

## 低酸素気吸入がその後の呼吸循環器系に及ぼす影響

難波 昇吾

キーワード: 常圧低酸素, 安静時代謝量, 換気応答

Effect of acute normobaric hypoxia on cardiopulmonary function.

Shogo Namba

### Abstract

The purpose of this study was to examine that changes in cardiopulmonary function and energy metabolism in normoxic condition following acute short-term normobaric hypoxia at rest. Seven male untrained subjects participated in this study (age ;  $22 \pm 2$  years, height ;  $174 \pm 2$  cm, body weight ;  $71.1 \pm 5.0$  kg). They randomly carried out four different trial (N; normoxia-rest, H; normobaric hypoxia-rest, NE; normoxia-exercise, HE; normobaric hypoxia-exercise). In N and H trials, subjects stayed for 120 min at each condition. On the other hand, Both of NE and HE trial of subjects also completed  $70\% \dot{V}O_{2max}$  cycle ergometer exercise for 50 min following stay for 70 min at each condition. In hypoxia trial, subjects stayed normobaric hypoxic air ( $14.3\% O_2$ ). The normobaric hypoxic room system was utilized for acute short-term hypoxia, and the oxygen levels in the room were maintained at  $14.3 \pm 0.1\%$  (simulated 3000 m altitude) for the H trial. We measured on hart rate (HR), ventilation ( $\dot{V}E$ ), oxygen uptake ( $\dot{V}O_2$ ), carbon dioxide out put ( $\dot{V}CO_2$ ), carbon dioxide end-tidal  $CO_2$  pressure ( $PETCO_2$ ), energy expenditure (REE), and respiratory quotient (R) for 10 min every 60min throughout the 180 min after each trials. We could not find any significantly different parameter each trial. However, HR,  $\dot{V}E$ ,  $\dot{V}O_2$  and REE of exercise trial and hypoxia trial showed tendency to increase than that of N trial. And,  $PETCO_2$  and R of exercise trial and hypoxia trial showed tendency to decrease compare with N trial. These results suggest exposure to acute normobaric hypoxia would be effective in increase of  $\dot{V}E$ , REE and fat metabolism in normoxic condition following hypoxic treatment.

Key words : nomobaric hypoxia, REE, ventilatory response

### I. 緒言

近年, 高地トレーニングはスポーツ選手のパフォーマンスの向上のみならず, 幅広い年齢層のヒトに対する肥満予防および健康の維持・増進に貢献する可能性が報告されており (浅野, 1999), 標高 1000m~3000m 程度のチベット・ヒマラヤ, アンデスおよびコーカサスなどの高地民族には長寿者が多くみられるのは, 高地での日常運動時の生理的負担度が平地よりも比較

的大きく, 呼吸循環器系への刺激が高まることが要因の 1 つとしている (浅野, 1991). 浅野によれば, 日常的に運動していない健康な中年男性を対象に, 高度 2000m 相当に設定した低圧室での 1 回 15 分の自転車運動 (運動時心拍数, 130~140 拍/分) を週 2~3 回連続で 4 週間継続させ, 同一強度での常圧下トレーニング群と比較したところ, 高所トレーニング群では有気的作業能力は約 18% 増大したが, 対象群では変化が認

められなかったとしている。さらには最大下運動時の心拍数および拡張期血圧の低下が高所トレーニング群でみられたことから、運動経験のない中年者においても循環系や有気的作業能力が比較的短期間に改善をもたらすことが報告されている(浅野ほか, 1997)。このことから、浅野は高所トレーニングが一般人の呼吸循環器系および有気的作業能力の改善による動脈硬化や肥満の予防など、健康の維持・増進に貢献する可能性を示唆している(浅野・小林, 2004)。

急性の高地および低酸素曝露に対する生体反応の一つに換気の亢進がある。このメカニズムは吸気酸素分圧( $P_{iO_2}$ )の低下により、肺毛細血管から血液へ酸素を拡散する場所である肺泡気レベルの酸素分圧( $P_{AO_2}$ )の低下を引き起こす。次に、肺泡気酸素分圧( $P_{A,O_2}$ )の低下は、ヘモグロビンとの酸素分子結合が少なくなることで、血液中の酸素分圧( $P_{O_2}$ )の低下、さらには、動脈血酸素分圧( $P_{aO_2}$ )の低下まで引き起こし、最終的には動脈血酸素飽和度( $Sa_{O_2}$ )を低下させる。これにより肺換気量(VE)の亢進が起こるとしており(ウィルバー, 2008)、この反応を低酸素換気応答: hypoxic ventilator response (HVR)と呼んでいる。HVRは頸動脈体にある化学受容器が $PO_2$ の低下を感知し、脳にある呼吸中枢を刺激することで起こる。通常HVRは $P_{iO_2}$ が100mmHg(高度3000m相当)を下回らない限り出現しないとされている。

