

長距離走における着地動作に関する研究

土居 陽治郎・小林 一敏・宮地 力・牛山 幸彦*

A study of footstrike patterns in distance running

Youjiro DOI, Kazutoshi KOBAYASHI, Chikara MIYAJI and
Yukihiko USHIYAMA

The purpose of this investigation was to study the influence of the footstrike pattern at landing in distance running: (a) relationship between footstrike pattern at landing and electromyographic (EMG) activities or stiffness of tibialis anterior muscle; (b) relationship between shock-absorbing attenuation and footstrike pattern at landing; (c) to explain the results with Miyaji's viscoelastic elements model. One of the experiments of the study was 5000m running race, performed by using 11 male distance runners. They were 6 rearfoot strikers and 5 midfoot strikers. The other experiment was test running with four different velocities, performed by four distance runners (2 rearfoot strikers and 2 midfoot strikers) to whom accelerometers were mounted at the ankle and the knee. The EMG activities of tibialis anterior muscle was also recorded. The experimental results show as follows:

- 1) Rearfoot strike causes a huge increase of the stiffness of tibialis anterior muscle after running.
- 2) The amplitudes of the acceleration at the ankle are influenced by running speed and footstrike pattern. Even if the acceleration amplitudes are smaller in rearfoot striker than in midfoot striker, it is not sure that the impact force are also smaller. It is necessary to reexamine some speculation that acceleration values correspond to impact forces.

Although different footstrike pattern at landing influences the kinetic and the kinematic behavior in distance running, these result cannot be the basis in deciding whether one or the other pattern is better and should be preferred.

Key words : rearfoot strike, midfoot strike, viscoelastic model, impact force

I. 研究のねらい

近年、欧米や日本ではジョギング走を楽しんだり、ロードレースなどに出場するなどといった本格的な大衆ランナーの増加が著しい。こういう走運動、特に長距離走に対する関心の高さはランニングシューズの選択にまで影響を与え、あるシューズメーカーのカatalogには「シューズのバイオメカニクス」などという項目まで登場し、着地衝撃というような専門用語が一般化しつつある。

しかし、着地衝撃という用語自体ごく最近になって注目されるようになったわけで、それだけに歴史が浅く、着地動作（足の着き方）に関する理解は進んでいるとはいえない状態にある。

着地動作には足のどの部分から着地するかということで、飯本ら¹⁾は踵型、中間型、つま先型の3種類に分類している。用語的には、踵から着地する rearfoot (heel) strike, 足の中央部から着地する midfoot strike, そしてつま先から着地する forefoot (toe) strike の3つのタイプに分ける方が多いようである。Cavanagh ら²⁾は長距離走の地

* 筑波大学研究生

面反力の測定を行なった際に、17名中12名が rear-foot striker でありその他は midfoot striker であったと報告している。また、Kerr ら⁸⁾は、長距離ロードレース参加者のうち81%が rearfoot striker であったが、スピードのあるランナーになると midfoot striker の割合が増加していたという興味ある事実を報告している。このことは、着地動作が長距離走のパフォーマンスに少なからず影響を及ぼしていることを示唆するものである。

また、ランニング時において前脛骨筋は主として遊脚時に活動し、前足部を背屈させる働きがあり、それと拮抗的に作用する腓腹筋は着地直前から働きはじめ、接地期のキック作用に伴い足を底屈させる働きがある¹¹⁾¹²⁾。これらのことから、着地時の足の背屈は前脛骨筋の働きと関係があると考えられる。事実、飯本ら⁹⁾は足の背屈を示す足関節角度の違いが足の着き方に影響していることを報告し、また Kirby ら¹⁰⁾は着地動作の違いが前脛骨筋の筋の内圧や筋放電に影響を与えていることを明らかにしている。これらのことから、着地時の足の背屈は前脛骨筋の働きと着地動作とに関係があると考えられる。

筆者らは5000m タイムレース前後における身体各部の筋の硬さ変化を測定し、前脛骨筋の硬さ変化が最も顕著であったという結果を得た⁴⁾。先にあげた Kerr らの報告にもあるように、長距離走者には rearfoot striker が多く見られること、rearfoot strike を行なうには足を背屈させることなどから考え合わせると、着地動作と前脛骨筋の硬さ変化との間には何らかの関係があると考えられる。

