

低酸素下での短時間高強度インターバル運動中休息時の 高酸素ガス吸入が発揮パワーに及ぼす影響

徳山大学 小川 剛 司
(共同研究者) 筑波大学 西保 岳

The Effect of Hyperoxic Gas Breathing During Recovery Phase on Exercise Performance in Intermittent Sprint Cycling in Hypoxia

by

Takeshi Ogawa
Tokuyama University
Takeshi Nishiyasu
*Institute of Health & Sport Sciences,
University of Tsukuba*

ABSTRACT

We tried to investigate whether the power output during intermittent sprint cycling in hypoxia would increase by hyperoxic gas breathing during recovery phases. Six healthy subjects performed the intermittent sprint cycling (15 sec maximal cycling with 60 sec recovery) until exhaustion, in normoxia (N), hypoxia (H;14.2%O₂), and hypoxia with hyperoxic gas (32%O₂) breathing during recovery phases (HH). During exercise, we measured the changes in power output and heart rate. The numbers of repetition was higher in HH than H ($p<0.05$). The mean power output at each bout was higher in HH than H (ANOVA; $p<0.05$), but it was not significantly different between HH and N. We could conclude that the treatment of hyperoxic gas during recovery phase would enhance the exercise performance in sprint intermittent exercise in hypoxia.

要 旨

短時間運動を休息を挟んで繰り返すインターバル運動では、発揮パワーは低酸素下で通常酸素下よりも低くなることが報告されている。しかし、運動間の休息時に高酸素ガス吸入をした場合、発揮のパワー低下が見られなくなるか否かは明らかでない。本研究はインターバル運動の発揮パワーに対する休息時の高酸素ガス吸入の影響を調べることを目的とした。6名の男女大学生が通常酸素下 (N) と低酸素下 (3,000m 相当; H), および低酸素下において運動間の休息時での 32% 高酸素ガス吸入下 (HH) した条件の 3 条件下で、15 秒間の全力自転車こぎ運動を 1 分の休息をはさんで疲労困憊に至るまで繰り返した。このとき発揮パワーを測定し、運動パフォーマンスを評価した。その結果各セットの発揮パワーは、運動後半において H で N よりも低値を示したが、HH と N との間には有意な差がなかった。運動の繰り返し回数は H で N および HH よりも低値を示した。これらの結果から低酸素下でのインターバル運動の発揮パワーの低下は、運動間の休息時の高酸素ガス吸入によって回復することが示唆された。

緒 言

高所トレーニングは、平地あるいは高所での運動能力の向上を目的として行われるトレーニングの総称であり、従来から主に持久的種目のトップアスリートの間でさかんに用いられている。高所トレーニングの効果は主に、高所滞在自体によるヘモグロビンの増加や心肺機能の向上などによる酸素運搬能力の向上と、運動トレーニングによる運動刺激の合成効果による様々な生理的变化によるものと考えられている^{10, 12)}。一方で、平地での運動パフォーマンスに対して、高所トレーニングが必ずしも効果的でなかったとする報告もある⁵⁾。効果がなかった原因の一つとして、高所では有酸

素能力および持久的運動パフォーマンスの低下により、十分な強度の運動トレーニングが行えないことがあげられる^{4, 7)}。そこで、より効果的な高所トレーニング法を開発することが望まれるが、高所トレーニング中の運動トレーニングに用いられるような高強度運動時の運動能力や生体反応に対する低酸素の影響については明らかではない。

高所では気圧の低下に伴い、空気中の酸素分圧低下によって、有酸素能力が低下するため、持久的運動パフォーマンスは低下する^{6, 8)}。一方で、短時間運動 (30~60 秒程度) の運動パフォーマンスは、低酸素下においては、有酸素代謝からのエネルギー供給が低下するにもかかわらず、無酸素代謝によるエネルギー供給の増加が起ることにより、維持されることが報告されている (Calbet ら³⁾, 10%O₂; Weyand ら¹³⁾, 12%O₂)。

