

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

曹 銀行 内丸 仁

キーワード：常圧低酸素, 糖酸化, 運動

Energy Expenditure and Glucose Oxidation Rate during Incremental Graded Exercise
under Moderate Normobaric Hypoxia

Yinhang Cao and Jin Uchimaru

Abstract

【Purpose】The purpose of this study was to evaluate that the energy expenditure and glucose metabolisms responses to maximal incremental exercise in moderate normobaric hypoxia. **【Methods】** Seven healthy subjects (Age; 22 ± 2 yrs, Height; 174 ± 2 cm, Body weight; 71.1 ± 5.0 kg) participated in this study. All subjects completed two maximal incremental exercise test under the both normoxic (N trial) and normobaric hypoxic conditions (H trial). We measured heart rate (HR), ventilation ($\dot{V}E$), oxygen uptake ($\dot{V}O_2$), carbon dioxide production ($\dot{V}CO_2$) and respiratory exchange (RER) during exercise test. Also, energy expenditure rate (EER) and glucose oxidation rate (GOR) were calculated by the formula of Burstein et al (1989). **【Results】** The HR and $\dot{V}E$ during exercise of H trial were significantly higher than that of N trial ($p < 0.05$). But there is no significantly difference in EER between both conditions. On the other hand, GOR and CHO oxidation rate of H trial (GOR: 2.24 ± 0.35 mg/min/m², CHO oxidation rate: 0.35 ± 0.05 mg/kcal/min/m² @60% $\dot{V}O_2$ max) were higher than that of N trial (GOR: 1.80 ± 0.19 mg/min/m², CHO oxidation rate: 0.29 ± 0.03 mg/kcal/min/m² @60% $\dot{V}O_2$ max) from moderate to high work load ($p < 0.05$). **【Conclusion】** These results suggest that moderate to high intensity exercise with hypoxia would be promoted glucose oxidation rate and CHO oxidation rate.

Key words: normobaric hypoxia, glucose oxidation, exercise

I. 緒言

近年、競技力を向上させる目的で行われている高地トレーニングは、大気酸素分圧の低下に伴う肺胞内の酸素分圧や血液中の酸素飽和度の低下、組織での酸素不足をもたらす低酸素刺激に着目して、運動時の呼吸循環機能や筋機能及び競技パフォーマンスの改善を目指し取り組む方法である。また、奥島ら(2014)は簡易型の低酸素気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トレーニングや登山前の順応のために利用されている。

高桜ら(1999)は低酸素環境下において基礎代謝が増加することを報告している。また、片山ら(2012)は、平地よりも高地での運動はエネルギー消費量の増大をもたらすことも報告している。一方、Barry et al.(2000)は健常者を対象に、4,300mの高地において102Wの負荷強度で45分間運動させたところ、エネルギー消費は平地と有意な差が認められなかったことを示している。よって、低酸素環境下において運動時のエネルギー消費に関する先行研究は数少なく、明確な見解が得られていない。

加えて、高桜ら(2008)、大倉ら(2006)及びChen et al.(2013)の報告では、高地、つまりは低酸素環境下での滞在や運動が幅広い年齢層の対象者に対して、肥満予防や健康増進等に貢献する可能性のあることが指摘されている。興味深いことに、Jonathan et al.(1982)及びOscar et al.(2007)は、標高1,000~3,000m程度のチベット、ヒマラヤ、南米アンデス及びコーカサスなどの高地民族には長寿者が多いこと、心疾患や高血圧の発生率が低いこと、また、平地住民と比べて、高地住民は血糖値及び糖尿病リスクが低いことを報告している。これらの要因として浅野(2012)は、高地での日常の運動時において生理学的負担度が平地と比べて比較的

大きく、特に、呼吸循環系への刺激が高まることを挙げている。

他にも、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、血圧の低下などをもたらすことを報告しているのに加えて、近年では糖代謝に及ぼす影響についても注目が集まっていると考えている。例えば、Kelly et al.(2010)は健常者を対象に、4,300mへ2時間滞在させたところ、糖負荷試験の結果が常酸素環境と比べてより改善したこと、また、Roberts. et al.(1996)は、4,300mの高地において、低負荷強度(80W)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それぞれ報告している。したがって、高度(4,000m以上)の低酸素刺激は糖代謝を促進するものと推測できる。また、Dan et al.(1986)及び片山ら(2012)により、健常者を対象に中等度の低酸素環境下においても、中等強度負荷で30~45分程度運動させることで糖酸化率や糖取り込み能を改善・促進することが示されている。

