

常圧低酸素環境下での高強度インターバルトレーニングが 血糖値に及ぼす影響

桜井智野風¹⁾ 滝野 彩¹⁾ 出口 雅樹¹⁾ 高木 純²⁾

Tomonobu Sakurai¹, Aya Takino¹, Masaki Deguchi¹ and Jun Takagi²: Effect of high intensity interval training on blood glucose level in hypoxic environment

Abstract : The purpose of this study was to investigate the influence of high intensity interval training performed in hypoxic environment on sugar metabolism. We exercised in 6 healthy adult males in a normal oxygen environment and a normal pressure hypoxic environment. Exercise in both environments was carried out using a bicycle ergometer. The exercise was 45 sets of high intensity interval pedaling. The protocol was set as follows. One set took 5-sec of full force pedaling by 7.5% load of body weight and 25-sec of unloaded pedaling. Between each set was rest for 30-sec. When performing exercise in a low oxygen environment, the oxygen concentration was set to 14.5%. Exercise in each environment was conducted at intervals of 10 days or more. Blood oxygen saturation and heart rate were measured every set end using a pulse oximeter and blood glucose and hot lactic acid values were measured at the end of 15, 30 and 45 sets before exercise, 5-min and 15-min after completion was measured six times in total. Also, the peak rotation speed and peak power during pedaling were also measured.

Peak rotation speed and peak power during exercise varied with each set number, but no significant difference was observed under both circumstances. The blood glucose level tended to rise irrespective of the oxygen concentration difference after the start of the high intensity interval movement, but it was significantly higher than the normal oxygen environment in the latter half of the exercise in the low oxygen environment. In the blood lactate level, it was high at all times under low oxygen environment. Blood oxygen saturation was significantly lower in hypoxic environment than in normal oxygen environment. It was suggested that exercise in hypoxic environment promotes energy production by blood glucose as compared with movement in a normal oxygen environment.

Key words : moderate altitude, hypoxia, high-intensity interval training, blood glucose

キーワード : 常圧, 低酸素, 高強度インターバルトレーニング, 血糖

1) 桐蔭横浜大学大学院スポーツ科学研究科

2) 株式会社バディ企画研究所

1. Toin university of Yokohama, Graduate school of Sport Sciences

2. Buddy Sports Kinder garden Sports Club

I. 語 言

スポーツパフォーマンスを向上させるために有効なトレーニング方法として、高地トレーニングがある。高地トレーニングは大気酸素分圧の低下に伴い引き起こされる肺胞内の酸素分圧や、血液中の酸素飽和度の低下、組織での酸素不足がもたらす低酸素刺激により、運動時の呼吸循環機能や筋機能の改善を目的としたトレーニング方法である(曹ほか, 2015)。しかしながら、近年、簡易型の低酸素発生装置が開発されたことから、常圧環境での低酸素室が普及し、アスリートのみならず一般人においても低酸素環境下での運動トレーニングが可能になっている。気圧の変化を伴わない低酸素環境下での運動トレーニングにおいても、有酸素性のパフォーマンスを向上させるために有効なトレーニング方法としての認識が高まってきている。そのため、持久性能力が重要とされるスポーツ種目における競技力向上において導入され、その成果も報告されている(Hendriksen et al., 2003; Dufour et al., 2006; Roels et al., 2007)。

これに加え先行研究において、常圧低酸素環境下での有酸素性トレーニングが、常酸素環境下での同様のトレーニングと比較し中性脂肪および体脂肪量の減少やインスリン抵抗性の改善に効果的であることが報告されている(Haufe et al., 2008)。Susanne et al (2009)は、低酸素環境下での滞在及び運動は、体脂肪の減少、血圧の低下などがもたらすことを報告しているのに加えて、糖質代謝に及ぼす影響についても言及している。またRoberts et al (1996)は、標高4300 mの高地において、低負荷強度で45分間運動させたところ、骨格筋における糖取り込みが促進したことを報告している。今や低圧を伴わない低酸素環境下でのトレーニングは、スポーツパフォーマンスの向上のみならず、老若男女の健康維持・増進に効果が期待できるトレーニング方法としても、その有効性に期待が寄せられている(Netzer et al., 2008; Wiesner et al., 2010)。このように、先行研究の多くが低酸素環境下で行う低強度の持久性トレーニングの効果を検討したものである。身体トレーニングを考える際、筋量の増加やスピードの向上を目的とすると、無酸素性・乳酸系ハイパワートレーニングに取り組まなくてはならない。しかしながら、低酸素環境下で行う無酸素性・乳酸系ハイパワートレーニングが、身体の生理的变化に及ぼす影響について検討している報告は希少で、明確な知見が得られていないのが現状である。

