

シューズのソール形状の違いが歩行時の推進力や衝撃力に及ぼす影響

小山 桂史^{1,2)}, 小島 賢悟

The influence of shoes sole shape on ground reaction force during walking

Keiji Koyama^{1,2)}, Kengo Kojima

要約：本研究ではシューズのソール形状が歩行時の地面反力変数に及ぼす影響について検討した。健康な男子大学生7名はソール形状の異なる2種類のシューズをそれぞれ着用して10mの平らな歩行路を歩行した。2種類のシューズは、平らなソール形状のシューズ (Control, 以下 CON) と前後に湾曲したソール形状のシューズ (Unstable shoes, 以下 UNS) であった。被験者は歩行開始地点から6mに埋設したフォースプレート上に右足を接地し、その時の地面反力はフォースプレートで記録された。地面反力の時系列データから接地時間、推進方向の地面反力の負の方向のピーク値 (Fy1)、正方向のピーク値 (Fy2)、鉛直方向の地面反力の二峰性の前半のピーク値 (Fz1)、後半のピーク値 (Fz2) を算出した。UNSの歩行時ではCONの歩行時と比べて、推進力の変数Fy1 (UNS; -163.3 ± 24.6 N, CON; -154.3 ± 28.1 N, $p < 0.05$) とFz2 (UNS; 690.0 ± 42.0 N, CON; 726.0 ± 61.1 N, $p < 0.05$) は有意に低値を示した。シューズのソール形状は歩行の時間的変数、衝撃力変数には影響しないが、推進力の地面反力の変数に影響し、Unstable shoesの着用は推進力の地面反力の変数を低下させることが示唆された。シューズのソール形状は歩行の推進力を左右する構造の一つかもしれない。

キーワード：衝撃力, 推進力, Unstable shoes, 接地, フォースプレート

Abstract : The purpose of this study was investigated that the influence of the shape of shoe sole on the ground reaction force variables during walking. Seven healthy males wore unstable shoes (UNS) and normal walking shoes (CON), and walked on 10m. UNS has rounded soles in the anterior-posterior direction, which has been commercially introduced. CON has flat soles in the anterior-posterior direction. The ground reaction force was measured when the subjects landed on their right foot within the force plate during walking. Contact time, negative and positive peak of propulsion ground reaction force (Fy1 and Fy2) and first and second peak of vertical ground reaction force (Fz1 and Fz2) were calculated. The walking with UNS was lower Fy1 (UNS; -163.3 ± 24.6 N, CON; -154.3 ± 28.1 N, $p < 0.05$) and Fz2 (UNS; 690.0 ± 42.0 N, CON; 726.0 ± 61.1 N, $p < 0.05$) compared with walking with CON. These results suggested that the shape of shoe sole affected the propulsion force during walking, particularly the sole of the unstable shoes decreased propulsion force. Adjusting the sole of shoes according to individual conditions may contribute to improved walking ability.

Key words : Impact force, Propulsion force, Unstable shoes, Foot contact, Force plate

1) 桐蔭横浜大学スポーツ科学部
2) 桐蔭横浜大学大学院スポーツ科学研究科

1. Faculty of Sports Science, Toin University of Yokohama, Kanagawa, JAPAN
2. Graduate School of Sport Sciences, Toin University of Yokohama, Kanagawa, JAPAN

I. 背景

歩行の立脚期前半では踵着地に伴い後足部に地面から体重よりも大きな衝撃力が作用し、後半の踵離地からつま先離地までは身体を推進させるために拇指球付近の前足部に大きな力が作用する (Jacobs et al. 1972). 踵着地に伴う衝撃力が瞬間的に大きくなることや、繰り返し作用することはアキレス腱炎、足底筋膜炎、シンスプリント、膝関節障害 (Radin et al. 1991) などの怪我の要因につながる (Folman et al. 1986; Nigg et al. 1987). 一方で、立脚期後半の地面を押す力は推進力につながる。このように、歩行の立脚期前半と後半では力変数の意味は異なるため、立脚期前半と後半に区別して力変数を考える必要がある。歩行の力変数は鉛直方向、推進方向、左右方向の3方向の地面反力にわけてフォースプレートで計測され、評価されてきた (Hasan et al. 1991). 鉛直方向の地面反力は二峰性の波形を示し (Keller et al. 1996), 前半の峰は怪我の因子との関連で評価されてきた (Jacobs et al. 1972). また推進方向の地面反力は、立脚期前半では推進方向と逆向きの減速成分の力が発揮され、後半では推進方向と同じ向きの加速成分が発揮される。減速成分と加速成分は推進力として評価されている (Tibone et al. 1986).

