

トレッドミル歩行時の二酸化炭素排出量及び 血中乳酸値に及ぼす高酸素吸入の影響

*Effects of hyperoxic gas inhalation on carbon dioxide output
and blood lactate concentration during treadmill walking*

藤瀬 武彦* 長崎 浩爾** 岩垣 丞恒*** 山村 雅一****

Abstract

The purpose of this study was to investigate the effects of hyperoxic gas inhalation on carbon dioxide output ($\dot{V}CO_2$) and blood lactate concentration during endurance exercise at low intensity. Two males and four females performed 30 min of treadmill walking during normoxia (normal air) and hyperoxia (59.6% O₂). In normoxic condition, heart rate and oxygen uptake during exercise were 139 ± 7 beats/min (69.5% HRmax) and 1630 ± 557 ml/min (26.0 ml/kg/min), and exercise intensity was 6.2 Mets. Heart rate, ventilation, $\dot{V}CO_2$, and blood lactate concentration during exercise were obtained in both condition. These physiological parameters were significantly lower in hyperoxia compared with normoxia. Mean value of $\dot{V}CO_2$ during exercise with normoxia was 1302 ± 496 ml/min while in hyperoxia was 1208 ± 518 ml/min. The difference was statistically significant ($p=0.003$). The blood lactate concentration in normoxia was 2.02 ± 0.85 mM while in hyperoxia was 1.47 ± 0.59 mM in like manner. The difference was statistically significant also ($p=0.018$). It was supposed a decrease in value of the respiratory exchange ratio from the result of a decreased $\dot{V}CO_2$ in hyperoxia. These results would suggest that hyperoxia might depress glycolysis and thus enhance fat utilization in endurance exercise at low intensity.

Key words : hyperoxia, treadmill walking, carbon dioxide output, blood lactate concentration, energy metabolism

*FUJISE, Takehiko [新潟国際情報大学 情報文化学部 情報システム学科]

**NAGASAKI, Koji [新潟国際情報大学 情報文化学部 体育非常勤講師]

***IWAGAKI, Suketsune [東海大学 体育学部 運動生理学教室]

****YAMAMURA, Masaichi [東海大学 医学部 生化学教室]

I. 緒言

ヒトに60%程度の高濃度酸素ガス（以下高酸素とする）を吸入させながら持久的な運動を行わせると、常圧下空気呼吸時と比較して心拍数、換気量、呼吸交換比、及び血中乳酸値の上昇などの生理応答が低減すること^{1,2,6,8,12,15,16,22)}、また、疲労困憊まで運動を持続させると作業成績の向上すること^{1,12,15,24,29,32)}が知られている。

これらの生理応答は、持久的トレーニングによる効果とほぼ同様なものであり¹⁰⁾、運動時の骨格筋細胞における中性脂肪利用能の向上が生じ、その結果としてのglycogen sparing effectを示唆するものと考えられている。すなわち、呼吸交換比や血中乳酸値の高酸素吸入による低下は、酸素分圧の上昇によりglycolysisが抑制される¹⁴⁾という、いわゆるPasteur effectが生じ、この結果として脂質代謝によるエネルギー供給が相対的に増加したことを示すものと従来から推測されている^{2,15,16)}。最近ではこのような高酸素吸入の効果を追求するために、ヒトやラットにいわゆる高酸素トレーニングを行わせて呼吸循環機能や代謝応答あるいは運動能力に及ぼす影響についても検討されている^{9,10,11,13,25,27)}。

今日までに一定負荷法による持久的運動における高酸素吸入の影響を検討した報告では、運動強度が中等度から最大下、つまり最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_{2max}$) の67%¹⁶⁾、76.8%²⁾、80%²⁴⁾、90%¹⁾など70~90%程度の方が比較的多く、一般に運動トレーニングとして行われている歩行のように低強度でしかも運動時間が30分程度の持久的運動における高酸素吸入の影響を検討した報告はほとんど見あたらない³¹⁾。

したがって、本実験ではトレッドミル歩行時の高酸素吸入がエネルギー代謝、特に二酸化炭素排出量及び血中乳酸値にどのような影響を及ぼすか検討した。

II. 方法

A. 被験者

被験者には、健康な一般男女大学生6名を選んだ。彼らの身体特性は表1に示した。表中の体脂肪率は、上腕背部及び肩甲骨下部の皮下脂肪厚を測定することによって算出した³⁾。なお、実験に先立ち、その目的、方法、及び安全性について彼らに説明して測定の同意を得た。

Table 1. Physical characteristics in each subject.

