

# 短期間の間欠的低酸素暴露が 持久的鍛練者の呼吸循環系に及ぼす影響

名古屋大学 片山敬章  
(共同研究者) 同 松尾 宏  
同 石田浩司  
同 森 滋夫  
同 宮村実晴

## The Effect of Short-Term Intermittent Hypoxia on Cardiorespiratory Adaptation in Endurance Trained Athletes

by

Keisho Katayama, Koji Ishida, Miharu Miyamura  
*Research Center of Health, Physical Fitness and Sports,*

*Nagoya University*

Hiroshi Matsuo

*Graduate School of Medicine, Nagoya University*

Shigeo Mori

*Space Medicine Research Center,*

*Research Institute of Environmental Medicine, Nagoya University*

### ABSTRACT

The aim of this study was to clarify the effects of intermittent hypoxia on endurance running performance and cardiorespiratory adaptation in trained endurance athletes. Ten trained male endurance runners volunteered to participate in this study. The subjects in the hypoxic group (n=5) were exposed to a simulated altitude of 4,500 m for 90 min, three times a week for 3 weeks. The measurements of 3,000-m running time, cardiorespiratory parameters during maximal exercise test, and hematological status at rest were performed before (Pre) and after intermittent hypoxia for 3 weeks (Post). These measurements

were repeated after the cessation of intermittent hypoxia for 3 weeks (3wk). The same parameters were measured in the control group (n=5), which was not exposed to intermittent hypoxia, at Pre, Post, and 3wk. The 3,000-m running time in the hypoxic group improved significantly ( $p<0.05$ ) following intermittent hypoxia, but not in the control group. There were no changes cardiorespiratory parameters to maximal exercise in either group at Post, while oxygen uptake ( $\dot{V}O_2$ ) during submaximal exercise in the hypoxic group decreased significantly ( $p<0.05$ ) after intermittent hypoxia. No changes in resting hematological parameters were found after intermittent hypoxia. The improved 3,000-m running time and the decreased  $\dot{V}O_2$  during submaximal exercise returned to Pre level after the cessation of intermittent hypoxia for 3 weeks. These results suggest that intermittent hypoxia could improve submaximal exercise efficiency and endurance running performance, but these improvements do not continue after the cessation of intermittent hypoxia for 3 weeks.

## 要 旨

本研究の目的は、安静時における間欠的低酸素暴露が持久的鍛練者におけるパフォーマンスおよび呼吸循環応答に及ぼす影響を明らかにすることである。持久的鍛練者10名を被検者とし、低酸素群およびコントロール群それぞれ5名ずつとした。低酸素暴露には低圧室を用い、高度を4,500mに設定、暴露時間および期間は90分/日、3日/週、3週間とした。3,000mランニングタイム、最大運動テストによる呼吸循環パラメータ、安静時の血液成分の測定を低酸素暴露前後、さらに低酸素暴露終了から3週間後に行った。低酸素群において、3,000mランニングタイムの有意な向上が認められた。向上したランニングタイムは暴露停止から3週間後には低下傾向が見られた。最大運動テストによる最大酸素摂取量などの呼吸循環パラメータには両群ともに有意な変化は見られなかった。低酸素群において、最大下運動中の酸素摂取量 ( $\dot{V}O_2$ ) の有意な低下が間欠的低酸素暴露後に認められた。低下した最大下運動中の  $\dot{V}O_2$  は暴露停止から3週間後には暴露前のレベルまで戻

った。安静時の血液成分に関しては両群ともに実験期間を通じて有意な変化は見られなかった。これらの結果から、安静時の間欠的低酸素暴露により持久的鍛練者における持久的パフォーマンスと最大下運動時の運動効率が向上すること、しかしながら、この向上は暴露停止から3週間は維持されないことが明らかとなった。

## 緒 言

間欠的な低酸素暴露による身体適応に関する研究の多くは1930年代より旧ソビエト連邦にて行われており、高高所登山前の順化や、様々な疾患への治療に有効であることが報告されている<sup>1)</sup>。

また、平地における持久的パフォーマンス向上の手段の一つとして、間欠的な低酸素暴露中に行う持久的トレーニング(平地滞在+高所トレーニング、いわゆる Living low-training high) が用いられており、パフォーマンスや呼吸循環系の変化に関してもこれまで数多くの研究が行われてきた<sup>2, 3, 4)</sup>。一方、安静時の間欠的低酸素暴露が呼吸循環応答や血液成分に及ぼす影響が近年注目され、いくつかの研究結果が報告されている<sup>5, 6, 7, 8)</sup>。

