



足底メカノレセプターの刺激を目的とするインソールの開発と効果検証

小林, 晃大

(Citation)

課題研究優秀論文集, 2025:299-324

(Issue Date)

2026-01

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/0100499448>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100499448>



2025 年度 卒業研究最終論文

足底メカノレセプターの刺激を目的とする
インソールの開発と効果検証

神戸大学附属中等教育学校 12 回生

6 年 3 組 12 番

小林 晃大

(指導教員 武藤 柚奈、河合 暁子)

2025 年度 卒業研究最終論文
足底メカノレセプターの刺激を目的とする
インソールの開発と効果検証
神戸大学附属中等教育学校 12 回生 6 年 3 組 12 番 小林 晃大
(指導教員 武藤 柚奈、河合 暁子)

要旨

近年、高齢者による転倒事故が多発しており、その影響は骨折や頭部外傷といった重大な傷害を引き起こす可能性が高まり、非常に深刻である。その結果、一時的あるいは長期的な入院が必要となり、最悪の場合、寝たきりの状態に至ることもある。さらに、転倒による負傷は身体機能の低下を招き、自立した生活の継続が困難となることで、介護が必要となるリスクが高まる。高齢者が安心して日常生活を送るためには、転倒を未然に防ぐための効果的な対策が求められている。

高齢者の転倒要因としては、歩行の不安定さ、筋力の低下、感覚機能の衰えなどが挙げられる。中でも足裏の感覚低下は、転倒リスクを高める重要な要素の一つである。人は歩行中、地面からの刺激を足裏で感じ取り、それに基づいてバランスを調整している。しかし、加齢によりこの感覚が鈍くなると、わずかな段差や障害物への反応が遅れ、転倒につながりやすくなる(1)。

そこで本研究では、足裏に存在するメカノレセプター（感覚受容器）に着目し、これを活性化させることでバランス感覚の向上を図るトレーニングインソールを提案する。メカノレセプターは、地面からの圧力や振動を感知して体の姿勢やバランスを調整する役割を担っているが、加齢によりその機能が低下すると歩行時の安定性が損なわれ、転倒リスクが増大する(2)。

本研究のインソールは、足裏に継続的かつ適度な刺激を与えることで、メカノレセプターの働きを促進し、感覚機能の低下を抑制することを目的としている。

加えて、インソールは日常的に使用可能なように、履き心地や快適性にも配慮して設計した。使用者が継続的に着用できるよう、適度なクッション性を備えるとともに、足への負担を軽減する柔軟な素材を採用した。これにより、無理なく装着を継続しながら、自然な形でバランス感覚のトレーニングを行うことが可能となる。

本研究で開発したトレーニングインソールは、日常生活の中で無理なくバランス感覚を鍛えることができるという点で、従来の運動療法やバランストレーニングとは異なる特徴を有する。これにより、高齢者は歩行時の安定性を向上させ、転倒リスクの軽減が期待される。高齢者が安心して安全に生活できる社会を実現するために、本研究のインソールは有効な手段の一つとなり得ると考えられる。

足底メカノレセプターの刺激を目的とする

インソールの開発と効果検証

Stimulation of Plantar Mechanoreceptors
Development of Insoles and Verification of Effectiveness

小林 晃大
Kobayashi Akihiro

Abstract

In Japan, where the population is rapidly aging, the number of accidents involving falls among the elderly is increasing every year. Falls are a major cause of injury and quality of life decline among the elderly, and their prevention has become an important public health issue. The purpose of this study is to develop insoles that help prevent falls by improving foot function, balance, and toe movement. In collaboration with a shoe company, I designed an insole that supports the natural movement of the foot and stimulates the toe area, where the mechanoreceptors responsible for balance are concentrated. The thickness and material of the insoles were chosen to ensure comfort and ease of use in everyday life. The insoles are intended to promote healthy foot activity without interfering with motor function. The effectiveness of this insole was also verified through testing and analysis. Through this project, we hope to raise awareness of the dangers of falls among the elderly and emphasize the importance of proactive fall prevention in an aging society.

Keywords: mechanoreceptors; insole; fall prevention; balance ability; plantar sensatio; toe - grip exercise

目次

要旨	I
第 1 章 序論	1
第 1 節 近年の高齢者転倒事故について	1
第 2 節 本研究の目的	1
第 3 節 本研究における単語の定義	1
第 2 章 高齢者の身体機能の低下と転倒リスク	3
第 1 節 転倒の背景となる身体機能の変化	3
第 2 節 高齢者の転倒のメカニズム	3
第 3 節 高齢者の足部機能の低下と歩行への影響	4
第 4 節 足底メカノレセプターの機能と歩行における役割	5
第 3 章 トレーニングインソールの開発	7
第 1 節 高齢者の転倒と身体的要因	7
第 2 節 トレーニングインソールの仕様と機能	7
第 3 節 メカノレセプター活性化で期待される効果	9
第 4 章 実験① 二点識別覚検査 (TPD)	10
第 1 節 実験の概要	10
第 2 節 実験目的	10
第 3 節 実験方法	10
第 4 節 実験結果	10
第 5 節 考察	11
第 5 章 実験② Functional Reach Test (FRT)	12
第 1 節 実験の概要	12
第 2 節 実験目的	12
第 3 節 実験方法	12
第 4 節 実験結果	13
第 5 節 考察	13
第 6 章 結論	14
第 1 節 まとめ	14
第 2 節 今後の展望	14
謝辞	16
付録 A 二点識別覚検査	17
付録 B FRT (ファンクショナルリーチテスト)	19
付録 C 対応のある t 検定と Cohen's d の算出	19
参考文献	22

第 1 章 序論

第 1 節 近年の高齢者転倒事故について

令和 4 年 10 月 1 日現在、日本の総人口は 1 億 2,495 万人である(3)。65 歳以上人口は 3,624 万人となり、総人口に占める割合（高齢化率）も 29.0%となった。65 歳以上人口を男女別にみると、男性は 1,573 万人、女性は 2,051 万人であり、男性対女性の比は約 3 対 4 となっており、女性の割合が高くなっている(3)。

