

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：32636

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26350824

研究課題名(和文)骨格筋エネルギー代謝からみた効果的な低酸素トレーニング法の検証

研究課題名(英文) Validation of the effectiveness of hypoxic training from the viewpoint of muscle energy metabolism

研究代表者

本間 俊行 (Toshiyuki, Homma)

大東文化大学・スポーツ健康科学部・准教授

研究者番号：90392703

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：骨格筋エネルギー代謝の観点から、より効果的な低酸素トレーニング法を開発することを目的とした。常酸素環境と低酸素環境での筋エネルギー代謝の違いを調べた結果、常酸素環境と比較して低酸素環境では、同一絶対強度での運動時に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くなることが示唆された。この低酸素環境におけるエネルギー代謝の特性を活かして無酸素性エネルギー供給能力を高めることを目的としたトレーニング実験を行った。その結果、低酸素環境で高強度・短時間の運動トレーニングを行うと、常酸素環境で同様のトレーニングを行う場合と比較して、無酸素性エネルギー供給能の向上が大きいことが示された。

研究成果の概要(英文)：We aimed to develop a more effective method of hypoxic training from the viewpoint of muscle energy metabolism. We investigated the muscle energy metabolism during exercise under normoxia and hypoxia. Our results suggested that during identical load exercise, aerobic energy release was lower and anaerobic energy release was higher under hypoxia than under normoxia. In the present study, we investigated the effects of high-intensity, short-duration exercise training under hypoxia on muscle energy metabolism. The results indicated that the increase in the ability of anaerobic energy release was greater after the training under hypoxia than under normoxia.

研究分野：運動生理学

キーワード：低酸素トレーニング 骨格筋エネルギー代謝 磁気共鳴分光法 無酸素性エネルギー供給 酸素性エネルギー供給

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性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性および有酸素性エネルギー代謝の両面から明らかにする。次に、常酸素環境よりも低酸素環境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および全身の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】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

低酸素環境での高強度・短時間の運動は、常酸素環境で同様の運動を行う場合よりも無酸素性エネルギー供給の動員が大きくなるという仮説の下、効果的な無酸素性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法を開発することを目的として、低酸素環境での短時間・高強度運動時におけるエネルギー代謝動態を調べた。

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 ± 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環境(酸素濃度 20.9%)と低酸素環境(酸素濃度 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 (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全身および骨格筋のエネルギー代謝とパフォーマンスに及ぼす影響

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。

男女自転車競技選手 12 名(年齢 21 ± 1 歳)を対象に、トレーニングを常酸素環境で行う群(常酸素群: 6 名)と、低酸素環境で行う群(低酸素群: 6 名)に分けて週 4 日 \times 3 週間のトレーニングを行わせた。トレーニングは、70 秒間持続可能な最大の仕事率で、70 秒間の一定負荷自転車運動を 15 分間の休息を挟んで 3 回行うものとした。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量には差がなかった。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 $^{31}\text{P-MRS}$ で測定した。

4. 研究成果

実験 1 において、 VO_2 は運動開始後 20 秒までは両条件で同様の変化を示したが、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 ($P < 0.05$)。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: $2.60 \pm 0.26\text{L}$, $P < 0.01$)。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: $15.4 \pm 1.4\text{mM}$, $P < 0.01$)。

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_2 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($P < 0.05$)。

トレーニング前後において、磁気共鳴装置内で最大随意収縮力の 20% 強度・50 回/分での動的膝伸展運動を疲労困憊に至るまで行わせ、運動持続時間および運動中の骨格筋エネルギー代謝を測定した。トレーニング前後で膝伸展運動の持続時間は常酸素群では変化しなかった(150 ± 14 秒 163 ± 9 秒)のに対し、低酸素群では有意に延長した(120 ± 19 秒 172 ± 30 秒, $P < 0.01$)。疲労困憊時の筋内 PCr 濃度には両群ともトレーニング前後で差がなかったもの(図 1), 筋内 pH は低酸素群ではトレーニング後においてトレーニング前よりも低値を示した($P < 0.05$, 図 2)。

以上のことから、低酸素環境での高強度・短時間の運動トレーニングは、無酸素性エネルギー供給能力の向上に有効であり、高強度運動時において筋内 pH がより低いレベルまで運動の持続が可能になる効果が得られる可能性が示された。

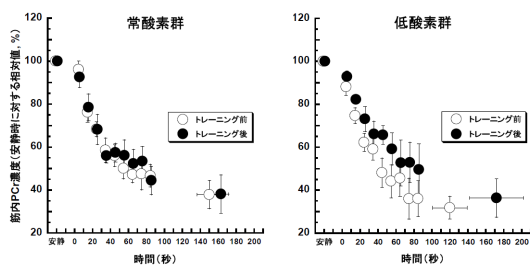


図 1. トレーニング前後での膝伸展運動時の筋内 PCr の変化(左図: 常酸素群, 右図: 低酸素群)