実際の運動トレーニングや球技スポーツなどでは、単一の運動ではなく短時間運動を間欠的に行う、いわゆるインターバル運動を行うことが多い。このような運動では、有酸素代謝だけでなく、無酸素代謝も重要なエネルギー供給源であることが報告されているが¹¹⁾、インターバル運動を低圧下で行ったときの運動パフォーマンスや代謝応答は十分に明らかでない。Brosnan ら²⁾ は高所トレーニング中の運動トレーニングにおいて、インターバル運動を行い、15 秒の一定負荷の最大強度で自転車運動を繰り返したとき、標高 2,100m の高地において平地よりも発揮パワーが低値を示したことを報告している。また、Balsom ら¹⁾ は、低圧下 (標高 3,000m 相当) においてインターバル運動 (6 秒の全力自転車運動を 30 秒の休息を挟みながら 10 回繰り返す) を行ったところ、常圧下よりも発揮パワーおよび酸素摂取量が低下することを報告しており、低酸素下での有酸素代謝の低下と、インターバル運動のパフォーマンスの低下に関連がある可能性が考えられる。

このような低酸素下でのインターバル運動にお

ける発揮パワーの低下が、有酸素能力の低下によるものならば、休息時のみでも高酸素ガスを吸入させることで発揮パワー低下を防ぐことができるかもしれない。しかしながら、低酸素下において高強度インターバル運動の発揮パワーが、運動間の休息時における高酸素ガス吸入の影響を受けるか否かに関しては明らかでない。そこで本研究では低酸素下での短時間のインターバル運動のパフォーマンスに対する運動間の休息中での高酸素ガス吸入の効果を検討することを目的として、1) 低酸素下、2) 通常酸素下、3) 低酸素下でのインターバル運動中の休息時のみ高酸素を吸入した条件の3条件下において、15秒の全力自転車こぎ運動を疲労困憊に陥るまで繰り返した。

1. 実験方法

1. 1 被験者

被験者は6名の体育系大学に所属する男子大学生であった。被験者の平均身長は 174.8 ± 5.4 cm、体重は 66.2 ± 5.8 kgであった。被験者は全員平地居住者であった。被験者には実験に先立ち、実験の目的、方法および実験実施上の危険性を十分に説明し、実験参加の同意を得た。

1. 2 実験手順

被験者は自転車エルゴメータによるインターバル運動を、人工気象室内で行った。運動は1) 通常酸素下 (N)、2) 酸素濃度を14.2%に設定した低酸素下 (H) および3) 低酸素下においてインターバル運動セッションの休息時に32%の高酸素ガスを運動直後からの45秒間吸入させた条件 (HH) の3条件でそれぞれ行った。14.2%の酸素は標高3,000mの酸素分圧と同等である。室内の気温は20℃、湿度50%に設定した。

1. 3 運動テスト

被験者は電磁式自転車エルゴメータ

(PowerMax V-II ; Combi社製) を用いインターバル運動を行った。主運動は5分間のウォーミングアップに続き、サドルに座り安静を5分間保った後に開始した。主運動は15秒間の全力自転車こぎを60秒間の休息を挟んで行い、被験者がペダル回転数60回転以上を維持できなくなった時点Exhaustionとみなし、運動セッションを終了した。運動中にはストラップを用いて前足部をペダルに固定した。被験者には腰をサドルから離さないで運動するように指示した。エルゴメータの負荷は、被験者の体重 $\times 0.1$ kpとした。このとき、発揮パワーを測定し、運動時の各セットの平均パワー (MP)、セッション全体でのパワー低下率 (Δ MP)、総仕事量 (Total Work) を算出し、運動パフォーマンスを調べた。また、実験中は血中酸素飽和度をパルスオキシメーター (N-600 ; ネルコア社製) を用いて、前額部にプローブを貼り付け測定した。得られたデータから、1セットごとに、5秒ごとのデータから1セット内での最低値 (SaO_2 min) および最高値 (SaO_2 max)、および運動とそれに続く休息を合わせて1セットとした時の平均値を算出した。また、心拍数 (HR) をHR モニター (s-800i ; POLAR社製) を用いて測定し、得られたデータから運動とそれに続く休息を合わせて1セットとした時の各セットでの平均値を算出した。

1. 4 統計分析

測定値はすべて平均値 \pm 標準偏差で表した。分析には2元配置分散分析 (ANOVA) を用いて吸入ガス条件間および運動セット間を検定し、各セットにおいてはpaired t-testを行った。各吸入ガス条件間の値の比較検定にはpaired t-testを用いた。各水準間における有意基準は5%未満に設定した。

