

カーボンファイバープレート内蔵 ランニングシューズが漸増負荷 ランニングテスト中の乳酸代謝に及ぼす影響

Effect of carbon fiber plate equipped running shoes on
lactate metabolism during incremental running test

鈴木 康 弘

Abstract

The purpose of this study was to examine the changes in physiological load in a hypoxic environment caused by differences in shoes with and without carbon fiber plates in Japanese elite long-distance runner. The carbon-plated shoes: Nike-ZoomX Vaporfly2 Next% 2 (VFN), and the non-carbon-plated shoes: Nike-ZoomX Pegasus Turbo 2 (PT2) were tested in elite male long distance runner on 10 stage x 3-min incremental running test. The longest 30-min incremental running test could not be completed in either shoes condition, with a duration of 26-min in PT2 and 28 min 30 sec in VFN. Running velocities at blood lactate concentration (L_a) of 2 mmol/L and 4 mmol/L were 242 m/min and 280 m/min for PT2, respectively, compared to 285 m/min and 308 m/min for VFN, respectively. The highest value of L_a appeared in stage 9, when exhaustion was reached in both conditions, at 15.2 mmol/L for PT2 compared to 12.5 mmol/L for VFN. In addition, lower heart rate and higher arterial blood oxygen saturation were observed in the VFN condition compared to the PT2 condition at the same stage. These results suggest that changes in running shoes with and without carbon fiber plates can alter energy metabolism in the glycolytic system, and therefore, continuous assessment of aerobic capacity through running should be performed wearing the same running shoes.

I 緒言

陸上競技長距離走選手を対象に長距離走パフォーマンスおよび有酸素性能力を評価する手段として、トレッドミルを用いた漸増負荷ランニングテストがよく用いられる。漸増負荷ランニングテストは、速度もしくは傾斜と速度の両方を増加させながら被験者を疲労困憊まで走らせ、呼気ガスを採取することにより最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_2\max$) や最大下運動時の酸素摂取量 (ランニングエコノミー) を測定したり、血中乳酸濃度を測定することにより乳酸性作業閾値 (Lactate Threshold: LT) を測定したりするテストである¹³⁾。長距離走のパフォーマンスは、 $\dot{V}O_2\max$ ¹¹⁾¹²⁾、ランニングエコノミー¹⁰⁾¹²⁾、LT⁵⁾¹⁵⁾などのいわゆる有酸素性能力によって評価することができることが知られており⁴⁾⁹⁾、これらのいわゆる呼吸循環系の指標を向上させることが、長距離選手の主なトレーニング目標となっている。すなわち、長距離走選手の年間トレーニング計画において定期的に漸増負荷ランニングテストを実施することにより、呼吸循環系のトレーニングが適切に行われているかを評価することは、長距離走パフォーマンスの向上に繋がると考えられる。

近年、ランニングシューズのテクノロジー化が進み、ナイキ社が開発したミッドソールの中にカーボンファイバープレートを入れたシューズの出現により、長距離走パフォーマンス、特にマラソンを始めとするロードレースでの記録が著しく向上している²⁾¹⁴⁾。カーボンファイバープレート内蔵シューズは、足が接地してから離地するまでに反発を多く得ることによって、足への負担を軽減することにより、走の経済性の指標であるランニングエコノミーが向上することが報告されている⁶⁾⁷⁾⁸⁾。そのため、カーボンファイバープレートが内蔵されているシューズと内蔵されていないシューズとを比較した場合、同じ速度で走ったとしても、生理学的負荷は異なっていると考えられる。したがって、トレッドミルを用いた呼吸循環系の指標の評価時に履くシューズは、被験者内および被験者間で統一したものを用いなければ、必ずしも同じ評価ができない可能性がある。

ナイキ社製のカーボンファイバープレート内蔵シューズの出現以来、これらのシューズ機能を評価した研究が多く行われてきている¹⁾²⁾³⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾。そして最近では、複数のシューズメーカーが製造したカーボンファイバープレート内蔵シューズの特性を比較検討している研究が発表されている⁸⁾が、同一メーカーが製造したシューズを用いて、シューズの形状がほぼ同じでカーボンファイバープレートの有無による変化を比較した研究は、我々の知る限り見当たらない。また、長距離走者はパフォーマンス向上のために高地/低酸素トレーニングを実施することが多い¹⁶⁾が、ランニング用シューズの違いが低酸素環境での生理学的変化の程度に及ぼす影響を検討した研究は見当たらない。