高齢者の「不慮の事故」のうち、「転倒・転落」によるもので死亡者数は 9,509 人（令和 3 年）、救急搬送者数は全体の 82%で、死亡者数、救急搬送者数はともに多く、毎年継続的に発生している高齢者の転倒・転落は骨折や頭部外傷等の重大な傷害を招き、これが原因で介護が必要な状態になることもある(4)。

また、高齢者の転倒事故には、身体的要因と環境的要因の双方が関係している。身体的要因では、加齢による筋力やバランス感覚の低下、視力や反応速度の低下などが挙げられる。一方、外的要因では、家の中の段差や滑りやすい床、暗い照明、散らかった部屋など、生活環境に起因する危険が転倒の原因となる(1)。

第 2 節 本研究の目的

近年、日本は急速な高齢化社会を迎え、65 歳以上の高齢者の割合は増加し続けている。この社会背景において、高齢者の生活の質を維持するためには、転倒事故の防止が重要な課題となっている。転倒は、高齢者にとって重大な健康リスクを伴い、骨折や頭部外傷などの命に関わる怪我を引き起こすだけでなく、回復には長時間を要し、その後の生活の質を低下させる。歩行時の足元の不安定さや体力の低下が影響しやすい高齢者にとって、転倒を防ぐための対策が必要である。

そのため、本研究の目的は、高齢者の転倒リスクを軽減するためのシューズを提案することである。

現在、多くのシューズには転倒防止を目的とした機能が備わっている場合が多い。しかし、高齢者の抱える歩行の不安定さや視覚・感覚の低下を補うための機能を備えているシューズは、使われていないため、本研究では中高年向けのトレーニングインソールを提案することで、バランス感覚の維持または向上が期待でき、中高年の足の筋力の機能を鍛えて将来、高齢者となったときに転倒することを防止する。

第 3 節 本研究における単語の定義

高齢者：65 歳以上の男女であり、75 歳以上の高齢者を「後期高齢者」と分類されるが、本研究においては 65 歳以上の男女を指す。

メカノレセプター：物理的な刺激、特に機械的な変化（圧力、振動、伸展、引張など）を感知する感覚受容器のこと。これらの受容器は、皮膚、筋肉、腱、関節などに存在し、

体の外部および内部の物理的な変化を感知し、神経信号に変換して脳に伝達するもの。
インソール：靴の内部、足の裏に直接触れる部分。足底の快適さをサポートし、クッション性を高め、足のアーチをサポートするために特別な素材や形状が使われることが多い。取り外しが可能。

体性感覚：触覚、温度感覚、痛覚の皮膚感覚と、筋や腱、関節などに起こる深部感覚からなり、内臓感覚は含まない。皮膚感覚が皮膚表面における感覚であるのに対し、深部感覚とは身体内部の感覚を意味する。後者は固有感覚または自己受容感覚とも呼ばれ、筋受容器からの伸縮の情報により、身体部位の位置の情報が得られるもの。

歩行周期：右足または左足のかかとが地面に接地してからもう一度同じ足のかかとが地面に接地するまでの時間のこと。

テクスチャー：材料の質感や感触、特徴や表面の様子のこと。

二点識別覚（Two-Point Discrimination）：皮膚に対して2つの点で同時に触れたとき、それを2点として識別できる最小の距離を測る感覚機能。足底感覚の鋭敏さを測定するために用いられる実験方法。

FRT（Functional Reach Test）：身体のバランス能力を評価するテスト。立位姿勢から前方に手を伸ばし、倒れずに到達できる最大距離を測定することで、前方への重心移動能力と姿勢の安定性を評価する方法。

第2章 高齢者の身体機能の低下と転倒リスク

第1節 転倒の背景となる身体機能の変化

高齢者の転倒事故は、身体機能の低下と密接に関係しており、その背景には加齢に伴う多面的な機能衰退が存在する。特に、筋力、柔軟性、バランス能力、感覚機能といった運動制御に必要な要素が年齢とともに低下することが、転倒の主たるリスク因子として知られている。中でも下肢筋力の減少は歩行の安定性に直接的な影響を及ぼし、特に大腿四頭筋や下腿三頭筋の筋力低下は、立ち上がりや階段昇降といった基本的動作に支障をきたす要因となる。

また、足底に存在するメカノレセプターの感受性が低下することで、足裏からの圧力や振動といった情報が脳に正確に伝達されにくくなり、重心の位置や地面の状態を把握する能力が鈍くなる。この結果、わずかな段差や傾斜でも姿勢を崩しやすくなり、転倒リスクが高まる。さらに、視覚や聴覚といった感覚器官の老化も、周囲の環境変化への反応を遅らせ、危険の察知や回避行動の遅延を引き起こす(5)。

これらの身体的・感覚的機能の低下が複合的に重なることで、転倒の危険性は著しく増大し、結果として骨折や頭部外傷といった重篤な外傷につながる可能性がある。特に大腿骨近位部骨折は、高齢者の寝たきり状態や要介護状態に導く要因となり、QOLの低下や医療・介護費の増加にも直結する(5)。

したがって、高齢者における転倒事故を未然に防ぐためには、筋力やバランス能力だけでなく、感覚機能を含む身体機能全体を包括的に維持・向上させるアプローチが不可欠である。加齢は避けられないものであるが、適切な刺激や訓練によって神経・筋機能の維持は可能であり、そのための具体的な手段としてインソールのような介入は有用であると考えられる。

第2節 高齢者の転倒のメカニズム

高齢者における身体の衰えは、多くの要因があり、転倒のリスクを高める重要な要素となる。以下に、高齢者の身体的な衰えと、それが転倒にどのようにつながるかを述べる。

まず、筋力の低下は、加齢に伴い最も顕著に現れる衰えの一つである。特に脚部の筋力が低下する現象はサルコペニアと呼ばれ、歩行や立ち上がりといった基本的な動作が困難になる(6)。

筋力の低下により、姿勢を維持する能力が低下し、バランスを崩した際に体を支えることが難しくなる。これが転倒のリスクを高める要因となる。平衡感覚の低下もまた、加齢に伴う重要な問題である。内耳の機能が衰えることで、平衡感覚が低下し、視覚や触覚からの情報処理が遅くなる。この結果、身体の位置を正確に把握する能力が低下し、不安定な地面や暗い場所での歩行中にバランスを崩しやすくなる(6)。

