

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：82632

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2019～2021

課題番号：19K24334

研究課題名（和文）動脈血酸素飽和度を用いた至適な低酸素トレーニングプログラムの開発

研究課題名（英文）Development of optimal hypoxic training program using oxygen saturation

研究代表者

笠井 信一（Nobukazu, KASAI）

独立行政法人日本スポーツ振興センター国立スポーツ科学センター・スポーツ研究部・契約研究員

研究者番号：60845874

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000 円

研究成果の概要（和文）：スプリント運動時における吸入酸素濃度の違いが動脈血酸素飽和度（SpO₂）の変化および代謝応答に及ぼす影響を検討した結果、血中乳酸濃度および運動時における組織酸素飽和度に有意な差はみられなかった。また、低酸素環境下でのスプリントトレーニング時におけるSpO₂の違いが局所循環（筋血流量および筋酸素消費量）に及ぼす影響を検討した結果、運動時におけるSpO₂の変化率と各指標の変化率との間に有意な関係性はみられなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、動脈血酸素飽和度（SpO₂）を考慮した低酸素環境下における運動・トレーニングが無酸素性能力の改善に及ぼす効果を明らかにし、SpO₂を用いた効率的な低酸素トレーニングプログラムを新たに提案することを目的に研究を実施してきた。高強度運動時のSpO₂の応答には個人差が非常に大きく、低酸素トレーニングプログラムを作成する上での体系的なSpO₂の基準を示すことができなかった。今後は低酸素刺激の個人差を引き起こす要因を明らかにし、低酸素トレーニングをより安全かつ効率的に実践するトレーニングプログラムの作成が求められる。

研究成果の概要（英文）：The present study determined the effect of difference in inspired oxygen during sprint exercise on arterial oxygen saturation (SpO₂) and metabolic responses. There was no significant relationship between blood lactate. Moreover, the present study was designed to investigate the difference of SpO₂ during sprint training under hypoxia on muscle oxygen consumption and muscle blood flow. No significant relationships between changes in SpO₂ and muscle oxygen consumption and muscle blood flow.

研究分野：トレーニング科学

キーワード：低酸素 高強度運動 動脈血酸素飽和度 低酸素トレーニング トレーニング科学

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

アスリートの競技力向上をねらいとした最先端のトレーニングの一つに「低酸素トレーニング」が挙げられる。「低酸素トレーニング」は室内の酸素濃度を人工的に減じた環境下で実施される。申請者はこれまで、低酸素トレーニングが通常酸素環境下で同様のトレーニングを実施する場合と比較して、無酸素性能力を改善させること、骨格筋内のグリコーゲン量を大幅に増加させることなどを明らかにしてきた (Kasai et al. 2015, 2017, 2019)。近年では無酸素性能力の改善に対する効果が複数報告されている (Faiss et al. 2013, Hamlin et al. 2017)。さらに、無酸素性能力の向上をねらいとした低酸素トレーニングの推奨プロトコール（トレーニング頻度や運動・休息时间など）が示された一方で (Brocherie et al. 2017)、至適な酸素濃度までは依然として明らかにされていない。トレーニング効果を報告した多くの先行研究では、一律の酸素濃度 (14.5%前後) が用いられている。しかし、低酸素環境下における動脈血酸素飽和度 (SpO_2) の低下の程度に大きな個人差がみられることを考慮すると、低酸素トレーニングにおける至適な酸素濃度を提示する上では、一律の酸素濃度ではなく各個人の SpO_2 の変化に注視することが重要である。

2. 研究の目的

本研究では、 SpO_2 を考慮した低酸素環境下における運動・トレーニングが無酸素性能力の改善に及ぼす効果を明らかにし、 SpO_2 を用いた効率的な低酸素トレーニングプログラムを新たに提案することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 研究 1：低酸素環境下での高強度運動時における SpO_2 の違いが生理応答に及ぼす影響

被験者は、日頃から運動習慣のある男性球技選手 11 名（平均値±標準誤差：年齢, 20.5±0.2 歳；身長, 173.3±1.2cm；体重, 78.3±3.0kg）とした。すべての被験者に対して、本研究の「意義」「目的」「方法」「仮説」「危険性」「本研究により被る不利益」等を文書と口頭で説明し、理解を得た後、自発的な意思により同意書に署名を得た。

