

ヘリウム酸素混合ガス吸入による換気量増加が高所での運動パフォーマンスに及ぼす影響

小川剛司

徳山大学 経済学部

(旧所属：筑波大学人間総合科学研究科)

## Abstract

In hypobaric hypoxic condition, we previously reported that the magnitude of increase in pulmonary ventilation (VE) related to the extent of decrease in maximal oxygen uptake ( $VO_{2max}$ ). It is hypothesized that if VE during maximal exercise make increase,  $VO_{2max}$  and exercise performance would improve in hypobaric hypoxia. Breathing a helium oxygen gas mixture ( $HeO_2$ ; 20.9% $O_2$ ) is used to reduce air density, expecting the increase in ventilation. Therefore, to test the hypothesis that the maximal oxygen uptake ( $VO_{2max}$ ) and exercise performance in hypobaric hypoxia would increase by increase in VE, the subjects underwent two type of exercise in hypobaric hypoxia with  $HeO_2$  breathing. Twelve healthy young male subjects performed treadmill running incremental test to exhaustion at 560 mmHg (2,500m above sea level), and intermittent sprint cycling test at 520mmHg (3,000m above sea level). The exercise tests were carried out in hypobaric hypoxia with breathing  $HeO_2$  and with normal air (Air) in random order.  $VE_{max}$ ,  $VO_{2max}$  and arterial oxyhemoglobin saturation ( $SaO_2$ ) were measured during incremental exercise. Power output, VE,  $VO_2$  and  $SaO_2$  were measured during intermittent sprint cycling.  $VE_{max}$ ,  $VO_{2max}$  and  $SaO_2$  were 15.2, 7.5 and 4.0% higher, respectively (all  $p<0.05$ ) with  $HeO_2$  than in Air ( $VE_{max}$ ,  $171.9 \pm 16.1$  vs.  $150.1 \pm 16.9$  L/min;  $VO_{2max}$ ,  $52.50 \pm 9.13$  vs.  $48.72 \pm 5.35$  ml/kg/min;  $SaO_2$ ,  $79 \pm 3$  vs.  $76 \pm 3$  %). There was a linear relationship between the increment of  $VE_{max}$  and the increment of  $VO_{2max}$  ( $r=0.72$ ;  $p<0.05$ ). The air-flow resistance can be a limiting factor of  $VE_{max}$  and consequently,  $VO_{2max}$  is limited in part by  $VE_{max}$ . On the other hand, in intermittent sprint cycling, the power output and  $VO_2$  were not significantly different between in  $HeO_2$  and Air, despite of increase in VE. These results suggested in acute moderate hypobaric hypoxia, although the pulmonary ventilation and aerobic capacity increase by  $HeO_2$  breathing,  $HeO_2$  breathing does not change the performance and oxygen consumption in intermittent sprint exercise.

## 1. 緒言

高所トレーニングは、平地あるいは高所での運動能力の向上を目的として行われるトレーニングの総称であり、従来から主に持久的種目のトップアスリートの間でさかんに用いられている(Gore et al. 2001; Truijens et al. 2002). 特に近年、日本では女子マラソンのトップアスリートが積極的に高所トレーニングを行っていることが知られており、パフォーマンス向上に対する高所トレーニングの効果が注目されている。

高所トレーニングの効果は主に、高所滞在自体によるヘモグロビンの増加や心肺機能の向上などによって起こる酸素運搬能力の向上と、運動トレーニングによる運動刺激の合成効果による様々な生理的变化によるものと考えられている(Rusko 1996). 一方で、平地での運動パフォーマンスに対して、高所トレーニングが必ずしも効果的でなかったとする報告もある(Faulkner et al. 1967; Julian et al. 2004). 効果がなかった原因として、1)高所では有酸素能力および持久的運動パフォーマンスの低下により、十分な強度の運動トレーニングが行えないこと、2)先に述べた高所滞在によって期待されるヘモグロビン増加が見られない場合があること、3)高所におけるいわゆる高山病などの不適応を起こしてしまう場合があることなどが考えられている(Chapman et al. 1998a; Levine et al. 1997). 以上のような原因を解決して、より効果的な高所トレーニング法を開発することが望まれるが、高所トレーニング中の低圧下での運動トレーニングに用いられるような高強度運動時の運動能力や呼吸循環応答に対する低圧の影響や、低圧下での有酸素能力低下に関する生理学的機序については十分に明らかではない。

低圧低酸素下(高所)では酸素を利用してエネルギーを得る代謝過程の最大能力(有酸素能力)の指標である最大酸素摂取量( $VO_{2max}$ )は、低圧の程度が大きくなるにしたがって、ほぼ直線的に低下していくことが知られている(Fulco et al. 1998; Jackson et al. 1988). しかしながら、 $VO_{2max}$ はどの人においても必ずしも大気中の酸素分圧の低下に対して一律に低下していくわけではなく、その低下の程度には大きな個人差が見られる(Fulco et al. 1998). 先行研究では、 $VO_{2max}$ が高い競技者ほど低圧低酸素下で $VO_{2max}$ の低下が大きい傾向にあることが報告されていることなどからも(Gavin et al. 1998; Koistinen et al. 1995), 単に大気中の酸素分圧の低下だけでなく、低圧下での何らかの生体反応の違いが要因となって $VO_{2max}$ が低下するものと考えられる。

このような低圧低酸素下での $VO_{2max}$ 低下の要因として運動中の換気量(VE)に注目した研究において、低酸素下(13.3% $O_2$ )での最大換気量( $VE_{max}$ )は、 $VO_{2max}$ の低下率や運動中の動脈血酸素飽和度( $SaO_2$ )との間に正の相関関係があることが報告されている(Gavin et al. 1998). したがって、運動中の換気亢進の程度が、低圧下での $VO_{2max}$ 低下の要因の一つである可能性が考えられる。

低圧下での高強度運動中の換気増大のメカニズムについて、我々は過去に低酸素に対する呼吸感受性(HVR)と、低圧下での高強度運動中の換気増大の程度や $VO_{2max}$ 低下の程度との間に関係が見られ、HVRが高い者は低い者よりも、有酸素能力の低下の程度が小さいことを報告している(ogawa et al. 2007). しかしながら、高強度運動時の換気増大の程度は、化学受容器反射の感受性などの換気増大因子だけではなく、気道や気管支における機械的な抵抗(気道抵抗)によって換気増大が制限される影響も受けると考えられている(Chapman et al. 1998b; Johnson et al. 1992; McClaran et al. 1998). 運動中のVEに対する気道抵抗の影響を調べる方法として、気体密度の低いヘリウムを吸入することによって気道や気管支における機械的な抵抗を軽減させてその効果を検討する方法が用いられる(Papamoschou 1995). 多くの先行研究では、酸素を混合したヘリウムガス( $HeO_2$ )吸入によって、通常大気吸入(Air)よりも $VE_{max}$ を増加させたときの呼吸代謝応答や運動パフォーマンスを調べている。これらの先行研究では $HeO_2$ 吸入の、 $VO_{2max}$ や運動中の $SaO_2$ に対する $HeO_2$ 効果には一致した見解が得られていない

(Buono & Maly 1996; McClaran et al. 1998; Powers et al. 1986).