Subject	Age (yr)	Height (cm)	Weight (kg)	Fat (%)	LBM (kg)
A(M)	18	179.1	61.4	11.6	54.3
B(F)	22	161.7	58.5	20.4	46.6
C(F)	21	160.4	50.7	28.0	36.5
D(F)	18	157.1	57.4	34.2	37.8
E(F)	21	157.3	49.0	23.3	37.6
F(M)	20	181.1	98.6	21.0	77.9
Mean	20	166.1	62.6	23.1	48.4
SD	2	11.0	18.3	7.6	16.0

M: male, F: female, LBM: lean body mass.

B. トレッドミル歩行

トレッドミル歩行の負荷条件は表2に示した。すなわち、傾斜角度を7~10% (平均8.8%) に設定したトレッドミルによる30分間の歩行運動で、速度は5.0~5.5 km/h (平均5.2 km/h) であった。なお、被験者は全員トレッドミル歩行にある程度慣れていった。

各被験者は原則として1週間の間隔をおいてトレッドミル歩行を2回行った。なお、6名中3名が1回目の歩行時に空気を (以下空気条件とする)、2回目に高酸素を吸入して (以下高酸素条件とする) 運動を行い、他の3名がその逆の順序で行った。

Table 2. Exercise loads of treadmill walking in each subject.

Subject	Speed (km/h)	Elevation (%)
A(M)	5.5	10
B(F)	5.0	10
C(F)	5.0	7
D(F)	5.0	10
E(F)	5.0	7
F(M)	5.4	9
Mean	5.2	8.8
SD	0.2	1.5

M: male, F: female.

C. 高酸素吸入方法

本実験で使用した高酸素は、太陽東洋酸素社製の既知濃度混合ガス (59.6%O₂+40.4%N₂) であった。高酸素の吸入方法は、まず、高酸素をガス圧縮ボンベからビニールチューブを介して蒸留水入りの20ℓガラス製ボトルを通すことにより加湿し、200ℓのダグラスバッグに貯

めた。そして、この高酸素は蛇管を介して被験者に吸入させた。なお、空気条件では高酸素を貯めたダグラスバッグの二方活栓を閉めて空気を呼吸させた。

D. 測定項目

被験者には、まず採気用のルドルフマスクを装着させて、安静時の生理的指標を得るために20分間の仰臥位安静を行わせた。この間、高酸素条件の被験者に対しては高酸素の吸入を行い、そのまま運動を開始させた。

安静時及び運動時の心拍数は、日本光電工業社製ベッドサイドモニター（Life Scope 8, BSM-7103）を用いて双極胸部誘導法により求めた。

酸素摂取量（ $\dot{V}O_2$ ）及び二酸化炭素排出量（ $\dot{V}CO_2$ ）の測定は、ダグラスバッグ法により行った。すなわち、仰臥安静20分後の5分間、運動開始後3分毎に1分間の採気を行った。呼気ガス中の O_2 及び CO_2 濃度の分析には、日本電気三栄社製ガス分析器（Respina IH26）を用いた。これは予め太陽東洋酸素社製の純窒素ガス（99.9999%）及び標準ガス（15.23% O_2 +4.92% CO_2 in N_2 ）によって校正した。また、換気量の測定には品川精器社製乾式テストガスメーター（MODEL DC-5A）を用いた。そして、それぞれ1分毎の $\dot{V}O_2$ 及び $\dot{V}CO_2$ を算出するとともに、これらの値から呼吸交換比（ $\dot{V}CO_2/\dot{V}O_2$ ）を求めた。

なお、高酸素吸入時における $\dot{V}O_2$ は、ダグラスバッグ法によって測定する場合には外気の混合による影響が大きくなり、その値が過大評価される³⁰⁾ために測定しなかった。

血中乳酸値は、安静時、運動開始後9分30秒、19分30秒、及び29分30秒にオートレットにより指先を穿刺して専用のガラス製キャピラリーチューブ（YSI 1505 CAPILLARY DISPENSERS, 25 μ l）を用いて採血し、Yellow Springs Instrument 社製乳酸分析器（YSI 1500 SPORT）によって測定した。

なお、測定時の実験室の室温は22.5~25.0℃であり、気圧は758~772 mmHgの範囲にあった。

E. 統計処理

測定値は平均及び標準偏差で示した。空気条件及び高酸素条件における各測定値は、paired t-testにより比較した。なお、統計的な有意性は危険率5%水準以下とした。

Ⅲ. 結果

A. 空気条件における酸素摂取量

図1には空気条件における $\dot{V}O_2$ の変動を示した。安静時及び運動時（各時点の平均）の $\dot{V}O_2$ は、 266 ± 71 ml/min (4.2 ml/kg/min) 及び 1630 ± 557 ml/min (26.0 ml/kg/min) であった。これらの値から運動強度の指標としてMETs (metabolic equivalent unit) を算出すると6.2 METsであった。

