

Effect of normobaric hyperoxia on quadriceps muscle fatigability during repetitive maximal isometric contractions

平岩 悠子¹⁾, 吉武 康栄²⁾, 山本 正嘉³⁾

¹⁾鹿屋体育大学体育学部

²⁾鹿屋体育大学スポーツパフォーマンス系

³⁾鹿屋体育大学スポーツトレーニング教育研究センター

Yuko Hiraiwa¹⁾, Yasuhide Yoshitake¹⁾, and Masayoshi Yamamoto¹⁾

¹⁾National Institute of Fitness and Sports in Kanoya

Abstract

The effect of higher O₂ content in the air on quadriceps muscle fatigability during repetitive maximal isometric contractions was assessed in healthy young male. On separate days, nine participants performed twenty single-leg knee-extension exercises with maximal efforts while inspiring normal air (CONT) or 30 % O₂ (HO). Surface EMG from the rectus femoris and vastus lateralis muscles, knee extension force, blood lactate concentration, and SpO₂ were measured during muscle contractions under both conditions. Almost all measurement parameters were not significantly different between CONT and HO except for SpO₂. The results suggest that the quadriceps muscle fatigability involving exerted force and muscle activation level during repetitive muscle contractions at high intensity are not affected on the hyperoxia at least at 30% O₂.

Key words: hyperoxia, knee extension, EMG

キーワード：高酸素環境，脚伸展運動，筋電図

I. 研究目的

高酸素環境下で運動を行った場合に，どのような生理応答が起こるかについては，古くから運動生理学者の興味を引き，多くの検討が行われてきた．先行研究を見ると，相対的に運動強度が低くて持続時間の長い，いわゆる有酸素運動に関しては，作業能力が向上することをはじめとして，活動筋への酸素の運搬や利用の増加，乳酸蓄積に伴う H⁺イオン濃度増加の抑制，換気低下による呼吸運動のエネルギー消費量の減少，呼吸交換比の低下から推測され

るグリコーゲン節約といった効果が報告されている^{1,2,3,4,5)}．

一方，高酸素環境が無酸素性の運動に及ぼす影響については研究が少ないが，その中で藤瀬ら⁶⁾は，酸素濃度60%の高酸素空気を吸入しながらベンチプレスを疲労困憊まで行った時に，反復回数が増加すると報告している．またEikenら⁷⁾は，1.3気圧の高圧室で高酸素を吸入しながら，最大努力で等速性の膝伸展運動を行った時に，最大トルクや仕事量が増加することを報告している．

このような報告を考慮すると、有酸素性、無酸素性運動ともに、高酸素環境下でトレーニングを行うことで、その効果を向上できる可能性も考えられる。しかしこれまでは、高酸素ガスを詰めたボンベを用いたり、高压室に入室するなど、特殊性の高いものであったために、実質的には取り組むことが困難であった。

ところが近年、膜分離方式を利用した常圧高酸素室が開発されたことにより、安全で手軽に高酸素トレーニングができるようになってきた。この施設の制約として、酸素濃度は30%程度が上限であるということがあるが、有酸素性の運動能力に関してはこの程度の高酸素環境下でも改善すると報告されている⁸⁾。しかし、われわれが知る限りでは、無酸素性運動の場合に運動能力が改善するかについては研究は見られない。

そこで本研究では、酸素濃度30%に設定した常圧高酸素室において、最大努力で下肢の等尺性運動を反復して行った。そして、各セットの最大発揮筋力、筋放電量、呼吸循環系等の生理応答について、通常酸素環境下で同様の運動を行った時と比較検討することを目的とした。

II. 方 法

A. 被験者

被験者は、健康な体育大学男子学生9名（年齢：21.7±1.3歳，身長：168.5±4.2cm，体重：64.8±5.9kg）とした。すべての被験者には、本研究の目的、方法、およびそれにとまなう危険性について、文書および口頭にて説明し、本研究に参加する同意を得た。

B. 運動の方法

すべての実験は、環境シミュレーター室（トレーニング環境シミュレーター、エスペックエンジニアリング社製）において、常圧高酸素環境（酸素濃度：30.0%）と、通常酸素環境（20.9%）の2条件下でおこなった。また課題運動は、右脚での等尺性膝伸展運動を行った。

