

常圧低酸素走路利用のトレーニング効果

Effects of training on work capacity in hypoxic running room

平田 敏彦
後藤 清志
高下 直紀*
寒竹 謙一朗**

Abstract

This study was designed to evaluate the effect of training in a hypoxic running room constructed in an old mine on the systemic endurance capacity of athletes. The subjects were 5 long-distance runners aged 19-22 years who belonged to a track and field team of a university. Training was performed at a normal atmospheric pressure in an old mine converted to a hypoxic running room. The subjects trained for 3 hours daily at an oxygen concentration of 18.0% for 3 days and at 16.0% for 7 days. The training intensity was 80% VCP at the 18% oxygen concentration and 100% VCP at the 16% oxygen concentration. The heart rate on the maximum effort test was reduced after the hypoxic training compared with the level before the training. The SpO_2 on the maximum effort test remained higher until about 10 minutes after the beginning of exercise and decreased more slowly after the hypoxic training than before the training. The workload and $\dot{V}O_2\max$ significantly increased after the training compared with the values before the training ($p<0.05$). These results suggest that hypoxic training is effective for improving the systemic endurance capacity.

Key word : hypoxic running room, training, $\dot{V}O_2\max$, SpO_2

【研究目的】

近年、全身持久力を高めるための方法として、高所トレーニングが注目され、多くの人々が高地に出向き長期のトレーニングを実施している。その中でも、高地以外の環境つまり、人工的に設計された低酸素環境施設を利用し、常圧の平地において高所環境でのトレーニングと同様の効果を上げようとする試みがなされている。これは、主に、低圧室または低圧タンクと呼ばれる施設で行われてきた。

しかし、近年、常圧（平地）状態で酸素濃度を自由に定めることのできる低酸素装置の開発が進み、人工的な低酸素環境施設でのトレーニング実施が身近でできる様になった。

今回、我々は硫化鉄鉱石採掘坑道跡地（旧坑道）を利用し、常圧において、高分子膜酸素分離方式による酸素濃度13.5%（標高3500m相当）まで可能な低酸素環境のトレーニング走路を開発した。

本研究目的はこの低酸素走路を利用し、競技選手を対象に全身持久的トレーニングの効果を検討することである。

【研究方法】

1. 被検者

被検者群は大学陸上競技部に所属する年齢 20.6 ± 1.0 歳、身長 172.2 ± 3.8 cm、体重 61.2 ± 2.5 kg、の健康な長距離選手 5 名である（表 1）。

Table 1. Work capacity at sea level in subjects

Subj (n=5)	Age (Yr.)	Height (cm)	Weight (kg)	LBM(kg)		%Fat(%)	
				Before	After	Before	After
MUR	22.0	168.5	61.0	56.7	56.9	6.3	7.7
OKA	21.0	173.0	59.5	59.3	54.3	7.8	7.4
NIN	21.0	171.5	61.0	56.1	56.9	8.0	7.6
HIG	20.0	179.0	65.9	62.0	60.3	8.0	7.0
NAJ	19.0	169.0	58.8	55.4	53.4	7.5	8.3
Mean	20.6	172.2	61.2	57.9	56.6	8.2	7.6
S.D.	1.0	3.8	2.5	2.4	2.2	0.7	0.4

* 株式会社竹中工務店、** 岡山県柵原町役場

2. 常圧低酸素走路施設

トレーニングに用いた低酸素走路施設は、標高200mに位置する全長42.195m、平均走路幅2.8m、平均天井高3mの旧坑道を用いた。低酸素条件を保つために、常圧において低酸素環境を設定できる、高分子膜酸素分離方式による低酸素発生装置(タバイ社製)を走路に隣接して設置した。また、走路面はタータン(ゴムチップウレタン舗装)仕上げとした(図1)。



Fig1. The hypoxic running room in mine

3. トレーニングの方法

トレーニングは、最初に低酸素環境に慣れる目的で、常圧で酸素濃度18.0%に設定した条件で3日間、次に本格的なトレーニング実施を目的として、常圧で酸素濃度16.0%に設定した条件で7日間の計10日間とした。また、低酸素条件でのトレーニング時間は1日3時間であった。

各被験者は低酸素走路に入室後、走路を利用して約40分間のウォーミングアップを行い、その後各被験者に相当したトレーニング強度を指標に、トレッドミルまたは自転車エルゴメータを利用し、ランニングおよび自転車こぎの運動を行った。その後、ウォーミングアップ時と同様に低酸素走路を利用して40分間のクーリングダウンを実施した。

