

熱可塑性足底板が長距離走中の生理的応答に与える影響

大 沼 勇 人 (国立スポーツ科学センター スポーツ研究部)
笠 次 良 爾 (奈良教育大学 保健体育講座)
立 正 伸 (奈良教育大学 保健体育講座)

Effects of thermoplastic insole on physiological responses in endurance running

Hayato OHNUMA

(Department of Sports Science, Japan Institute of Sports Sciences)

Ryoji KASANAMI

(Department of Physical Education, Nara University of Education)

Masanobu TACHI

(Department of Physical Education, Nara University of Education)

Abstract

The purpose of this study was to investigate the effects of thermoplastic insole on physiological responses in endurance running. Subjects were 7 male university runners age 20.9 ± 1.2 years height 1.71 ± 0.07 m weight 61.7 ± 4.7 kg, VO_2 65.0 ± 6.2 ml/min/kg. The subjects performed thirty minutes running in 70% VO_{2max} running speed with two different conditions (shoes with insole and shoes without insole). VO_2 , the concentration of blood lactate acid, heart rate, RPE were measured during thirty minutes endurance running. The trials were divided into three 10 minutes phases. The analysis values were averaged for each phase and compared between the phases and between conditions. RPE was significantly lower in insole condition than in no condition, and increased significantly between each phase. However, there were no significant differences in VO_2 , the concentration of blood lactate acid and heart rate between phases and insole condition. These results suggested that thermoplastic insole does not limit performance in endurance running, and reduces runner's subjective fatigue.

キーワード：熱可塑性足底板，ランニングエコノミー，
主観的運動強度

Key Words：Thermoplastic insole，
Running economy，
Rating of perceived exertion

1. 緒言

走運動は、さまざまなスポーツ場面において基本的な動作である。走運動のひとつである長距離走においては、パフォーマンスに関連する要因について生理学的知見からこれまで数多く検討されてきた。長距離走において高いパフォーマンスを発揮するためには、酸素を利用しエネルギーを生成する能力すなわち最大酸素摂取量が高いことが重要であり、最大酸素摂取量が高い走者ほどパフォーマンスが高いことが報告されてきた^{2), 6), 10)}。しか

しながら、トップアスリートを対象にした研究では、相関関係が見られなかったことも報告されており^{3), 13)}、最大酸素摂取量は重要な要因ではあるものの、単一で長距離走のパフォーマンスを説明することには限界があることを示唆している。その他の要因について、血中乳酸濃度について焦点が当てられ、乳酸性作業閾値 (Lactate Threshold) や乳酸蓄積開始点 (Onset of Blood Lactate Accumulation) 時における走速度も長距離走において高いパフォーマンスを発揮するための重要な一要因であり、LTやOBLAが高い走者ほどパフォーマンスが高い

ことが報告されてきた^{5), 22), 29), 31)}。近年では、ランニングエコノミーが長距離走のパフォーマンスを決定する大きな要因であることが多く報告されている。Daniel et al. 4) がランニングエコノミーを一走速度における酸素摂取量と定義し、少ない酸素摂取量で走行するほどランニングエコノミーは高いことを示し、ランニングエコノミーが高い走者ほど長距離のパフォーマンスが高いことも多く報告されている^{11), 16), 28)}。これらの生理的応答が長距離走のパフォーマンスに影響を及ぼす主たる因子であると考えられている。

走運動におけるパフォーマンス向上のための手段のひとつとして、ランニングシューズや足底板といった機能的装具の使用が挙げられる。先行研究において、ランニングシューズがバイオメカニクスの指標や生理学的指標に影響を及ぼすことが多く報告されている^{7), 10), 14), 17), 19), 20), 30)}。ランニングシューズが長距離走における生理学的応答に及ぼす影響について、Squadrone and Gallozzi³⁰⁾ は、トレッドミル走において、Minimalist shoes条件では通常使用しているランニングシューズ条件よりもランニングエコノミーが高くなることを報告している。また、Fuller et al.⁷⁾ も、軽量のシューズ条件では重量のシューズよりもランニングエコノミーが高くなることを述べている。すなわち、機能的装具の使用は長距離走中における生理的応答に影響を及ぼす有用な一手段であると考えられる。

