

間欠的低酸素トレーニングが 身体パフォーマンスに及ぼす影響

名古屋大学	片山敬章
(共同研究者) 同	佐藤靖文
同	諸留克史
同	島典広
同	森滋夫
同	石田浩司
同	宮村実晴

The Effect of Intermittent Hypoxic Exposure with Endurance Training on Physical Performance at Sea Level

by

Keisho Katayama, Yasutake Sato, Yoshifumi Morotome,
Norihiro Shima, Shigeo Mori, Koji Ishida, Miharuru Miyamura
Nagoya University

ABSTRACT

The present study was performed to clarify the effects of intermittent exposure to altitude at 4,500m with endurance training on physical performance at sea level and ventilatory chemosensitivity. Seven subjects (AL group) performed endurance training during hypoxic situation for 30 min·d⁻¹, 5 d·wk⁻¹ for 2 wk, while other seven subjects (SL group) trained at sea level for the same period. Before and after the training period, maximum oxygen uptake

($\dot{V}_{O_{2max}}$) and endurance time were measured for each subject using a bicycle ergometer with incremental loading. Hypoxic ventilatory response (HVR) was measured using an isocapnic progressive hypoxic method. Resting hypercapnic ventilatory response was measured by two methods, i.e., hypercapnic ventilatory response as an index of central hypercapnic chemosensitivity (HCVR) using CO₂ rebreathing method and hypercapnic ventilatory response as an index of peripheral hypercapnic chemosensitivity (HCVR_{SB}) using single breath CO₂ method. After 2 weeks of endurance training, significant increases were noted in $\dot{V}_{O_{2max}}$ and endurance time in both groups, but there were not significant differences between the groups. HVR tended to increase in the AL group but not statistically significant, while there was significantly decreased in the SL group. On the other hand, endurance training did not alter HCVR and HCVR_{SB} in both groups. These results suggest that ventilatory chemosensitivity to hypoxia is more variable by endurance training than that ventilatory chemosensitivity to hypercapnia. It also suggests that changes of these chemosensitivity have little or no effect on $\dot{V}_{O_{2max}}$ and time to fatigue at sea level.

要 旨

本研究の目的は間欠的低酸素暴露と持久的トレーニングとの組み合わせ（間欠的低酸素トレーニング）が平地におけるパフォーマンスおよび呼吸の化学感受性に及ぼす影響を明らかにすることである。14名の被験者を7名づつ間欠的低酸素トレーニング群（AL群）、および平地トレーニング群（SL群）に振り分けた。最大酸素摂取量（ $\dot{V}_{O_{2max}}$ ）、 $\dot{V}_{O_{2max}}$ 測定時の運動時間（Endurance time）、低酸素に対する換気応答（HVR）、中枢化学受容器の高炭酸ガスに対する換気応答（HCVR）、末梢化学受容器の高炭酸ガスに対する換気応答（HCVR_{SB}）をトレーニング前後に測定した。2週間のトレーニング後、 $\dot{V}_{O_{2max}}$ 、Endurance timeは両群で有意に増加したが、群間で差は見られなかった。HVRはAL群で増加傾向を、SLで有意な低下を示したがHCVR、HCVR_{SB}には変化が見られなかった。これらの結果は、高度4,500mでの2週間の間欠的低酸素トレーニングは平地におけるパフォーマンスに影響を及ぼさないこと、安静時

の低酸素および高炭酸ガスに対する換気応答の変化は平地でのパフォーマンスに寄与しないことを示唆している。

緒 言

近年、低酸素環境下における赤血球数の増加のような身体的环境適応の一部が持久的トレーニングによるそれとよく類似し、平地でのパフォーマンスの向上に有益であると推測されることから、数多くのコーチやアスリートにより低酸素環境と持久的トレーニングとを組み合わせた高所・低酸素トレーニングが用いられている。しかしながら、これまでの低酸素トレーニングに関する研究ではコントロール群との比較がないことからその有効性に関しては明確にされていない。またコントロール群を用いた研究においても、高所・低酸素環境下で行う持久的トレーニングが平地で行うそれと比較して平地でのパフォーマンス向上においてより効果的であるという明らかな確証はいまだ得られていない^{1,2)}。さらに、最大酸素摂取量（ $\dot{V}_{O_{2max}}$ ）を持久的能力の指標として用いた場合

