

■研究と報告

酸素濃度の相違が呼吸・循環機能に与える影響
—VE・SpO₂・HRの面からの検討—Effects of Oxygen Density on Respiratory and Circulatory System
—Study on VE・SpO₂・HR—大倉 三洋*¹, 吉田 良一*², 山本 巖*³, 藤原 孝之*⁴
中屋 久長*¹, 辻田 純三*⁵, 古屋 美知*⁶Mitsuhiro Ookura*¹, Ryouichi Yoshida*², Iwao Yamamoto*³, Takayuki Fujiwara*⁴,
Hisanaga Nakaya*¹, Junzo Tsujita*⁵, Michi Furuya*⁶

要 旨：身体に負荷をかける場合「運動負荷」に加え、空気中の酸素濃度も「環境負荷」としてトレーニングに影響を与えることが知られている。今回、高酸素・低酸素環境の運動療法への応用を目的に常圧下で酸素濃度を30%（高酸素環境）、20.9%（通常環境）、16.4%（中等度低酸素環境）、14.5%（高度低酸素環境）に設定し、呼吸・循環機能に与える影響についてSpO₂、VE、HRの面から検討した。安静時、運動時SpO₂は酸素分圧の影響を受け酸素濃度の低下にともなって低下することが確認された。安静時、運動時VEとHRは酸素濃度の低下にともなって増加する傾向が認められた。これらの現象は、酸素分圧の低下により引き起こされる組織への酸素供給量の減少を補うための急性適応であると考えられる。この急性適応によって、高酸素環境では通常環境と同程度の生体負担度で、より強い物理的強度の運動が可能である。また低酸素環境では通常環境よりも弱い物理的強度で通常環境と同程度のストレスを呼吸・循環系に与えることが可能である。以上のことより、患者の全身持久力の維持・改善を目的とした運動療法を行わせる際には、運動負荷に加え酸素濃度という環境負荷を利用することによって、患者の状態に合ったきめ細かな運動負荷設定が可能であり、より効果的な運動療法の実施ができることを示唆するものである。

キーワード：低酸素環境、高酸素環境、運動療法、呼吸循環機能

*¹ 高知リハビリテーション学院 Kochi Rehabilitation Institute*² (有)ワイ・ケー・エス Y.K.S. Inc*³ 信州大学 Shinshu University*⁴ 郡山健康科学専門学校 Educational Foundation Koriyama Tohto Academy*⁵ 兵庫医科大学 Hyogo College of Medicine*⁶ 高知学園短期大学 Kochi Gakuen Junior College

I はじめに

身体に負荷をかける場合、どのような運動をどの程度行わせるかといった「運動負荷」に加え、トレーニングを行う周囲の温度・湿度・気圧・酸素濃度といった環境因子も「環境負荷」としてトレーニング効果に影響を与えることが知られている。

このような環境因子の中で気圧や酸素濃度といった環境因子の利用は、スポーツや医学分野においてトレーニングへの応用、また、治療法として試みられている。特に低酸素環境のトレーニングへの応用はローマ（1960年）、東京（1964年）オリンピックのマラソン競技でアベベ選手（エチオピア）を始めとする高地民族の活躍が契機となり、高地トレーニングとしてトップアスリートを対象に中国雲南省昆明（1880 m）、米国コロラド州ガニソン（2350 m）国内では天狗平（2300 m）などで積極的に行われている。

一方、高酸素環境が人間の作業能力に及ぼす効果に関する研究は20世紀初めにはすでに行われており以来多くの研究者によって研究がなされている^{1~5)}。しかし低酸素環境と異なり高酸素環境は自然界には存在しないため、これまでの多くの研究は高圧・高酸素室やその研究目的に合わせた酸素濃度の圧縮ボンベを用意し、これをダグラスバッグにもどしフェイスマスクを介して高酸素ガスを吸入する方法が用いられている。この方法では運動時にフェイスマスクを装着する必要があるが、呼吸器疾患や高齢者を対象とする場合には実施困難なことが多く実用的でない。また高圧・高酸素環境では高圧室を利用するため、装置が大掛かりになり高価であることや安全性（爆発、火災事故など）、気圧の影響などを考慮する必要がありトレーニングや運動療法の訓練には適していない。

高地や低圧室のような低圧環境下では気圧の減少に伴い空気の酸素分圧が低下する、また高圧室のような高圧環境下では気圧の上昇に伴い空気の酸素分圧が高くなる。したがって酸素濃度を、それぞれの気圧における酸素分圧に相当する酸素濃度に調節することにより、常圧下でも低酸素環境あるいは高酸素環境を人工的に作り出すことが可

