

高気圧・高濃度酸素は筋疲労および筋痛を 早期に回復できるか

京都大学大学院 石原 昭彦

Effects of Hyperbaric Exposure with High Concentration of Oxygen on Recovery of Muscle Stiffness

by

Akihiko Ishihara

*Graduate School of Human and Environmental Studies,
Kyoto University*

ABSTRACT

Effects of hyperbaric exposure with high concentration of oxygen on recovery of muscle stiffness and fatigue were investigated. College volleyball players were exposed to hyperbaric exposure (1.25 atm) with high concentration of oxygen (35.0%) for 1 hour a day. After 5 days, oxygen saturation, blood lactate level, muscle stiffness and fatigue were measured before and after hyperbaric exposure. The oxygen saturation increased and the blood lactate level, muscle stiffness and fatigue decreased after hyperbaric exposure. It is concluded that the increased blood flow and oxygen supply by hyperbaric exposure with high concentration of oxygen induce an enhancement in muscle metabolism, which improves muscle stiffness and fatigue.

要 旨

高気圧および高濃度酸素への曝露によって筋疲労や筋痛を効果的に回復できるかどうかを検討した。大学バレーボール部の男子選手を5日間の合宿中に毎日1時間にわたり1.25気圧で酸素濃度を

35.0%に維持した酸素カプセルに滞在させた。合宿5日目に酸素カプセルに滞在する前後で酸素飽和度、血中乳酸値、筋硬度、筋痛を比較した。その結果、高気圧および高濃度酸素への滞在によって酸素飽和度が上昇して血中乳酸値が減少した。さらに、高気圧および高濃度酸素への滞在によっ

て筋の硬さや筋痛が軽減した。高気圧および高濃度酸素への滞在によって血流量（酸素量）が増大して代謝が向上したことが筋疲労や筋痛からの早期回復を引き起こしたと結論される。

緒言

長時間の筋活動は、疲労物質（乳酸）の蓄積や筋血流量の低下を引き起こす。乳酸の蓄積や筋血流量の低下は骨格筋の回復を遅らせることになり、回復前に筋活動を行えば筋や腱、靭帯の損傷を引き起こす可能性が高くなる。短時間で効果的に筋疲労や筋痛から回復できれば早期に安全に筋活動を再開できる。

高気圧・高濃度酸素への滞在は、ヘモグロビンに結びつく結合型酸素を増大させて、さらに、体液中にガス化して溶け込む溶解型酸素を増大させる。増大した結合型酸素や溶解型酸素は、乳酸の除去を促進したり、細胞の代謝を向上させるので、筋疲労や筋痛からの早期回復を期待できる。本研究では、大学のバレーボール部に所属する男子選手を高気圧・高濃度酸素を維持できる酸素カプセルに滞在させて、筋疲労や筋痛から効果的に回復できるかどうかを検討した。

1. 実験方法および結果

実験1 高気圧・高濃度酸素は筋疲労や筋痛からの回復にどのような影響を及ぼすのか。

実験方法：被験者には大学バレーボール部の男子選手32名を用いた。5日間の合宿中の練習後に毎日1回酸素カプセルに滞在してもらった。酸素カプセルに滞在する時間は1時間20分とした（最初の10分間で1.25気圧まで上昇させて、最後の10分間で1気圧に下げた）。被験者の32名を

Group 1-1 対照群8名（1気圧，酸素濃度20.9%
（通常の酸素濃度））

Group 1-2 高濃度酸素群8名（1気圧，酸素濃度35.0%）

Group 1-3 高気圧群8名（1.25気圧）

Group 1-4 高気圧+高濃度酸素群8名（1.25気圧，酸素濃度35.0%）

に分けた。Group 1-1は、酸素カプセルに滞在するだけで、酸素濃度や気圧は変化させなかった。Group 1-2は、酸素濃度だけを35.0%まで増大させた。Group 1-3は、気圧だけを1.25まで上昇させた。Group 1-4は、気圧を1.25まで上昇させて、さらに、酸素濃度を35.0%まで増大させた。Group 1-2とGroup 1-4は、酸素濃度を増大させているので血液中のヘモグロビンに結合する酸素（結合型酸素）が増えると考えられる。Group 1-3とGroup 1-4は、気圧を上昇させているので体液中に溶け込む酸素（溶解型酸素）が増えると考えられる。

