

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H04558

研究課題名(和文) 摩擦に起因するすべり・つまずき転倒機構の解明に基づく転倒予防靴底・床材料の開発

研究課題名(英文) Development of Shoe Soles and Flooring Materials for Fall Prevention Based on Elucidation of Friction-Induced Slip and Trip Fall Mechanisms

研究代表者

山口 健 (Yamaguchi, Takeshi)

東北大学・工学研究科・教授

研究者番号：50332515

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、二足歩行の神経筋骨格歩行モデルを用いた歩行シミュレーションと歩行実験により、高齢者に見られるすり足歩行において、すべり転倒・つまずき転倒が生じない好適な足底と床面間の摩擦係数の範囲が存在すること、そしてその摩擦係数の範囲が0.4～1.1であることを明らかにした。また、植物系多孔性炭素粒子のゴムへの充填や矩形ゴムブロックの端面角部半径の制御により上記の好適摩擦係数範囲の摩擦係数を、水潤滑下や油潤滑下という低摩擦になりやすい条件においても実現できることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、高齢者にみられるすり足歩行において、すべり転倒及びつまずき転倒が生じない靴底と床面間の摩擦係数の範囲を明らかにするとともに、これらの摩擦係数の範囲を乾燥状態、水濡れ・油濡れ状態において実現可能なゴム複合材料の開発ならびに意匠設計に成功したものである。本研究は、高齢者の転倒防止のための靴底や床材料の開発につながる点で社会的意義が高く、さらに、安定歩行のための足底と床面間の摩擦の役割について、本質的な理解を与えるものであり、学術的意義も高いといえる。

研究成果の概要(英文)：In this study, we have found through walking experiments and gait simulation using a neuromusculoskeletal gait model of bipedal walking that there is an optimal range of friction coefficients between the foot sole and the floor that prevents slip- and trip-induced falls in the shuffling gait observed in elderly people, and that this range is between 0.4 and 1.1. It was also shown that the above optimum range of friction coefficients can be achieved by filling the rubber with plant-based porous carbon particles and by controlling the radius of the corner of the end face of the rectangular rubber block, even under water-lubricated and oil-lubricated conditions, which tend to cause low friction.

研究分野：バイオメカニクス

キーワード：転倒 すべり つまずき 高齢者 摩擦 神経筋骨格モデル

1. 研究開始当初の背景

高齢者の転倒事故の主要な原因はつまずき(第1位:全体の40%)とすべり(第2位:全体の20%)である。高齢者は加齢による筋力低下や歩幅の減少に伴いフットクリアランス(足底と床面間の距離)が低下し、すり足歩行となりやすい。このようなすり足歩行では、足底と床面間の摩擦や摩擦の変化が歩行安定性に大きな影響を与えられ、すなわち、足底と床面間の摩擦係数が低すぎる場合には「すべり転倒」が、高すぎる場合には「つまずき転倒」が発生する危険が高くなると考えられる。つまずき転倒では物理的な段差につまずく場合もあるが、近年、建築物のバリアフリー化が進み、物理的な段差が少なくなっているにも関わらず高齢者のつまずき転倒が減少していない理由として、「摩擦つまずき転倒」が多発している可能性が考えられる。このようなすべり転倒・つまずき転倒の双方を抑制可能な靴底材料、床材料の開発のためには、高齢者に見られるすり足歩行において、すべり転倒・つまずき転倒を防止し、安定に歩行ができる足底と床面間の好適な摩擦係数の範囲を解明する必要がある。

一方、靴底材料や床材料には高摩擦が求められるため、ゴムやウレタンなどの高分子材料が一般に用いられている。しかし、これらの材料は乾燥状態では摩擦が高く、水や油で濡れた場合には、摩擦が急激に低下する。したがって、すり足歩行においては、乾燥状態では「つまずき転倒」が、水や油で濡れた状態では「すべり転倒」が生じやすくなる。そこで本研究では、硬質な多孔性炭素粒子を配合することで、ゴムやウレタンの乾燥状態における摩擦係数の過度な増加を抑制しつつ、水や油で濡れた状態での摩擦係数の低下を抑制し、すべり転倒・つまずき転倒双方の防止に効果的な靴底材料、床材料の開発が可能となると期待される。