足底板に関する研究は、回内足や回外足といった足部アライメント・下肢全体アライメントの改善など、臨床的視点から検討されてきた^{8), 12), 15), 23), 24), 25)}。現在、足底板には数多くの種類があり、材質や形態、成型方法などに違いがある。その中のひとつに、熱可塑性足底板が挙げられる。Dexy¹³⁾ は、半硬質もしくは硬質素材で成形された熱可塑性足底板は、さまざまな足および下肢障害の治療として使用できると述べている。この芯材として用いられている熱可塑性ポリウレタンは、荷重負荷に対する適度な緩衝ならびに反発作用を持つという特徴がある。小林ら¹⁵⁾ は、熱可塑性足底板を装用することによって、歩行時における舟状骨高が非装用時よりも拳上されたと報告している。また、大沼ら²⁵⁾ は、歩行のみならず、走行時においても、熱可塑性足底板を装用することによって、内側縦アーチが保持されることや踵骨回内が抑制されることを報告している。

これまで熱可塑性足底板は臨床的な視点からその有用性が報告されてきたものの、機能的装具のひとつでもあるため、ランニングシューズ同様に長距離走中の生理的応答に影響を及ぼす可能性がある。本研究では、熱可塑性足底板が長距離走中における生理学的応答に及ぼす影響について明らかにすることを目的とした。

2. 方法

2.1. 被験者

男子大学生 7 名（年齢 20.9 ± 1.2 歳、身長 1.71 ± 0.07 m、体重 61.7 ± 4.7 kg）を対象とした。被験者は身体に傷害がない者に協力を依頼した。あらかじめ実験の要旨、内容および手順を口頭と文書で説明し、実験内容を理解したうえで参加することの承諾を得た。なお、本研究は、奈良教育大学倫理審査委員会の承認を得て、実施した。

2.2. 実験概要

実験は、最大酸素摂取量の測定および30分間走を2回、計3回行なった。実験にはトレッドミル（AR-200、ミナト医科学株式会社）を使用した。最大酸素摂取量の測定から1週間後に1回目の30分間走、さらに2日後に2回目の30分間走を実施した。

本研究では、芯材が厚さ約3mmの熱可塑性ポリウレタン製足底板（カスタムバランス、Footbalance System社製、販売元（株）日本シグマックス）を用いて実験を行った。また、両条件における靴の統制には、全被験者で同一のものを用いた。

2.2.1. 最大酸素摂取量の測定

傾斜角0度のトレッドミル上を、安静1分、時速9 km/hでのウォーミングアップ3分を行った後、9 km/hから20秒で0.2 km/hずつ速度が上がるプロトコルの漸増負荷運動を行い、疲労困憊になるまで運動を続けた。運動中は呼吸代謝モニタシステム（AE-300SRC、ミナト医科学株式会社）を用いて酸素摂取量を5秒間隔で連続して測定した。最大酸素摂取量の決定に関しては、各速度の酸素摂取量の平均を求め、その最大値を最大酸素摂取量とした。また、トレッドミル走速度と酸素摂取量の回帰直線から70%VO₂Max時のトレッドミル速度を算出した。

2.2.2. 30分間走

傾斜角0度のトレッドミル上での30分間走を足底板装用条件と非装用条件の2回行なった。インソールの有無の試技順番については、無作為のランダムで設定した。被験者は、8 km/hの速度で3分間トレッドミル上でのウォーミングアップを行ない、3分間の安静状態の後、算出した個々の70%VO₂Max時の速度で運動を開始し、運動終了まで一定速度で走行した。運動強度の設定については、Hanson et al.¹¹⁾ は、ランニングシューズの検討実験における走速度設定として70%VO₂Max強度を採用していること、運動時間の設定については、陸上競技トラック種目で最長距離である10000mは30分前後であることから、本研究では70%VO₂Max強度における30

