

シューズを検討するための
歩行・走行・跳躍時における足関節運動
のX線映画，動作筋電図的研究

関西医科大学	岡本勉
(共同研究者) 同	澤田敏
同	堤博美
福井大学	吉澤正尹
兵庫教育大学	後藤幸弘
仏教大学	風井訖恭
大阪教育大学附属 高等学校池田校舎	岡秀郎
大阪教育大学名誉教授	根本芳男

**A Cineradiographic, Kinesiological, and
Electromyographic Study of Ankle Movement
during
the Use of Shoes for Walking and Running
by**

Tsutomu Okamoto, Satoshi Sawada, Hiromi Tsutsumi
Kansai Medical University
Masatada Yoshizawa
Fukui Universtiy
Yukihiro Goto
Hyogo Usiversity of Teacher Education
Nobuyuki Kazai
Bukkyo University
Hideo Oka
Osaka Kyoiku University High School
Yoshio Nemoto
The professor emeritus from Osaka Kyoiku University

ABSTRACT

Using electromyography, electrogoniometry, cineradiography, and foot-contact kinetic measurements (contact forces, barogram, and center of pressure pattern), we investigated walking and running to gather basic data on shoes. We obtained the following results.

1. During contact with the ground, forces were concentrated mainly (a) at the heel, especially on the outside border, and (b) along the forefoot in the region of the metatarsal heads. For this reason the shoe needs to adequately support the calcaneus and the metatarsal heads.

2. When the foot pushes off to leave the ground, the midfoot, especially that part around the ball of the foot, should not be restricted by the shoe so as to add to the load of the calf muscles.

3. The upper portion of the toe compartment should be constructed so as not to restrict hyperextension of the great toe before the heel contacts the ground.

4. Electromyography, polyaxial electrogoniometry, cineradiography, and simultaneous determination of (a) contact forces, (b) distribution of contact pressure, and (c) path of the center of pressure can all combine to give useful information that might aid in the optimal design of shoes.

はじめに

歩行・走行・跳躍時の筋電図，エレクトロゴニオグラム（電気角度変化曲線），X線映画，フォースプレートによる床反力の歪変化曲線などの記録が，シューズを検討する上でどの程度貢献できるかを実験的に検討を加えた。

なお跳躍動作については，横江¹⁾も指摘しているように，走は跳の連続であるという観点から，今回は歩と走について比較検討することにした。

実験方法

歩行習得初期の1歳前後の乳幼児から成人に至る延べ200余名を対象に，歩行・走行について下肢筋群の筋電図，足・膝・股関節のゴニオグラム，離床・接床期を区分するバゾグラム，16mm

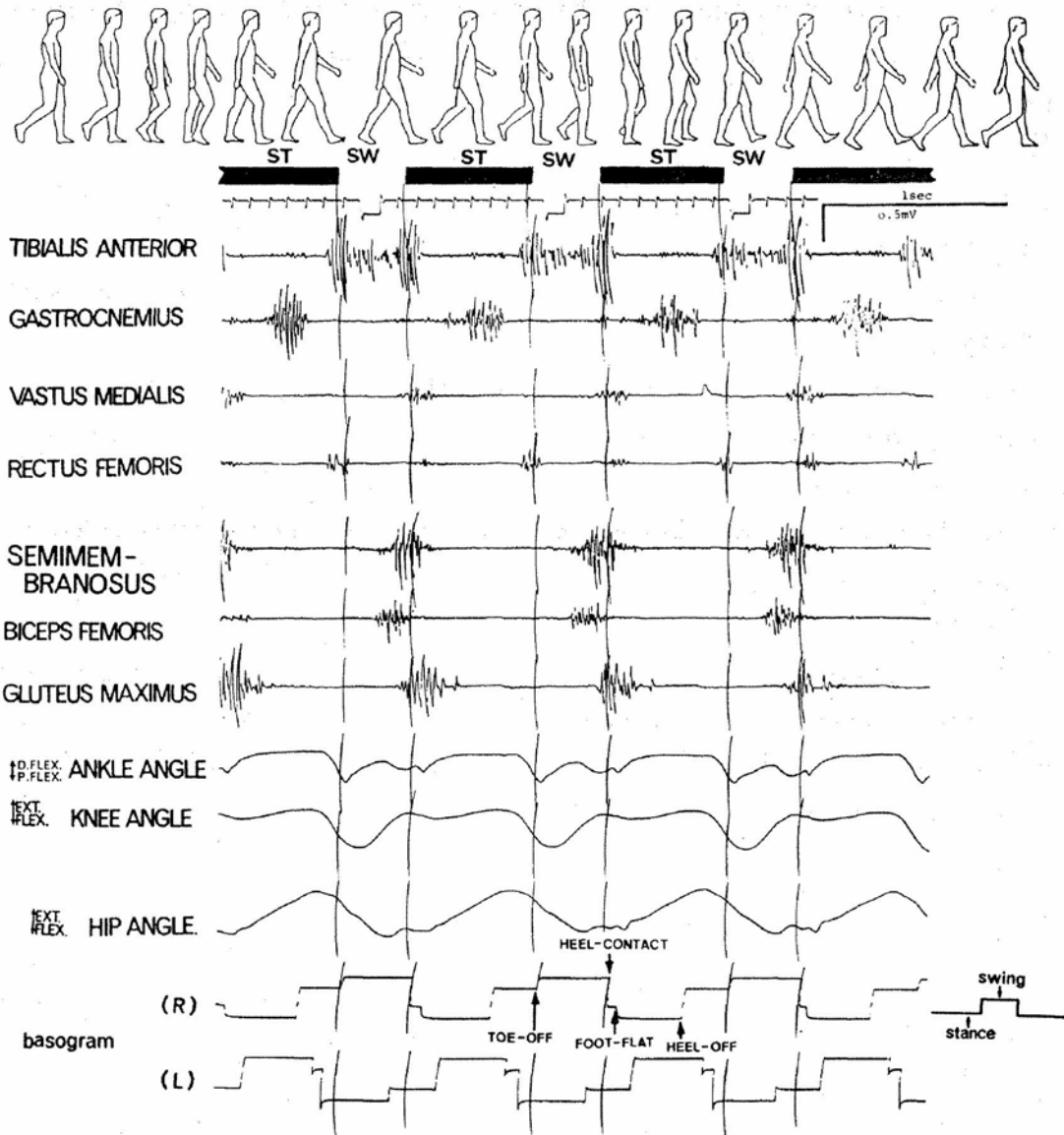
映画のフレームシグナルを20ch多用途脳波計，12ch電磁オッシログラフで同時記録した。