一方で, Esposito & Ferretti (1997)は2条件の酸素濃度(通常酸素および11% $O_2$ の低酸素)と2条件のガス( $HeO_2$ および窒素混合ガス( $N_2O_2$ ))を組み合わせた4条件で $VO_{2max}$ テストを行い, どちらの酸素濃度下でも $HeO_2$ 吸入によって $N_2O_2$ 吸入時よりも $VE$ が増加したが, 低酸素下でのみ $VO_{2max}$ は $HeO_2$ において $N_2O_2$ よりも高値を示したことを報告している. この結果から, 気道抵抗は $VE$ の制限要因であり, なおかつ低酸素下においては $VO_{2max}$ の制限要因となりうることが考えられる. したがって, 低圧環境において, ヘリウム混合ガスを吸入させることで運動時の換気量を人為的に増加させた場合, 運動のパフォーマンス低下が抑えられ, 高所においてもパフォーマンス向上に効果的な運動トレーニングを行うことができるようになる可能性があるが, このことについては明らかではない.

しかしながら, 高所は酸素濃度のみが平地よりも低いのではなく, 気圧自体が低下している. 気圧自体の低下は気道を通る流体の密度が低下することを意味し, 先に述べた気道抵抗を低下させる要因であることが考えられる. したがって, 高所では気圧変化を伴わない低酸素下よりもヘリウム混合ガス吸入の効果は少ないことも考えられるが, 明らかでない.

そこで本研究では, 単位体積当たりの密度が通常空気よりも低いヘリウム酸素を吸入させる手法を用いて換気量を増加させることで低圧下の $VO_{2max}$ は通常のを吸入した時よりも増加するかどうか, 運動トレーニングで用いられるようなインターバル運動のパフォーマンスが向上するかどうかを検証することを目的とした.

実験では, 通常空気とヘリウム混合ガスのそれぞれを吸入した条件において低圧下で漸増負荷運動を行い,  $VO_{2max}$ , 換気応答を調べた. また, 同様に低圧下において通常空気もしくはヘリウム混合ガスを吸入させた状態でインターバル運動を行い, その時のパフォーマンスを調べた.

## 2. 研究方法

### 2.1 被験者

漸増負荷運動を行った被験者は12名の体育を専攻する学生であった。そのうち7名は、持久的運動種目を専門とする競技者であった。インターバル運動を行った被験者は11名の体育を専攻する学生であった。被験者は全員平地居住者であった。被験者には実験に先立ち、実験の目的、方法および実験実施上の危険性を十分に説明し、実験参加の同意を得た。

### 2.2 試験環境

実験は環境制御装置室内で行い、 $\text{VO}_{2\text{max}}$ テストは気圧を560mmHgに設定した低圧下(H)において行った。560mmHgは標高2,500m相当である。一方で、インターバル運動は気圧を525mmHgに設定した低圧下において行った。525mmHgは標高3,000m相当である。気圧は約15~20分程度で減圧が完了する程度で緩やかに減圧し、減圧終了後に実験を開始した。室内の気温は20°Cに設定した。室内の二酸化炭素濃度の上昇を防ぐため、強制的に換気を行った。

### 2.3 漸増負荷運動テスト

漸増負荷運動テストはトレッドミルを用いて行った。被験者は通常空気(Air)を吸入する条件と、ヘリウムガスに20.9%の酸素を注入したヘリウム混合ガス( $\text{HeO}_2$ )を吸入する条件の2条件で行った。 $\text{HeO}_2$ は実験前に大容量のダグラスバッグに封入し、実験中は蛇管を通してバッグから直接被験者のマスクに接続し、吸入させた。Airと $\text{HeO}_2$ で条件を同じにするために、Airでも同じ装置を使い、吸入させた。

被験者は任意のウォーミングアップの後、実験室に入室し、各ガス吸入時で実験を行った。運動は、トレッドミル傾斜角を0度に設定し、始めの速度を220から140  $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ の間に設定し、2分ごとに20  $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ 、漸増負荷させていった。運動時間が8分を超えてからは、1分ごとに10  $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ ずつ、exhaustionに至るまで増速した。このとき、運動中の呼気をダグラスバッグに集め、呼気ガス分析を行った。呼気は1分ごとにダグラスバッグに集めた後、質量分析計(ARCO1000; Arco; Chiba, Japan)を用いて酸素濃度および二酸化炭素濃度( $\text{FO}_2$ および $\text{FCO}_2$ )を測定した。質量分析計は実験前後で $\text{N}_2$ およびHeのそれぞれの気体で調節された校正ガスを用いて校正を行った。その後、バッグ容量を乾式ガスメーター(DC-5A; Shinagawa; Tokyo, Japan)によって測定した。ガスメーターは2Lのシリンダーを用いて、あらかじめAirおよび $\text{HeO}_2$ のそれぞれの気体を流し、注意深く校正を行った。得られたデータから、 $\text{VO}_2$ 、 $\text{VE}$ を算出し、運動中の最大値である $\text{VO}_{2\text{max}}$ 、 $\text{VE}_{\text{max}}$ を求めた。一方で、自動ガス分析器(RM-300i; Minato Medcal Science; Osaka, Japan および ARCO1000; Arco; Chiba, Japan)を用いて、一呼吸ごとにガス分析を行い、被験者が最大運動を行ったかを確認した。すべての被験者は1) $\text{VO}_2$ が定常状態に達していた、2)呼吸商は1.1を超えていた、3)被験者は最大努力(RPEは20)を行ったことから、 $\text{VO}_{2\text{max}}$ に至っていたものと考えられる。 $\text{SaO}_2$ は前額からパルスオキシメーター(N-535; Nellcor, Hayward, CA)を用いて測定した。HRはハートレートモニター(Vantage NV; POLAR, Finland)を用いて測定した。