2. 結果

各条件下でのインターバル運動の発揮パワーの結果は表1および図1に示す。MPの最高値

表1 インターバル運動におけるパフォーマンス

	N	H	HH
PeakMP (W)	763 ± 44	746 ± 61	763 ± 54
Δ MP (%)	45.3 ± 23	38.8 ± 4.7	38.0 ± 7.5
meanMP (W)	577 ± 60	561 ± 57*	574 ± 65
Total work until 6th (kJ)	54.5 ± 6.2	52.8 ± 4.7*+	56.1 ± 6.1*
Exhaustion (bout)	10 ± 2	8 ± 1*+	10 ± 2

N, 通常酸素下; H, 低酸素下; HH, 低酸素+高酸素ガス; MP, 各セットでの平均パワー; Δ MP, 平均パワーの低下率; meanMP, セッションにおける平均パワー; *, p<0.05vs.N; +, p<0.05vs.HH.

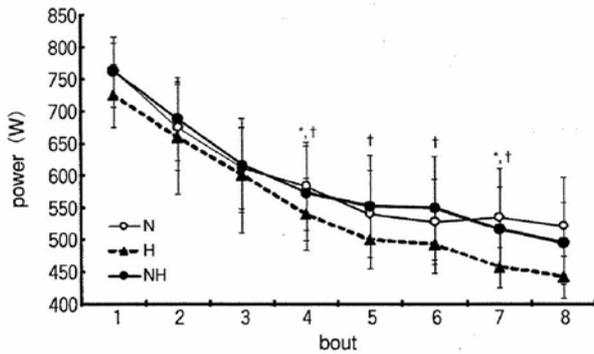


図1 各セットにおける平均パワーの推移

○, N条件; ▲, H条件; ●, HH条件; *, p<0.05 H vs. N; †, p<0.05 H vs. HH. 7セット目以降はH条件下の被験者数が5名であった。

(peakMP) は1セット目で出現し、条件間での有意な差は見られなかった。セッション全体での平均パワー (meanMP) はH条件下でN条件下よりも低値を示した。Δ MPは各条件下で有意な差が見られなかった。6セット目までの (Total work) 総仕事量 (Total work until 6th) はHH条件下でのH条件下よりも有意に高く (p<0.05), N条件下と同程度であった。被験者がExhaustionに至るまでの繰り返し数および6セット目までの総仕事量はH条件下で他の条件下よりも有意に少なかった (p<0.05)。各セットのMPはH条件下でN条件下よりも有意に低値を示した (ANOVA主効果; p<0.05)。HH条件下での各セットのMPはN条件

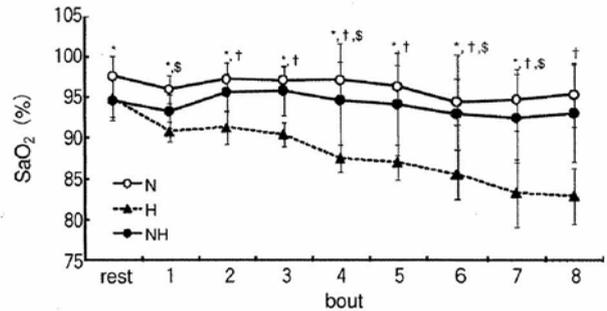


図2 各セットにおけるSaO₂の推移 (1)

○, N条件; ▲, H条件; ●, HH条件; *, p<0.05 H vs. N; †, p<0.05 H vs. HH; \$, p<0.05. 7セット目以降はH条件下の被験者数が5名であった。

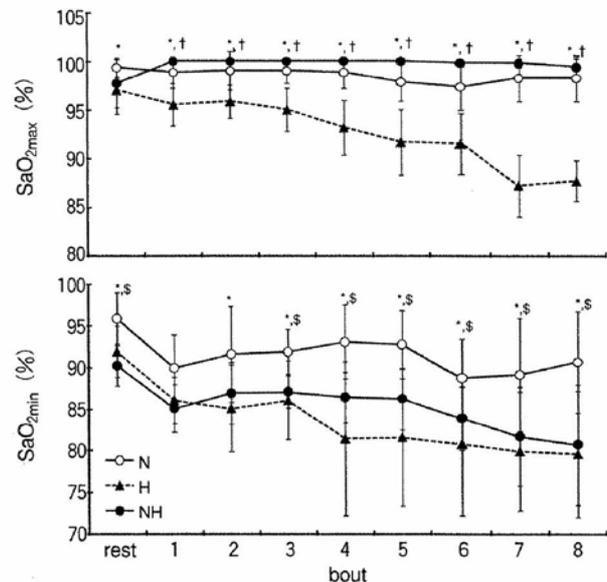


図3 各セットにおけるSaO₂の推移 (2)