一方、Takuma et al.(2014)は健常者を対象に、中等度の低酸素環境(15.0%O₂)へ7時間を滞在させたところ、滞在中の血糖値に変化がなかったことを報告している。

以上のことから、高度の低酸素環境下での滞在や運動は、糖代謝を促進する可能性があるものと考えられる。しかしながら、先行研究より中等度の低酸素環境を利用し、一般人を対象とした運動に伴うエネルギー代謝、特に糖質利用に関しては不明な点が多い。加えて、仮に中等度高地相当の低酸素環境下での運動による効果が得られると仮定しても、糖代謝に及ぼす低酸素環境下での効果的な運動強度なども明らかとなっていない。

そこで、本研究では、中等度高地相当の常圧低酸素環境下での漸増負荷運動時における呼吸循環代謝応答から、エネルギー消費

及び糖酸化率について、常酸素環境下での運動と比較検討することを目的とした。また、本研究の結果から、常圧低酸素環境を利用した安全かつ効果的な至適運動強度について、さらには、低酸素環境が、健康維持・増進や疾病予防のための有益な運動環境として活用する可能性についても考察することとした。

II. 研究方法

1. 被験者

被験者は、運動習慣のない非喫煙者の男子大学生7名であった。被験者の平均年齢、平均身長、平均体重及び常酸素環境下での体重あたり最高酸素摂取量を表1に示す。なお、すべての被験者には、本研究の目的、方法などを十分に説明した後、被験者として本実験へ参加するための同意書を得た。

表1. 被験者の身体特性 (n=7)

年齢	身長	体重	$\dot{V}O_{2peak}/BW @ SL$
歳	cm	kg	ml/kg/min
22±2	174±2	71.1±5.0	50.7±11.0

$\dot{V}O_{2peak}/BW @ SL$: 常酸素環境下での体重あたり最高酸素摂取量

2. 実験デザイン

被験者は、常酸素環境条件(以下「N 試行」と略す)及び常圧低酸素環境条件(以下「H 試行」と略す)の両試行下で、自転車エルゴメータ(Ergomedic 828E, Monark 社製)を用いて多段階漸増運動を実施した。室温及び相対湿度はそれぞれ約24℃及び約50%に設定した。両試行の間には1週間のwash-out期間を挟んでランダムに実施した。なお、両試行は同じ時間帯で実施した。被験者には、翌日の実験への影響を避けるため、実験前日の激しい運動及び飲酒等を控えるように指示した。

1) 環境条件

低酸素環境は、常圧低酸素室を用いて、酸素濃度14.5%(3,000m相当)に設定した。本実験で使用した低酸素室の仕組みは、高分子膜を内蔵した常圧低酸素発生制御装置(YHS-515S, YKS 社製)に外気をコンプレッサーで加圧・送込みし、高分子膜を通して高酸素空気と低酸素空気に分離して低酸素空気を作り、その低酸素空気を低酸素室に流し、試験中の酸素濃度を一定になるようにコントロールした。なお、運動時に室内の二酸化炭素濃度の上昇を抑えるために、二酸化炭素スクラバー2型(YKS 社製)を使用した。

また、常酸素環境は通常大気環境とした。

2) 多段階漸増運動負荷試験

N及びHの両試行下において、被験者は、椅子の奥まで深く腰掛けるように指示し、入室後5分の座位安静を保たせた。その後、自転車エルゴメータへ移動し、多段階漸増運動を行わせた。

多段階漸増運動は、ペダル回転数は60回/分とし、運動開始から2分間にわたって1.00Kpの負荷でペダリングを行わせ、以後1分毎に0.50Kpずつ増加させ2.50Kpまで負荷を上げた。2.50Kp以降は1分毎に0.25Kpずつ負荷を増加させ、対象者のペダリング回転数が毎分55回転以下になった時点を疲労困憊状態として、運動を中止した。運動中に、各被験者の呼気ガスパラメータ及び心拍数(以下「HR」と略す)を連続的に測定した。