図1と図2は、実験のプロトコルと実験風景を示したものである。被験者は、環境シミュレーター室内で30分間の安静暴露を行った後、約5分間の軽いウォーミングアップを行った。被験者は図2のように座位姿勢をとった後、意図しない動きの混入を避けるために、被験者の体幹および両脚部はゴムバンドで固定した。なお、右脚の膝関節角度は全被験者

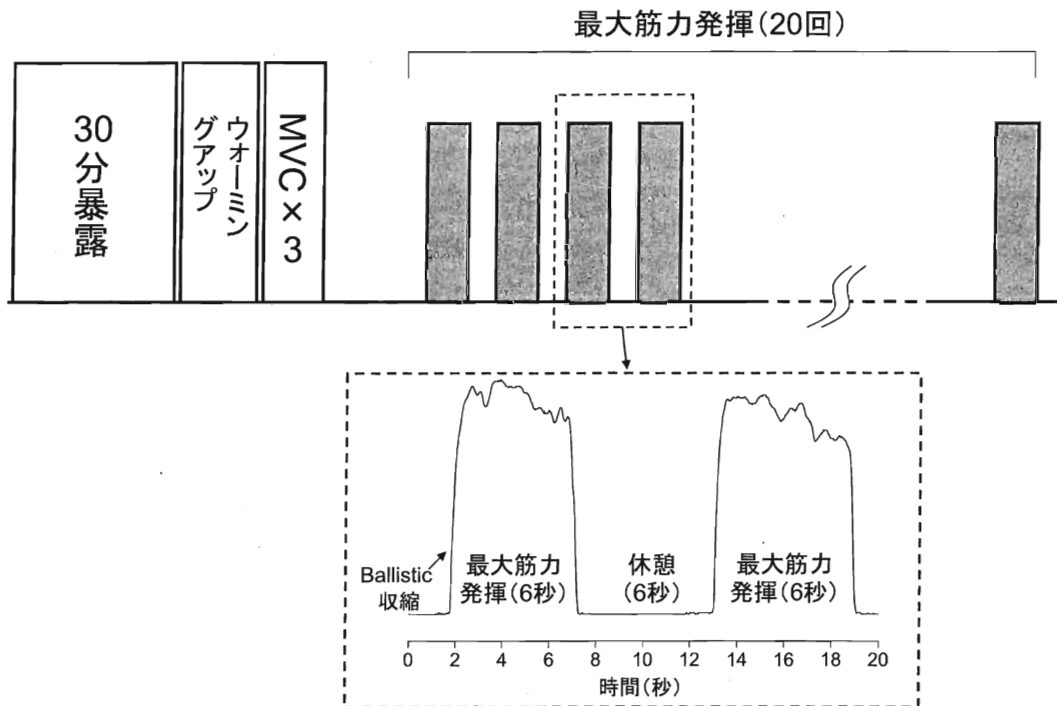
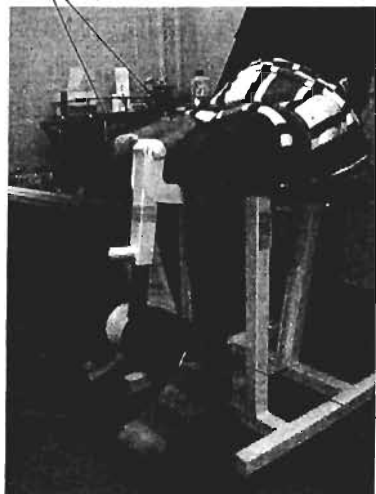


図1. 実験のプロトコル

筋電図(EMG)



ロードセル

図2. 実験風景

において90度に固定した。

まず、膝伸展動作の最大等尺性筋収縮 (maximal voluntary contraction; MVC) を行った。力発揮は、約5秒間かけてMVCに到達するよう少しずつ増加させ、その後約3秒間維持するよう行わせた。この試行は3回行い、そのうち最も筋力発揮が大きかった試技の最大値を各被験者のMVCとした。各試行の間には最低3分間の休憩を与えた。

次に、最大努力での反復筋力測定を行った。運動様式は、最大努力の6秒間筋力発揮と6秒間安静を1セットとし、これを20セット行わせた(図1)。力を発揮させる際には、安静時の6秒間に膝関節の位置を90度に合わせてから、できるだけ爆発的(ballistic)に膝伸展運動を行い、その後は最大努力の筋収縮を持続させるように指示した。なお、運動および休息のタイミングは検者のカウントによって調節した。

測定は、常圧高酸素環境と通常酸素環境の2条件をランダムな順序で、別の日の同一時間帯に行った。また、筋疲労や筋痛を考慮し、測定の間隔は5日以上あけた。なお、全被験者には測定日の2日以上前に動作の練習を行わせた。

