常圧低酸素環境が運動中の呼吸循環代謝応答に 与える影響

*Effects of a Low-oxygen Normal Pressure Environment on the Respiratory,
Cardiovascular and Metabolic Responses to Exercise*

片山 訓博^{1,2)} 大倉 三洋¹⁾ 山崎 裕司¹⁾ 重島 晃史^{1,2)}
酒井 寿美¹⁾ 栗山 裕司¹⁾ 稲岡 忠勝¹⁾ 宮崎 登美子¹⁾
柏 智之¹⁾ 藤本 哲也²⁾ 藤原 孝之^{2,3)}

KUNIHIRO KATAYAMA^{1,2)}, MITSUHIRO OOKURA¹⁾, HIROSHI YAMASAKI¹⁾, KOJI SHIGESHIMA^{1,2)},
SUMI SAKAI¹⁾, HIROSHI KURIYAMA¹⁾, TADAKATU INAOKA¹⁾, TOMIKO MIYAZAKI¹⁾,
TOMOYUKI KASHIWA¹⁾, TETSUYA FUJIMOTO²⁾, TAKAYUKI FUJIWARA^{2,3)}

¹⁾ Department of Physical Therapy, Kochi Rehabilitation Institute: 1139-3 Takaoka-cho, Otsu, Tosa-city, Kochi, 781-1102, Japan.
TEL+81 88-850-2315

²⁾ Interdisciplinary Graduate School of Science and Technology, Shinshu University

³⁾ Koriyama Institute of Health Science

Rigakuryoho Kagaku 27(4): 357-361, 2012. Submitted Oct. 20, 2011. Accepted Nov. 16, 2011.

ABSTRACT: [Purpose] We measured the respiratory, cardiovascular and metabolic responses to low intensity exercise in a low-oxygen normal pressure environment, and investigated its effect on energy metabolism. [Subjects] The subjects were 13 normally healthy males. [Method] The subjects performed exercise at a load of 70% of the anaerobic threshold on a bicycle ergometer under normal (20.9%) and low (14.5%) oxygen concentrations at a normal pressure of 1.0 atm. During exercise, we measured oxygen saturation, heart rate, and conducted respiratory gas analysis. [Results] Under the low oxygen condition, compared to the normal oxygen condition, the heart rate and respiratory minute volume during exercise showed significantly high values, while the lipid oxidation rate was significantly low. Conversely, the glucose oxidation rate was significantly high, and energy metabolism rose. [Conclusion] The results suggest that carbohydrate utilization is promoted by exercise under a low-oxygen normal pressure environment.

Key words: low-oxygen normal pressure environment, energy metabolism, respiratory and cardiovascular responses

要旨:〔目的〕常圧低酸素環境における低強度運動時の呼吸循環代謝応答を測定し、エネルギー代謝に与える影響について検討した。〔対象〕健康成人男性13名。〔方法〕通常酸素濃度条件（1.0 atm、酸素濃度20.9%）と常圧低酸素条件（1.0 atm、酸素濃度14.5%）を設定した。両条件下でATポイントの70%負荷による自転車エルゴメータ運動を行った。実験中、酸素飽和度、心拍数、呼気ガスデータを測定した。〔結果〕低酸素条件では、通常酸素条件に比べ、運動時心拍数、分時換気量が有意に高値を示した。低酸素条件は、通常酸素条件に比べ、脂肪酸化率は有意に低かった。逆に、ブドウ糖酸化率は有意に高く、エネルギー代謝は亢進していた。〔結語〕常圧低酸素環境下の運動によって、糖質利用が促進される可能性が示唆された。

キーワード: 常圧低酸素環境、エネルギー代謝、呼吸循環応答

¹⁾ 高知リハビリテーション学院 理学療法学科:高知県土佐市高岡町乙1139-3 (〒781-1102) TEL 088-850-2315

²⁾ 信州大学大学院総合工学研究科

³⁾ 郡山健康科学専門学校

I. はじめに

標高1000～3000 m程度のチベット・ヒマラヤ、南米アンデスおよびコーカサスなどの高地民族には長寿が多く、また冠心疾患や高血圧症の発生率が低いことが報告されている^{1,2)}。これらの要因として浅野³⁾は、高地での日常の運動時生理的負担度が、平地よりも比較的大きく呼吸循環器系への刺激が高まると報告した。Terradosら⁴⁾は、標高2300 mに相当する人工的な低圧低酸素環境下における4週間のトレーニングは、脂肪酸化の亢進、さらには解糖系の抑制効果があったと報告した。高櫻ら⁵⁾は、高地環境への滞在やトレーニングによって、インスリン感受性の改善がもたらされると報告した。