異なる 4 つの酸素環境下（標高 3000m = 14.4%条件、標高 2500m = 15.4%条件、標高 2000m = 16.4%条件、標高 0m = 20.9%条件）における測定を、それぞれ異なる日に実施した。本研究はダブルブラインド、クロスオーバーデザインで実施し、各条件で用いた酸素濃度は被験者には一切開示しなかった。被験者は二方向非再呼吸弁を備えたマスクを装着し、人工環境制御装置を用いて 500L のダグラスバックにあらかじめ充填した異なる 4 つの酸素を吸入した。

被験者は実験室へ入室し、安静時における筋酸素動体の測定後、規定のウォーミングアップを実施した。ウォーミングアップ終了 5 分後から低酸素または通常酸素の吸入を開始し、10 分間安静とした。その後、ハイパワー式自転車エルゴメータ (Lode Excalibur Sport ergometer, Lode 社製) を用いてスプリント運動 (6 秒間全力ペダリング × 5 セット、セット間休息 30 秒) を実施した。これらの運動を 1 セッションとし、10 分間の休息を挟んで 3 セッション実施した。なお、被験者にはすべてのセットを通して最大努力で運動するように指示した。セッション間の休息時はそれぞれの条件下において自転車エルゴメータ上で安静を維持し、運動終了 5 分後までそれぞれの環境下で安静とした。得られたデータより、最高パワーおよび平均パワーを算出した。

運動前および各セッション終了直後において指先から穿刺による採血を実施し、乳酸分析器 (ラクテートプロ 2, アークレイ社製) を用いて血中乳酸濃度を 2 回測定し、その平均値を測定

値とした。運動開始前から運動終了後まで、左手の示指より SpO₂ (PULSOX-300i, コニカミノルタ社製) を 1 秒毎に連続的に測定した。HR は、ワイヤレス型心拍計 (M200, POLAR ELECTRO 社製) を用いて 1 秒毎に連続的に測定した。さらに、各セッション終了直後に、ボルグスケールを用いて呼吸および下肢筋群における主観的疲労感を評価した。

すべての結果は、平均値 (means) ± 標準誤差 (SE) で示した。測定項目における時間経過に伴う平均値の差の検定には、反復測定による二元配置の分散分析 (two-way ANOVA) を用い、有意な交互作用 (条件 × 時間) または主効果 (条件、時間) がみられた際には Tukey-Kramer 法による多重比較検定を行った。SpO₂ とその他の測定項目との関係を検討するためには、ピアソンの積率相関係数を求めた。有意水準はすべて 5 % とした。

(2) 研究 2: トレーニング時における SpO₂ に基づいた低酸素トレーニングの効果

被験者は、日頃から運動習慣のある女性球技選手 7 名とした (年齢, 21.8 ± 1.2 歳, 身長, 160.9 ± 1.9 cm, 体重, 62.6 ± 3.1 kg)。すべての被験者に対して、本研究の「意義」「目的」「方法」「仮説」「危険性」「本研究により被る不利益」等を文書と口頭で説明し、理解を得た後、自発的な意思により同意書に署名を得た。

トレーニング介入前に練習試技を実施し、その後少なくとも 3 日間を経てトレーニング前の測定を行った。毎回のトレーニング時における吸入酸素濃度は、14.5% (標高 3,000m 相当) とした。トレーニングにはハイパワー式自転車エルゴメータ (POWER MAX V-III, CONAMI SPORTS & LIFE 社製) を用い、間欠的全力ペダリング運動を週 3 回・2 週間 (6 回) にわたり実施した。すべてのトレーニングは、室内の酸素濃度が制御可能な人工気象室内で実施し、室温は 20°C とした。室内における酸素濃度および二酸化炭素濃度は持続的に計測され、酸素濃度の増減に応じて窒素の排出が自動的に調整された。

毎回のトレーニングでは、6 秒間の全力ペダリングを 30 秒間の休息を設けて 5 セット行う間欠的ペダリング運動を 1 セッションとし、10 分間の休息を挟んで 3 セッション実施した。トレーニング開始 10 分前およびトレーニング終了後 10 分間は人工気象室内で安静にした。合計 6 回のトレーニングを通して、低酸素環境下への総曝露時間は約 360 分であった (1 回のトレーニングセッションあたり 60 分)。また、トレーニング時のウォーミングアップ開始前には右手の示指から動脈血酸素飽和度 (SpO₂, PULSOX-300i, コニカミノルタ社製) を測定した。また、ワイヤレス型心拍計 (M200, POLAR ELECTRO 社製) を用いて心拍数を 1 秒毎に連続的に測定した。なお、実験期間中は、通常通りの食事および身体活動を維持するように指示した。

