

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 19 日現在

機関番号：34315

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23700791

研究課題名(和文)低酸素トレーニングに対する骨格筋の無酸素的および有酸素的エネルギー供給能の適応

研究課題名(英文)Effect of hypoxic training on muscle anaerobic and aerobic capacity

研究代表者

本間 俊行(Homma, Toshiyuki)

立命館大学・スポーツ健康科学部・助教

研究者番号：90392703

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円、(間接経費) 840,000円

研究成果の概要(和文)：低酸素トレーニングに対する骨格筋エネルギー代謝の適応について検討した。最初に、短時間・高強度の固定負荷運動時の代謝動態について常酸素環境と低酸素環境の違いを調べた。その結果、同一絶対強度での運動時において、常酸素環境と比較して低酸素環境では、運動中の有酸素的エネルギー供給量が小さく、無酸素的エネルギー供給量が大きいことが示された。次に、低酸素環境での短時間・高強度の運動トレーニングの骨格筋エネルギー代謝に対する効果を調べた。その結果、低酸素環境での短時間・高強度のトレーニングは、常酸素環境で同様のトレーニングを行うよりも、骨格筋の無酸素的エネルギー供給能力を高める効果が高いことが示唆された。

研究成果の概要(英文)：We investigated the effects of hypoxic exercise training on muscle energy metabolism. First, we examined the difference in metabolic kinetics during short-lasting, high-intensity constant-load exercise under conditions of normoxia and hypoxia. We found that the aerobic energy release was smaller and compensatory anaerobic energy release was larger under hypoxia than under normoxia, during exercise at the same absolute load. Next, we examined the effects of short-lasting, high-intensity exercise training under hypoxia on muscle energy metabolism. The results indicated that muscle anaerobic capacity is more effectively improved under hypoxia than under normoxia by short-lasting, high-intensity exercise training.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：分科：健康・スポーツ科学， 細目：スポーツ科学

キーワード：低酸素トレーニング 骨格筋エネルギー代謝 無酸素的エネルギー供給 有酸素的エネルギー供給 リン31-磁気共鳴分光法 近赤外分光法 酸素摂取量 血中乳酸濃度

### 1. 研究開始当初の背景

従来、高地(低酸素)トレーニングは、長距離種目の競技選手の有酸素的エネルギー供給能力向上を主な目的として実施されてきたが、近年では比較的短時間で終了する競技種目においても実施されている。低酸素トレーニングに対する運動パフォーマンスへの効果に関する生理的適応について調べられた研究では、血液性状、運動時の血中乳酸値、最大酸素摂取量などの全身的な生理パラメータによる検討が多い。しかしながら、高地トレーニングに対する骨格筋のエネルギー代謝の適応については十分に明らかにされておらず、特に無酸素性エネルギー代謝の適応については不明な点が多い。

### 2. 研究の目的

本研究では、まず低酸素環境において、実際のトレーニング場面を想定したプロトコルでの運動時の骨格筋エネルギー代謝動態の特徴について無酸素的および有酸素的エネルギー代謝の両面から明らかにする。次に、低酸素下で行うほうが高い効果が得られると予想されるトレーニングプロトコルを用いてトレーニング実験を行い、その効果について骨格筋エネルギー代謝と運動パフォーマンスから評価する。筋エネルギー代謝の測定には、リン 31 - 磁気共鳴分光法 ( $^{31}\text{P}$ -MRS) を用いて非侵襲的に行い、現役の競技選手の代謝能やそのトレーニング効果について評価できる方法を確立する。本研究は、骨格筋エネルギー代謝の観点から、高地トレーニングを効果的に実施するための、競技選手のトレーニング方法の検討やトレーニング効果の評価に応用可能な基礎資料を得ることを目的とする。

### 3. 研究の方法

【実験 1】自転車トラック競技短距離日本代表選手が実際に行っている低酸素環境での短時間・高強度一定負荷運動時の代謝動態

無酸素的エネルギー供給能力の向上を目的とした低酸素トレーニングの有効性を検証することを目的として、自転車トラック競技短距離選手が実際に行っているトレーニングの運動時における代謝に低酸素曝露が及ぼす影響を調べた。

日本代表 6 名を含む男子自転車トラック競技短距離選手 11 名(年齢  $22.2 \pm 4.5$  歳)を対象に、被験者ごとに設定した 70 秒間持続できる最大の仕事率 ( $558 \pm 76.9\text{W}$ ) での固定負荷自転車運動を常酸素下 (20.9%) と低酸素下 (14.4%) で行わせた。運動時間は 70 秒間、ペダリングの回転数は 100 回/分であった。運動中の酸素摂取量 ( $\text{VO}_2$ ) をプレス・バイ・プレス法で測定した。また、運行終了後に血中乳酸濃度を測定した。