高地や低圧低酸素環境下でのトレーニングを実現することは物理的、経済的に極めて困難である。また、低酸素環境における高強度のトレーニングは、重度の低酸素血症を誘発する可能性が高い。心疾患や肺疾患を合併することが少なくない中高年者の生活習慣病予防を目的とした運動としてはリスクが高い。

近年、比較的簡易な装置を用いて常圧環境下で酸素濃度のみを低下させ低酸素環境を作り出すことが可能となっている。もし、常圧の低酸素環境によって、低圧低酸素環境（高地環境など）と同様の運動時におけるエネルギー代謝に好影響が与えられるとすれば、効果的なトレーニング環境が容易に実現できる可能性がある。

本研究では、ATポイントの70%運動強度時での常圧低酸素環境における呼吸循環代謝応答を測定し、その有用性について検討した。

II. 対象と方法

1. 対象

対象は健康成人男性13名とした。平均年齢 21.2 ± 0.6 歳、平均身長 168.8 ± 4.7 cm、平均体重 62.6 ± 5.1 kg、平均体表面積 1.72 ± 0.08 m²であった。対象者には、研究の主旨・内容および注意事項について説明し、同意を得たのちに実験を開始した。なお、本研究は高知リハビリテーション学院における研究に係わる生命倫理に関する研究倫理委員会から承認を受けた後に実施した。

2. 方法

室温27℃、湿度40～50%の室内にて、塩化ビニール製テント（容積4.0 m³）を用い、藤原らの特許⁶⁾を使用し大倉⁷⁾の報告した膜分離方式の高・低酸素空気発生装置（分離膜：宇部興産製UBEN2セパレーター、コンプレッサー：アネスト岩田製SLP-22C）を用いて低酸素濃度環境（酸素濃度14.5%，0.7 atm、高度3,000 m相当：以下、低酸素）、と通常酸素濃度環境（酸素濃度20.9%，1.0 atm：以下、通常酸素）を準備した。

最初に通常酸素の条件を実施し、1週間の間隔を空けて低酸素条件を実施した。両条件とも30分間の安静椅子座位後、嫌気性代謝閾値（以下、ATポイント）の70%定量負荷による自転車エルゴメータ運動を30分間実施し、その後30分間の回復期（安静座位）を設けた。安静時、運動時および回復期において呼気ガスデータ、心拍数および経皮的動脈血酸素飽和度（以下、SpO₂）を連続測定した。

自転車エルゴメータの回転数は55回/分とした。呼気ガス分析データより、分時換気量（以下、 $\dot{V}_E$ ：ℓ/分）、分時二酸化炭素排出量（以下、 $\dot{V}CO_2$ ：ml/分）、脂肪酸化率（lipid oxidation rate、以下LOR、mg/分）およびブドウ糖酸化率（glucose oxidation rate、以下GOR、mg/分）を比較検討した。LOR、GORは、つぎの式から算出した⁸⁾。NU（尿中窒素排出量/分）は0.008g/分で一定とし、 $LOR = 1.689 \times (\dot{V}O_2 (\ell) - \dot{V}CO_2 (\ell)) - 1.943 \times NU$ 、 $GOR = 4.571 \times \dot{V}CO_2 (\ell) - 3.231 \times \dot{V}O_2 (\ell) - 2.826 \times NU$ 、そして、LOR、GORを体表面積で補正した。

実験中は、心電図モニターにて心拍数（以下、HR：拍/分）、不整脈をモニターした。経皮的動脈血酸素飽和度（以下、SpO₂）はパルスオキシメーター（NBP-400、NELLOR PUPITANBENNETT社製）を用いて測定した。ATポイントは、2秒間に1W（30 W/分）の割合で漸増する漸増動負荷により、呼気ガス分析装置（エアロモニターAE-300S、ミナト医科学社製）を用い、ブレスバイブレス法にて呼気ガスデータを連続測定し、V-Slope法により求めた。

各データは開始から終了まで1分間隔で測定し、運動前5分間の安静時と5分間のstageごとの平均値を比較検討した。

なお、被験者は前日の夕食以降絶食として翌日の午前中に測定を実施した。

統計学的手法は、通常酸素、低酸素条件間の比較にはWillcoxonの符号付順位和検定を用いた。同一酸素濃度環境におけるstage間の比較には一元配置分散分析と多重比較検定（Tukey-Kramer法）を用いた。いずれも有意水準は危険率5%未満とした。統計解析には、SPSSver.18を用いた。