なお成人若干名については，上記動作・筋電図記録の他に，足関節の回内・回外を記録できる2軸ゴニオメータ，X線映画ならびに床反力，圧中心，足圧分布図を記録できる歩行・走行解析装置を用いて実験を行なった。

結果ならびに考察

図1は，成人歩行の代表的な下肢筋群の筋電図パターンならびに動作記録（下肢の各関節の角度変化曲線，接地・離地を区別するバゾグラム）を示している。足底スイッチを用いて記録したバゾグラムから，凸部は足が地面から離れている離床期（swing phase: SW）を示し，凹部は足が地面に着いている接床期（stance phase: ST）を示し

NORMAL WALKING (ADULT)



7980 T.T. 73

図1 成人歩行の筋電図

ている。

着地付近において接地の際の衝撃を吸収するため、前脛骨筋 (Tibialis anterior)、内側広筋 (Vastus medialis)、大腿直筋 (Rectus femoris)、大腿二頭筋 (Biceps femoris)、半膜様筋 (Semi-membranosus)、大殿筋 (Gluteus maximus) に集中的な放電がみられ、その後、接床期の後半、踵の押し上げのために腓腹筋 (Gastrocnemius) に

強い放電がみられた。次いで離床のため、股関節の屈曲に働く大腿直筋、足関節の背屈に働く前脛骨筋に放電がみられた。

足関節筋については、前脛骨筋とその拮抗筋である腓腹筋の放電様相は相反的なパターンを示した。

通常、負荷が小さいときは主動筋に放電がみられ、拮抗筋には放電がみられない場合が多い。ま

た、軽い負荷で反復するような動作では、相拮抗する筋の放電が交互に現れる相反的なパターンがみられる。これは、動作が円滑になされていることを示している。成人歩行（図1）では、前脛骨筋と腓腹筋の放電は相反のパターンを示したが、乳幼児の歩行習得初期では、これらの両筋には強い同時放電がみられた²⁾。しかし、この時期でも、安定した支持歩行では相反神経支配の放電パターンがみられた²⁾。このことから、乳幼児の独立歩行の習得初期では非常に不安定で筋力も十分でないため、同時放電を示したものと思われる。次いで歩行習得1～2カ月後では、両筋には相反のパターンがかなりみられるようになってきた²⁾。これは、負荷の軽減とともに、乳幼児なりに円滑な動作がなされるようになってきたことを示している。それ故、歩行のように負荷の軽い反復する動作において、相拮抗する筋群の放電が同時放電を示すか、あるいは相反的模式を示すかにより、筋の作用機序の面から円滑な動作がな

されているかどうかを知ることが出来る。このことから、非常に不安定な歩行習得初期の乳幼児の靴底については十分考慮する必要がある。

膝・股関節筋については着地付近に多くの筋が参画している。相拮抗する2関節筋である大腿直筋と大腿二頭筋、半膜様筋の放電様相には変異がみとめられた。そこで、電磁オッシログラフを用いて早送りスピード（20cm/sec）で記録した。

図2は歩行、図3は走行（全力の60～65%）の筋電図を示している。

歩行時（図2）の着地前後をみると、2関節筋である大腿直筋の放電が増大するとき、大腿二頭筋、半膜様筋の放電が減少・消失する傾向がみられ、拮抗筋抑制と考えられる放電様相が多くみとめられた³⁾。さらに早足歩行や走行になると、その傾向が顕著になってきた（図3）。

通常、外部に力を伝える場合、2つ以上の関節が直列につながって同じ動作をするとき、どちらかの関節が制約要因（弱関節）となり、その関節

NORMAL WALKING (ADULT)