高気圧および高濃度酸素への滞在には、研究室で開発した「酸素カプセル」を使用した（図1）。酸素カプセルは、人が1名入ることのできる半円

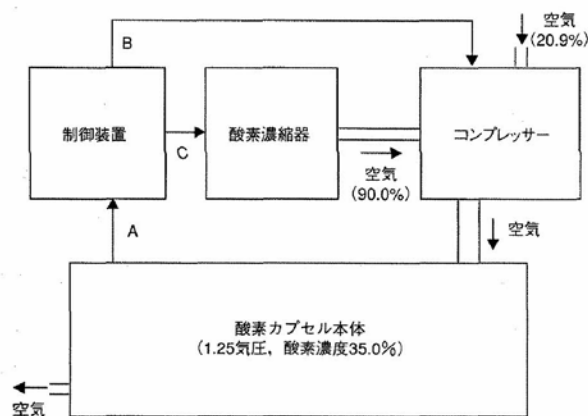


図1 酸素カプセルの構成。半円筒形の袋（酸素カプセル本体）、カプセルに空気を送り込むコンプレッサー、酸素カプセル内の酸素濃度を増大させるための酸素濃縮器、気圧や酸素濃度などを調整する制御装置から構成されている。制御装置により任意の気圧、酸素濃度、作動時間を設定できる。酸素濃縮器からは90.0%濃度の酸素を含んだ空気がコンプレッサーに送られる。コンプレッサーは酸素濃縮器から送られる空気と大気中の空気（20.9%の酸素濃度）を混合して酸素カプセルに送る。酸素カプセル内の気圧と酸素濃度の情報は制御装置にフィードバックされる（経路A）。コンプレッサーから酸素カプセルに送られる空気の流量を調節することにより酸素カプセル内の圧力を制御する（経路B）。酸素濃縮器から送られる空気の流量を調節することにより酸素カプセル内の酸素濃度を制御する（経路C）。

筒形の袋（長さ200cm，幅70cm，高さ50cm），酸素カプセル内に空気を送り込むコンプレッサー，酸素カプセル内の酸素濃度を増大させるための酸素濃縮器，気圧，酸素濃度，作動時間などを調整する制御装置から構成されている。また，酸素カプセルの両側には直径18.5cmの小窓があり，酸素カプセル内の様子を観察することができる。

合宿5日目に酸素カプセルに滞在する前後で，酸素飽和度（ミノルタ社パルソックス-3i），血中乳酸値（アークレイ社ラクテートプロ），筋硬度（ヘンリージャパン社PEK-1），筋痛，疲労感を測定した。酸素飽和度については，両側の第2指で測定して平均値を求めた。筋硬度については，両側の大腿前中央部で測定して平均値を求めた。筋痛と疲労感は，問診表を使用して，1. まったくない，2. ほとんどない，3. あまりない，4. まあまあ，5. かなりあるの5段階で主観的に判断してもらった。

実験結果：合宿5日目の各Groupの酸素カプセルに滞在する前後の値を図2に示した。測定項目は，図の上から順に酸素飽和度，血中乳酸値，筋硬度（任意の値），筋痛，疲労感である。Group 1-1とGroup 1-2については，酸素カプセルに滞在する前後で酸素飽和度，血中乳酸値，筋硬度のいずれにも差がみられなかった。Group 1-3については，酸素カプセルに滞在した後で酸素飽和度の上昇，血中乳酸値の減少が認められた。一方，筋硬度については，酸素カプセルに滞在する前後で差がみられなかった。Group 1-4については，酸素カプセルに滞在した後で酸素飽和度の上昇，血中乳酸値の減少，筋硬度の低下が認められた。

筋痛と疲労感については，Group 1-1，Group 1-2，Group 1-3では，酸素カプセルに滞在する前後で筋痛，疲労感ともに差がみられなかった。Group 1-4については，酸素カプセルに滞在した後で筋痛と疲労感の軽減が認められた。

実験2 高気圧・高濃度酸素は血流量や皮膚温にどのような影響を及ぼすのか。

実験方法：被験者には健康な成人男子（大学生）24名を用いた。被験者の24名を

Group 2-1 対照群6名（1気圧，酸素濃度20.9%（通常の酸素濃度））

Group 2-2 高濃度酸素群6名（1気圧，酸素濃度35.0%）

Group 2-3 高気圧群6名（1.25気圧）

Group 2-4 高気圧+高濃度酸素群6名（1.25気圧，酸素濃度35.0%）

に分けた。Group 2-1は，酸素カプセルに滞在するだけで，酸素濃度や気圧は変化させなかった。Group 2-2は，酸素濃度だけを35.0%まで増大させた。Group 2-3は，気圧だけを1.25まで上昇させた。Group 2-4は，気圧を1.25まで上昇させて，さらに，酸素濃度を35.0%まで増大させた。酸素カプセルには1回だけ1時間20分にわたり滞在してもらった（最初の10分間で1.25気圧まで上昇させて，最後の10分間で1気圧に下げた）。酸素カプセルに滞在する前後，酸素カプセルから出て1時間後の下腿の血流量と足の甲の皮膚温を測定した。血流量は日本光電の超音波双方向血流計（SD-50EX-F）により，皮膚温は堀場製作所の非接触2次元放射温度計（アイスクエア ii-1064）により測定した。