【実験 2】低酸素環境での短時間・高強度運動トレーニングが骨格筋および全身でのエ

### ネルギー代謝に及ぼす影響

低酸素環境での短時間・高強度の運動トレーニングが骨格筋および全身の代謝的な適応と運動パフォーマンスに及ぼす影響について明らかにすることを目的とした検討を行った。

自転車競技選手 12 名を、常酸素下(酸素濃度 20.9%)でトレーニングを行う群(常酸素群)と低酸素下(酸素濃度 16.2%)でトレーニングを行う群(低酸素群)の 2 群に分け、週あたり 4 回、3 週間のトレーニングを行わせた。1 セッションあたりのトレーニングの内容は、自転車エルゴメータを用いて 70 秒間維持できる最大強度での 70 秒間の固定負荷自転車運動を 15 分間の休息を挟んで 3 回行わせるものであった。事前のテストにおいて 70 秒間維持できる最大強度は常酸素下と低酸素下とで差がないことを確認しており、常酸素群と低酸素群のトレーニング時の仕事率には差がなかった。3 週間のトレーニングの前後で最大酸素摂取量、65~70 秒維持できる最大強度での固定負荷自転車運動時の酸素摂取量および血中乳酸濃度を測定した。また、トレーニングに対する骨格筋エネルギー代謝の適応を評価するため、3 週間のトレーニング期間前後で、磁気共鳴装置内において動的膝伸展運動を行わせ、運動時における大腿部の骨格筋エネルギー代謝をリン 31 -  $^{31}\text{P}$ -MRS で測定した。

### 4. 研究成果

実験 1 において、 $\text{VO}_2$  は運動開始後 20 秒までは両条件で同様の变化を示したが、それ以降は運動終了まで低酸素下のほうが常酸素下よりも低値を示した ( $P < 0.05$ , 図 1)。運動中の総酸素摂取量は低酸素下において常酸素下よりも有意に低かった(常酸素下:  $2.98 \pm 0.25\text{L}$ , 低酸素下:  $2.60 \pm 0.26\text{L}$ ,  $P < 0.01$ , 図 2)。運動終了後の血中乳酸濃度の最高値は低酸素下において常酸素下よりも有意に高かった(常酸素下:  $13.7 \pm 1.6\text{mM}$ , 低酸素下:  $15.4 \pm 1.4\text{mM}$ ,  $P < 0.01$ , 図 3)。

