

## 長距離走における走速度増大に伴う着地衝撃と走動作の関係

榎本靖士, 谷川 聡, 向井直樹, 阿江通良  
筑波大学体育系

### 1. はじめに

ランニングにおいて地面反力の着地後 50ms 以内に生じる第 1 ピーク（着地衝撃または衝撃力）は、障害との関係ばかりでなく（Hreljac, 2004）、ランニングエコノミーとの関係（Chang and Kram, 1999）についても研究され、ランニングにおいて研究課題としてばかりでなく、トレーニングや走技術の評価として重要な観点の 1 つである。とくに障害との関係では、理論上はある大きさの衝撃力が、ある期間内に蓄積した量で障害が発生するリスクとなると述べられており（Hreljac, 2004）、ランニング実践では衝撃力をどうコントロールするかは重要な課題である。

これまでランニングにおける着地衝撃に関して多くのバイオメカニクスの研究が行われている。それらは、着地直後の地面反力の衝撃力がどのように身体部分を伝わるか（Hamil ら, 1995）や衝撃力にはどの部分の質量と加速度が影響を及ぼしているのか（Liu and Nigg, 2000）を粘弾性モデルを用いてシミュレーションを行なって研究されている。また、衝撃力は、接地様式、すなわち踵接地と前足部接地との比較（Cavanagh and LaFortune, 1980）や着地前の筋の予備緊張（Nigg and Wakeling, 2001）、そして足部（踵）の前頭面内における動き（Nigg, 2001）との関連などから研究されている。さらには、疲労と衝撃力との関係、すなわち疲労することにより衝撃力が大きくなる傾向にあることが報告されている（Verbitsky ら, 1998）。

近年、サッカーのキック動作などでは、キック足とボールとのインパクトについてハイスピードカメラを用いて詳細に研究されるようになり、ボールキックに役立つ知見が提供されている（布目, 2004）。ランニングにおいても地面と足との衝突とみなすことができるため、着地前から支持期にわたる支持脚の動きと衝撃力との関係を研究することが、衝撃力を小さくする要因を検討するために役立つと考えられる。さらに、跳び降りの着地動作において、その動作の強度（跳び降り高）を変えることによって、着地衝撃を緩衝する動作が異なることが報告されている（阿江, 1994）。ランニングスピードが大きいつき衝撃力は大きいことが報告されており（阿江ら, 1991）、長距離走トレーニングはさまざまな走速度で行なわれることを考えると走速度を変化させたときの着地動作と衝撃力の関係を検討することは意義があると言えよう。

そこで、本研究では、学生長距離選手を対象に、着地前および後における着地脚の動作を、ジョギングからレーススピードにわたって計測し、着地前後の動作と地面反力との関係を検討することを目的とする。

### 2. 研究方法

#### 2.1 被験者

大学陸上競技部に所属する男子長距離走者 10 名を被験者とした。被験者は実験の前 1 か月は少なくとも障害は発生しておらず、通常のトレーニングを行なっていた。被験者には実験の内容と危険性を書面と口頭で説明したうえで、同意を得た。本実験は、筑波大学体育系研究倫理委員会の承認を得て行われた。

## 2.2 実験試技

被験者にジョギングからレースペースの3段階のペースで走行させた。ペースは5分/km, 4分/km, 3分/kmとし、それぞれ低速、中速、高速とした。実験用の走路は約50mで、40~45m地点を分析エリアとし、その区間で光電管を用いてタイムを計測し、ペースを確認した。設定したペースから0.05秒(1kmでは10秒)以内を成功試技とし、各ペースで3本以上の成功試技を収集した。シューズによる地面反力への影響をなくすため、被験者にはすべて同じシューズ(Mizuno wave spacer)を着用させた。

## 2.3 データ収集

被験者の左右の下肢の動きを3次元動作計測装置(VICON MX-T20)によって計測した。左右の下肢の、つま先、拇指球内側と外側、踵の後方の上部、下部と外側部の3点、足関節内踝と外踝、膝関節内側と外側、ダミーマーカー1点の計21点の反射マーカーを貼付した。写真1は、マーカーの貼付位置を示している。