また、Cavanagh らの研究にも見られるように、着地動作によって着地衝撃の大きさも異なっていることが報告されている。こういったランニング中の着地衝撃に関する研究にかかわる実走テストの大部分は実験室的研究であり、被験者に動作の制約（例えばフォースプレートを踏むように指示するなど）を課している場合が多い。また、ランニング中の地面反力を検討したり身体側への影響を見るうえで、下腿部や足部に加速度計を装着した研究もいくつかある¹⁷⁾¹⁹⁾。一般に、加速度計は非常に小型・軽量であるため、それらを装着しても被験者にはほとんど負担がなく、動きの制約を受けにくい（いろんな場所で様々な動きができる）という有利な面がある。

このような加速度計を用いた着地衝撃の評価方法は、長距離走などのフィールドにおける実走テストにおいて大変有効的な手段となりうる。しかしながら、着地時の衝撃加速度と地面反力との関係はまだ十分に解明されているわけではなく、飯本らも指摘しているとおり、着地動作の違いによって、衝撃加速度も地面反力同様に変化することから、着地動作による衝撃加速度の変化について検討していく必要がある。

そこで上記のような問題点をふまえて、本研究では、長距離走における着地動作に注目し、

- 1) 前脛骨筋の使い方の違いが着地動作どのような影響を及ぼすか
- 2) 着地動作の違いが着地時の衝撃加速度にどのような影響を及ぼすか

ということについて考察を試みたものである。

II. 方 法

(1) 5000m 走前後での前脛骨筋の硬さ変化の測定

筑波大学陸上競技部長距離選手11名に5000m タイムレースを実施し、その時のレース前とレース後の前脛骨筋の硬さを皮膚圧入計（図1）を用いて測定した。また、同時にレース中のランニングフォームをビデオ撮影し、主として着地動作のタイプ（rearfoot striker と midfoot striker）分けに利用した。

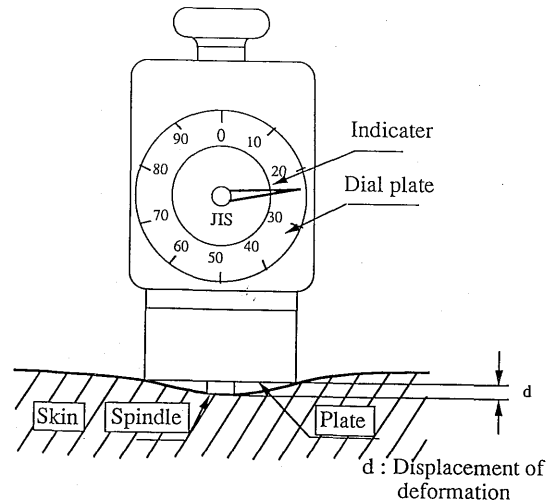


Fig. 1 Muscle Stiffness Testing device.

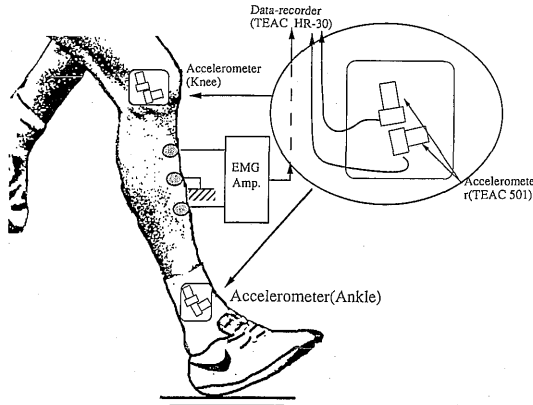


Fig. 2 Accelerometers on knee and ankle for assessment of shock of landing.