Garciaら<sup>9)</sup>は、安静状態における常圧低酸素への暴露(13%酸素濃度, 2時間/日)を2週間行い, 網状赤血球濃度の有意な増加を認めている。さらに, Rodriguezら<sup>10)</sup>もまた, 安静時の間欠的な低圧低酸素暴露(高度4,000~5,500 m, 90分/日, 3日/週, 3週間)により, 赤血球数が増加することを明らかにした。これらの結果から, 安静状態での間欠的な低酸素暴露が平地環境における持続的パフォーマンス向上に有効ではないかと考えられている<sup>11)</sup>。Hellemans<sup>12)</sup>とCedaro<sup>13)</sup>は持続的アスリートを対象に, 10~20日間の安静時における間欠的な常圧低酸素暴露(2~3時間/日, 9~10%酸素濃度)を行い, 血液成分ならびに持続的パフォーマンスの向上が認められたことを報告している。しかしながら, これらの研究ではコントロール群を用いておらず, 持続的鍛練者に対する安静時の間欠的な低酸素暴露が持続的パフォーマンスを向上させるか否かについては明らかではない。さらに, 持続的鍛練者を対象とし, 安静時の間欠的な低酸素暴露による呼吸循環系の適応を報告した研究はわれわれの知る限り見当たらず, 不明である。

そこで, 本研究では持続的鍛練者における安静時の間欠的な低酸素暴露が持続的パフォーマンスおよび呼吸循環系に及ぼす影響について明らかにす

ることを目的とした。

## 1. 方法

### 1.1 被検者

大学陸上部中長距離パートに所属し, 最大酸素摂取量が $65\text{ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 以上の男性10名を被検者とし, 低酸素群5名, コントロール群5名に振り分けた。年齢, 身長および体重は低酸素群で $20.4\pm 1.5$ 歳,  $172.3\pm 5.3\text{cm}$ ,  $55.5\pm 3.0\text{kg}$ , コントロール群で $23.2\pm 3.2$ 歳,  $172.0\pm 1.9\text{cm}$ ,  $58.3\pm 4.4\text{kg}$ (平均値 $\pm$ 標準偏差)である。すべての被検者には本実験の目的, 方法などを十分に説明し, 実験参加の同意を得た。本研究は名古屋大学総合保健体育科学センター倫理委員会の承認を受けて実施した。

### 1.2 実験進行

本研究の実験進行を図1に示した。低酸素暴露前(Pre)に最大運動テスト, 3,000mタイムトライアル, 安静時において採血を行った。低酸素暴露のプロトコルは, 血液成分に有意な改善が認められたRodriguezら<sup>10)</sup>の研究とほぼ同様とした。すなわち, 低酸素暴露には低圧室を用い(名古屋大学環境医学研究所), 高度を4,500mに設定,

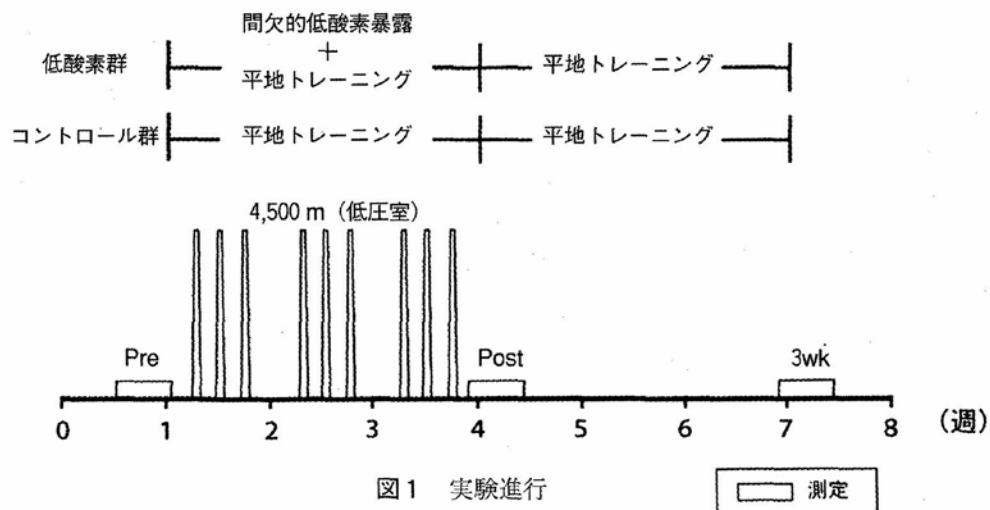


図1 実験進行

暴露時間および期間は90分/日, 3日/週, 3週間とした。低酸素暴露後に最大運動テスト, 3,000mタイムトライアルおよび採血を行った (Post)。さらに, これらの測定を暴露停止から3週間後に再度行った (3wk)。同様の測定をコントロール群においても実施した。両群の被検者は実験期間中に平地にて通常のトレーニングを行った。

### 1. 3 最大運動テスト

最大酸素摂取量 ( $\dot{V}O_{2max}$ ) の測定にはトレッドミルを用い, Modified Å strand-Saltin プロトコールを使用した<sup>14)</sup>。このプロトコールは9.0miles/hの速度, 傾斜0%で2分間, その後疲労困憊にいたるまで2分ごとに傾斜を2%ずつ増加させるものである。呼気ガスは1分ごと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質量分析器 (アルコ, ARCO-1000) により測定した。心拍数の測定には双極誘導心電計 (日本光電, OEC-6401) を用いた。 $\dot{V}O_{2max}$  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酸素摂取量 ( $\dot{V}O_2$ ) 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 ( $HR_{max} = 220 - \text{年齢}$ ) に達している