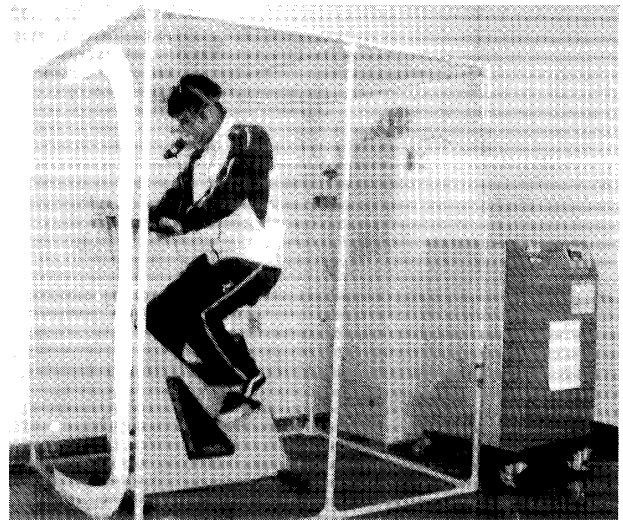


図1 訓練用酸素室

能である。われわれは高酸素・低酸素環境の運動療法への応用を目的に、訓練室でも簡単に酸素濃度を35～14%の範囲で任意に設定できる訓練用酸素室（図1）を作成し、酸素濃度の違いが呼吸・循環機能に与える影響について、動脈血酸素飽和度・換気量・心拍数の面から検討したので報告する。

II 対象および方法

被験者は健常男子学生12名、平均年齢22.8歳（20～26歳）、身長と体重の平均値±標準偏差は、それぞれ170.2±4.3 cm（164～177 cm）、62.3±4.8 kg（55～71 kg）である。倫理的配慮として実験の主旨および注意事項について被験者に説明し同意を得た。

被験者を酸素濃度を30.0%（1.4 atm相当）、20.9%（1.0 atm、高度0 m相当）、16.4%（0.8 atm、高度2000 m相当）および14.5%（0.7 atm、高度3000 m相当）に設定した常圧・酸素室内で30分間安静にさせた後、自転車エルゴメータ（コンビ社製エルゴメータ232C）を用い、ペダル回転数を50～60 n/min、130 Wの負荷で10分間駆動させた。また、安静5分、運動10分の計15分間の換気量（以下VEと略す）、心拍数（以下HRと略す）をミナト医科学製エアロモニターAE280Sを用いて連続測定した。動脈血酸素飽和度（以下SpO₂と略す）の測定はNELLOR PUPITAN BENNETT社製パルスオキシメータNBP-400を用い安

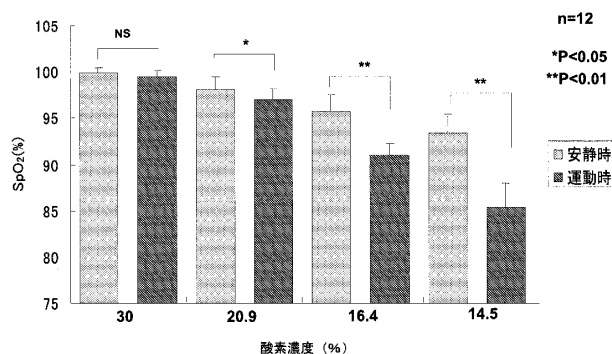


図2 各酸素濃度における安静時と運動時 SpO₂ の比較

静開始から運動終了まで1分間隔で測定した。なお安静時 VE, HR, SpO₂ は安静終了前3分目から終了までの3分間, 運動時 VE, HR, SpO₂ は運動開始5分目から終了までの5分間の平均値とし, 各酸素濃度間で比較検討した。

統計解析は, 一元配置分散分析を行い, その後の多重比較は Fisher の PLSD を用いて行った。また, 安静時と運動時の SpO₂ の比較には対応のある t 検定を用いた。全ての検定において, 有意水準は 5% 未満とした。

III 結果

1) SpO₂ の変化

安静時 SpO₂ の平均値±標準偏差は酸素濃度 30% で 99.8 ± 0.6%, 20.9% で 98.1 ± 1.4%, 16.4% で 95.8 ± 1.8%, 14.5% で 93.3 ± 2.2%, 運動時 SpO₂ の平均値±標準偏差は酸素濃度 30% で 99.4 ± 0.8%, 20.9% で 96.9 ± 1.2%, 16.4% で 91.0 ± 1.3%, 14.5% で 85.4 ± 2.5% であり, 安静時, 運動時とも全ての酸素濃度間で有意差が認められた (表 1, 2, 3)。また, 各酸素濃度における安静時と運動時 SpO₂ の比較では酸素濃度 20.9% で危険率 5%, 16.4%, 14.5% では危険率 1% 以上で有意差が認められたが, 酸素濃度 30% では有意差は認められなかった (図 2)。