上, 各セットの最高SaO₂ (SaO₂max); 下, 各セットの最低SaO₂ (SaO₂min) ○, N条件; ▲, H条件; ●, HH条件; *, p<0.05 H vs. N; †, p<0.05 H vs. HH; \$, p<0.05. 7セット目以降はH条件下の被験者数が5名であった。

下と有意な差は見られなかった。

各セットのSaO₂の結果を図2および図3に示す。各セットのSaO₂はH条件下でN条件下よりも有意に低値を示した (ANOVA主効果; p<0.05)。一方で, HH条件下では, SaO₂はH条件下よりも有意に高値を示したが, N条件よりも有意に低値を示した (ANOVA主効果; p<0.05)。HH条件下では, 最低SaO₂はN条件下よりも有意に低値を示した (ANOVA主効果; p<0.05) 一方で, 最高SaO₂はH条件下よりも有意に高値を示した (ANOVA主効果; p<0.05)。

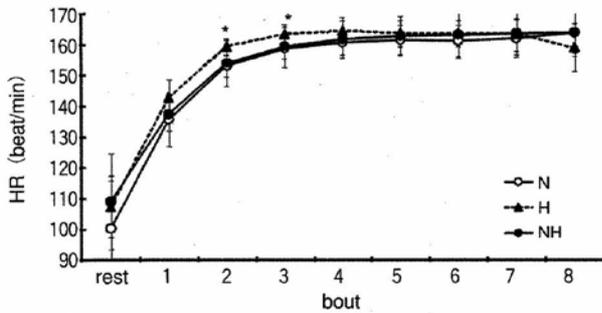


図4 各セットにおける心拍数の推移

○, N条件; ▲, H条件; ●, HH条件; *, $p < 0.05$ H vs. N. 7セット目以降はH条件下の被験者数が5名であった.

各セットのHRの結果を図4に示す. 各セットのHRはH条件下でN条件下よりも有意に高値を示した (ANOVA主効果; $p < 0.05$). HH条件下では, HRはN条件下と有意な差は見られなかった.

3. 考察

本研究では低酸素下での短時間のインターバル運動のパフォーマンスに対する運動間の休息中での高酸素ガス吸入の効果を検討した. その結果, 1) 3,000m相当の低酸素下における各セットでの平均パワー, 総仕事量および繰り返し回数といった運動パフォーマンスに関連するパラメーターは, 通常酸素下よりも低値を示した, 2) 低酸素下でのインターバル運動での運動間の休息時に32%の高酸素ガスを吸入させる条件では各セットの平均パワー, 総仕事量および繰り返し回数は通常酸素下と同程度であった, 3) 低酸素下では SaO_2 は通常酸素下よりも低値を示したが, SaO_2 は高酸素ガス吸入によって一時的に通常酸素下と同程度まで上昇し, 運動時では再び低下することが繰り返された. これらの結果から, 標高3,000m相当の低酸素下では, 本研究で用いた15秒間の間欠的な短時間運動のパフォーマンスは, 通常酸素下よりも低下するものの, 運動セッション間の休息時に高酸素ガス吸入をすることで通常酸素下と同程度に発揮できるようになることが示唆された. 一方, 低酸素下のインターバル運動において, 休息中だけの高酸素ガス吸入であれば, 運動中にお

れる低酸素刺激も十分に受けられる可能性が示唆される.

短時間の全力運動を低酸素下で行った場合, McLellanら⁹⁾は30および45秒のWingate-testにおいて平均パワーは低酸素下(11.3% O_2)でも低下しなかったことを報告している. 走運動においては, Weyandら¹³⁾はall-outまでの運動時間が60秒以内の最大運動ならば, そのときの走速度は低酸素下(12% O_2)と通常酸素下で差がないことを報告している. Calbetら³⁾は持続的サイクリストにおける30秒間のWingate-testでは, 低酸素下(10% O_2)において通常酸素下よりも酸素摂取量は16%低下するにもかかわらず, 無酸素代謝の指標である酸素借は増加したことから, 低酸素下においては無酸素代謝の寄与が増加することによって発揮パワーに通常酸素下と差がなかったことを示唆している. 本研究においては15秒間の全力スプリント運動を繰り返した. 3セット目までは発揮パワーに有意な差が見られなかったことから, セッション前半では, 単一の短時間運動と同様, 低酸素下においては無酸素代謝の寄与が増加することによって運動パフォーマンスが通常酸素下と同程度に発揮されたものと考えられる.