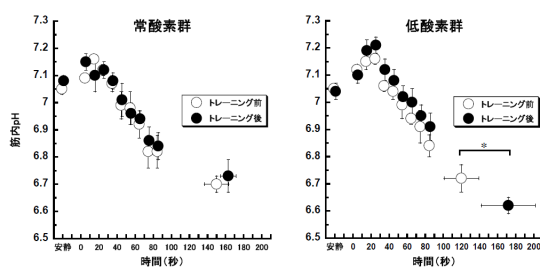


図 2. トレーニング前後での膝伸展運動時の筋内 pH の変化(左図: 常酸素群, 右図: 低酸素群)

* $P < 0.05$, トレーニング前 vs. トレーニング後

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性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 9 件)

1. Toda Y, Kimura T, Taki C, Kurihara T, Homma T, Hamaoka T, Sanada K. New ultrasonography-based method for predicting total skeletal muscle mass in male athletes. Journal of Physical Therapy Science. 28 (5): 1556-1559, 2016 (Reviewed).
2. Nirengi S, Amagasa S, Homma T, Yoneshiro T, Matsumiya S, Kurosawa Y, Sakane N, Ebi K, Saito M, Hamaoka T. Daily ingestion of catechin-rich beverage increases brown adipose tissue density and decreases extramyocellular lipids in healthy young women. Springerplus. 5(1):1363, 2016 (Reviewed).
3. Nirengi S, Homma T, Inoue N, Sato H, Yoneshiro T, Matsushita M, Kameya T, Sugie H, Tsuzaki K, Saito M, Sakane N, Kurosawa Y, Hamaoka T. Assessment of human brown adipose tissue density during daily ingestion of thermogenic capsinoids using near-infrared time-resolved spectroscopy. J Biomed Opt. 21(9):091305, 2016 (Reviewed).
4. Hasegawa N, Fujie S, Kurihara T, Homma T, Sanada K, Sato K, Hamaoka T, Iemitsu M. Effects of habitual aerobic exercise on the relationship between intramyocellular or extramyocellular lipid content and arterial stiffness. J Hum Hypertens. 30(10):606-612, 2016 (Reviewed).
5. Kurosawa Y, Nirengi S, Homma T, Esaki K, Ohta M, Clark JF, Hamaoka T. A single-dose of oral nattokinase potentiates thrombolysis and anti-coagulation profiles. Sci Rep. 5:11601, 2015 (Reviewed).
6. Hirabayashi A, Inamuro N, Mimura K, Kurihara T, Homma T. Compressed sensing MRI using sparsity induced from adjacent slice similarity. Proceedings of the International Conference on Sampling Theory and Applications. SampTA2015:287-291, 2015 (Reviewed).
7. Kido K, Suga T, Tanaka D, Honjo T, Homma T, Fujita S, Hamaoka T, Isaka T. Ischemic preconditioning accelerates muscle deoxygenation dynamics and enhances exercise endurance during the work-to-work test. Physiol Rep. 3(5): e12395, 2015 (Reviewed).
8. Homma T, Hamaoka T, Osada T, Murase N, Kime R, Kurosawa Y, Ichimura S, Esaki K,

Nakamura F, Katsumura T. Once-weekly muscle endurance and strength training prevents deterioration of muscle oxidative function and attenuates the degree of strength decline during 3-week forearm immobilization. *Eur J Appl Physiol.* 115(3):555-563, 2015 (Reviewed).

9. Hasegawa N, Kurihara T, Sato K, Homma T, Fujie S, Fujita S, Sanada K, Hamaoka T, Iemitsu M. Intramyocellular and Extramyocellular Lipids Are Associated With Arterial Stiffness. *Am J Hypertens.* 28(12):1473-1479, 2015 (Reviewed).

〔学会発表〕(計 15 件)