特に視覚が低下している場合、これらの問題はさらに深刻化する。関節の可動域の制限も、高齢者の転倒リスクに寄与する要因である。膝や足首の柔軟性が低下し、可動域

が狭くなると、歩行がぎこちなくなり、つまずいた際に素早くバランスを取ることが難しくなる。可動域の制限は、転倒を引き起こしやすい状況を作り出す要因となる。

さらに、反射神経の低下も、転倒のリスクを高める。加齢により反射神経が鈍くなると、障害物や段差に対して迅速に反応することができなくなる。このため、危険を察知したとしても、体が素早く対応できず、転倒につながりやすい。

また、骨密度の低下も転倒につながる一つの要因である。骨密度が低下すると骨が脆くなり、転倒時に骨折するリスクが高まる。骨折への恐れから慎重な歩行を心がけるあまり、かえって不自然な歩行となり、転倒リスクが増大する場合もある。

視覚の低下も高齢者の転倒リスクに影響を与える。視力が低下すると、足元の障害物や地面の変化を見逃しやすくなり、つまずきや転倒のリスクが高まる。視覚情報が正確でないと、他の感覚を補うことが難しくなり、バランスを崩しやすくなる。

加えて、認知機能の低下も転倒に関与する。加齢により注意力や判断力が低下すると、複数のタスクを同時に行う際に注意が散漫になり、危険を認識するのが遅れることで転倒リスクが高まる。

以上のように、高齢者の身体の衰えは、筋力、平衡感覚、関節の柔軟性、反射神経、骨密度、視覚、認知機能など多くの要因が絡み合い、転倒のリスクを高めている。これらの要因を考慮した靴やインソールの設計は、高齢者の転倒を防止し、生活の質を向上させることができると考えた。

第3節 高齢者の足部機能の低下と歩行への影響

高齢者の足の衰えは、歩行能力の低下や転倒リスクの増加に直接的に影響を与える重要な要素である。以下に、足の衰えに関連する主な要因と、それが高齢者の生活にどのような影響を及ぼすかを述べる。

足部の筋力低下は、加齢に伴う一般的な現象であり、特に足指や足底の筋力が減少することが多い。これにより、足が地面をしっかりと捉える能力が低下し、歩行の安定性が損なわれる。足の筋力が低下すると、歩行中の蹴り出しや踏み込みが弱くなり、歩幅が狭くなるため、つまずきやすくなる。また、筋力の低下は、立位での安定性を保つことが難しくなり、転倒のリスクを増加させる。足関節の可動域の制限も高齢者における足の衰えの一因である(7)。

足関節の柔軟性が低下すると、足首の動きが制限され、歩行時の衝撃吸収能力が低下する。これにより、足が地面に適応する能力が損なわれ、不整地や段差のある場所での歩行が困難になる。足関節の硬さは、足首を使ったバランス調整が難しくなるため、バランスを崩しやすく、転倒につながりやすい(7)。

足底の感覚の鈍化も高齢者に見られる特徴である。足底には多くの感覚受容器（メカノレセプター）が存在し、地面からの情報を脳に伝える役割を果たしているが、加齢によりこれらの感覚が鈍化する。感覚が鈍化すると、足裏で感じる地面の感触が不明瞭になり、足の位置や地面の状態を正確に把握することが難しくなる。すると、バランスを崩しやすくなり、転倒のリスクが高まる(8)。

足の変形も高齢者に多く見られる問題である。代表的なものに外反母趾や扁平足があり、これらの変形は足の構造を変化させ、歩行に支障をきたす。外反母趾は、足の指が内側に曲がり、バランスが取りにくくなる一方で、扁平足は足のアーチが低下し、足全体のクッション性が損なわれる。これにより、足の痛みや疲労が増し、長時間の歩行が難しくなる。血行不良も高齢者の足に影響を与える要因である(7)。

加齢による血管の弾力性の低下や運動不足により、足の血流が悪くなり、冷えやしびれが生じることがある。血行不良は、足の筋肉や関節の柔軟性を低下させ、足の機能をさらに悪化させる可能性がある。以上のように、高齢者の足の衰えは、筋力低下、関節の可動域制限、感覚の鈍化、足の変形、血行不良など多岐にわたる要因が複合的に影響を与える。

これらの要因が歩行の安定性を損ない、転倒リスクを高めるため、高齢者の足に適した靴やインソールの提案を行う。

第4節 足底メカノレセプターの機能と歩行における役割

足の裏には、日常生活で歩く際に重要な役割を果たす多くのメカノレセプターが存在している。これらの受容器は、足の裏で受ける物理的な刺激を感知し、神経を通じて脳に伝えることによって、歩行のバランスや姿勢を調整するために欠かせない情報を伝える。足の裏に分布するメカノレセプターは、主に触覚、圧力、振動、体の動きに反応する。これにより、私たちは自分の足がどのように地面に接しているのか、またどのように動いているのかを認識することができる(8)。

足の裏に存在するメカノレセプターの種類として、代表的なものに「マイスナー小体」や「パチニ小体」があり、これらはそれぞれ異なるタイプの物理的刺激に反応し、足の裏での感覚を細かく分けて処理している。「マイスナー小体」は、皮膚の浅い部分に分布し、軽い触れ合いや細かな振動に敏感で、これにより、足の裏での微細な感覚変化を感じ取り、歩行や走行中に細かい調整を行うことができる。例えば、足の裏に小さな異物が触れたときや、地面の凹凸を感じ取るときに重要な役割を果たしている(8)。

一方、「パチニ小体」は、皮膚の深層や関節に存在し、振動や急激な圧力の変化に反応する。足の裏では、地面を踏んだ際の圧力の変化や、歩行時に足が着地した瞬間の衝撃を感知する。この情報は、足が地面にどれだけ強く接しているのか、また足の位置がどのように変わったのかを判断するために重要である。特に歩行や走行時において、地面との接触を通じて足の位置を正確に把握することで、体全体のバランスを保つことができる(8)。

また、足の裏には、「ルフィニ終末」というメカノレセプターも存在し、持続的な圧力や皮膚の伸び縮みを感知する役割を果たしており、足の裏での体重の移動や、長時間の立位や歩行による圧力の変化に対応している。このような感覚は、体重移動をスムーズに行うために欠かせない情報である。例えば、歩行中に足の裏で地面にかかる圧力がどのように変化するかを感じ取り、次の一步を踏み出すためのタイミングを適切に決定することができる(8)。