分間走行を実験試技として採用した。また、環境条件は、WBGT計（WBGT-103, 京都電子工業株式会社）を用い、実験開始時の気温と湿度を記録した。

2.3. 測定および分析

ウォーミングアップ終了時に、被験者に心拍計（Polar社製：RS800CX）と呼気ガス分析用マスク装着させ、安静状態の開始から運動終了まで5秒間隔で測定し続けた。呼気ガス分析では、酸素摂取量を分析項目に設定した。いずれも運動開始後9～10分、運動19～20分、運動29～30分の平均値をそれぞれ算出した。血中乳酸濃度と主観的運動強度の測定について、いずれも運動開始前安静状態、運動開始10分、20分、運動終了直後の計4回測定を行なった。また、運動10分および20分の測定は、運動を継続したまま採血した。主観的運動強度の測定には、Borg et al.¹⁾が報告したBrog scaleを日本語に改訂した運動強度表²⁶⁾を用いた。

上述した分析項目を運動開始10分後（前半）、運動開始20分後（中盤）、運動終了時（後半）における平均値を算出した。

2.4. 統計

分析項目それぞれについて、条件間と局面間における平均値の差について、繰り返しのある二元配置分散分析を用いて、統計処理を行なった。有意な主効果および交互作用が認められた項目についてはBonferroni法を用いて、多重比較を行なった。

足底板装用時と非装用時における実験環境の温度と湿度については、対応のない検定を用いて、各条件間の平均値の差について検討した。有意水準はそれぞれ5%未満とした。

3. 結果

3.1. 実験環境の統制

結果をTable 1に示す。WBGT計を用いて測定した温度と湿度について、足底板装用時と非装用時における条件間に、有意な差は見られなかった。

Table 1 Differences of temperature and humidity between each condition.

	Insole	No insole	Statistical difference
Temperature (°C)	27.5 ± 0.4	26.8 ± 1.1	p=0.22
Humidity (% RH)	43.1 ± 10.8	43.1 ± 12.0	p=0.49

Values are expressed as means ± standard deviations.

3.2. 生理学的指標

結果をFig.1に示す。酸素摂取量、心拍数、血中乳酸濃度については、有意な差は見られなかった。しかし、主観的運動強度には、交互作用は見られなかったものの、条件間および局面間で有意な差が見られた。その詳細は以下に示す通りであった。(Fig.1)

・主観的運動強度

装用時における主観的運動強度はいずれの局面においても非装用時より有意に低かった。また、前半より中盤、後半、中盤より後半で有意に高かった。

4. 考察

本研究は、熱可塑性足底板が長距離走中の生理学的応答に及ぼす影響について明らかにすることを目的とした。その結果、酸素摂取量、心拍数、血中乳酸濃度については有意な交互作用は認められなかったが、主観的運動強度では条件間および局面間で有意な主効果が認められた。本研究において得られた結果について、以下に考察した。

実験環境の統制のため、WBGT計を用いて温度と湿度を計測した。その結果、いずれも有意な差は認められなかった。よって、本研究における実験環境は統制されていた。

主観的運動強度について、前半より中盤、後半、中盤より後半で有意に高かった。これまで先行研究においては、主観的運動強度と心拍数、酸素摂取量に正の相関関係があることが報告されている^{1), 26)}。本研究では、一定走速度条件かつ生理学的指標は定

常状態であったのにも関わらず、主観的運動強度が増加した。その要因として、試技時間の増加に伴って相対的な運動強度が高まったため、主観的運動強度が増加したと考えられる。また、装用時における主観的運動強度は非装用時より有意に低かった。よって、熱可塑性足底板の装用は主観的疲労度を軽減させる可能性が示唆された。

生理学的指標となる酸素摂取量、心拍数、血中乳酸濃度については、いずれにおいても有意な差は見られなかった。これらの結果より、熱可塑性足底板の装用は長距離走中の生理学的応答には影響を及ぼさないことが明らかとなった。OBLAは4mmol/lが境界値とされており²⁹⁾、本研究における各局面における血中乳酸濃度の平均値は概ね4mmol/l以下であり、各局面間で有意な差は見られなかった。よって、本研究における試技はOBLA以下での運動強度であったといえる。短時間でのOBLA以下での運動の場合、呼吸交換比が1を超えず、酸素摂取量や心拍数は増加することなく、定常状態となる。そのため、生理学的指標は定常状態となり、各局面間で有意な