(2) 着地時の衝撃加速度・前脛骨筋の筋放電の測定

被験者それぞれに、右膝関節部（腓骨頭側面）および右足関節部（外果上部）の皮膚面に圧電型加速度計を、下腿の長軸方向と短軸方向にそれぞれが直角になるように、両面接着テープにて装着し、ずれないようにその上からテープを巻き固定した（図2）。使用した加速度計は TEAC 501（容量212G, 2 Hz~40kHz±3 dB, 重量1.8g, 大きさ7.9φx10.7H mm）増幅器には TEAC SA-10（交流アンプ）を用いた。また、着地動作を足関節の動きに注目してとらえられるよう、前脛骨筋の筋放電を表面電極法を用いて検出し、インストレーションアンプにて増幅した。

これらのデータをデータレコーダ（TEAC HR-30）に収録した。その際、被験者にデータレコーダを背負って走ってもらった。この方法の特徴は、データレコーダ等の重量が比較的軽い（約1 kg）ため被験者に負担にならない利点を持つ反面、衝撃や振動を拾いやすく、必要な計測データに重畳されてしまう欠点を持っている。そこで、データレコーダをザックに入れ、被験者の背部にテープなどでしっかりと固定させ、衝撃・振動の影響を除去した。

被験者には、方法(1)の長距離選手の中から、着地動作の異なるタイプ（rearfoot strikerとmid-foot striker）の選手をそれぞれ2名ずつ選び、次の4段階の走速度を与えた。使用したシューズはすべてジョギング用シューズとした。場所は筑波

大学陸上競技場（全天候型トラック）である。

- a. jogging 程度（約 4 m/s）で400m
- b. 5000m レース程度（約 6 m/s）で400m
- c. 1500m レース程度（約6.5m/s）で400m
- d. 全力走（約 8 m/s）で60m

これら試技中の動作を被験者の右側方からビデオ撮影し、被験者の走速度算出やランニングフォームの分析に用いた。また、着地時の水平面と下腿の長軸とのなす角度をビデオ画像から求め、その正弦成分を長軸側の加速度成分に乗じて、鉛直方向の加速度に変換した。

III. 結果と考察

(1) 着地動作の違いによる前脛骨筋の硬さ変化

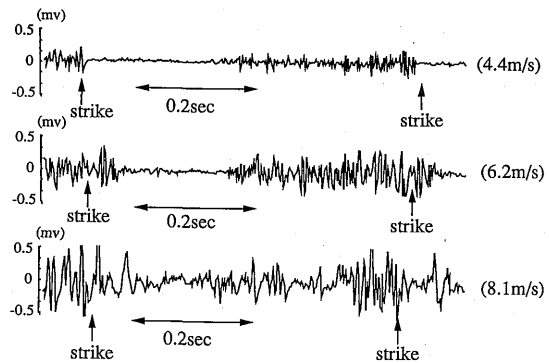


Fig. 3 EMG patterns of tibialis anterior muscle for different running velocities (jogging, 5000m race and max speed) in a rearfoot strike runner (Sub. R).

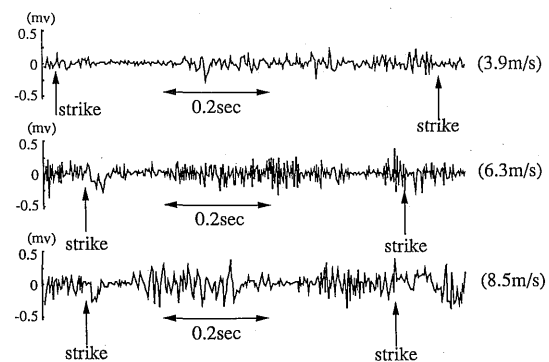


Fig. 4 EMG patterns of tibialis anterior muscle for different running velocities (jogging, 5000m race and max speed) in a midfoot strike runner (Sub. Y).

と筋放電パターンについて

方法(1)の5000m レース前後における前脛骨筋の硬さ変化・レース記録およびビデオ画像分析から得られた着地動作の分類を表1に示す。

レース後の筋の硬さはレース前に比べて有意に増加した。また、レース前の筋の硬さにはそれほど個人差は見られないが、レース後の筋の硬さには個人差が大きい。また、筋の硬さの増加率も個人間でばらつきが大きい。そこで、着地動作の違いによる前脛骨筋の硬さ変化に着目すると、平均で rearfoot striker が51.7%，midfoot striker が25.8%の増加が見られた。標本数が少なく両者の差の有意性を明らかにするまでには至らなかったが、このことは、着地動作の違いが前脛骨筋の硬さ変化に影響していると考えられる。この中で midffot striker とされる Sub. W については、着地直前での足部背屈はそれほどないが、離地後、脚を身体後方から体幹部へ引きつける際に足部を背屈させる動作があり、この局面で前脛骨筋を積極的に使ったために筋の硬さの顕著な増大につながったと考えられる。