2. 研究の目的

本研究では理論的・実験的研究により、高齢者に見られるすり足歩行において、すべり転倒・つまずき転倒の危険性が少なく、安定な歩行を実現可能な足底と床面間の摩擦係数の好適範囲を明らかにするとともに、摩擦に起因する転倒の防止に効果的な靴底材料、床材料の開発を行う。具体的には以下の3点を目的とする。

- (1) 通常歩行、すり足歩行においてすべり転倒・つまずき転倒を防止し、安全歩行を可能とする、足底と床面間の摩擦係数の好適範囲を、神経筋骨格モデルに基づく歩行シミュレーションにより理論的に明らかにする。
- (2) 若年者と高齢者を被験者とした通常歩行・すり足歩行実験により、歩行シミュレーションから得られた結果を実験的に検証する。
- (3) 硬質多孔性炭素粒子を用いた高分子材料の摩擦制御技術並びに意匠形状の制御により、すべり転倒・つまずき転倒の双方を抑制可能な靴底材料、床材料を開発する。

3. 研究の方法

(1) 神経筋骨格モデルを用いた歩行シミュレーションによる好適摩擦係数範囲の解明

二足歩行の神経筋骨格モデルを用いて、図1に示すような若年者を模擬した通常歩行(平均歩幅0.68m, 平均歩行率120歩/分, 平均フットクリアランス0.14m)、高齢者を模擬したすり足歩行(平均歩幅0.60m, 平均歩行率102歩/分, 平均フットクリアランス0.02m)モデルを作製した。また足部と床面の接触をばね・ダンパからなるモデルで近似し、垂直方向(k_{gy})と水平方向(k_{gx})のばね定数の比(k_{gx}/k_{gy})を変化させることで、水平方向の床反力を変化させた歩行シミュレーションを行い、 k_{gx}/k_{gy} と転倒確率の関係を明らかにした。ここで、 k_{gx}/k_{gy} が小さい場合は足底と床面間の摩擦が小さく、 k_{gx}/k_{gy} が大きい場合は摩擦が大きいといえる。 k_{gx}/k_{gy} を0.002から0.2まで変化させて歩行シミュレーションを行った。

(2) 歩行実験による好適摩擦係数範囲の検証

図2に示すように、歩行路中央に設置したフォースプレート上にあらかじめ摩擦係数の異なる2種類の床材を並べ、その上を5名の健康成人男性に歩行させた際の床反力と被験者に取り付けた赤外線反射マーカの位置を3次元動作解析装置を用いて計測した。被験者には靴下を履いて歩行するよう指示した。床材は、高摩擦から低摩擦へ、低摩擦から高摩擦へ変化する2種類の条件を設定した(図2)。被験者には、身長40%の歩幅、歩行率110歩/分の通常歩行、身長20%の歩幅、歩行率100歩/分の高齢者を模擬したすり足歩行の2条件で歩行するよう指示を行った。床材の切り替わりの前後において、足底と床面間の摩擦係数と身体質量中心周りのモーメントの変化を明らかにするとともに、両者の関係を明らかにした。

(3) 植物系多孔質炭素材料を充填した高摩擦ゴム複合材料の開発及び高摩擦ゴムブロック形状の解明

植物系多孔質炭素粒子を合成ゴムに異なる体積割合で充填したゴム系複合材料を開発し、平滑なガラス面に対する水潤滑下における摩擦係数を明らかにした。また、端面角部の曲率半径が異なる矩形ゴムブロックを複数有する試験片を作製し、グリセリン水溶液中で平滑なガラス面に対する摩擦係数を明らかにした。また、同時に接触面観察を行い、高摩擦発現時のメカニズムについても検討を行った。