計測エリア5mの中央にフォースプラットフォームを埋設し、表面は走路と同じ材質で覆い、走者が自然な走りで踏めるようにした。

動作は500Hz, 地面反力は2000Hzで計測した。これらはVICONハードウェアで完全に同期し、VICON NEXUSを用いてデータ収集された。



写真1 動作計測用のマーカー貼付位置

## 2.4 データ処理

VICONからマーカーの3次元座標と地面反力データをアスキー形式で出力した。マーカーの3次元座標から足関節、膝関節中心の座標を推定するとともに、足、下腿のセグメントを3次元剛体モデルとし、3次元の姿勢を算出した。

地面反力鉛直成分が体重の3%以上の加重で接地、3%以下で離地とした。地面反力の大きさは

体重で除して体重あたりに、支持時間は 100%に規格化した。

地面反力鉛直成分の第 1 ピークおよび第 2 ピーク，水平前後成分の負のピークと正のピーク，各成分の力積を算出した。

走速度は，5m 区間のタイムから算出し，ピッチは地面反力鉛直成分の力積を体重で除した値を 1 歩の時間とし，その逆数とした。ストライドは走速度をピッチで除すことにより算出した。

### 3. 結果

#### 3.1 ストライドとピッチ

被験者の低速，中速，高速における走速度は， $3.34 \pm 0.09$ ， $4.05 \pm 0.27$ ， $5.49 \pm 0.13$  m/s であった。ピッチは， $2.79 \pm 0.09$ ， $2.94 \pm 0.27$ ， $3.20 \pm 0.21$  歩/s，ストライドは， $1.20 \pm 0.05$ ， $1.39 \pm 0.12$ ， $1.73 \pm 0.12$  m であった。ピッチおよびストライドとも走速度の増大とともに増大していた。

図 1 は，低速，中速，高速における支持期時間と非支持期時間を被験者の平均値と標準偏差で示したものである。支持期時間は，低速，中速，高速で  $0.218 \pm 0.012$ ， $0.189 \pm 0.014$ ， $0.157 \pm 0.013$  s で，非支持期時間は， $0.141 \pm 0.012$ ， $0.153 \pm 0.018$ ， $0.157 \pm 0.016$  s であった。支持期時間が走速度の増大とともに顕著に減少していた。

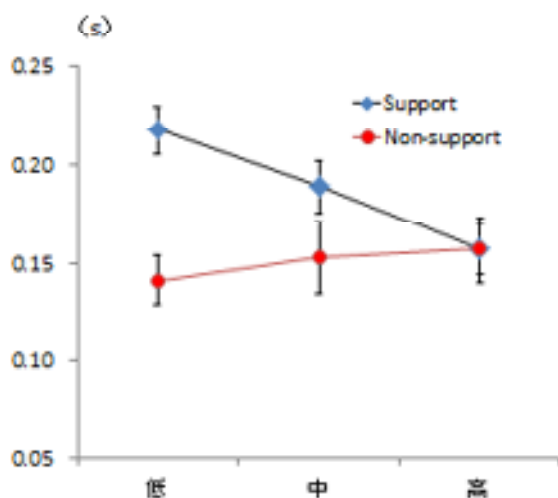


図1 ペース別の支持期と非支持期時間

#### 3.2 地面反力

図 2 は，低速，中速，高速での地面反力鉛直成分および水平前後成分を，全被験者の平均値で示したものである。時間は，支持時間で規格化している。鉛直成分は，一般的に接地直後に第 1 ピークが出現するが，本研究では衝撃力とみられる大きな鉛直成分の第 1 ピークは 10 名中 2 名に認められた。平均の波形では第 1 ピークはほぼみられなかった。その後，支持期中間あたりで最大値を示し，その後減少していた。この第 2 ピークは走速度が増大するにつれて増大していた。低速，中速，高速における第 2 ピークは， $2.83 \pm 0.16$ ， $3.01 \pm 0.24$ ， $3.21 \pm 0.23$  N/BW であった。

水平前後成分は、接地後に負に大きくなり、支持期中間あたりで負から正に変わり、正に大きくなった後、離地していた（図2）。低速、中速、高速における負のピーク値は、 $-0.42 \pm 0.06$ ,  $-0.52 \pm 0.06$ ,  $-0.65 \pm 0.11$  N/BW, 正のピーク値は、 $0.33 \pm 0.04$ ,  $0.41 \pm 0.07$ ,  $0.57 \pm 0.06$  N/BW と、どちらも走速度の増大とともに数値が大きくなっていった。