足の裏のメカノレセプターは、歩行や立位、走行などの動作において非常に重要な役割を果たす。これらの受容器は、足がどのように地面に接しているか、またその接触がどのように変化するかを細かく感知し、その情報を神経から脳に送ることができる。脳はこれらの情報を元に、足の動きを調整し、体全体のバランスを保つために必要な指示を出す。このメカニズムによって、スムーズに歩いたり走ったりすることができ、また不安定な地面や障害物に対応することができる(8)。

さらに、足の裏のメカノレセプターは、反射的な動作にも関与している。例えば、足の裏に急激な圧力が加わった場合、その情報はすぐに脳に伝達され、足を引き上げる動作が反射的に行われることがある。このような反射的な反応は、怪我を避けたり、足を守ったりするために重要な役割を果たす。特に、不安定な地面や予期しない障害物に直面したとき、足の裏のメカノレセプターが迅速に反応することで、体全体が素早く調整され、バランスを崩すことなく安全に動くことができる(8)。

メカノレセプターをトレーニングするためには、母趾の動きを促すため「タオルギャザー」が効果的であるといわれている。「タオルギャザー」とは、タオルを床に敷き、タオルの上に足を置く。次に足の指を使ってタオルを手繰り寄せる。タオルを端まで手繰り寄せたら、タオルをもとに戻す。この動作を繰り返すことで足裏の筋力が強化し、母趾の可動域を広げる効果がある(9)。

足の裏のメカノレセプターの働きは、日常生活の中で私たちが歩いたり立ったりする際の基本的な動作にとって非常に重要である。これらの受容器が正しく機能することで、安定した歩行や立位を維持でき、体全体のバランスを保ちながらスムーズに動くことができる。もしこれらのメカノレセプターに障害が生じると、歩行や立位が不安定になり、転倒や怪我のリスクが高くなる可能性がある。そのため、足の裏におけるメカノレセプターの健康を保つことは、生活の質を維持する上で非常に重要である(10)。

第3章 トレーニングインソールの開発

第1節 高齢者の転倒と身体的要因

高齢者の転倒事故は、健康への影響や生活の質の低下を招く大きな問題である。その原因の一つとして、加齢に伴うメカノレセプターの機能低下が挙げられる。メカノレセプターは皮膚や筋肉、関節に存在し、圧力や振動などの感覚を脳に伝える役割を果たし、特に足の裏に豊富に存在する。しかし、これらの感覚が鈍くなるとバランス感覚が低下し、転倒のリスクが高まる。この問題を解決するために、日常的にメカノレセプターをトレーニングできるインソールを提案する。

まず、インソールの表面に多様な材料の質感や表面の様子（テクスチャー）や突起を配置することで、足裏の感覚を刺激し、メカノレセプターを活性化させることができる。これにより、使用者が歩行中に自然と足裏の感覚を鍛えることができる。

第2節 トレーニングインソールの仕様と機能

本研究では、高齢者の転倒リスクを軽減することを目的として、バランス感覚の維持・向上を図るトレーニングインソールを提案する。インソールの設計においては、使用者が日常的に無理なく装着できることを重視し、履きやすさと機能性を両立させる工夫を施した。以下に、本研究で開発したインソールの特徴について説明する。（写真①参照）

まず、かかと部分には豚革を使用している。豚革は柔軟性があり、履き続けることで使用者の足に馴染みやすい特性を持つ。これにより、かかとをしっかりとホールドし、長時間装着していてもずれにくく、快適に使用できる構造となっている。かかと部分のホールド感が向上することで、歩行時の安定性が増し、余計な力を使わずに歩くことが可能となる。また、かかとがしっかりと支えられることで、歩行時の足のブレを抑え、疲労の軽減にもつながる。

次に、土踏まず部分のサポートについてである。本研究のインソールでは、サイズによって異なるが、土踏まず部分の厚さを他の部分よりも2～4mm厚く設計している。（写真②③参照）この構造によって、足裏への負担が分散され、土踏まずのアーチが適切に維持される効果が期待できる。土踏まずのアーチは歩行時の衝撃吸収の役割を果たしており、適切にサポートすることで、加齢や筋力低下によるアーチの低下（扁平足）を防ぐことができる。アーチが低下すると、歩行時の衝撃が直接足裏に伝わり、疲労が蓄積しやすくなるため、インソールによる適度なサポートが重要である。この設計によって、長時間の歩行でも疲れにくくなり、高齢者が安心して歩行できる環境を提供することができる。

さらに、足指の付け根部分には凹凸を搭載した。（写真④参照）これは、歩行時に地面を蹴り出す際に足指の付け根周辺に体重がかかることを利用し、接地面積を減らすことでメカノレセプターを刺激できることを目的としている。メカノレセプターは圧力や振動を感知してバランスを維持する役割を持つが、加齢によりその機能が低下す

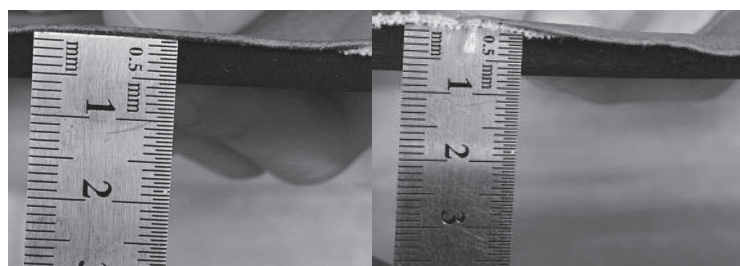
ることが知られている。そこで、インソールの基盤素材を線状に 6 本切り抜き、凹凸を作り出すことで、足指の付け根部分に適度な刺激を与える設計とした。この凹凸は、歩行時に自然に刺激を受ける構造になっており、特別なトレーニングを行わなくても、日常生活の中で足裏の感覚を活性化することができる。また、履きやすさを重視し、痛みを伴わずに心地よい刺激を得られるように工夫した。