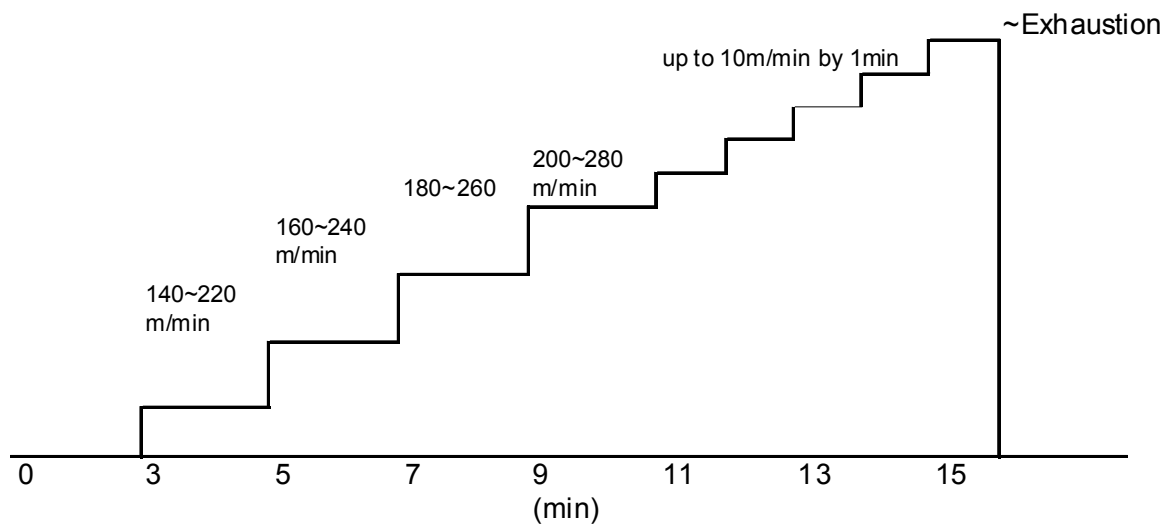


Figure 1: The protocol of incremental running test.

## 2.4 インターバル運動テスト

インターバル運動テストは自転車エルゴメーター (PowerMAXV-II; Combi; Japan) を用いて行った。被験者は通常空気(Air)を吸入する条件と、ヘリウムガスに 20.9%の酸素を注入したヘリウム混合ガス(HeO<sub>2</sub>)を吸入する条件の 2 条件で行った。HeO<sub>2</sub>は実験前に大容量のダグラスバッグに封入し、実験中は蛇管を通してバッグから直接被験者のマスクに接続し、吸入させた。Air と HeO<sub>2</sub> で条件を同じにするために、Air でも同じ装置を使い、吸入させた。

被験者は任意のウォーミングアップの後、実験室に入室し、各ガス吸入時で実験を行った。被験者は脚の長さに応じて決められたサドルおよびハンドルの高さで自転車運動を行った。ペダリング負荷は体重に応じて決定し、体重×0.1kp に設定した。主運動は 10 秒間の全力自転車を 30 秒間の休息を挟んで 10 回繰り返した。このとき、運動中のペダル回転数を連続的に測定し続け、発揮パワーを算出した。得られたデータは、0.1 秒毎にパーソナルコンピューターに保存した。セットごとに平均されたデータから、発揮パワーの最大値を最大パワー (PP)、最小値を最小パワー (Pmin)、インターバル運動全体の平均値を平均パワー (Pmean) とした。また、PP と Pmin の差を百分率で表し、%ΔP とした。運動中の呼気をダグラスバッグに集め、呼気ガス分析を行った。呼気はダグラスバッグに集めた後、質量分析計(ARCO1000; Arco; Chiba, Japan)を用いて酸素濃度および二酸化炭素濃度(FO<sub>2</sub> および FCO<sub>2</sub>)を測定した。質量分析計は実験前後で N<sub>2</sub> および He のそれぞれの気体で調節された校正ガスを用いて校正を行った。その後、バッグ容量を乾式ガスメーター(DC-5A; Shinagawa; Tokyo, Japan)によって測定した。得られたデータから、VO<sub>2</sub>, VE を算出した。SaO<sub>2</sub>は前額からパルスオキシメーター(N-535; Nellcor, Hayward, CA)を用いて測定した。HR はハートレートモニター(Vantage NV; POLAR, Finland)を用いて測定した。

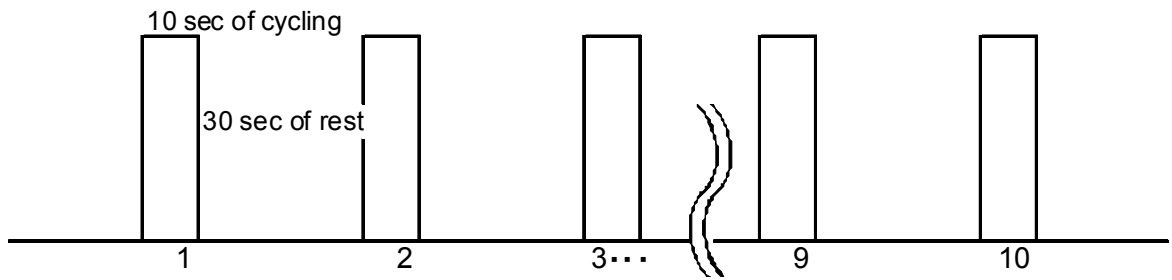


Figure 2: The protocol of interval maximal cycling test.