3. 測定項目及び方法

1) 呼気ガスパラメータと心拍数

運動中の呼吸循環系パラメータの測定は、Cosmed社製K4b2を用いた。測定はBreath by breath法により行い、換気量(以下「 $\dot{V}E$ 」と略す)、酸素摂取量(以下「 $\dot{V}O_2$ 」

と略す)、二酸化炭素排出量(以下「 $\dot{V}CO_2$ 」と略す)及び呼吸交換比(以下「RER」と略す)を30秒間毎に記録した。心拍数はスポーツ心拍計(S810i、POLAR社製)を用いて1分毎に測定し記録した。

最高酸素摂取量(以下「 $\dot{V}O_{2peak}$ 」と略す)の判定基準は、1) $\dot{V}O_2$ のプラトー現象の発現、2) 年齢から推定される最高心拍数($HR_{max}=220-\text{年齢}$)にほぼ達していること($\pm 10\text{beats/min}$)、3) 呼吸交換比(RER)が1.0を超えていること、4) 血中乳酸が10mmol/l以上に達すること、5) RPE(主観的運動強度)が19あるいは20の5つの条件のうち2つ以上を満たすものを $\dot{V}O_{2peak}$ とするのが一般的であるが(山地啓司、2001,p.13-18)、本実験においては自転車エルゴメータを用いたため、被験者のペダリング回転数が毎分55回転以下になった時点を $\dot{V}O_{2peak}$ とした。最高心拍数(以下「 HR_{peak} 」と略す)及び最高換気量(以下「 $\dot{V}E_{peak}$ 」と略す)は $\dot{V}O_{2peak}$ の出現した時点とし、疲労困憊に達した時間を運動継続時間とした。また、疲労困憊時の負荷を仕事量とした。

2) エネルギー消費率、糖酸化率及び糖質利用率の算出

エネルギー消費率(Energy Expenditure

Rate: EER)及び糖酸化率(Glucose Oxidation Rate: GOR)はBursztein. et al.(1989)の計算式より求めた。NU(尿中窒素排出量/分)は0.008g/分とし、EER及びGORを体表面積で補正した。

$$EER=3.581 \times \dot{V}O_2(L)+1.448 \times \dot{V}CO_2(L) -1.773 \times NU$$

$$GOR=4.571 \times \dot{V}CO_2(L)-3.231 \times \dot{V}O_2(L) -2.826 \times NU$$

糖質利用率はBarry. et al.(2000)の計算式より求めた。

$$\text{糖質利用率}=\text{GOR}/\text{EER}$$

4. 統計分析

各変数の測定結果は平均値 \pm 標準偏差で示した。N試行とH試行の間に有意差の検定にはpaired t-test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、SPSS 19.0 for windowsを用いた。

V. 研究結果

本研究では、N及びHの両試行において全員が遂行した1.00kpから3.75kpまでの区間を主な分析対象とした。

1. 運動テスト

1) 最大運動時の各パラメータ

表2. 常酸素及び常圧低酸素環境下での最大運動時における各指標の比較

	N 試行	H 試行
$\dot{V}E_{peak}$ (l/min)	126.7 \pm 21.8	125.5 \pm 16.5
$\dot{V}O_{2peak}$ (l/min)	3.57 \pm 0.54	2.99 \pm 0.45**
$\dot{V}O_{2peak}/BW$ (ml/kg/min)	50.5 \pm 11.0	42.6 \pm 9.3*
$\dot{V}CO_{2peak}$ (l/min)	3.88 \pm 0.47	3.53 \pm 0.27*
HR_{peak} (beats/min)	185 \pm 8	182 \pm 8
RER_{peak}	1.11 \pm 0.06	1.20 \pm 0.09
仕事量(watts)	279 \pm 27	244 \pm 17**
運動継続時間(min)	14 \pm 2	12 \pm 1**