C. 測定項目

1) 発揮筋力と筋電図

発揮筋力は、ロードセル(5710A, 日本光電社製)を用いて測定し、DCアンプ(1269T, 日本光電社製)を介して増幅し導出した。

筋電図(EMG)は、双極誘導の表面電極法により記録した。被験筋は、右脚の外側広筋、大腿直筋の計2筋とした。筋電図は、直径5mmの銀円盤の電極(Ag/AgCl製)を用い導出した。電極の装着は、皮膚抵抗を減らすために筋電図貼付部位をサンドペーパーでこすり、アルコール綿で十分に拭き取った後、各筋腹の中央に2cmの電極間距離にて皮膚表面に貼付した。アース用の電極は膝蓋骨上に貼付した。EMG信号は、生体アンプ(MEG-6108M, 日本光電社製)で増幅し、時定数0.03秒、高域遮断1000Hz~2000Hzにて導出した。

各セットにおける発揮筋力およびEMGは、各セットの運動6秒中、中央3秒間の平均筋電図振幅値(RMS)を、Chart5.1(AD Instruments社製)を用いて算出した。筋電図においては、MVC測定時において、筋力が最大値を示した地点から中央0.5秒間の筋電図振幅値を基準値とし、正規化を行った。同様に、MVC発揮時に得られた値を基準とし、反復筋力測定時の筋力を正規化した。

さらに、筋収縮を始めてから筋力が最大値に達するまでの区間(以下、立ち上がり)、筋弛緩を始めてから完全に弛緩するまでの区間(以下、立ち下がり)の最大速度を定量化するために、力の1階微分値を算出し、その最大値および最小値をそれぞれの評価値とした。さらに発揮筋力の運動中6秒間の積分値も求めた。

脚筋力、EMGの各データは、16ビットのA/D変換機(Power-Lab/16s, AD Instruments社製)を用いて1000~2000HzでサンプリングしPCに記録した。EMGに関しては、オフライン上にて帯域通過処理5~500Hzを行った。

2) 呼吸循環系および代謝系の応答

動脈血酸素飽和度(SpO₂)は、実験開始から終了まで、パルスオキシメーター(Pulsox-3si, Minolta社製)を用いて連続的に測定し、セットご

とに算出した。

心拍数 (HR) は、実験開始から終了まで心拍計 (702i, Polar社製) を用いて連続的に測定し、SpO₂ と同様の表し方で示した。

血中乳酸濃度 (La) は、簡易血中乳酸測定器 (ラクテートプロ, アークレイ社製) を用い、30分暴露後 (運動前)、運動終了1分後、3分後、6分後の計4回測定した。

D. 統計処理

統計処理には、条件とセットをそれぞれ要因とした反復測定による二元配置分散分析を用いた。その結果、各条件間に有意差が見られた場合は、ボンフェローニ法にて有意差を判定した。有意水準は5%とした。

なお、図は平均値と標準誤差で示した。

Ⅲ. 結 果

1) データの記録状況

本研究の結果、反復最大筋力測定時において、筋

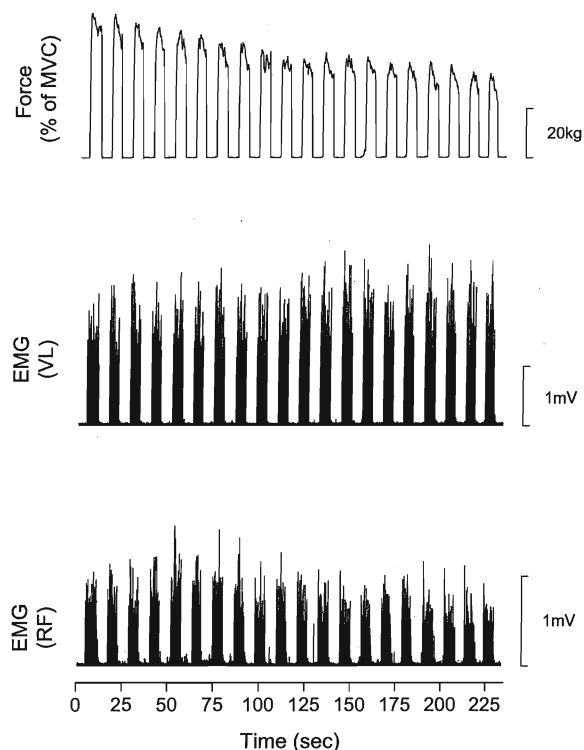


図3. 反復最大筋力発揮中の力 (上段)、外側広筋 (中段) および大腿直筋 (下段) の全波整流後の節電図波形の例

力の1セット目の値が2セット目の値に比べて低値を示しており、ウォーミングアップ不足の可能性が考えられた。このため筋力、EMG、iEMG、筋力の上昇、下降については、2セット目の値を基準として正規化して算出することとし、計19セットの結果を図で示した。