地面反力鉛直および水平前後成分の正および負の力積は、低速、中速、高速において  $3.52 \pm 0.11$ ,  $3.36 \pm 0.25$ ,  $3.08 \pm 0.21$  Ns/kg（鉛直）、 $-0.206 \pm 0.025$ ,  $-0.230 \pm 0.029$ ,  $-0.227 \pm 0.032$  Ns/kg（水平前後負）、 $0.212 \pm 0.029$ ,  $0.224 \pm 0.043$ ,  $0.257 \pm 0.034$  Ns/kg（水平前後正）であった。鉛直成分は走速度増大につれてむしろ減少していた。水平前後成分は、正および負ともに走速度による変化はみられなかった。

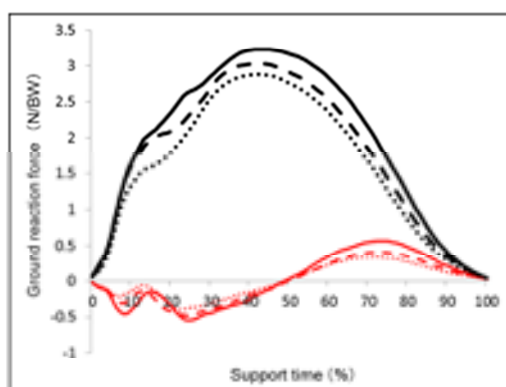


図2 ベース別の地面反力鉛直成分と水平前後成分

### 3.3 足の動き

低速、中速、高速における接地時の足の速度の前後成分は、 $1.93 \pm 0.42$ ,  $2.11 \pm 0.50$ ,  $2.27 \pm 0.68$  m/s, 鉛直成分は、 $-1.48 \pm 0.24$ ,  $-1.86 \pm 0.25$ ,  $-2.30 \pm 0.22$  m/s であった。前後成分は走速度の増大にかかわらずほぼ一定であったが、鉛直成分は走速度の増大とともに下方方向に大きくなっていった。

図3は、支持期における足の角速度を示したものである。X軸まわりの負は足の進展を、Z軸まわりの負は足の回内角速度を示している。すなわち、足は接地時の進展角速度が大きいですが、接地後一度小さくなり、離地時に大きくなっている。また、接地時に回内角速度がみられ、すばやく大きくなり、支持期中間あたりからはほぼ0になる。

低速、中速、高速における回内角速度のピーク値は、 $-462.2 \pm 71.0$ ,  $-533.3 \pm 68.9$ ,  $-629.0 \pm 108.2$  deg/s で、走速度の増大とともに大きくなっていった。

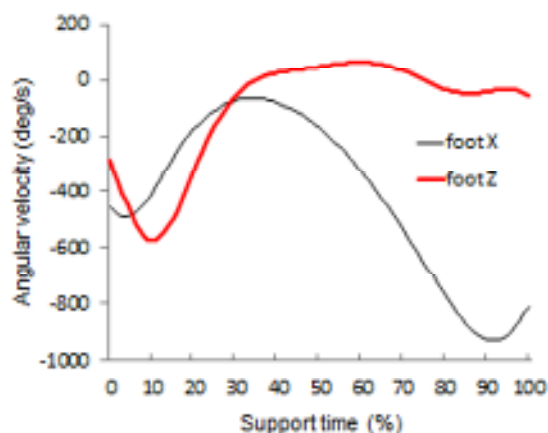


図3 支持期における足の角速度(典型例)

#### 4. 考察

地面反力の鉛直成分第1ピークは衝撃力であり，走速度の増大とともに大きくなること，接地のパターンにより異なることが報告されている (Cavanagh and LaFortune, 1980). しかし，本研究で測定した男子学生長距離走者では大きな衝撃力を示したものは，10名中2名のみであり，走速度が増大してもその数は変わらなかった．しかし，第2ピークは走速度の増大ともなって増大していた．これは支持時間の減少と力積が変化しなかったことと関連していると考えられる．すなわち，走速度の増大にともない非支持時間は変化しないが，支持時間の減少によるピッチの増大がみられ，これは高速ではより短い時間で低速と同じ力積を獲得していたことを示している．