一方で, 標高2,100mの高所において高強度短時間運動を間欠的に行ったところ(15秒の自転車運動を15, 30, 45秒の休息を挟み6回繰り返す), 発揮パワーは平地よりも低下したことや²⁾, 6秒の最大運動を30秒の休息を挟んで10回繰り返したときのパフォーマンスおよび運動プロトコル中の酸素摂取量は低圧下(525mmHg; 標高3,000m相当)において常圧下よりも低下したこと¹⁾が報告されている. 本研究においても各セットでの平均パワー, 総仕事量および繰り返し回数は低酸素下において通常酸素下よりも低値を示した. さらにこのとき, SaO_2 は低酸素下で通常酸素下よりも有意に低値を示したことから, 低酸素下では酸素供給量が低下していたことが考えら

れる。したがって、本研究のインターバル運動においても先行研究と同様に低酸素下での酸素供給量の低下が原因となって酸素摂取量が低下し、インターバル運動のパフォーマンスが低下したものと考えられる。

本研究ではさらに、低酸素下でのインターバル運動中の運動間の休息時に32%の高酸素ガスを吸入させたところ、各セットでの平均パワーおよび繰り返し回数は通常酸素下と同程度となった。この高酸素ガス吸入開始直後にはSaO₂は一時的に100%となったことから、酸素供給量が一時的に増加することで、低酸素下でのインターバル運動パフォーマンスは通常酸素下と同程度まで発揮されたものと考えられる。さらに、高酸素ガス吸入をやめて運動を行うことでSaO₂は再びH条件下と同程度まで低下したことから、休息中に高酸素ガス吸入を行っても、高酸素を吸入していない運動時には動脈血の低酸素化が起こっていたものと考えられる。したがって、インターバル運動を行う場合、高酸素吸入を行っても休息中だけでは運動強度の低下が防がれ、なおかつ、低酸素刺激も受けられる可能性が考えられる。

Tabata ら¹¹⁾ はインターバル運動中には無酸素代謝および有酸素代謝双方からのエネルギー供給があることを示唆している。本研究で行ったインターバル運動のパフォーマンスが低酸素下で低下し、低酸素下での運動時の休息中に高酸素ガス吸入を行うことで増加した結果は、インターバル運動が酸素供給の影響を受けること、すなわち、有酸素代謝がインターバル運動のパフォーマンスの制限要因の一つであることを示唆するものである。

低酸素下での心拍数 (HR) は通常酸素下よりも低酸素下で高く推移したが、低酸素下における高酸素ガス吸入によって通常酸素下と同程度になった。このことから、低酸素下でのインターバル運動の絶対強度は高酸素ガス吸入によって増加す

るものの (発揮パワーの増加)、相対強度は低下することが示唆された。

低酸素下でのHRは同一絶対強度の最大下運動時には増加するが、最大運動時では通常酸素下と比較し差がないという報告⁶⁾がある一方で、低酸素下において最大運動時のHRは低下したとする報告⁸⁾もあり、結果が一致しない。本研究の結果は超最大強度 ($\dot{V}O_{2max}$ 強度以上) でのインターバル運動においては、低酸素下においてHRは通常酸素下よりも高くなることを示唆するものである。また、低酸素下での一時的な高酸素ガス吸入によりHRは通常酸素下と同程度になったことから、HRの増加は低酸素刺激によって引き起こされたものと考えられる。

本研究の結果を高所トレーニングなどのスポーツの現場に応用するならば、例えば、高所トレーニングにおける運動トレーニングなど、低酸素下での運動間の休息時に高酸素ガス吸入を行う手法が考えられる。この手法により休息時の高酸素ガス吸入によって低酸素刺激を受けなおかつ、高い強度の運動トレーニングを行うことができることから、高所トレーニング失敗の原因として挙げられる高所における運動トレーニング強度の不足を予防できる可能性が考えられる。しかしながら、このような低酸素下でのインターバル運動の休息時に高酸素を吸入させながらのトレーニングのパフォーマンス向上に対する効果の検討はなされておらず、今後さらなる検討が必要である。

