足部接地パターンがランニングにおける 推進特性に及ぼす影響

Effect of Foot Strike Pattern on Propulsion in Running

肥田 直人¹⁾ 石井 慎一郎²⁾ 山本 澄子³⁾

NAOTO HIDA, RPT¹⁾, SHINICHIRO ISHII, PhD²⁾, SUMIKO YAMAMOTO, PhD³⁾

¹⁾ Honmoku Hospital: 11-5 Honmokusannotani, Naka-ku, Yokohama-shi, Kanagawa 231-0824, Japan TEL +81 45-621-2445
E-mail: 15s3054@g.iuhw.ac.jp

²⁾ Kanagawa University of Health and Welfare Graduate School

³⁾ International University of Health and Welfare Graduate School

Rigakuryoho Kagaku 31(6): 815-818, 2016. Submitted May 16, 2016. Accepted Jul. 8, 2016.

ABSTRACT: [Purpose] This study investigated differences in forefoot and hindfoot strike patterns on propulsion in running. [Subjects and Methods] The subjects were 18 healthy adults. Forefoot strike running (FR) and hindfoot strike running (HR) were measured using a 3D motion analysis system. [Results] In HR, forward transfer of the center of gravity in the stance phase was large, whereas it was large in the swing phase of FR. In HR, the vertical component of the ground reaction force (GRF) was large in the first half of the stance phase, and in FR, the vertical and anterior components of GRF were large in the latter half. In HR, a large torque was generated in the posterior direction in the first half of the stance phase. [Conclusion] It was found that in HR, forward propulsion was generated through reduction of the impact of heel strike, whereas in FR, it was generated by striking the ground hard.

Key words: running, foot strike pattern, propulsion

要旨:〔目的〕本研究では、ランニングにおける前足部接地と後足部接地の推進特性の違いを調べた。〔対象と方法〕対象は健康成人18名。三次元動作解析装置を用いて前足部から接地したランニングと、後足部から接地したランニングを計測した。〔結果〕後足部接地では立脚期に重心前方移動が大きく、前足部接地では遊脚期に大きかった。後足部接地では立脚前半における床反力鉛直成分が大きく、前足部接地では立脚後半における床反力鉛直・前方成分が大きかった。後足部接地では、立脚前半に大きな後方への回転力が生じた。〔結語〕後足部接地では衝撃を減らすことで前に進み、前足部接地では地面を強く蹴ることで前に進むという特性がみられた。

キーワード: ランニング, 足部接地パターン, 推進

¹⁾ 本牧病院：神奈川県横浜市中区本牧三之谷11-5 (〒231-0824) TEL 045-621-2445

²⁾ 神奈川県立保健福祉大学大学院

³⁾ 国際医療福祉大学大学院

I. はじめに

これまで、ランニングの足部接地パターンは、後足部接地（rearfoot strike, 以下 RFS）が一般的であり、一般のマラソンランナーを調査した研究においても全体の 98.12% のランナーが RFS を選択していたとの報告がなされている¹⁾。しかし、近年のマラソン競技において、速いタイムを出しているケニアやエチオピアの選手は前足部部地（forefoot strike, 以下 FFS）を選択する傾向にあり、マラソンの世界記録保持者でケニア出身の選手も FFS であったことが報告されている²⁾。

RFS と FFS に関しては、常にランニングシューズを着用して走るランナーは RFS を選択し、対照的に東アフリカのランナーのように常に裸足で走る習慣のあった長距離ランナーは FFS を選択すること、また FFS では接地時の衝撃力が少ないとの報告がなされている³⁾。そのため、日本人のようにクッション性の良い靴を履いて育ったランナーは、靴を履くことで着地時の衝撃を軽減させているが、東アフリカのランナーのように靴を履かないで育ったランナーは、自然に FFS を選択して衝撃を軽減させていることが推察される。