2) VE の変化

安静時 VE の平均値±標準偏差は酸素濃度 30.0% で 9.7 ± 0.8 l/min, 20.9% で 10.7 ± 0.5 l/min, 16.4% で 11.0 ± 0.3 l/min, 14.5% で 13.1 ± 0.8 l/min, 運動時 VE の平均値±標準偏差は酸素濃度 30.0% で 49.8 ± 3.1 l/min, 20.9% で

53.2 ± 2.6 l/min, 16.4% で 57.5 ± 4.7 l/min, 14.5% で 63.2 ± 5.8 l/min であった (表 1, 2, 3)。安静時 VE では酸素濃度 20.9% と 16.4% の間で有意差が認められなかったが, その他の酸素濃度間では危険率 5% 以上で有意差が認められた。運動時 VE では酸素濃度 30% と 16.54%, 30% と 14.5%, 20.9% と 14.5% の間で有意差は認められたが, 酸素濃度 30% と 20.9%, 20.9% と 16.4%, 16.4% と 14.5% では有意差が認められなかった (表 1, 2, 3)。

3) HR の変化

安静時 HR の平均値±標準偏差は酸素濃度 30% で 63.8 ± 6.6 bpm, 20.9% で 70.1 ± 5.5, 16.4% で 74.2 ± 6.3 bpm, 14.5% で 79.9 ± 7.0 bpm, 運動時 HR の平均値±標準偏差は酸素濃度 30% で 129.8 ± 12.2 bpm, 20.9% で 141.8 ± 14.7 bpm, 16.4% で 150.9 ± 15.8 bpm, 14.5% で 157.6 ± 16.6 bpm であり, 安静時 HR では 20.9% と 16.4% 以外の各酸素濃度間で有意差が認められた。運動時 HR では酸素濃度 30% と 16.5%, 30% と 14.5%, 20.9% と 14.5% の間で有意差が認められた (表 1, 2, 3)。

IV 考察

高地トレーニングに代表される低酸素環境の利用はオリンピックにおける高地民族の活躍が契機となってオリンピック選手をはじめトップアスリートのトレーニング方法として多くの競技団体で実施されている。高地トレーニングといっても特別なトレーニング方法があるわけではなく, 標高が高く気圧の低い環境すなわち低圧環境という環境負荷をトレーニングに応用することを意味している。低圧環境では気圧の低下に伴い, 空気や肺胞内の酸素分圧が指数関数的に低下する。この酸素分圧の低下に比例して酸素分子の数が減少することによって低圧・低酸素環境をもたらすことになる。例えば標高 2000 m では平地で 16.4%, 標高 3000 m では 14.5% の酸素濃度でトレーニングすることになる。逆に平地で空気の酸素濃度を 20.9% から 16.4%, 14.5% にコントロールすれば, 常圧下で標高 2000 m, 3000 m と同じ低酸素分圧の空気を吸入することになる。

表1 各酸素濃度における呼吸・循環応答の分散分析結果

	安静時			運動時		
	F 値	P 値	F (0.95)	F 値	P 値	F (0.95)
SpO ₂	36.5	5.27E-1	2.82	180.8	9.34E-25	2.82
VE	20.3	5.35E-05	3.49	6.6	0.0069	3.49
HR	13.7	1.92E-06	2.82	7.9	0.0003	2.82

表2 各酸素濃度における呼吸・循環応答の多重比較の結果(安静時) n = 12

O ₂ 濃度 (%)	VE (l/min)	SpO ₂ (%)	HR (bpm)
30.0	9.7 ± 0.8	99.8 ± 0.6	63.8 ± 6.6
20.9	10.7 ± 0.5	98.1 ± 1.4	70.1 ± 5.5
16.4	11.0 ± 0.3	95.8 ± 1.8	74.2 ± 6.3
14.5	13.1 ± 0.8	93.3 ± 2.2	79.6 ± 7.0

* P < 0.05 ** P < 0.01

表3 各酸素濃度における呼吸・循環応答の多重比較の結果(運動時) n = 12

O ₂ 濃度 (%)	VE (l/min)	SpO ₂ (%)	HR (bpm)
30.0	49.8 ± 3.1	99.4 ± 0.8	129.8 ± 12.2
20.9	53.2 ± 2.6	96.9 ± 1.2	141.8 ± 14.7
16.4	57.2 ± 4.7	91.0 ± 1.3	150.9 ± 15.8
14.5	62.3 ± 5.8	85.4 ± 2.5	157.6 ± 16.6