## 2.5 統計分析

漸増負荷運動テストにおける各項目において、Air 条件と HeO<sub>2</sub> 条件の有意差検定には Paired t-test を用いた。インターバル運動テストにおける吸入条件およびセットごとの有意差検定には二次元配置分散分析を用いて行った。また、事後検定として Fisher の LSD を用いた。相関分析には、ピアソンの相関係数を用いた。各検定における有意基準は 5%未満に設定した。

### 3. 結果

#### 3.1 漸増負荷運動テストの結果

低圧下での  $VO_{2max}$  は  $HeO_2$  吸入時において Air 吸入時よりも有意に高値を示した。  $HeO_2$  吸入による  $VO_{2max}$  の増加率は 12.3 %であった。  $VE_{max}$  は  $HeO_2$  吸入時において Air 吸入時よりも有意に高値を示し、  $HeO_2$  吸入による  $VE_{max}$  の増加率は 16.3 %であった。 また、  $HeO_2$  吸入による  $VO_{2max}$  の増加率と  $VE_{max}$  の増加率との間に有意な正の相関関係が見られた ( $r=0.73$ ;  $P<0.05$ )。  $SaO_2$  は  $HeO_2$  吸入時において Air 吸入時よりも有意に高値を示した。  $HR_{max}$  は  $HeO_2$  吸入時において Air 吸入時よりも有意に高値を示し、  $HeO_2$  吸入による  $HR_{max}$  の増加率は 4.1 %であった。

**Table1: The results of maximal running trial**

	He-O <sub>2</sub>	Air	difference (%)
$VE_{max}$ (l/min)	171.9 ± 16.1*	150.1 ± 16.9	15.1
$VO_{2max}$ (ml/kg/min)	52.50 ± 9.13*	48.72 ± 5.35	7.5
$VO_{2max}$ (ml/min)	3365 ± 461*	3144 ± 316	7
$SaO_2$ (%)	79 ± 3*	76 ± 3	3.9
$HR_{max}$ (beat/min)	192 ± 7*	186 ± 10	3.1

$VE_{max}$ , maximal minute ventilation;  $VO_{2max}$ , maximal oxygen uptake;  $SaO_2$ , mean oxy-hemoglobin saturation;  $HR_{max}$ , maximal hear rate; \*,  $p<0.05$  vs. Air.

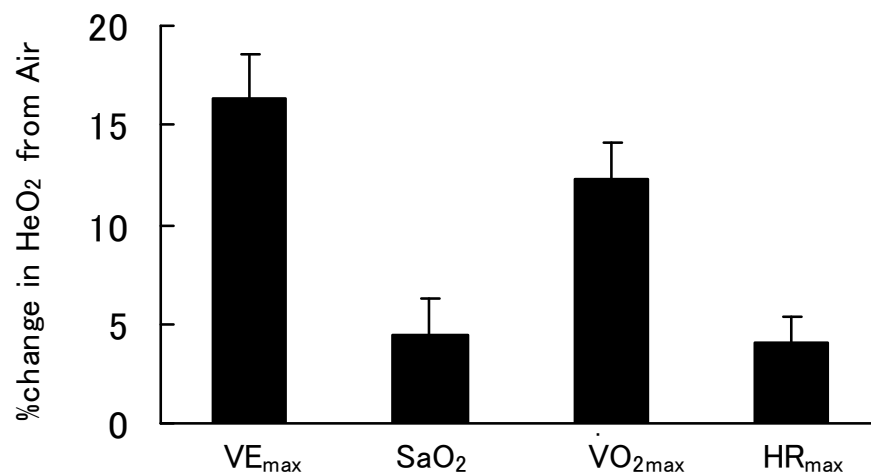


Figure 3. The percentage of change in variables in  $HeO_2$  trial compared to Air trial.

The percentage of change in variables in  $HeO_2 = (HeO_2 - Air) / Air * 100$ .

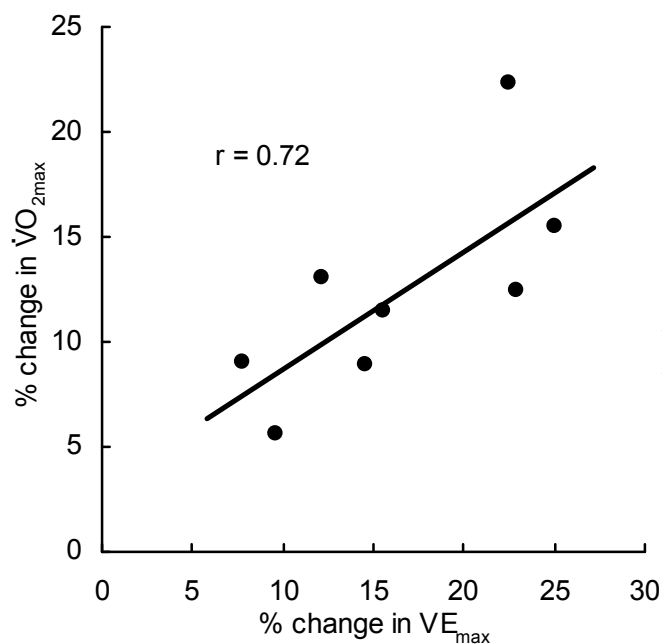


Figure 4.  
The relationship between the percentage of change in VE<sub>max</sub> and the percentage of change in VO<sub>2max</sub> in HeO<sub>2</sub> trial. The percentage of change in variables in HeO<sub>2</sub> = (HeO<sub>2</sub> - Air)/Air \* 100.

### 3.2 インターバル運動テストの結果

インターバル運動テストの結果を Table 2 および Figure 5 に示す。インターバル運動の PP, MP, % $\Delta$ P の発揮パワーに関する指標は Air と HeO<sub>2</sub> で有意な差は見られなかった。MP も同様に有意な差は見られなかった。各セットの平均パワーの推移を Figure 5 に示す。各セットの発揮パワーはセットが進むにつれて有意に低下していったが (P<0.05; ANOVA), Air と HeO<sub>2</sub> で有意な差は見られなかった。インターバル運動セッション全体の VE は HeO<sub>2</sub> において Air よりも 17% と大きく高値を示した。しかしながら、VO<sub>2</sub> および SaO<sub>2</sub> においては条件間で有意な差は見られなかった。HR も条件間で有意な差は見られなかった。

**Table 2 The results of the interval exercise trial**

	HeO <sub>2</sub>	Air	difference (%)
PP (W)	798 ± 75	788 ± 73	1.2
MP (W)	621 ± 60	615 ± 67	0.9
% $\Delta$ P (%)	33.1 ± 7.8	32.4 ± 6.4	2.0
VE (l/min)	143 ± 20*	122 ± 16	17.0
VO <sub>2</sub> (ml/kg/min)	37.6 ± 3.6	35.9 ± 2.6	4.5
SaO <sub>2</sub> (%)	89 ± 3	86 ± 3	3.1
HR (beat/min)	163 ± 13	162 ± 13	1.0

Values are mean ± SD. PP, peak power output; MP, mean power output; % $\Delta$ P, the rate of decrease in power output; VE, mean minute ventilation; VO<sub>2</sub>, mean oxygen uptake; SaO<sub>2</sub>, mean oxy-hemoglobin saturation; HR, mean hear rate; \*, p<0.05 vs. Air.