FFS が足部接地時の衝撃が少ない理由として、吉野⁴⁾は FFS では接地時の衝撃を足のアーチやアキレス腱、ふくらはぎの筋肉などで吸収できるからだとして述べている。このような考えから、ランニングでは RFS よりも接地時の衝撃が少ない FFS の方が適しているという考えが広まってきている。それに伴い、靴を履いて育ったランナーにおいても、あえて FFS を選択するランナーが増加している。しかし、FFS に意識的に変更したランナーにおいて第 2 中足骨の疲労骨折を呈したとの報告⁵⁾や、FFS ではシンスプリントの発生リスクが高まるとの報告⁶⁾がなされており、RFS と FFS のどちらの足部接地パターンが良いのかは現在も議論がなされている。

これらの報告から、足部接地パターンは生まれ育った環境に多大な影響を受けることが示唆された。しかし、ランニングとは、左右の足で交互に地面を蹴ることによって前方に移動する動きであり⁷⁾、RFS と FFS ではこの重心を前方に推進させるためのメカニズムの違いは明らかにされておらず、どのようなランニングフォームに RFS や FFS が適しているのかは定かではない。そこで、本研究では RFS と FFS における前方に移動するための推進特性の違いを明らかにするため、運動力学の観点から並進運動と回転運動に着目して分析を行った。

II. 対象と方法

1. 対象

被検者は、本研究の趣旨および目的に対して、同意が得られた健康成人 18 名（男性 14 名、女性 4 名）とした。

被検者の除外基準は、既往歴に整形外科的疾患、重篤な呼吸器・循環器疾患、皮膚疾患被検者がいない者とした。被検者の年齢は 25.9 ± 3.7 歳であり、身長は 168.6 ± 5.5 cm、体重は 60.8 ± 7.2 kg（平均値 $\pm$ 標準偏差）であった。

なお、本研究は神奈川県立保健福祉大学大学院の倫理審査委員会の承認（承認番号 25-035）を得て行われた。

2. 方法

ランニングの計測は、6 枚の床反力計（AMTI 社製）と 10 台の赤外線カメラで構成される三次元動作解析装置（VICON612, VICON-PEAK 社製）を用いて行った。

被検者の体表面上の所定の位置に、臨床歩行分析研究会の提唱する DIFF 方式⁸⁾に準じて、赤外線反射標点を貼付した。赤外線反射標点の貼付位置は、両側の肩峰、右肩甲骨下角、両側の上前腸骨棘と大転子を結んだ線の 1/3 の点、両側の膝関節裂隙外側、両側の外果、両側の第 5 中足趾節間関節の計 11 箇所とした。

運動課題は 2 種類あり、後足部から接地したランニングの RFS を計測した後に、前足部から接地したランニングの FFS の計測を行った。RFS と FFS の両条件で、計測装置が接地された 8 m の走行路を、被検者が走りやすいと感じる速度で、意識的に後足部ないし前足部から接地するよう指示した。また、被検者には計測を行う前に RFS と FFS という二つの異なった足部接地パターンに慣れることができるよう、十分に練習する時間を与えた。

三次元動作解析装置によってサンプリングされた、各赤外線反射標点の三次元座標データと床反力データを、計算処理プログラム DIFF Gait と Wave Eyes を使用して計算処理を行い、重心移動距離、床反力鉛直・前後成分、身体重心回りのモーメントを算出した。また本研究では、床反力前後成分を用いて立脚期を立脚前半、立脚後半に分けた。立脚前半は足部接地から床反力前後成分が後方から前方に切り替わるまでとし、立脚後半は床反力前後成分が前方に切り替わった時期からつま先離地までとした。

重心移動距離の分析では、立脚期において重心が前方に移動した距離と、遊脚期において重心が前方に移動した距離を算出し、その値をランニング中の平均速度で除し、速度を一定と仮定したときの立脚期と遊脚期における移動距離を算出した。

床反力の鉛直成分の分析では、立脚前半における鉛直成分の積分値、立脚後半における鉛直成分の積分値を算出した。床反力の前後成分の分析では、立脚前半における後方成分の積分値、立脚後半における前方成分の積分値を算出した。