でも、平地での $\dot{V}O_{2max}$ の高所トレーニングによる付加的な効果はないとする報告が多い³⁻⁸⁾。

高所暴露による適応の代表的なものとして呼吸系の変化があげられる。中でも、高所滞在や連続的な低酸素への暴露が低酸素に対する換気応答 (HVR) を増加させることはよく知られている⁹⁻¹²⁾。低酸素換気感受性の増大は低酸素環境下における換気量を増加させ、その結果として肺胞および動脈血内の酸素分圧の増加に貢献すると考えられている。このため、低酸素換気感受性の高いヒトは低いヒトと比較して低酸素環境下でのパフォーマンスが高いこと¹³⁾や急性高山病の発現率が低いことなどが報告されている¹⁴⁾。また HVR のみならず、高炭酸ガスに対する換気応答も連続的な高所暴露により増加することが報告されている^{9, 11, 12)}。これまで、高炭酸ガスに対する換気応答の測定には Rebreathing 法や Steady-state 法などが用いられてきた。しかしながらこれらの方法では、中枢化学受容器と末梢化学受容器の両者を含んだ高炭酸ガスに対する換気応答を評価していると考えられている。低酸素暴露および持久的トレーニングによる中枢と末梢の化学受容器における高炭酸ガスに対する換気応答の変化は異なることが推測されるにも関わらず、これまで末梢化学受容器の高炭酸ガスに対する換気応答についての縦断的な報告は見当たらない。さらに、これまで高所・低酸素トレーニングによる呼吸の化学感受性の変化について報告したものは少なく^{4, 5, 15)}、呼吸の化学感受性の変化と持久的トレーニングによるパフォーマンスの変化との関連性についてはいまだ明らかではない。

そこで、本研究では高度4,500mへの間欠的な暴露と持久的トレーニングとの組み合わせ (間欠的低酸素トレーニング) が、1) 平地における持久的パフォーマンスと、2) 低酸素および高炭酸ガスに対する換気感受性に及ぼす影響を観察し、呼吸の化学感受性の変化がパフォーマンスの変化

に関係するか否かを明らかにすることを目的とした。

1. 方法

1. 1 被験者

14名の健康な男性を被験者とし、間欠的低酸素トレーニング群 (AL) 7名、平地トレーニング群7名 (SL) にランダムに振り分けた。それぞれの群の年齢、身長および体重は (平均値±標準偏差) AL群で21.0±3.1歳, 174.6±7.1cm, 65.5±3.8kg, SL群で21.7±3.9歳, 171.8±3.4cm, 62.7±4.6kgであり、実験以前に両群間に有意な差は認められなかった。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、研究参加の同意を得た。

1. 2 実験手順

被験者にはまず低圧室および平地にて行う実験装置に慣れさせた。持久的トレーニング開始前に、両群の被験者に対し $\dot{V}O_{2max}$ の測定を行った。SL群では平地で、またAL群では4,500mに設定した低圧室 (名古屋大学環境医学研究所) で $\dot{V}O_{2max}$ の測定を行った。各被験者の低酸素および高炭酸ガスに対する換気応答の測定は30分間の安静後に行った。 $\dot{V}O_{2max}$ および換気応答の測定は2週間のトレーニング前後に行った。持久的トレーニングはSL群は平地にて測定した $\dot{V}O_{2max}$ の70%の強度 (70% of sea level $\dot{V}O_{2max}$) で、一方、AL群は高度4,500mに設定した低圧室内において同高度で測定した $\dot{V}O_{2max}$ の70%の強度 (70% of altitude $\dot{V}O_{2max}$) で行った。トレーニングには自転車エルゴメータを用い、ペダリングの回転数は60回転/分とし、時間および期間は30分/日、5日/週、2週間とした。AL群においてはトレーニング時間以外は平地にて通常の生活をさせた。