そこで本研究では、陸上競技長距離走を専門としている日本トップレベルの競技者を対象

として、カーボンファイバークラウドの有無によるシューズの違いが、低酸素環境における生理学的負荷に及ぼす変化について検討することを目的とした。

II 方法

1. 対象者

対象者は、実業団の陸上競技部に所属する日本人長距離走競技者1名(29歳)であった。対象者は、過去に日本選手権で優勝および世界選手権に出場経験がある、日本でのトップレベルの競技者であり、測定時の自己ベスト記録は5,000 m 走, 10,000 m 走ともに日本歴代2位であった。対象者はトレッドミルでの測定および低酸素環境でのトレーニング経験が十分にあり、実験に先立ち、実験の趣旨、内容および危険性について十分な説明をすることにより参加の同意を得た。

2. ランニングシューズ

実験に使用したシューズは、ナイキ社製の競技用ランニングシューズであり、1つは、カーボンファイバークラウドが内蔵されたZoomX Vaporfly Next% 2 (VFN)、もう1つはVFと同じ形状であるがカーボンプレートが内蔵されていないZoomX Pegasus Turbo 2 (PT2)であった。シューズの重量はVFNが191 g, PT2が209 gであり、いずれのシューズも測定日以前に対象者が2-3回履いて走ったのみの比較的新しいものであった。

3. 実験デザイン

対象者は、トレッドミルを用いた漸増負荷ランニングテストを2回実施し、1回目の測定と2回目の測定の間隔は48時間に設定した。測定は昼食後2時間が経過した状態で行い、1回目はカーボンファイバークラウドが内蔵されていないシューズ(PT2)を履いてもらい、2回目はカーボンファイバークラウド内蔵のシューズ(VFN)を履いてもらってテストを実施した。なお、対象者は普段からナイキ社製のシューズを履いてトレーニングしていた。さらに対象者には、測定の24時間前以降は、激しい運動、アルコールおよび各種サプリメントの摂取を避けるように指示した。

漸増負荷ランニングテストは、いずれも常圧低酸素環境のトレーニング室(Espec社製)内で実施した。この低酸素トレーニング室は、床面積が8.7 m×6.9 m, 天井高は3.3 mであり、酸素濃度の制御範囲は18.6-11.2% (標高1,000-5,000 m相当)であった。トレーニング室内の酸素濃度は、標高3,000 m相当(吸気酸素濃度:14.4%)に設定し、トレーニング中の室内温度は、おおよそ20-22℃になるようにエアコンの温度を設定した。

対象者は、運動開始10分前に低酸素トレーニング室に入室し、2回の測定とともに同じ内

カーボンファイバープレート内蔵ランニングシューズが漸増負荷ランニングテスト中の乳酸代謝…
容のウォーミングアップを行った後、漸増負荷ランニングテストを開始した。

4. 測定項目

漸増負荷ランニングテストは、1ステージ3分間の運動を30秒の休息を挟みながら疲労困憊まで最大10ステージ行う最大30分間の運動であった。各ステージの速度は、事前に常酸素環境で測定した血中乳酸濃度が4 mmol/L (Onset of Blood Lactate Accumulation: OBLA) に相当する走速度 (373 m/min) を基準に、5% OBLA 速度から運動を開始し、ステージ毎に5% ずつ速度を漸増させ、10セット目が100% OBLA になるように設定した。すなわち、トレッドミル速度は、205, 224, 242, 261, 280, 298, 317, 336, 354, 373 m/min であった。なお、30秒の休息中にBorgスケールにより自覚的運動強度 (RPE) を記録し、同時に指先から微量採血し、血中乳酸濃度分析機 (Lactate Pro 2, Arkray, Japan) を用いて血中乳酸濃度を測定した。また、各ステージの走速度と血中乳酸濃度の結果をもとに、最小二乗法を用いて近似曲線を算出し、血中乳酸濃度が2 mmol/L 時およびOBLA 時の走速度を算出した。

漸増負荷ランニング運動中は、心拍計 (Polar H10: Polar 社製) を用いて心拍数 (HR) を5秒平均で連続的に測定し、パルスオキシメーター (WristOx₂ Model 3150: Nonin Medical 社製) を用いて動脈血酸素飽和濃度 (SpO₂) を1秒平均で連続的に測定した。HR は各ステージにおける最高値を記録し、SpO₂ は各ステージにおける最低値を記録した。