一方、換気の増加は、呼気中の二酸化炭素を増加させ、末梢の二酸化炭素分圧( $P_{CO_2}$ )を低下させる(Dempsey and Forster, 1982)。すなわち、換気の亢進により $H^+$ が低下することで血中のpHの上昇を招き、呼吸性アルカローシスを引き起こす(Hansen et al, 1967)。

換気の亢進がエネルギー代謝へ与える影響についても検討が行われてきている。高地滞在および低酸素環境下への曝露における代謝への影響についての研究では、高地(2360m)への3日間の滞在が動脈血酸素飽和度の低下と高地滞在中の安静時エネルギー消費量増大に関連性があることが報告されている(高桜ほか, 1997)。また、25~60歳の男性肥満者を対象として、高度1500m相当に設定した低圧室での一過性の60分間のトレッドミル運動をLT(Lactate Threshold)強度で行い、同一強度での常圧環境

下運動群と比較しところ、曝露運動中のエネルギー消費量に差は認められなかったものの、曝露終了後30分、60分後の安静時エネルギー消費量(REE)において、常圧運動群と比較して有意に高い値を示し、脂質代謝の亢進を報告している(寺尾ほか, 2002)。加えて低圧環境下での運動が翌日まで安静時代謝量を高める傾向になったことも報告している。このことから、高地・低酸素環境での一過性の滞在や運動およびトレーニングが運動中および運動後のREEを高める可能性が示唆される。Hillらによれば10年間の横断的な研究の結果、1日あたり50kcal~100kcalのエネルギー消費量の増加が体重の増加を抑制するとの報告をしている(Hill et al, 2003)。また、長野らは平地でVT強度の運動を1時間行くと、運動後過剰酸素摂取量の増加がみられるとともに、呼吸交換比(R)が運動中の値よりも運動終了後に急激に下降すると示している(長野ほか, 1992)。これらを含めて考えると、高地および低酸素曝露による換気の亢進は平地での滞在あるいはトレーニングに比べREEを持続的に高値に保ち、脂質代謝の亢進も引き起こすことで、体重の必要以上の増加を抑制する可能性が考えられる。

これは、体重の適正な維持を行うことにより、肥満症を防止しメタボリックシンドロームならびに生活習慣病になるリスクを下げ、健康の維持・増進に関与するものと考えられる。

しかしながら、一過性の低酸素環境下へ曝露や運動後の継続した呼吸循環器系への影響について調べた研究は少ないのが現状である。運動を行わずとも低酸素環境に曝露されるだけで上記の効果が得られるのであれば、病気やケガ等により運動を行うことができない人々に対しての健康の維持・増進への応用が可能となるものと推測する。本研究は、一過性の低酸素気吸入中の安静および運動が、その後数時間にわたる呼吸循環器系機能に及ぼす影響について検討することを目的とした。

### III. 研究方法

#### 1. 被験者

被験者は、本実験に参加することに協力の得られた運動習慣のない非喫煙者の男子大学生7名であった(表1)。被験者の平均年齢、平均身長および平均体重はそれぞれ  $22 \pm 2$

歳, 174±2cm, 71.1±5.0kg であった. 本実験においては体格による個人の影響を少なくするために体重が均一化されるよう被験者を決定した.

表.1 被験者身体的特性

被験者	年齢 (歳)	身長 (cm)	体重 (kg)	BMI	常酸素環境下 $\dot{V}O_{2max}$ (ml/kg/min)	低酸素環境下 $\dot{V}O_{2max}$ (ml/kg/min)
A	22	177	63.8	20.4	61.2	49.5
B	24	176	77.6	25.1	41.5	37.4
C	23	174	74.9	24.7	49.3	32.9
D	22	176	65.3	21.1	70.3	60.1
E	18	171	71.1	24.3	45.3	39.1
F	24	173	73.7	24.6	41.0	36.7
G	23	171	71.5	24.5	46.2	43.7
平均	22	174	71.1	23.5	50.7*	42.8
標準偏差	2	2	5.0	1.9	11.0	9.3

\*:常酸素環境下  $\dot{V}O_{2max}$  および低酸素環境下  $\dot{V}O_{2max}$  比較検定対応のある検定 (p<0.05)

2. 実験プロトコル

被験者には, 翌日の実験への影響を避けるため, 実験前日の激しい運動, 飲酒を禁止した. さらに, 夜 10 時以降に食事や水以外の水分摂取を行わないよう指示した. 暴露前および暴露後の測定は人工気象室で行った. 人工気象室の設定環境は気温 22°C, 相対湿度 60%に制御した. 実験当日, 被験者は食事を摂らずに水分摂取のみで実験に参加させた.