1. 3 最大酸素摂取量の測定

$\dot{V}O_{2max}$ の測定には負荷自動制御が可能な自転車エルゴメータを使用し、初期負荷60Wより疲労

困憊にいたるまで2分毎に30Wずつ増加させる連続的多段階漸増負荷法を用いた。ペダリングの回転数は60回転/分とした。呼気ガスは30秒毎に呼吸マスクを介してダグラスバッグに採集した。呼気ガス量は低圧室内では乾式ガスメータ（品川製作所, DC-2）、平地においては湿式ガスメータ（品川製作所, WE）により、呼気ガスの酸素および炭酸ガス濃度はガス分析器（ミナト医科学, MG-360）により測定した。心拍数は双極誘導心電計（日本光電, OEC-6401）により測定した。 $\dot{V}_{O_{2max}}$ の決定は以下の3項目のうち2項目を満たした場合とした。すなわち、1) 負荷の増加に対する \dot{V}_{O_2} のプラトー (<150ml) がみられること、2) 年齢から推測される最高心拍数 (HRmax = 220 - 年齢) に達していること、3) 呼吸交換比が1.0以上であること。本研究においては、平地におけるパフォーマンスの指標として $\dot{V}_{O_{2max}}$ および $\dot{V}_{O_{2max}}$ 測定時の疲労困憊に至るまでの時間 (Endurance time) を用いた。

1. 4 低酸素に対する換気応答の測定

低酸素に対する換気応答 (hypoxic ventilatory response: HVR) の測定には isocapnic progressive hypoxic test を用いた。再呼吸システムは我々の先行研究¹⁵⁾と同様のものを使用した。再呼吸中は一回換気量 (V_T)、分時換気量 (\dot{V}_I)、終末呼気酸素濃度 ($F_{ET}O_2$)、終末呼気炭酸ガス濃度 ($F_{ET}CO_2$)、動脈血酸素飽和度 (SaO_2) を連続的に記録した。被験者にはノーズクリップを装着し、熱線流量計 (ミナト医科学, RF-H) に接続されたマウスピースを通して呼吸を行わせた。マウスピースにはガス分析器 (ミナト医科学, MG-360) のサンプリングチューブを挿入し $F_{ET}O_2$ 、 $F_{ET}CO_2$ を測定し、コンピュータにて終末呼気酸素分圧 ($P_{ET}O_2$)、終末呼気炭酸ガス分圧 ($P_{ET}CO_2$) を算出した。 SaO_2 はパルスオキシメータ (日本光電, OLV-1200) のプローブを心臓位置に維持した左手人差し指指尖に装着して測定した。熱線流量計、

ガス分析器およびパルスオキシメータからの信号は A/D 変換器 (Canopus, ADX-98H) を介して 100Hz でサンプリングを行い、コンピュータ (NEC, PC-9821) にて連続的に記録した。再呼吸は 7~10 分間行い、 $P_{ET}O_2$ が再呼吸前約 100 Torr から 40 Torr に低下するか、 SaO_2 が約 98% から 70% に低下した時点で終了とした。HVR は \dot{V}_I と SaO_2 の関係を直線回帰により算出し、その傾き ($\Delta \dot{V}_I / \Delta SaO_2 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \%^{-1}$) を正の値に変換して示した。

1. 5 高炭酸ガスに対する換気応答の測定

高炭酸ガスに対する換気応答の測定には CO_2 再呼吸法と Single breath CO_2 法を用いて測定した。まず、 CO_2 再呼吸は Read¹⁶⁾ の方法に従い、Bag in box システムを用い、被験者に 5~6 l のバッグに入った 7% CO_2 in O_2 の混合ガスを 3~4 分間再呼吸を行わせた。 \dot{V}_I および $P_{ET}CO_2$ を HVR と同様の測定システムを用いて連続的に記録した。再呼吸法による高炭酸ガスに対する換気応答 (HCVR) は \dot{V}_I と $P_{ET}CO_2$ の直線回帰により得られる傾き ($S \cdot \Delta \dot{V}_I / \Delta P_{ET}CO_2 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{torr}^{-1}$) により評価した。一方、末梢化学受容器の CO_2 に対する換気応答の測定には、McClean¹⁷⁾ による Single breath CO_2 法を採用した。システムは HCVR と同様の Bag in box システムを用い、13% CO_2 - 21% O_2 - 66% N_2 の混合ガスを用いた。Single breath CO_2 測定では \dot{V}_I 、 $P_{ET}CO_2$ 、一回換気量 (V_T) および吸気時間 (T_I) を連続的に記録した。被験者は 15~20 分間、マウスピースを通じて安静呼吸を行いランダムに 6~8 回混合ガスを 1 呼吸のみ吸入した。1 回の混合ガス吸入には約 2 分間のインターバルをおいた。混合ガス吸入後 20 秒内で最も高い $P_{ET}CO_2$ および V_T/T_I 値を記録し、試行回数にて平均値を算出し、その傾き ($\Delta V_T/T_I / \Delta P_{ET}CO_2 \text{ ml} \cdot \text{sec}^{-1} \cdot \text{torr}^{-1}$) を Single breath CO_2 法による高炭酸ガスに対する換気応答 (HCVR_{SB}) 値とした。なお $\Delta P_{ET}CO_2$ には Khoo¹⁸⁾ の補正式