身体重心回りのモーメント（以下、身体回転力）の分析では、矢状面内の重心位置と床反力作用点（center of pressure, 以下 COP）位置（前後方向位置）、床反力前

後・鉛直成分より，以下の計算式を用いて算出した。

身体回転力 = $F_y \times dz + F_z \times dy$ (図 1)

F_y ：床反力前後成分

dz ：重心の高さ

F_z ：床反力鉛直成分

dy ：重心と COP の前後方向座標位置の差から算出した距離

上記計算式によって算出した身体回転力のデータから，立脚前半における後方への身体回転力のピーク値を算出した。

統計学処理では，RFS と FFS それぞれの各 5 試行の計測データの平均値を代表データとし，対応のある t 検定を用いて RFS と FFS における代表データの差を比較した。有意水準は 5% とした。統計ソフトは JSTAT を使用した。

III. 結 果

立脚期の重心前方移動距離は，RFS が FFS に比較して有意に大きかった ($p=0.01$)。一方，遊脚期の重心前方移動距離は FFS が RFS に比較して有意に大きかった ($p=0.02$)。

床反力鉛直成分の積分値は，立脚前半では RFS が FFS より有意に大きく ($p=0.01$)，立脚後半では FFS が RFS より有意に大きかった ($p=0.01$)。床反力前後成分の積分値は，立脚前半の床反力後方成分には有意な差はみられなかったが ($p=0.45$)，立脚後半における床反力前方成分では FFS が RFS より有意に大きかった ($p=0.01$)。

身体回転力は，立脚前半において RFS では FFS より有意に大きな後方への回転力が出現した ($p=0.01$) (表 1)。

IV. 考 察

ランニングの重心移動様式は，「はずむボール (bounding ball)」のような重心の軌跡をたどることが知られており⁹⁾，重心は足部接地後に前下方に移動し最下点に達すると，その後は前上方に移動し足部離地後の遊脚期に最上点に達する。本研究結果においても，RFS と FFS とともに，「はずむボール」の重心の軌跡となった。一方，RFS と FFS では重心を前方移動するための推進特性が異なることがわかった。RFS では身体の回転を制動しながら立脚期に重心を前方に推進させているのに対して，FFS では跳び跳ねるように前方に推進していた。

RFS が立脚期に大きく前に進むことができた理由として，RFS では立脚前半において大きな床反力鉛直成分が生じていたことが考えられる。立脚前半において大きな床反力鉛直成分が生じることで，重心には持ち上げるような力が加わるのと同時に，立脚前半では COP が重心よりも前方に位置しているため大きな後方への回転力が生じることになる。ランニングでは足部が地面に接

図1 矢状面における重心とCOP, 床反力の力学モデル

表 1 RFS 条件と FFS 条件での比較

	RFS	FFS
重心移動距離 (移動距離/平均速度)		
立脚期	0.25 ± 0.05	0.24 ± 0.04*
遊脚期	0.12 ± 0.04	0.14 ± 0.04*
床反力鉛直成分 積分値 (Ns)		
鉛直成分 立脚前半	120.2 ± 19.3	98.5 ± 15.0*
鉛直成分 立脚後半	89.0 ± 15.0	108.6 ± 19.8*
後方成分 立脚前半	10.7 ± 2.5	10.4 ± 2.2
前方成分 立脚後半	13.2 ± 2.6	17.4 ± 3.9*
身体後方回転力 ピーク値 (Nm)		
立脚前半	30.4 ± 20.6	12.2 ± 20.1*

数値は平均値 ± 標準偏差。RFS : rearfoot strike, FFS : forefoot strike.

* : $p<0.05$.