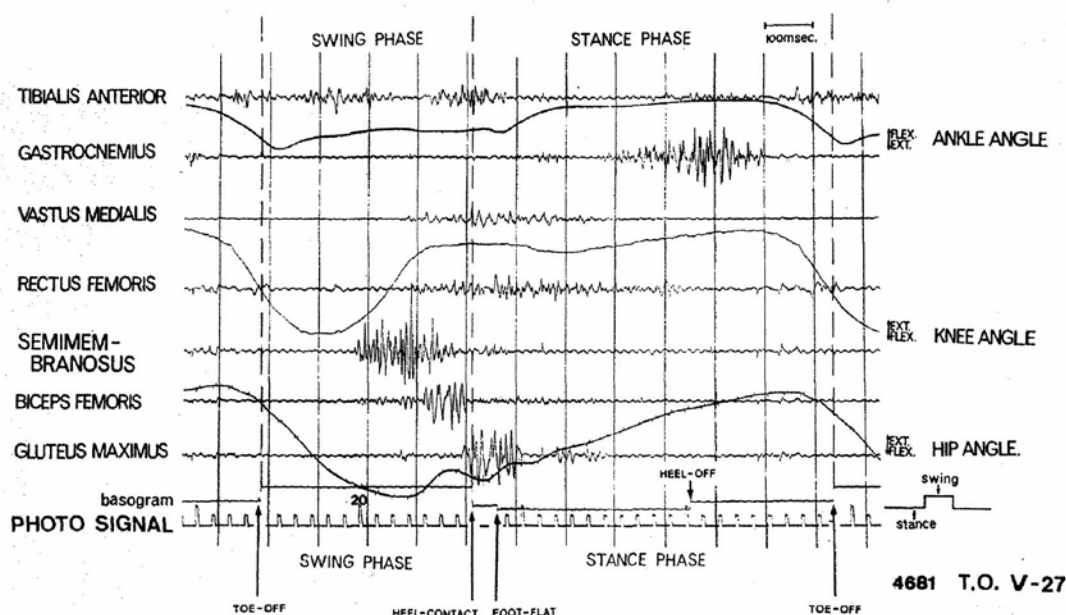


図2 電磁オッシログラフで記録した成人歩行の筋電図

RUNNING

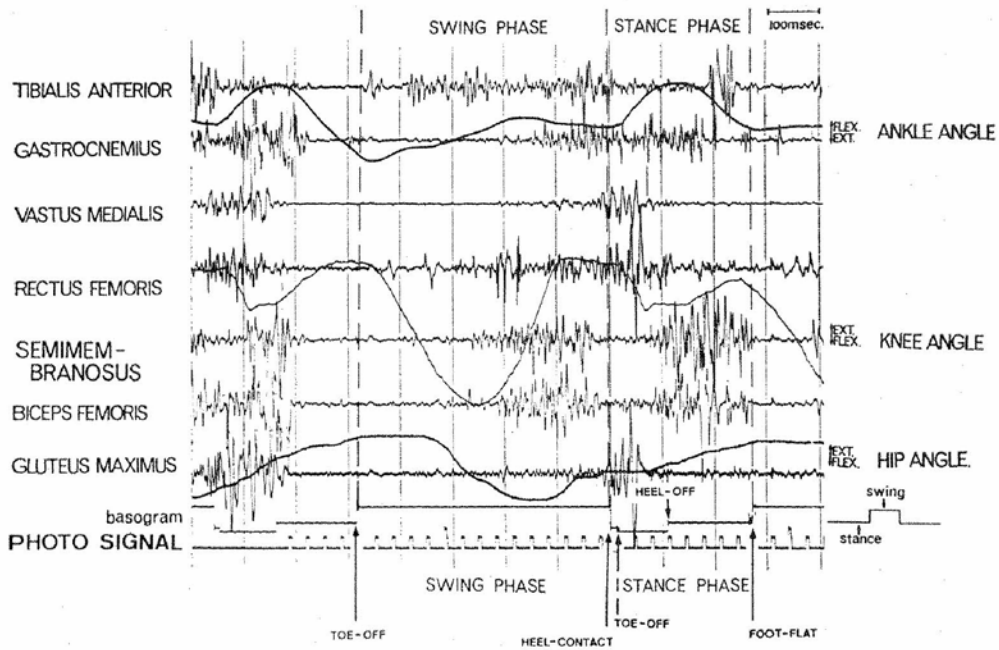


図3 電磁オシログラフで記録した成人走行の筋電図

の筋により負荷がかかっている³⁾。歩行・走行の着地においては膝・股関節が共に伸展されているときであり、大腿直筋と大腿二頭筋、半膜様筋の放電パターンから、股関節の伸展よりも膝関節の伸展がより積極的、すなわち膝伸展筋により負荷がかかっていることがわかる。

次に推力の得られる踵の押し上げ（キック）期においては腓腹筋に強い放電のみられるとき、歩行（図2）では大腿直筋、大腿二頭筋、半膜様筋の2関節筋には放電はみられないが、走行（図3）では大腿二頭筋、半膜様筋に強い放電がみられ、拮抗筋の大腿直筋の放電が減少・消失する傾向を示した。これは着地時とは逆のパターンであり、膝伸展よりも股関節の伸展がより積極的になされていることを示している。

歩行・走行における足関節の動きは足底屈・足背屈だけでなく、横江¹⁾ Inman et al⁴⁾, Cavanagh⁵⁾らが指摘しているように、回内（外反）、回外（内反）動作を伴うので、その間、下腿・大

腿の回旋が引き起こされることが知られている。それ故、複雑な足関節の動きが膝・股関節筋にも影響を与えることは十分考えられる。上述したように、膝・股関節の2関節筋である大腿直筋、大腿二頭筋の筋電図を記録することによって、脚伸展の間、どちらの関節により負荷がかかっている

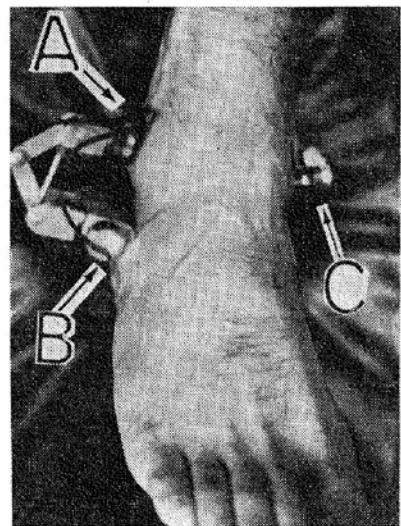


図4 足関節に装着した2軸ゴニオメータ（A, B）

かを教えてくれる。このような現象は、いくら精巧な視覚的分析機器を用いても把握することが出来ないで、筋電図記録が非常に有効である。

歩行・走行時の足関節運動を詳細にみるには、距踵関節での回外・回内運動を把握する必要がある。横江¹⁾、Cavanagh⁵⁾は、フィルム分析から回内・回外を測定しているが、今回、足関節の屈伸運動の他に回内・回外を連続記録できる2軸ゴニオメータを試作した(図4)。図中の外側Aは果関節での屈伸、Bは距踵関節での回内・回外を記

録できるゴニオメータである。内側のCは従来の1軸ゴニオメータである。

図5は、歩行・走行について2軸ゴニオメータによるゴニオグラムと筋電図、床反力を同時記録したものである。

歩行・走行とも、踵が地面に着くと同時に急激に回外(supination)がなされるが、その後、歩行では離床まで徐々に回内(pronation)がなされている。一方、走行では足底全面接地の間、ほぼ回外を保ち、踵の押し上げと同時に急激に回内さ