被験者は実験当日の朝, 覚醒状態で人工気象室での常酸素環境下のもと 15 分間座位安静の後に 10 分間の呼気ガス測定を行った. 次に低酸素室に移動し, 常酸素暴露を座位安静状態で 120 分間行う常酸素安静(以下「N」と略す)および低酸素暴露を座位安静状態で 120 分間行う低酸素安静(以下「H」と略す), 常酸素暴露中に 70 分間の座位安静の後 50 分間の 60~70% $\dot{V}O_{2max}$  の一定負荷運動を行わせる常酸素運動(以下「NE」と略す)および低酸素暴露中に 70 分間の座位安静の後 50 分間の 60~70% $\dot{V}O_{2max}$  の一定負荷運動を行わせる低酸素運動(以下「HE」と略す)を 1 週間のウォッシュアウト期間を設けて

ランダムに行った. 暴露後, 人工気象室に戻り常酸素環境下にて 3 時間の座位安静状態を保ちながら呼気ガス測定を 1 時間毎に 1 回(10min/回)測定した.

3. 実験条件

1) 測定項目および方法

暴露前および暴露後の呼吸循環器系パラメータは breath-by-breath 法を用いて測定した. 測定にはテレメトリー式呼気ガス分析器(Cosemed 社製 K4b2)を用いて, 分時呼気換気量(VE), 酸素摂取量( $\dot{V}O_2$ ), 二酸化炭素排泄量( $\dot{V}CO_2$ ), 呼気終末二酸化炭素分圧(PETCO<sub>2</sub>), 呼吸交換比(R)および心拍数(HR)を測定した. 安静時代謝量(REE)は Weir の式 ( $REE \text{ kcal/min} = 3.9 \times \dot{V}O_2 \text{ l/min} + 1.1 \times \dot{V}CO_2 \text{ l/min}$ )を用いて算出した(Weir, 1949). 暴露中は心拍数(HR)をスポーツ心拍計(POLAR 社製 S810i)を用いて 60 秒毎に継続的に測定し記録した. 動脈血酸素飽和度(SpO<sub>2</sub>)はパルスオキシメータ(KONICA MINORUTA 社製 PULSOX-300i)を左手指先に装着して測定した. 血圧の測定には自動血圧計(OMRON 社製 HEM-6000)を使用した.

2) 最大酸素摂取量( $\dot{V}O_{2max}$ )の測定

被験者にはまず呼気ガス分析装置に慣れさせ, 最大運動負荷テストを実施した.  $\dot{V}O_{2max}$  の測定は低酸素および常酸素運動実験での運動強度を算出する指標とするために実施した. 測定は自転車エルゴメーター(Monark 社製 Ergomedic 828E)を用いて, 1kp の負荷で 2 分間動かした後, 次の 3 分間は 0.5kp ずつ負荷し, その後は疲労困憊にいたるまで 1 分毎に, 0.25kp ずつ負荷し, 疲労困憊にいたるまで運動を行わせる連続的多段階増負荷法を用いた. ペダルの回転数は 60 回

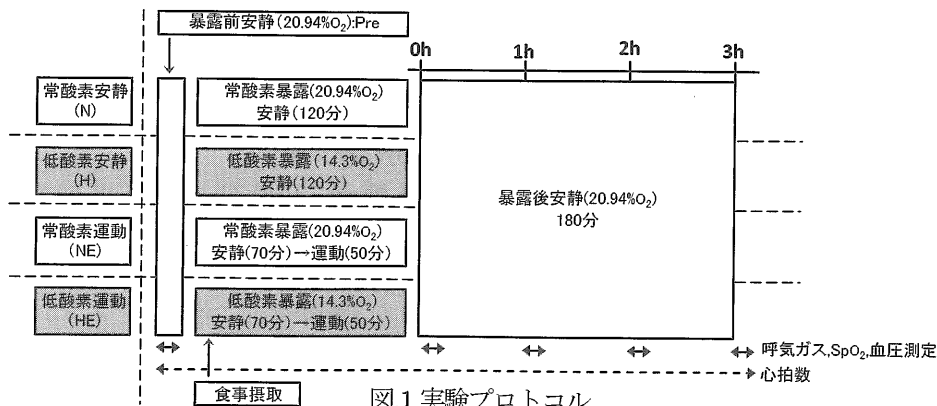


図.1 実験プロトコル

転/分とした。

3) 環境条件

低酸素環境下での実験は、S 大学常圧低酸素室を使用した。本研究では常圧低酸素環境下を標高 3000m 相当 (14.3%O<sub>2</sub>) に調節して行った。常圧低酸素室は低酸素発生装置によって制御されており、まず、大気をコンプレッサーを介して分離膜に通すことによって、低酸素気(10%O<sub>2</sub>)に分離する。分離した低酸素気を大気と再混合して低酸素室に流し、酸素濃度を設定した濃度に一定にコントロールした。