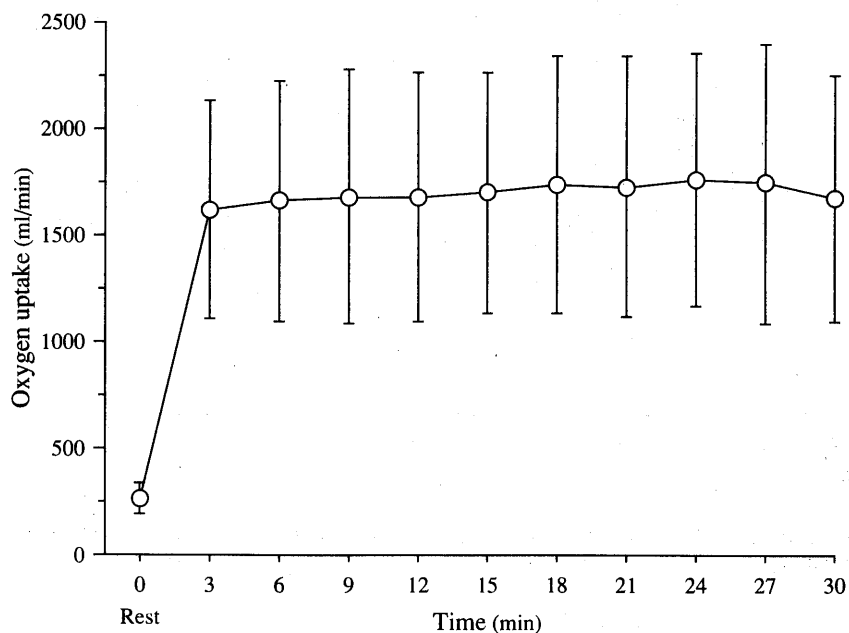


Fig. 1. Oxygen uptake (n=6, means±SD) at rest and during treadmill walking in normoxic condition.

B. 空気条件における呼吸交換比

図2には空気条件における呼吸交換比の変動を示した。安静時及び運動時（各時点の平均）の呼吸交換比は、それぞれ 0.720 ± 0.050 及び 0.800 ± 0.050 であった。

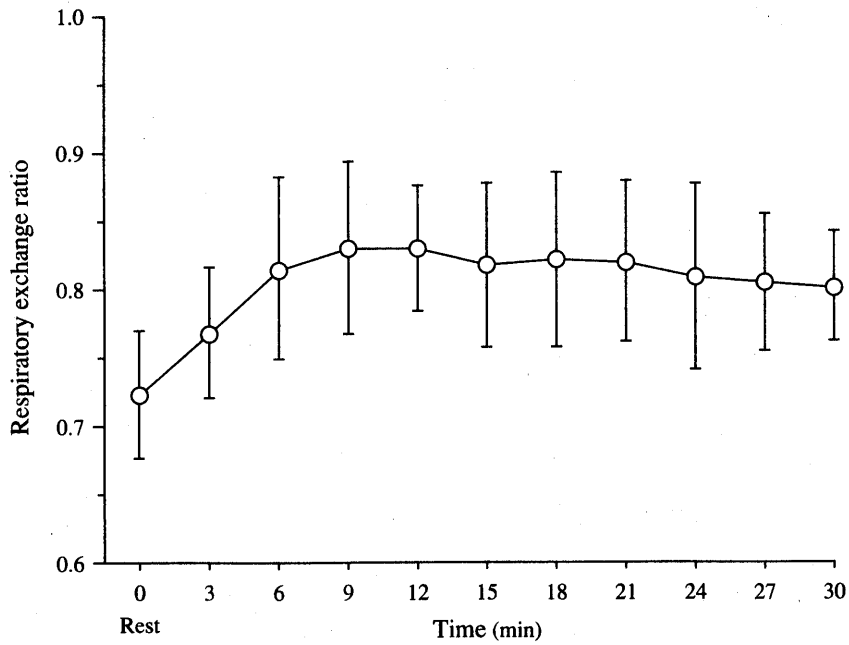


Fig. 2. Respiratory exchange ratio (n=6, means±SD) at rest and during treadmill walking in normoxic condition.

C. 心拍数

図3には安静時及び運動時の心拍数の変動を示した。安静時の心拍数には空気条件及び高酸素条件間に有意差は認められなかったが、運動時の毎分の心拍数はほとんどが高酸素吸入により有意に低値を示した。なお、空気条件及び高酸素条件における運動時の平均心拍数は、それぞれ 139 ± 7 拍/min及び 128 ± 10 拍/minであり、両条件間に有意差が認められた ($p=0.002$)。