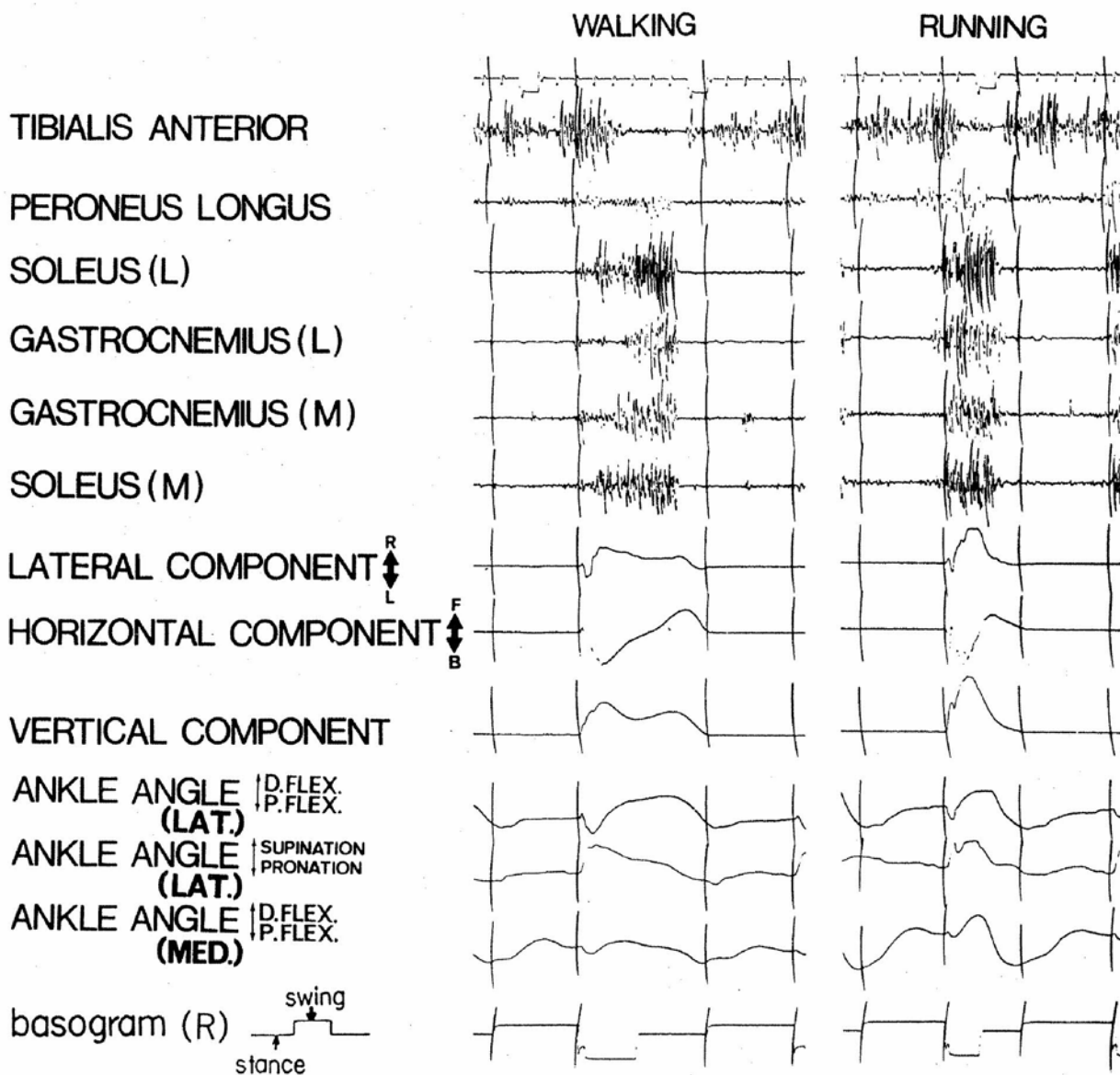


図5 成人の歩行・走行時の多元記録
(筋電図, 床反力歪曲線, 二軸ゴニオグラムならびにバゾグラム)

れている。前後方向の床反力から推力の得られる間、歩行・走行ともに回内がなされていた。Cavanagh⁵⁾は、着地時に最大回外位になることを図示しているが、図5の2軸ゴニオグラムから、着地時は急激に回外されつつあることがわかる。

図6は、新しいシューズ (new shoes) と踵外側の極度に摩耗した古いシューズ (used shoes) を着用した歩行に、試作した2軸ゴニオメータを適用したものである。

古いシューズでは、新しいシューズのように着地時に急激な回外はみられず、徐々に回外がなされ、足底全面接地の間、回外位を保ち、推進にきりかわる頃急に回内がなされている。古いシューズでは着地後徐々に回外されているのは、踵外側の摩耗により着床面が広がっていることに起因しているものと考えられる。Cavanagh⁵⁾は、摩耗がひどいと足に害を及ぼすのは否定できず、摩耗によって足がいきなり平らに着地することにな

WALKING

TIBIALIS ANTERIOR

PERONEUS LONGUS

SOLEUS (L)

GASTROCNEMIUS (L)

GASTROCNEMIUS (M)

SOLEUS (M)