4. 食事

被験者の食事の摂取は暴露開始直後に行われた。食事は摂取エネルギー量に違いが現れないように規定食を用い、おにぎり 2 個(336kcal)を摂取させた。

5. 統計処理

各測定項目については平均値および標準偏差として示した。低酸素環境下および常酸素環境下での最大酸素摂取量の比較には対応のある t 検定を行った。暴露後の経時変化における平均値の差の有意性に関する検定には二元配置分散分析を行い、その後の多重比較検定には Bonferroni の方法を用いた。また暴露後 3 時間の平均値の差を実験条件について有意性を比較するために、一元配置分散分析を行い、その後の多重比較検定には Bonferroni の方法を用いた。統計処理は SPSS 15.0j for windows を用いて行い、有意水準は 5%未満とした。

IV. 研究結果

1. 常酸素および低酸素環境下での最大酸素摂取量(V<sub>O<sub>2</sub>max</sub>)

V<sub>O<sub>2</sub>max</sub> は常酸素環境下で 50.7±11.0 ml/kg/min および、低酸素環境下で(14.3%O<sub>2</sub>)42.8±9.3 ml/kg/min であった。常酸素環境下での V<sub>O<sub>2</sub>max</sub> 値を基準とすると低酸素環境下での V<sub>O<sub>2</sub>max</sub> 相対値は 84%となり、低酸素環境下では常酸素環境下に比べて V<sub>O<sub>2</sub>max</sub> が有意に低い値(p<0.05)となった。

2. 常酸素および低酸素環境曝露中の運動

安静時 HR は、N 試行 61±6beat/min、H 試行 68±4beat/min、NE 試行(安静時) 62±5beat/min、HE 試行(安静時) 69±7beat/min であり、低酸素曝露中が常酸素

曝露中よりも有意に高い値を示した。また曝露中の運動時 HR は、NE 試行 148±9beat/min、HE 試行 143±11beat/min であり、運動中の心拍数に有意な差はみられなかった(p=0.2)

安静時 SpO<sub>2</sub> において常酸素平均 97±0%および低酸素平均 92±2%となり、低酸素環境下において有意に低い値を示した(p<0.001)。また、NE 試行および HE 試行で安静時と運動時の SpO<sub>2</sub> 比較したところ、NE 試行(安静時) 97±0%、NE 試行(運動時) 97±1%、HE 試行(安静時) 91±2%、HE 試行(運動時) 90±2%となり、NE 試行に有意な差が見られなかったものの、HE 試行においては有意に低い値を示した(p<0.05)。

3. 常酸素および低酸素環境曝露後の各パラメータ変化

1) 心拍数(HR)

曝露後 3 時間の HR 平均は、N 試行 55±6beat/min、H 試行 56±3beat/min、NE 試行 67±7beat/min、HE 試行 67±4beat/min となり、運動試行が安静試行よりも有意に高い値を示した。また、これを実験条件別に各 Pre テストからの 3 時間の平均増加率(%ΔHR) について見ると、N 試行-13±13%、H 試行-5±10%、HE 試行 8±9%、NE 試行 0±7%となり、N 試行に比べ NE 試行が有意に高い値を示し(p<0.05)、安静試行よりも運動試行が高い値を示す傾向にあり、また安静試行では常酸素曝露よりも低酸素曝露後が高くなる傾向を示した。

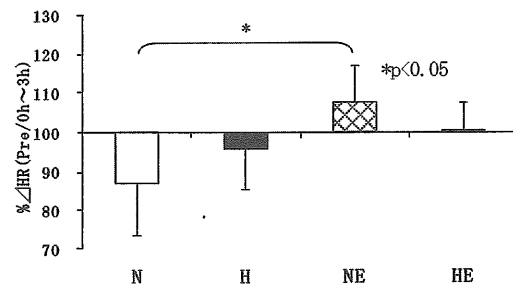


図 2-1. HR 平均増加率

2) 分時換気量(VE)

曝露後 3 時間の VE 平均は、N 試行 8.6±1.1l/min、H 試行 8.7±1.0l/min、NE 試行 9.2±1.2l/min、HE 試行 9.6±1.0l/min であった。これを実験条件別に各 Pre テストからの 3 時間の平均増加率(%ΔVE) について見ると、N 試行 -5±11%、H 試行 -1±6%、NE 試行 8±13%、HE 試行