先行研究において、無酸素性の高強度インターバルトレーニングは、中強度の有酸素性トレーニングと比較し運動時間および実施回数が少ないにも関わらず運動パフォーマンスの向上には差がなかったことを報告している(Gibala et al . 2008)。Holliss BA et al (2013)は、標高3,000m程度の酸素濃度(14.5%)環境下での高強度負荷トレーニングにより、骨格筋中におけるクレアチンリン酸のターンオーバーが改善されたことを報告している。また、Kon et al (2015)は、同様のインターバルトレーニングを一過性に低酸素環境下で行ったところ、運動

後に糖質代謝を促進させる働きを持つ成長ホルモンの分泌量が常酸素環境下よりも著しく増加することを明らかにした。これらのことは、低酸素環境下で高強度インターバルトレーニングを行った場合、常酸素環境下で行う場合よりも、糖質代謝の亢進に効果的である可能性を示唆している。しかし、これまで低酸素環境下での高強度インターバルトレーニングが、血糖の変化や糖質エネルギーの使用状況に及ぼす影響について検討した研究は無く、その効果については明らかになっていない。

そこで本研究では、低酸素トレーニングの有効性や酸素濃度の環境の違いによる糖質エネルギー産生と利用のメカニズムについて検討することを目的とした。

II. 方 法

1. 被験者

被験者は、内科的疾患がなく喫煙経験の無い、運動部に所属する健康男子大学生6名であった。その身体的特性を表1に示した。被験者には実験当日、食後6時間以上経過後、空腹状態にて実験を行った。被験者には、事前に実験の内容および危険性を口頭および書面で十分に説明し、実験参加の承諾を得た。なお、本研究は桐蔭横浜大学臨床研究倫理審査委員会の承認を得て行った。

2. 高強度インターバル運動

被験者は、Holliss BA et al (2013)の方法に従い酸素濃度が14.5 %に設定された常圧低酸素環境条件及び常酸素環境条件の両試行下で自転車エルゴメーター(パワーマックスV III, コナミスポーツライフ社製)を用いて高強度インターバル運動を実施した。常酸素及び常圧低酸素環境の室温は22℃に設定した。被験者には、実験前、30分程度の座位安静を実施した。高強度インターバル運動は実際のスポーツ場面を考慮したプロトコルにて実施した(長谷川ら2009)。体重7.5 %の負荷で5秒間の全力ペダリング、その後25秒間負荷がない状態でペダリング、その後30秒間の完全休憩を1セットとし、これを45セット行った。水分補給は被験者のタイミングに合わせて不定期に行い、水のみとした。

3. 測定項目

測定項目は、血糖値、乳酸値、血中酸素飽和度およびペダリングパワーを測定した。血中酸素飽和度はセット終了毎に測定し、血糖値と乳酸値は運動実施前、15、30、45セット終了時、終了後5分後および15分後の計6回測定した(図1)。血糖値の測定には血糖測定器(グルコカードGブラック、アークレイ社製)、乳酸値の測定には乳酸測定器(ラクテート・プロ2、アークレイ社製)を用い、手指尖部から微量採血を行い測定した。血中酸素飽和度はパルスオキシメーター(OXIBOY、シースター株式会社製)を用いて、ペダリングパワーは自転車エルゴメーターから各セット休息終了時に測定した。

4. 統計処理

各算出項目は平均値±標準誤差で示した。測定値変化量は、二元配置分散分析を行い、差が認められた際の検定には、Paired t-testを用いた。なお、有意性は危険率を5%未満で判定した。

Ⅲ. 結 果

1. 血糖値

図2に、各測定時における被験者6名の血糖値の変化を示した。運動前の数値は常酸素環境97.5 ± 3.3 mg/dl、低酸素環境99.5 ± 5.1 mg/dlであった。45セット終了時は常酸素環境111.2 ± 3.4 mg/dl、低酸素環境123.0 ± 5.8 mg/dlであり、運動終了15分後では、常酸素環境114.8 ± 2.7 mg/dl、低酸素環境104.3 ± 7.9 mg/dlとなり、両時点において常酸素環境下、低酸素環境下の間に有意差が見られた。低酸素環境

