, England).

山口健, センサシューズによる歩行中の靴底接地面内の必要摩擦係数分布, 日本設計工学会 2016 年度秋季研究発表講演会, 2016 年 10 月 8 日, 北九州国際会議場, 北九州

〔図書〕(計 1 件)

山口健, テクノシステム, 第 7 節 生体・医療 第 2 項 バイオメカニクス解析による耐滑フットウェアの開発, 数値解析と表面分析によるトライボロジー現象の解明とその制御, 2018, 1158.

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名: 堀切川 一男

ローマ字氏名: HOKKIRIGAWA Kazuo

所属研究機関名: 東北大学

部局名: 大学院工学研究科

職名: 教授

研究者番号(8桁): 60173605

研究分担者氏名: 柴田 圭

ローマ字氏名: SHIBATA Kei

所属研究機関名: 東北大学

部局名: 大学院工学研究科

職名: 助教

研究者番号(8桁): 60612398