ヒトの身体運動時の怪我予防や推進力を促進させる一つの道具としてシューズがある。シューズは、ヒトの身体運動に伴う衝撃を緩衝して怪我を予防する衝撃緩衝機能、運動能力を高める弾性もしくは反撥機能の双方を考えて開発されている。Unstable shoes (以下、UNS) と呼ばれるシューズのソールは前後に湾曲した形状で、着用者の歩行姿勢を不安定にさせ、着用者にトレーニング効果を与えるシューズとして開発された (Nigg et al. 2006). 事実、UNSの着用時では平らなソール形状のシューズ着用時と比べて、姿勢が不安定に強いられることが知られている (Nigg et al. 2012). また歩行時の下肢筋活動量はUNSの着用時では平らなソール形状のシューズと比べて高くなり、酸素摂取量も高くエネルギー消費量が増大することが報告されている (Koyama et al. 2012). これらの先行研究に基づくと、UNSといった特殊なソール形状を持つシューズは歩行の衝撃力、もしくは推進力が変化するために、ヒト生体内の筋活動量やエネルギー消費量も増幅することが予測される。しかしながら、UNSのようなシューズのソール形状が歩行時の地面反力変数に及ぼす影響は十分に見解が得られてない。そこで本研究では前後に湾曲した特殊なソール形状を持つUNSと平らなソール形状のシューズをそれぞれ着用した歩行時の地面反力変数を比較することで、シューズのソール形状が歩行時の地面反力変数に及ぼす影響を検討した。もしもソール形状が歩行時の地面反力変数に影響するのであれば、シューズのソール形状は歩行時の衝撃緩衝機能、もしくは推進機能を高められる方法の一つとして考え

られ、今後のシューズ製品の開発にも期待される。

II. 方法

1. 被験者：

健康な男子大学生7名(年齢:20.9 ± 0.38歳, 身長:1.73 ± 0.04m, 体重:62.8 ± 7.6kg)がソール形状の異なる2種類のシューズ、平らなソール形状のシューズ(以下、CON)と先行研究(Koyama et al. 2012)と同様の前後に湾曲したソール形状のUNSをそれぞれ着用して平らな歩行路を歩行した。全ての被験者は日常生活で市販されている平らなソール形状のシューズを着用し、全ての被験者のシューズのサイズは27.0cmであった。いずれの被験者も実験実施前の3カ月以内には下肢への外傷歴が無く、運動習慣も無い者であった。本研究の運動プロトコルを実施する前に、被験者には下肢筋群のストレッチを実施させ、身体に不具合が無いことを確認させ、その後の運動で怪我が起こらないように準備させた。その後、被験者には2種類のシューズで運動プロトコルと同じ条件で練習させ、歩行の歩様を調節することなく、足の接地がフォースプレート内に収まることを確認した。被験者には本研究に参加するにあたり、本研究の目的や方法、実験の実施に伴う注意事項や危険性を口頭で説明して、本研究に参加する同意を得た。また本研究はヘルシンキ宣言に記載された規定に基づいて実施した。

2. 運動プロトコル：

被験者はCONとUNSのそれぞれのシューズを着用して10mの平らな歩行路を歩行した。被験者には歩く時には、歩幅、歩数、歩行速度などを意図的に変えることなく、目線は前方に向けて歩くように指示した。被験者の右足が歩行開始地点から6m離れて埋設されたフォースプレート(9281E, Kistler, Switzerland)に収まったことを確認し、その着地が不自然な動作ではなかったことを視覚的および被験者に口頭で確認した。CONとUNSの各条件での試技は、成功試技が3回ずつ得られるまで実施した。

3. 地面反力変数の分析：

接地中の地面反力はフォースプレートによってサンプリング周波数1KHzでアンプを介して記録され、その後、アナログデジタル変換機(PH-770; DKH, Tokyo)を介してパーソナルコンピュータに記録された。歩行時の鉛直方向、進行方向の地面反力のデータは分析解析ソフト(TRIAS, DKH, Tokyo)を使用して衝撃力と推進力として評価された。

図1ではUNSを着用した時の推進方向および鉛直方向の地面反力を示した。接地時間は、鉛直方向の地面反力のゼロが正の値になった瞬間から正の値がゼロに戻った瞬間ま

での時間として算出した。推進方向の地面反力の負のピーク値 (Fy1) と正のピーク値 (Fy2)、鉛直方向の地面反力の二峰性の前半のピーク値 (Fz1) と後半のピーク値 (Fz2) を算出した。Fy1, Fy2, Fz2 を推進力の変数, Fz1 を衝撃力の変数として評価した。推進力の変数 Fy1, Fy2, Fz2 および衝撃力の変数 Fz1 はそれぞれ試技3回の平均値として算出して、条件間で比較した。