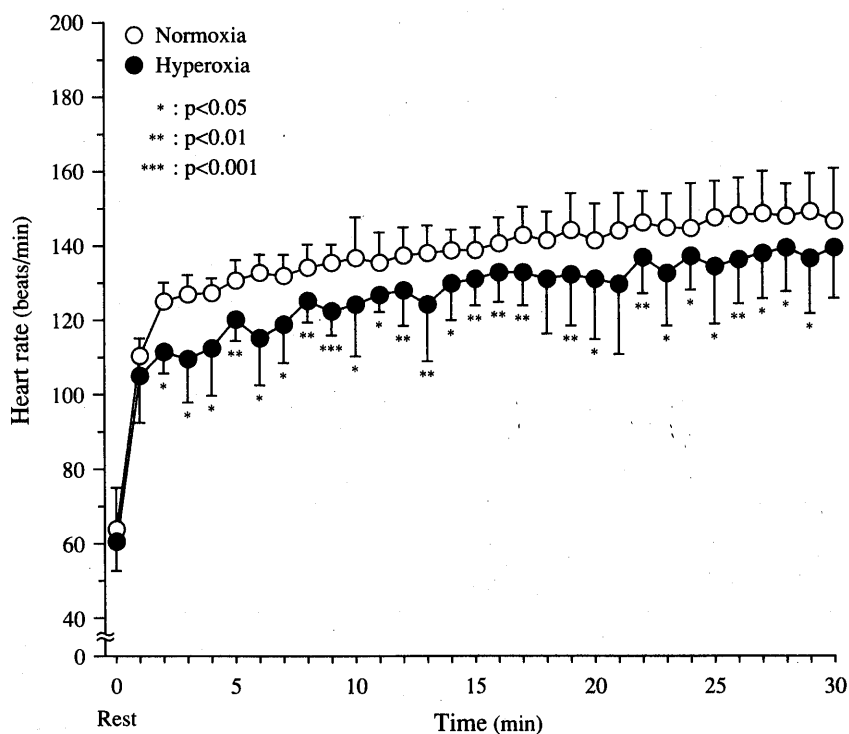


Fig. 3. Heart rate ($n=6$, means \pm SD) at rest and during treadmill walking in normoxic and hyperoxic conditions.

D. 換気量

図4には安静時及び運動時の換気量 (STPD) の変動を示した。安静時の換気量には空気条件及び高酸素条件間に有意差は認められなかったが、運動時の3分毎の換気量は高酸素吸入により低値を示す傾向にあり、3分、9分、15分、18分、24分時点で有意差が認められた。なお、空気条件及び高酸素条件における運動時の平均換気量は、それぞれ 34.8 ± 11.0 l/min及び 30.3 ± 10.6 l/minであり、両条件間に有意差が認められた ($p=0.009$)。

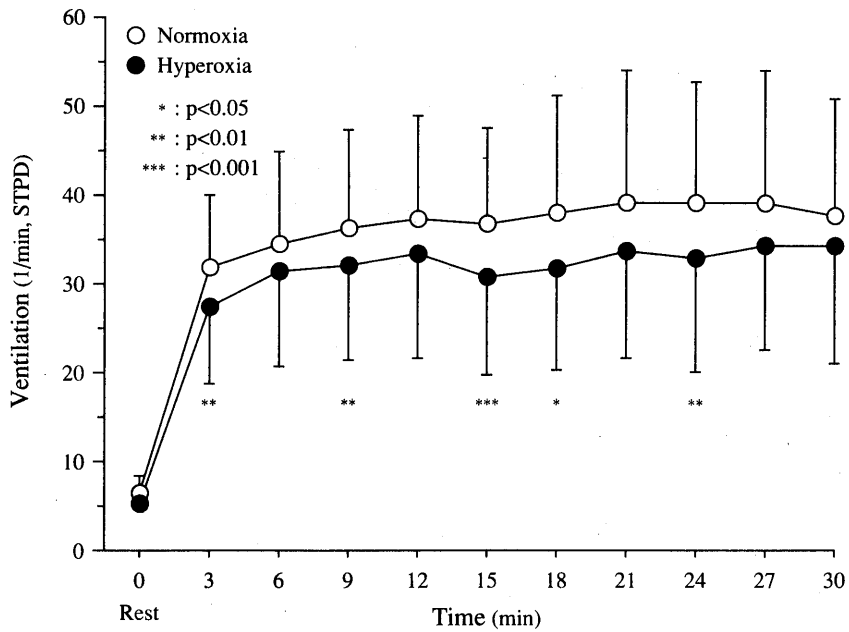


Fig. 4. Ventilation ($n=6$, means \pm SD) at rest and during treadmill walking in normoxic and hyperoxic conditions.