こういった着地動作の違いが前脛骨筋の硬さにどのような影響を及ぼしているかを検討するために、ランニング中の前脛骨筋の筋放電を記録したとその筋放電パターンを図3および図4に示した。図3は rearfoot striker、図4は midfoot striker のものである。それぞれ上段から jogging スピード、長距離レーススピードそしてほぼ全力に近い

スピードのものである。両者の筋放電を比較すると、rearfoot striker は遊脚時の特に着地直前に顕著な筋放電が見られるのに対して、midfoot striker では着地直前の筋放電はあまり目立たなかった。rearfoot striker の着地直前の顕著な筋放電は着地時の足部を背屈させる働きに関与しているとは考えられるが、この着地直前の筋活動そのものがレース後の前脛骨筋の硬さの違いとして現われるかどうかは今回の実験からでは結論づけられない。なぜなら、どの程度の筋活動の違いが筋の硬さの違いとして現われるのかが今のところまだ明らかになっていないこと、またさらに、Sub. W に見られるように、前脛骨筋の硬さの増加が着地直前以外の時の前脛骨筋の働きによる場合も考えられるからである。

したがって、着地動作の違いによって5000m レース前後での前脛骨筋の硬さ変化に違いが見られ、rearfoot striker は前脛骨筋が硬くなりやすいという特徴があると考えられるものの、硬さ変化の違いを筋放電パターンからだけでは結論づけられなかった。筋の硬さ変化に関する基礎的研究が今後望まれるところである。

(2) 着地動作の違いと衝撃加速度

着地時に足首にかかる鉛直方向の衝撃加速度のピーク値（以後、足首衝撃加速度という）と走速度の関係を図5に示した。全ての被験者において、走速度の増加にともない足首衝撃加速度の大きさが大きくなった。また、jogging 程度の比較的走速

Table 1 Changes of stiffness of tibialis anterior muscle after 5000m running race, time records at the race and landing patterns.

Sub.	Befor 5000m	After 5000m	Increase ratio	Time	Landing Style
P	33	38	1.15	15:18	Midfoot
Q	30	38	1.27	15:36	Midfoot
R	32	50	1.56	15:52	Rearfoot
S	32	36	1.13	16:16	Rearfoot
T	31	53	1.71	15.56	Rearfoot
U	30	43	1.43	15:37	Rearfoot
V	34	39	1.15	15:26	Midfoot
W	25	35	1.40	15:46	Midfoot
X	30	48	1.60	16:31	Rearfoot
Y	34	45	1.32	15:54	Midfoot
Z	30	50	1.67	15:59	Rearfoot
Average	31.00	43.18*	1.40		
S.D.	2.64	6.28	0.21		

* significant increase (p<0.001)

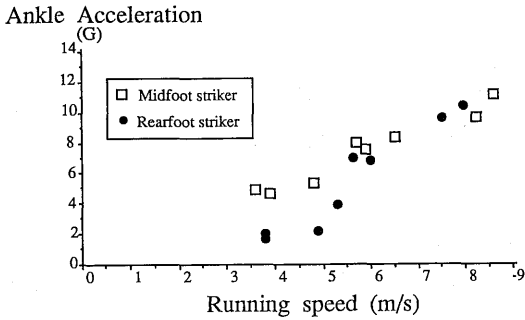


Fig. 5 Running speed and vertical acceleration of ankle for 4 subjects with two different landing styles.

度が遅いときに、着地動作の違いによる足首衝撃加速度の大きさに差異が見られ、midfoot strikerの方がrearfoot strikerよりもその値が大きいのが特徴であった。しかしながら、長距離レースの走速度以上のスピードになると、midfoot strikerもrearfoot strikerも足首衝撃加速度に違いが見られなくなった。このことから、足首衝撃加速度は走速度によって左右され、jogging程度の遅い走速度の時に着地動作の違いによる差が現われやすいことが考えられる。

先行研究によると、rearfoot strikeの方がmidfoot strikeに比べて着地衝撃力(受動的衝撃力¹⁸⁾)は大きいとされている(Cavanagh²⁾, Dickinson³⁾)。この着地衝撃にみられる受動的な力波形は下腿や足に取付けた加速度波形の鋭く大きな立ち上がりと時間的に一致するため、衝撃によるものと解釈されている¹⁰⁾。そのため、加速度計の信号から着地衝撃力を推定できるとNiggらは述べている¹⁴⁾¹⁶⁾。