最後に、母趾（親指）部分には凹みを設け、タオルギャザーの動作を取り入れた。タオルギャザーは、足指を使ってタオルをたぐり寄せる運動であり、足底筋群を鍛えるトレーニングとして知られている。本研究では、この動きをインソールのデザインに応用し、母趾の動きを促進する構造を導入した。具体的には、母趾が自然に動くような凹みを配置することで、無意識のうちに足指を使う機会を増やし、メカノレセプターの機能維持や向上を図ることを狙っている。母趾の動きが活性化されると、歩行時のバランス調整がスムーズになり、転倒リスクの軽減につながる。

以上のように、本研究のトレーニングインソールは、かかと部分のホールド性向上、土踏まずのサポート、足指付け根の凹凸による刺激、そして母趾の動きを促す構造を組み合わせることで、バランス感覚の維持・向上を目指している。



写真①



写真② 厚さ 5.0mm

写真③ 厚さ 7.0mm

第3節 メカノレセプター活性化で期待される効果

本インソールを中高年期から使用することで、加齢後の転倒リスクの低減が期待できる。

まず、足裏のメカノレセプターの維持である。加齢により鈍くなる足裏の感覚を適度に刺激し、地面の状態を正しく把握しやすくすることで、転倒しにくい状態を保つことができる(10)。

また、足のアーチを維持することで歩行の安定性が向上する。土踏まずをサポートすることで衝撃を吸収し、長時間の歩行でも疲れにくくなる。これにより、高齢になってもスムーズに歩くことができる。

さらに、足指の筋力維持による踏ん張る力の向上も重要なポイントである。足指の動きを促す設計により、無意識のうちに筋力を鍛えることができ、転倒しそうになったときに姿勢を立て直しやすくなる。

また、かかとをしっかりホールドすることで歩行時のブレを防ぎ、安定した歩行をサポートする。これにより、運動習慣が維持しやすくなり、体力や筋力の低下を防ぐことにもつながる。

結果として、転倒による骨折や寝たきりのリスクが減少し、健康寿命の延伸につながる。

第 4 章 実験① 二点識別覚検査 (TPD)

第 1 節 実験の概要

本実験では、高齢者の転倒予防を目的に、足指のグリップ運動を促すトレーニングインソールの有効性を検証した。6 名の被験者にインソール装着時と非装着時の足底感覚機能を測定するため、二点識別覚検査 (TPD) を実施し、対応のある t 検定で比較した(12)。結果、3 週間装着後に足底感覚機能の向上が見られ、足部の感覚刺激が向上することで転倒予防に有効である可能性が示された。また、本研究は本校の倫理審査承認後 (承認番号 25-001) を経て、対象者に説明・同意を得た上で実施した。

第 2 節 実験目的

本実験では、高齢者の転倒事故を目的として、足部の感覚機能やバランス能力を改善するトレーニングインソールの有効性を検証する。足底にはバランスに関与するメカノレセプターが多く存在しており、インソールによる機械的刺激がその機能を活性化させる可能性がある。被験者にインソールを装着させ、足底の感覚機能およびバランス能力の変化を測定、分析することで、インソールの転倒予防効果を明らかにすることを目的とする。

第 3 節 実験方法

二点識別覚検査は、足底の皮膚に触れる二点間の距離を変化させながら、ノギスを足底にあて、被験者がそれを一点か二点かを識別できるかどうかを調べる感覚機能の測定法である。今回は足底部 (左右) の同一点に対し、距離を段階的に狭めていき、二点として認識できなくなる最小の距離 (閾値) を測定した。被験者 6 名に対し、トレーニングインソールを装着した状態で、0 週、1 週、2 週、3 週目にそれぞれ測定を行った。

第 4 節 実験結果

以下のグラフに示すのは、6 名 (A~F) の被験者に対する、0 週目と 3 週目の右足および左足の二点識別覚の変化の結果である。数値は閾値 (mm) を表しており、値が小さいほど感覚が鋭敏であることを示す。結果から、多くの被験者において右足、左足ともに閾値が低下し、二点識別覚の改善が見られた。特に C、F において顕著な改善が確認されたことから、インソールによる足底感覚機能の向上効果が示唆された。

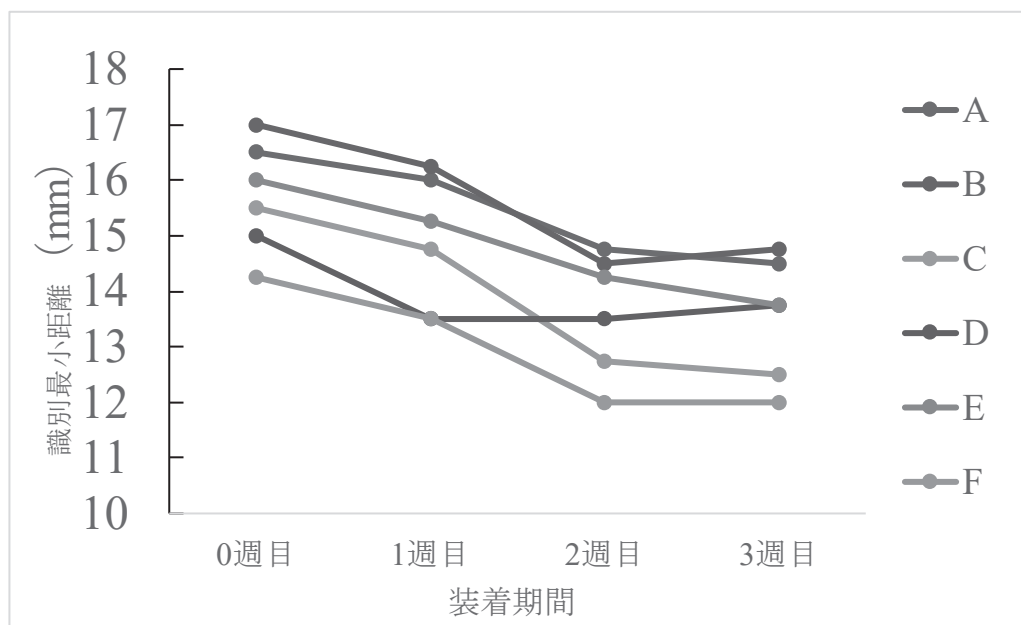


図 1 二点識別覚検査結果

第 5 節 考察

本実験の結果から、対応のある t 検定および Cohen's d の算出を実施した。インソール装着前の TPD (Two-Point Discrimination) 平均値は、右足が $15.92 \pm 1.20\text{mm}$ 、左足が $15.5 \pm 0.89\text{mm}$ であった。装着 3 週間後には、右足 $13.92 \pm 1.28\text{mm}$ 、左足 $13.17 \pm 0.93\text{mm}$ へと改善がみられ、いずれも統計的に有意な変化を示した (右足: $p < 0.001$, $d = 2.83$ 、左足: $p < 0.001$, $d = 3.85$)。この効果量は、Cohen の基準においても非常に大きな分類に該当し、インソールが足底感覚機能に及ぼす影響の大きさを裏付ける結果である。