$\dot{V}E_{peak}$: 最高換気量, $\dot{V}O_{2peak}$: 最高酸素摂取量, $\dot{V}O_{2peak}/BW$: 体重あたり最高酸素摂取量, $\dot{V}CO_{2peak}$: 最高二酸化炭素排出量,

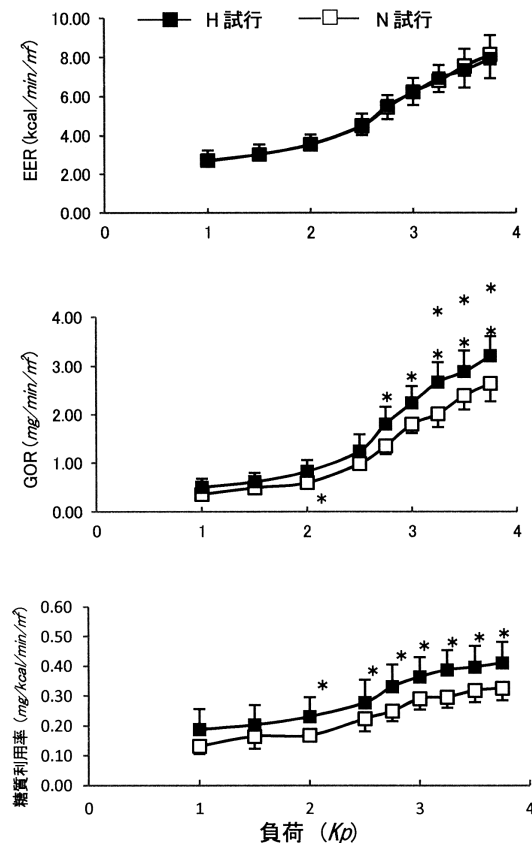
HR_{peak} : 最高心拍数, RER_{peak} : 最高呼吸交換比, N 試行: 常酸素環境条件, H 試行: 常圧低酸素環境条件, *: p<0.05, **: p<0.01 vs N 試行

常酸素及び常圧低酸素環境下での最大運動時の各指標の値を表2に示した。N試行に比べてH試行下では、体重当たりの $\dot{V}O_{2peak}$ 、 $\dot{V}CO_{2peak}$ 、仕事量及び運動継続時間は有意に低下した($p<0.01\sim0.05$)。一方、 $\dot{V}E_{peak}$ 、 HR_{peak} 及び RER_{peak} はN試行とH試行の間に有意な差は認められなかった。

2. エネルギー代謝

1) 絶対的強度でのEER、GOR及び糖質利用率

図1が示したように、H試行及びN試行下で、絶対的強度でのEERに差は認められなかった。それに対し、H試行では、中強度から運動時におけるGOR及び糖質利用率が有意に高値となった($p<0.01\sim0.05$)。

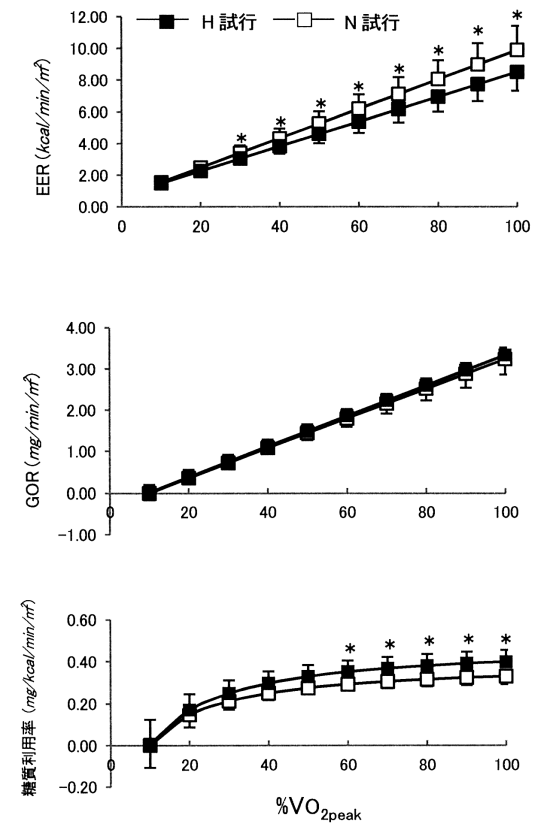


EER: エネルギー消費率, GOR: 糖酸化率, N 試行: 常酸素環境条件, H 試行: 常圧低酸素環境条件, *: $p<0.05$ * *: $p<0.01$ vs N 試行