III. 結果

被験者のATポイント70%における自転車エルゴメータの負荷量は、 47.5 ± 5.3 wattであった。

SpO₂は、安静時、運動時、回復期すべてのstageで低酸素、通常酸素の条件間で有意差を認め、低酸素が低値であった（表1、表2、 $p < 0.05$ ）。低酸素条件での運動時SpO₂は、すべてのステージで平均90%を上回った。また運動中、安静時に認められていない不整脈の出現はなかった。

表1 安静、運動時の各stageでの各測定結果

	安静	運動 stage 1	運動 stage 2	運動 stage 3	運動 stage 4	運動 stage 5	運動 stage 6
SPO2 (%)	低酸素	90.8 ± 2.0 *1	90.1 ± 1.9 *1	90.4 ± 1.5 *1	90.4 ± 1.3 *1	90.6 ± 1.3 *1	91.4 ± 1.6 *1
	通常酸素	97.4 ± 0.8	97.5 ± 0.8	97.2 ± 0.8	97.2 ± 0.8	97.0 ± 0.8	97.1 ± 0.8
HR (拍/分)	低酸素	84.1 ± 11.5	108.6 ± 12.0 *1	112.2 ± 12.9 *1	114.1 ± 12.7 *1	114.9 ± 13.6 *1	116.4 ± 14.0 *1
	通常酸素	80.5 ± 11.4	102.3 ± 8.8	105.3 ± 10.2	105.9 ± 10.2	105.9 ± 10.7	107.9 ± 11.4
VCO2 (ml/分)	低酸素	228.0 ± 37.4	679.9 ± 91.8	716.6 ± 95.4	725.0 ± 91.8	725.1 ± 95.9	728.3 ± 90.9
	通常酸素	228.6 ± 26.0	673.0 ± 64.8	735.5 ± 77.6	736.9 ± 80.8	726.9 ± 72.4	743.9 ± 80.8
VE (L /分)	低酸素	9.9 ± 1.4	22.5 ± 3.0 *1	23.8 ± 3.5	24.5 ± 3.7	24.7 ± 3.5 *1	25.2 ± 3.8 *1
	通常酸素	9.8 ± 1.5	21.1 ± 2.0	23.1 ± 2.2	23.2 ± 2.6	22.9 ± 2.2	23.5 ± 2.5
LOR (mg/分/m ²)	低酸素	4.1 ± 6.1 *1	4.0 ± 8.2 *1 *4	2.2 ± 5.2 *1 *4	5.1 ± 12.6 *1 *4	9.7 ± 18.4 *1 *4	20.2 ± 30.5 *1 *4
	通常酸素	15.3 ± 16.2	83.5 ± 48.5 *2	31.7 ± 30.6 *3	35.0 ± 28.6 *3	47.3 ± 29.5 *3	42.1 ± 33.1 *3
GOR (mg/分/m ²)	低酸素	238.6 ± 81.4 *1	891.9 ± 218.8 *1	925.1 ± 175.9 *1	909.0 ± 176.1 *1	893.3 ± 201.6 *1	832.5 ± 172.7 *1
	通常酸素	194.3 ± 52.6	561.7 ± 141.9	746.3 ± 147.7	728.5 ± 127.5	691.1 ± 118.5	716.0 ± 138.8
							725.0 ± 143.6

平均値 ± 標準偏差

* 1 : 低酸素 VS 通常酸素, * 2 : 安静 stage 6 VS 運動 stage 1, * 3 : 運動 stage 1 VS 運動 stage 2, 3, 4, 5, 6, * 4 : 安静 stage 6 VS 運動 stage 1, 2, 3, 4, 5, 6