4. トレーニング強度

トレーニング強度は酸素濃度18%条件での最初の3日間は、各被験者の呼吸性代償点の80%に相当する運動強度で、酸素濃度16%条件での7日間は、各被験者の呼吸性代償点相当する運動強度であった。トレーニング時間は、両条件ともに60分間とした。低酸素走路室内温度は、常時、ほぼ18度に保たれた。

5. 最大運動テストおよび最大下運動テスト

各被験者にトレーニング効果を評価するために、トレーニングの開始前と終了後8日目に常圧、常酸素下において、自転車エルゴメータでの最大運動テストと最大下運動テストを実施した。最大運動テストはランブ負荷法を用いて、各被験者が疲労困憊するまで運動を負荷した。

運動中の心拍数(HR)、酸素摂取量($\dot{V}O_2$)、換気性閾値(VT)、呼吸性代償点(VCP)²⁴⁾、最大酸素摂取量($\dot{V}O_{2max}$)、酸素脈(O_2p)は、Sensor Medics社製MMC4400tcを用いて、動脈血酸素飽和度(SpO_2)は、パルスオキシメータ(OLV-2100、日本光電社製)を用いてそれぞれ測定した。また、最大下運動テストは10分間の運動を行った。運動強度は運動開始3分間が各被験者の40% $\dot{V}O_{2max}$ で、3分以後7分間は各被験者の60% $\dot{V}O_{2max}$ であった。運動中のHR、酸素摂取量 $\dot{V}O_2$ 、 SpO_2 は最大運動テストと同様の方法で測定した。最大運動および最大テストの実験室内温度は18度~21度であった。

6. 統計処理

各測定項目の値はすべて平均値±標準偏差で示した。トレーニング前後の各測定項目はトレーニング前後の平均値の有意差 t 検定を行った。

【研究結果】

1. 最大運動テスト

図2はトレーニング前後の最大運動テスト中のHRについて、被検者5名の平均値で示したものである。トレーニング前後のHRは運動強度の増加にともなってそれぞれ増加する傾向を示したが、トレーニング後はトレーニング前に比較し低い値での変動傾向を示した。

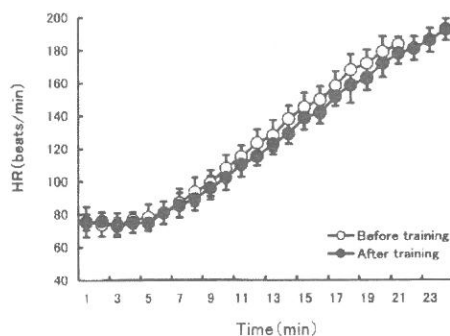


Fig 2. Changes in HR during maximal work at sea level before and after training

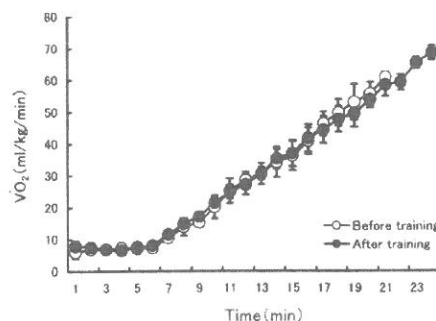


Fig 3. Changes in $\dot{V}O_2$ during maximal work at sea level before and after training

図4はトレーニング前後の最大運動テスト中のSpO₂について、被験者5名の平均値で示したものである。トレーニング前後の最大下運動テスト中のSpO₂は、運動強度の増加にともなってそれぞれ減少する傾向を示した。しかし、トレーニング後は運動開始後10分近くまで高い値が維持され、トレーニング前に比較して減少傾向がゆるやかであった。表2はトレーニング前後のWork load、 $\dot{V}O_{2max}$ 、HRmax、SpO₂それぞれについて示したものである。

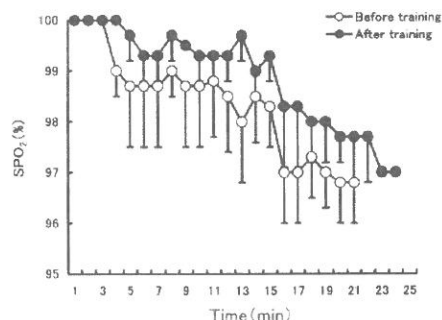


Fig 4. Changes in SpO₂ during maximal work at sea level before and after training