Ⅲ 結果

標高3,000 m 相当の酸素濃度 (14.4%) における最長30分間の漸増負荷ランニングテストは、いずれのシューズ条件でも完走できず、その持続時間はPT2では26分 (第9ステージ2分でオールアウト) であり、VFNでは28分30秒 (第10ステージ1分30秒でオールアウト) であった。

図1に、シューズの違いによる血中乳酸濃度 (La) の変化を示した。各ステージのLaは全てのステージにおいてVFNがPT2と比較して低値を示した。また、Laが2 mmol/L 時およびOBLA 時の走速度は、PT2がそれぞれ242 m/min および280 m/min であったのに対し、VFNではそれぞれ285 m/min および308 m/min であった (表1)。Laの最高値は、いずれの条件でも疲労困憊に至った第9ステージで現れ、PT2が15.2 mmol/L であったのに対し、VFNでは12.5 mmol/L であった。

図2に、シューズの違いによるHRの変化を示した。第1, 2ステージにおいては、PT2がわずかに低値を示したが、第3から第7ステージにおいてはVFNが低値を示し、第8, 9ステージでは同じ値であり、HRの最高値はいずれの条件でも171 bpm であった。

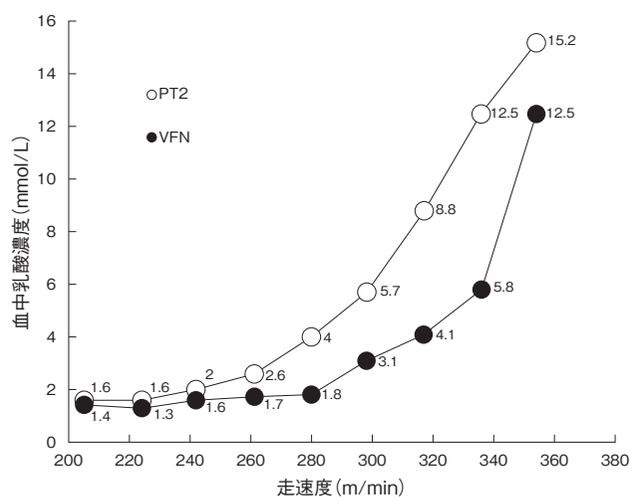


図1 シューズの違いによる血中乳酸濃度の変化

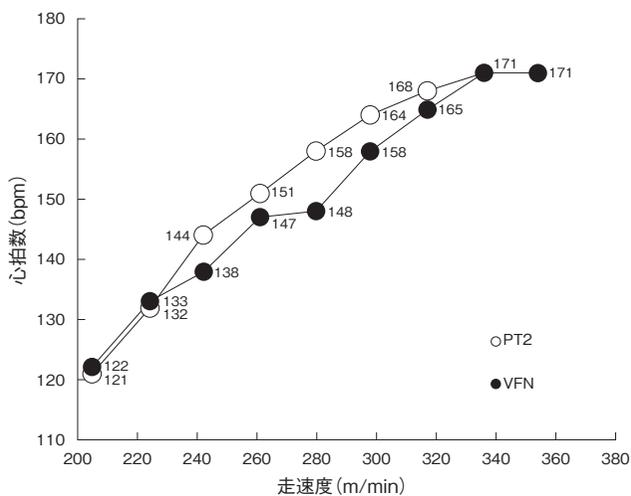


図2 シューズの違いによる心拍数の変化

表1 シューズの違いによる血中乳酸濃度 2 mmol/L 時および 4 mmol/L 時の走速度の比較

	2 mmol/L 時の走速度 (m/min)	4 mmol/L 時の走速度 (m/min)
PT2	242	280
VFN	285	308

PT2: Nike-ZoomX Pegasus Turbo 2
 VFN: Nike-ZoomX Vaporfly Next% 2

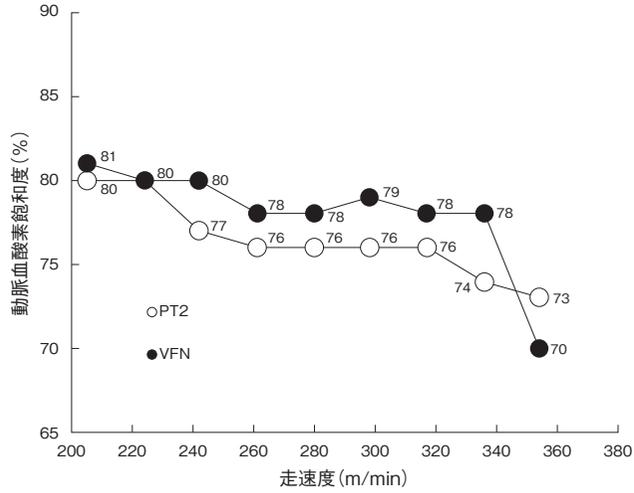


図3 シューズの違いによる動脈血酸素飽和度の変化

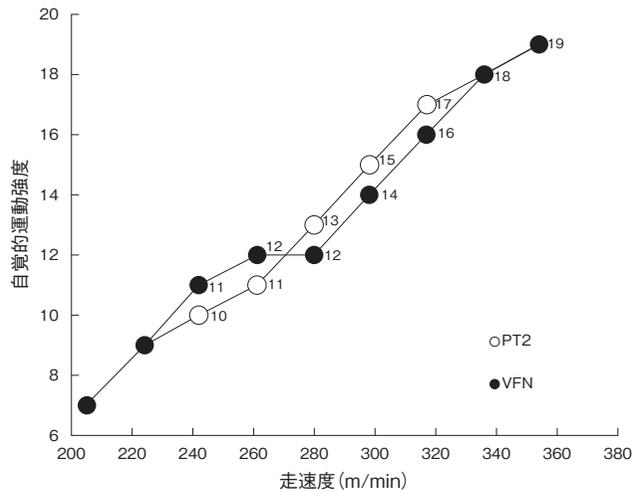


図4 シューズの違いによる自覚的運動強度の変化

図3に、シューズの違いによる SpO₂ の変化を示した。第2ステージでは条件間で同値を示したが、第1から第8ステージでは VFN が高値を示した。また疲労困憊に至った第9ステージでは、VFN が低値を示した。また SpO₂ の最低値は、PT2 が73% であり、VFN が70% であった。

図4に、シューズの違いによる RPE の変化を示した。RPE は第1ステージから第9ステージまでほぼ同じような値を示した。

IV 考察