表2 回復時の各stageでの各測定結果

	回復 stage 1	回復 stage 2	回復 stage 3	回復 stage 4	回復 stage 5	回復 stage 6
SPO2 (%)	低酸素 92.3 ± 1.2 *1	92.4 ± 1.1 *1	91.7 ± 1.0 *1	91.4 ± 0.9 *1	91.2 ± 0.8 *1	91.6 ± 1.0 *1
	通常酸素 97.1 ± 0.9	97.2 ± 0.6	97.2 ± 0.8	97.3 ± 0.9	97.2 ± 0.9	97.3 ± 1.0
HR (拍/分)	低酸素 94.6 ± 14.6 *1	88.8 ± 13.7 *1	88.8 ± 12.0 *1	87.56 ± 13.9 *1	87.6 ± 13.6 *1	87.6 ± 12.4 *1
	通常酸素 85.7 ± 13.1	81.1 ± 11.4	80.4 ± 10.0	79.5 ± 10.6	78.5 ± 11.8	78.1 ± 10.5
VCO2	低酸素 318.6 ± 39.7	249.1 ± 39.6	235.0 ± 42.8	232.9 ± 42.2	236.1 ± 36.0	229.5 ± 33.3
	通常酸素 325.4 ± 36.0	255.7 ± 35.4	239.4 ± 29.2	227.9 ± 33.8	220.8 ± 36.8	228.0 ± 34.7
VE	低酸素 13.4 ± 1.6	11.3 ± 1.4	10.5 ± 1.4	10.2 ± 1.7	10.4 ± 1.3 *1	10.2 ± 1.6
	通常酸素 13.1 ± 1.4	10.8 ± 1.1	10.2 ± 1.2	10.0 ± 1.4	9.5 ± 1.1	9.7 ± 1.2
LOR (mg/分/m ²)	低酸素 14.0 ± 17.6 *1	7.9 ± 15.0 *2 *3 *4	8.4 ± 14.5	7.0 ± 11.8 *1	4.5 ± 8.3 *1	2.5 ± 3.9 *1
	通常酸素 4.0 ± 5.5 *2 *3, *4	7.5 ± 10.1	9.8 ± 9.2 *2	11.2 ± 11.6 *2	17.1 ± 16.3	16.1 ± 14.2
GOR (mg/分/m ²)	低酸素 312.3 ± 62.5 *1	240.9 ± 48.3	228.7 ± 69.7	233.4 ± 68.6	244.8 ± 66.6 *1	236.0 ± 53.1 *1
	通常酸素 371.3 ± 46.0 *5	258.5 ± 54.2 *5	223.9 ± 46.5 *5	204.2 ± 52.3 *5	177.1 ± 47.1 *5	189.1 ± 46.7 *5

平均値 ± 標準偏差

* 1 : 低酸素 VS 通常酸素, * 2 : 運動 stage 4 VS 回復 stage 1, 2, 3, 4, * 3 : 運動 stage 5 VS 回復 stage 1, 2, * 4 : 運動 stage 6 VS 回復 stage 1, 2, * 5 : 運動 stage 1, 2, 3, 4, 5, 6 VS 回復 stage 1, 2, 3, 4, 5, 6

HRは、運動時、回復期すべてのstageで低酸素、通常酸素の条件間で有意差を認め、低酸素が高値であった(表1, 表2, $p<0.05$).

$\dot{V}CO_2$ は、運動時、回復期すべてのstageで低酸素と通常酸素条件の間で有意差は認められなかった.

$\dot{V}E$ は、運動時stage1, 4, 5, 6と回復期stage 5の間に有意差を認め、運動時stage1, 4, 5, 6が高値であった(表1, 表2, $p<0.05$).

LORは、運動時全てのstageにおいて低酸素条件より通常酸素条件が有意に高値を示した(表1, 表2, $p<0.05$). 回復期stage1では、低酸素条件が有意に高値を示したが、stage4, 5, 6においては再び低酸素条件より通常酸素条件が高値を示した(表1, 表2, $p<0.05$).

GORは、運動時全てのstageにおいて低酸素条件が通常酸素条件より高値を示した(表1, $p<0.05$). 回復期stage1では、通常酸素条件において有意に高値を示したが、回復期stage 5, 6においては再び低酸素条件が通常酸素条件より高値を示した(表1, 表2, $p<0.05$).

通常酸素条件では運動時stage 1において、LORが著しく高値を示したのに対し、逆にGORは低値を示した. 運動時stage 2以降、LORは低下、GORは上昇したが運動継続による影響は認められなかった. 低酸素条件では、運動継続中、有意ではないがLORは増加し続け、運動終了によって低下に転じた. 低酸素条件下での運動時GORは運動開始時から高値をとり続けた(表1).

IV. 考 察

常圧低酸素環境への暴露後の運動が呼吸循環代謝応答に与える影響について分析した.

低酸素への暴露は肺動脈の攣縮を引き起こし、肺高血圧を生じさせる. 今回、低酸素条件下での SpO_2 は、運動時の平均値で90%を下回ることがなかったことから重度の低酸素血症を引き起こさなかった点で、運動強度設定は妥当なものと考えられた.

HR, $\dot{V}E$ は、運動時低酸素条件で高値を示した. 我々の先行研究⁹⁾では、自転車エルゴメータによる漸増負荷試験において20~50 wattの低負荷強度では、HR, $\dot{V}E$ は低酸素と通常酸素濃度の間に有意差を認めなかった. 今回のようなATポイントの70% (平均 47.5 ± 5.3 watt)での連続負荷の場合、低負荷強度でも呼吸循環器系へのストレスが増大することが確認できた.