また被験者は全部で9名であったが、EMGについてはS/N比が顕著に低かった者が3名いた。また、測定機器の誤作動によって測定が出来なかった者が、筋力の立ち上がりと立ち下がりでは1名、HRでは3名、SpO₂では2名いた。このため、以下の記述するデータはそれらを省いて算出したものである。

2) 発揮筋力および筋電図

図3は、反復最大筋力発揮中の力および筋電図の例を示している。

図4は、両条件における各セットの発揮筋力について、9名の平均値を示したものである。発揮筋力は運動の進行に伴い徐々に低下する傾向を示したが、その全セットにおいて環境間に有意差は認められなかった。

図5は、外側広筋 (A) および大腿直筋 (B) の筋放電量について、6名の結果を示したものである。どちらの筋においても、全セットにおいて環境間に有意差は認められなかった。

図6 Aは、両条件での各セットにおける8名の力の立ち上がりの平均値を示したものである。有意差は見られなかったが、後半で高酸素環境の方がやや

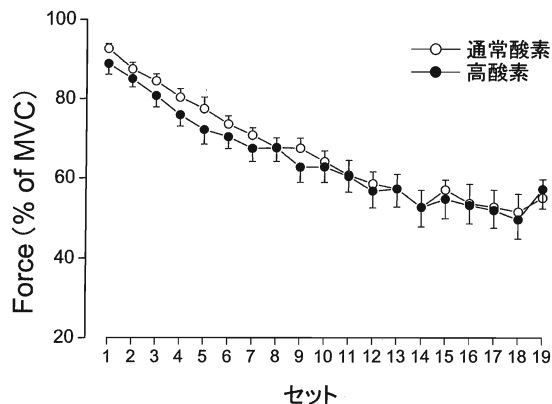


図4. 両環境での発揮筋力 (n = 9). 値はMVCに対する相対値で表した。

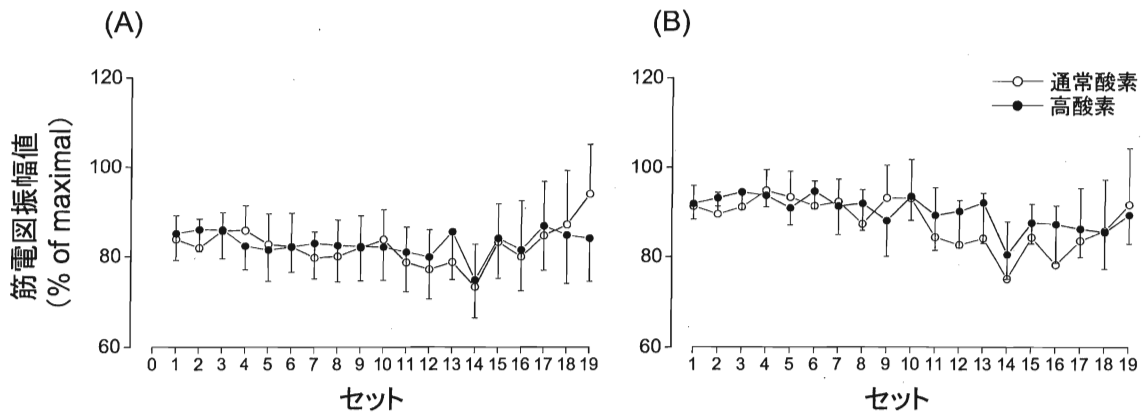


図5. 外側広筋 (A) および大腿直筋 (B) の筋放電量 (n = 6).