E. 二酸化炭素排出量

図5には安静時及び運動時の \dot{V}_{CO_2} の変動を示した。安静時の換気量には空気条件及び高酸素条件間に有意差は認められなかったが、運動時の3分毎の換気量は高酸素吸入により低値を示す傾向にあり、3分、6分、9分、15分、18分、21分、24分時点で有意差が認められた。なお、空気条件及び高酸素条件における運動時の平均 \dot{V}_{CO_2} は、それぞれ 1302 ± 496 ml/min及び 1208 ± 518 ml/minであり、両条件間に有意差が認められた ($p=0.003$)。

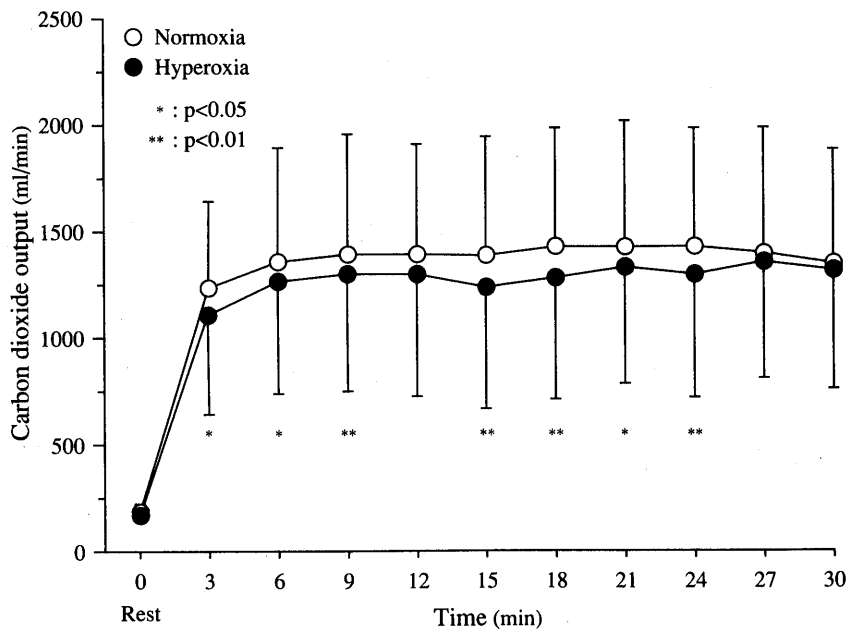


Fig. 5. Carbon dioxide output ($n=6$, means \pm SD) at rest and during treadmill walking in normoxic and hyperoxic conditions.

F. 血中乳酸値

図6には安静時及び運動時の血中乳酸値の変動を示した。血中乳酸値は安静時及び運動時とも高酸素吸入により低値を示す傾向にあり、安静時と運動開始後10分の値には有意差が認められなかったものの運動開始後20分及び30分の値には有意差が認められた ($p<0.05$)。なお、空気条件及び高酸素条件における運動時の平均血中乳酸値は、それぞれ 2.02 ± 0.85 mM及び 1.47 ± 0.59 mMであり、両条件間に有意差が認められた ($p=0.018$)。

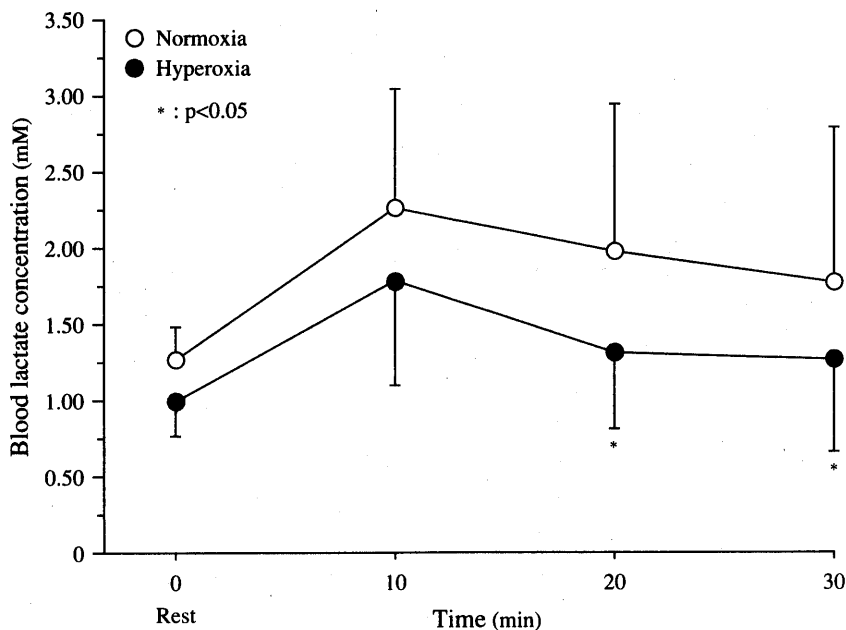


Fig. 6. Blood lactate concentration ($n=6$, means \pm SD) at rest and during treadmill walking in normoxic and hyperoxic conditions.