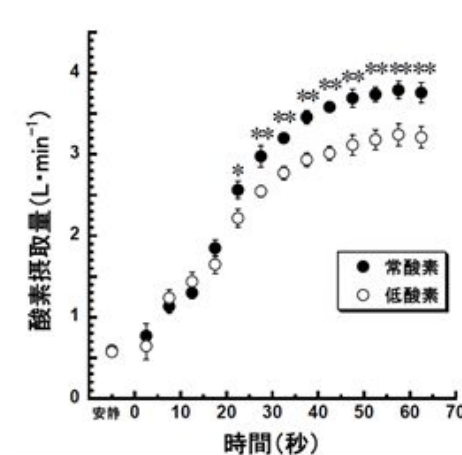


図 1. 同一絶対強度での固定負荷運動中の酸素摂取量 ( $\text{VO}_2$ ) の変化

\* $P < 0.05$ , \*\* $P < 0.01$ , 常酸素下 vs. 低酸素下

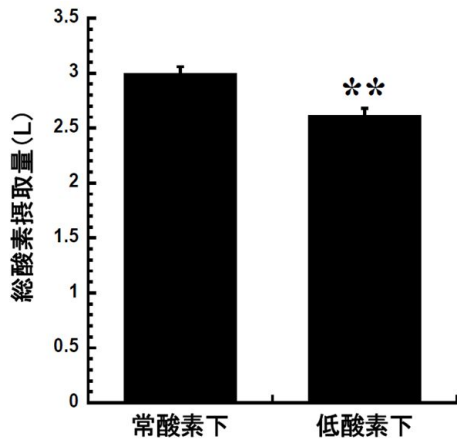


図 2. 同一絶対強度での固定負荷運動中の総酸素摂取量  
\*\*P < 0.01, 常酸素下 vs. 低酸素下

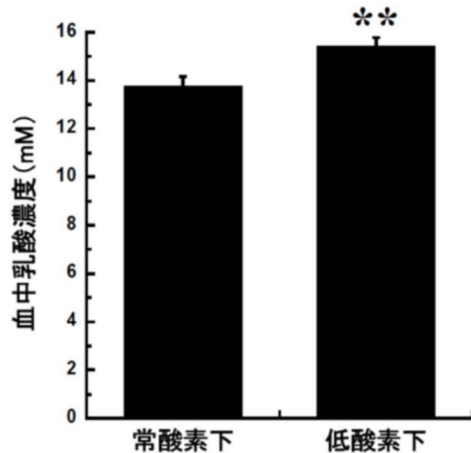


図 3. 同一絶対強度での固定負荷運動後の血中乳酸濃度の最高値  
\*\*P < 0.01, 常酸素下 vs. 低酸素下

これらの結果から、短時間・高強度の同一絶対強度の運動時においては、低酸素下のほうが常酸素下よりも有酸素性エネルギー供給量が小さく、無酸素性エネルギー供給量が大きいことが示唆された。運動後の血中乳酸濃度の差や、運動開始後 20 秒以降で VO<sub>2</sub> に条件間で差がみられたことから、低酸素下では常酸素下よりも解糖系によるエネルギー供給が大きくなると思われる。以上のことから、短時間・高強度のトレーニングを行う際には、常酸素環境よりも低酸素環境のほうが無酸素性エネルギー供給機構に与える刺激が大きいことが示唆された。

実験 2 では、最大酸素摂取量は両群ともに有意な変化を示さなかった。トレーニング前の 65~70 秒間維持できた最大強度での固定負荷運動の持続時間は両群ともにトレーニング後に有意に延長した(いずれも P < 0.05)。運動中の酸素摂取量は、常酸素群では増加した(P < 0.05)のに対して、低酸素群では変化

しなかった。運動時の血中乳酸濃度は低酸素群のみトレーニング後に高まった(P < 0.05)。

磁気共鳴装置内において最大随意収縮力の 20% 強度での動的膝伸展運動を疲労困憊に至るまで行わせ、運動持続時間(運動パフォーマンスの指標として使用)および運動中の骨格筋エネルギー代謝を測定した。その結果、運動持続時間は常酸素群では変化しなかったものの、低酸素群では有意に延長した(P < 0.01)。疲労困憊時の筋内 PCr 濃度には両群で差がなかったものの、筋内 pH は低酸素群のほうが低値を示した(P < 0.05)。

以上のことから、3 週間の短時間・高強度での運動トレーニングに対して、常酸素環境と低酸素環境とで運動パフォーマンスは類似した適応を示すものの、代謝的には異なった適応を示すことが明らかになった。

本研究の成果は、競技時間が比較的短時間で終了する競技種目の無酸素的エネルギー供給能力の向上を目的とした低酸素トレーニングが有効であることを示唆するものである。本研究の実験 1 で行った 70 秒間持続できる最大の仕事率は常酸素環境と低酸素環境とで違いがないため、低酸素環境でのトレーニングは、常酸素環境と同様の機械的仕事を行うことが可能であり、その上で骨格筋に対しては常酸素環境とは異なった代謝的負荷を与えることが可能という利点があることが明らかになった。したがって、競技現場において低酸素トレーニングを効果的に行うための基礎資料として、本研究の成果は有用であると思われる。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 5 件)

1. 高地での滞在および運動トレーニングが女性競技者の運動中の糖代謝に与える影響. 前川剛輝, 鈴木なつ未, 紅椋英信, 本間俊行, 横澤俊治. 登山医学, 査読有, 33(1): 114 - 120, 2013
2. 池田祐介, 高嶋渉, 貴嶋孝太, 衣斐淑子, 陸名英二, 本間俊行, 村田正洋. 自転車競技の発走機を用いたスタートにおけるスタート準備動作とパフォーマンスの関係. トレーニング科学, 査読有, 24(4): 279-290, 2013.
3. 池田祐介, 高嶋渉, 本間俊行, 高橋英幸, 村田正洋. 男女一流自転車競技選手における筋の形態的特徴と自転車エルゴメータのパワー発揮能力との関係. 体育学研究, 査読有, 58(2): 539-555, 2013.  
DOI: 10.5432/jjpehss.12064
4. 本間俊行. MR スペクトロスコピー (MRS) がもたらす情報 - <sup>31</sup>P-MRS によるリン酸化合物の代謝を中心に - . インナー

ビジョン. 査読無, 27 (3): 37-40, 2012.

5. Kon M, Ikeda T, Homma T, Suzuki Y. Effects of low-intensity resistance exercise under acute systemic hypoxia on hormonal responses. J Strength Cond Res. 査読有, 26(3):611-617, 2012. DOI: 10.1519/JSC.0b013e3182281c69.