5±12%となり、安静試行よりも運動試行が高い値を示す傾向にあり、また安静試行では常酸素曝露よりも低酸素曝露後が高くなる傾向を示した。

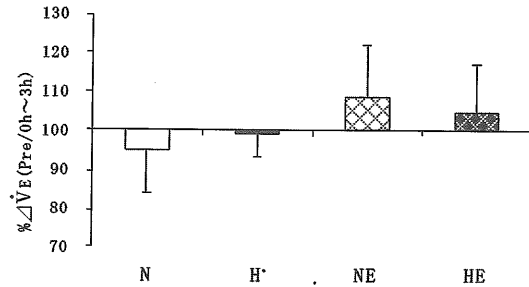


図 2-2. VE 平均増加率

### 3) 酸素摂取量 ( $\dot{V}O_2$ )

曝露後 3 時間の  $\dot{V}O_2$  平均は、N 試行 270±20ml/min, H 試行 266±20ml/min, NE 試行 296±36ml/min, HE 試行 299±17ml/min となり、NE 試行および HE 試行においては実験前後で有意な増加が見られた。これを実験条件別に各 Pre テストからの 3 時間の平均増加率 (% $\dot{V}O_2$ ) について見ると、N 試行 1±17%, H 試行 9±10%, NE 試行 19±14%, HE 試行 20±12% となり、安静試行よりも運動試行が、常酸素曝露よりも低酸素曝露が高い値を示す傾向にあった。

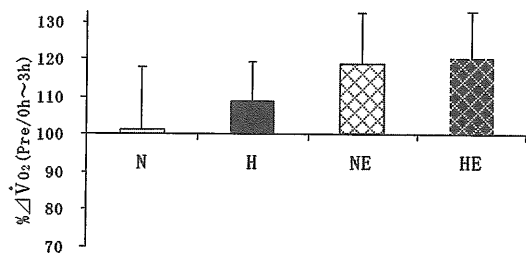


図 2-3.  $\dot{V}O_2$  平均増加率

### 4) 二酸化炭素排泄量 ( $\dot{V}CO_2$ )

曝露後 3 時間の  $\dot{V}CO_2$  平均は、N 試行 224±20ml/min, H 試行 216±15ml/min, NE 試行 232±19ml/min, HE 試行 238±13ml/min となり、NE 試行では実験前後において有意に高い値を示した。これを実験条件別に各 Pre テストからの 3 時間の平均増加率 (% $\dot{V}CO_2$ ) について見ると、N 試行 1±23%, H 試行 6±11%, NE 試行 14±12%, HE 試行 7±13% となり、安静試行よりも運動試行が高い値を示す傾向にあり、また安静試行では常酸素曝露よりも低酸素曝露が高

くなる傾向を示した。

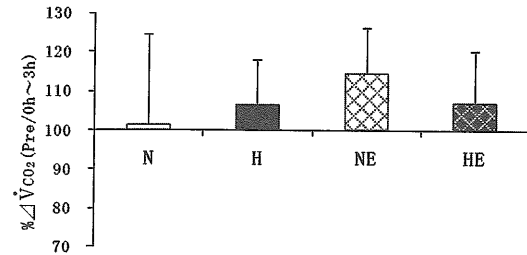


図 2-4.  $\dot{V}CO_2$  平均増加率

### 5) 安静時エネルギー代謝 (REE)

曝露後 3 時間の REE 平均は、N 試行 1.30±0.10 kcal/min, H 試行 1.28±0.09 kcal/min, NE 試行 1.41±0.16 kcal/min, HE 試行 1.43±0.08 kcal/min であり、NE 試行および HE 試行においては実験前後で有意な増加が見られた。また、実験条件別に各 Pre テストからの 3 時間の平均増加率 (% $\dot{V}CO_2$ ) について見ると、N 試行 1±18%, H 試行 8±10%, NE 試行 18±13%, HE 試行 18±12% となり、安静試行よりも運動試行が、常酸素曝露よりも低酸素曝露がそれぞれ高い値を示す傾向にあった。