この結果は、トレーニングインソールの構造によって、足底のメカノレセプターが日常の歩行動作を通して継続的かつ適度な刺激を受け続けたことに起因すると考えられる。特に、足指を動かすよう誘導する凹みや凹凸構造により、母趾や足指周囲の感覚器が積極的に活性化され、それが TPD の閾値低下に寄与したと推察される。一般に、メカノレセプターは適切な刺激を受けることで感受性が維持・向上するとされており、今回のような“履くだけ”のトレーニング刺激が有効に機能した一例と言える。

また、足底感覚の改善は転倒予防と密接に関係する。足底の触圧や位置感覚が鋭敏になることで、重心移動に対するフィードバックが迅速になり、姿勢の崩れや不意の揺らぎにも即座に反応できるようになる。これは結果的に、バランス制御能力の向上と転倒リスクの軽減につながるものであり、高齢者にとって非常に意義深い身体的変化といえる。

第 5 章 実験② Functional Reach Test (FRT)

第 1 節 実験の概要

本実験では、高齢者の転倒予防を目的に、足指のグリップ運動を促すトレーニングインソールの有効性を検証した。6 名の被験者にインソール装着時と非装着時の足底感覚機能の測定するため、Functional Reach Test (FRT) を実施し、対応のある t 検定で比較した(14)。結果、3 週間装着後に足底感覚機能の向上が見られ、足部の感覚刺激が向上することで転倒予防に有効である可能性が示された。また、本研究は本校の倫理審査承認後（承認番号 25-001）対象者に説明し同意を得て実施した。

第 2 節 実験目的

本実験の目的は、高齢者の転倒予防を目的として、足指のグリップ運動を促すトレーニングインソールの有効性を検証することである。インソール装着による足底への感覚刺激が、バランス能力や身体の安定性に及ぼす影響を明らかにするため、Functional Reach Test (FRT) を用いて足底感覚機能の変化を評価し、その効果を定量的に把握することを目的とする。

第 3 節 実験方法

本実験では、被験者 6 名に対し、FRT (Functional Reach Test) を用いて前方への重心移動能力およびバランス制御能力を評価した。FRT は、静的バランスの指標として広く用いられており、直立姿勢から腕を前方に最大限に伸ばしたときの可到達距離 (cm) を測定することで、転倒リスクの予測や身体安定性の把握が可能となる評価法である。

具体的には、被験者を壁に沿って立たせ、両足を肩幅に開いて自然な立位姿勢をとらせた後、利き腕を肩の高さで前方に水平に挙上させた状態から、体幹を動かさずに可能な限り手を前方へ伸ばしてもらった。測定時には、壁に目盛りを取り付け、腕の先端が到達した位置を記録した。なお、上肢を動かす際に踵が浮いた場合や、足の位置が動いた場合は無効とし、正確なバランス能力を測るために姿勢の保持にも注意を払った。

測定は、インソール非装着時（事前）および 3 週間のインソール装着後（事後）にそれぞれ 3 回ずつ実施し、各回の到達距離を記録したうえで、その平均値を分析に用いた。統計解析には、対応のある t 検定を使用し、インソールの使用によるバランス能力の変化が有意なものであるかを評価した。特に、FRT は日常生活動作における重心移動の能力と相関が高いため、本研究のインソールによるバランス改善効果を検証するうえで有効な指標となる。

第 4 節 実験結果

以下のグラフに示すのは、6 名 (A~F) の被験者に対する、0 週目と 3 週目の Functional Reach Test (FRT) の変化の結果である。数値は到達距離 (cm) を表しており、値が大きいほどバランス能力が高いことを示す。結果から、多くの被験者において到達距離が増加し、バランス能力の改善が見られた。特に A、C において顕著な改善が確認されたことから、インソールによる足底感覚機能および身体安定性の向上効果が示唆された。

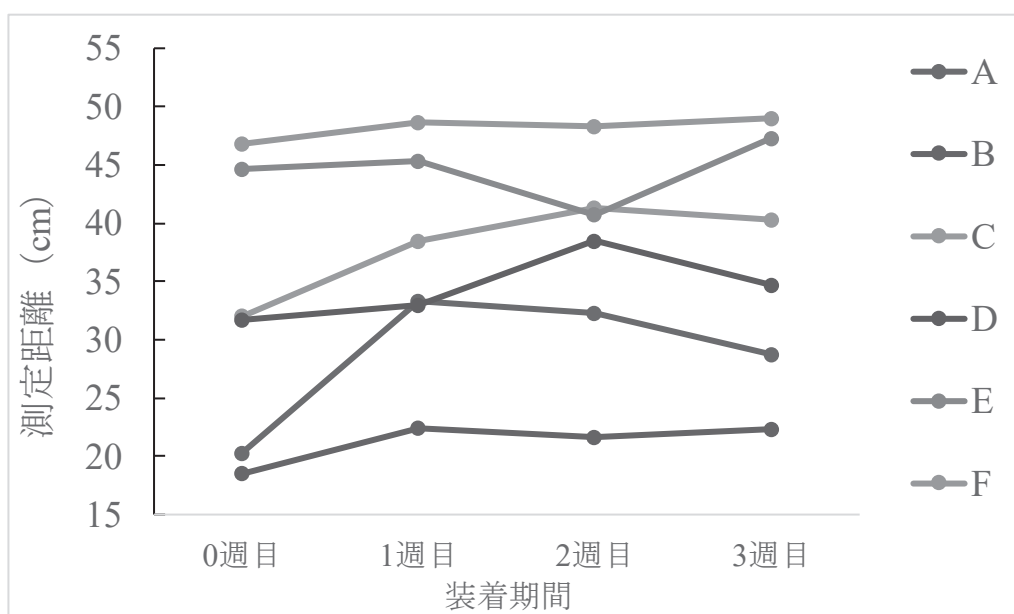


図 2 Functional Reach Test 結果

第 5 節 考察

本実験の結果から、対応のある t 検定と Cohen's d の算出を実施した。インソール装着前の FRT 平均値は $32.3 \pm 11.8\text{cm}$ であった。装着 3 週間後、FRT の数値は、 $37.05 \pm 10.50\text{cm}$ と有意な改善を認め ($p < 0.01, d = 1.65$)、大きな効果量が得られた。これらのことから、トレーニングインソールを 3 週間継続して使用することで、足底からの感覚入力が高まり、姿勢の安定性やバランス能力が向上したことが示唆される。