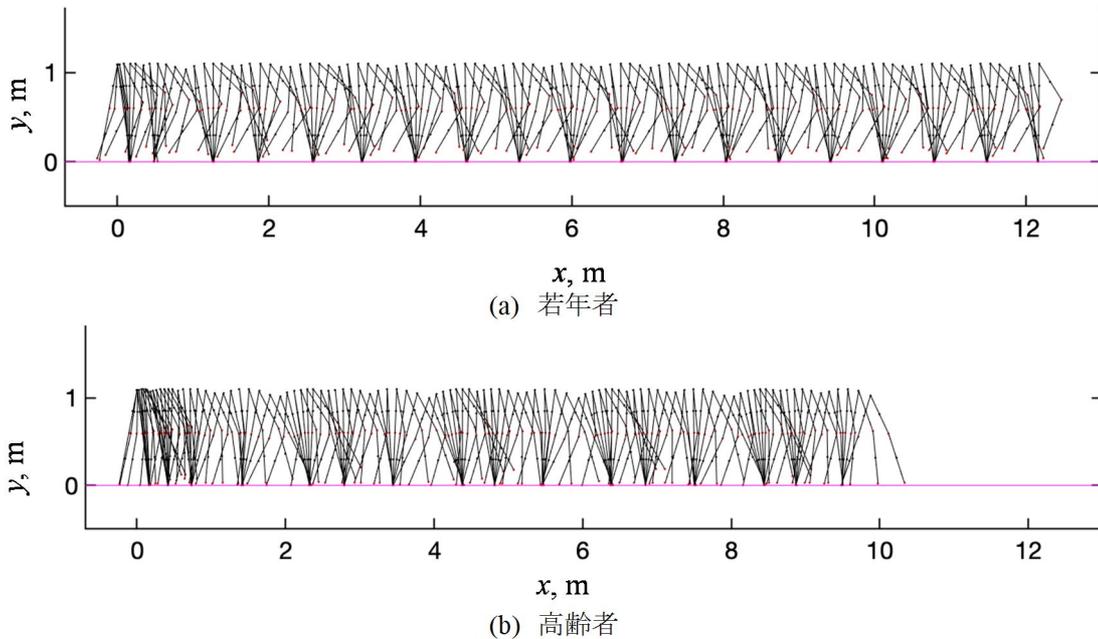


図1 若年者(a)と高齢者 (b) を模擬した歩行シミュレーションの例
 ($k_{gx}/k_{gy}=0.02$, 転倒なし)

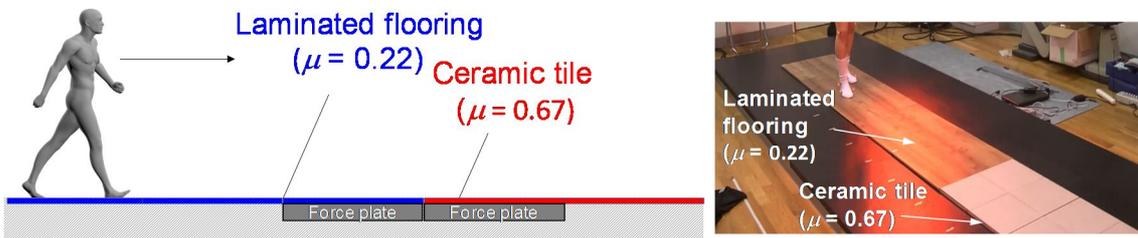
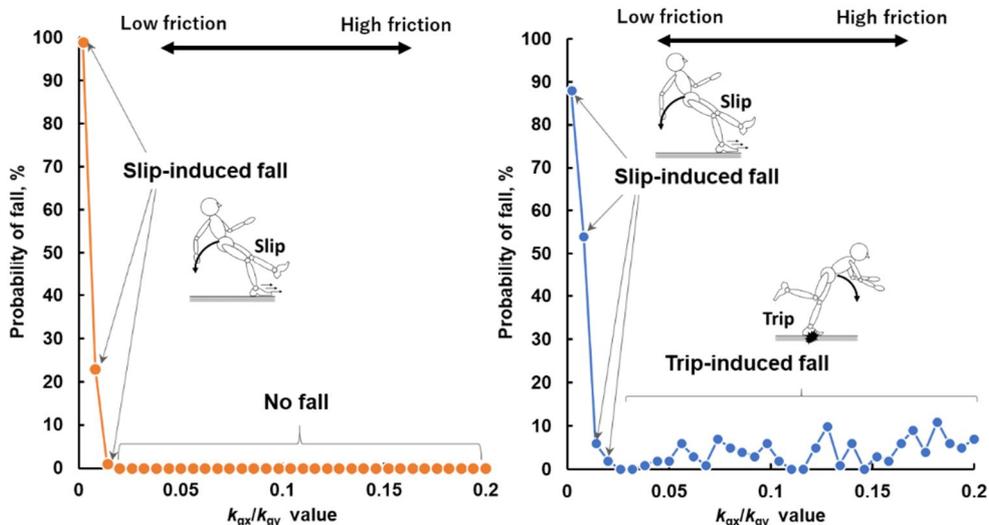