図2 後足部接地と前足部接地における重心前方移動様式の違い

地する瞬間には重心は前方へ速度を持っていることから、足部接地後には慣性により重心は前方に進んでいき、重心は足関節を支点として前方に回転していく。そのため、RFSでは立脚前半に後方への身体回転力を大きくすることで、慣性により生じる重心の前方回転にブレーキをかけていることが考えられる。RFSでは立脚前半の重心が下がっていく期間において、重心を持ち上げる力を生じるのと同時に慣性による前方回転にブレーキをかけることで、重心が落下するまでの時間が延長され、その期間に大きく前方に移動するという推進特性を用いていた。その結果、RFSの重心はボールがはずむまでの間に大きく前方に移動し、はずむ距離は短くなっていたことが示唆される(図2)。本研究結果から、臨床現場において、RFSでは歩幅を長くとするストライド走行がより適していることが示唆される。

一方、FFSでは、遊脚期に大きく前に進むという戦略を取っていた。FFSが遊脚期に大きく前に進むことができた理由として、足部接地時の衝撃が小さいことが挙げられる。FFSでは立脚前半の床反力鉛直成分(足部接地時の衝撃)が小さいことで、慣性による前方回転を打ち消すことなく重心が円滑に前方に回転していき、素早く立脚後半に移行していた。その後の立脚後半においてFFSでは床反力鉛直成分・前方成分を大きくし、地面を強く蹴ることで遊脚期に重心を大きく前方に移動するという推進特性を用いていた。その結果、FFSの重心は、ボールが大きく前にはずむような動きとなっていたことが示唆される(図2)。これらから、臨床現場において、FFSでは、立脚時間が短く素早く足を回転させるピッチ

走行が適していることが示唆される。

また、本研究結果から、RFSでは大きな衝撃を利用し慣性による前方回転力を打ち消すことで、立脚期に大きく前方に進むという特性がみられた。一方、FFSでは衝撃を少なくし慣性により円滑に前方に回転し、立脚後半において蹴り出す力を大きくすることで、遊脚期に大きく前方に進むという特性がみられた。RFSとFFSでは推進特性が異なるため、臨床現場ではRFSとFFSのそれぞれの特性を考慮したランニングフォームを指導することが重要である。

本研究の限界として、三次元動作解析装置を使用したことで走行路が8mと短くなったことや、被検者に研究のために足部接地パターンを矯正したことで、普段とは異なったランニングとなった可能性が示唆される。今後は、十分な走行路を確保することや、被検者の普段の足部接地パターンを考慮したうえでの検証が必要と考える。

引用文献

- 1) Bertelsen ML, Jensen JF, Nielsen MH, et al.: Footstrike patterns among novice runners wearing a conventional, neutral running shoe. *Gait Posture*, 2013, 38(2): 354-356.
- 2) NHKスペシャル取材班, 善家 賢: 42.195 kmの科学. 角川書店, 東京, 2013, pp98-99.
- 3) Lieberman DE, Venkadesan M, Werbel W, et al.: Foot strike patterns and collision forces in habitually barefoot versus shod runners. *Nature*, 2010, 463(7280): 531-535.
- 4) 吉野 剛: 新走法で速くなる! 裸足感覚ランニング. 洋泉社, 東京, 2013, p18.
- 5) Giuliani J, Masini B, Alitz C, et al.: Barefoot-simulating footwear associated with metatarsal stress injury in 2 runners. *Orthopedics*, 2011, 34(7): 320-323.
- 6) 笹山亜紗子, 松本秀男, 世良 泰・他: 前足部及び後足部接地により歩行及びランニング時の下腿障害リスクは増加するか. *臨床バイオメカニクス*, 2010, 31: 469-475.
- 7) 谷川英徳: ランニングのバイオメカニクス. *臨床スポーツ医学*, 2014, 31(9): 824-829.
- 8) 櫻井愛子: 臨床歩行計測入門. 江原義弘・他(編), 医歯薬出版, 東京, 2002, pp150-153.
- 9) 小田伸午, 市橋則明: ヒトの動き百話. 市村出版, 東京, 2011, p162.