こと, 3) 呼吸交換比 (RER) が1.1以上であること, である。

### 1. 4 持久的パフォーマンス

持久的パフォーマンスの評価は400mトラックを用いた3,000mタイムトライアルにより行った。

### 1. 5 血液パラメータ

安静時において採血を行い (早朝8:00), ヘモグロビン濃度, ヘマトクリット, 赤血球数, 網状赤血球濃度を測定した。

### 1. 6 統計処理

各変数の測定結果を平均値±標準偏差で示した。各群での実験期間中の変数の差の検定には, Newman-Keuls テストを用いた。危険率 (P) 5%未満を有意水準とした。

## 2. 結果

間欠的低酸素暴露の1および2日目には3名の被検者が軽い頭痛を訴えたが, その後は症状は見られなかった。低酸素群およびコントロール群での平地環境におけるトレーニング量は (100 ~ 115km/週) 実験期間を通じて両群間で差は認められなかった。

表1 最大運動テストにおける疲労困憊時の呼吸循環パラメータの変化

	群	Pre	Post	3wk
$\dot{V}O_{2max}$ ( $l \cdot \text{min}^{-1}$ )	H	3.75 ± 0.26	3.73 ± 0.28	3.76 ± 0.31
	C	4.04 ± 0.50	4.09 ± 0.53	4.03 ± 0.44
$\dot{V}O_{2max}$ ( $ml \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ )	H	67.6 ± 2.5	67.7 ± 2.0	68.4 ± 3.1
	C	69.1 ± 2.8	69.3 ± 2.6	69.5 ± 2.4
$\dot{V}CO_{2max}$ ( $l \cdot \text{min}^{-1}$ )	H	4.45 ± 0.38	4.46 ± 0.30	4.53 ± 0.30
	C	4.77 ± 0.53	4.77 ± 0.43	4.87 ± 0.48
$\dot{V}E_{max}$ ( $l \cdot \text{min}^{-1}$ )	H	148.9 ± 17.3	147.1 ± 17.0	148.5 ± 18.0
	C	146.0 ± 7.8	146.5 ± 9.3	147.8 ± 9.5
RER	H	1.18 ± 0.05	1.19 ± 0.03	1.20 ± 0.02
	C	1.18 ± 0.04	1.17 ± 0.06	1.20 ± 0.05
$HR_{max}$ ( $\text{beats} \cdot \text{min}^{-1}$ )	H	187.2 ± 6.2	189.0 ± 4.6	189.2 ± 7.2
	C	191.8 ± 3.3	190.2 ± 5.4	191.4 ± 4.0

平均値±標準偏差; H, 低酸素群; C, コントロール群;  $\dot{V}O_{2max}$ , 最大酸素摂取量;  $\dot{V}CO_{2max}$ , 最大炭酸ガス排出量;  $\dot{V}E_{max}$ , 最大分時換気量; RER, 呼吸交換比;  $HR_{max}$ , 最高心拍数

### 2.1 最大運動テスト

最大運動テストにおける疲労困憊時の呼吸循環パラメータを表1に示した。 $\dot{V}O_{2max}$ , 最大炭酸ガス排出量 ( $\dot{V}CO_{2max}$ ), 最大分時換気量 ( $\dot{V}E_{max}$ ), RER,  $HR_{max}$  は実験期間を通じて両群とも有意な変化は見られなかった。