〔学会発表〕(計 15 件)

1. 戸田瑠子, 木村哲也, 栗原俊之, 本間俊行, 浜岡隆文, 真田樹義. 超音波装置を用いたアスリートの骨格筋量推定式の開発. 京都滋賀体育学会第 143 回大会. 2014 年 3 月 8 日. 京都大学 (京都府)
2. 本間俊行. 低酸素環境における運動時骨格筋エネルギー代謝. 第 34 回グアニジノ化合物研究会, 2013 年 10 月 19 日. 全国町村会館 (東京都)
3. 二連木晋輔, 佐伯武士, 木戸康平, 黒澤裕子, 本間俊行, 栗原俊之, 浜岡隆文. 近赤外線時間分解分光法を用いた様々な部位の光路長の計測. 第 68 回日本体力医学会大会. 2013 年 9 月 23 日. 日本教育会館 (東京都)
4. 本間俊行, 横澤俊治, 高松潤二. トライアスロンレースにおけるランニングパフォーマンスとトラック走での血中乳酸濃度との関連. 日本体育学会第 64 回大会, 2013 年 8 月 30 日, 立命館大学 (滋賀県草津市)
5. 前川剛輝, 鈴木なつ未, 紅椋英信, 本間俊行, 横澤俊治. 高地滞在が女性競技者の運動中の糖代謝に与える影響. 第 33 回日本登山医学会学術集会. 2013 年 6 月 15 日. 京都大学 (京都府)
6. Maegawa T, Kobai H, Suzuki N, Homma T, Yokozawa T. Effects of moderate altitude training on the 1,500-m race performance of elite junior speed skaters. 18th International Hypoxia Symposium, レイクルーズ(カナダ) 2013 年 02 月 28 日
7. 前川剛輝, 紅椋英信, 本間俊行, 鈴木なつ未. エリートジュニアスピードスケート選手における運動中のエネルギー代謝の性差. 第 26 回女性スポーツ医学研究会学術集会, 東京慈恵会医科大学 (東京都), 2012 年 12 月 8 日
8. 高嶋渉, 池田祐介, 本間俊行, 西山哲成. 自転車 4 km タイムトライアルにおけるペダリングパワーおよび筋血流量の変動. 第 25 回日本トレーニング科学会大会. 2012 年 12 月 1 日, 立命館大学 (滋賀県草津市).
9. 本間俊行. 自転車トラック競技短距離選手の低酸素トレーニング. 第 16 回高所トレーニング国際シンポジウム, 2012 年 10 月 21 日, 国立スポーツ科学センター (東京都)
10. 紅椋英信, 鈴木なつ未, 本間俊行, 横澤俊治, 前川剛輝. エリートジュニアスピードスケート選手における人工低酸素環境を利用した高所トレーニングの試み. 第 24 回日本トレーニング科学会大会. 2011 年 11 月 5 日, 早稲田大学 (東京都)
11. 本間俊行, 高嶋渉, 今有礼, 本田亜紀子,

- 居石真理絵, 村田正洋, 西山哲成, 池田祐介. 低酸素環境での超最大自転車運動時の代謝動態. 第 66 回日本体力医学会大会, 2011 年 9 月 18 日. 海峡メッセ下関 (山口県)
12. 藤岡正子, 浜岡隆文, 長田卓也, 村瀬訓生, 木目良太郎, 黒澤裕子, 市村志朗, 本間俊行, 江崎和希, 中村芙美子, 勝村俊仁. 筋力トレーニングが筋不活動に伴う筋機能低下を抑制するか. 第 66 回日本体力医学会大会. 2011 年 9 月 17 日. 海峡メッセ下関 (山口県)
13. 高嶋渉, 本間俊行, 村田正洋, 西山哲成, 池田祐介. 高強度自転車運動におけるクラントルク発揮パターンの変化. 第 66 回日本体力医学会大会, 2011 年 9 月 16 日. 海峡メッセ下関 (山口県)
14. Nakamura F, Hamaoka T, Osada T, Murase N, Kime R, Homma T, Kurosawa Y, Esaki K, Shiroishi K, Ichimura S, Katsumura T: "The effect of low-volume endurance and strength training on muscle phosphocreatine recovery and perfusion during 3-week upper limb immobilization" 16th Annual Congress of the European College of Sport Science. 2011 年 7 月 7 日. リバプール (イギリス)
15. Fujioka M, Hamaoka T, Osada T, Murase N, Kime R, Kurosawa Y, Ichimura S, Homma T, Ueda C, Esaki K, Ohmori F, Yamaguchi K, Katsumura T. Lower-volume exercise training and branched-chain amino acid intake prevent muscle degradation during immobilization" 16th Annual Congress of the European College of Sport Science. 2011 年 7 月 7 日. リバプール (イギリス)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

本間 俊行 (HOMMA TOSHIYUKI)

立命館大学・スポーツ健康科学部・助教

研究者番号: 90392703