補助事業番号　2024M-450
補助事業名　2024年度　歩行中の床反力モーメントが下肢関節群統合制御に及ぼす効果検証と転倒リスク評価法の開発　補助事業
補助事業者名　九州産業大学　健康･スポーツ科学センター　安陪大治郎

１　研究の概要

直立二足歩行はヒト固有の移動形態であるが、腰痛や膝痛、最大疾走速度の遅さ、困難な出産など生物学的に多くの不利益がある。これらの中でも歩容調整能の低下や不安定な立位姿勢に起因する転倒事故は大きな社会問題となっている。驚いたことに歩行機能の低下や転倒リスクの増大は、疾患や加齢に関わらず健常者でも中年期に予兆が出現し始め、これが加齢に伴って致命的な転倒骨折事故に発展する（Rasmussen et al. 2019)。

歩行のような周期的動作では、主に脊髄系セントラル･パターン･ジェネレータ（CPG）が下肢関節群を統合制御することで歩容調整を成立させる。脊髄CPGによる下肢関節群の統合制御はPCL則を用いて可視化および数値化することができる（Ivanenko et al. 2008)。これまで、脊髄CPGによる歩容調整能は頑健性が高いと考えられてきたが、それは全ての関連先行研究が一定歩行速度で歩容調整能を評価してきたことに由来する。そこで申請者らは、トレッドミル速度を正弦波状に外部制御させる手法を確立したことで､歩容調整能に非侵襲的かつ連続的な介入を加えられるようになった。その結果、若年者でも運動不足者が速度変化する場合（Abe et al. 2022)、或いは不安定な履物で速度変化する場合（Abe et al. 2023）などに歩容擾乱が発生することが判明した。一方で回復戦略には大きな個人差がある（Horiuchi & Abe et al. 2023）ことが課題として残された。この理由の一つとして、これまで殆ど無視されてきたVFM（床反力モーメント≒地面と足底の接触面に発生する捻り）が有力なファクターとして注目されている（Ogihara et al. 2023)。本事業はVFMに対する実験的介入が歩容調整に及ぼす影響を定量化し、転倒機序を再定義する試みである。

２　研究の目的と背景

日本では約40年前に転倒事故対策として本格的にバリアフリーが社会実装され始めたが、高齢者の転倒事故死亡者数は減るどころか過去20年間で2.3倍も増加した(厚労省統計2018)。これは交通事故死の3.3倍に相当する。例えば歩容調整能力を低下させる要因の一つにハイヒール着用がある。我々は着脱式ハイヒールソケットを開発し踵面積を10倍に拡げたところ、速度変化に対する歩容変量の追従性が改善されることを明らかにしたが､個人差が大きいことも判明した。履物の底面積拡大は接触摩擦を増大させるが、雪面など低μ路面では効力を発揮しない。このジレンマに整合性を付ける鍵が床反力モーメント（VFM）である（Ogihara et al. 2023)。VFMと歩容調整能力の関連性は未解明であり、歩行中の動的バランスを見直す端緒になる。

そこで、これまで殆ど無視されてきた床反力成分の一つであるVFMと歩容調整能の関連性

を検討することにした。まず、歩行中の股･膝･足の3関節の角度変化を複数台の高速度カメラで撮像し、下肢3関節の統合制御則（PCL）とVFMの関連性を異なる歩行速度で確認した。次に、両手荷物持ちやハイヒール着用、加齢、速度変化など日常生活で起こり得る条件でVFMが下肢統合制御（≒歩容安定性）に及ぼす影響を検討する。最終的に歩容擾乱に関連する条件を特定し、その改善策を提言することを研究目標とした。

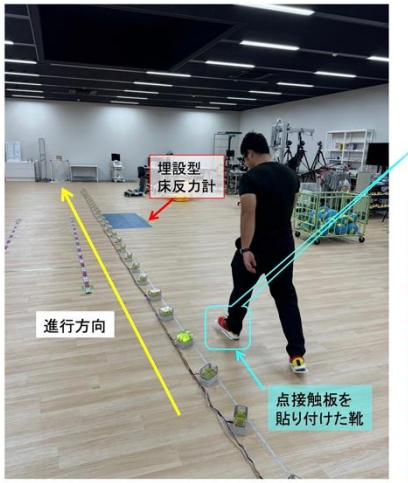
３　研究内容

床反力モーメントが下肢関節群統合制御に及ぼす効果検証手法の開発

(URL; https://ras2.kyusan-u.ac.jp/kyshp/KgApp/k03/resid/S001545)

本事業では4フェーズに分けて実験を行った。2024年度上半期は上記URLにも掲載したような様々な機材やギアを特注製作した。2024年度下半期に予備実験、本実験と進んだ。

1)　歩行路での床反力介入実験



自由歩行で速度規定するための電子ペーサー(特注製作)

軽量化点接触板(拡大図)

※ この設定は一定速度で歩行する場合の速度をかなり正確に統制可能であるが、速度変化には対応できない。
そこで次頁のように靴底に特注床反力計を取り付け、トレッドミルでの速度変動条件を進めている(次頁)。