LATERAL COMPONENT $\begin{matrix} R \\ \updownarrow \\ L \end{matrix}$

HORIZONTAL COMPONENT $\begin{matrix} F \\ \updownarrow \\ B \end{matrix}$

VERTICAL COMPONENT

ANKLE ANGLE (LAT.) $\begin{matrix} |D.FLEX. \\ |P.FLEX. \end{matrix}$

ANKLE ANGLE (LAT.) $\begin{matrix} |SUPINATION \\ |PRONATION \end{matrix}$

ANKLE ANGLE (MED.) $\begin{matrix} |D.FLEX. \\ |P.FLEX. \end{matrix}$

basogram (R) $\begin{matrix} \text{swing} \\ \text{stance} \end{matrix}$

NEW SHOES

USED SHOES

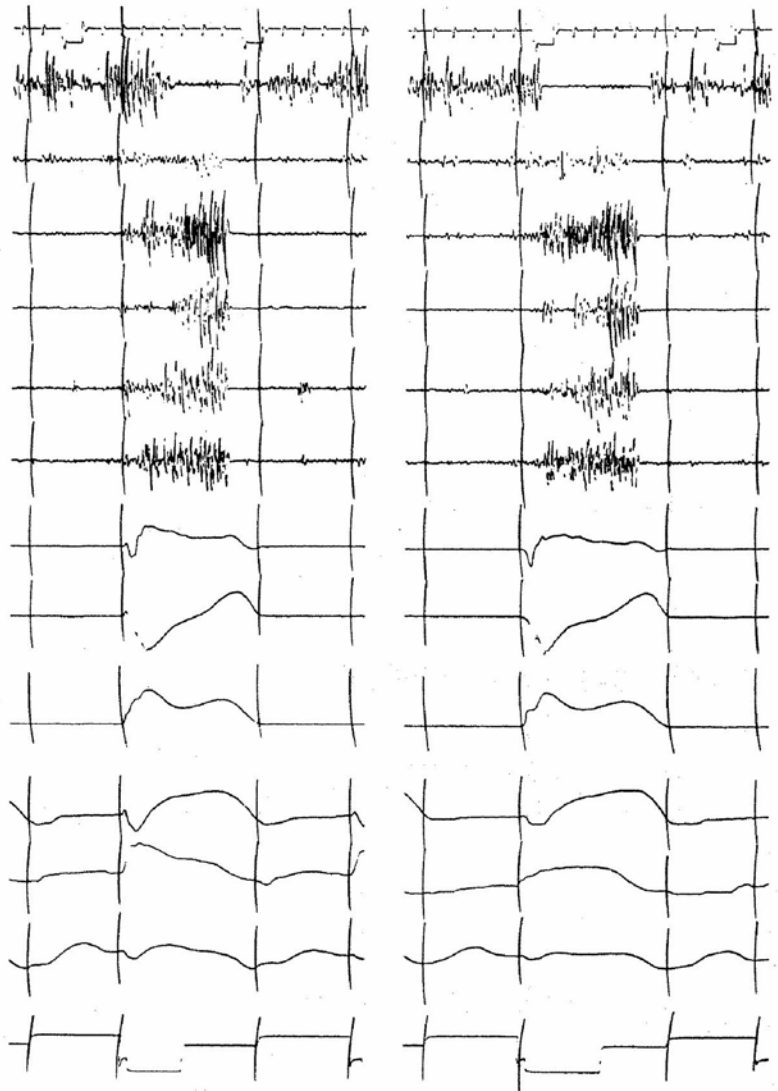


図6 新しいシューズと古いシューズを着用した歩行の多元記録

ってしまうと望ましいソフトな“ナイフの刃”のような着地ができず、足と脚の数多くの関節に急激な動きを引き起こすことを指摘している。実際、古いシューズでは、同時記録した垂直分力の曲線を見ると、着地直後のカーブ上昇時に段がみとめられ、円滑な動作がなされていないことを示

している。

上述したように、2軸ゴニオメータを足関節の運動に適用することは、フィルム分析だけでは把握できない瞬時の微妙な変化を記録することができるので、今後シューズを検討するための貴重な道具となりうることがわかった。

Walking

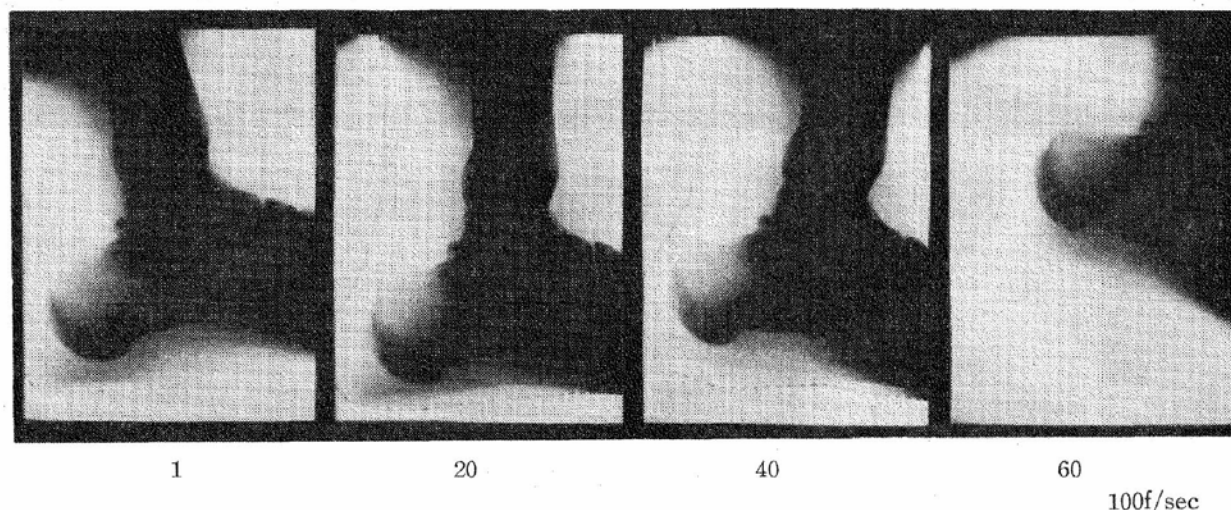


図7 35mm X線高速カメラ（100コマ/秒）による歩行時の足関節部の連続写真

図7は35mm高速X線カメラ（100コマ/秒）で歩行時の足関節部を側面から撮影（10×15cm）し、20コマ間隔で示したものである。

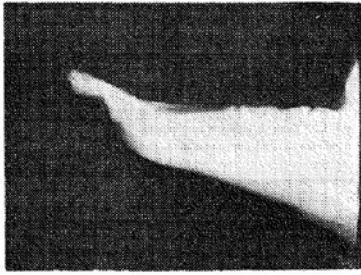
踵の接床時と離床時を比較すると、踵の下部脂肪層が、接地時では離床時に比べてかなり薄くなっているのがわかる。すなわち、脂肪層が緩衝作用の大きな役割を果していることを示している。前足部分では、踵下部に比べて中足骨頭下部の脂肪層は薄く、接床時は離床時に比べて脂肪層が更に薄くなっているのがわかった。このことから、Cavanagh⁵⁾も指摘しているように、シューズには踵部分だけでなく、前足部を保護する機能が必要と思われる。