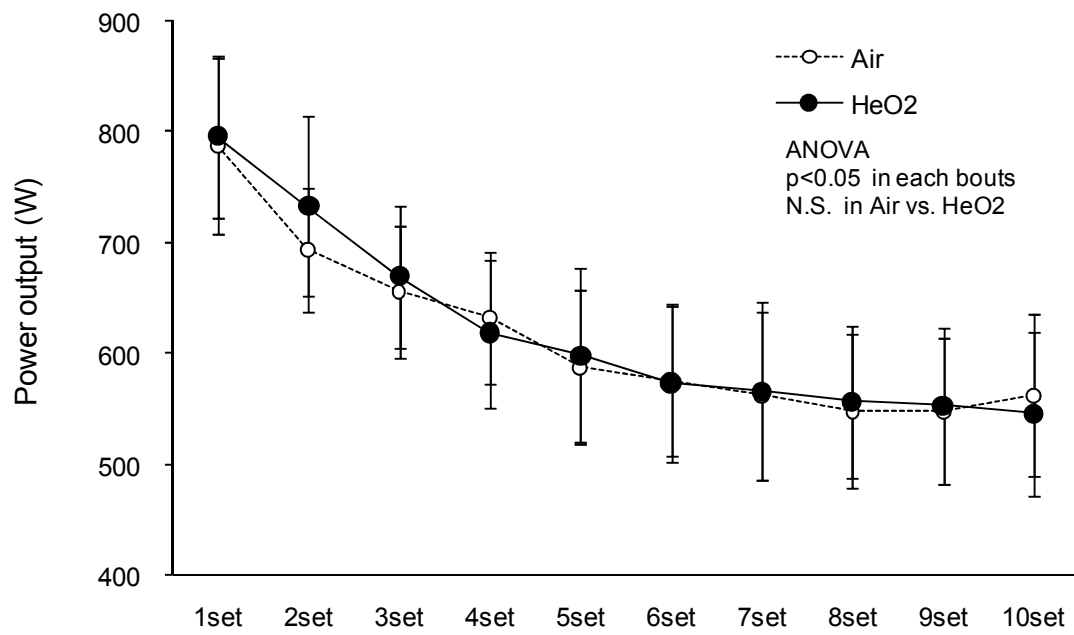


Figure 5. The mean power output at each bout.

## 4. 考察

本研究は、単位体積当たりの密度が通常空気よりも低いヘリウム酸素を吸入させる手法を用いて換気量を増加させることで通常の空気を吸入した時よりも低圧下の  $VO_{2max}$  や、運動トレーニングで用いられるようなインターバル運動のパフォーマンスが向上するかどうかを検証することを目的として、通常空気(Air)とヘリウム混合ガス( $HeO_2$ )のそれぞれを吸入した条件において低圧下で漸増負荷運動テストを行い、 $VO_{2max}$  や  $VE_{max}$  を調べた。また、インターバル運動テストを行い、運動パフォーマンスおよびその時の代謝応答を調べた。その結果、漸増負荷運動テストでは、低圧下における  $VE_{max}$ 、 $VO_{2max}$  および  $SaO_2$  は、 $HeO_2$  吸入時において Air 吸入時よりも高くなった一方で、インターバル運動の発揮パワーは Air と  $HeO_2$  で有意な差は見られなかった。これら本研究の漸増負荷運動テストおよびインターバル運動テストの結果から、ヘリウム混合ガス吸入を行うことで、高所での有酸素能力を一過性に高める効果的があるが、短時間のインターバル運動は変化しないことが示唆された。

本研究の結果は一方で、ヘリウム混合ガスなど、低圧下において換気量が高めることができれば、 $VO_{2max}$  の低下を少なくできることを示唆するものであり、換気増大の程度は低圧下での  $VO_{2max}$  の制限要因であることが明らかとなった。さらに、標高 2,500m 相当の低圧下においても気道抵抗は  $VE_{max}$  の制限要因であり、 $HeO_2$  吸入は  $VO_{2max}$  や  $SaO_2$  増加に効果があることが示唆された。

### 4.1 ヘリウム混合ガス吸入の漸増負荷運動に対する効果

$HeO_2$  吸入による呼吸抵抗の減少は、ヘリウムの持つ低い密度と高い粘性によってもたらされると考えられている(Papamoschou 1995)。ある管内での流体の流れやすさを示すレイノルズ数は、

$$Re = V \times L / (\mu / \rho)$$

(Re;レイノルズ数, V;流速, L;管の径,  $\mu$ ;粘性係数,  $\rho$ ;密度)

で表される。レイノルズ数は抵抗が低い層流と、抵抗の大きい乱流のおおよその区別をする指標でもあり、ある管内での層流から乱流への遷移する領域、すなわちレイノルズ数が高い管においては、レイノルズ数が低い管よりも流速が高く、乱流が生じやすいことを意味する。本実験で用いた 20.9%の酸素を混合したヘリウムガスでは通常空気と比較して単位気体あたりの密度が 1/3 であり、粘性が 1.1 倍となるため、ある気道において、同じ流速が見られた場合、レイノルズ数を計算すると、 $HeO_2$  ではレイノルズ数は Air の 0.303 倍となり、すなわち、 $HeO_2$  は Air よりも気道および肺胞内で乱流が発生しにくく、気道における流体の流れの抵抗が低くなると考えられる。したがって、 $VE$  が増加したものと考えられる。 $VE$  の増加は肺胞酸素分圧の増加をもたらす、動脈血酸素飽和度 ( $SaO_2$ ) が増加することによって、酸素運搬量が増加したことが  $VO_{2max}$  の増加をもたらしたものと考えられる。