IV. 考 察

近年、運動時の身体に対する酸素毒の影響について議論されることが多くなった^{21,24}。正常気圧高酸素投与時のいわゆる酸素中毒に関する文献²³では、60%程度の O_2 を長時間にわたり連続吸入したとしても酸素中毒や、細胞障害、気道粘膜線毛や肺胞貪食細胞の機能障害などはほとんど起こらないとされている。確かに60% O_2 を吸入すると O_2^- (superoxide anion radical)などの活性酸素の産生量も酸素濃度に比例して増加する²⁶という意味ではよいことではない

かもしれない。しかし、有酸素的能力の高い者ほどSOD (superoxide dismutase, $2O_2^- + 2H^+ \rightarrow H_2O_2 + O_2$) やcatalase ($2H_2O_2 \rightarrow 2H_2O + O_2$) の活性などのscavenger能が高いと報告されている²⁰⁾。また、最近では高気圧酸素療法 (100%O₂、1.3~2気圧、30~60分) が筋肉の損傷や疲労の回復に有効であり¹⁹⁾、オリンピック選手が試合前後に利用していることも報告されている⁷⁾。このようなことから、現時点では30分程度の運動時の60%O₂吸入が身体に悪影響を及ぼす可能性はかなり少ないものと判断せざるを得ない。

高酸素吸入に関連した報告における一定負荷法での持久的運動の強度は、前述したように多くが $\dot{V}O_{2max}$ の70%程度を超えており、空気条件における運動時の血中乳酸値が3.0~4.0 mM以上に達することが多い^{1,2,16,24)}。本実験では被験者の $\dot{V}O_{2max}$ を測定しなかった。しかし、空気条件での運動において運動強度が6.2 METsであったこと、心拍数が推定最高心拍数 (20-年齢)³⁾の69.5%であったこと、血中乳酸値が2.02 mMであったこと、さらに私たちは本実験以外で一般男女大学生 (男性20名、女子16名、合計36名) を対象に自転車エルゴメーターを用いた漸増負荷法による $\dot{V}O_{2max}$ の測定を行っており、この結果では最高心拍数の69.5%の運動強度が $\dot{V}O_{2max}$ の52.3%に相当した (未発表) ことから、本実験での運動は過去の報告における運動よりも強度の低いことが伺われる。

持久的運動時の高酸素吸入による生理応答の変動は空気条件と比較して、心拍数、換気量、 $\dot{V}CO_2$ 、呼吸交換比、及び血中乳酸値は低値を示す傾向にあることは前述したが、 $\dot{V}O_2$ は空気条件及び高酸素条件ともほぼ同等の値を示すことが多い^{1,2,12,15,17,28)}。本実験でも、測定できなかった $\dot{V}O_2$ 及び呼吸交換比以外の生理応答が高酸素吸入により有意に低値を示し、過去の報告とほぼ一致した。本実験では空気条件及び高酸素条件とも運動強度が同一であったことから、 $\dot{V}O_2$ は両条件とも同等であったことが推測できる。したがって、 $\dot{V}CO_2$ が高酸素吸入により有意に低下したことは、同時に呼吸交換比も低下したことが容易に推測することができると思われる。

持久的トレーニング前後に同一強度の120分間運動 (64% $\dot{V}O_{2max}$ 強度) を負荷した報告⁸⁾では、運動時の呼吸交換比がトレーニング前から後にかけて0.04から0.10 (平均0.062) 低下し、運動時における筋中の中性脂肪の減少量はトレーニング後 (26.1 mmol/kg dry wt) が前 (12.7 mmol/kg dry wt) の約2倍であり、またグリコーゲンの減少量は後 (120 mmol/kg dry wt) が前 (203 mmol/kg dry wt) の約60%であったことが示されている。本実験では運動時の $\dot{V}CO_2$ が高酸素吸入により94 ml/min低下したが、このときの $\dot{V}O_2$ が同等だと仮定すれば、呼吸交換比が空気

条件で0.80で、高酸素条件で0.74になり、0.06の低下が生じたことになる。

一方、ラットを用いた高酸素実験 (hyperbaric hyperoxia; 4 bar)¹⁴⁾では、高酸素暴露により肝組織におけるglyconeogenesisの抑制が生じたことでATPの消費が抑制され (ATP濃度の増加)、この結果として解糖系の鍵酵素であるPFK (phosphofructokinase; ATP+fructose 6-phosphate → ADP+fructose 1,6-diphosphate+H⁺) が抑制されることを示唆している。また、ラットに6週間にわたる間欠的な高酸素暴露や高酸素トレーニングを負荷した報告^{9,10,11)}では、精巢上体周囲脂肪組織の脂肪分解能 (basal lipolysis) の上昇や安静時 (絶食時) の肝グリコーゲン減少量の低下 (glycogen sparing)、さらにはHDLコレステロールの増加の生じる可能性などが示唆されている。