FRT の数値が有意に改善されたことは、前方への重心移動の能力が高まったことを意味しており、転倒のリスクが低下できる可能性がある。特に、効果量 $d = 1.65$ という大きな値は、インソールの使用が実際の生活においても十分な効果をもたらすことを示している。これは、足指を積極的に運動させる構造によって、足指の感覚が鋭くなり、バランスをとる力が強くなった可能性がある。

第 6 章 結論

第 1 節 まとめ

本研究では、メカノレセプターを刺激する構造を備えたトレーニングインソールの開発と、その効果検証を行った。インソールを 3 週間にわたり使用した結果、二点識別覚検査および FRT (Functional Reach Test) の結果から、感覚機能およびバランス能力の双方において有意な改善が確認された。

特に、足底感覚の鋭敏化および前方への重心移動能力の向上が認められ、インソールによる持続的な機械的刺激がメカノレセプターを活性化し、身体機能の改善につながる可能性が示された。

このことから、本研究で開発したインソールは、バランス能力と感覚機能の向上を通じて、高齢者の転倒予防に寄与する有効な手段となり得ると結論づけられる。特別な訓練を必要とせず、日常生活の中で自然にトレーニング効果が得られる点も、本インソールの大きな利点である。

第 2 節 今後の展望

本研究では、インソールの使用による感覚機能とバランス能力の短期的な改善を示すことができたが、今後の研究では以下のような拡張が望まれる。

まず、プラセボインソールを用いた対照群との比較実験が必要である。現状では、効果の因果関係を明確にするための対照群が存在していないため、見かけ上似たが機能を持たないインソールとの比較が不可欠である。これにより、インソールに備えられた構造の有効性を科学的に証明できる。

次に、長期的な使用による効果の持続性の検証も重要である。今回の研究では 3 週間という短期間での評価にとどまったが、数か月～数年にわたって継続使用した場合に感覚機能やバランス能力がどのように変化するかを追跡することで、日常的な使用の価値がより明確になる。

さらに、年齢・性別・体格など多様な対象者による実験も必要である。本研究では中年男性教員を対象としていたが、後期高齢者や女性、歩行困難を抱える人など、さまざまな背景を持つ被験者を対象とした検証を行うことで、より広範な効果の一般化が期待できる。

また、将来的な商品化に向けた展望としては、医療機関や福祉施設との連携のもとで臨床試験を行い、安全性・耐久性・コストパフォーマンスを検証することが必要である。現在の試作インソールは機能性重視であるが、デザイン性や素材の改良によって、より多くの高齢者が抵抗なく日常的に使用できる製品へと発展させる余地がある。さらに、靴メーカーや医療福祉機器企業との共同開発によって製品化が実現すれば、介護予防や自立支援の現場においても大きな効果が期待される。

今後は、「履くだけでバランス感覚を鍛えられる」インソールとして、日常生活に自然に溶け込む製品開発と普及活動を進め、高齢者の転倒事故を社会全体で減少させることを目指す。

承認番号	
25-00/	



謝辞

本研究を進めるにあたり、多大なるご協力をいただいた方々に深く感謝申し上げます。インタビュー調査にご協力いただいた神戸大学大学院保健学研究科教授の森山英樹様、藤原化工株式会社 シニアシューフィッター 藤原崇晃様ならびに実験にご協力いただいた本校男性教員6名の皆様に心より御礼申し上げます。また、本校神戸大学附属中等教育学校教諭の武藤柚奈先生、河合暁子先生、林兵馬先生に御礼申し上げます。皆様のご支援とご助言がなければ、本研究を無事に終えることはできませんでした。この場をお借りして、改めて感謝の意を表します。誠にありがとうございました。

付録 A 二点識別覚検査

2025 年 4 月 17 日～5 月 14 日に、本校神戸大学附属中等教育学校の教員 6 名にインソールを 3 週間装着していただき、0 週目から 3 週目まで 1 週間ごとに二点識別覚を測定した。(単位は mm)

被験者	0 週目	1 週目	2 週目	3 週目
A	17	16.5	15.5	15
B	17	16.5	14.5	15.5
C	16	15	13	13
D	15	14	14	14
E	16.5	15.5	15	14
F	14	13	12	12

表① 二点識別覚検査_結果 右足

t-検定: 一対の標本による平均の検定ツール		
	変数 1	変数 2
平均	15.9	13.9
分散	1.44	1.64
観測数	6	6
ピアソン相関	0.840	
仮説平均との差異	0	
自由度	5	
t	6.93	
P(T<=t) 片側	0.000481	
t 境界値 片側	2.02	
P(T<=t) 両側	0.000961	
t 境界値 両側	2.57	

表② 二点識別覚検査_検定 右足

被験者	0 週 目	1 週 目	2 週 目	3 週 目
A	16	15.5	14	14
B	17	16	14.5	14
C	15	14.5	12.5	12
D	15	13	13	13.5
E	15.5	15	13.5	13.5
F	14.5	14	12	12

表③ 二点識別覚検査_結果 左足

t-検定: 一対の標本による平均の検定ツール		
	変数 1	変数 2
平均	15.5	13.1
分散	0.80	0.742
観測数	6	6
ピアソン相関	0.650	
仮説平均との差異	0	
自由度	5	
t	8.04	
P(T<=t) 片側	0.000240	
t 境界値 片側	2.06	
P(T<=t) 両側	0.000481	
t 境界値 両側	2.57	