Table 2. Work capacity at sea level in subjects

Subj (n=5)	Work load(watts)		$\dot{V}O_{2max}$ (ml/kg/min)		HR _{max} (beats/min)		O ₂ P(ml/beats)	
	Before	After	Before	After	Before	After	Before	After
MUR	245	295	61.0	67.2	172	179	20	22
OKA	285	305	60.5	66.1	170	191	21	22
NIN	290	320	55.0	66.4	186	188	22	23
HIG	295	330	65.8	70.8	191	189	21	23
NAJ	240	275	50.6	64.0	189	195	16	17
Mean	271.0	306.0	58.6	66.9	181.6	188.4	20.0	21.4
S.D.	23.5	17.7	5.3	2.2	8.8	5.3	2.1	2.2

図5はレーニング前後のWork loadと $\dot{V}O_2\max$ について、被験者5名の平均値で比較したものである。トレーニング後の最高心拍数は、 $188.4 \pm 5.3 \text{ beats/min}$ を $\dot{V}O_2\max$ は $64.6 \pm 5.1 \text{ ml/kg/min}$ を O_2p は $21.4 \pm 2.2 \text{ ml/beat}$ を示した。トレーニング後の $\dot{V}O_2\max$ 、 $HR\max$ 、 O_2p は全被験者の平均値でみるとトレーニング前に比較して高い値を示し、Work loadと $\dot{V}O_2\max$ はトレーニング前に比較して有意($p < 0.05$)な差がみられた。

2. 最大下運動テスト

図6はトレーニング前後の最大下運動テスト中のHRについて、被検者5名の平均値で示したものである。トレーニング前後のHRは、運動強度の増加にともなって増加する傾向を示したが、トレーニング後は、トレーニング前と比較して低い変動傾向を示した。

同様に、図7はトレーニング前後の最大下運動テスト中の $\dot{V}O_2$ を被検者5名の平均値示したものである。トレーニング前後の $\dot{V}O_2$ は、運動強度の増加にともなって増加する傾向を示したが、トレーニング前後の $\dot{V}O_2$ は、ほぼ同様の値で変動した。

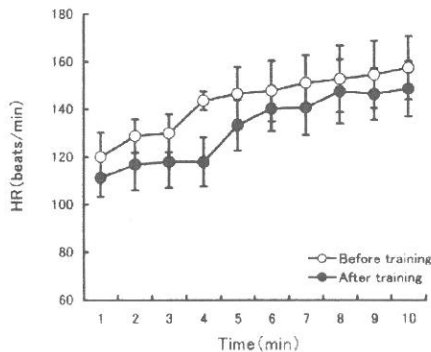


Fig 6. Changes in HR during submaximal work at sea level before and after training

図8はトレーニング前後の最大下運動テスト中の SpO_2 について、被験者5名の平均値で示したものである。トレーニング前後の最大下運動テスト中の SpO_2 は、運動強度の増加にともなって同様の減少傾向を示した。

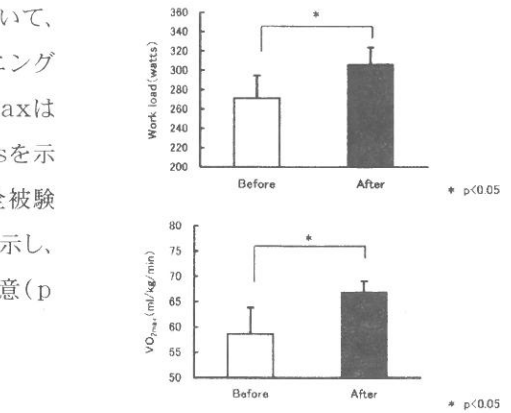


Fig 5. Changes in total work(upper) and $\dot{V}O_2\max$ (under) at sea level before and after training

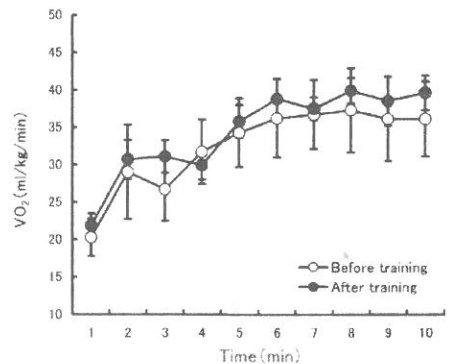


Fig 7. Changes in $\dot{V}O_2$ during submaximal work at sea level before and after training