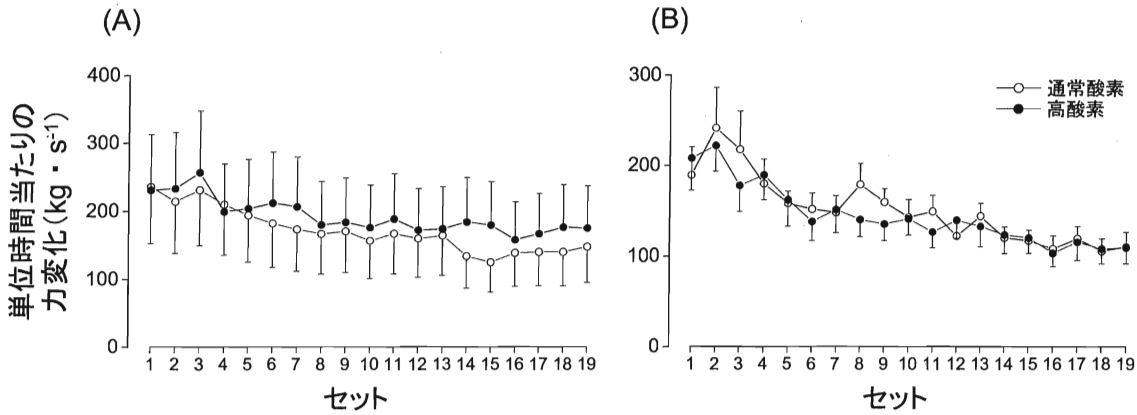


図6. 発揮筋力の立ち上がり (A) および立ち下がり (B) (n = 8).

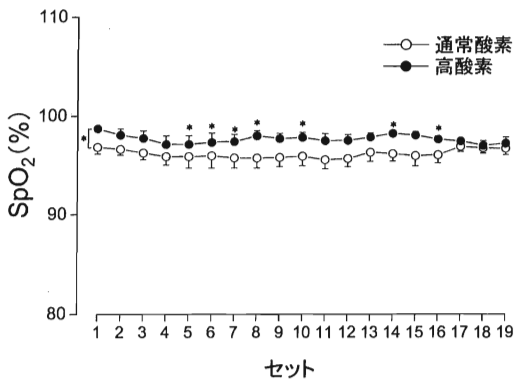


図7. 運動中のSpO₂の推移 (n = 7). * P < 0.05

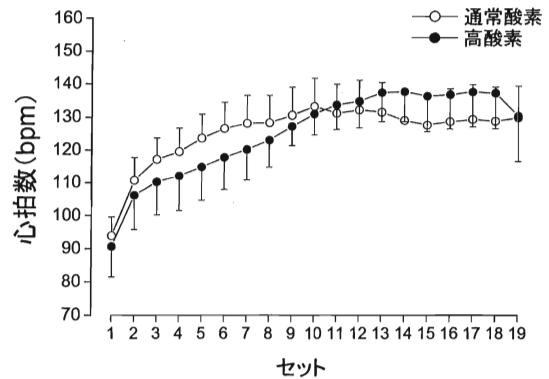


図8. 運動中の心拍数 (HR) の推移 (n = 6).

高い値を示す傾向が見られた。図6 Bは、両条件での各セットにおける8名の力の立ち下りの平均値を示したものであるが、有意差は認められなかった。

3) 呼吸循環系および代謝系の生理応答

図7は、両環境での、運動開始から終了までの7名のSpO₂の応答を示したものである。高酸素の条

件では、運動開始から運動後半にかけて、有意に高い値を示した (P < 0.05)。

図8は、両環境での運動開始から終了までの、6名の心拍数の応答を示したものである。運動前半では通常酸素の条件で、また運動後半には高酸素の条件で高値を示す傾向が見られたが、有意差は認めら

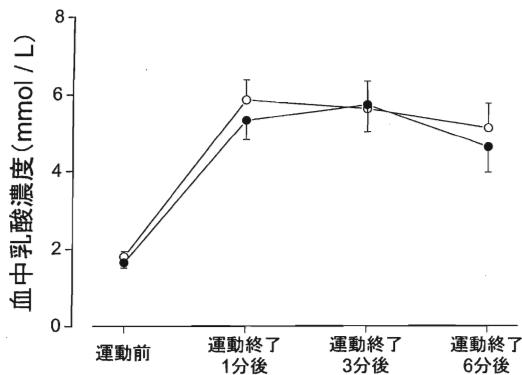


図9. 血中乳酸濃度の推移 (n = 9).