一方, 最大運動テストにおける最初の4つのス

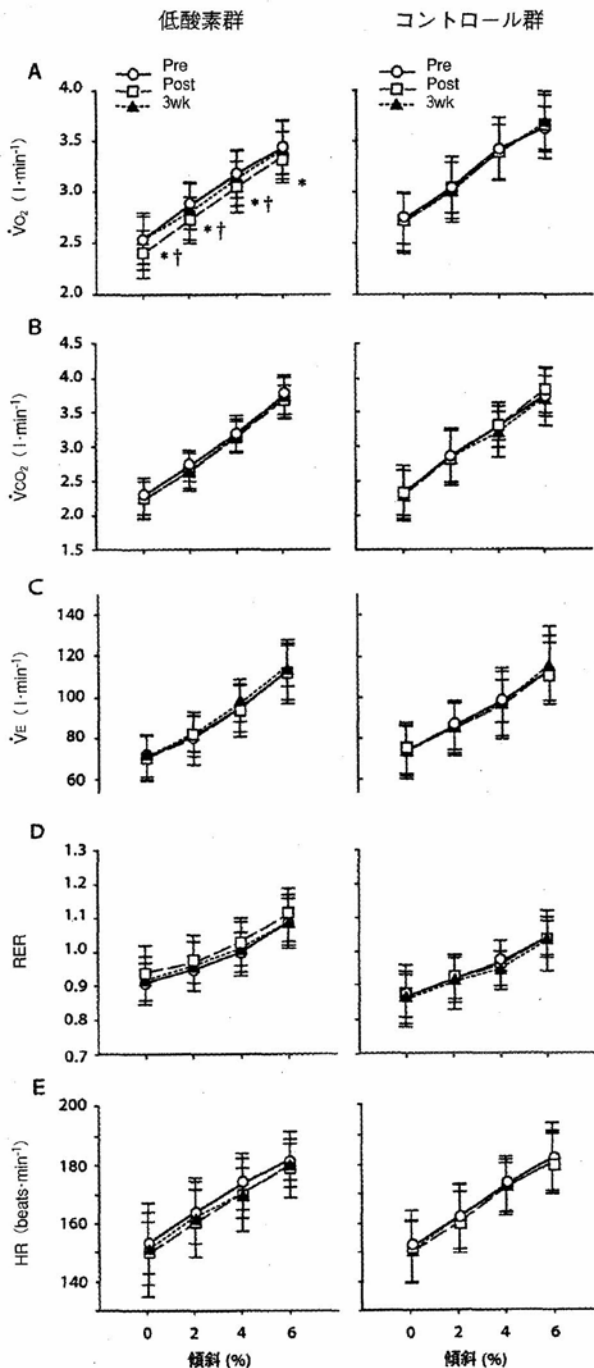


図2 最大下運動中の $\dot{V}O_2$  (A),  $\dot{V}CO_2$  (B),  $\dot{V}E$  (C), RER (D), HR (E) の変化  
 \* Pre vs. Post. ( $p<0.05$ )  
 † Post vs. 3wk ( $p<0.05$ )

テージ (傾斜0, 2, 4, 6%) において低酸素群で低酸素暴露後に有意な ( $p<0.05$ )  $\dot{V}O_2$ の低下が認められた (図2A). 低下した $\dot{V}O_2$ は暴露停止から3週間後 (3wk) にはPreとほぼ同じレベルに戻った (図2A). 同様に, 最大下運動時におけるHRも統計的な有意差は見られなかったが, 低酸素暴露後に低下の傾向が見られた (図2E). 最大下運動時のRERは増加の傾向が見られたが, 統計的に有意ではなかった (図2D).  $\dot{V}CO_2$ ,  $\dot{V}E$ は間欠的低酸素暴露による変化は認められなかった. コントロール群では, すべてのパラメータにおいて有意な変化は見られなかった (図2).

### 2.2 持久的パフォーマンス

2名の被検者 (それぞれの群で1名ずつ) が3回のうち1回ずつトライアル前に脚の違和感を訴えたため, 3回の3,000mタイムトライアルを実施することができなかった. 従って, タイムトライアルについては両群4名ずつとし統計解析を行った. 図3に3,000mタイムトライアルの結果を示した. 低酸素群では暴露後に3,000mパフォーマンスの有意な ( $p<0.05$ ) 向上が認められたが, 向上したパフォーマンスは3週間の暴露停止後に低下の傾向が見られた. 一方, コントロール群では実験期間を通じて有意な変化は認められなかった.

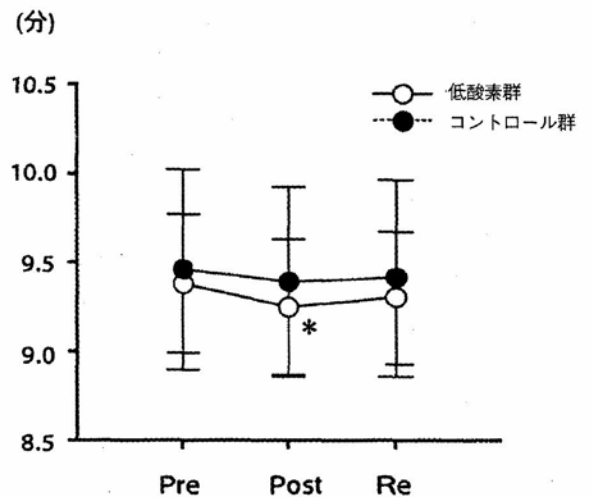


図3 3,000mランニングタイムの変化  
 \*Pre vs. Post ( $p<0.05$ ) 低酸素群

表2 血液成分の変化

	群	Pre	Post	3wk
ヘモグロビン ( $\text{g} \cdot \text{dl}^{-1}$ )	H	14.1 $\pm$ 0.8	14.6 $\pm$ 0.9	14.5 $\pm$ 0.7
	C	14.7 $\pm$ 0.5	14.9 $\pm$ 0.7	14.6 $\pm$ 0.7
ヘマトクリット (%)	H	40.3 $\pm$ 4.4	42.4 $\pm$ 5.3	42.4 $\pm$ 4.6
	C	45.2 $\pm$ 1.6	45.7 $\pm$ 1.2	45.3 $\pm$ 2.6
赤血球数 ( $10^6 \cdot \mu\text{l}^{-1}$ )	H	4.39 $\pm$ 0.29	4.57 $\pm$ 0.38	4.56 $\pm$ 0.51
	C	4.92 $\pm$ 0.17	4.97 $\pm$ 0.18	4.91 $\pm$ 0.30
網状赤血球数 (%)	H	1.2 $\pm$ 0.3	0.8 $\pm$ 0.4	1.1 $\pm$ 0.4
	C	0.9 $\pm$ 0.4	0.9 $\pm$ 0.4	1.0 $\pm$ 0.6