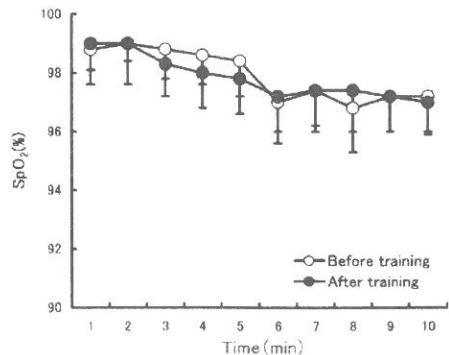


Fig 8. Changes in SpO_2 during submaximal work at sea level before and after training

【考察】

高地でのトレーニングは、直接呼吸循環機能に負担がかかりトレーニング中に呼吸困難が生じたり、高地になればなるほど重力の影響を受けていることから、平地での運動感覚との相違も生じ、運動動作に違和感をもつ者もある。さらに、現在、高地トレーニングの環境は、国外に整備されている場合が多く、国内に滞在する者においては、国外での高地トレーニング実施に経済的負担がかかることも大きな障害となっていて、身近での低酸素環境トレーニング施設の必要性が指摘されている。

そこで本研究は旧坑道利用の低酸素走路を建設し、その施設利用でのトレーニング効果を検討した。現在、日本人選手の高地トレーニングは、標高1800m～2200m(酸素濃度16.8～16.1%)を基本とするのが望¹³⁾ましいとされていることから、本研究ではトレーニングの酸素濃度を16%とした。また、陸上競技長距離選手の走記録とVCPと高い相関関係があるとの報告⁷⁾から、各個人のVCPをトレーニング強度の指標と決定した。

本研究でのトレーニング後の最大運動テスト中のHRと $\dot{V}O_2$ はトレーニング前に比較してほぼ同様の傾向を示した。しかし、SpO₂はトレーニング前後ともに運動開始後、低下傾向を示し、トレーニング後の傾向は、トレーニング前に比較して高い値を維持した。また、最大下運動テストでの $\dot{V}O_2$ はトレーニング前後ともに同様の変動傾向がみられたに対し、トレーニング後HRは、トレーニング前に比較して有意な差は得られなかったが、低い値の変動傾向を示した。

小林^{14,15)}は標高2300 m～2450mにおいて、実業団陸上競技長距離選手と高校クロスカントリー選手を対象に3泊4日の短期的高地トレーニングを実施し、トレーニング後に異なる3速度の3分間ペース走中の血液中の乳酸濃度が、トレーニング前に比較して明らかに低値を示したことを報告している。杉田²¹⁾は実業団中長距離選手を対象に、標高2300mでの3泊4日間の滞在と陸上トレーニングを行い、平地における各種の走行速度に対して、トレーニング後のHRと血中乳酸濃度はトレーニング前に比較して有意に低くなることを報告している。

さらに、Rusko²⁰⁾は競技者を対象に酸素濃度16%の低酸素室に滞在させ、トレーニングは、平地での常酸素環境で行った結果、エリスロポエチンおよび赤血球数が有意に増加したことを報告している。また、標高2000mに相当する常圧低酸素環境と低圧低酸素環境での運動中の生理的応答に有意な差が見られないことが明らかにされ、常圧低酸素環境でのトレーニング効果と高地で得られるトレーニング効果とを同様に考えても差し支えないことの報告¹⁷⁾もある。

以上のことから、本研究における低酸素走路での10日間のトレーニングにおいてもトレーニング後の結果として、血中乳酸耐性が増し、さらには赤血球増大や酸素の取り込みが高まり、運動強度が増加しても酸素飽和度が維持されたものと推測される。

本研究でのトレーニング後の全被験者の平均値 $\dot{V}O_{2max}$ HRmax O_{2p}, Work loadはトレーニング前に比較して増加傾向を示した。中でもトレーニング後の $\dot{V}O_{2max}$ は 66.9 ± 2.2 ml/kg/minを示し、トレーニング前に比較して14.2%の、Work loadは 306 ± 17.7 wattsを示し、トレーニング前に比較して12.9%のそれぞれ有意(p<0.05)な増加を示した。Daniel⁵⁾はトップクラスの陸上長距離選手6人を対象