を用いた。

1. 6 統計処理

各変数の測定結果を平均値±標準偏差 (mean ± SD) で示した。各群でのトレーニング前後の差の検定には Wilcoxon テストを、群間の比較には Mann-Whitney テストを用い、危険率 (P) 5% 未満を有意水準とした。

2. 結果

2. 1 $\dot{V}O_{2max}$ の変化

トレーニング前、後の体重当たりの $\dot{V}O_{2max}$ ($ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$) の変化を図 1 に、 $\dot{V}O_{2max}$ 測定時の各パラメータ [$\dot{V}O_{2max}$ ($l \cdot min^{-1}$), 最大毎分換気量 ($\dot{V}_{E_{max}}$, $l \cdot min^{-1}$), 換気当量 ($\dot{V}_E / \dot{V}O_2$, $\dot{V}_E / \dot{V}CO_2$), 最高心拍数 (HR_{max} , $beats \cdot min^{-1}$)] の変化を表 1 に示した。 $\dot{V}O_{2max}$ はトレーニング後両群共にトレーニング前と比較して有意な増加を示した (図 1)。しかしながら、両群間で有意な差は見られなかった。 $\dot{V}_{E_{max}}$ は両群ともに有意な変化は示さなかった。 $\dot{V}_E / \dot{V}O_2$, $\dot{V}_E / \dot{V}CO_2$ は AL 群では有意な変化は示さなかったが、SL 群ではトレーニング後で有意な低下を示した。 HR_{max} は両群ともに有意な変化は示さなかった。

2. 2 Endurance time の変化

トレーニング前後の Endurance time の変化を図 2 に示した。Endurance time はトレーニングにより両群ともに増加した。両群間に有意な差は認め

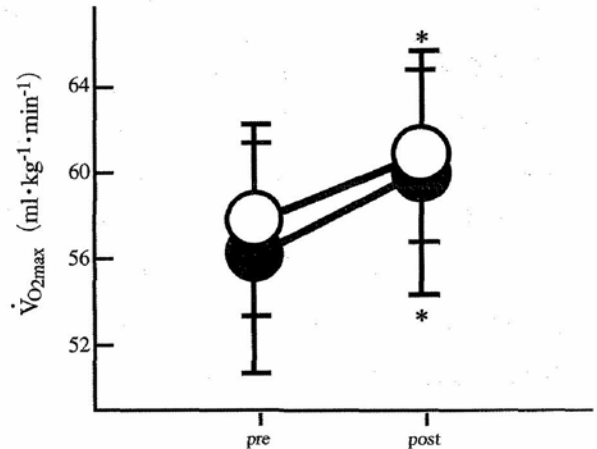


図 1 トレーニング前後における $\dot{V}O_{2max}$ の変化
* トレーニング前と比較して有意な差が見られたもの
●: 間欠的低酸素トレーニング群
○: 平地トレーニング群

