

ハイヒールなど湾曲した足底での歩行動作における 床反力の足底圧計測による再現性の調査

Investigating the reproducibility of ground reaction force measured by plantar pressure during walking with curved soles, such as high heels)

内田真菜¹ 中村ふみ子¹

Mana Uchida¹, Fumiko Nakamura¹

¹沼津工業高等専門学校 制御情報工学科

¹National Institute of Technology, Numazu College, Control & Computer Engineering

Abstract: With shoes that have curved soles, such as pumps, conventional methods for measuring plantar pressure cannot directly substitute for ground reaction force. In this study, as a first step toward realizing a clothing-type wearable device for measuring kinematics that does not depend of shoe shape, we investigated whether ground reaction force and the center of foot pressure can be estimated from plantar pressure data. Using pumps with different heel heights, we conducted walking experiments measuring plantar pressure, ground reaction force, and three-dimensional movement, and analyzed the relationship between the two and the influence of heel height.

1 はじめに

現在の日本では医療費が年々増加しており、その削減が課題となっている[1]。介護人材の求職者数も年々減少している[2]ため、個人が日々の健康状態を把握し、維持・管理できるシステムが有用であると考えられる。近年ではスマートウォッチなどのウェアラブルデバイスにより、心拍や心電図などから日々の体調管理を行うシステムが実用化されつつあるが、これらのデバイスは計測面が狭いため測定できる生体機能が限定されてしまう。この課題を解決するため、本研究は運動学・運動力学を用いて、体表面の広範囲において日々の健康状態をモニタリングする衣類型のウェアラブル IoT デバイスの開発を念頭に進めている。衣類型デバイスの実現には、正確な運動力学情報の取得が不可欠であり、まずその実現に必要な条件となる運動力学の解明に取り組むことが重要である。その第一歩として、本研究では足底が湾曲するパンプスでの歩行動作に着目し、靴の中に内蔵された足底圧計の計測データのみを用い

て、歩行時の正確な床反力や COP (足圧中心) を予測するアルゴリズムの開発が可能であることを明らかにすることを目的とする (図 1)。

2 先行研究並びに既存の製品

歩行や走行時の動作解析はバイオメカニクス分野以外の工学分野や医療分野でも研究が進んでいる。しかし、足底面を曲面とし、様々な靴の種類や実験環境に対応できる歩行中の分析は未だに課題が残されている。以下に、関連分野での足底圧と三次元動作に関する研究事例を紹介する。医療の分野において足底圧を用いた臨床実験[3]などが実施されてきている。また、お茶の水女子大学ではリハビリテーション医療の視点から 7 点の計測ポイントからなる足底圧測定装置の開発が進められてきた[4]。同志社大学においては、ウェアラブル型の床反力の計測器の開発がなされてきた[5]。三次元動作から歩行姿勢や動作の異常レベルの数値化を考案した報告もある[6]。この論文では、歩行の良し悪しは頭頂部の垂直方向の加速度や前額面上の水平方向への変位から決定されると報告されている。また、既に発売されている、足底圧や加速度計を内蔵したタイプのインソール型ヘルスマータ「ardi」[7]などもあるが、アルゴ