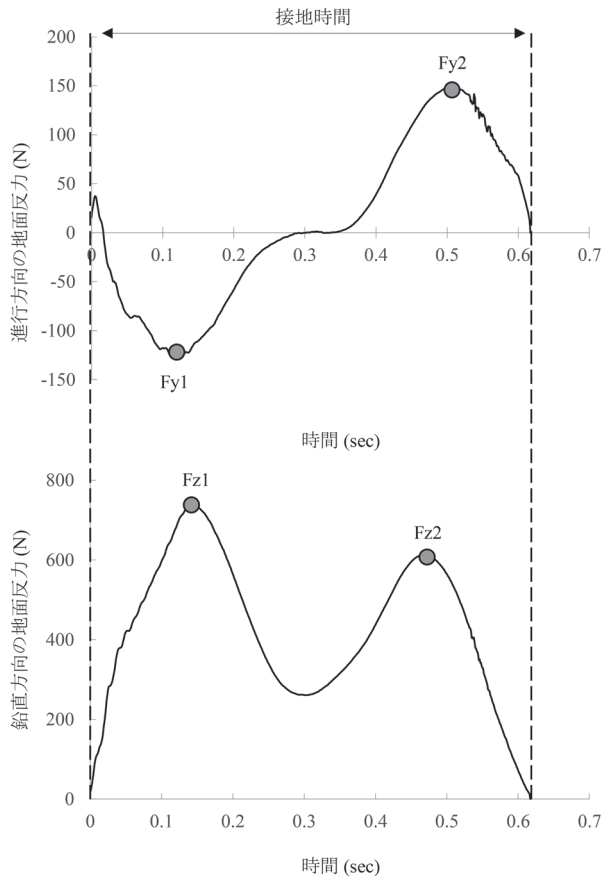


図1 Unstable shoes で歩行時の地面反力
Fy1: 推進方向の地面反力の負のピーク値, Fy2: 推進方向の地面反力の正のピーク値, Fz1: 鉛直方向の地面反力の二峰性の前半のピーク値, Fz2: 鉛直方向の二峰性の後半のピーク値を示した。

4. 統計：

各測定項目の数値は平均値±標準偏差で示された。接地時間, Fy1, Fy2, Fz1, Fz2 の CON と UNS のシューズ間による差の検定は対応のある t 検定を使用して、危険率検定 5% 未満 (p < 0.05) を有意と判定した。

III. 結果

CON と UNS で歩行時の接地時間, Fy1, Fy2, Fz1, Fz2 を表1に示した。UNS の歩行時では CON の歩行時と比べて、推進力の変数 Fy1 (UNS; -163.3 ± 24.6 N, CON; -154.3 ± 28.1 N, p < 0.05) と Fz2 (UNS; 690.0 ± 42.0 N, CON; 726.0 ± 61.1 N, p < 0.05) は有意に低値を示した。一方、接地時間, Fy2, 衝撃力の変数の Fz1 には差が見られなかった。

表1 各シューズで歩行時の地面反力の変数

	UNS	CON	p値
接地時間 (sec)	0.65 ± 0.02	0.66 ± 0.03	0.211
Fy1 (N)	-163.3 ± 24.6	-154.3 ± 28.1	0.038 *
Fy2 (N)	160.6 ± 11.6	163.9 ± 14.2	0.523
Fz1 (N)	760.0 ± 70.9	763.5 ± 93.5	0.747
Fz2 (N)	690.0 ± 42.0	726.0 ± 61.1	0.012 *

各項目の数値は平均値±標準偏差で示した。UNS: ソール形状が前後に湾曲した Unstable shoes, CON: ソール形状が平らなシューズ, Fy1: 推進方向の地面反力の負のピーク値, Fy2: 推進方向の地面反力の正のピーク値, Fz1: 鉛直方向の地面反力の二峰性の前半のピーク値, Fz2: 鉛直方向の二峰性の後半のピーク値を示した。* は統計の結果, p < 0.05 を示した。

IV. 考察

本研究では Unstable shoes といった前後に湾曲した特殊なソール形状を持つシューズを使用して、シューズのソール形状が地面反力の変数に及ぼす影響を検討した。その結果、シューズのソール形状は衝撃力ではなく、推進力に影響を及ぼし、Unstable shoes のソール形状は通常の日常生活で着用する平らなソール形状のシューズよりも推進力を低下させることが明らかとなった。