本研究における最も重要な知見は、ナイキ社製カーボンファイバープレート内蔵レーシングシューズ (ZoomX Vaporfly Next% 2; VFN) は、ほぼ形状が同じタイプでカーボンファイバープレートなしのシューズ (ZoomX Pegasus Turbo 2; PT2) と比較して、標高 3,000 m 相当の低酸素環境におけるトレッドミルを用いた漸増負荷ランニングテストにおいて、同一速度での血中乳酸濃度 (La) および心拍数 (HR) を低く抑えることができ、動脈血酸素飽和度 (SpO_2) を高く保つことができる可能性が示唆されたことである。これらの結果は、漸増負荷ランニングテストを行う際は毎回同じランニングシューズを履いて実施する必要があることを意味しており、異なるランニングシューズでテストを実施することは、有酸素性能力の各指標を過大評価もしくは過小評価してしまう可能性があるため注意が必要であることを示唆している。

2017年にナイキ社が発表したカーボンファイバープレート入りレーシングシューズ (Zoom Vaporfly 4%) のプロトタイプを用いた研究により、カーボンファイバープレートが内蔵されていない自社のシューズおよびアディダス社のシューズと比較してランニングエコノミーが約4%向上することが報告され⁶⁾、商品名の4%の由来となっていることはよく知られている。また、プロトタイプではなく、一般人が購入できる市販タイプの Zoom Vaporfly 4% を用いた場合でも、ランニングエコノミーは約2~3%向上することが認められており⁷⁾、このナイキ社製カーボンファイバープレート内蔵レーシングシューズの出現により、10 km, ハーフマラソン, マラソンのシーズンベストタイム上位20位および100位が2017年より大幅に減少していることが報告されている²⁾。Senefeld et al.¹⁴⁾ は、ナイキの新しいシューズ技術を使用して、世界のマラソン大会で走ったエリートマラソンのレースタイムが、男性で2% (2.8分), 女性で2.6% (4.3分) 向上したことを報告しており、選手たちはナイキ社製レーシングシューズによる恩恵を大きく受けていると考えられる。さらに、さまざまなシューズメーカーにおける7種類のカーボンファイバープレート内蔵シューズを比較検討した研究においても、ナイキ社製シューズが他社シューズと比較して最もランニングエコノミーを改善したことが報告されており⁸⁾、単にカーボンファイバープレートを内蔵するだけでは、ナイキ社製のシューズと同等のランニングエコノミーを達成することはできないことが示唆されている。このように、ナイキ社製のカーボンファイバープレートをミッドソールに入れたシューズは、他社製のシューズと比較して、機能的優位性が高いと考えられる。そのため、本研究ではナイキ社製のシューズを用いて、カーボンファイバープレートの有無による生理学的負荷の違いを、主に血中乳酸濃度の変化によって説明しようと試みた。一方、呼気ガス分析装置を用いた測定が必要であるランニングエコノミーは、機材の関係で