下の運動においては、血糖値は高値を示し、終了後は低値を示した。

2. 乳酸値

図3に、各測定時における被験者6名の乳酸値の平均値を示した。運動前から終了後までの数値は、常酸素環境において運動前1.2 ± 1.1 mmol/l、15セット終了後8.8 ± 1.3 mmol/l、45セット終了後10.0 ± 1.5 mmol/l、終了5分後7.2 ± 1.4 mmol/l、終了15分後4.6 ± 2.6 mmol/lに対し、低酸素環境においては運動前2.1 ± 0.2 mmol/l、15セット終了後12.9 ± 1.8 mmol/l、30セット終了後11.4 ± 1.9 mmol/l、45セット終了後10.7 ± 0.9 mmol/l、終了5分後9.6 ± 2.0 mmol/l、終了15分後5.6 ± 0.7 mmol/lであった。乳酸値の変化に関して、運動中は低酸素環境下において常に高値を示す傾向があり、15セット終了時には常酸素環境下と低酸素環境下において有意差が見られた。

表1 被験者の身体的特徴

年齢 (歳)	身長 (cm)	体重 (kg)
20.7 ± 1.0	170.2 ± 4.6	62.2 ± 5.8

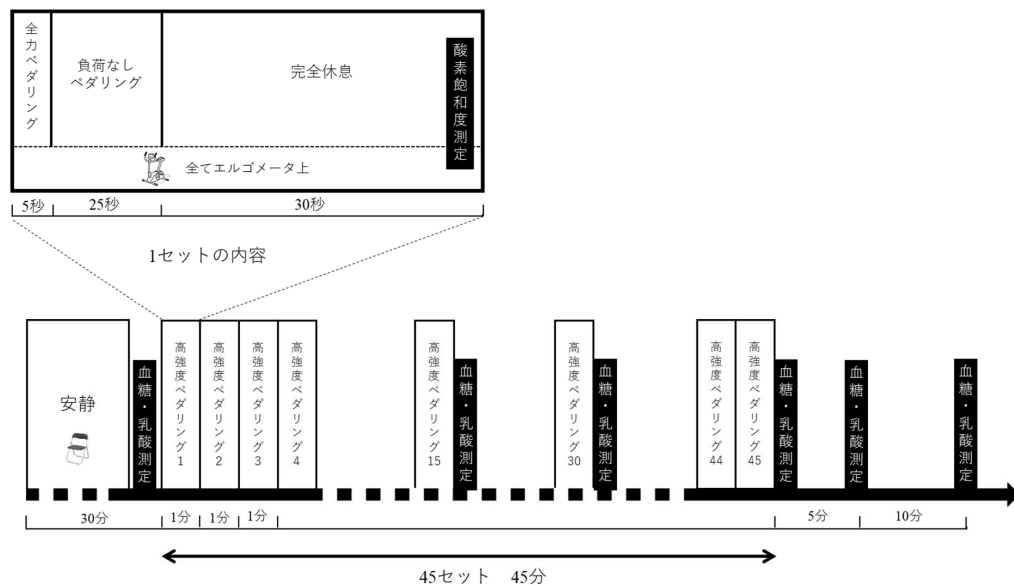


図1 実験プロトコル

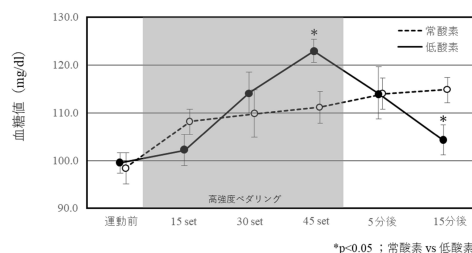


図2 血糖値の変化

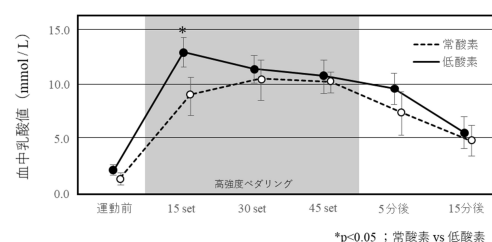


図3 乳酸値の変化

3. 血中酸素飽和度

図4に、セット終了ごとに測定した血中酸素飽和度を示した。血中酸素飽和度は、低酸素環境下において運動中全セットにおいて有意に低値を示した。

4. ペダリングパワー

図5に、セット終了ごとに測定したペダリングパワーを示した。ペダリングパワーには、各群における差は見られなかった。

IV. 考 察

異なる酸素環境下での高強度インターバル運動時における血中酸素飽和度の推移は、酸素濃度に同期した明らかな差異を示した。低酸素環境における血中酸素飽和度の低下は運動パフォーマンスの低下に影響を及ぼすとされるが、本研究においては運動パフォーマンスの指標となるパワー（ペダリング仕事量）に影響が見られなかった。これは、本実験のプロトコルは、サッカーの試合をモデルとした45分にわたる45セットのインターバル運動であったため、30秒という十分な休息をとれることで、筋活動に使用するアデノシン三リン酸(ATP)の再生を賄うことができたと考えられる(Sloniger et al., 1998)。ATP再生に使用されるエネルギーである糖質の不足は血糖値に反映される。本研究における血糖値の変化は、運動終盤には低酸素環境で高値を示し、回復時には常酸素環境が高値を示した。高強度インターバル運動を行うことによって血糖値は上昇する(Jonathan et al., 2011)。これは、高強度の筋運動のエネルギー産生のために使用された糖を補うため、肝臓に貯蔵されている糖質の新生・放出が促進され、血糖値が上昇したのと考えられる。