平均値 $\pm$ 標準偏差；H, 低酸素群；C, コントロール群

### 2. 3 血液パラメータ

実験期間中の血液成分の変化を表2に示した。両群においてすべての血液成分に有意な変化は見られなかった。

### 3. 考察

本研究で明らかになったことは、1) 間欠的低酸素暴露により3,000mランニングタイムの向上が認められ、この向上したランニングタイムは暴露停止から3週間後には低下傾向が見られた、2) 最大運動時の呼吸循環パラメータおよび安静時の血液成分は間欠的低酸素暴露により変化が見られなかった、3) 最大下運動時の $\dot{V}_{O_2}$ の有意な低下が間欠的低酸素暴露により認められたが、暴露停止3週間後には暴露前のレベルに戻った、であった。

高所・低酸素トレーニングによるパフォーマンスの変化に関しては、これまで数多くの報告がなされてきた。しかしながら、安静時の間欠的低酸素暴露と平地でのトレーニングとの組み合わせが持続的パフォーマンスに及ぼす影響についての報告は少ない。Hellemans<sup>12)</sup>とCedaro<sup>13)</sup>は、2~3時間/日、10~21日間の常圧低酸素環境(9~10%酸素濃度)への安静状態での間欠的暴露により、持続的パフォーマンスの向上が認められたと報告している。しかしながら、これらの研究では、コントロール群を用いておらず、安静時の間欠的低酸素暴露により持続的アスリートのパフォーマンスが向上するか否かについては明らかではない。本研究では、低酸素暴露を行わず平地で低酸素群

と同様のトレーニングを行うコントロール群を用い、パフォーマンスの変化について検討を行った。結果、低酸素群では3週間の間欠的低酸素暴露により、3,000mランニングタイムの有意な向上が見られ、コントロール群では変化が認められなかった(図3)。この結果は、安静時の間欠的低酸素暴露と平地環境におけるトレーニングとの組み合わせが持続的鍛練者におけるパフォーマンスを向上させることを示唆している。

高所・低酸素トレーニングが持続的パフォーマンスに及ぼす影響については非常に数多くの研究結果が示されているが、高所・低酸素トレーニング終了後のパフォーマンスの変化や呼吸循環系の変化についての報告は少ない。さらに、間欠的な低酸素暴露停止後の持続的パフォーマンスや呼吸循環系の変化に関する報告は見当たらない。本研究では、3,000mタイムトライアルを暴露停止から3週間後に再度行った(図1)。その結果、間欠的低酸素暴露後に向上した持続的パフォーマンスは平地でのトレーニングを継続しているにも関わらず、暴露停止3週間後には維持されなかった(図3)。この結果は、高所滞在+高所トレーニング(Living high-training high)では平地に戻った後2~3週間後に持続的パフォーマンスのピークが認められるという研究や<sup>15,16)</sup>、高所滞在+平地トレーニング(Living high-training low)ではパフォーマンスの向上が3週間維持される<sup>14)</sup>という研究とは異なる結果となった。なぜこの違いが認められたのかについては、低酸素暴露の時間お

よび期間の違いや被検者の特性などが考えられるが、本研究からそれらを明らかにすることはできない。しかしながら、本研究の結果から安静時の間欠的低酸素暴露後のパフォーマンスの変化は、Living high-training highやLiving high-training lowとは異なることが明らかとなった。

高所滞在や連続的低酸素暴露により、赤血球数の増加が認められることは数多くの研究により明らかにされているが、近年、安静時の間欠的低酸素暴露においても造血作用が認められることがいくつかの研究により報告されている<sup>9,12,13</sup>。Rodriguezら<sup>10</sup>もまた、週3回、3週間の間欠的低酸素暴露（90分/日）により赤血球数が有意に増加することを明らかにした。一方、本研究では間欠的低酸素暴露により安静時における血液成分に有意な変化は認められなかった（表2）。この違いにはいくつかの要因が考えられる。第一に、低酸素の程度であるが、本研究では低圧室を4,500mに設定した。この高度はHellemans<sup>12</sup>やCedaro<sup>13</sup>の研究にて設定された9～10%酸素濃度（5,800～6,400m高度に相当）より低い。しかしながら、Garciaら<sup>9</sup>は13%酸素濃度（高度3,800m相当）を用いた間欠的低酸素暴露により血液成分が有意に変化したことを報告している。したがって、本研究で用いた低酸素刺激の程度（4,500m高度）は造血を促すには十分な刺激であることが推測される。第2に、低酸素暴露の期間について、本研究では3回/週（1日おき）、3週間に設定した。これは血液成分に改善が認められたというRodriguezら<sup>10</sup>のプロトコールに準じたものである。しかしながら、10～20日間、連日の間欠的低酸素暴露により赤血球数や網状赤血球濃度が増加したことが報告されている<sup>12,13</sup>。これらの結果を考慮すると、1日おきの低酸素暴露では赤血球数を増加させるには不十分であるのかもしれない。第3に、1日の暴露時間に関して、酸素濃度が13%以下（高度3,800m以上）の場合、