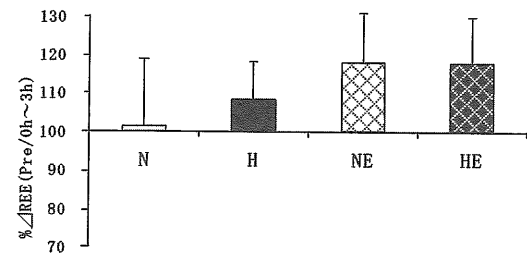


図 2-5. REE 平均増加率

### 6) 呼気終末二酸化炭素分圧 (PETCO2)

曝露後 3 時間の PETCO2 平均は、N 試行 38.26±2.82mmHg, H 試行 37.27±2.45 mmHg, NE 試行 37.99±2.36 mmHg, HE 試行 36.69±3.15mmHg であった。これを実験条件別に各 Pre テストからの 3 時間の平均増加率 (% $\dot{V}CO_2$ ) について見ると、N 試行 5±5%, H 試行 0±4%, NE 試行 3±4%, HE 試行 0±5% となり、常酸素試行よりも低酸素試行が低い値を示す傾向にあった。

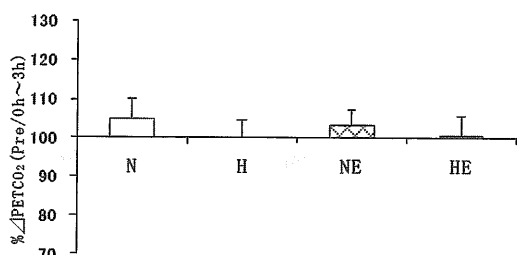


図2-6. PETCO<sub>2</sub>平均増加率

7) 呼吸交換比(R)

曝露後3時間のR平均は、N試行0.83±0.04, H試行0.81±0.03, NE試行0.78±0.05, HE試行0.79±0.03となり、これを実験条件別に各Preテストからの3時間の平均増加率(%ΔR)について見ると、N試行-1±8%, H試行-2±9%, NE試行-4±6%, HE試行-11±6%となり、低酸素曝露および運動試行後にRが下がる傾向が見られた。

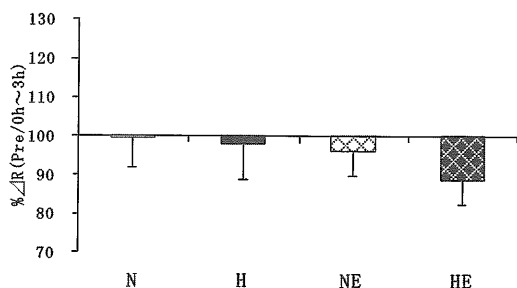


図2-7. R平均増加率

V. 考察

今回の実験において、 $\dot{V}_E$ の増加を各Preテストからの3時間の増加率(%Δ $\dot{V}_E$ )としてみると、酸素濃度による $\dot{V}_E$ の変化は大きく見られないものの、H試行においてはN試行よりも高い増加率を維持する傾向がみられ、また運動試行においては安静試行と比較して換気亢進の傾向がみられた。この結果は他の研究(寺尾ほか, 2002; 長野ほか, 1992)と同様の傾向であった。常酸素環境と低酸素環境での運動実験の比較となるNE試行とHE試行を比較すると、常酸素環境下での運動が低酸素環境下での運動よりも高い換気の亢進の傾向がみられたが、これは運動強度に差があったことが要因の1つとしてとて考えられる。

換気亢進の要因として、一過性の低酸素曝露による $PiO_2$ の低下が起因となる $SaO_2$ の低下が考

えられる(ウィルバー, 2008)。また、呼気中の二酸化炭素の増加、つまりは末梢の二酸化炭素分圧( $PcO_2$ )を低下させる報告(Dempsey and Forster, 1982)があり、今回の実験においても低酸素曝露による換気量の有意な増加は見られないものの、換気亢進の指標となるPETCO<sub>2</sub>が低酸素条件下では低い値を示す傾向となったことから換気の亢進が起こっていた可能性は否定できない。

また、換気の亢進に伴う $\dot{V}O_2$ および $\dot{V}CO_2$ の増加傾向が低酸素曝露および運動試行においてみられ、さらにHRの曝露後の増加率についても、低酸素曝露および運動によってその後3時間のHRの維持および増加傾向がみられた。HRの増加の要因としては、低酸素曝露が交感神経系を刺激し亢進させることが明らかにされており、それは血漿中と尿中のエピネフリンの増加に反映されるとの報告がなされている(Mazzeo et al, 1991)。エピネフリンは副腎髄質から分泌され、 $\beta$ アドレナリン受容体に作用し、心拍数を増加させるとの報告がなされている(Mazzeo et al, 1994)。したがって、低酸素由来によって引き起こされる本研究でみられたHR、 $\dot{V}O_2$ および $\dot{V}CO_2$ の増加の結果は、低酸素曝露によって換気の亢進が起こる可能性を示すものと考えられる。