図1. 絶対的強度でのエネルギー代謝

2) 相対的強度でのEER、GOR及び糖質利用率

図2に示すように、H試行ではN試行に比べ、相対的強度でのEERが低下傾向を示し、30% $\dot{V}O_{2peak}$ 強度からは有意に低値となった($p<0.05$)。それに対し、相対的強度でのGORは両試行の間に統計的に有意な差は認められなかった。また、H試行では、糖質利用率は増加傾向を示し、60% $\dot{V}O_{2peak}$ 強度から有意に高値となった($p<0.05$)。



EER: エネルギー消費率, GOR: 糖酸化率, N 試行: 常酸素環境条件, H 試行: 常圧低酸素環境条件, *: $p<0.05$ vs N 試行

図2. 相対的強度でのエネルギー代謝

VI. 考察

本研究における主要な知見は、常酸素環境に比べ、常圧低酸素環境下では、絶対的強度でのエネルギー消費率は充進されなかったものの、中等強度から高強度運動における糖酸化率及び糖質利用率はより促進されることが示唆されたことである。H試行で

は、体重当りの $\dot{V}O_{2peak}$ 、仕事量及び運動継続時間は N 試行に比べて有意に低下した。これらの結果は押田ら(2012)の先行研究と一致しており、本研究においても低酸素環境では運動パフォーマンスを低下させることを確認した。

本研究では、絶対的強度での EER が両試行の間に有意な差がなかった。しかし、片山ら(2012)は、14.5% O_2 の低酸素環境下で 70%AT 強度で 30 分間の運動中におけるエネルギー消費が亢進されることを報告している。このことは、低酸素環境下での運動時の生体への負荷が高いこと、さらには、運動時のエネルギー基質利用が糖質により強く依存する状態となることから、エネルギー消費の亢進がなされていると推測する。今後、低酸素環境下における運動の様式や種類に着目してエネルギー消費に及ぼす影響を検討する必要もあると考える。

本実験では、14.5% O_2 (3,000m 相当)の常圧低酸素環境下において、絶対的強度での GOR 及び糖質利用率は常酸素環境に比べて中等強度から高強度運動時に有意に高値となった。Roberts. et al.(1996)は、4,300m の高地において、低負荷強度(80W)で 45 分間運動させたところ、骨格筋における糖の取り込みが促進したことを報告している。これは、Kelly et al.(2010)により、低酸素が骨格筋への糖輸送を促進するためであることが動物実験や人体実験から明らかにされている。また、Brooks. et al.(1991)は健常者を対象に、4,300m の高地において軽負荷で 45 分間の運動中における血液中のグルコース出現率及びグルコース消失率が促進することを報告している。これらの先行研究より、低酸素環境は、骨格筋におけるエネルギー源としての糖質利用を促進させるものと推測でき、本研究において見られる低酸素環境下での運動中に生じる GOR 及び糖質利用率の増加を説明するものであると考

える。

さらには、運動強度を相対的強度で比べた場合にも、N 試行に比べて H 試行では、相対的強度下で 30% $\dot{V}O_{2peak}$ から $\dot{V}O_2$ 及び負荷が有意に低下したものの、60% $\dot{V}O_{2peak}$ から糖質利用率が有意に増加しており、中等度の低酸素環境下では常酸素環境より、比較的軽物理的強度でも多くのグルコースが利用されたと考える。Dan et al.(1986)は健常者を対象に、高酸素及び常圧低酸素環境(15% O_2)下でそれぞれの LT 強度で 40 分間の運動を実施したところ、低酸素環境下での運動中におけるグルコース消失率及びグルコース出現率がより促進されたことを報告している。