暴露開始から84～120分の間にエリスロポエチンの有意な増加が認められることが報告されている<sup>17</sup>。Freyら<sup>18</sup>は、75分/日の間欠的低酸素暴露（9%酸素濃度、3週間）では血液成分に変化が認められないことを明らかにしている。一方、Hellemans<sup>12</sup>とCedaro<sup>13</sup>は、2～3時間/日の暴露により血液成分が改善したことを、また、Garciaら<sup>9</sup>は2時間/日の低酸素暴露により網状赤血球に有意な増加が見られたことを報告している。したがって、間欠的低酸素暴露によって造血が刺激されるには、少なくとも1日2時間以上の時間が必要であることが推測される。

低酸素環境への適応の中で、平地における持久的パフォーマンスを向上させる最も重要な適応は、血中の酸素運搬能を改善する赤血球数の増加であると考えられている<sup>19,20</sup>。実際に、高所トレーニングによるパフォーマンスの向上と赤血球数の増加が見られ、両者間に有意な相関関係が見られることが先行研究により報告されている<sup>14,21</sup>。従って、これらの研究では向上した持久的パフォーマンスのメカニズムは血中の酸素運搬の増加の結果であることが考えられる。しかしながら、本研究では血液成分の変化は認められず、間欠的低酸素暴露や暴露停止による持久的パフォーマンスの変化は血中の酸素運搬系の変化では説明することができない。

これまでの高所トレーニング<sup>14,22</sup>や高所滞在<sup>23,24</sup>での研究では、最大下運動中の $\dot{V}O_2$ は変化しないことが示されている。しかしながら、近年、Greenら<sup>25</sup>とGoreら<sup>26</sup>は高所滞在やLiving high-training lowにより最大下運動中の $\dot{V}O_2$ が低下することを報告している。本研究においても最大運動テスト時の最初の4ステージにおいて $\dot{V}O_2$ の有意な低下が確認された（図2A）。これらの結果から、安静時の間欠的低酸素暴露によっても最大下運動時の $\dot{V}O_2$ の低下が引き起こされることが明らかとなった。いくつかのメカニズムが間

欠的低酸素暴露による最大下運動時の $\dot{V}O_2$ 低下に関係すると考えられる。第一に、運動時では呼吸筋で消費する酸素の量が増加し、体全体で消費する $\dot{V}O_2$ の一部を占めることから<sup>27)</sup>、もし呼吸筋における酸素消費の低下が認められれば、最大下運動時の $\dot{V}O_2$ 低下の要因であると考えられる。しかしながら、本研究では、最大下運動中の換気量の低下は低酸素暴露により見られなかった(図2C)。したがって、間欠的低酸素暴露後の最大下運動時の $\dot{V}O_2$ の低下は呼吸筋における $\dot{V}O_2$ の低下によるものではないことが推測される。第二に、有酸素性から無酸素性へのエネルギー供給系の移行が考えられる。しかしながら、間欠的低酸素暴露による最大下運動時における乳酸値の低下が先行研究により報告されている<sup>28,29)</sup>。それ故に、間欠的な低酸素暴露による運動時の無酸素性代謝への移行は考えにくい。第三に、間欠的低酸素暴露後に、統計的に有意な差は得られなかったが、運動時のRERに増加傾向が見られた。この結果は、高所滞在やLiving high-training lowによって最大下運動時の酸素摂取量が低下したGreenら<sup>25)</sup>やGoreら<sup>26)</sup>の研究結果と一致する。Goreら<sup>25)</sup>によれば、RERの増加は一定の酸素消費に対するエネルギー生成効率が高い、脂質代謝から炭水化物代謝への移行を反映するものであると考えられている。さらに、高所での運動時には脂質代謝よりもむしろ炭水化物代謝が優先的に行われることも報告されている<sup>30,31)</sup>。これらのことから、脂質代謝から炭水化物代謝への移行も最大運動時の $\dot{V}O_2$ の低下の要因の一つとして考えられるかもしれない。第四に、間欠的低酸素暴露によるミトコンドリアにおけるエネルギー産生の効率化が考えられる。Serebrovskaya<sup>1)</sup>は、14日間の間欠的低酸素暴露によってミトコンドリアの呼吸調整の指標であるChance (State 3/State 4) と燐酸化率(ATP生成/酸素消費)が増加したことを報告している。この結果から、間欠的低酸素暴露による運動時の $\dot{V}O_2$

低下は酸素利用におけるエネルギー産生が効率化したことが関係していると考えられる。最後に、Greenら<sup>32,33)</sup>は、高所滞在大および高所トレーニング後に骨格筋における $Na^+-K^+-ATPase$ のdownregulationが引き起こされたことを報告している。従って、骨格筋におけるこのATP消費を減少するメカニズムも $\dot{V}O_2$ 低下の要因として含まれるかもしれない<sup>25,26)</sup>。

上述したように、本研究では間欠的低酸素暴露によって血液成分に変化は認められなかった。したがって、本研究で見られた持続的パフォーマンスの変化を血液成分の酸素運搬能力の変化によって説明することはできない。低酸素暴露後(Post)ならびに低酸素暴露停止から3週間後(3wk)における最大下運動時の $\dot{V}O_2$ の変化が持続的パフォーマンスと同じ変化をしたことは興味深い。最大下運動時における $\dot{V}O_2$ の変化は運動効率の変化を示しており、高い運動効率は持続的パフォーマンスに対して有益であると考えられている<sup>34)</sup>。実際に、同程度の $\dot{V}O_{2max}$ を持ったアスリートにおいて運動効率と持続的パフォーマンスの間に有意な相関関係が認められることが先行研究において報告されている<sup>35)</sup>。したがって、本研究における間欠的低酸素暴露による持続的パフォーマンスの変化が運動効率の変化によってもたらされた可能性は考えられる。この点を明らかにするためには、さらなる研究が必要である。