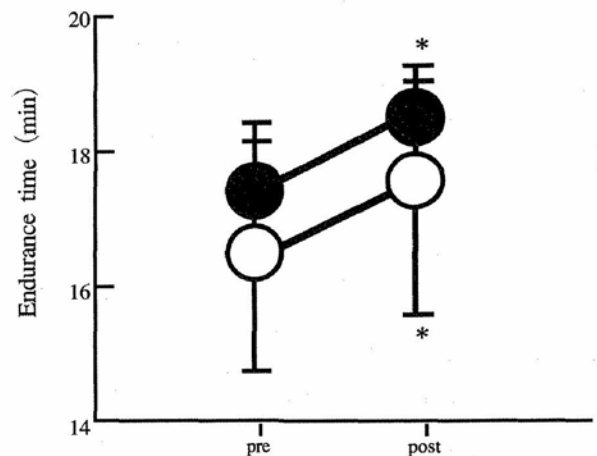


図 2 トレーニング前後における Endurance Time の変化
* トレーニング前と比較して有意な差が見られたもの
●: AL 群 ○: SL 群

られなかった。

2. 3 HVR の変化

両群におけるトレーニング前後の HVR の変化を図 3 に示した。AL 群では HVR はトレーニング

表 1 $\dot{V}O_{2max}$ 測定時の各パラメータの変化

		pre	post
$\dot{V}O_{2max}$ ($l \cdot min^{-1}$)	AL	3.65 ± 0.34	3.92 ± 0.40 *
	SL	3.59 ± 0.38	3.71 ± 0.21 *
$\dot{V}_{E_{max}}$ ($l \cdot min^{-1}$)	AL	153.8 ± 16.5	155.9 ± 24.1
	SL	156.7 ± 17.4	150.8 ± 11.7
$\dot{V}_E / \dot{V}O_2$	AL	41.5 ± 4.5	39.8 ± 4.6
	SL	43.9 ± 5.4	40.7 ± 2.7 *
$\dot{V}_E / \dot{V}CO_2$	AL	37.3 ± 2.6	37.6 ± 2.7
	SL	39.3 ± 3.3	37.4 ± 3.1 *
HR_{max} ($beats \cdot min^{-1}$)	AL	197.0 ± 9.9	196.3 ± 6.1
	SL	192.3 ± 4.5	194.0 ± 7.8

平均値±標準偏差, * トレーニング前と比較して有意な差が見られたもの。

AL: 間欠的低酸素トレーニング群, SL: 平地トレーニング群, $\dot{V}O_{2max}$: 最大酸素摂取量
 $\dot{V}_{E_{max}}$: 最大毎分換気量, $\dot{V}_E / \dot{V}O_2$, $\dot{V}_E / \dot{V}CO_2$: 換気当量, HR_{max} : 最大心拍数

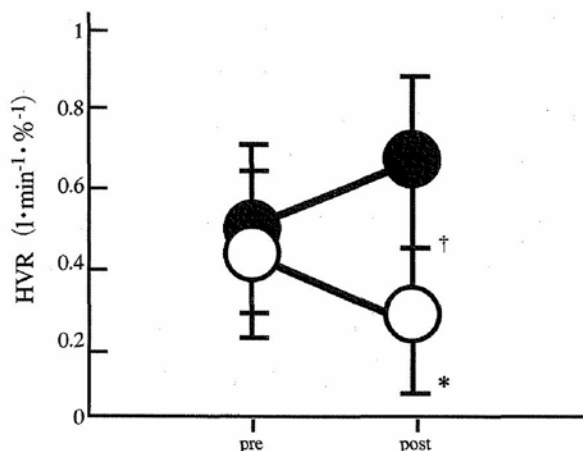


図3 トレーニング前後におけるHVRの変化
 *トレーニング前と比較して有意な差が見られたもの
 †群間で有意な差が見られたもの
 ●: AL群 ○: SL群

表2 HCVR, HCVR_{SB} の変化

		pre	post
HCVR (l·min ⁻¹ ·torr)	AL	1.24 ± 0.55	1.29 ± 0.34
	SL	1.30 ± 0.77	1.36 ± 0.85
HCVR _{SB} (ml·sec ⁻¹ ·torr ⁻¹)	AL	11.7 ± 6.2	12.8 ± 7.1
	SL	11.5 ± 5.1	11.3 ± 6.3

平均値±標準偏差, AL: 間欠的低酸素トレーニング群, SL: 平地トレーニング群

により増加傾向を示したがトレーニング前と比較して統計的に有意な差は得られなかった [平均値±標準偏差, 0.49 ± 0.22 l·min⁻¹·%⁻¹ (pre), 0.67 ± 0.22 l·min⁻¹·%⁻¹ (post)]. 一方, SL群ではHVRはトレーニングにより有意な低下を示した [0.43 ± 0.22 l·min⁻¹·%⁻¹ (pre), 0.25 ± 0.19 l·min⁻¹·%⁻¹ (post), P<0.05]. トレーニング後で両群間に有意な差が見られた.

2. 4 HCVR, HCVR_{SB} の変化

トレーニング前後のHCVR, HCVR_{SB} の変化を表2に示した. 両群においてHCVR, HCVR_{SB} ともトレーニングにより有意な変化は見られなかった.

3. 考 察

本研究では, 高度4,500mに設定した間欠的低酸素トレーニングによるパフォーマンスの変化を, 呼吸の化学感受性の変化と関連させて検討するこ

とを目的とした. 2週間の間欠的低酸素トレーニングと平地トレーニングでは, $\dot{V}O_{2max}$ および Endurance time を指標とした場合には平地におけるパフォーマンスに差は見られなかった. しかしながら, 低酸素に対する換気感受性の変化については両群で明らかな差が見られた.