GORは、運動時全てのstageにおいて低酸素条件が通常酸素条件より高値を示した. 高地環境における低酸素血症では、ミトコンドリア内で有気的解糖が阻害されるため、ミトコンドリア脱共役タンパク質の減少で代償が図られる. それとともに、嫌氣的解糖によるATP合成効率を増やしてATP不足を補う結果、グルコース利用が増加し、血糖値が低下する. 結果として、インスリン

分泌も低下し、インスリン感受性の改善がもたらされる⁵⁾ことが報告されている. 今回の常圧低酸素環境でも同様の効果によりグルコースが多く利用されたと考えられる. 低酸素条件におけるGORは30分間の運動中の平均は 191.1 mg/min/m^2 と通常酸素条件値よりも大きく、これは通常酸素条件の27.5%に相当した. このことは今回の常圧低酸素設備でも、糖質利用が促進されることを示している. よって、常圧低酸素環境は糖質代謝を促進する必要がある対象者にとって有益なトレーニング環境となる可能性がある.

LORは、運動期全てのstageにおいて低酸素より通常酸素が高値を示し、安静時、回復期stage 4, 5, 6においても同様であった. 高地環境への滞在やトレーニングによって、低酸素による酸素飽和度の低下により交感神経系ホルモン分泌が促進し⁵⁾, $\beta 3AR$ を介して白色脂肪細胞から遊離脂肪酸の放出が生じ¹⁰⁾, 脂質代謝が亢進することが報告されている. これらの先行研究は低酸素環境下への暴露に登山時間を有することや登山後4日から数週間の滞在期間中に測定された結果であった. 本研究の低酸素環境下への暴露は、安静座位と運動時で僅か60分であった. また、通常酸素条件では、運動による脂質代謝の亢進を認めなかったことに比較して、低酸素条件では有意ではないが運動中、一貫して脂質代謝は増加傾向にあった. したがって、より長時間の低酸素環境への暴露や長時間の運動において、低酸素条件下の脂質代謝を調査する必要がある.

低酸素条件における運動時GORは通常酸素条件よりも平均値の差で 191.1 mg/min/m^2 大きく、逆に運動時LORは、通常酸素条件よりも平均値の差で 37.5 mg/min/m^2 小さかった. 糖質1gによって産生されるエネルギー量は約4 Kcal, 脂質1gでは約9 Kcalである. この値を代入すると低酸素条件における運動時エネルギー代謝は、約13%大きかった. したがって、常圧低酸素条件での運動はエネルギー代謝を亢進させる上でも有益なものと考えられた.

引用文献

- 1) Baker PT: The adaptive fitness of high – altitude population. In: The Biodogy of High Altitude Peoples. Cambridge University Press, Cambridge, 1978, pp317-350.
- 2) Leef A: 長野敬 訳, 現代の医学生と死『老化』. Science, 1981, 別冊38: 31-40.
- 3) 浅野勝己: 高所「低酸素」環境と体力増進. 体力科学, 1990, 39: 15-16.
- 4) Terrados N, Melichna J, Sylven C, et al.: Effect of training at simulated altitude on performance and muscle metabolic capacity in competitive road cyclists. Eur J Appl Physiol, 1988, 57: 203-209.
- 5) 高櫻英輔, 長崎成良, 田辺隆一・他: 高所環境における肥満治療 (第3報) —高所と運動による影響—. 登山医学,

- 1999, 19: 129-136.
- 6) 藤原孝之, 小林嘉一:「高酸素濃度空間を備えた建物」, 特開平 11-137617. 1995-5-25
- 7) 大倉三洋, 吉田良一, 山本 巖・他:低酸素環境の運動療法への応用に関する研究—常圧・低酸素室の試作—. 日保学誌, 2006, 8(4): 227-233.
- 8) Bursztein S, Elwyn DH, Aslanazy J, et al.: Theoretical framework of indirect calorimetry and Energy. In: Energy metabolism, indirect calorimetry and nutrition. Williams & Wilkins, Baltimore, 1989, pp27-83.
- 9) 片山訓博, 大倉三洋, 山崎裕司・他:常圧低酸素および高酸素環境への急性暴露による運動時の呼吸循環応答の変化—理学療法における効果的運動環境を模索して—. 理学療法科学, 2011, 26(3): 365-369.
- 10) 長崎成良, 高櫻英輔, 金山昌子・他:高所環境における肥満の研究(第4報)—マウスにおけるメタボリックシンドローム関連因子とUCP-1 遺伝子発現への影響—. 登山医学, 2005, 25: 109-114.