に標高2300m、酸素濃度15.9%の高地で長期間のトレーニングを行い、トレーニング後の平地における $\dot{V}O_2\text{max}$ に9.1%の増加みられたことを報告している。

村岡ら¹⁷⁾は陸上競技中距離選手を対象に、低酸素室利用のトレーニングにおいて赤血球数と最大酸素摂取量の増大を報告している。

浅野ら²⁾は大学陸上競技男子中長距離選手を対象に標高4000m相当の高度において、70~80% $\dot{V}O_2\text{max}$ で30分間のトレッドミル走のトレーニングを週3回、10週間行い、 $\dot{V}O_2\text{max}$ や無酸素的作業閾値の改善から走記録の向上を報告している。

これまで、 $\dot{V}O_2\text{max}$ が比較的低い場合には全身持久力のトレーニング効果として $\dot{V}O_2\text{max}$ の向上がみられ走記録と相関関係が高く、 $\dot{V}O_2\text{max}$ が高い一流選手ではVCPが高くなり走記録との相関関係が高いことが報告⁷⁾されている。

また、高地でのトレーニングは大気中の酸素分圧の低下に伴って、呼吸循環器への負荷を与えてそれに順応することにより効果を生み出そうとすることにある。しかし、高地でのトレーニング後の競技は常圧、つまり、平地で行う場合が多く、選手の中には平地でのトレーニングにおいて、下肢の動作に違和感を訴える選手もいて、低酸素環境のトレーニングを常圧で行うことを好む傾向も見受けられる。

一方、常圧、常酸素下での全身持久力のトレーニングにおいて、 $\dot{V}O_2\text{max}$ の改善が期待できるのは最低5~10週間が必要との報告²⁵⁾もなされている。しかし、本研究では常圧、16%の低酸素環境での10日間のトレーニングにおいてWork loadや $\dot{V}O_2\text{max}$ の増加がみられた。これは低酸素環境でのトレーニング中に血液中ヘモグロビンの増加や組織への O_2 運搬能が高まり、特に最大下運動中の生理的応答が改善され、酸素利用率や走行効率が高まった結果から生じたものと思われる。

要約

年齢19~22歳の男子大学長距離戦選手を被験者に酸素濃度16.0%の常圧低酸素走路を利用し全身持久力向上のトレーニングを10日間行いトレーニング効果を検討した。

結果の要約は以下の通りである。

- 1) トレーニング前後の最大運動テスト中のHR(被検者5名の平均値)は運動強度の増加にともなってそれぞれ増加する傾向を示したが、トレーニング後はトレーニング前に比較し、低い値の変動傾向を示した。
- 2) トレーニング前後の最大運動テスト中の $\dot{V}O_2$ (被検者5名の平均値)は運動強度の増加にともなってそれぞれ増加する傾向を示し、トレーニング前後の $\dot{V}O_2$ はほぼ同様の値で変動した。
- 3) トレーニング前後の最大下運動テスト中の SpO_2 (被検者5名の平均値)は運動強度の増加にともなってそれぞれ減少する傾向を示したが、トレーニング後は運動開始後10分近くまで高い値が維持され減少傾向がゆるやかであった。
- 4) トレーニング後のWork load、 $\dot{V}O_2\text{max}$ 、HRmax、 O_2p (被検者5名の平均値)はトレーニング前に比較して高い値を示し、Work loadと $\dot{V}O_2\text{max}$ はトレーニング前に比較して有意($p <$

0.05) に高い値を示した。

5) トレーニング後の最大下運動テスト中のHR (被検者5名の平均値) は運動強度の増加にともなって増加する傾向を示したが、トレーニング後はトレーニング前と比較して低い変動傾向を示した。

6) トレーニング前後の最大下運動テスト中の $\dot{V}O_2$ (被検者5名の平均値) は運動強度の増加にともなってそれぞれ増加する傾向を示し、トレーニング後前の $\dot{V}O_2$ はほぼ同様の値で変動した。

これらの結果から常圧低酸素走路を利用した酸素濃度16.0%の10日間の全身持久力向上のトレーニングは、低酸素環境で血中乳酸耐性が増し、さらには赤血球増大や酸素の取り込みが高まり、結果として運動強度が増加しても酸素飽和度が維持されるトレーニング効果の生理的応答を生じたものと推測される。