仮に、Niggらの考えのとおりだとすると、rearfoot strikerは着地衝撃力が大きいために衝撃加速度は大きく、逆に、midfoot strikerやforefoot strikerの衝撃加速度は小さくなることが予想される。しかし、今回の実験からはrearfoot strikerの衝撃加速度の方がmidfoot strikerに比べて小さい結果となり、Niggらの考えとは一致しなかった。またこのことに関して、飯本らは、足首に付けた加速度計から得られた足首衝撃加速度が着地動作によって変化するが、その変化と着地衝撃力との関係は一樣でなかったことを報告している⁵⁾⁶⁾。これらのことから、必ずしも衝撃加速度の

大きさが着地衝撃力の大きさを反映しているとは言いがたく、衝撃加速度と着地衝撃力との関係を再検討する必要があるように思われる。

(3) 着地動作のシミュレーションモデル

宮地ら¹³⁾²⁰⁾はランニング中の着地動作を粘弾性モデルを用いてシミュレーションしている。図6はその粘弾性モデルである。このモデルでは、着地時の地面反力や集中質量要素に働く衝撃加速度などをシミュレーションできる特徴を有している。ここで、 m_2 は衝突にかかわる部分の質量であり、松井の求めた部分質量¹¹⁾などから考えると、1.3kg以下であれば足部の質量、それ以上であれば足・下腿等を含んだ質量といえることができる。そして m_1 は身体質量から m_2 を除いたものとする、 m_2 に働く衝撃加速度はほぼ足首付近に生ずる衝撃加速度としてとらえることができる。そこで、着地衝撃力に与える影響の大きい m_2 部分の質量を変化させて着地動作をシミュレーションさせてみた。その際に必要なばね、粘性に関する係数は宮地のデータを採用し、下腿・足部分の衝突速度は0.85 m/sとした。この速度は図7に示されるように、足首衝撃加速度の値が着地動作によって異なって

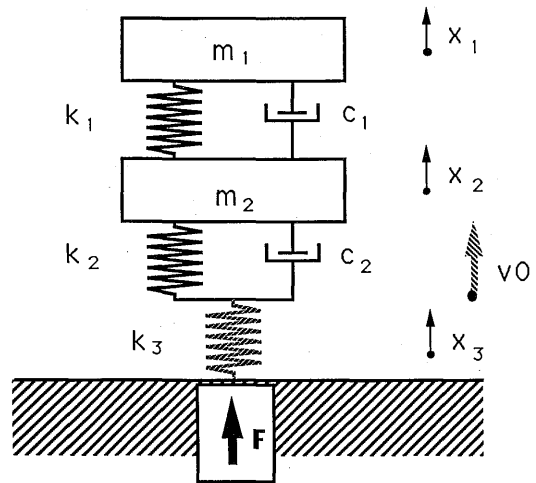


Fig. 6 Viscoelastic model of landing in running (Miyaji, etc, 1988)

- m_1 : mass of upper body and upper leg
- m_2 : lower leg mass
- k_1 and c_1 : model of knee action
- k_2 and c_2 : model of ankle joint action
- k_3 : non-linear elastic element of foot tissue

Touchdown velocity of the heel (m/s)

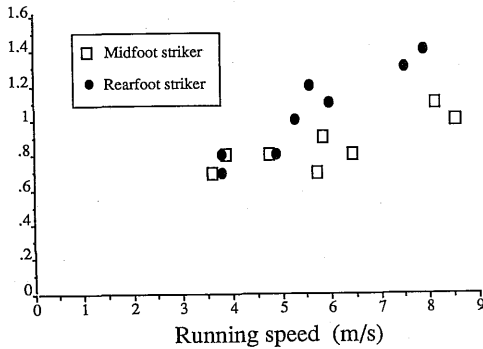


Fig. 7 Running speed and touchdown velocity of the heel.