次に、今回の実験において $\dot{V}O_2$ および $\dot{V}CO_2$ は増加傾向がみられたが、結果として推定によるREEも増加させる結果となった。これまで、常酸素環境における一過性の運動が体熱産生およびエネルギー代謝に及ぼす影響については研究が行われており、70%  $\dot{V}O_{2max}$ 強度の運動を60分行わせたところ24時間が経過してもREEは運動前の値まで戻らないという報告(Maehlum, 1986)がある。この結果は、日本人を対象とした実験においても同様であった(長野ほか, 1992)。一方、低酸素環境下においては、一過性の運動が運動終了に長時間にわたってエネルギー代謝量を上昇させることが報告されている(寺尾ほか, 2002)。今回の実験では、曝露後のREEは先行研究と同様に低酸素曝露および運動により、高い値を示す傾向にあった。Preテストからの%ΔREEで見ると、有意な差ではないがH試行ではN試行と比較して約6%の増加がみられた。しかし、HE試行とNE試行間では差が見られなかった。また運動試行では安静施行に比べ平均で約17%のREEの

増加がみられた。

長野ほか(1992)によれば、平地でVT強度の運動を1時間行くと、運動後過剰酸素摂取量の増加がみられるとともに、Rが運動中の値よりも運動終了後に急激に下降することが報告されており、さらに寺尾ほか(2002)は低酸素環境下でのLT強度での歩行運動が、脂質代謝の亢進を報告しており、時間経過後に低酸素環境での運動が常酸素環境での運動よりも脂質代謝の亢進が持続することを推察している。本研究においても各環境での運動後3時間のRを比較すると、HEが暴露後に最もRの低下を示し、H試行ではN試行と比較するとよりRが低下する傾向が見られることから、低酸素暴露による脂質代謝の亢進が推察された。しかしながら、要因については今回の実験では明らかとすることができなかった。

今回の実験では、BMRの条件が若干異なっていたこと、そして、食事摂取によるエネルギー代謝への影響がどの程度のものだった明らかとすることができなかったことを本研究の限界点として挙げる。今後はこの点について本来、基礎代謝量(BMR: basal metabolic rate)は早朝空腹時で覚醒状態における安静時代謝量のことであり、生命維持に必要な生理科学的反応を支える覚醒時の最小エネルギーと定義されている(中山・入来, 1987)。BMRは、その測定前24~48時間運動を規制し、エネルギーの消費と摂取のバランスのとれた条件下で、夕食と睡眠(8時間)をとって夕食から12時間以上絶食して、翌日の朝、室温を20~22度に設定した室内で覚醒時に精神的にも肉体的にも安静な仰臥の状態に測定されるとしている(Ravussin et al, 1986)。そして、REEの80%前後はBMRによって占められている(Poehlman et al, 1989)。残りの20%の内訳は骨格筋の緊張などの影響が10%、DITの影響が10%である。しかしながら、我々の研究では各試行前の測定では、被験者は必ずしも安静状態であったとはいえ、このことから、BMRの測定の違いが結果に影響していた可能性があることをふまえて、結果を解釈する必要があると考える。今後はこの点について再検討する必要があると考える。

## VI. まとめ

今回の実験から、低酸素環境下に短時間曝露することによる換気の亢進、REE増加および脂質代謝の亢進がおこる可能性が十分にあると考えられる。このことから、低酸素環境曝露が体重の必要以上の増加を抑制することでメタボリックシンドロームや生活習慣病などを予防し、健康の維持・増進に関与する可能性を示す結果となった。

## VII. 引用文献

- 1) 浅野勝己 (1991) 高地と運動. 呼吸, 10(1):1609-1618.
- 2) 浅野勝己ほか (1997) 一般中年男性の低圧シミュレーターによる高所トレーニングの有氧的作業能に及ぼす影響. 筑波大学体育科学系紀要, 20:153-158.
- 3) Asano, K., R. S. Mazzeo, R. E. McCullough, E. E. Wolfel, and J. T. Reeves. (1997) Relation of sympathetic activation to ventilation in man at 4,300m altitude. *Aviation, Space and Environmental Medicine*, 68:104-110.
- 4) 浅野勝己 (1999) 高所トレーニングの生理学的意義と最近の動向. 臨床スポーツ医学, 16(5):505-516.
- 5) 浅野勝己・小林寛道 (2004) 高所トレーニングの科学. 杏林書院:東京, pp. 2-19.
- 6) Dempsey, J. A., and H. V. Forster. (1982) Mediation of ventilator adaptations. *Physiological Reviews*, 62:262-346
- 7) Easton, P. A., L. J. Slykerman, and N. R. Anthonisen. (1986) Ventilatory response to sustained hypoxia in normal adults. *Journal of Applied Physiology*, 61:906-911.
- 8) Fatemian, M., D. Y. Kim, M. J. Poulin, and P. A. Robbins (2001) Very mild exposure to hypoxia for 8hr can induce ventilator acclimatization in humans. *Pflugers Archiv*, 441:840-843.
- 9) Hansen, J. R., G. P. Stetler, and J. F. Vogel. (1967) Arterial pyruvate, lactate, pH and Pco<sub>2</sub> during work at sea level and high