このような  $HeO_2$  吸入による気道抵抗の軽減による  $VE$  の増加が運動時の  $SaO_2$  や  $VO_{2max}$  に及ぼす影響に関して、Powers et al. (1986)は、通常酸素濃度の  $HeO_2$  吸入時では、通常大気下よりも  $VE_{max}$ 、 $VO_{2max}$  および運動パフォーマンスが増加したことを報告している。一方で、 $HeO_2$  吸入によって通常大気よりも  $VE$  は増加するが、運動性低酸素血症は改善されないことや(Buono & Maly 1996)、ウマにおいて、 $HeO_2$  を吸入させることで、 $VE_{max}$  は増加するが、 $VO_{2max}$  は増加しないことなどが報告されており(Erickson et al. 1994)、通常酸素下では  $VE$  は、必ずしも  $VO_{2max}$  の制限要因でないことが考えられる。Esposito & Ferretti (1997)は、2 種類の酸素濃度(通常酸素および 11% $O_2$  低酸素)と 2 種類的气体( $HeO_2$  および窒素ガス( $N_2O_2$ ))の 4 条件で  $VO_{2max}$  テストを行い、どちらの酸素濃度下でも  $HeO_2$  吸入時において

N<sub>2</sub>O<sub>2</sub>吸入時よりも VE が増加したが、VO<sub>2max</sub> は低酸素下のみ HeO<sub>2</sub>吸入時において N<sub>2</sub>O<sub>2</sub>吸入時よりも高値を示したことを報告している。本実験では先行研究で用いられたような常圧低酸素ではなく、低圧下において測定を行い、常圧よりも気体の密度の低い標高 2,500m の低圧下においても、気道抵抗は VE<sub>max</sub> の制限要因であり、VO<sub>2max</sub> や SaO<sub>2</sub> に影響を及ぼすことが示唆された。

Esposito & Ferretti (1997)の研究では、低酸素下(11%O<sub>2</sub>)での VE<sub>max</sub> および VO<sub>2max</sub> はそれぞれ HeO<sub>2</sub> 吸入により通常大気よりも 31% および 14%高値を示した。本実験では、VE<sub>max</sub> は 16%、VO<sub>2max</sub> は 12% 増加し、HeO<sub>2</sub> の効果は先行研究よりも小さかった。効果が小さかった原因として、本実験の低圧の程度が 2,500m 相当であり、これは常圧下では 15.6%酸素濃度の低酸素に相当し、先行研究の 11%の低酸素よりも低酸素の程度が弱かったことから、化学受容器反射による換気亢進命令が本実験において少なかったため、気道抵抗が軽減されても換気亢進が少なかった可能性が考えられる。さらに、本実験で用いた標高 2,500m 相当の低圧下では常圧低酸素下とは異なり、空気の密度が 0.95kg・m<sup>-3</sup> と、平地の 79%となっていたため(平地は 1.20kg・m<sup>-3</sup>)、Air 吸入条件下においてすでに呼吸抵抗がある程度軽減されていた可能性が考えられる。

低圧下での高強度運動時の VE の制限要因について、我々の行った先行研究では低酸素状態に対する呼吸の感受性 (HVR) に注目して実験を行い、HVR が高い者は低圧下での VE<sub>max</sub> 増大の程度が大きく、VO<sub>2max</sub> の低下が少ないことを報告している (Ogawa et al. 2007)。本研究では、気道抵抗が低圧下での VE<sub>max</sub> および VO<sub>2max</sub> を制限していることが示唆された。本研究では、これら低圧下での運動時の換気増大にかかわる因子について、HVR と機械的な気道抵抗のどちらがどれだけ VE<sub>max</sub> に影響を及ぼしているかについて検討を行っていない。運動時の呼吸循環応答における HVR と呼吸抵抗の関係について、Derchak et al. (2000)は、機械的な呼吸制限が大きく、換気増大がそれによって抑制される者と、そのような換気増大の抑制が見られない者に群を分け、最大運動中の呼吸循環応答と HVR の関係を調べたところ、呼吸制限の大きい者においては、小さい者よりも HVR と常圧下での高強度運動中の SaO<sub>2</sub> や VE との関係が弱かったことを報告している。また、Johnson et al. (1992)は機械的な気道抵抗が大きく、換気が抑制される者では、二酸化炭素や低酸素ガスといった換気増大刺激となるガスを吸入しても、動中の VE を増やせなかったことを報告している。これらの結果から、機械的な気道抵抗があることによって、化学受容器を介した換気亢進命令に対して VE を十分に高められない場合があることが示唆された(Dempsey et al. 1984)。したがって、HVR と低圧下での VO<sub>2max</sub> や呼吸循環応答との関係は、気道抵抗が軽減された場合、より明確に表れることが考えられる。しかしながら、HVR などの化学感受性と気道抵抗が、お互いにどの程度低圧下での高強度運動時の換気亢進に寄与しているかは明らかではなく、今後更なる検討が必要である。

VO<sub>2max</sub> に対するヘリウム混合ガス吸入の効果について、他方で、HeO<sub>2</sub> 吸入により横隔膜や呼吸筋群の仕事量の軽減をもたらすことが関係している可能性が考えられる(Papamoschou 1995; Mink & Wood 1980)。最大運動時の換気増大に伴う呼吸筋群での酸素消費量は全身の VO<sub>2max</sub> の約 10-15%程度にも達することが報告されており、VO<sub>2max</sub> の制限要因の一つであることが示唆されている(Aaron et al. 1992; Harms et al. 1997; Vella et al. 2006)。Harms らは最大運動時に吸気補助を行い、呼吸筋群の仕事量を軽減させることによって運動パフォーマンスが向上したことを報告している(Harms et al. 2000)。このメカニズムについて、Harms ら(1997, 1998)は高強度自転車運動時に吸気補助を行うことによって、活動筋への血流量が増加したことを報告しており、呼吸筋の仕事量の軽減によって、呼吸筋群への血流量が減少し、活動筋への血流量を増加させることができたものと考えられる。本研究で用いたヘリウム混合ガス吸入も同様に、呼吸筋群の仕事量の軽減させることができることが報告されており

(Papamoschou 1995; Mink & Wood 1980), HeO<sub>2</sub> 吸入時では呼吸筋群の血流量が活動筋群へ再分配され, Air 吸入条件よりも, より多く活動筋へ酸素供給ができたことが考えられる. しかしながら, 本研究では呼吸筋群の仕事量を血流量を測定しておらず, 今後の検討課題である.