トレーニング期間前後には、間欠的スプリントテストを実施した。これらすべてのテストは通常酸素環境下で行い、トレーニング期間後における間欠的スプリントテストはトレーニング終了 72 時間後 (3 日後) に実施した。トレーニング期間前後における各指標の変化の程度を比較した。パワーエルゴメータを用いて、規定のウォーミングアップを実施した。その後、6 秒間の全力ペダリングを 30 秒間の休息を設けて 5 セット行う間欠的ペダリング運動を 1 セッションとし、10 分間の休息を挟んで 3 セッション実施した。被験者にはテストを通して最大努力で運動するように指示した。得られたデータより、最高パワー、平均パワーを算出した。運動前、各セッション終了直後、運動終了直後、運動終了 15 分後・30 分後には、外側広筋における血流量を測定した。また、運動前、運動終了直後、運動終了 15 分後・30 分後には、外側広筋における酸素消費量を測定した。これらの測定は多チャンネル組織酸素計および加圧装置 (D. E. Hokanson 社製、USA) を用いて測定した。

すべての結果は、means ± SE で示した。間欠的スプリントテストにおける平均パワーの差の検定には、反復測定による二元配置の分散分析を用い、有意な交互作用 (トレーニング期間 × セ

ット)または主効果(トレーニング期間、セット)がみられた際には Tukey-Kramer 法による多重比較検定を行った。筋血流量および筋酸素消費量の差の検定には、反復測定による二元配置の分散分析を用い、有意な交互作用(トレーニング期間 × 時間)または主効果(トレーニング期間、時間)がみられた際には Tukey-Kramer 法による多重比較検定を行った。群間での変化率の検定には、対応のない t 検定を用いた。有意水準はすべて 5 %とした。

4. 研究成果

(1) 研究 1

平均パワーは運動の進行に伴い有意に低下したが ($P < 0.01$)、有意な交互作用 ($P = 0.15$) および条件での主効果 ($P = 0.15$) はみられなかった。

表 1 には SpO_2 および血中乳酸濃度の推移を示した。 SpO_2 の平均値には、有意な交互作用 ($P = 0.01$) および主効果(時間; $P < 0.01$, 条件; $P < 0.01$) がみられた。全てのセッションにおいて、3つの低酸素条件(14.4%、15.4%、16.4%条件)が20.9%条件と比較して有意に低値を示した ($P < 0.05$)。血中乳酸濃度は運動に伴い有意に上昇したが ($P < 0.01$)、いずれの時点においても条件間の有意差は認められなかった ($P = 0.54$)。

表 1. トレーニング期間前後における筋血流量および筋酸素消費量

	セッション	20.9%	16.4%	15.4%	14.4%
SpO_2 (%)	1	92.5 ± 0.6	88.1 ± 0.8*	87.2 ± 0.8*	87.5 ± 0.7*
	2	92.8 ± 0.6	88.5 ± 0.5*	86.7 ± 0.8*	86.2 ± 1.0*
	3	92.4 ± 0.5	88.4 ± 0.3*	87.0 ± 1.0*	87.4 ± 0.9*
乳酸濃度 (mmol/L)	運動前	2.1 ± 0.2	1.9 ± 0.1	1.9 ± 0.2	2.0 ± 0.2
	1	8.0 ± 2.7	8.3 ± 1.8	9.0 ± 1.9	9.1 ± 1.8
	2	10.1 ± 2.8	10.9 ± 1.9	11.3 ± 2.6	12.3 ± 1.8
	3	11.5 ± 3.0	11.8 ± 2.5	12.2 ± 4.4	11.9 ± 3.4

*; $P < 0.05$ vs. 20.9%.