図4は，中速における地面反力の典型例を示したものである．被験者 TJ は衝撃力のない，被験者 TM は衝撃力の大きいタイプであった．TJ では支持期前半に衝撃力がなく，地面反力が滑らかに大きくなり，さらにピーク値が大きく，そして支持期後半では地面反力が急速に小さくなっていった．一方，TM は衝撃力が大きく出た後，一度地面反力は小さくなり，第2ピークも小さかった．そして，支持期後半は離地時まで大きい傾向がみられる．以上のことは，長距離走者では第1ピークの衝撃力が身体を上方に持ち上げることに効果的に作用していない可能性を示唆している．すなわち，長距離走では，地面反力のタイプや接地のタイプよりも身体を上方に効率よく持ち上げることが重要であり，そのための評価を検討すべきであると考えられる．

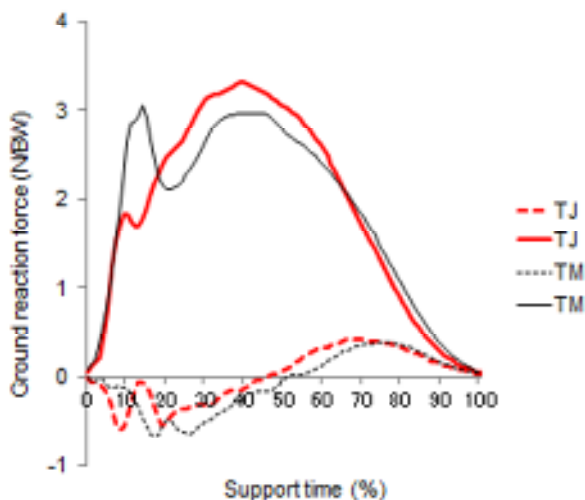


図4 中速における地面反力の典型例

地面反力の水平前後成分の負および正のピーク値は、走速度の増大にともない顕著に大きくなっていった。しかし、つま先の地面对する速度は、いずれの走速度においても変わらず 2 m/s 程度であった。走速度は、それぞれ 3.34, 4.05, 5.49 m/s であったため、足の振り戻しによる後方への速度が、走速度の増大とともに大きくなっていったことが示唆される。しかし、今回の結果からは足の後方へのスウィング速度と地面反力の水平前後成分との間には明確な関係はみられなかった。図 4 の典型例でみられるように、鉛直成分の第 1 ピークが生じている走者は水平前後成分の反力が小さく、その後大きく生じている。このように鉛直成分の衝撃力と水平成分との関係も今後は検討する必要がある。

接地時のつま先の鉛直速度が走速度の増大にともなって負に大きくなっていった。これは前述の足の後方へのスウィング動作の結果、鉛直方向の速度も大きくなっていったと考えられる。すなわち、後方へのスウィング動作を行なうことで足を地面にたたきつけるような動きも含まれることを示していると考えられる。もし地面をたたかないことがよいとすれば、足の後方へのスウィングを大きくしつつ、下方向への速度を大きくしない足の振り戻しの動作を習得することが望ましいと言えよう。しかし、接地時の足の鉛直速度が下方向に大きくなっていくにもかかわらず、地面反力鉛直成分の第 1 ピークは大きくなっていなかった。足を地面にたたきつける速度が大きくなっていても衝撃力が大きくなっていないのはなぜであろうか。

接地直後に足は伸展角速度（前方への回転）を持つとともに、回内角速度を持っており、走速度の増大にともなって大きくなっていく。この回内動作によって地面反力鉛直成分の衝撃力が緩衝されている可能性が考えられる。TJ と TM について足の動きをみると、つま先の後方と下方への速度は、TJ がそれぞれ 1.89, -2.20 m/s, TM が 2.47, -2.50 m/s であった。回内角速度は、TJ が -441.8 deg/s, TM が -636.4 deg/s であった。TM は足の後方へのスウィングが弱いけど下方向への速度が大きく、その後回内角速度が大きかったことを示している。