* P < 0.05 ** P < 0.01

浅野^{6,7)}は高地トレーニングの原理について、低圧・低酸素環境において持久性トレーニングを行うことは、平地でのトレーニングに比べ、相対的運動強度が高くなり組織細胞への低酸素状態をいっそう増強することになる。すなわち低圧・低酸素環境による安静時の呼吸循環機能亢進(受動的効果)の上にトレーニングによる生理的効果(積極的効果)を加えた合成効果を期待するものであると述べている。

一方、高酸素環境は低酸素環境と異なり自然界には存在しないため、高圧室を利用して酸素分圧を高めるか、高濃度の酸素を直接吸入させることによって作り出される。高酸素環境で持久的な運動を行わせると通常環境下と比較して、HR, VE, 呼吸交換比および血中乳酸値の上昇などの生理的応答が低減するとともに、performanceが向上することが知られている^{8~11)}。これは高酸素環境では酸素分圧が高くなり肺拡散能が高まることやHenryの法則に従って肺胞内から肺静脈の血漿中に溶解込む酸素の量が増えるためと考えられている。

SpO₂は動脈血中のヘモグロビンが酸素とどの程度結合しているかを示すものである。肺胞内の酸素ガスの移動は肺胞と血液間の酸素分圧の差による拡散現象により行われ、分圧差が大きいほど

肺拡散容量は大きくなる。健常者の通常環境下での安静時SpO₂は96~98%であり最大下の運動でもほとんど低下しないといわれている¹²⁾。本研究結果においても安静時、運動時SpO₂は高酸素環境(酸素濃度30%) > 通常酸素環境(20.9%) > 中等度低酸素環境(16.4%) > 高度低酸素環境(14.5%)と肺胞内の酸素分圧が低くなるにしたがってSpO₂も低下することが認められた。また、通常酸素環境、低酸素環境では安静時SpO₂と運動時SpO₂の間に有意差が認められたのに対し、高酸素環境では有意差が認められなかった。これは酸素濃度30%の高酸素環境での吸入時酸素分圧は218 torr(理論値)と高いため肺拡散能が高いレベルで維持され、運動時においても通常酸素環境や低酸素環境に比べ血液への酸素の供給が十分に行なわれていると考えられる。

酸素濃度の違いによる安静時、運動時VEの変化は高酸素環境 < 通常環境 < 中等度低酸素環境 < 高度低酸素環境と、酸素濃度が低くなるにしたがってVEの増加が認められた。低酸素環境におけるVEの増加現象について宮村¹³⁾は、高度の上昇に比例して肺胞および動脈血の酸素分圧が低下し末梢化学受容器、特に頸動脈小体が刺激され頸動脈小体からの求心性インパルスによって延髄孤束核(nucleus tractus solitarius: NTS)が刺激され、

NTS内にグルタメートの遊離を引き起こし、呼吸中枢が興奮しVEの増加が起こると説明している。また、高酸素環境におけるVEの減少は、逆に動脈血の酸素分圧の上昇が呼吸中枢の興奮を抑制することにより引き起こされると考えられる。

酸素濃度の違いによる安静時、運動時HRの変化は、高酸素環境<通常環境<中等度低酸素環境<高度低酸素環境と酸素濃度が低くなるにしたがって増加傾向を示した。これは、SpO₂の低下による組織への酸素供給量の減少に対し、HRを増加させるとことにより補うという急性適応と考えられる。また、高酸素環境では逆に酸素分圧の上昇に伴いSpO₂も高くなり、組織への酸素供給能が高まるためにHRが減少したものと考えられる。

本研究結果から酸素濃度という環境負荷は、通常環境と高酸素環境で同一強度の運動を行わせると通常環境に比べ呼吸・循環系へのストレスは減少し、低酸素環境では呼吸・循環系へのストレスが大きくなる。すなわち、高酸素環境では通常環境と同じ呼吸・循環系へのストレスでより強い物理的強度での運動が可能である。また、低酸素環境では通常環境よりも弱い物理的強度で通常環境と同程度のストレスを呼吸循環系に与えることが可能である。これらのことは、従来行われている患者の全身持久力の維持・改善を目的に行われている運動負荷に加え、酸素濃度という環境負荷を利用することによって、その患者の状態に合ったきめ細かな運動負荷設定が可能であり、より効果的な運動療法の実施ができることを示唆するものである。