図8、9は、足全体の動きをとらえるため秒速6コマで撮影（35×35cm）したX線写真である。

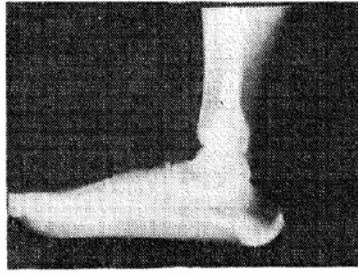
着床前の歩行と走行を比較すると、走行時、母趾が極端に背屈されていた。これは、スピードが増すにつれ足関節の足背屈が強くなされたとき、このような母趾背屈が伴うものと思われる。走行では母趾が極度に背屈されるため、特にランニングシューズのアップパーのトゥボックス付近は少し余裕が必要と思われる。また、踵の押し上げ時、中足骨頭を支点として踵が45°以上挙上されていることから、母趾球付近に柔軟な材質が用いられることにより、下腿三頭筋の負担が軽くなるものと考えられる。

X線映画では、脂肪層や骨の動きの変化を詳細にとらえることが出来るので、今後側面からだけでなく、後面から撮影すると、足と下腿との関係など興味ある知見が得られるものと思われる。

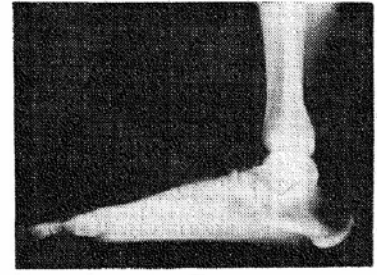
Walking



A



B



C



D



E



F



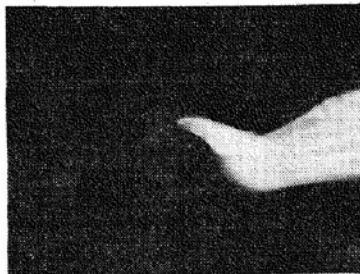
G



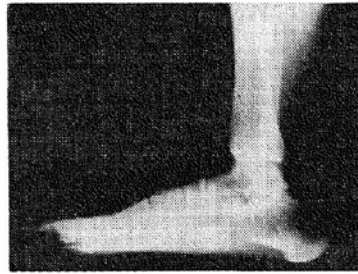
H

図8 歩行時のX線写真
(6コマ/秒)

Running



A



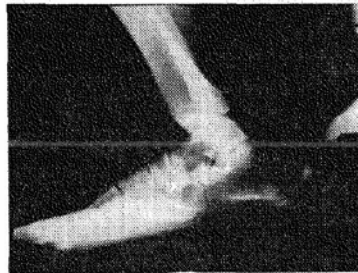
B



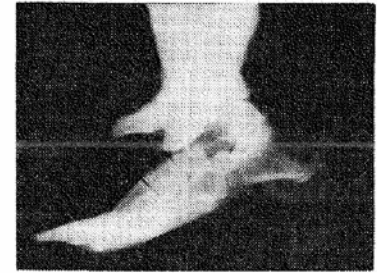
C



D



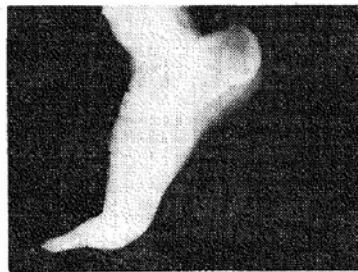
E



F



G



H

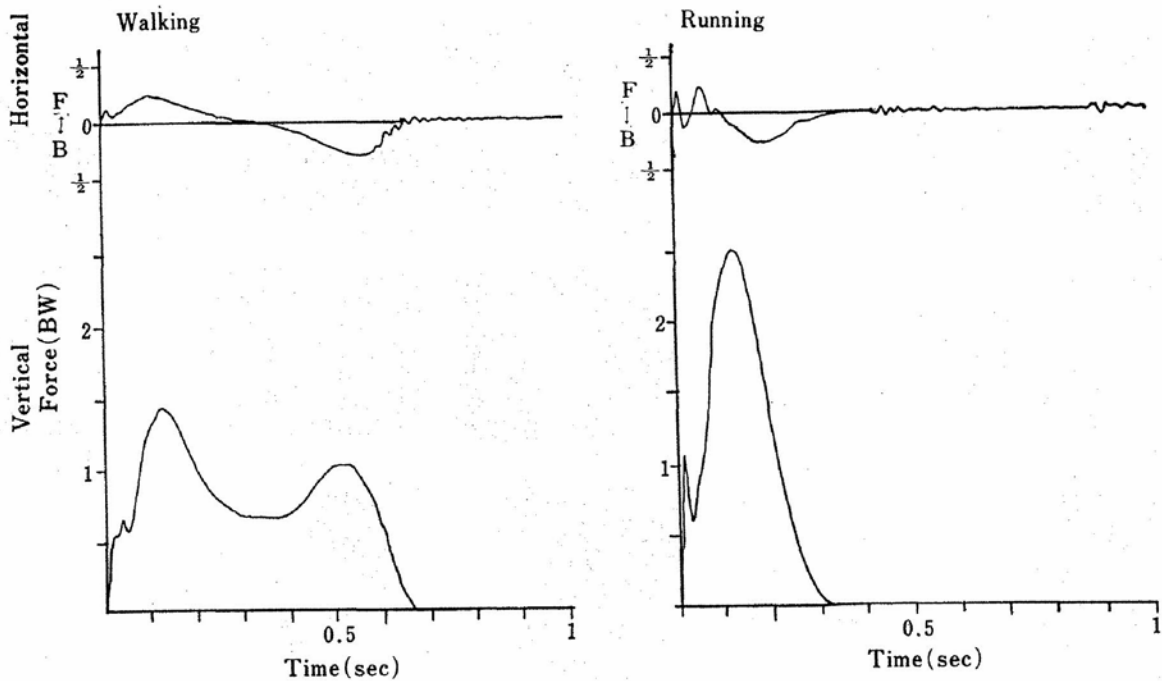
図9 走行時のX線写真
(6コマ/秒)