文献

1. 青木純一郎編: 高地トレーニングガイドラインとそのスポーツ的背景一, (財)日本体育協会, 2002.
2. 浅野勝巳: 高所トレーニングの応用と効果. J. J. S p o r t s S c i, 4(11), 834-836, 1985.
3. 浅野勝巳, 岡本三郎, 正岡俊文, 水野康, 熊崎泰仁: ラグビー競技者の高所順応トレーニングの作業能に及ぼす影響. 筑波大学体育科学紀要, 13, 169-178, 1990.
4. Benjamin D. levine and james stray-gundersen: "Living high-training low": effect of moderate-altitude acclimatization with low-altitude training on performance. J. Appl. Physiol. 83(1) 102-112, 1997.
5. Daniels, J and N. Oldridge : The effects of alternate exposure to altitude and sea level on world class middle-distance-runners. Med. Sci. Sports. 2(3)107-112, 1970.
6. Daniels, J. : Altitude and athletic training and performance. Amer. J. Sports Med. 17 : 371-373, 1979.
7. 平田敏彦: ジュニア男子陸上競技選手の身体組成・全身持久力と走記録. 岡山医学会雑誌, 112, 149-158, 2000.
8. 平田敏彦編: 低酸素環境が身体に及ぼす影響とトレーニング効果に関する研究報告書. 1-63, 2002.
9. 平田敏彦, 脇本敏裕, 三秋欣彦, 長尾光城, 長尾憲樹: 常圧低酸素環境下における持続的トレーニング効果. 体力科学, 51(6), 692, 2002
10. 加賀谷潤彦: 高所と運動. 身体運動の生理学(猪飼道夫編著), 401-409, 杏林書院, 東京, 1973.
12. 片山敬章, 佐藤靖丈, 諸留克史, 島典広, 石田浩司, 宮村実晴: 低酸素環境下における持続的トレーニング及びディトレーニングが低酸素に対する呼吸循環応答に及ぼす影響. 体力科学

- 科学48(6),894,1999.
13. 小林寛道：日本陸上競技連盟の高所トレーニングへの取り組みの現在・過去・未来：競技力向上の観点から。臨床スポーツ、16,517-523、1999.
 14. 小林寛道：高地トレーニングと低酸素トレーニングの発展。体育の科学、51,(4),260-265、2001.
 15. 小林寛道：高地から低酸素環境へー高地トレーニングの活用法を考える。体力科学、51、29、2002.
 16. 宮村実晴編：高所一運動生理学的基礎と応用一。ナッブ、東京、2000.
 17. 村岡功、青木純一郎、前嶋孝、川初清典、他：低酸素室の利用に関する・実験的研究。平成11年ど日本オリンピック委員会スポー医・科学研究報告。No. IV JOC高地トレーニング医・科学サポーター第9報一。73-87,2000.
 18. 棚屋光男、小林寛道：東京大学における低酸素環境走路(実験用テント)の利用。体育の科学、51(4), 299-301、2001.
 19. 荻田太、田畑泉：異なる低酸素環境下でのトレーニングが最大酸素摂取量と最大酸素借に及ぼす影響。体力科学49(6),894,2000.
 20. Rusko H. R : New aspects of altitude training. Am J sports Med, 24, 48-52,1996.
 21. 杉田正明：立山方式・短期的高所トレーニングの効果について～陸上競技・中長距離選手を対象として～。第3回高所トレーニング国際シンポジウム'99立山講演・発表論文集、23, 2000.
 22. Squires,R.W and Buskirk, E. R : Aerobic capacity during acute exposure to simulated altitude ,914 to 2286 meters. Med, Sci. Sports Exercise, 14,(1) , 36-40, 1982.
 23. Terrados, N, Melichna, J、Sylvén, C. Jansson, E and Kaijser, L : Effects of training at simulated altitude on performance and muscle metabolic capacity in competitive road cyclists. Eur. J. Physiol, 57 , 203-209, 1988.
 24. Wasserman K. Whipp B. J. Koyal S. N. and Beaver W. L : Anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise. J. Appl. Physiol. 35, 236-243, 1973.
 25. 山地啓司、横山泰行：持久性トレーニング(強度、時間、頻度、期間)の最大酸素摂取量への影響。体育学研究、32, 167-179,1987.
 26. 山本正喜：鹿屋体育大学の低酸素環境室～トレーニング環境シミュレータ～。体育の科学、51(4), 295-298、2001.

2002年10月31日受付
2002年12月25日受理