(2) 研究 2

トレーニング時における SpO_2 の平均値は $89.1 \pm 2.9\%$ であった。トレーニング期間前後において実施した間欠的スプリントテストにおける各セッションの平均パワーは、トレーニング前と比較して有意に増加した (図 1)。

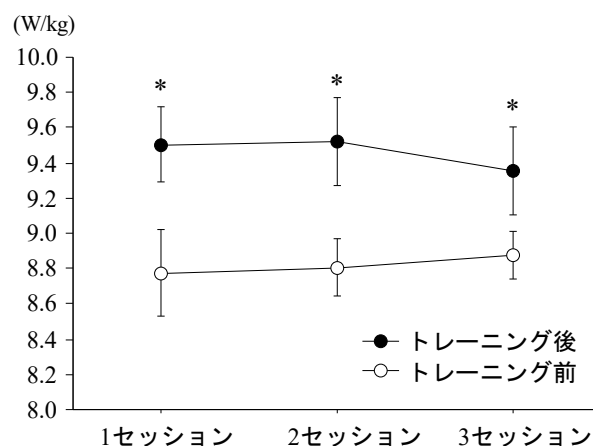


図 1. トレーニング期間前後における平均パワー

*; $P < 0.05$ vs. トレーニング前.

筋血流量はトレーニング前と比較して、2セッション後および運動直後において有意に高値を示した (表 2)。筋酸素消費量はトレーニング前と比較して、運動終了直後において有意に高値を示した。

表 2. トレーニング期間前後における筋血流量および筋酸素消費量

		運動前	運動終了直後	運動終了15分後	運動終了30分後
筋血流量 (mL · min ⁻¹ · 100g ⁻¹)	トレーニング前	0.223 ± 0.063	1.255 ± 0.362	0.551 ± 0.202	0.528 ± 0.143
	トレーニング後	0.195 ± 0.060	1.632 ± 0.528*	0.621 ± 0.207	0.415 ± 0.063
筋酸素消費量 (mLO ₂ · min ⁻¹ · 100g ⁻¹)	トレーニング前	0.044 ± 0.002	0.274 ± 0.042	0.179 ± 0.021	0.123 ± 0.024
	トレーニング後	0.070 ± 0.009	0.437 ± 0.050*	0.210 ± 0.022	0.198 ± 0.019

*: P<0.05 vs. トレーニング前.

<引用文献>

- ① Faiss R, Leger B, Vesin JM, Fournier PE, Eggel Y, Deriaz O, Millet GP. Significant molecular and systemic adaptations after repeated sprint training in hypoxia. PLoS One. 8: e56522, 2013
- ② Hamlin MJ, Olsen PD, Marshall HC, Lizamore CA, Elliot CA. Hypoxic Repeat Sprint Training Improves Rugby Player' s Repeated Sprint but Not Endurance Performance. Front Physiol. 8: 24, 2017
- ③ Brocherie F, Girard O, Faiss R, Millet GP. Effects of Repeated-Sprint Training in Hypoxia on Sea-Level Performance: A Meta-Analysis. Sports Med. 47(8): 1651-1660, 2017
- ④ Girard O, Brocherie F, Millet GP. Effects of altitude/hypoxia on single- and multiple-sprint performance: A comprehensive review. Sports Med. 47: 1931-1949, 2017
- ⑤ Girard O, Brocherie F, Goods PSR, Millet GP. An Updated Panorama of "Living Low-Training High" Altitude/Hypoxic Methods. Front Sports Act Living. 2:26, 2020
- ⑥ Kasai N, Mizuno S, Ishimoto S, Sakamoto E, Maruta M, Goto K. Effect of training in hypoxia on repeated sprint performance in female athletes. Springerplus. 4: 310, 2015
- ⑦ Kasai N, Kojima C, Sumi D, Takahashi H, Goto K, Suzuki Y. Impact of 5 days of sprint training in hypoxia on performance and muscle energy substances. Int J Sports Med, 38: 983-991, 2017
- ⑧ Kasai N, Mizuno S, Ishimoto S, Sakamoto E, Maruta M, Kurihara T, Kurosawa Y, Goto K. Impact of 6 consecutive days of sprint training in hypoxia on performance in competitive sprint runners. J Strength Cond Res 33:36-43, 2019

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 笠井信一、角大地、小島千尋、八津谷陽香、山口慶一、後藤一成
2. 発表標題 低酸素環境下での高強度運動が筋代謝に及ぼす影響
3. 学会等名 第74回日本体力医学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 笠井信一
2. 発表標題 低酸素環境下におけるスプリントトレーニングの効果 - 競技現場での実践に向けたエビデンスの構築 -
3. 学会等名 第74回日本体力医学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 笠井信一
2. 発表標題 低酸素環境下におけるスプリントトレーニングと負荷特性
3. 学会等名 日本運動免疫学研究会（JSEI）スプリングセミナー2020（招待講演）
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------