*連絡先：沼津工業高等専門学校制御情報工学科
〒410-8501 静岡県沼津市大岡 3600
E-mail: kyoumu@numazu-ct.ac.jp

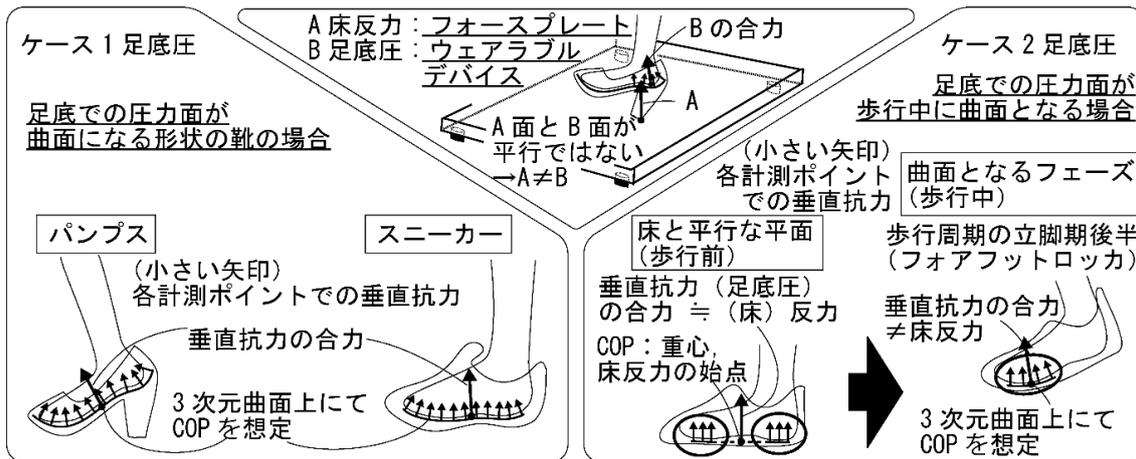


図 1: 足底が湾曲した際の床反力は足底圧で代用できるか？

リズム開発時、データ解析時ともに計測ポイントが一桁台の複数個所に限られているのではないかとインターネット上での公開情報からは読み取れる。また歩行前の静止時における足底の曲率は計測されたと公開情報から確認できるが、歩行中の曲率を考慮した COP かどうかは情報がなく、どのような方法で歩行姿勢や重心が決定され、健康状態が予測されているかは公開されていない。

3 本研究の意義

足底の圧力面が湾曲している場合、現在の靴の中にセンサシートを敷くようなウェアラブル型の計測では COP を正確に計測することができず、置き式のフォースプレートで計測できる床反力の代替にならないという課題がある[8]。本研究ではこの課題を解決するためのアルゴリズム開発の可能性を探る。

生体を扱う力学は剛体を扱う力学とは異なる。その一つ目の理由として、人体表面（歩行時であれば足底）付近や人体表面と接触するソックスや靴の内側の表面付近は弾性や塑性といった剛性とは異なる物性を考慮しなければならないことがあげられる。靴の内側（人体側）の足底圧を外側（床側）の床反力に代替できるのは、それらが平行かつ平面で間に存在する靴やソックスの素材が足裏に沿って曲がることかでき、弾・塑性の力の影響が誤差範囲である場合に限られる。そもそも、外力を人体の足底との接触面（靴下や靴の内側の表面）からの反力とするか、靴下や靴を身体の一部とみなし床からの反力とするかは、得たい結果によってどちらかを選択すべきである。二つ目の理由として、人は動作中に「転びそう」「痛い」「疲れる」など、危険察知を含めたさまざまな意識の介入によって次の動作が変化することがあげられる。これらの意識を取り除いた

物性だけで反応を実験し、そこから意識的な反応との差分が調査できるのであれば、それは湾曲した足底における反力の始点である COP や大きさや方向の解明としては理想的な方法である。しかし、人間と同じ物性で、同時に感覚を持たない人体モデルを作成し、動作させ、力学的な反応を確認することは現実的ではない。そこで以下の①から③の仮説を立て、湾曲（ヒール高）の異なるパンプス着用時の人の歩行実験から、計測結果を考察する。

①かかたが高いほど、歩行中の足底圧と床反力の大きさの倍率は不均一なる。低いほど倍率は一定になる。

②かかたが高いほど、身体の左右のバランスが悪く、不安定な（各歩での足圧、動作（特に各部の左右への移動）の周期中の変動量がランダム）歩行になる。また COP（足底圧に関しては、足底面が曲面の場合は平面に伸ばした各セルの圧力の総和で代用の移動範囲は、線形的に増加する。

③かかたが高いほど、転ばないための防御本能による意識の介入から、歩幅や足の上下幅が小さく制御され、倒れないように姿勢のバランスは保たれる。

もし仮説①が正しければ、かかたが低い場合は、足底圧から床反力は単純に歩行条件にて定数をかけるだけで予測でき、かかたが高い方が予測しにくくなる。次に②の仮説を立てた理由は、立脚期での重力方向の力を水平面上へ投影した場合の面（以後、重力方向の基底面と呼ぶ）の面積が、かかたが低いほど大きく、空間の他の 2 軸方向へ分解された反力が小さくなり、身体が安定しやすくなると考えられるからである。また、多くの人の経験則からも、かかたが低いほど疲れにくく、安定した歩行をしているという認識が一般的である。また COP は一般的に身体のバランスを表す指標とされている。かかたが

高いほど重力方向の基底面が小さくなることで、身体は不安定な状態になることから、COPの移動量も大きくなると予想した。しかし、②と③は相反する予測とも言える。③については、かかとが高くなるほどふくらはぎなどの筋力を働かせ、転ばないように意識、無意識のうちに気を付けるように身体が反応し、動作が小さく周期毎に均一な歩行になるという仮説である。すなわち、力学的な働きによる動作に意識、無意識の神経系の働きを上乘せして歩行運動を制御してしまうことを意味する。