図10は、歩行・走行解析装置（スイス、キスラー社製）を用いて記録した、裸足での歩行・走行の前後方向の力と垂直分力の変化曲線を示している。

図11は、床反力のデータから、圧力分布の中心点がどこを通るかをコンピュータにより描かせたものである。

図12, 13は、床反力と同時にビデオカメラによって撮影した圧力分布図で踵・前足部の白い部分は、大きな力がかかっていることを示している。

歩行の接地時間は0.66秒、走行は0.32秒であった。垂直分力は、歩行では二峰性のカーブを描くのに対し、走行では一峰性を示し、踵接地直後に第1ピーク、次いで接床の中頃で最大（第2ピーク）となるのが特徴的であった。



(F : ブレーキ, B : キック, BW : 体重)

図10 自動解析装置による歩行ならびに走行の床反力歪曲線

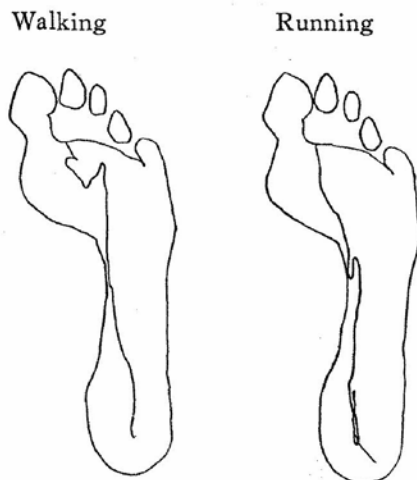
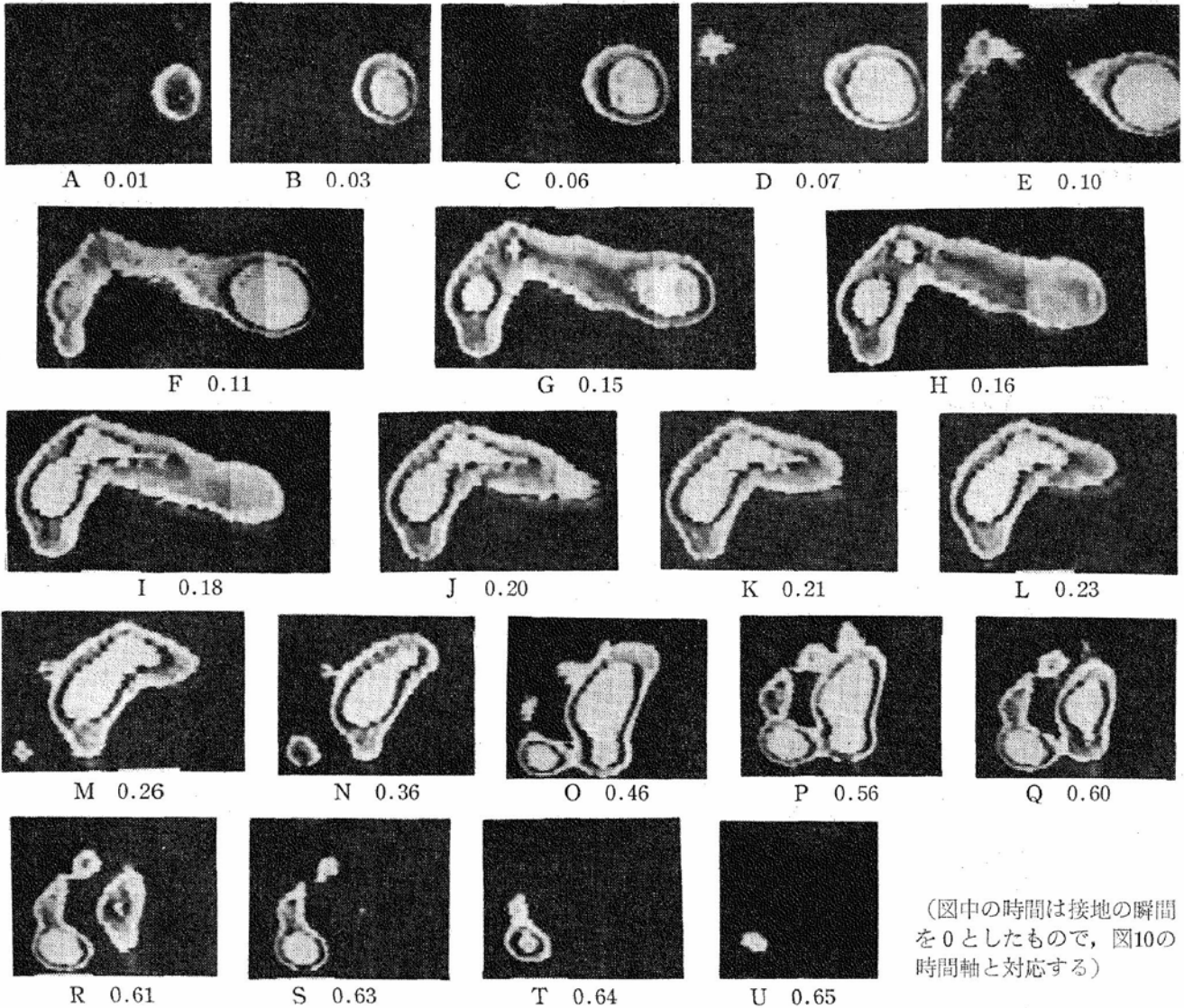


図11 自動解析装置による足圧中心移動曲線

歩行でも、図10に示すように、接踵直後に第1ピークらしい段がみられる場合と、そのような段がみられずスムーズな上昇カーブを描く場合が存在した。一方、つま先歩行では、接床直後に段がみとめられる例は存在しなかった。このことは、踵接地では接地面がつま先（前足部）歩行に比べて、小さく不安定で一定しないため、変異がみとめられたものと思われる。推力の得られる間、走行では体重の2.5倍の力がかかり、前足部、すなわち中足骨頭、母

Walking



(図中の時間は接地の瞬間を0としたもので、図10の時間軸と対応する)

図12 自動解析装置による歩行時の足圧分布図 (単位: sec)

趾球付近に大きな力が長い時間働いているのがわかる。同様のことを Cavanagh⁵⁾ も報告している。一方、ソールの摩耗は、多くの者では後部外側の端と母趾球付近がひどい。この摩耗は、シューズと地面との間の動きが激しい場所で起きていることを示している。