一般的に, 高所トレーニングが高所におけるパフォーマンス向上に対して有益であることはこれまでの研究で示されているが, 平地におけるパフォーマンス向上に対して有益であるという明らかな証拠は得られていない. 本研究では, 高所トレーニングの方法として間欠的低酸素トレーニングを用いた. この方法は低酸素の暴露時間が短いため, 急性高山病などに代表されるようなネガティブな影響は少なく, トレーニング時間以外は平地にて通常的生活を行うことができるために被験者への負担が高所滞在と比較して少ない⁷⁾. しかしながら, この方法を用いたこれまでの研究では平地でトレーニングした群と比較して $\dot{V}O_{2max}$ に差はみられないとの報告が多い³⁻⁸⁾. 本研究では高度4,500mを設定し低酸素による刺激を強くすることで, 平地でのパフォーマンスに有益な結果が示されるのではないかと仮定した. しかしながら, 本研究では $\dot{V}O_{2max}$, Endurance time いずれも平地トレーニング群と比較して有意な増加は認められなかった. これらの結果はこれまでの間欠的低酸素トレーニングを用いた研究結果と一致するものであり, 本研究で用いた高度4,500mでの間欠的低酸素トレーニングは平地でのそれと比較して $\dot{V}O_{2max}$, Endurance time からみた平地におけるパフォーマンスに有益な影響を及ぼさないことを示唆している.

長期の高所滞在や連続的・間欠的な低酸素への暴露が末梢化学受容器の低酸素に対する換気感受性の指標とされるHVRを増加させることは数多くの研究者により報告されている⁹⁻¹²⁾. しかしながら, 間欠的低酸素トレーニングが呼吸の化学感

受性に及ぼす影響を報告したものは少ない。Levineら⁴⁾とBenoitら⁵⁾は、数週間の間欠的低酸素トレーニングの結果、HVRが増加したと報告している。これに対し、我々の先行研究では6日間の間欠的低酸素トレーニングによりHVRは変化せず、低酸素暴露時の持続的トレーニングはHVRの増加を抑制すると考察している¹⁵⁾。本研究では2週間の期間を設定しトレーニング前と比較して統計的に有意な差は見られなかったがHVRは増加の傾向を示した。以上のことから、間欠的低酸素トレーニングによるHVRの変化には低酸素への暴露期間が重要な因子であり、本研究で見られたHVRの増加傾向は低酸素暴露時間の増大が持続的トレーニングによるHVR増加の抑制効果を上回った結果であることが推測される。

持続的鍛練者は非鍛練者と比較して安静時のHVRが低いことが知られている^{19, 20)}。数少ない先行研究では持続的トレーニングによりHVRは変化せず^{4, 5)}、持続的鍛練者における低いHVRは遺伝的な影響が大きいと考えられてきた²¹⁾。しかしながら、本研究では2週間の持続的トレーニングにより有意に低下した(図3)。本研究と先行研究との結果の相違についてはさらなる研究が必要とされるが、本研究の結果は持続的鍛練者に見られる低いHVRは遺伝的要因だけでなく、環境的要因、つまり持続的トレーニングが関与することを示唆している。

HVRと同様に、HCVRも高所滞在により増加することが知られている^{10, 11)}。しかしながら、我々の先行研究では6日間の間欠的低酸素暴露ではHCVRは変化しなかった¹⁵⁾。本研究においても間欠的低酸素トレーニングおよび平地でのトレーニングによりHCVRには変化が認められなかった。これらの結果は少なくとも本研究で行われたような2週間の間欠的低酸素トレーニングはHCVRに影響を及ぼさないことを示している。これまでの平地での持続的トレーニングによる

HCVRの変化についての研究では一致した結果が得られていない。例えば、Bradleyら²²⁾は、6~8週間の持続的トレーニングによりHCVRは変化しなかったと報告している。これに対し、Miyamuraら²³⁾は数年間のトレーニングでHCVRが低下したことを述べている。これらの結果より、HCVRが本研究では変化しなかった原因としてトレーニング期間が短かったためではないかと考えられる。