カーボンファイバープレート内蔵ランニングシューズが漸増負荷ランニングテスト中の乳酸代謝…
本研究では測定できなかった。

ランニングエコノミーは、長距離走パフォーマンスを左右する重要な生理学的指標であるため、レーシングシューズの研究において測定項目に多く用いられている¹⁾²⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾。しかし、ランニングエコノミーばかりではなく、血中乳酸濃度を用いた指標であるLTやOBLAも長距離走パフォーマンスを評価するために重要⁵⁾¹⁵⁾であるが、カーボンファイバープレート内蔵のシューズがLTやOBLAに及ぼす影響を検討した研究は見当たらない。そこで本研究では、これらの指標がカーボンファイバープレートの有無によりどの程度変化するのかについて検討した。その結果、カーボンファイバープレートが内蔵されていないシューズ(PT2)では、漸増負荷ランニングテストにおける第3ステージで血中乳酸濃度が2 mmol/Lに達したのに対し、カーボンファイバープレート内蔵シューズ(VFN)では第5ステージにおいても2 mmol/L以下の値であった(図1)。また、第5ステージではPT2は4 mmol/Lに達していたが、VFNが4 mmol/Lを超えたのは第7ステージであり、カーボンファイバープレートの有無は、漸増負荷ランニングテストにおける同一速度のLaを大きく低下させることが示唆された(図1)。さらに、VFNは、最大下強度におけるHRの上昇を抑え、SpO₂の低下を抑えることが認められた(図2, 図3)。これらの結果は、長距離走競技者が有酸素性を評価するために実施する漸増負荷ランニングテストを複数回実施する場合には、同一シューズを用いてテストする必要があることを示唆するものであり、もし同一のシューズでの実施が難しい場合は、少なくとも、カーボンファイバープレート内蔵シューズとカーボンファイバープレートが内蔵されていないシューズとを混在させて測定してはいけないことを強く示唆するものである。

本研究は、日本トップレベルのエリート長距離選手を対象にした事例研究であるため、カーボンファイバープレートの有無により、なぜこのような生理学的変化が認められたのかを明示することはできない。先行研究によると、カーボンファイバープレート内蔵シューズでは、ランニング中に地面から大きな衝撃を受ける筋の一つである下腿三頭筋の筋活動(底屈速度)が低下すること⁶⁾、足底部のアーチと足底筋における筋腱複合体の長さ変化が小さくなり、それにより立脚後半における足底筋および脛骨筋の筋腱複合体の短縮速度が遅くなること³⁾が報告されている。もし、下腿三頭筋、足底筋および脛骨筋における筋腱複合体の短縮速度低下の原因が筋にあるとすれば、本研究で認められたランニング中における少ないエネルギーで運動可能なこと(Laの低下、HRの低下、SpO₂の増加)を説明できるかもしれない。しかしながら、先行研究で認められている筋腱複合体の短縮速度の低下が筋に起因するのか、もしくは腱に起因するのかは明らかではないため、今後さらなる研究が必要である。