図2 歩行実験の様子 (低摩擦床材から高摩擦床材へ変化させた場合)

4. 研究成果

(1) 神経筋骨格モデルを用いた歩行シミュレーションによる好適摩擦係数範囲の解明

通常歩行では、 $k_{gx}/k_{gy} < 0.02$ ではすべりによる転倒が生じるものの、 $k_{gx}/k_{gy} = 0.02$ では転倒は生じなかった (図 3(a)). 一方、高齢者を模擬したすり足歩行では、 $k_{gx}/k_{gy} < 0.02$ では同じくすべり転倒が生じ、 $k_{gx}/k_{gy} > 0.04$ ではつまずきによる前方転倒が生じることが分かった (図 3(b)). このことから、すり足歩行では低摩擦条件におけるすべり転倒に加えて、高摩擦条件におけるつまずき転倒が生じること、いずれの転倒も生じない好適な摩擦係数範囲が存在することが分かった。

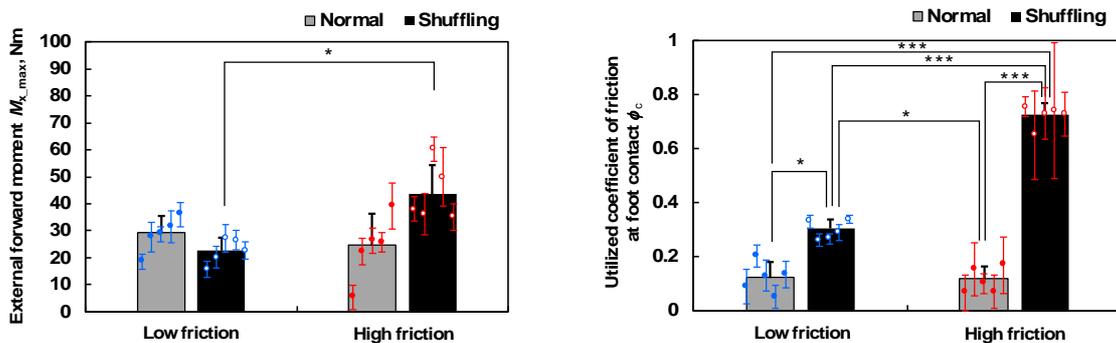


(a) 若年者歩行モデル (b) 高齢者歩行モデル

図3 足底-床面摩擦パラメータ (k_{gx}/k_{gy}) と転倒確率の関係

(2) 歩行実験による好適摩擦係数範囲の検証

高摩擦から低摩擦に変化する条件では、通常歩行、すり足歩行ともに2枚目の床材への接地後に前方へのすべりが生じたが、転倒は生じなかった。一方、低摩擦から高摩擦に変化する条件では、高齢者を模擬したすり足歩行では、2枚目の床材への接地時に摩擦係数が高く、その結果接地後に身体が前方に倒れる方向に重心周りのモーメントが増加し、前方へのつまずき転倒危険性が増加することが示唆された(図4)。このことから、高齢者に見られるすり足歩行では、足底と床面間の摩擦係数が高い場合には、つまずき転倒が生じやすいことが示された。しかし、通常歩行では、摩擦係数が増加しても前方への重心周りのモーメントは変化しなかった。以上の結果から、いずれの歩行条件においても転倒は生じなかったが、令和2年度の歩行シミュレーションで得られた転倒危険性と足底-床面摩擦の関係を支持する結果が得られた。また、令和2年度に作成した二足歩行の神経筋骨格モデルを足部及び上体を有するモデルに改良し、上記の実験と同様の歩行条件(通常歩行、すり足歩行)で床面の摩擦パラメータを変化させて、シミュレーションを行ったところ、すべり転倒、つまずき転倒が生じない好適な摩擦係数の範囲は0.4~1.1であることが明らかとなった。



(a) 身体質量中心周りの最大前方モーメント

(b) 足底接地時の摩擦係数

図4 各床面条件における(a)足底接地後の最大前方モーメント及び(b)足底接地後時の摩擦係数

(3) 植物系多孔質炭素材料を充填した高摩擦ゴム複合材料の開発及び高摩擦ゴムブロック形状の解明

多孔性炭素粒子を配合することで未配合のゴムに比べて摩擦係数が増加することが分かった。また、多孔性炭素粒子の充填率により、水潤滑下における摩擦係数を0.5から2.0まで変化させることが可能であることが明らかとなった。また、ゴムブロック端面角部の曲率半径の減少に伴い摩擦係数は増加し、ゴムブロックの端面角部曲率半径が0.1mm以下ではグリセリン潤滑下において大気中無潤滑下よりも高い摩擦係数を得られることが分かった。また、グリセリン潤滑下において、端面角部半径により摩擦係数を0.2から1.5まで変化させることが可能であることも明らかとなった(図5)。

以上のことから、植物系多孔性炭素粒子のゴムへの充填や矩形ゴムブロックの端面角部半径の制御により、令和3年度に明らかとなった好適摩擦係数範囲(0.4 - 1.1)の摩擦係数を、水潤滑下や油潤滑下という低摩擦になりやすい条件においても実現できることが示された。この知見を用いることで従来技術では実現不可能な耐滑靴底・床材料および靴底・床意匠の開発が可能となると考えられる。