れなかった。

図9は、両環境における安静時と回復期の9名の血中乳酸濃度の変動を示したものである。環境間に有意差は認められなかった。

IV. 考 察

本研究では、酸素濃度が30%の常圧高酸素環境下において、下肢の最大等尺性運動を反復して行った。そしてその時の発揮筋力や生理応答について、通常酸素環境下で同様の運動を行った時と比較した。その結果、発揮筋力の大きさを始め(図4)、発揮筋力の立ち上がりや立ち下がり(図6)といった筋力発揮特性、および筋電図(図5)にも両環境で有意差は見られなかった。

また生理応答についても、SpO₂のみ有意差が見られたものの(図7)、心拍数(図8)や血中乳酸濃度(図9)には有意差は認められなかった。したがって本実験で用いた、酸素濃度が30%という高酸素環境下において、片脚の等尺性運動を行う場合には、高酸素環境の影響は受けないといえる。

先行研究を見ると、藤瀬ら⁶⁾は、約60%の常圧高酸素空気を吸入させながら1RMの70%の負荷でベンチプレスを行った結果、作業回数が有意に増加したと報告している。またEikenら⁷⁾は、1.3気圧の環境で高酸素を吸入させながら、最大努力での等速性の膝伸展運動を反復した結果、ピークトルクや総仕事量が有意に増加したと報告している。

本研究と先行研究との間で、このような相違が見られた理由としては、本研究で用いた酸素濃度が30

%と、先行研究に比べて低かったことが考えられる。酸素分圧として比べてみると、本研究では藤瀬の場合の約2分の1、Eikenの場合の約6分の1という低いものであった。したがって、高酸素空気を吸入することの生体への影響が小さかった可能性が考えられる。

本研究で酸素濃度を30%に設定した理由は、現在トレーニング施設として普及しつつある、膜分離方式を利用した常圧高酸素室の、高酸素濃度の設定の上限が30%程度であることによる。この方式を用いた高酸素室は、高圧室に比べると安全性が高く、また使用方法も簡便であり、コストも安価であるため、スポーツトレーニングにとっては活用しやすい施設である。またこれまでの研究により、有酸素性運動に関しては、作業能力の向上などの効果があることが報告されている^{1,2,3,4,7)}。

しかし本研究の結果から、片脚での脚伸展等尺性運動といった比較的局所的な運動においては、30%の常圧高酸素環境ではその効果が得られない可能性が高いといえよう。

V. ま と め

本研究では、常圧の高酸素環境下と通常酸素環境下において、最大努力で等尺性運動を反復し、発揮筋力、筋放電量、呼吸循環系や代謝系の生理応答を比較検討した。その結果、発揮筋力の諸特性には両環境間で有意差が見られなかった。また生理応答については、動脈血酸素飽和度に一部で有意差が見られたものの、筋放電量、心拍数、血中乳酸濃度には有意差は見られなかった。したがって、30%の常圧高酸素環境下でこのような局所的な全力運動を反復して行う場合、運動のパフォーマンスや生理応答は改善されないことが示唆される。

引用文献

- 1) 杉山康司, 青木純一郎: 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, 1990.
- 2) 坪井實: 運動時における酸素の効用. Jpn. J. Sports Sci., 6: 797-802, 1987.

- 3) Linossier M.-T., D. Dormois, L. Arzac, C. Denis, J.-P. Gay, A. Geysant, and J.-R. Lacour: Effect of hyperoxia on aerobic and anaerobic performances and muscle metabolism during maximal cycling exercise. *Acta Physiol. Scand.*, 168: 403-411, 2000.
- 4) Plet J., P. K. Pedersen, F. B. Jensen, and J. K. Hansen: Increased working capacity with hyperoxia in humans. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 65: 171-177, 1992.
- 5) Welch, H. G.: Hyperoxia and human performance; a brief review. *Med. Sci. Sports Exer.*, 14: 253-262, 1982.
- 6) 藤瀬武彦, 重原麻里, 長崎浩爾, 高橋努, 岩垣丞恒, 山村雅一: 無酸素的運動時の高濃度酸素ガス吸入が作業成績に及ぼす効果. 新潟国際情報大学情報文化学部紀要, 5: 265-282, 2002.
- 7) Eiken, O., C. M. Hesser, F. Lind, A. Thorsson, and P. A. Tesch: Human skeletal muscle function and metabolism during intense exercise at high O₂ and N₂ pressures. *J. Appl. Physiol.*, 63: 571-575, 1987.
- 8) 許斐真由子: 高酸素環境下で行う高強度 Interval Trainingの効果; 通常酸素環境下でのトレーニングと比較して, 平成16年度 鹿屋体育大学大学院体育学研究科修士論文.