- altitude. *Journal of Applied Physiology*, 24:523-530.
- 10) Hill, J. O., Wyatt, H., Reed, G. W., Peters, J. C. (2003) Where do we go from here?. *Science*, 299:853-855.
  - 11) 細谷憲政 (1997) 今なぜエネルギー代謝か. 第一出版:東京 pp. 8-11, 97-101.
  - 12) Katayama, K., Y. Sato, Y. Morotome, N. Shima, K. Ishida, S. Mori, and M. Miyamura. (1999) Ventilatory chemosensitive adaptations to intermittent hypoxic exposure with endurance training and detraining. *Journal of Applied Physiology*, 86:1805-1811.
  - 13) Katayama, K., Y. Sato, Y. Morotomo, N. Shima, K. Ishida, S. Mori, and M. Miyamura. (2001) Intermittent hypoxia increases ventilation and SaO<sub>2</sub> during hypoxic exercise and hypoxic chemosensitivity. *Journal of Applied Physiology*, 90:1431-1440.
  - 14) Maehlum, S., Grandmontagne, M., Newsholmen, E. A. and Sejester, O. M. (1986) Magnitude and duration of excess postexercise oxygen consumption in healthy young subjects. *Metabolism*, 35:425-429.
  - 15) Mazzeo, R. S., P. R. Bender, G. A. Brooks, G. E. Butterfield, B. M. Groves, J. R. Sutton, E. E. Wolfel, and J. T. Reeves. (1991) Arterial catecholamine responses during exercise with acute and chronic high altitude exposure. *American Journal of Physiology: Endocrinology and Metabolism*, 261:E419-E424.
  - 16) Mazzeo, R. S., E. E. Wolfel, G. E. Butterfield, and J. T. Reeves. (1994) Sympathetic responses during 21 days at high altitude (4,300m) as determined by urinary and arterial catecholamines. *Metabolism*, 43:1226-1232.
  - 17) 中山照雄・入来正躬 (1987) 新生理科学大系 (第22巻) エネルギー代謝・体温調節の生理学. 医学書院:東京, pp. 55-66.
  - 18) 長野真弓・白山正人・平野裕一・宮下充正 (1992) 換気性閾値強度の運動が運動後過剰酸素消費量の量・持続時間におよぼす影響. *体力科学*, 41:436-446.
  - 19) 大中政治 (1976) 安静代謝の日内変動を考慮した特異動作的作用の算出法について. *栄養と食糧*, 29(8):445-454
  - 20) Peronnet, F., G. Thibault, and D.-L. Cousineau. (1991) A theoretical analysis of the effect of altitude on running performance. *Journal of Applied Physiology*, 70:399-404.
  - 21) Poehlman, E. T. (1989) A review: exercise and its influence on resting energy metabolism in man. *Med Sci Sports Exerc*, 21:515-25
  - 22) Tataranni, P. A., Larson, D. E., Snitkr, S., and Ravussin. (1995) Thermic effect of food in humans: methods and results from use of respiratory chamber. *Am. J. Clin. Nutr*, 61:1013-1019
  - 23) Ravussin, E., Lillioja, S., Anderson, T. E., Christin, L., and Bogardus. (1986) Determinants of 24-hour energy expenditure in man. Methods and results using a respiratory chamber. *The Journal of clinical investigation*, 78(6):1568-1578
  - 24) 高桜英輔・長崎盛良・田辺隆一・家城恭彦・藤井礼子・能村ますみ・萩野弘美・結城敦子・泉一郎 (1997) 高所環境における肥満治療の研究(ヘルシーウォーキング立山) - 安静時エネルギー代謝増大を利用して-. *登山医学*, 17:97-102.
  - 25) 寺尾保・桑平一郎・恩田哲也・有賀誠司・中村豊・サンドウー・アダルシュ・宮川千秋・山並義孝・佐藤勝 (2002) 肥満者に対する低圧環境下の歩行運動が運動終了後のエネルギー消費量に及ぼす影響. *東海大学スポーツ医科学雑誌(第14号)*, 14:16-22.
  - 26) Weir, V., (1949) New Methods for calculating metabolic rate with special reference to protein metabolism. *J. Physiol*, 109:1-9.
  - 27) ウィルバー: 川原貴・鈴木康弘訳 (2008) 高地トレーニングと競技パフォーマンス. 講談社サイエンティフィック:東京, pp. 11-69.