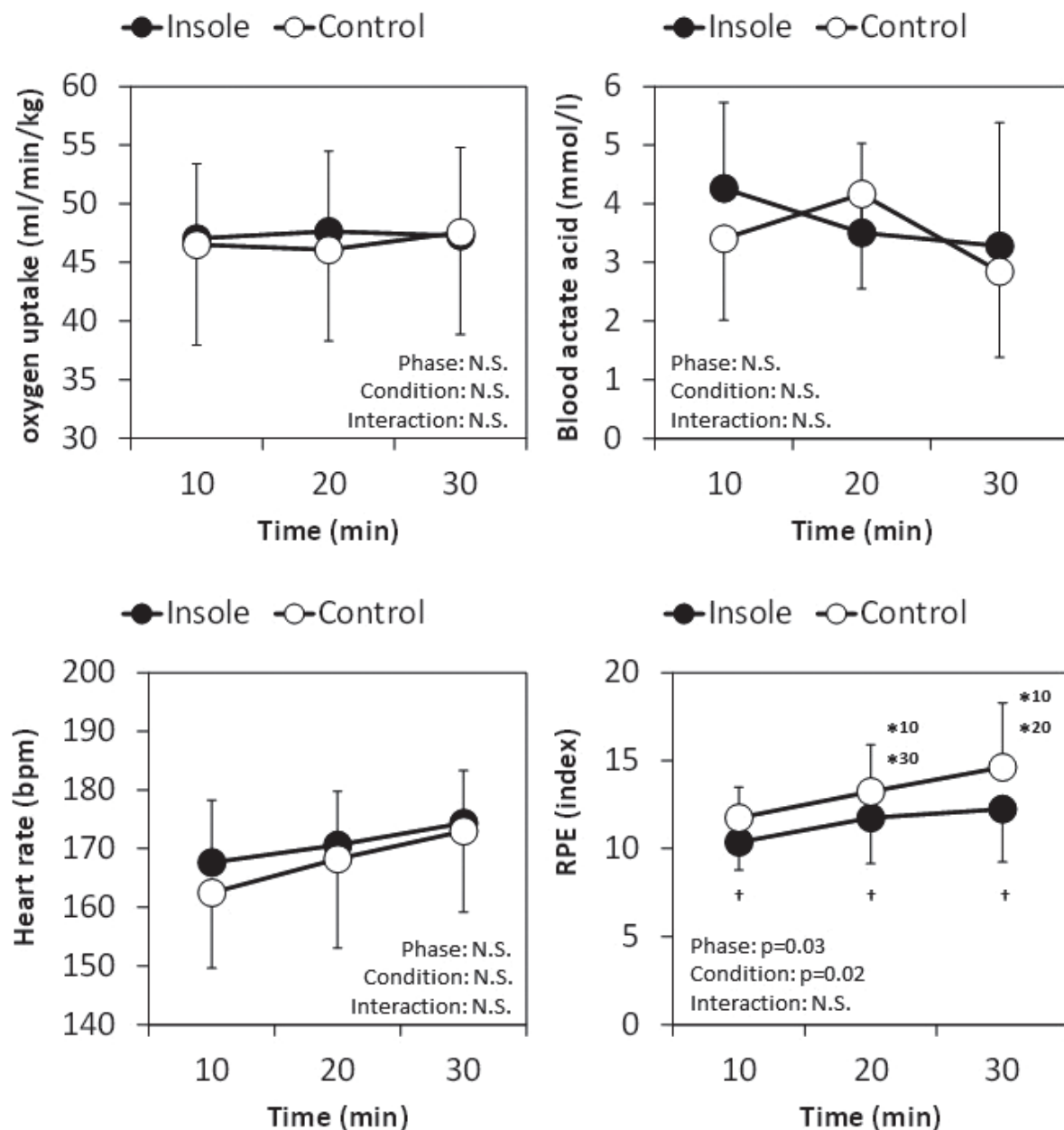


Fig.1 The time-course and statistical differences of physiological responses between each conditions.

*: significant difference between each phases. †: significant difference between insole and no insole conditions.