高強度ペダリング運動後半のセットにおいて、常酸素環境では血糖値は安定するものの、低酸素環境下においてはさらに上昇した。この低酸素環境下における高血糖の傾向は、低酸素環境下で高強度の筋活動を行うことで常酸素環境下と比較して、酸化系によるエネルギー産生に比し解糖系によるエネルギー産生が促進されたために引き起こされた現象であり(Roberts et al., 1996)、糖質利用と糖新生のバランスが崩れた状態であったと考えられる。低酸素環境下における血中乳酸値は、15セット終了時に常酸素環境下に比べ有意な上昇が見られ、それ以外の時点においても高値を示す傾向にあった。乳酸は主に速筋線維細胞内において、嫌氣的エネルギー産生のために糖が分解(解糖)される際に生成される。低酸素環境下における高強度運動開始時には、常酸素環境下に比べ解糖系によるエネルギー産生が促進されたことが考えられる。

Kon et al., 2015 は、低酸素環境下でインターバルトレーニングを行ったところ、運動後に糖質代謝を促進させる働きを持つ成長ホルモンの分泌量が常酸素環境下よりも著しく増加することから、低酸素環境下における高強度インターバルトレーニングでは、常酸素環境下よりも、糖質代謝の亢進に効果的であ

る可能性を示唆している。本実験においては、高強度インターバル運動の最中から糖質代謝の亢進が観察され、その亢進は運動中継続することが示された。運動プロトコルの違いによるものとも考えられるが、本実験で用いたプロトコルは、サッカー競技をモデルにしたプロトコルであり、実際のスポーツ現場に応用可能なデータを示していると考えられる。

今回、低酸素環境下での高強度インターバル運動において、解糖系によるエネルギー産生が促進されたにもかかわらず、血糖値の上昇を観察した。これは、低酸素環境下では糖質利用に際し、常酸素環境よりも糖新生機構が活発化する可能性を示唆する。このことから、低酸素環境下における高強度インターバル運動時では、糖質は極めて重要なエネルギー源であり、常酸素環境下運動時に比べより多くの糖質(グルコース)の摂取、補給が重要と考えられる。

V. ま と め

本研究では、常圧低酸素および常酸素環境下での高強度インターバル運動時における血糖値の変化を乳酸値、血中酸素飽和度に関連させて比較検討した。血糖値は高強度インターバル運動後、酸素濃度の違いに関係なく上昇する傾向が見られた。また、インターバル運動中の血糖値は低酸素環境下での値が高くなる傾向が見られ、乳酸値は常時低酸素環境下において高値を示した。低酸素環境下で高強度インターバル運動を行うことによって、肝臓における糖質の産生・放出が促進され、解糖系によるエネルギー産生が促進されたと考えられる。高強度インターバル運動において、酸素濃度の違いにより糖質を利用するエネルギー産生のメカニズムに差異が生じることが考えられ、低酸素環境下での運動は、常酸素環境下での運動に比べて解糖系によるエネルギー産生が増加し、糖新生も促進されることが示唆された。スポーツトレーニングにおける、高地トレーニングや低酸素トレーニングの実施には、糖質の管理がより重要となることが示唆された。