このようなことから、本実験において運動時に $\dot{V}CO_2$ 及び血中乳酸値が高酸素吸入により有意に低値を示したことは、従来から示唆されているように、酸素分圧の上昇によりglycolysisが抑制されたために脂質代謝によるエネルギー供給が相対的に増加したとの推測が可能であろう。しかし、これらの解釈については、必ずしも一致した見解が得られていないのも現状であり^{24,33)}、今後さらに詳細な検討が必要であろう。

V. 結 語

本実験では、一般男女大学生6名を対象に30分間のトレッドミル歩行時の高酸素吸入が $\dot{V}CO_2$ 及び血中乳酸値などの生理応答にどのような影響を及ぼすか検討した。トレッドミル歩行は、8.8%の傾斜で速度が5.2 km/hの条件で、3名が1回目の運動時に空気を、2回目に高酸素を吸入して運動を行い、他の3名がその逆の順序で行った。

- 1) 空気条件における安静時及び運動時の $\dot{V}O_2$ は、 266 ± 71 ml/min (4.2 ml/kg/min) 及び 1630 ± 557 ml/min (26.0 ml/kg/min) であった。したがって、運動強度は約6.2 METsであった。また、安静時及び運動時の呼吸交換比は 0.720 ± 0.050 及び 0.800 ± 0.050 であった。
- 2) 空気条件及び高酸素条件における運動時の心拍数は、それぞれ 139 ± 7 拍/min及び 128 ± 10 拍/minであり ($p=0.002$)、また同様に換気量は 34.8 ± 11.0 l/min及び 30.3 ± 10.6 l/minであり ($p=0.018$)、ともに高酸素吸入により低下した。
- 3) 空気条件及び高酸素条件における運動時の $\dot{V}CO_2$ は、それぞれ 1302 ± 496 ml/min及び 1208 ± 518 ml/minであり ($p=0.003$)、高酸素吸入により低下した。

4) 血中乳酸値は、運動開始後20分及び30分時点で高酸素吸入により有意に低下した。なお、空気条件及び高酸素条件における運動時の平均血中乳酸値は、それぞれ 2.02 ± 0.85 mM及び 1.47 ± 0.59 mMであった ($p=0.018$)。

以上の結果から、低強度の持久的運動であるトレッドミル歩行時の高酸素吸入は、二酸化炭素排出量及び血中乳酸値を有意に低下させることが明らかになった。

謝 辞

本稿を終えるにあたり、実験補助及び測定結果の整理に多大なるご協力をいただきました1998年度情報システム学科4年藤瀬ゼミ学生の成田美紀子君に謝意を表します。

文 献

- 1) Adams, R. P. and H. G. Welch. (1980): Oxygen uptake, acid-base status, and performance with varied inspired oxygen fractions. *J. Appl. Physiol.*, 49: 863-868.
- 2) Adams, R. P., Cashman, P. A., and Young, J. C. (1986): Effect of hyperoxia on substrate utilization during intense submaximal exercise. *J. Appl. Physiol.*, 61: 523-529.
- 3) アメリカスポーツ医学協会編 (1993) : 体育指導者のために 運動処方指針. 原著第4版, 南江堂, 東京.
- 4) Brody, J. S. and M. E. Whitcomb. (1977): Acute respiratory failure. *Medical emergencies*. Little, Brown, Boston: 115-127.
- 5) Brozek, J., Grande, F., Anderson, J. T., and Keys, A. (1963): Densitometric analysis of body composition: revision of some quantitative assumption. *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, 110: 113-140.
- 6) Byrnes, W. C., Mihevic, P. M., Freedson, P. S., and Horvath, S. M. (1984): Submaximal exercise quantified as percent of normoxic and hyperoxic maximum oxygen uptakes. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 16: 572-577.
- 7) コーチング・クリニック編集部 (1998) : コーチング・クリニック5月号, ベースボール・マガジン社, 東京 : pp.44-45.
- 8) Ekblom, B., Huot, R., Stein, E. M., and Thorstensson, A. T. (1975): Effect of changes in arterial