差が見られなかったと考えられる。また、いずれの局面においても、条件間では有意な差は見られなかった。ランニングシューズの違いがランニングエコノミーに与える影響について検討した報告²⁸⁾では、Minimalist shoes 条件では通常使用しているランニングシューズ条件よりもランニングエコノミーが高くなることを報告している。足底板の違いが長距離走のパフォーマンスに及ぼす影響はランニングシューズよりも少ないため、条件間で違いが生じなかったと可能性がある。

本研究では、70%VO₂max強度の30分間走中を実験試技に設定したが、長距離走は走速度・走行時間の設定が

幅広い運動である。そのため、運動強度と運動時間の違いによって、熱可塑性足底板が長距離中の生理的応答に及ぼす影響が異なる可能性がある。運動強度について、本研究では70%VO₂Maxの走速度に設定し、その平均走速度は11.3km/h (3.14m/s)であった。本研究における走速度は、ランニングシューズが長距離走パフォーマンスとランニングエコノミーに及ぼす影響についての総説⁷⁾にて取り上げられた先行研究における走速度の設定と概ね一致しており、運動強度の設定としては妥当であったと考えられる。しかしながら、本研究で設定した走速度よりも低い速度域に設定し、ランニングシューズ

の違いによってランニングエコノミーが異なることを報告した先行研究^{17), 21)}もある。本研究で設定した走速度よりも低い速度域においては、熱可塑性足底板が長距離走中の酸素摂取量や生理学的応答に影響を及ぼす可能性がある。

また、運動強時間について、本研究では、70%VO₂maxの運動強度で30分間に設定した。前述したように、OBLA以下での運動強度であったため、生理学的指標は局面間で有意な差が見られず、定常状態であったと考えられる。先行研究において、中程度の運動強度でも長時間行なうことにより、VE drift¹⁹⁾やcardiovascular drift²⁸⁾といった呼吸循環系の応答特性が生じ、生理学的指標が変化することが知られている。本研究では陸上競技トラック種目で最長距離である10000mを想定し、運動時間として30分と設定したが、より長い時間の運動において、VE driftやcardiovascular driftといった生理学応答に対して、熱可塑性足底板が影響を及ぼす可能性がある。

5. 結論

本研究は、熱可塑性足底板が長距離走中の生理的応答に与える影響について明らかにすることを目的であった。本研究によって得られた結果は以下の通りである。

- 1) 酸素摂取量、血中乳酸濃度、心拍数といった生理学的指標は、熱可塑性足底板の装用による影響を受けなかった。
- 2) 主観的運動強度は、運動時間の増加とともに増加したが、いずれにおいても、装用条件では非装用条件よりも低かった。

これらの結果より、熱可塑性足底板は長距離走中のパフォーマンスの制限因子にはならず、走者の主観的疲労度を軽減させることが示唆された。

引用参考文献

1. Borg GA. Perceived exertion: a note on "history and methods". *Med. Sci. Sports*. 5 (2):90-93, 1973.
2. Costill DL, Thonason H, Robert E. Fraction utilization of the aerobic capacity during Distance running. *Med Sci Sports*. 5 (4):248-252, 1973.
3. Costill DL, Daniels J, Evans W, Fink W, Krahenbuhl G, Saltin B. Skeletal muscle enzymes and fiber composition in male and female track athletes. *J Appl Physiol*. 40 (2):149-54, 1976.
4. Daniels JT. A physiologist's view of running economy. *Med Sci Sports Exerc*. 17 (3):332-338, 1985
5. Farrell PA, Wilmore JH, Coyle EF, Billing JE, Costill DL. Plasma lactate accumulation and distance running performance. 1979. *Med Sci Sports Exerc*. 25 (10):1091-7, discussion 1089-90, 1993
6. Foster C, Costill DL, Daniels JT, Fink WJ. Skeletal muscle enzyme activity, fiber composition and VO₂ max in relation to distance running performance. *Eur J Appl*