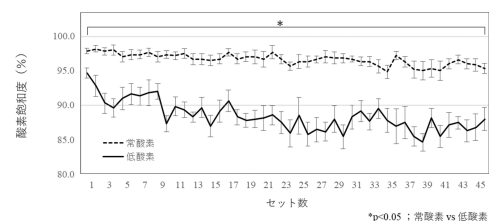


図4 血中酸素飽和度の変化

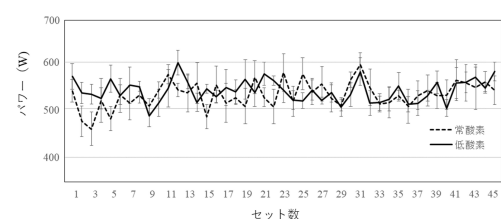


図5 ペダリングパワーの推移

文 献

- Dufour, S.P., Ponsot, E., Zoll, J., Doutreleau, S., Lonsdorfer-Wolf, E., Geny, B., Lampert, E., Flück, M., Hoppeler, H., Billat, V., Mettauer, B., Richard, R., and Lonsdorfer, J., (2006) Exercise training in normobaric hypoxia in endurance runners. I. Improvement in aerobic performance capacity . *Journal of Applied Physiology*, 100: 1238-1248.
- Gibala, M.J., and McGee, S.L.(2008) Metabolic adaptations to short-term high-intensity interval training: a little pain for a lot of gain? *Exerc Sport Sci Rev.*, 36:58-63.
- Harris, J.C. (1989) Suited up and stripped down: Perspectives for sociocultural sport studies. *Sociol. Sport J.*, 6: 335-347.
- 長谷川博・高津理美・安松幹展 (2009) 休息間の脚部冷却が暑熱環境下における間欠的運動能力及び生体負担度に及ぼす影響, *デサントスポーツ科学*, 30: 181-186.
- Haufe, S., Wiesner, S., Engeli, S., Luft, F.C., and Jordan, J. (2008) Influences of normobaric hypoxia training on metabolic risk markers in human subjects. *Med Sci Sports Exerc.*, 40:1939-1944.
- Hendriksen, I.J., and Meeuwssen, T. (2003) The effect of intermittent training in hypobaric hypoxia on sea-level exercise: crossover study in humans . *European Journal of Applied Physiology*, 88: 396-403.
- Holliss, B.A.I., Fulford, J., Vanhatalo, A., Pedlar, C.R., and Jones, A.M. (2013) Influence of intermittent hypoxic training on muscle energetics and exercise tolerance. *J Appl Physiol.*, 114:611-619.
- Jonathan, L., Jenna, G., Michael, P., Adeel, S., Mark, T., Zubin, P., Mary, J., and Martin, G.(2011) Low-volume high-intensity interval training reduces hyperglycemia and increases muscle mitochondrial capacity in patients with type 2 diabetes. *J. Appl. Physiol.*, 111:1554-1560
- Kon, M., Nakagaki, K., Ebi, Y., Nishiyama, T., and Russell, A.P. (2015) Hormonal and metabolic responses to repeated cycling sprints under different hypoxic conditions. *Growth Horm IGF Res.*, 25:121-126.
- Morishima, T., and Goto. K. (2014) Successive exposure to moderate hypoxia does not affect glucose metabolism and substrate oxidation in young healthy men. *Springerplus*. 21:370.
- Netzer, N.C., Chytra, R., and Küpper, T. (2008) Low intense physical exercise in normobaric hypoxia leads to more weight loss in obese people than low intense physical exercise in normobaric sham hypoxia . *Sleep Breath*, 12:129-134.
- Roberts, A.C., Reeves, J.T., and Butter-field, G.E. (1996) Altitude and β -blockade augment glucose utilization during submaximal exercise. *J Appl Physiol.*, 80: 605-616.
- Roels, B., Bentley, D.J., Coste, O., Mercier, J., and Millet, G.P. (2007) Effects of intermittent hypoxic training on cycling performance in well-trained athletes . *European Journal of Applied Physiology*, 101: 359-368.
- 曹 銀行・内丸 仁 (2015) 常圧低酸素環境下での漸増負荷運動時におけるエネルギー消費及び糖酸化率. *仙台大学大学院スポーツ科学研究科修士論文集*, 16:87-95.
- Sloniger, M.A., Cureton, K.J., Prior, B.M., and Evans, E.M. (1998) Anaerobic capacity and muscle activation during horizontal and uphill running. *J. Appl. Physiol.*, 83: 262-269.
- Wiesner, S., Haufe, S., Engeli, S., Mutschler, H., Haas, U., Luft, F.C., and Jordan, J. (2010) Influences of normobaric hypoxia training on physical fitness and metabolic risk markers in overweight to obese subjects. *Obesity*, 18:116-120.