本研究では HeO<sub>2</sub> 吸入による VE<sub>max</sub> の増加および VO<sub>2max</sub> の増加の程度に大きな個人差が見られ, 必ずしも, ヘリウムによる気道抵抗の一定の軽減が, どの被験者においても VE<sub>max</sub> に一定の効果をもたらすとは限らないことが示唆された. HeO<sub>2</sub> 吸入効果の小さい者では, 気道抵抗は VE<sub>max</sub> の制限にそれほど寄与しておらず, Air 吸入時でも十分に換気亢進がされていた可能性が考えられる. さらに, ヘリウムによる機械的な抵抗の軽減によって, 呼吸筋の仕事量が減少し, 呼吸筋での VO<sub>2</sub> が低下したことが予想される. そのため, 活動筋での VO<sub>2</sub> が増加しても全身の VO<sub>2max</sub> には表れにくかった可能性が考えられる. 一方で, VE<sub>max</sub> が HeO<sub>2</sub> 吸入によって大きく増加する者ほど VO<sub>2max</sub> は大きく増加する傾向が見られたことは(Fig. 3), 気道抵抗が VE<sub>max</sub> や VO<sub>2max</sub> に及ぼす影響の大きさに個人差があることを示唆するものであり, 機械的な気道抵抗による VE<sub>max</sub> 制限の程度は, 低圧下での VO<sub>2max</sub> に影響を及ぼす可能性が示唆された.

#### 4.2 ヘリウム混合ガス吸入のインターバル運動に対する効果

本研究で用いたような 10 秒の全力運動を 30 秒の休息をはさんで繰り返す短時間の超高強度インターバル運動の平均パワー, 最大パワーなどの発揮パワーは HeO<sub>2</sub> と Air で有意な差は見られず, 高所でのインターバル運動パフォーマンスにはヘリウム混合ガス吸入の効果がないことが示唆された. インターバル運動においても漸増負荷運動と同様に HeO<sub>2</sub> では Air よりも VE は 17% 高値を示し, ヘリウムガス吸入による気道抵抗の軽減の効果があったことが示唆された. しかしながら, VO<sub>2</sub> はヘリウム吸入によっても有意に増加することはなかった. これらことは, 高所でのインターバル運動中の酸素摂取やパフォーマンス発揮には, ヘリウム混合ガス吸入で得られる換気量の増大や, 呼吸筋群の仕事量軽減などの効果がないことが示唆された.

我々は先行研究において, 標高 2,500m と同等の低圧下でインターバル運動(20 秒の間欠的漸増負荷運動)を行ったところ, 低圧下では酸素摂取量の低下に対して無酸素代謝が増加し, インターバル運動のパフォーマンスが常圧下と同程度発揮されたことを報告している(Ogawa et al. 2005). すなわち, 短時間のインターバル運動の運動パフォーマンスは有酸素代謝からのエネルギー供給量の影響を受けないことを示唆するものである. 本研究のインターバル運動の運動時間は 10 秒であり, 先行研究よりも短く, 有酸素代謝からのエネルギー供給の寄与はパフォーマンス発揮に関係がないことが予想され, そのため, ヘリウム混合ガス吸入を行っても VO<sub>2</sub> が増加しなかった可能性が考えられる.

#### 4.3 高所トレーニングなどトレーニング現場への応用

本研究では, ヘリウム混合ガス吸入によって通常空気吸入時よりも漸増負荷運動時の SaO<sub>2</sub> が平地の水準まで戻らなくとも, VO<sub>2max</sub> は高くなり, 有酸素能力が高まった. これらの結果の高所トレーニングへの応用について, ヘリウム混合ガスを吸入させながら, 高所で持久的運動を行うことでより効果的な運動トレーニングを行うことができるものと考えられる. 先に述べたように, 高所トレーニングを行っても, 必ずしも平地での運動パフォーマンスに対して効果的でなかったとする報告があり(Faulkner et al. 1967; Julian et al. 2004), その原因として, 高所では有酸素能力および持久的運動パフォーマンスの低下により, パフォーマンス向上に必要な強度の運動トレーニングが行えないことが考えら

れている(Chapman et al. 1998a; Levine et al. 1997). そこで、本研究で行ったようなヘリウム混合ガス吸入を行いながら高所で運動を行うことで、低酸素刺激を受けつつも、高い強度の運動トレーニングを行うことができる可能性がある。今後、ヘリウム混合ガス吸入を用いた運動を高所で行うようなトレーニングプログラムの開発など、さらなる検討が必要である。

## 5. 結言

本研究は、単位体積当たりの密度が通常空気よりも低いヘリウム酸素を吸入させる手法を用いて換気量を増加させることで低圧下の  $VO_{2max}$  は通常の空気を吸入した時よりも増加するかどうか、運動トレーニングで用いられるようなインターバル運動のパフォーマンスが向上するかどうかを検証することを目的として、通常空気(Air)とヘリウム混合ガス( $HeO_2$ )のそれぞれを吸入した条件において低圧下で 1) 漸増負荷運動テストを行い、 $VO_{2max}$  や  $VE_{max}$  を、2) インターバル運動テストを行い、運動パフォーマンスを調べた。

その結果、漸増負荷運動テストから、低圧下における  $VE_{max}$ 、 $VO_{2max}$  および  $SaO_2$  は  $HeO_2$  吸入時において Air 吸入時よりも高くなった。  $HeO_2$  吸入時においては、Air 吸入時よりも高い VE によって、肺胞換気量の増加により肺でのガス交換が改善され、 $SaO_2$  が増加して酸素供給量が増加することによって、結果的に  $VO_{2max}$  が増加したものと考えられる。このことから、標高 2,500m 相当の低圧下においても気道抵抗は  $VE_{max}$  の制限要因であり、 $HeO_2$  吸入は  $VO_{2max}$  や  $SaO_2$  増加に効果があることが示唆された。また、この結果は一方で、低圧下において換気量を高めることができれば、 $VO_{2max}$  の低下を少なくできることを示唆するものであり、換気増大の程度は低圧下での  $VO_{2max}$  の制限要因であることが明らかとなった。インターバル運動においては、 $HeO_2$  吸入時と Air 吸入時で発揮パワーに有意な差が見られなかった。このことから、低圧下でのインターバル運動のパフォーマンスはヘリウム混合ガス吸入の効果がないことが示唆された。さらにこの結果は、換気量もしくは有酸素能力の低下は、本研究で行ったようなインターバル運動のパフォーマンスの制限要因ではないことが示唆された。まとめとして、本研究の結果から、高所において、ヘリウム混合ガス吸入による換気量増大は、有酸素能力および継続的な持続的運動パフォーマンス増大に効果的であるが、短時間のインターバル運動には効果がないことが示唆された。