歩行の接地時間および衝撃力変数の Fz1 は Unstable shoes と平らなソール形状のシューズで変わらなかった。足が地面に着地した衝撃力が異なる一つの理由に足関節動作の違いが考えられる。ランニングにおける衝撃力の大きさは着地動作が関係し (Sun et al. 2018), 裸足時ではシューズ着用時よりも歩幅が小さく、足関節の背屈角度が小さくなり前足部で着地することで、衝撃力が小さくなることがわかっている (Lieberman et al. 2010)。他の運動のドロップジャンプの着地においても、着地後の衝撃力は足関節動作が関与している (Koyama et al. 2018)。本研究では着地動作を定量していないが、接地時間や Fz1 がシューズ間で変わらなかったことはシューズのソール形状が歩行の着地時の足関節動作には影響しなかったことが推測された。

シューズは衝撃力を軽減することを一つの目的として製造されている (Cavanagh et al. 1981)。移動運動で作用する衝撃力は体重の5倍に達することもあり、それが繰り返

し作用することはアキレス腱炎、足底筋膜炎、シンスプリント、膝関節障害 (Radin et al. 1991) などの怪我を引き起こす要因であることが考えられている (Folman et al. 1986; Nigg et al. 1987). Unstable shoes は歩行時の下肢筋活動量を高めて酸素消費量を増加させ (Koyama et al. 2012)、着用者の身体的なトレーニング効果を促進させるシューズである (Turbanski et al. 2011). Unstable shoes を着用したとしても平らなソール形状のシューズと比べて $Fz1$ が増大しなかったことを考えると、着地時の衝撃力に耐えるために下肢筋活動量が要求されているとは考えにくい。日常生活でのトレーニング効果を意図して Unstable shoes を着用したとしても衝撃力が原因で下肢の障害が発生する確率は平らなソール形状のシューズと比べて変わらないことも推測される。したがって、Unstable shoes によるソール形状の不安定さは歩行時の下肢障害の発生する確率を高めることなく、トレーニング効果を誘発できることが示唆された。

一方で、歩行の推進力変数である $Fz2$, $Fy1$ は、Unstable shoes の歩行時が平らなソール形状のシューズの歩行時と比べて低値を示し、推進力が小さくなることが示唆された。Unstable shoes はヒトの日常生活の姿勢を意図的に不安定にさせるため、着用者は姿勢を安定させるために下肢筋群の力発揮が必要とされて身体的なトレーニングにつながる。事実、Unstable shoes の着用時では平らなソール形状のシューズを着用した時よりも下肢筋群の力発揮が増幅し (Maffiuletti 2012)、どの歩行速度においてもエネルギー消費量が高まることが知られている (Koyama et al. 2012)。Unstable shoes の開発目的と科学的なエビデンスに基づく、Unstable shoes の着用した歩行では平らなソール形状のシューズよりも主に姿勢を安定させるために余計な力発揮を要求されて (Landry et al. 2012)、歩きづらくなる。 $Fz2$ は、歩行の身体を推進させる動作時に発揮される鉛直方向の地面反力である。通常の平らなソール形状のシューズであれば、推進時には前足部の拇指球付近で力を発揮する。しかしながら、Unstable shoes ではその力に加え、姿勢を制御する力発揮も必要となり、 $Fz2$ の推進方向への力発揮が分散されて低下することが考えられた。また $Fy1$ は着地時の減速成分を示し、この減速成分が大きくなると、推進方向への制動が作用して、推進力が低下する。Unstable shoes では $Fy1$ が高く、着地時での歩行姿勢を維持する力が要求され、減速成分の力も大きくなったことが考えられる。これらのことから、シューズのソール形状は歩行時の推進力に影響して、Unstable shoes のような前後に湾曲したソール形状は推進力の地面反力の変数を低下させることが示唆された。

本研究ではシューズのソール形状が歩行時の地面反力の変数に及ぼす影響を明らかにしたものの、いくつかの点については課題も残る。まず本研究では極端にソール形状が

異なるシューズを使用した、どの程度まで形状が異なれば、歩行時の地面反力の変数に影響を及ぼすかまでは明らかではない。また本研究で使用した2種類のシューズは重さ、素材が異なるため、これらの因子が影響した可能性があり、今後はこれらの要因も排除した上で、ソール形状が地面反力の変数に及ぼす影響を検討する必要がある。Unstable shoes で歩行時の推進力成分は平らなソール形状のシューズと比べて小さかったにも関わらず、接地時間は変わらなかった。このことは、推進させる時の下肢関節動作がシューズ間で異なるのかもしれない。Unstable shoes と平らなソール形状のシューズでは歩行時の股関節、膝関節、足関節動作が異なっている (Romkes et al. 2006)。今後、ソール形状による推進力の違いを関節動作から説明する必要がある。これらの課題点は残っているものの、本研究の結果は今後、傷害予防もしくは身体運動能力の向上の観点からシューズのソール形状を考える必要な情報になるであろう。