低酸素環境下で、無酸素性作業閾値以上の運動実験では、グルコース利用は増加し、乳酸産生も増加したことが示された(八田秀雄、2009)。また、松村ら(1998)は嫌氣的解糖系が促進されることも報告していることから、低酸素環境下において、乳酸性作業閾値以上の運動強度を負荷すると、糖取り込みがより促進されるといえる。本研究では、血中乳酸濃度は測定していないため、血中乳酸濃度の変化を確認できなかった。しかし、本研究では、N 及び H の両試行下において、漸増負荷運動時における換気性作業閾値(VT)出現時の RER が H 試行では、N 試行よりも高値で推移しており、特に 50% $\dot{V}O_{2peak}$ 強度以降、最大運動時まで高結果となった。

このことは結果として、糖質利用率が H 試行下で N 試行より有意に高くなる時点と一致しており、低酸素環境下での運動、特に VT 強度以上の運動におけるエネルギー消費が糖質により強く依存することを裏付けており、先行研究と同様に本研究においても、中等度の低酸素環境下で、糖質利用がより高まる運動強度は中等強度から高強度までであることが示された。

以上の結果から、低酸素環境下での中等強度から高強度運動時における糖酸化率及び糖質利用率が亢進されたことが示された。Schobersberger et al.(2003)は、メタボリックシンドロームの人を対象に、中等度高地での滞在と運動を実施した結果、糖負荷試験による血糖値の改善が認められることを報告している。これらの成績から、低酸素環境下での運動が健康維持・増進、特に成人病予防、生活習慣病等の改善に有効な手段となり得る可能性を示している。

本研究の結果から、中等度の常圧低酸素環境下での漸増負荷運動時における中等強度から高強度運動は糖代謝を促進すると考えられるが、中強度における長時間一定負荷運動等における糖代謝及び脂質代謝に及ぼす影響は明確な結論が出るに至っていない。また、呼吸循環応答だけでなく、血糖値や血中インスリン値などに変化が起こるか、さらに、どのような時間経過で変化するかも明らかでなく、運動様式の違い及びトレーニング効果などについては、非常に興味深い点であり、今後の課題としたい。

Ⅶ. まとめ

中等度の常圧低酸素環境下での運動は、中等強度から高強度運動時における糖酸化率及び糖質利用率が促進されることが示唆された。結果として、中等度の常圧低酸素環境は、運動時における糖代謝を促進させるため、競技力の向上だけではなく、健康維持、生活習慣病や疾病予防の必要ある対象者にとって有益な運動環境となる可能性が十分にあると考えられる。

Ⅷ. 引用文献

浅野勝己 (2012)低圧・低酸素環境下の運動生理. *Japanese Journal of Mountain Medicine*,32:24-29.
Barry Braun, Jacinda, T.M., and Stephen,

R.M.(2000) Women at altitude: carbohydrate utilization during exercise at 4,300m. *J Appl Physiol*,88:246-255.
Brooks, G.A., Butterfield, G.E., and Wolre, R.R.(1991) Increased dependence on blood glucose after acclimatization to 4,300m. *J ApplPhysiol*, 70(2):919-927.
Dan, M.C., David, H.W., and Mladen, V.(1986) Glucose turnover in response to exercise during high- and low-FiO₂ breathing in man. *Am J Physiol*,251:209-214.
Erik, A., Richter, M.H. (2013) Exercise, GLUT4, and Skeletal Muscle Glucose Uptake. *American Physiological Society* 93:993-1017
八田秀雄. (2009) 運動時における酸素と乳酸の代謝,からだに酸素の事典. 朝倉書店, 東京,pp272-275.
Jonathan, A., John, W.W., and Jacqueline, O.(1982) Relationship of site-specific cancer mortality rates to altitude. *Carcinogenesis*,5:461-465.
John ,L.A., Julie, O.C., and Walter, J.P.(1995) Hypoxia stimulates glucose transport in insulin-resistant human skeletal muscle. *DIABETES*, 44:695-698.
Karen, R.K., David, L.W., and Ciaran, E.F. (2010) Acute altitude-induced hypoxia suppresses plasma glucose and leptin in healthy humans. *Metabolism Clinical and Experimental*,59:200-205.
Kerstin, M.O., Hartmut, G., and Sebastian, R.(2004) Hypoxia causes glucose intolerance in humans. *Am J RespirCrit Care Med*, 169:1231-1237.
Kelly, KR., Williamason, DL., Fealy, CE. (2010) Acute altitude-induced hypoxia suppresses plasma glucose and leptin in healthy humans. *Metabolism*, 59:200-205.