間欠的低酸素トレーニングおよび平地における持続的トレーニングにより、中枢のみではなく末梢化学受容器の高炭酸ガスに対する換気感受性にも変化が現れるのではないかと推測した。本研究では、主に中枢の化学受容器の高炭酸ガスに対する換気応答の指標であるHCVRに加えて、Single Breath CO₂法を用いて末梢化学受容器の高炭酸ガスに対する換気応答についても測定を行った。その結果、HCVR_{SB}にも有意な変化は認められなかった。以上の結果から、本研究で用いた2週間の間欠的低酸素トレーニングおよび平地での持続的トレーニングでは中枢および末梢の化学受容器に対する高炭酸ガスに対する換気応答は変化しないことが明らかとなった。

先行研究によると、安静時のHVR、HCVRと運動に対する換気応答の間に有意な関係があることが報告されている²⁴⁻²⁷⁾。HVRが運動時の換気の決定に重要であるとする、間欠的トレーニング群で最大運動時の換気当量は増加し、平地トレーニング群では低下することが予測される。しかしながら、本研究での安静時のHVRの変化と運動に対する換気応答の変化とは必ずしも一致しなかった。また、縦断的な研究では、トレーニングによるHVRの変化と最大運動時の換気当量の変化とは一致しないことが報告されている^{4, 15)}。したがって、安静時のHVRと平地における運動に対する換気との関係についてはさらに検討を要すると考える。

4. まとめ

本研究では $\dot{V}O_{2max}$ の70%の強度で平地 (SL群) と高度4,500mに相当する低圧室 (AL群) で2週間の持久的トレーニングを行わせた。その結果、AL群とSL群では $\dot{V}O_{2max}$ および Endurance time は両群で有意に増加したが、群間に差は認められなかった。低酸素に対する換気応答はAL群で増加傾向を、SL群で有意な低下を示したが、中枢および末梢化学受容器の高炭酸ガスに対する換気応答は変化を示さなかった。これらの結果から、(1) 高度4,500mでの2週間の間欠的低酸素トレーニングは平地におけるパフォーマンスに影響を及ぼさない、(2) 安静時の低酸素および高炭酸ガスに対する換気応答の変化は平地でのパフォーマンスに寄与しない、ことが示唆された。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、被験者として名古屋大学医学研究科長崎君、加藤君、名古屋大学スキー部の皆様の参加を得た。記して謝意を表す。

本研究の遂行には申請書に記載した研究者にさらに3名 (名古屋大学 森滋夫・島典広・諸留克史) の参加を得ましたので、共同研究者として記載いたしました。

最後に、本研究に助成いただいた、石本記念デサントスポーツ科学振興財団に心からのお礼を申し上げます。

文 献

- 1) Bailey DM and Davies B ; Physiological implications of altitude training for endurance performance at sea level : a review, *Br. J. Sports Med.*, 31, 183-190 (1997)
- 2) Wolski LA, McKenzie DC and Wenger HA ; Altitude training for improvements in sea level performance, *Sports Med.*, 22, 251-263 (1996)

- 3) Davies CTM and Sargeant AJ ; Effects of hypoxic training on normoxic maximal aerobic power output, *Eur. J. Appl. Physiol.*, 33, 227-236 (1974)
- 4) Levine BD, Friedman DB, Engfred K, Hanel B, Kjaer M, Clifford PS and Secher NH ; The effect of normoxic or hypobaric hypoxic endurance training on the hypoxic ventilatory response, *Med. Sci. Sports Exerc.*, 24, 769-775 (1992)
- 5) Benoit H, Germain M, Barthélémy JC, Denis C, Castells J, Dormois D, Lacour JR and Geysant A ; Pre-acclimatization to high altitude using exercise with normobaric hypoxic gas mixtures, *Int. J. Sports Med.*, 13, S213-S216 (1992)
- 6) Desplanches D, Hoppeler H, Linossier MT, Denis C, Claassen H, Dormois D, Lacour JR and Geysant A ; Effects of training in normoxia and normobaric hypoxia on human muscle ultrastructure, *Eur. J. Physiol.*, 425, 263-267 (1993)
- 7) Melissa L, MacDougall JD, Tanopolsky MA, Cipriano N and Green HJ ; Skeletal muscle adaptations to training under normobaric hypoxic versus normoxic conditions, *Med. Sci. Sports Exerc.*, 29, 238-243 (1997)
- 8) Emonson DL, Aminuddin AHK, Wight RL, Scroop GC and Gore CJ ; Training-induced increases in sea level $\dot{V}O_{2max}$ and endurance are not enhanced by acute hypobaric exposure, *Eur. J. Appl. Physiol.*, 76, 8-12 (1997)
- 9) Forster HV, Dempsey JA, Birnbaum ML, Reddan WG, Thoden J, Grover RF and Rankin J ; Effect of chronic exposure to hypoxia on ventilatory response to CO₂ and hypoxia, *J. Appl. Physiol.*, 31, 586-592 (1971)
- 10) White DP, Gleeson K, Pickett CK, Rannels AM, Cymerman A and Weil JV ; Altitude acclimatization: influence on periodic breathing and chemoresponsiveness during sleep, *J. Appl. Physiol.*, 63, 401-412 (1987)
- 11) Schoene RB, Roach RC, Hackett PH, Sutton JR, Cymerman A and Houston CS ; Operation Everest II: ventilatory adaptation during gradual decompression to extreme altitude, *Med. Sci. Sports Exerc.*, 22, 804-810 (1990)
- 12) Sato M, Severinghaus JW, Powell FL, Xu FD and Spellman JrMJ ; Augmented hypoxic ventilatory response in men at altitude, *J. Appl. Physiol.*, 73, 101-107 (1992)
- 13) Masuyama S, Kimura H, Sugita T, Kuriyama T, Tatsumi K, Kunitomo F, Okita S, Tojima H, Yuguchi