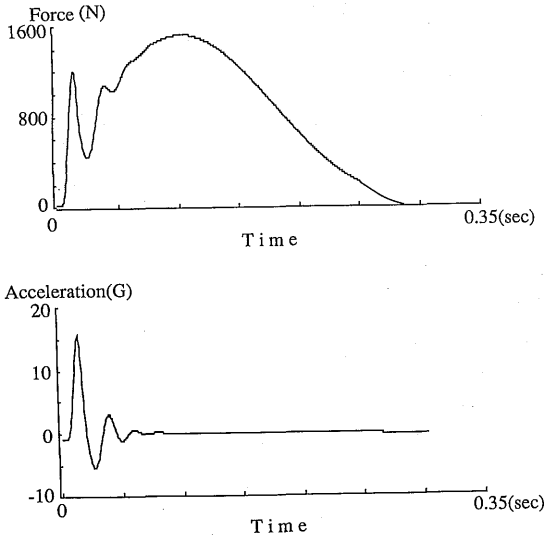


Fig. 8 Results of a simulated ground reaction force and ankle acceleration in rearfoot strike running.

Conditions of the model simulation:

- $m_1 = 59.5\text{kg}$
- $m_2 = 5.5\text{kg}$
- $k_1 = 2.1\text{e}4[\text{N/m}]$
- $c_1 = 3.5\text{e}2[\text{Ns/m}]$
- $k_2 = 4.0\text{e}5[\text{N/m}]$
- $c_2 = 4.0\text{e}3[\text{Ns/m}]$
- $k_3 = 1.0\text{e}13[\text{N/m}^5]$
- $v_0 = -0.85[\text{m/s}]$

いた時の走速度 (約 5 m/s) での衝突速度に近く、この値は過去に測定された衝突速度の範囲内にある⁷⁾¹⁵⁾。

図 8 は rearfoot striker に見られるような着地衝撃力の大きな例 ($m_2 = 5.5\text{kg}$), 図 9 は midfoot striker に見られるような着地衝撃力の小さな例 ($m_2 = 1.3\text{kg}$) である。質量的な関係から言えば、図 8 は膝から下の質量が、図 9 では足首から下の質量が着地の際の衝突に関与していることになる。この 2 例を比較すると、着地衝撃力の大きいときに衝撃加速度は小さくなっていることがわかる。このことを明確にするうえで、 m_2 の質量を $0.5\text{kg} \sim 12.5\text{kg}$ の範囲で変化させたときの着地衝撃力と衝撃加速度との関係を図 10 に示した。この結果、地面反力の前半の部分で生ずる着地衝撃力の大きさが足首付近に生ずる衝撃加速度の大きさにつながるとは考えにくく、衝撃加速度の大きさから着

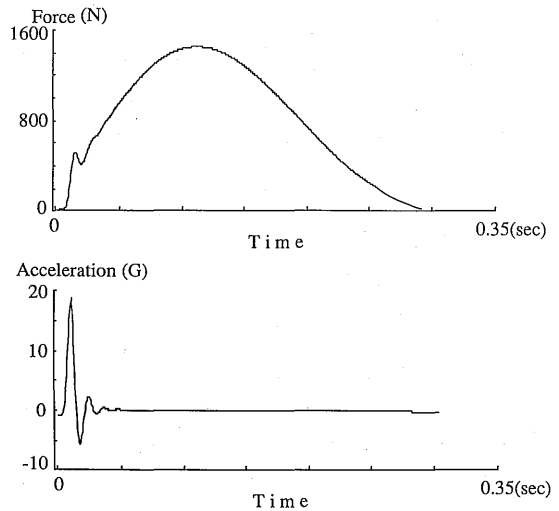


Fig. 9 Results of a simulated ground reaction force and ankle acceleration in midfoot strike running.

Conditions of the model simulation:

- $m_1 = 63.7\text{kg}$
- $m_2 = 1.3\text{kg}$
- $k_1 = 2.1\text{e}4[\text{N/m}]$
- $c_1 = 3.5\text{e}2[\text{Ns/m}]$
- $k_2 = 4.0\text{e}5[\text{N/m}]$
- $c_2 = 4.0\text{e}3[\text{Ns/m}]$
- $k_3 = 1.0\text{e}13[\text{N/m}^5]$
- $v_0 = -0.85[\text{m/s}]$