- Physiol Occup Physiol*. 39 (2):73-80, 1978.
7. Fuller JT, Bellenger CR, Thewlis D, Tsiros MD, Buckley JD. The effect of footwear on running performance and running economy in distance runners. *Sports Med*. 45 (3):411-22, 2015.
8. Doxey GE. Clinical Use and Fabrication of Molded Thermoplastic Foot Orthotic Devices. *Phys Ther*. 65 (11):1679-82, 1985.
9. Hanson NJ, Berg K, Deka P, Meendering JR, Ryan C. Oxygen cost of running barefoot vs. running shod. *Int J Sports Med*. 32 (6):401-6, 2011.
10. Houmard JA, Costill DL, Mitchell JB, Park SH, Chenier TC. The role of anaerobic ability in middle distance running performance. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*. 62 (1):40-43, 1991.
11. Jone AM. A five year physiological case study of an Olympic runner. *Br J Sports Med*. 32 (1):39-43, 1998.
12. 川本竜史, 石毛勇介, 持田 尚, 吉久武志, 深代千之. 足底板の着用による走行時床反力の軽減効果. *バイオメカニクス研究*. 7 (4), 272-278, 2003.
13. Kenney WL, Hodgson JL. Variables predictive of performance in elite middle-distance runners. *Br J Sports Med*. 19 (4) :207-9, 1985.
14. Kerrigan DC, Franz JR, Keenan GS, Dicharry J, Della Croce U, Wilder RP. The effect of running shoes on lower extremity joint torques. *PM R*. 1 (12):1058-63, 2009.
15. 小林 裕和, 伊藤 浩充, 安倍 浩之, 下 嘉幸, 福山 支伸. 異なる方法で成形された熱可塑性インソールが歩行に与える影響. *臨床バイオメカニクス*. 31:439-444, 2010.
16. Larsen HB. Kenyan dominance in distance running. *Comp Biochem Physiol A Mol Integr Physiol*. 136 (1):161-70, 2003.
17. Lussiana T, Fabre N, Hébert-Losier K, Mourot L. Effect of slope and footwear on running economy and kinematics. *Scand J Med Sci Sports*. 23 (4):246-53, 2013.
18. Bishop M, Fiolkowski P, Conrad B, Brunt D, Horodyski M. Athletic footwear, leg stiffness, and running kinematics. *J Athl Train*. 41 (4):387-92, 2006.
19. Martin BJ, Morgan EJ, Zwillich CW, Weil JV. Control of breathing during prolonged exercise. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol*. 50 (1):27-31, 1981.
20. McNair PJ and Marshall RN. Kinematic and kinetic parameters associated with running in different shoes. *Br J Sports Med*. 28 (4): 256-260, 1994.
21. Moore IS, Jones A, Dixon S. The pursuit of improved running performance: Can changes in cushioning and somatosensory feedback influence running economy and injury risk? *Footwear Sci*. 6 (1) 1-11, 2014.
22. Morgan DW, Baldini FD, Martin PE, Kohrt WM. Ten kilometer performance and predicted velocity at VO₂max among well-trained male runners. *Med Sci Sports Exerc*. 21 (1):78-83, 1989.
23. Mündermann A1, Nigg BM, Humble RN, Stefanyshyn DJ. Foot orthotics affect lower extremity kinematics and kinetics during running. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*. 18 (3):254-62, 2003.
24. Nester CJ1, van der Linden ML, Bowker P. Effect of foot orthoses on the kinematics and kinetics of normal walking gait. *Gait Posture*. 17 (2):180-7, 2003.
25. 大沼勇人, 笠次良爾, 立正伸. 熱可塑性足底板が足部のキネ

- マテイクスに及ぼす影響.日本臨床スポーツ医学会誌. 23 (1):272-278, 2015.
26. 小野寺孝一, 宮下充正. 全身持久性運動における主観的強度と客観的強度.体育学研. 21 (4):191-203, 1976.
27. Paavolainen L, Häkkinen K, Härmäläinen I, Nummela A, Rusko H. Explosive-strength training improves 5-km running time by improving running economy and muscle power. *J Appl Physiol*. 86 (5):1527-33, 1999.
28. Sawka MN, Knowlton RG, Critz JB. Thermal and circulatory responses to repeated bouts of prolonged running. *Med Sci Sports*. 11 (2):177-80, 1979.
29. Sjodin B, Jacobs I. Onset of blood lactate accumulation and marathon running performance. *Int J Sports Med*. 2 (1):23-6, 1981.
30. Squadrone R, Gallozzi C. Biomechanical and physiological comparison of barefoot and two shod conditions in experienced barefoot runners. *J Sports Med Phys Fitness*. 49 (1):6-13, 2009.
31. Tanaka K, Watanabe H, Konishi Y, Mitsuzono R, Sumida S, Tanaka S, Fukuda T, Nakadomo F. Longitudinal associations between anaerobic threshold and distance running performance. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*. 55 (3):248-52, 1986.