文 献

- Cavanagh, P.R., Williams, K.R., and Clarke, T.E. (1981) A comparison of ground reaction forces during walking barefoot and in shoes. *Biomechanics VII-b*, 3: 151-156.
- Folman, Y., Wosk, J., Voloshin, A., and Liberty, S. (1986) Cyclic impacts on heel strike: a possible biomechanical factor in the etiology of degenerative disease of the human locomotor system. *Arch. Orthop. Trauma. Surg.*, 104: 363-365.
- Hasan, S.S., Edmondstone, M.A., Limbird, T.J., Shiavi, R.G., and Peterson, S.W. (1991) Reaction force patterns of injured and uninjured knees during walking and pivoting. *J. Electromyogr. Kinesiol.*, 1: 218-228.
- Jacobs, N.A., Skorecki, J., and Charnley, J. (1972) Analysis of the vertical component of force in normal and pathological gait. *J. Biomech.*, 5: 11-34.
- Koyama, K., Naito, H., Ozaki, H., and Yanagiya, T. (2012) Effects of unstable shoes on energy cost during treadmill walking at various speeds. *J. Sports. Sci. Med.*, 11: 632-637.
- Koyama, K., and Yamauchi, J. (2018) Comparison of lower limb kinetics, kinematics and muscle activation during drop jumping under shod and barefoot conditions. *J. Biomech.*, 69: 47-53.
- Landry, S.C., Nigg, B.M., and Tecante, K.E. (2012) Walking in an unstable Masai Barefoot Technology (MBT) shoe introduces kinematic and kinetic changes at the hip, knee and ankle before and after a 6-week accommodation period: a comprehensive analysis using principal component analysis (PCA). *Footwear. Science.*, 4, 101-114.
- Lieberman, D.E., Venkadesan, M., Werbel, W.A., Daoud, A.I., D'Andrea, S., Davis, I.S., Mang'eni, R.O., and Pitsiladis, Y. (2010) Foot strike patterns and collision forces in habitually barefoot versus shod runners. *Nature.*, 463: 531-535.
- Maffiuletti, N.A. (2012) Increased lower limb muscle activity induced by wearing MBT shoes: physiological benefits and potential concerns. *Footwear. Science.*, 4: 123-129.
- Nigg, B.M., Bahlsen, H.A., Luethi, S.M., and Stokes, S. (1987) The influence of running velocity and midsole hardness on external impact forces in

- heel-toe running. *J. Biomech.*, 20: 951-959.
- Nigg, B., Hintzen, S., and Ferber, R. (2006) Effect of an unstable shoe construction on lower extremity gait characteristics. *Clin. Biomech.*, 21: 82-88.
- Nigg, B., Federolf, P.A., von Tscharnner, V., and Nigg, S. (2012) Unstable shoes: functional concepts and scientific evidence. *Footwear. Science.*, 4: 73-82.
- Radin, E.L., Yang, K.H., Riegger, C., Kish, V.L., and O'Connor, J.J. (1991) Relationship between lower limb dynamics and knee joint pain. *J. Orthop. Res.*, 9: 398-405.
- Romkes, J., Rudmann, C., and Brunner, R. (2006) Changes in gait and EMG when walking with the Masai Barefoot Technique. *Clin. Biomech.*, 21: 75-81.
- Sun, X., Yang, Y., Wang, L., Zhang, X., and Fu, W. (2018) Do strike patterns or shoe conditions have a predominant influence on foot loading? *J. Hum. Kinet.*, 64: 13-23.
- Tibone, J.E., Antich, T.J., Fanton, G.S., Moynes, D.R., and Perry, J. (1986) Functional analysis of anterior cruciate ligament instability. *Am. J. Sports. Med.*, 14: 276-284.
- Turbanski, S., Lohrer, H., Nauck, T., and Schmidtbleicher, D. (2011) Training effects of two different unstable shoe constructions on postural control in static and dynamic testing situations. *Phys. Ther. Sport.*, 12: 80-86.