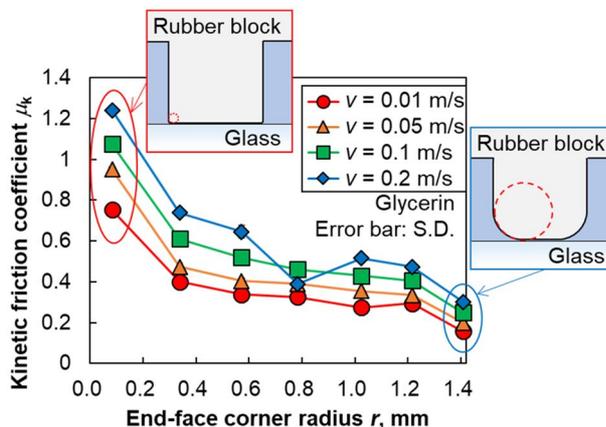


図5 ゴムブロック端面角部半径とグリセリン潤滑下における摩擦係数の関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Yamaguchi Takeshi, Shibata Kei, Wada Hiromi, Kakehi Hiroshi, Hokkirigawa Kazuo	4. 巻 11
2. 論文標題 Effect of foot-floor friction on the external moment about the body center of mass during shuffling gait: a pilot study	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 12133
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-021-91683-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Beschorner Kurt E., Li Yue, Yamaguchi Takeshi, Ellis William, Bowman Richard	4. 巻 223
2. 論文標題 The Future of Footwear Friction	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 21st Congress of the International Ergonomics Association (IEA 2021)	6. 最初と最後の頁 841 ~ 855
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-74614-8_103	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Yamaguchi Takeshi, Nakatani Kenichi, Hirose Tomoki, Yoshida Takashi, Masani Kei	4. 巻 223
2. 論文標題 Effects of Foot-Floor Friction on Trip-Induced Falls During Shuffling Gait: A Simulation Study	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 21st Congress of the International Ergonomics Association (IEA 2021)	6. 最初と最後の頁 856 ~ 860
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-74614-8_104	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Ishizako Arata, Tomosada Masaki, Hokkirigawa Kazuo, Yamaguchi Takeshi	4. 巻 174
2. 論文標題 Impact of rubber block end-face corner radius on the friction coefficient between rubber blocks and a glass plate under dry and lubrication conditions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Tribology International	6. 最初と最後の頁 107705 ~ 107705
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.triboint.2022.107705	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yamaguchi Takeshi、Masani Kei	4. 巻 12
2. 論文標題 Effects of age on dynamic balance measures and their correlation during walking across the adult lifespan	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 14301
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-022-18382-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Ishizako Arata、Matsumoto Hide、Yamaguchi Takeshi	4. 巻 184
2. 論文標題 Effect of the end-face corner radius of a rubber block on the friction coefficient and fluid-free gap under glycerin lubrication	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Tribology International	6. 最初と最後の頁 108473 ~ 108473