- oxygen content on circulation and physical performance. *J. Appl. Physiol.*, 39: 71-75.
- 9) 藤瀬武彦, 内山秀一, 玉木哲朗, 寺尾 保, 中野昭一 (1989): 高濃度酸素環境下トレーニングの効果に関する基礎的研究—60%酸素吸入がラットの脂肪分解能に及ぼす効果—. 日本体育学会第40回大会号A: 356.
 - 10) 藤瀬武彦, 内山秀一, 寺尾 保, 中野昭一 (1991): ラットの糖・脂質代謝に及ぼす高濃度酸素環境下の持久的トレーニングの影響. *体力科学*, 40: 208-218.
 - 11) Fujise, T., Terao, T., and Nakano, S. (1992): Effects of endurance training under hyperoxia on serum and tissue lipid levels in rats. *Tokai J. Exp. Clin. Med.*, 17: 67-73.
 - 12) 藤瀬武彦, 杉山文宏, 加藤健志, 岩垣丞恒, 松本正彦, 山村雅一 (1997): 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: 30-38.
 - 13) 藤瀬武彦, 杉山文宏, 加藤健志, 岩垣丞恒, 山村雅一 (1998): 持久的運動鍛練者の全身持久力に及ぼす高酸素トレーニングの効果. *トレーニング科学*, 10: 87-96
 - 14) Hanson, R. De G., Gray, R. M., and Alberti, M. M. (1981): Liver metabolites in resting and exercising rats at 1 and 4 bar. *J. Appl. Physiol.*, 51: 1326-1330.
 - 15) Hogan, M. C., Cox, R. H., and Welch, H. G. (1983): Lactate accumulation during incremental exercise with varied inspired oxygen fractions. *J. Appl. Physiol.*, 55: 1134-1140.
 - 16) Howley, E. T., Cox, R. H., Welch, H. G., and Adams, R. P. (1983): Effect of hyperoxia on metabolic and catecholamine responses to prolonged exercise. *J. Appl. Physiol.*, 54: 59-63.
 - 17) Hughes, R. L., Clode, M., Edwards, R. H. T., Goodwin, T. J., and Jones, N. L. (1968): Effect of inspired O₂ on cardiopulmonary and metabolic responses to exercise in man. *J. Appl. Physiol.*, 24: 336-347.
 - 18) Hurley, B. F., Nemeth, P. M., Martin III, W. H., Hagberg, J. M., Dalsky, G. P., and Holloszy, J. O. (1986): Muscle triglyceride utilization during exercise: effect of training. *J. Appl. Physiol.*, 60: 562-567.
 - 19) Ishii, Y., Miyanaga, Y., Asano, K., Shimojo, H., and Shiraki, H. (1998): Metabolic effects of hyperbaric oxygen on muscle tear in the hind limb of rats. *Adv. Exerc. Sports Physiol.*, 4: 11-15.
 - 20) Jenkins, R. R., Friedland, R., and Howald, H. (1984): The relationship of oxygen uptake to superoxide dismutase and catalase activity in human skeletal muscle. *Int. J. Sports Med.*, 5: 11-14.

- 21) 加藤邦彦 (1994): シンポジウムⅣ: 運動と活性酸素 運動はからだに悪い—活性酸素と老化促進. 体力科学, 43: 25-26.
- 22) Mateika, J. H. and Duffin, J. (1994): The ventilation, lactate and electromyographic thresholds during incremental exercise tests in normoxia, hypoxia and hyperoxia. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 69: 110-118.
- 23) Nunn, J. F. (1987): *Applied respiratory physiology*, 3rd ed. Butterworth and Co. (Publishers) Ltd. : 478-494.
- 24) Plet, J., Pedersen, P. K., Jensen, F. B., and Hansen, J. K. (1992): Increased working capacity with hyperoxia in humans. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 65: 171- 177.
- 25) Ploutz-Snyder, L. L., Simoneau, J.-A., Gilders, R. M., Staron, R. S., and Hagerman, F. C. (1996): Cardiorespiratory and metabolic adaptations to hyperoxic training. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 73: 38-48.
- 26) Sies, H., 井上正康監訳 (1987): 活性酸素と疾患. 初版, 学会出版センター. 東京: pp.162-163.
- 27) 杉山康司, 青木純一郎 (1990): 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.
- 28) Welch, H. G., Bonde-Petersen, F., Graham, T., Klousen, K., and Secher N. (1977): Effects of hyperoxia on leg blood flow and metabolism during exercise. *J. Appl. Physiol.*, 42: 385-390.
- 29) Welch, H. G. (1982): Hyperoxia and human performance: a brief review. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 14: 253-262.
- 30) Welch, H. G. and Pedersen, P. K. (1981): Measurement of metabolic rate in hyperoxia. *J. Appl. Physiol.*, 51: 725-731.
- 31) Wilson, B. A., Welch, H. G., and Liles, J. N. (1975): Effects of hyperoxic gas mixture on energy metabolism during prolonged work. *J. Appl. Physiol.*, 39: 267-271.
- 32) Wilson, G. D. and Welch, H. G. (1975): Effects of hyperoxic gas mixtures on exercise tolerance in man. *Med. Sci. Sports*, 7: 48-52.
- 33) Wolfe, B. R., Graham, T. E., and Barclay, J. K. (1987): Hyperoxia, mitochondrial redox state, and lactate metabolism of in situ canine muscle. *Am. J. Physiol.*, 253: C263-C268.
- 34) 吉川敏一, 西村俊一郎, 近藤元治 (1994): 運動と活性酸素. 体力科学, 43: 241-246.