4 実験

本実験は沼津工業高等専門学校「ヒトを対象とする研究倫理審査」(承認番号 2025-S07)により承認された上で行った。

4.1 実験参加者

実験は、20代の8人と40代の1人、50代の1人の健常成人の女性10人を対象に実施した(図2)。



図2: 左1cm, 右9cmのかかと高による歩行

4.2 計測機器

計測機器は、足底圧測定装置F-スキャンデータロガーシステム(ニッタ株式会社)と床反力計フォースプレート(KISTLER), 3次元加速度計GaitUp(株式会社クレアクト)を用いた。足底圧装置にはパンプスの中にセンサシートを装着するタイプを用い、床反力計は周りに全長360cmの木製の段差がない板を敷き片道の間とその上を1歩だけステップさせた。また3次元加速度計は、足部、手部、首部などに装着させた。

4.3 実験手順

参加者は、足底圧計を装着したヒール高5種類(1, 3, 5, 7, 9cm)の同じラインナップ(1cmのみ

類似した足底の形状のサンプル)パンプスを着用、靴下は綿100%の同じ素材のサンプルを履き、板と床反力計の上を6往復歩行した。その際、足底圧と床反力と3次元加速度を同時計測した。床反力計の上を踏むのは、全員右足で統一した。

5 結果

以下のグラフは、実験した中の一人の3, 9cmのかかと高におけるステップにて足底圧と床反力を計測した結果である。図3は、1ステップ中の圧力・反力の変動量、図4は、COPの軌道である。これらの結果は、参加者全員に共通した典型例と言える。足底圧の方が床反力よりも顕著にかかとの高さによって歩行周期の中の立脚期での圧力、COPの軌道に