V まとめ

本研究では、陸上競技長距離走を専門としている日本トップレベルの競技者1名を対象として、ナイキ社製シューズにおけるミッドソールのカーボンファイバープレートの有無が、トレッドミルを用いた漸増負荷ランニングテスト中のLa, HR, SpO₂にどのような影響を及ぼすのかについて検討した。その結果、VFNはPT2と比較して、LaおよびHRを低くし、SpO₂を高くすることができる傾向にあることが明らかになり、特に各ステージにおけるLaの低下は顕著であった。したがって、カーボンファイバープレートの有無によるランニングシューズの違いにより、解糖系のエネルギー代謝が大きく変化することから、ランニングにより有酸素性を継続的に評価する場合は、可能な限り同じランニングシューズを履いて実施する必要があることが示唆された。

謝辞

本研究は、2021年度の東京経済大学個人研究助成費（研究番号21-19）を受けた研究成果である。

注

- 1) Barnes K. R., Kilding A. E. A Randomized Crossover Study Investigating the Running Economy of Highly-Trained Male and Female Distance Runners in Marathon Racing Shoes versus Track Spikes. *Sports Med*, 49 (2): 331-342, 2019.
- 2) Bermon S., Garrandes F., Szabo A., Berkovics I., Adami P. E. Effect of Advanced Shoe Technology on the Evolution of Road Race Times in Male and Female Elite Runners. *Front Sports Act Living*, 3: 653173, 2021.
- 3) Cigoja S., Asmussen M. J., Firminger C. R., Fletcher J. R., Edwards W. B., Nigg B. M. The Effects of Increased Midsole Bending Stiffness of Sport Shoes on Muscle-Tendon Unit Shortening and Shortening Velocity: a Randomised Crossover Trial in Recreational Male Runners. *Sports Med Open*, 6 (1): 9, 2020.
- 4) di Prampero P. E., Atchou G., Bruckner J. C., Moia C. The energetics of endurance running. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 55 (3): 259-266, 1986.
- 5) Farrell P. A., Wilmore J. H., Coyle E. F., Billing J. E., Costill D. L. Plasma lactate accumulation and distance running performance. *Med Sci Sports*, 11 (4): 338-344, 1979.
- 6) Hoogkamer W., Kipp S., Frank J. H., Farina E. M., Luo G., Kram R. A Comparison of the Energetic Cost of Running in Marathon Racing Shoes. *Sports Med*, 48 (4): 1009-1019, 2018.
- 7) Hunter I., McLeod A., Valentine D., Low T., Ward J., Hager R. Running economy, mechanics, and marathon racing shoes. *J Sports Sci*, 37 (20): 2367-2373, 2019.
- 8) Joubert Dustin P., Jones Garrett P. A comparison of running economy across seven highly

- cushioned racing shoes with carbon-fibre plates. *Footwear Science*, 14 (2): 71–83, 2022.
- 9) Joyner M. J. Modeling: optimal marathon performance on the basis of physiological factors. *J Appl Physiol* (1985), 70 (2): 683–687, 1991.
 - 10) Larsen H. B. Kenyan dominance in distance running. *Comp Biochem Physiol A Mol Integr Physiol*, 136 (1): 161–170, 2003.
 - 11) Laursen P. B., Jenkins D. G. The scientific basis for high-intensity interval training: optimising training programmes and maximising performance in highly trained endurance athletes. *Sports Med*, 32 (1): 53–73, 2002.
 - 12) Saltin B., Larsen H., Terrados N., Bangsbo J., Bak T., Kim C. K., Svendenhag J., Rolf C. J. Aerobic exercise capacity at sea level and at altitude in Kenyan boys, junior and senior runners compared with Scandinavian runners. *Scand J Med Sci Sports*, 5 (4): 209–221, 1995.
 - 13) Schmitz B., Klose A., Schelleckes K., Jekat C. M., Kruger M., Brand S. M. Yo-Yo IR1 vs. incremental continuous running test for prediction of 3000-m performance. *J Sports Med Phys Fitness*, 57 (11): 1391–1398, 2017.
 - 14) Senefeld J. W., Haischer M. H., Jones A. M., Wiggins C. C., Beilfuss R., Joyner M. J., Hunter S. K. Technological advances in elite marathon performance. *J Appl Physiol* (1985), 130 (6): 2002–2008, 2021.
 - 15) Tanaka K., Matsuura Y. Marathon performance, anaerobic threshold, and onset of blood lactate accumulation. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol*, 57 (3): 640–643, 1984.
 - 16) Wilber R. L. Application of altitude/hypoxic training by elite athletes. *Med Sci Sports Exerc*, 39 (9): 1610–1624, 2007.