V まとめ

高酸素・低酸素環境の運動療法への応用を目的に常圧下で酸素濃度を30%（高酸素環境）、20.9%（通常環境）、16.4%（中等度低酸素環境）、14.5%（高度低酸素環境）に設定し、呼吸・循環機能に与える影響についてSpO₂・VE・HRの面から検討した。

1. SpO₂は安静時、運動時とも酸素濃度の低下にともなって低下することが確認され、酸素分圧の影響を反映していることが示唆された。

2. VE, HRは安静時、運動時とも酸素濃度の低下にともなって増加傾向が認められたこれらの現象は、酸素分圧の低下により引き起こされる組織への酸素供給量の減少を補うための急性適応であると考えられた。

3. 酸素濃度という環境負荷を利用することによって、患者の状態に合ったきめ細かな運動負荷設定が可能であり、より効果的な運動療法の実施ができることが示唆された。

文献

- 1) Douglas, C.G. and J.S. Haldane : The effects of previous forced breathing and oxygen inhalation on the distress caused by muscular work. *J. Physio*, 39 : i-iv, 1909.
- 2) Hill, L. and M. Flack : The influence of oxygen inhalations on muscular work. *J. Physiol*, 40 : 347-372, 1909.
- 3) Bannister, R.G. and D.J.C. Cunningham : The effects on the respiration and performance during exercise of adding oxygen to the inspired air. *J. Physiol. (Lond.)*, 125 : 118-137, 1954.
- 4) Ekblom, B., R. Huog, E.M. Staein and A.T. Thorstensson : Effects of changes in arterial oxygen content on circulation and Physical performance. *J. Appl. Physiol*, 39 : 71-75, 1975.
- 5) Adams, R.p. and H.G. Welch : Oxygen uptake, acid-base status, and performance with varied oxygen fractions. *J. Appl. Physiol*, 49 : 863-868, 1980.
- 6) 浅野勝巳 : 高地トレーニングの基礎. *臨床スポーツ医学*, 8 : 585-592, 1991.
- 7) 浅野勝巳 : 高所トレーニングの生理的意義と最近の動向. *臨床スポーツ医学*, 16 : 505-516, 1999.
- 8) Adams, R.P. : Effect of hyperoxia on substrate utilization during intense submaximal exercise, *J. Appl. Physiol.*, 61 : 523-529, 1986.
- 9) Ekblom, B. : Effect of changes in arterial oxygen content on circulation and physical performance, *J. Appl. Physiol.*, 39 : 71-75, 1975.
- 10) 杉山康司, 青木純一郎 : 全身持久力に及ぼす高酸素気吸入トレーニングの効果. *体力科学*, 39 : 173-180, 1990.
- 11) 藤瀬武彦, 杉山文宏, 加藤健志, 他 : 漸増負荷運動時の高濃度酸素吸入が持久的運動鍛練者の作業成績

- 及び生理的変量に及ぼす効果. トレーニング科学, 9:31-38, 1997.
- 12) 黒田善雄, 井川幸雄, 中嶋寛之, 他編: スポーツ医学基本用語ゼミナール. 臨床スポーツ医学, 5: 168, 1988.
- 13) 宮村 実晴: 低酸素環境における換気応答. 体育の科学, 51: 281-285, 2001.

Abstract : It is known that the oxygen density in the air affects the physical training as an environmental load, in addition to the exercise load. To study applicability of high · low oxygen density environment to the therapeutic exercise, its effect on respiratory · circulatory system in the four different degrees of oxygen density under normal air pressure, i.e. 30.0 % (high oxygen density environment), 20.9 % (normal oxygen density environment), 16.4 % (medium low oxygen density environment), 14.5 % (very low oxygen density environment), were examined by focusing on VE · SpO₂ · HR. It was confirmed that SpO₂, both at rest and exercise, affected by oxygen pressure, decreased in accordance with the decrease of oxygen density. Also, a trend was confirmed that VE and HR, both at rest and exercise, increased in accordance with the decrease of oxygen density. They are considered to be acute adaptation to retrieve oxygen supply reduced by the decrease of oxygen partial pressure. By this acute adaptation, given the same level of physiological load as that in normal oxygen density environment, it is possible to do exercise in greater physical strength in high oxygen density environment. Also, in low oxygen density environment it is possible to give the same level of stress to respiratory · circulatory system in less physical strength than that in normal oxygen density environment. Therefore, to maintain and improve the patient's general endurance in the therapeutic exercise, it is suggested that adding the environmental load of oxygen density to exercise load, enables us to make more suitable exercise load plan for each patient, which makes the therapeutic exercise more effective.

Key Words : high oxygen density environment, low oxygen density environment, therapeutic exercise, respiratory-circulatory system

(2006年4月7日 原稿受付)