- Y, Watanabe S and Honda Y ; Control of ventilation in extreme-altitude climbers, *J. Appl. Physiol.*, 61, 500-506 (1986)
- 14) Mathew L, Gopinathan PM, Purkayastha SS, Gupta JS and Nayar HS ; Chemoreceptor sensitivity and maladaptation to high altitude in man, *Eur. J. Appl. Physiol.*, 51, 137-144 (1983)
- 15) Katayama K, Sato Y, Ishida K, and Miyamura M ; The effects of intermittent exposure to hypoxia during endurance exercise training on the ventilatory responses to hypoxia and hypercapnia in humans, *Eur. J. Appl. Physiol.*, 78, 189-194 (1998)
- 16) Read DJC ; A clinical method for assessing the ventilatory response to carbon dioxide, *Aust. Ann. Med.*, 16, 20-32 (1967)
- 17) McClean PA, Phillipson EA, Martinez D and Zamel N ; Single breath of CO₂ as a clinical test of the peripheral chemoreflex, *J. Appl. Physiol.*, 64, 84-89 (1988)
- 18) Khoo MCK ; A model-based evaluation of the single-breath CO₂ ventilatory response test, *J. Appl. Physiol.*, 68, 393-399 (1990)
- 19) Byrne-Quinn E, Weil JV, Sodal, IE, Filley GF and Grover RF ; Ventilatory control in the athlete, *J. Appl. Physiol.*, 30, 91-98 (1971)
- 20) Schoene RB ; Control of ventilation in climbers to extreme altitude, *J. Appl. Physiol.*, 53, 886-890 (1982)
- 21) Scoggin CH, Doekel RD, Kryger MH, Zwillich CW and Weil JV ; Familial aspects of decreased hypoxic drive in endurance athletes, *J. Appl. Physiol.*, 44, 464-468 (1978)
- 22) Bradley BL, Mestas J, Forman J and Unger KM ; The effect on respiratory drive of a prolonged physical conditioning program, *Am. Rev. Respir. Dis.*, 122, 741-746 (1980)
- 23) Miyamura M and Ishida K ; Adaptive changes in hypercapnic ventilatory response during training and detraining, *Eur. J. Appl. Physiol.*, 60, 353-359 (1990)
- 24) Benoit H, Busso T, Castells J, Denis C and Geysant A ; Influence of hypoxic ventilatory response on arterial O₂ saturation during maximal exercise in acute hypoxia, *Eur. J. Appl. Physiol.*, 72, 101-105 (1995)
- 25) Martin BJ, Weil JV, Sparks KE, McCullough RE and Grover RF ; Exercise ventilation correlates positively with ventilatory chemoresponsiveness, *J. Appl. Physiol.*, 45, 557-564 (1978)
- 26) Martin BJ, Sparks KE, Zwillich CW and Weil JV ; Low exercise ventilation in endurance athletes, *Med. Sci. Sports*, 11, 181-185 (1979)
- 27) Pianosi P and Khoo MCK ; Change in the peripheral CO₂ chemoreflex from rest to exercise, *Eur. J. Appl. Physiol.*, 70, 360-366 (1995)