以上のことから、大きな圧のかかるところは当然足を保護する機能が必要であり、摩耗の多い部分はそれを防ぐ材質が考慮される必要がある。

また歩行・走行解析装置を用いることにより、圧の大きさ、方向、圧分布図を詳細に解析するこ

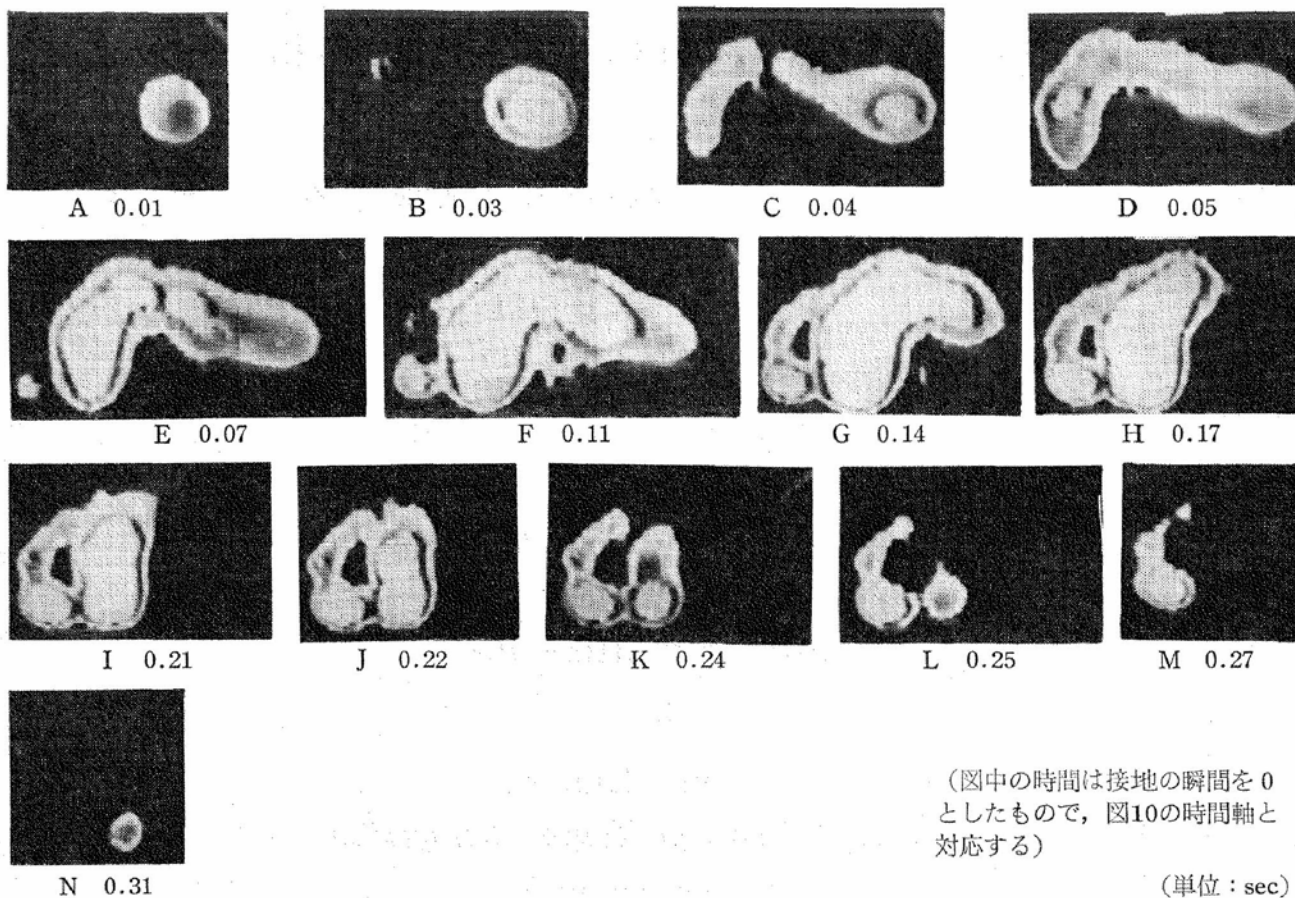
とは、今後シューズを検討するための有効な手段となりうる事がわかる。

おわりに

シューズを検討する基礎データを収集するため、筋電計、電気角度計、X線映画、歩行・走行装置（床反力、圧中心、圧分布図）による分析がいかに貢献しうるか、歩行・走行について実験的に検討した。

- 1) ソールの踵部分、特に外側部ならびに前足部中足骨頭、母趾球付近は、摩耗しにくく足を保

Running



(図中の時間は接地の瞬間を 0 としたもので、図10の時間軸と対応する)

(単位 : sec)

図13 自動解析装置による走行時の足圧分布図

護する機能が必要である。

2) ソールの母趾球付近は、踵の押し上げ時に下腿三頭筋に余分な負担のかからない柔らかい材質が望まれる。

3) アッパーのトゥボックスは、母趾が背屈できる余裕が必要である。

4) シューズを検討するため、筋電図、2軸ゴニオメータ、X線映画ならびに床反力、圧中心、圧分布図の記録できる歩行・走行解析装置は有効な手法であることがわかった。

文 献

- 1) 横江清司; 足, *J.J. Sports Sci.*, 1 (5), 365—371 (1982)
- 2) Okamoto, T. and Y. Goto.; Electromyographic Study of Normal Infant and Child Gait, *J. Libral Arts Dep. Kansai Med. Univ.*, 9, 72—100 (1982)
- 3) Okamoto, T. et al.; Electromyographic Study of the Bifunctional Leg Muscles during the Learning Process in Infant Walking, In *Biomechanics VIII-A*, ed by H. Matsui et al, Human Kinetics Publishers, Illinois, 419—422 (1983)
- 4) Inman, V.T., H.J. Ralston and F. Todd; *Human Walking*, Williams & Wilkins, Baltimore (1981)
- 5) Cavanagh, P.R.; *The Running Shoe Book*. Anderson World, Inc., California (1980)