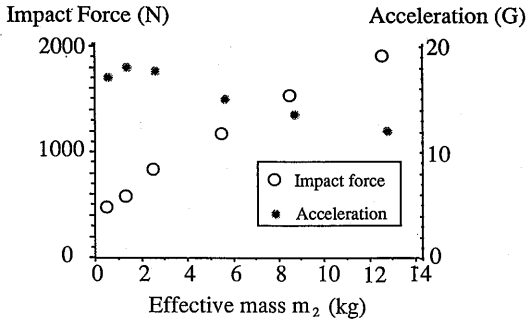


Fig. 10 Results of the impact forces and accelerations at ankle as a function of the effective mass m_2 in landing from the Miyaji's viscoelastic model. Conditions of the model simulation are as follows:
 touchdown velocity = -0.85m/s
 mass of a test subject = 65kg

地衝撃力を推定することは困難であることが明らかとなった。また、着地動作の違いはモデル的には m_2 の質量の大きさとして現われると考えられ、rearfoot strike の場合は m_2 が大きく、midfoot strike や forefoot strike では m_2 は小さくなることが示唆された。

また、今回の実験では、走速度の増加にともない着地動作の違いが足首衝撃加速度の大きさに影響しなかったが、これは rearfoot striker における衝突速度の増加によるものと推察される (図7)。この衝突速度の増加の衝撃加速度に対する影響を同じシミュレーションモデルを用いて検討したが、 m_2 の質量を一定にしても衝突速度の増加にともない衝撃加速度も増加することが確認された (図11)、実験結果と一致した。

以上、着地動作を質量・ばね・ダンパのモデルに置き換えて検討してきたが、今回用いたモデルはシューズの影響は考えておらず、あくまで裸足の状態で走ったものである。したがって、シューズを履いて走ったときの着地衝撃力や衝撃加速度の大きさよりも大きくなっており、そのまま実走テストの値 (例えば今回の実験から得られたデータなど) と比較することはできない。しかし、シューズによる衝撃緩衝の効果が一定であるとすれば、着地動作の違いがモデル的には質量 m_2 の違いとして現われると考えられる。そして、前述したように、前脛骨筋の働きが着地動作に影響していると考えられることから、着地時の衝突に関

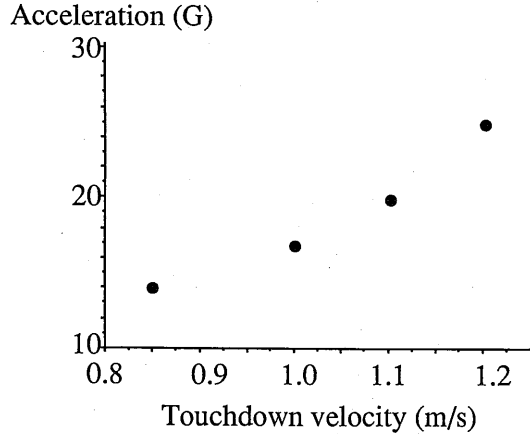


Fig. 11 Influence of touchdown velocity on the ankle acceleration obtained from the model simulations ($m_2 = 5.5\text{kg}$).

する質量の変化に対しても、前脛骨筋の使い方が影響していると推察されるが、他の下腿の筋との関連性について課題を残した。

IV. まとめ

長距離ランナーには踵から着地する rearfoot striker が多い。この着地動作には前脛骨筋の働きが作用していると考えられる。そこで、長距離走における前脛骨筋の働きと着地動作との関係を筋の硬さ変化、筋電図および衝撃加速度などから検討した結果、次のことが明らかとなった。

1) 5000m レース後に前脛骨筋の硬さの増加が目立ったランナーは、だいたい rearfoot striker であると考えられた。

2) 筋電図から rearfoot striker には、前脛骨筋の着地直前での筋活動が認められ、midfoot striker にはその傾向があまりなかった。しかし、これらの前脛骨筋の筋放電パターンからだけではレース後の筋の硬さの増加の違いを説明することはできなかった。

3) rearfoot strike を行なった場合、midfoot strike よりも着地時の足首にかかる衝撃加速度は小さくなる傾向にあった。着地動作のシミュレーションモデルを用いて衝撃加速度と着地衝撃力とを検討したところ、この衝撃加速度の大きさが直接、着地衝撃力の大きさに相当するわけではなく、加速度計から得られた値を着地衝撃の評価に用いることは困難であると考えられた。

4) 長距離レーススピード以上の走速度になると、rearfoot strike と midfoot strike という着地動作の違いが衝撃加速度の大きさにあまり関与しなくなったが、このことは rearfoot striker における着地時の衝突速度の増加によるものと考えられた。