#### 4. まとめ

本研究では、間欠的低酸素暴露によって3,000mランニングタイムの有意な向上が認められた。最大運動時の呼吸循環応答、ならびに安静時の血液成分には有意な変化は認められなかった。間欠的低酸素暴露により、最大下運動時の $\dot{V}O_2$ の有意な低下が見られた。向上したランニングタイムおよび低下した最大下運動時の $\dot{V}O_2$ は暴露停止から3週間後には暴露前のレベルに戻った。これ



らの結果から、安静時の間欠的低酸素暴露により持続的パフォーマンスと運動効率の向上が認められること、しかしながらこれらは暴露停止から3週間は維持されないことが明らかとなった。

### 謝 辞

本研究を遂行するにあたり、金尾洋治先生（愛知県立看護短期大学）、白藤寛子氏（名古屋大学）、名古屋大学陸上部の皆様多大な協力を得た。記して謝意を表す。

最後に、本研究に助成いただいた、財団法人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) Serebrovskaya T.V.; Intermittent hypoxia research in the former Soviet Union and the Commonwealth of Independent States: history and review of the concept and selected applications, *High Alt. Med. Biol.*, 3, 205-221 (2002)
- 2) Terrados N., Melichna J., Sylven C., Jansson E. and Kaijser L.; Effects of training at simulated altitude on performance and muscle metabolic capacity in competitive road cyclists, *Eur. J. Appl. Physiol.*, 57, 203-209 (1988)
- 3) Desplanches D., Hoppeler H., Linossier M.T., Denis C., Claassen H., Dormois D., Lacour J.R. and Geysant A.; Effects of training in normoxia and normobaric hypoxia on human muscle ultrastructure, *Pluigers Arch.*, 425, 263-267 (1993)
- 4) Meeuwse T., Hendriksen L.J.M. and Holewijn M.; Training-induced increases in sea-level performance are enhanced by acute intermittent hypobaric hypoxia, *Eur. J. Appl. Physiol.*, 84, 283-290 (2001)
- 5) Serebrovskaya T.V., Karaban I.N., Kolesnikova E.E., Mishunina T.M., Kuzminskaya L.A., Serebrovsky A.N. and Swanson R.J.; Human hypoxic ventilatory response with blood dopamine content under intermittent hypoxic training, *Can. J. Physiol. Pharmacol.*, 77, 967-973 (1999)
- 6) Powell F.L. and Garcia N.; Physiological effects of intermittent hypoxia, *High Alt. Med. Biol.*, 1, 125-136 (2000)
- 7) Katayama K., Shima N., Sato Y., Qiu J., Ishida K., Mori S. and Miyamura M.; Effect of intermittent hypoxia on cardiovascular adaptations and response to progressive hypoxia in humans, *High Alt. Med. Biol.*, 2, 501-508 (2001)
- 8) Katayama K., Sato Y., Morotome Y., Shima N., Ishida K., Mori S. and Miyamura M.; Intermittent hypoxia increases ventilation and SaO<sub>2</sub> during hypoxic exercise and hypoxic chemosensitivity, *J. Appl. Physiol.*, 90, 1431-1440 (2001)
- 9) Garcia N., Hopkins S.R. and Powell F.L.; Effects of intermittent hypoxia on the isocapnic hypoxic ventilatory response and erythropoiesis in humans, *Respir. Physiol.*, 123, 39-49 (2000)
- 10) Rodriguez F.A., Ventura J.L., Casas M., Casas H., Pages T., Rama R., Ricart A., Palacios L. and Viscor G.; Erythropoietin acute reaction and haematological adaptations to short, intermittent hypobaric hypoxia, *Eur. J. Appl. Physiol.*, 82, 170-177 (2000)
- 11) Wilber R.L.; Current trends in altitude training, *Sports Med.*, 31, 249-265 (2001)
- 12) Hellemans J.; Intermittent hypoxic training: Pilot trial, Proceeding of the Second Annual International Altitude Symposium, Flagstaff (AZ), 145-154 (1999)
- 13) Cedaro R.L.; Intermittent hypoxic training (IHT) : The next frontier in altitude training, Proceeding of the Third Annual International Altitude Symposium, Flagstaff (AZ), 54-58 (2000)
- 14) Levine B.D. and Stray-Gundersen J.; "Living high-training low": effect of moderate-altitude acclimatization with low-altitude training on performance, *J. Appl. Physiol.*, 83, 102-112 (1997)
- 15) Dick F.W.; Training at altitude in practice, *Int. J. Sports Med.*, 13 (Suppl), S203-S205 (1992)
- 16) Bailey D.M. and Davies B.; Physiological implications of altitude training for endurance performance at sea level: A review, *Br. J. Sports Med.*, 31, 183-190 (1997)
- 17) Schmit W.; Effects of intermittent exposure to high altitude on blood volume and erythropoietic activity, *High Alt. Med. Biol.*, 3, 167-176 (2002)
- 18) Frey W.O., Zenhausem R., Colombani P.C. and Fehr J.; Influence of intermittent exposure to normobaric hypoxia on hematological indexes and exercise performance, *Med. Sci. Sports Exerc.*, 32 (Suppl),