4. まとめ

本研究は短時間のインターバル運動を標高3,000m相当の低酸素下で、運動セッション間の休息時に酸素濃度32%高酸素ガス吸入をしながら行った時の運動パフォーマンスを評価した。その結果、運動パフォーマンスは通常酸素下よりも低酸素下で低かったが、高酸素ガス吸入条件では

(HH) 低酸素下よりも高くなり、通常酸素下と同程度まで発揮された。また、 SaO_2 は低酸素下では通常酸素下よりも低値を示したものの、高酸素ガス吸入によって一時的に通常酸素下と同程度まで回復し、運動時では再び低酸素下と同程度まで低下することが繰り返された。これらの結果から、本研究で用いた様な15秒間の間欠的な短時間運動では有酸素能力が低下するような低酸素下では運動パフォーマンスは低下するものの、32%高酸素ガス吸入を休息時に行うことで低酸素下における運動パフォーマンスの低下が防がれ、なおかつ、低酸素刺激も受けられる可能性が示唆された。

謝 辞

本研究に対して助成を賜りました財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。また、実験に協力して下さった筑波大学大学院生の藤井直人氏をはじめとした学生の皆様に心より感謝いたします。

文 献

- 1) Balsom P.D., Gaitanos G.C., Ekblom B., Sjodin B., Reduced oxygen availability during high intensity intermittent exercise impairs performance. *Acta. Physiol. Scand.*, 152: 279-285 (1994)
- 2) Brosnan M.J., Martin D.T., Hahn A.G., Gore C.J., Hawley J.A., Impaired interval exercise responses in elite female cyclists at moderate simulated altitude. *J. Appl. Physiol.*, 89: 1819-1824 (2000)
- 3) Calbet J.A.L., De Paz J.A., Garatachea N., Cabeza de Vaca S., Chavarren J., Anaerobic energy provision does not limit Wingate exercise performance in endurance-trained cyclists. *J. Appl. Physiol.*, 94: 668-676 (2003a)
- 4) Chapman R.F., Stray-Gundersen J., Levine B.D., Individual variation in response to altitude training. *J. Appl. Physiol.*, 85: 1448-1456 (1998)
- 5) Julian C.G., Gore C.J., Wilber R.L., Daniels J.T., Fredericson M., Stray-Gundersen J., Hahn A.G., Parisotto R., Levine B.D., Intermittent normobaric hypoxia does not alter performance or erythropoietic markers in highly trained distance runners. *J. Appl. Physiol.*, 96: 1800-1807 (2004)
- 6) Lawler J., Powers S.K., Thompson D., Linear relationship between $\dot{V}O_{2\max}$ and $\dot{V}O_{2\max}$ decrement during exposure to acute hypoxia. *J. Appl. Physiol.*, 64: 1486-1492 (1988)
- 7) Levine B.D., Stray-Gundersen J., "Living high-training low": effect of moderate-altitude acclimatization with low-altitude training on performance. *J. Appl. Physiol.*, 83: 102-112 (1997)
- 8) Martin D., O'Kroy J., Effects of hypoxia on the $\dot{V}O_{2\max}$ of trained and untrained subjects. *J. Sports Sci.*, 11: 37-42 (1993)
- 9) McLellan T.M., Cheung S.S., Meunier M.R., The effect of normocapnic hypoxia and the duration of exposure to hypoxia on supramaximal exercise performance. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.*, 66: 409-414 (1993)
- 10) Rusko H., New aspects of altitude training. *Am. J. Sports Med.*, 24: S48-S52 (1996)
- 11) Tabata I., Irisawa K., Kouzaki M., Nishimura K., Ogita F., Miyachi M., Metabolic profile of high intensity intermittent exercises. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 29: 390-395 (1997)
- 12) Truijens M.J., Toussaint H.M., Dow J., Levine B.D., Effect of high-intensity hypoxic training on sea-level swimming performances. *J. Appl. Physiol.*, 94: 733-743 (2002)
- 13) Weyand P.G., Lee C.S., Martinez-Ruiz R., Bundle M.W., Bellizzi M.J., Wright S., High-speed running performance is largely unaffected by hypoxic reductions in aerobic power. *J. Appl. Physiol.*, 86: 2059-2064 (1999)