- Kirwan, J.P., Hickner, R.C., and Yarasheski, K.E. (1992) Eccentric exercise induces transient insulin resistance in healthy individuals. *J. Appl. Physiol.*, 72(6):2197-2201.
- 片山訓博・大倉三洋・酒井寿美 (2012) 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. *理学療法科学*, 27:357-361.
- 松村嘉則・原田健・塚中敦子 (1998) 低酸素環境の運動時エネルギー代謝への影響(続報)—血漿乳酸と血液アンモニア濃度の変化—. *中京大学体育学論議*, 40(1):99-102.
- 奥島大・山本正嘉 (2014) 1週間の低酸素環境下での事前順化トレーニングが低酸素環境における運動能力及び生理応答に及ぼす影響. *体力科学*, 63(1):213-222.
- 押田芳治・小池晃彦・片山敬章. (2012) 低酸素環境での有酸素性運動による血糖変動に関する研究. *デサントスポーツ*, 35:3-9.
- 大倉三洋・吉田良一・山本徹. (2006) 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—. *The Journal of Japan Academy of Health Sciences*, 8:227-233.
- Oscar, C., Orison, O.W., and Elizabeth, G. (2007) Residents at high altitude show a lower glucose profile than sea-level residents throughout 12-hour blood continuous monitoring. *High Altitude Medicine & Biology*, 4:307-311.
- Richard, M., Neil, M., and Gary, B. (2011) Acute hypoxia and exercise improve insulin sensitivity (S12*) in individuals with type 2 diabetes. *DIABE-TES/METABOLISM RESEARCH AND RE-VIEWS*, 27:94-101.
- Rowell, L.B., Masoro, G.M., and Spencer, M.J. (1965) Splanchnic metabolism in exercising man. *J Appl Physiol.*, 20:1032.
- Roberts, A.C., Reeves, J.T., and Butterfield, G.E. (1996) Altitude and β -blockade augment glucose utilization during submaximal exercise. *J Appl Physiol.*, 80(2):605-616.
- Schobersberger W., Schmid P., and Lechleitner M. (2003) Austrian Moderate Altitude Study 2000 (AMAS 2000). The effects of moderate altitude (1,700m) on cardiovascular and metabolic variables in patients with metabolic syndrome. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 88: 506-514.
- Shu-Man chen, Hsueh-Yi Lin, and Chia-Hua Kuo. (2013) Altitude training improves glycemic control. *Chinese Journal of Physiology*. 56(4):193-198
- Susanne, W., Sven, H., and Stefan, E. (2009) Influences of normobaric hypoxia training on physical fitness and metabolic risk markers in overweight to obese subjects. *Obesity*, 18:116-120.
- 山地啓司. (2001) 環境条件とVO₂max, 最大酸素摂取量の科学. 改訂第2版, 林書院, 東京, pp13-18.
- 高桜英輔・長崎成良・金山昌子 (2008) 「山はメタボに有効か」高所環境を利用した肥満治療の研究—エネルギー消費量, インスリン感受性, 脂質代謝への影響—. *登山医学*, 28:1-6.
- 高桜英輔・長崎成良・田辺隆一 (1999) 高所にける肥満治療の研究(第3報)—高所と運動による影響—. 19:129-136.
- Takuma Morishima, Kazushige Goto. (2014) Successive exposure to moderate hypoxia does not affect glucose metabolism and substrate oxidation in young healthy men. *Springerplus*, 3:370-378.
- Wasserman, D.H., H.L.A. Lickley, and M.H. Wolfe. (1985) Effect of hematocrit reduction on hormonal and metabolic re-

sponses to exercise. *J Appl Physiol.*,
56:1257-1262.

Wen-Chih Lee, Jin-Jong Chen, and Hsin-Yi
Ho. (2003) Short-term altitude mountain
living improves glycemic control. *HIGH
ALTITUDE MEDICINE & BIOLOGY*,
4:81-91.