表④ 二点識別覚検査_検定 左足

付録 B FRT（ファンクショナルリーチテスト）

2025 年 4 月 17 日～5 月 14 日に、本校神戸大学附属中等教育学校の教員 6 名にインソールを 3 週間装着していただき、0 週目から 3 週目まで 1 週間ごとにファンクショナルリーチテストを実施した。（単位は cm）

被験者	0 週目	1 週目	2 週目	3 週目
A	20.3	33.3	32.3	28.7
B	18.5	22.4	21.7	22.3
C	32	38.5	41.3	40.3
D	31.7	33	38.5	34.7
E	44.7	45.3	40.7	47.3
F	46.8	48.7	48.3	49

表⑤ FRT_結果

t-検定: 一対の標本による平均の検定ツール		
	変数 1	変数 2
平均	32.3	37.1
分散	139	110
観測数	6	6
ピアソン相関	0.974	
仮説平均との差異	0	
自由度	5	
t	-4.03	
P(T<=t) 片側	0.00499	
t 境界値 片側	2.02	
P(T<=t) 両側	0.00998	
t 境界値 両側	2.57	

表⑥ FRT_検定

付録 C 対応のある t 検定と Cohen's d の算出

インソールが足底感覚とバランス能力に寄与するかを、対応のある t 検定と効果量 d を算出することで統計的に判断した。

【Python 使用】

統計解析コード

```
import os
import pandas as pd
import numpy as np
from scipy.stats import ttest_rel

# —— 設定 ——
input_dir = r"自分のパソコンで設定"
output_dir = r"自分のパソコンで設定"
os.makedirs(output_dir, exist_ok=True)

# —— 対象ファイル ——
files = {
    "FRT": "FRT_0_3.csv",
    "Left": "left_0_3.csv",
    "Right": "right_0_3.csv"
}

results = []

for key, fname in files.items():
    # CSV 読み込み（先頭行はヘッダー）
    path = os.path.join(input_dir, fname)
    df = pd.read_csv(path, header=0)

    # 「0 週目」「3 週目」を数値化して欠損除去
    week0 = pd.to_numeric(df["0 週目"], errors="coerce").dropna().values
    week2 = pd.to_numeric(df["3 週目"], errors="coerce").dropna().values

    # 対応を取るため最小長にトリム
    n = min(len(week0), len(week3))
    week0, week3 = week0[:n], week3[:n]

    # 対応のある  $t$  検定
    t_stat, p_val = ttest_rel(week0, week3)
```

```

# Cohen's d の計算
# 差分 week3-week0 の平均 ÷ 差分の不偏標準偏差
diff = week3 - week0
cohen_d = diff.mean() / diff.std(ddof=1)

# 結果を追加
results.append({
    "ファイル":    key,
    "比較":        "0 週目 vs 3 週目",
    "n":           n,
    "t-statistic": t_stat,
    "p-value":     p_val,
    "Cohen's d":   cohen_d
})

# —— 結果を DataFrame 化&CSV 出力 ——
res_df = pd.DataFrame(results)
out_path = os.path.join(output_dir, "paired_t_test_0_vs_3.csv")
res_df.to_csv(out_path, index=False, encoding="utf-8-sig")

print(f"検定結果を CSV に保存しました: {out_path}")
print(res_df)

```

参考文献

- (1)解良武士 (2002)「高齢者の転倒」
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jspta/9/1/9_1_7/_article/-char/ja
- (2)Tomoko Yamashita (2024)「虚弱高齢者における姿勢制御の改善」
https://researchmap.jp/read0115291/published_papers/45828694/attachment_file.pdf
- (3)内閣府 (2023)「高齢化の状況」
https://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/w-2023/html/zenbun/sl_1_1.html
- (4)消費者庁 (2022)「高齢者の不慮の事故」
https://www.caa.go.jp/policies/policy/consumer_safety/caution/caution_067/assets/consumer_safetycms205_221227_05.pdf
- (5)日本理学療法士協会 (2023)「転倒を予防して」
https://www.japanpt.or.jp/activity/asset/pdf/handbook18_whole_compressed.pdf
- (6)豊和グループ (2022)「高齢者の転倒・骨折の原因「サルコペニア」とは？」
- (7)上村一貴 (2009)「足底板が高齢者における歩行中の下肢関節運動に与える影響」
https://www.jstage.jst.go.jp/article/cjpt/2008/0/2008_0_A3P2029/_article/-char/ja/
- (8)マイナビコメディカル (2016)「上肢の筋活動にも影響あり？足底機能の重要性について」
<https://co-medical.mynavi.jp/contents/therapistplus/career/useful/976/>
- (9)恵佳和 (2008)「高齢者におけるタオルギャザー導入前後での効果」
https://www.jstage.jst.go.jp/article/kyushuptot/2007/0/2007_0_139/_article/-char/ja/
- (10)上川朗 (2021)「足底感覚入力の増強と視覚情報のフィードバックによる膝部動揺の制御を併用した立位姿勢制御」
https://i.kawasaki-m.ac.jp/mwsoc/journal/jp/2021-j31-1/P129-137_uckawa.pdf
- (11)グローバルノート (2023)「世界高齢化率 (高齢者人口比率)」
<https://www.globalnote.jp/post-3770.html>
- (12)野瀬友裕 (2009)「母趾足底部の触圧刺激が姿勢制御に及ぼす影響」理学療法科学学会誌
https://www.jstage.jst.go.jp/article/cjpt/2009/0/2009_0_A4P2047/_article/-char/ja/
- (13)野田市福祉部高齢者支援課 (年不明)「足裏の感覚と運動」
<http://mobile.city.noda.chiba.jp/kurashi/fukushi/hoken/1017562/1028870.html>
- (14)青山智(2008)『PT・OTのための測定評価 バランス評価』三輪書店
- (15)小原謙一(2013)『靴インソールによる足底刺激部位の違いが足圧中心動揺に与える影響』理学療法科学, 28(6): 801-804
https://www.jstage.jst.go.jp/article/rika/28/6/28_801/_pdf/-char/ja
- (16)佐々木 諒平(2010)『足趾機能がバランス能力に与える影響について』
https://www.jstage.jst.go.jp/article/ptcse/17/1/17_1_14/_article/-char/ja/