- S65 (2000)
- 19) Ekblom B., Goldbarg A.N. and Gullbring B.; Response to exercise after blood loss and reinfusion, *J. Appl. Physiol.*, 33, 175-180 (1972)
  - 20) Buick F.J., Gledhill N., Froese A.B., Spriet L. and Meyers E.C.; Effect of induced erythrocythemia on aerobic work capacity, *J. Appl. Physiol.*, 48, 636-642 (1980)
  - 21) Stray-Gundersen J., Chapman R.F. and Levine B.D.; "Living high-training low" altitude training improves sea level performance in male and female elite runners, *J. Appl. Physiol.*, 91, 1113-1120 (2001)
  - 22) Piehl-Aulin K., Svedenhag J., Wide L., Berglund B. and Saltin B., Short-term intermittent normobaric hypoxia - haematological, physiological and mental effects, *Scand. J. Med. Sci. Sports*, 8, 132-137 (1998)
  - 23) Wolfel E.E., Groves B.M., Brooks G.A., Butterfield G.E., Mazzeo R.S., Moore L.G., Sutton J.R., McCullough R.G., Huang S.Y., Sun S.F., Grover R.F., Hultgren H.N. and Reeves J.T.; Oxygen transport during steady-state submaximal exercise in chronic hypoxia, *J. Appl. Physiol.*, 70, 1129-1136 (1991)
  - 24) Grassi B., Marzorati M., Kayser B., Bordini M., Colombini A., Conti M., Marconi C. and Cerretelli P., Peak blood lactate and blood lactate vs. workload during acclimatization to 5,050m and in deacclimatization, *J. Appl. Physiol.*, 80, 685-692 (1996)
  - 25) Green H.J., Roy B., Grant S., Hughson R., Burnett M., Otto C., Pipe A., McKenzie D. and Johnson M.; Increases in submaximal cycling efficiency mediated by altitude acclimatization, *J. Appl. Physiol.*, 89, 1189-1197 (2000)
  - 26) Gore C.J., Hahn A.G., Aughey R.J., Martin D.T., Ashenden M.J., Clark S.A., Garnham A.P. Roberts A.D., Slater G.J. and McKenna M.J.; Live high:train low increases muscle buffer capacity and submaximal cycling efficiency, *Acta. Physiol. Scand.*, 173, 275-286 (2001)
  - 27) Harms C.A. and Dempsey J.A.; Cardiovascular consequences of exercise hyperpnea, *Exerc. Sports Sci. Rev.*, 27, 37-62 (1999)
  - 28) Rodriguez F.A., Casas H., Casas M., Pages T., Rama R., Ricart A., Ventura J.L., Ibanez J. and Viscor G.; Intermittent hypobaric hypoxia stimulates erythropoiesis and improves aerobic capacity, *Med. Sci. Sports Exerc.*, 31, 264-268 (1999)
  - 29) Casas M., Casas H., Pages T., Rama R., Ricart A., Ventura J.L., Ibanez J. Rodriguez F.A., and Viscor G.; Intermittent hypobaric hypoxia induces altitude acclimation and improves the lactate threshold, *Aviat. Space Environ. Med.*, 71, 125-130 (2000)
  - 30) Brooks G.A., Butterfield G.E., Wolfe R.R., Groves B.M., Mazzeo R.S., Sutton J.R., Wolfel E.E. and Reeves J.T.; Increased dependence on blood glucose after acclimatization to 4,300 m, *J. Appl. Physiol.*, 70, 919-927 (1991)
  - 31) Roberts A.C., Butterfield G.E., Cymerman A., Reeves J.T., Wolfel E.E. and Brooks G.A.; Acclimatization to 4,300-m altitude decreases reliance on fat as a substrate, *J. Appl. Physiol.*, 81, 1762-1771 (1996)
  - 32) Green H., Roy B., Grant S., Burnett M., Tupling R., Otto C., Pipe A. and McKenzie D.; Downregulation in muscle Na<sup>+</sup>-K<sup>+</sup>-ATPase following a 21-day expedition to 6,194 m, *J. Appl. Physiol.*, 88, 634-640 (2000)
  - 33) Green H. MacDougall J., Tarnopolsky M. and Melissa N.L.; Downregulation of Na<sup>+</sup>-K<sup>+</sup>-ATPase pumps in skeletal muscle with training in normobaric hypoxia, *J. Appl. Physiol.*, 86, 1745-1748 (1999)
  - 34) Jones A.M. and Carter H.; The effect of endurance training on parameters of aerobic fitness, *Sports Med.*, 29, 373-386 (2000)
  - 35) Morgan D.W. and Craib M.; Physiological aspects of running economy, *Med. Sci. Sports Exerc.*, 24, 456-461 (1992)