図 5 は、接地時のつま先の下方への速度と支持期における足の回内角速度のピーク値との関

係を示したものである。足の下方への速度が増大と回内速度との間に有意な相関がみられ、これらの関係が鉛直方向への衝撃を調整していると考えられる。これらの関係からはずれると地面反力鉛直方向の衝撃が大きくなる傾向があった。以上のことは、接地時の足のスウィングの方向と速さ、そして接地直後の足の回内動作との関連で衝撃力を調整している可能性が示唆するものであろう。今後、個々の変動に着目してさらに分析を進めることが望まれる。

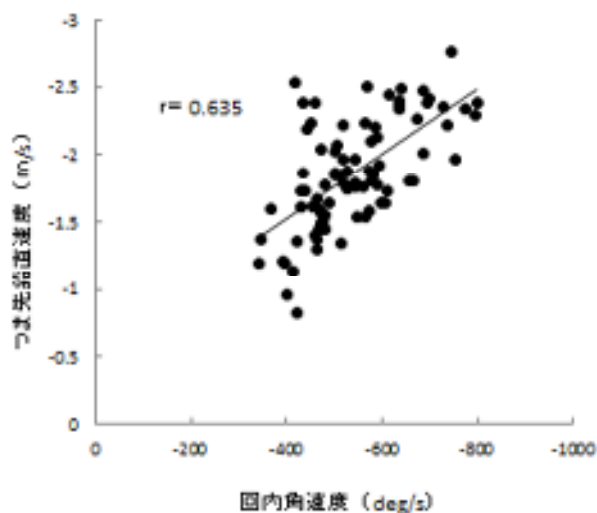


図5 接地後の回内角速度ピーク値と接地時のつま先鉛直速度との関係

## 5. まとめ

本研究の目的は、学生長距離選手を対象に、着地前および後における着地脚の動作を、ジョギングからレーススピードにわたって計測し、着地前後の動作と地面反力との関係を検討することであった。その結果、走速度の増大にともなって、地面反力鉛直成分の第2ピーク、水平前後成分の負および正のピークが大きくなるが、第1ピークは大きくならないことがわかった。さらに、長距離選手で大きな衝撃力が認められた走者は10名中2名であった。走速度増大にともなって足の後方へのスウィングは速くなるが、下方向への速度も大きくなり、これらの関係と接地直後の足の回内動作との関係で衝撃力が影響されている可能性が示唆された。今後は、個々のわずかな変化に着目して、さらになめらかな着地動作、さらには経済的な走動作につながる知見を究明することが必要であることがわかった。

## 引用文献

- 阿江通良, 宮下 憲, 大木昭一郎 (1991) スプリント走の地面反力. 陸上競技研究 7, 2-10.
- 阿江通良 (1994) 垂直跳および着地動作におけるパワー発揮の大きさと下肢関節の貢献度. バイオメカニズム学会 (編) バイオメカニズム 12—生体の運動機能とその復元—, 97-108. バイオメカニズム学会出版, 東京.
- Cavanagh P R, Lafortune M A (1980) Ground reaction forces in distance running. J. Biomechanics 13, 397-406.

- Chang Y H, Kram R (1999) Metabolic cost of generating horizontal forces during human running. *Journal of Applied Physiology* 86, 1657-1662.
- Hamill J, Derrick, T R, Holt K G (1995) Shock attenuation and stride frequency during running. *Human Movement Science* 14, 45-60.
- Hreljac A (2004) Impact and overuse injuries in runners. *Med Sci Sports Exerc* 36, 845-849.
- Liu W, Nigg B M (2000) A mechanical model to determine the influence of masses and mass distribution on the impact force during running. *Journal of Biomechanics* 33, 219-224.
- Nigg B M (2001) The role of impact forces and foot pronation: a new paradigm. *Clinical Journal of Sport Medicine* 11, 2-9.
- Nigg B M, Wakeling, J M (2001) Impact forces and muscle tuning: a new paradigm. *Exercise & Sport Sciences Reviews* 29, 37-41.
- 布目寛幸 (2004) データの平滑化に関する新たな試み. *バイオメカニクス研究* 8 (3) 172-178.
- Verbitsky O, Mizrahi J, Voloshin A, Treiger J, Isakov E (1998) Shock transmission and fatigue in human running. *Journal of Applied Biomechanics* 14, 300-311.