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.triboint.2023.108473	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 廣瀬智樹, 泉直斗, 吉田宇志, 政二慶, 山口健
2. 発表標題 歩行中の転倒に及ぼす足底と床面間の摩擦の影響
3. 学会等名 シンポジウム: スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス2021 (SHD2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山口健, 高橋優哉, 佐々木祥弘
2. 発表標題 靴底センサシステムによる歩行中の靴底-床面間の摩擦係数測定
3. 学会等名 日本機械学会 シンポジウム: スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス2021 (SHD2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石埕新太, 山口健, 堀切川一男
2. 発表標題 ゴムブロックの端面角部の形状が潤滑下の摩擦に及ぼす影響に関する研究
3. 学会等名 日本トライボロジー会議2021秋松江
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takeshi Yamaguchi, Kenichi Nakatani, Tomoki Hirose, Takashi Yoshida, Kei Masani
2. 発表標題 Effect of foot-floor friction on trip-induced falls during shuffling gait: a simulation study
3. 学会等名 International Ergonomics Association 21st Triennial Congress (IEA 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takeshi Yamaguchi, Kurt Beschorner, Yue Sophia Li, William Ells, Richard Bowman
2. 発表標題 The Future of Footwear Friction
3. 学会等名 International Ergonomics Association 21st Triennial Congress (IEA 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山口健
2. 発表標題 ヒューマンロコモーションとトライボロジー
3. 学会等名 2021年度第5回ヒューマンロコモーション拡張技術協議会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山口健
2. 発表標題 ヒューマンダイナミクスにおけるトライボロジー
3. 学会等名 トライボロジー会議2020秋別府（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Naoto Izumi, Tomoki Hirose, Takashi Yoshida, Kei Masani, Takeshi Yamaguchi
2. 発表標題 Impact of foot-floor friction on falls in the elderly: a computational simulation using neuromusculoskeletal model
3. 学会等名 ISPGR World Congress 2022（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Arata Ishizako, Masaki Tomosada, Takeshi Yamaguchi
2. 発表標題 Effect of end face corner face shaperadius of rubber block on friction under lubrication condition
3. 学会等名 International conference on slips, trips, and falls (STF) 2022 in Sendai（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石埜新太, 友定雅貴, 堀切川一男, 山口健
2. 発表標題 端面角部半径が異なるゴムブロックの無潤滑下及び潤滑下における摩擦特性
3. 学会等名 日本トライボロジー会議2022春東京
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石塚新太, 松本英, 山口健
2. 発表標題 ゴムブロックの摩耗に伴う端面角部半径の変化が潤滑下の摩擦に及ぼす影響
3. 学会等名 日本トライボロジー会議2022秋福井
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	柴田 圭 (Shitaba Kei) (60612398)	独立行政法人労働者健康安全機構労働安全衛生総合研究所・ リスク管理研究グループ・任期付研究員 (82629)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	政二 慶 (Msani Kei)	トロント大学・生体工学研究所・准教授	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
カナダ	KITE Research Institute		