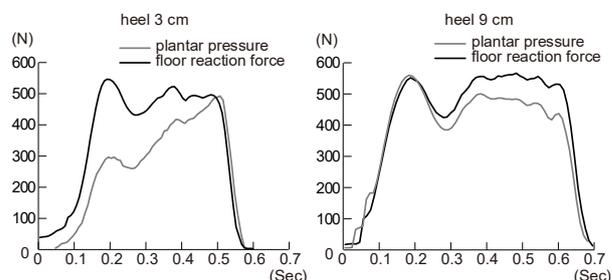


図3: 足底圧と床反力

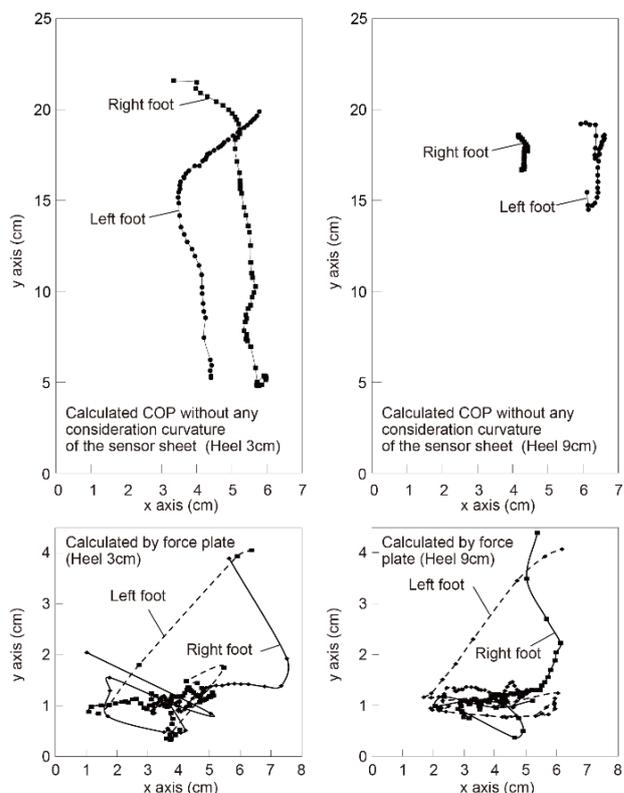


図4: COP

差があると見受けられた。また、3cm に比べ 9cm の方が立脚期の床反力と足底圧の差が少なく、COP の移動距離が小さくなる傾向にあった。

6 考察

2 ページ目で述べた仮説と 3 ページ目の結果を照らし合わせ考察する。仮説①においては、図 3 の足底圧と床反力の変動量のグラフから、かかとが高いほど両者の差が少なく、立脚期の周期の中での変位の差が均等に近い値を示している。よって、仮説とは逆の結果が得られたことになる。もし、このグラフが一般化できるのであれば、かかとが高い状態の方が、足底圧から床反力を予想しやすいことになる。本実験を行うまでに、参加者の中の 1 人において、ふくらはぎの 6 か所において筋電計測を行った際、それぞれの計測ポイントでかかとが高いほど力が入っているという結果が得られている。これらの結果から、力を入れた状態の方が、床反力と足底圧の変動量や変位は近い値を示し、予測しやすくなることが予想される。仮説②においても、仮説①と同様、図 4 から逆の結果が得られたことになる。これらの傾向は、全参加者において共通していた。平面で近似した足底圧から算出された COP、床反力から算出された COP とともに、足底の左右への変動は、かかとが高いほど小さいという結果になった。COP の変動が少ないことを、安定しているのととらえるよりも、硬直しているのととらえる見方が妥当である。この結果は、各歩の圧力が均一で COP の移動量が少ない方が安定していると考えた仮説②と逆説的な③の仮説が正しいことを意味する。同時計測を行った加速度計 GaitUp による歩行分析結果においても、全体的に左右へのバランスは高いかかとの方が良く、その各歩の分散も小さいという結果が示された。

7 むすび

本研究は、パンプスなど足底が湾曲した靴を着用した際、従来の足底圧計測手法はそのまま床反力の代用にはならないという課題を解決すべく実施した。その予測が可能であるか、足底の曲率の異なる 5 種類のかかと高のパンプスによる歩行実験を行った。その結果、かかとが高いほど不安定な歩行となり、足底圧、床反力が不均一で COP の左右方向への変動も大きくなるという仮説とは逆の結果が得られた。しかし、これらの結果は、かかと高が高い方が身体は安定してバランスが良くなり、数値の分散が小さくなったことを意味しているのではなく、ふくらは

ぎなどの筋に力が入り、身体が硬直していたという見方が適切ではないかと考えている。ヒール高の異なるパンプスを用いた足底圧、床反力、三次元動作計測による歩行実験の結果・考察を総合すると、足底圧データから床反力および COP を推定することは、ふくらはぎなどの筋肉に力を入れた状態の方がしやすい可能性があることが示唆された。今後は、歩行中の足底の湾曲の角度や全身の重心といったパラメータの解析により、足底の曲率やふくらはぎなどの筋力によらず、足底圧から床反力を予測できる方法を模索する予定である。

謝辞

本実験に参加いただきました沼津高専の女子学生有志の皆様、並びに教育後援会の皆様、心より深く感謝致します。

参考文献

- [1] 厚生労働省 保険局調査課: 令和 5(2023)年度 国民医療費の概況 (2025)
- [2] 厚生労働省 社会・援護局: 介護人材確保の現状について (2025)
- [3] 桐山希一: 足底圧の動的変化を指標とした健常成人の歩行制御および片麻痺歩行に関する研究, 医療保健学研究, 3, pp. 1-14 (2012)
- [4] Anzai, E., Yamashita, K., Matsunaga, Y., Sato, M., Menz, B. H., Ohta, Y.: Foot posture and dynamic foot function in people with and without knee osteoarthritis, *Osteoarthritis and Cartilage*, No. 25, pp. 131-132 (2017)
- [5] 辻内伸好, 伊藤彰人: 特集③: 人間工学のための計測手法 第 1 部: 動作計測 (3) 一力覚センサによる動作計測一, *人間工学*, Vol. 50, No. 5, pp. 243-255 (2014)
- [6] 米田昌弘, 福田寛二, 池淵充彦, 井上優, 大井通正, 三橋亜由美, 西田篤司, 松田昌弘, 村上昌宏, 糸数万紀: 体幹加速度を用いた歩行の質評価と跛行患者の歩容解析, *日本機械学会論文集*, Vol. 86, No. 886, pp. 20-00080 (2020)
- [7] Makuake: 姿勢が見える、だから変わる。足元からあなたを支える次世代スマートソール Ardi, <https://www.makuake.com/project/smartssole-ardi/> (2026 年 1 月 23 日)
- [8] Adachi, W., Tsujiuchi, N., Koizumi, T., Shiojima, K., Tsuchiya, Y., Inoue, Y.: Development of Walking Analysis System Using by Motion Sensor with Mobile Force Plate, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. C*, Vol. 78, No. 789, pp. 1607-1616 (2012)