1. 布施沙由里, 二連木晋輔, 天笠志保, 本間俊行, 木目良太郎, 村瀬訓生, 黒澤裕子, 井上茂, 浜岡隆文. 近赤外時間分解分光法により評価した褐色脂肪組織と体脂肪量との関係. 第 71 回日本体力医学会大会, 2016 年 9 月 25 日, いわて県民情報交流センター(岩手県盛岡市).
2. 本間俊行, 福谷好恵, 岡野美紗恵, 服部拓真, 佐藤祐也, 橋本健志, 藤田聡, 浜岡隆文. 局所的なレジスタンストレーニングが部位特異的な皮下脂肪量に及ぼす影響. 第 71 回日本体力医学会大会, 2016 年 9 月 24 日, 盛岡地域交流センター市民文化ホール(岩手県盛岡市).
3. 本間俊行, 村瀬訓生, 長田卓也, 木目良太郎, 黒澤裕子, 勝村俊仁, 浜岡隆文. 3 週間の前腕ギブス固定時における機能低下抑制のためのトレーニング量の検討. 第 70 回日本体力医学会大会, 2015 年 9 月 19 日, 和歌山県民文化会館(和歌山県和歌山市).
4. 徐宇中, 街勝憲, 本間俊行, 栗原俊之, 家光素行, 田畑泉. 疲労困憊に至らない高強度・短時間・間欠的クロストレーニングと疲労困憊に至る高強度・短時間・間欠的トレーニングが最大酸素摂取量に及ぼす影響. 第 70 回日本体力医学会大会, 2015 年 9 月 19 日, 和歌山県民文化会館(和歌山県和歌山市).
5. 高嶋涉, 本間俊行, 前川剛輝, 横澤俊治, 西山哲成. 自転車競技で用いられる空気抵抗軽減姿勢がペダリングパフォーマンスおよび生理応答に及ぼす影響. 日本体育学会第 66 回大会, 2015 年 8 月 27 日, 国土館大学世田谷キャンパス(東京都世田谷区).
6. 本間俊行, 高嶋涉, 池田祐介, 高橋英幸, 西山哲成. 低酸素環境での高強度・短時間の自転車運動トレーニングが骨格筋エネルギー代謝に及ぼす影響. 日本体育学会第 66 回大会, 2015 年 8 月 25 日, 国土館大学世田谷キャンパス(東京都世田谷区).
7. Nirengi S, Amagasa S, Homma T, Yoneshiro T, Kurosawa Y, Saito M, Hamaoka T. Effects of 12-week catechin-rich beverage intake on brown adipose tissue determined by novel near-infrared time-resolved spectroscopy and

extramyocellular lipids in healthy young women. *Beige and Brown Fat: Basic Biology and Novel Therapeutics*, 2015 年 4 月 20 日, Snowbird, Utah USA.

8. Nirengi S, Amagasa S, Homma T, Yoneshiro T, Kurosawa Y, Iida T, Oda M, Yamashita Y, Saito M, Hamaoka T. Verification of human brown adipose tissue evaluation using near-infrared time-resolved spectroscopy. ヒトの環境適応と全身的協関に関する国際シンポジウム. 2015 年 3 月 15 日, 神戸大学発達科学部(兵庫県神戸市).
9. 二連木晋輔, 本間俊行, 黒澤裕子, 浜岡隆文. 近赤外線時間分解分光法を用いたヒト褐色脂肪組織の新しい評価法. 第 18 回酸素ダイナミクス研究会, 2014 年 11 月 29 日, 京都大学(京都府京都市).
10. 黒澤裕子, 二連木晋輔, 永井優也, 本間俊行, 浜岡隆文. エコノミークラス症候群モデルにおける下肢酸素動態の変動と弾性タイツ着用効果の検証. 第 18 回酸素ダイナミクス研究会, 2014 年 11 月 29 日, 京都大学(京都府京都市).
11. 本間俊行, 高橋英幸. 低酸素環境での膝伸展運動時における骨格筋酸素動態とエネルギー代謝. 第 21 回医用近赤外線分光法研究会, 2014 年 11 月 1 日, 倉敷芸文館(岡山県倉敷市).
12. 黒澤裕子, 二連木晋輔, 永井優也, 本間俊行, 浜岡隆文. エコノミークラス症候群モデルにおける弾性タイツ着用の効果. 第 21 回医用近赤外線分光法研究会. 第 21 回医用近赤外線分光法研究会, 2014 年 11 月 1 日, 倉敷芸文館(岡山県倉敷市).
13. Nirengi S, Amagasa S, Homma T, Yoneshiro T, Matsumiya S, Kurosawa Y, Ebi K, Saito M, Hamaoka T. A 12-week catechin-rich beverage intake increases brown adipose tissue and decreases extramyocellular lipids in healthy young women. 3rd International Conference on Recent Advances and Controversies in the Measurement of Energy Metabolism. 2014 年 10 月 11 日, 花王株式会社(東京都墨田区).
14. 二連木晋輔, 天笠志保, 本間俊行, 黒澤裕子, 海老久美子, 浜岡隆文. 12 週間のカテキン摂取による褐色脂肪増量と筋細胞外脂肪の減少. 第 69 回日本体力医学会大会. 2014 年 9 月 20 日, 長崎大学文教キャンパス(長崎県長崎市).
15. 本間俊行, 栗原俊之, 梅野徳, 藤田聡, 浜岡隆文. レジスタンストレーニングが皮下脂肪と筋細胞内脂肪に及ぼす影響. 第 69 回日本体力医学会大会, 2014 年 9 月 19 日, 長崎大学文教キャンパス(長崎県長崎市).

6 . 研究組織

(1)研究代表者

本間 俊行 (HOMMA, Toshiyuki)
大東文化大学・スポーツ健康科学部
准教授
研究者番号：90392703

(2)研究分担者

浜岡 隆文 (HAMAOKA, Takafumi)
東京医科大学・医学部・教授
研究者番号：70266518

黒澤 裕子 (KUROSAWA, Yuko)
東京医科大学・医学部・助教
研究者番号：90623108