参 考 文 献

- 1) Cailliet, R. (荻島秀男訳)：足と足関節の痛み(第2版), 66-79, 医歯薬出版, 1985.
- 2) Cavanagh, P.R. and LaFortune, M.A.: Ground reaction forces in distance running., *Journal of Biomechanics*, 13, 397-406, 1980.
- 3) Dickinson, J.A., Cook, S.D. and Leinhardt, T.M.: The measurement of shock waves following heel strike while running., *Journal of Biomechanics*, 18, 415-422, 1985.
- 4) 土居陽治郎, 小林一敏: 筋肉の硬さに測定に関する研究, 筑波大学体育科学系紀要, 第11巻, 265-274, 1988.
- 5) 飯本雄二, 小林一敏, 中田了: 足の着き方と着地衝撃の関連性についての力学的研究, 東京体育学研究, 10, 31-34, 1983.
- 6) 飯本雄二, 小林一敏, 前田寛: 走運動における着地時衝撃の Modeling, 第7回バイオメカニクス学会大会論文集「よい動きとは」, 192-197, 1985.
- 7) Kaelin, X., Unold, E., Stussi, E. and Stacoff, A.: Interindividual and intraindividual variabilities in running., In Winter, D.A., Norman, R.W., Wells, R.P., Hayes, K.C. and Patla, A.E. (Editors), *Biomechanics IX-B*, 356-360, 1985.
- 8) Kerr, B.A., Beauchamp, L., Fisher, V. and Neil, R.: Footstrike patterns in distance running., *Biomechanical aspects of sport shoes and playing surfaces*, 135-142, 1983.
- 9) Kirby, R.L., McDermott, P.: Anterior tibial compartment pressures during running with rearfoot and forefoot landing styles., *Arch. Phys. Med. Rehabil.*, Vol. 64, No. 7, 296-299, 1983.
- 10) 小林一敏: 衝撃加速度からの変位の算出,

Japanese Journal of Sports Science, 6-3, 185-190, 1987.

- 11) 松井秀治: 運動と身体の重心～各種姿勢の重心位置に関する研究～, 21-42, 体育の科学社, 1958.
- 12) 松下健二, 後藤幸弘, 岡本勉, 辻野昭, 熊本水頼: 走の筋電図的研究, 体育学研究, 第19巻, 第3号, 147-156, 1974.
- 13) 宮地力, 小林一敏, 牛山幸彦: ランニング中の着地衝撃の粘弾性モデルによるシミュレーション, 筑波大学体育科学系紀要, 第11巻, 253-263, 1988.
- 14) Nigg, B.M.: Biomechanical aspects of running, In B.M. Nigg (Editor), *Biomechanics of running shoes*, pp. 1-25, Champaign, IL: Human Kinetics, 1986.
- 15) Nigg, B.M.: Experimental techniques used in running shoe research., In B.M. Nigg (Editor), *Biomechanics of running shoes*, pp. 27-61, Champaign, IL: Human Kinetics, 1986.
- 16) Nigg, B.M.: Loads in selected sport activities -an overview, In Winter, D.A., Norman, R. W., Wells, R.P., Hayes, K.C. and Patla, A. E. (Editors), *Biomechanics IX-B*, 91-96, 1985.
- 17) Nigg, B.M., Bahlisen, A.H., Denoth, J., Luethi, S.M. and Stacoff, A: Factors influencing kinetic and kinematic variables in running., In B.M. Nigg (Editor), *Biomechanics of running shoes*, pp. 139-159, Champaign, IL: Human Kinetics, 1986.
- 18) Nigg, B.M., Denoth, J. and Neukomm, P. A.: Quantifying the load on the human body: Problems and some possible solutions, In A. Morecki, K. Fidelus, k. Kedzior and A. Wit (Editors), *Biomechanics VII-B* pp. 88-99, 1981.
- 19) 小田博美, 小林一敏, 大島義晴: 走運動中身体が受ける力学的衝撃, 身体運動の科学IV「スポーツのバイオメカニクス」(日本バイオメカニクス学会編), 34-44, 杏林書院, 1983.
- 20) 牛山幸彦: ランニングにおける着地衝撃のバイオメカニクス的研究, 筑波大学体育研究科修士論文抄録第10巻, 81-84, 1988.