## 参考文献

- Aaron EA, Seow KC, Johnson BD, Dempsey JA (1992) Oxygen cost of exercise hyperpnea: implications for performance. *J Appl Physiol* 72: 1818-1825
- Buono MJ, Maly R (1996) Augmented hyperventilation via normoxic helium breathing does not prevent exercise-induced hypoxemia. *Can J Appl Physiol* 21: 264-270
- Chapman RF, Stray-Gundersen J, Levine BD (1998a) Individual variation in response to altitude training. *J Appl Physiol* 85:1448-1456

- Chapman RF, Emery M, Stager JM (1998b) Extent of expiratory flow limitation influences the increase in maximal exercise ventilation in hypoxia. *Respir Physiol* 113: 65-74
- Dempsey JA, Hanson PG, Henderson KS (1984) Exercise-induced arterial hypoxemia in healthy human subjects at sea level. *J Physiol* 355: 161-175
- Derchak PA, Stager JM, Tanner DA, Chapman RF (2000) Expiratory flow limitation confounds ventilatory response during exercise in athletes. *Med Sci Sports Exerc* 32: 1873-1879
- Erickson BK, Seaman J, Kubo K, Hiraga A, Kai M, Yamaya Y, Wagner PD (1994) Effect of helium-induced ventilatory unloading on breathing and diaphragm EMG in awake ponies *J Appl Physiol* 77: 452-462
- Esposito F, Ferretti G (1997) The effects of breathing He-O<sub>2</sub> mixtures on maximal oxygen consumption in normoxic and hypoxic men. *J Physiol* 503: 215-221
- Faulkner JA, Daniels JT, Balke B (1967) Effects of training at moderate altitude on physical performance capacity. *J Appl Physiol* 23: 85-89
- Fulco CS, Rock PB, Cymerman A. (1998) Maximal and submaximal exercise performance at altitude. *Aviat Space Environ Med* 69: 793-801
- Gavin TP, Derchak PA, Stager JM (1998) Ventilation's role in the decline in VO<sub>2max</sub> and SaO<sub>2</sub> in acute hypoxic exercise. *Med Sci Sports Exerc* 30: 195-199
- Gore CJ, Hahn AG, Aughey DT, Martin DT, Ashenden MJ, Clark AP, Granham AD, Roberts AD, Slaters GJ, McKenna MJ (2001) Live high: train low increases muscle buffer capacity and submaximal cycling efficiency. *Acta Physiol Scand* 173: 275-286
- Harms CA, Babrock MA, McClaran SR, Pegelow DF, Nিকেle GA, Nelson WB, Dempsey JA (1997) Respiratory muscle work compromises leg blood flow during maximal exercise *J Appl Physiol* 82: 1573-1583
- Harms CA, Wetter TJ, McClaran SR, Pegelow DF, Nিকেle GA, Nelson WB, Dempsey JA (1998) Effect of respiratory muscle work on cardiac output and its distribution during maximal exercise *J Appl Physiol* 85: 609-618
- Harms CA, Wetter TJ, St. Croix CM, Pegelow DF, Dempsey JA (2000) Effect of respiratory muscle work on exercise performance *J Appl Physiol* 89: 131-138
- Jackson CG, Sharkey BJ (1988) Altitude, training and human performance. *Sports Med* 6:279-84

- Johnson BD, Saupe KW, Dempsey JA (1992) Mechanical constraints on exercise hyperpnea in endurance athletes. *J Appl Physiol* 73: 874-886
- Julian CG, Gore CJ, Wilber RL, Daniels JT, Fredericson M, Stray-Gundersen J, Hahn AG, Parisotto R, Levine BD (2004) Intermittent normobaric hypoxia does not alter performance or erythropoietic markers in highly trained distance runners. *J Appl Physiol* 96: 1800-1807
- Koistinen P, Takala T, Martikkala V, Leppaluoto J (1995) Aerobic fitness influences the response of maximal oxygen uptake and lactate threshold in acute hypobaric hypoxia. *Int J Sports Med* 16: 78-81
- Levine BD, Stray-Gundersen J (1997) "Living high- training low": effect of moderate-altitude acclimatization with low-altitude training on performance. *J Appl Physiol* 83: 102-112
- McClaran SR, Harms CA, Pegelow DF, Dempsey JA (1998) Smaller lungs in women affect exercise hyperpnea. *J Appl Physiol* 84: 1872-1881
- Mink SN, Wood DH (1980) How does HeO<sub>2</sub> increase maximum expiratory flow in human lungs? *J Clin Invest* 66: 720-729
- Ogawa T, Ohba K, Nabekura Y, Nagai J, Hayashi K, Wada H, Nishiyasu T (2005) Intermittent short-term graded running performance in middle-distance runners in hypobaric hypoxia. *Eur J Appl Physiol* 94: 254-261
- Ogawa T, Hayashi K, Ichinose M, Nishiyasu T (2007) Relationship between rest ventilatory chemosensitivity and maximal oxygen uptake in moderate hypobaric hypoxia. *J Appl Physiol* 103: 1221-1226
- Papamoschou D (1995) Theoretical validation of the respiratory benefits of helium-oxygen mixtures. *Respir Physiol* 99: 183-190
- Powers SK, Jacques M, Richard R, Beadle RE (1986) Effects of breathing a normoxic He-O<sub>2</sub> gas mixture on exercise tolerance and VO<sub>2max</sub>. *Int J Sports Med* 7: 217-221
- Rusko H (1996) New aspects of altitude training. *Am J Sports Med* 24: S48-S52
- Truijens MJ, Toussaint HM, Dow J, Levine BD (2002) Effect of high-intensity hypoxic training on sea-level swimming performances. *J Appl Physiol* 94: 733-743
- VellaCA, Marks D, Robergs RA (2006) Oxygen cost of ventilation during incremental exercise to VO<sub>2max</sub>. *Respiology* 11: 175-181