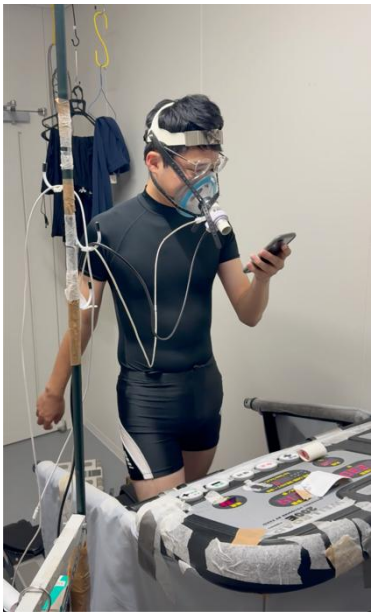
一般的に歩行路を自由歩行する場合、その速度を統制することが難しい。そこで左図のように電子ペーサーを特注製作し、「普通; 男性は時速4.5km/h、女性は4.2km/h」、「遅い; 男性は時速3.3km/h、女性は3.0km/h」、「速い; 男性は時速6.0km/h、女性は5.7km/h」で埋め込み式床反力計上を歩いた。設定条件は1. 統制条件（普通歩き）、2. 片腕を振りながら上体を正対させるスマホ歩行（下写真左）、3. 両腕を胸前で組んで上体を正対させる歩行（前頁写真中）、4. 点接触靴で自由歩行の4条件とした（前頁写真右）。我々の先行研究に倣い、3次元動作解析法を用いた動的バランスの評価を行った。

2)　トレッドミルでの歩行速度実験

歩行路での自由歩行では電子ペーサーを利用することで歩行速度を一定に保つことを可能としたが、速度変化には全く対応できない。そこでトレッドミルで歩行速度を正弦波状に変動させるプロトコールを上記条件で遂行した。トレッドミル歩行の場合、自由歩行時の埋め込み式床反力計は使えないため、左

下写真のようにウェアラブル床反力計を特注製作し、連続的な速度変化に伴う床反力モーメントの変化を測定した。

3） 代謝測定



1.統制条件、2.スマホ歩行、3.腕組み歩行、4.点接触靴歩行の4条件×速い～普通～遅い、の3速度で各4分間、酸素摂取量や二酸化炭素排出量を測定した（左写真参照）。このデータを最も早く論文化する予定である。

4） 簡便化･社会実装へ

ここまでに使用した機材代は全て併せると1億円を超えてしまう。社会実装するには費用対効果を考慮しなければならないため、9軸加速度計（1個11万円程度）を4個とスマートフォンを組み合わせて、ヒトの歩行中の動的バランスを評価することが出来ないか精度を検証する計画を練っている。掛かる費用が百分の一以下に抑えられる上、汎用性が高まる。

４　本研究が実社会にどう活かされるか ― 展望

本研究成果は若年者に対しては転倒骨折や靭帯損傷、妊婦の転倒流産などの甚大な健康被害予防､高齢者に対しては転倒骨折リスク低減による健康寿命延伸や介護負担軽減など社会全体に貢献する。

５　教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

ロコモーション研究を進化人類学的に発展させる大きな転機となる。下記の通り先行論文が受理されたところである。

６　本研究にかかわる知財・発表論文等（下線は代表者、点線は分担研究者）

【論文】

1. Kiyotaka Motoyama, Takehiro Tashiro, Akira Saito, Masahiro Horiuchi, Taisuke Sakaki, Daijiro Abe. (2025) Do speed amplitude and period affect gait variability and step followability under sinusoidal speed changing conditions? *Frontiers in Sports & Active Living*. Vol.7 Article ID:1602012 (*in press*).

【招待講演、学会発表】

1. 安陪大治郎, 本山清喬, 斎藤輝, 田代雄大, 堀内雅弘. (2024) 歩行速度変化は下肢協調制御にどのような影響を与えるのか？ 第78回日本人類学会大会ポスター発表
2. 安陪大治郎. (2024) 直立二足歩行における下肢関節群協調制御に影響を及ぼす因子.

第85回日本生理人類学会大会シンポジウム招待講演（杏林大学）

3. 安陪大治郎.（2025）進化という観点からロコモーション研究における代謝測定の意義を考える ～ それは生物学的不利益なのか、それとも利益なのか ～. 東大理学部人類学セミナー（東京大学）

７　補助事業に係る成果物

補助事業により作成したもの

【URL】 https://ras2.kyusan-u.ac.jp/kyshp/KgApp/k03/resid/S001545

埋め込み式床反力計横に設置された電子速度ペーサー

3Dプリンターで製作した点接触板

トレッドミル歩行中の床反力モーメントを測定するために特注製作された圧センサー靴

８　事業内容についての問い合わせ先

所属機関名：　九州産業大学健康･スポーツ科学センター
（キュウシュウサンギョウダイガク）
住　　所：　〒813-8503
福岡市東区松香台2-3-1
担 当 者：　教授 安陪 大治郎（アベ ダイジロウ）
担当部署：　産学共創･研究推進本部
（サンガクキョウソウ･ケンキュウスイシンホンブ）
E－mail：　abed@ip.kyusan-u.ac.jp
URL：　https://www.kyusan-u.ac.jp
https://ras2.kyusan-u.ac.jp/kyshp/KgApp/k03/resid/S001545