実験結果：各Groupの酸素カプセルに滞在した後，酸素カプセルから出た1時間後の血流量と皮膚温の変化を図3に示した。Group 2-1とGroup 2-2では，酸素カプセルに滞在する前後，さらに，酸素カプセルから出た1時間後で血流量に差がみられなかった。Group 2-3とGroup 2-4では，酸素カプセルに滞在した後で血流量の増大が認められ，血流量の増大は酸素カプセルから出た1時間後も継続していた。さらに，酸素カプセルに滞在した後と酸素カプセルから出た1時間後のGroup 2-4における血流量の上昇の割合は，Group 2-3にお

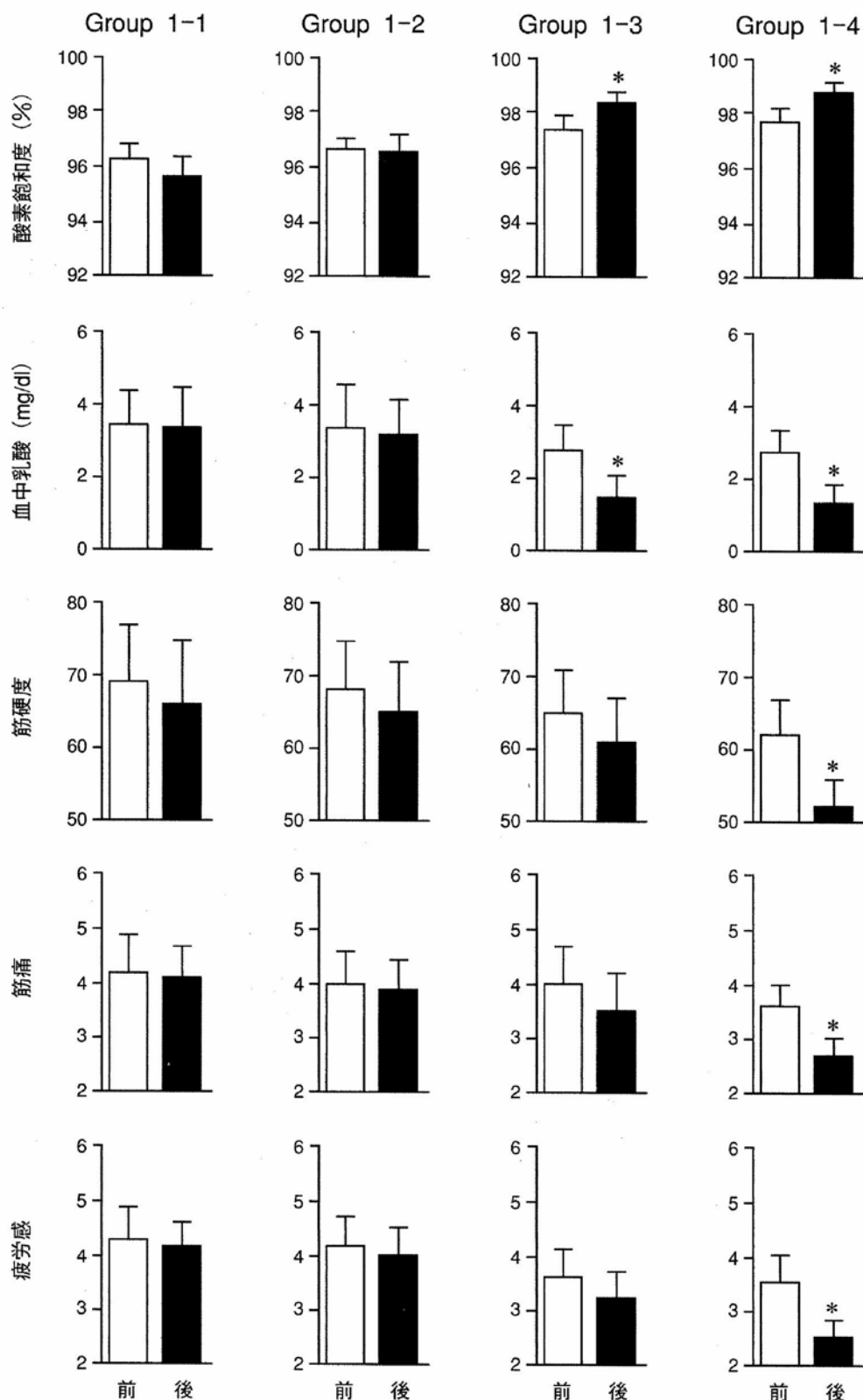


図2 大学バレーボール部の男子選手の合宿5日目の酸素カプセル滞在前後の酸素飽和度, 血中乳酸値, 大腿筋硬度, 筋痛, 疲労感の比較. 練習後に毎日1回酸素カプセルに滞在してもらった. Group 1-1 (8名) は, 酸素カプセルに滞在するだけで, 酸素濃度や気圧は変化させなかった. Group 1-2 (8名) は, 酸素濃度だけを35.0%まで増大させた. Group 1-3 (8名) は, 気圧だけを1.25まで上昇させた. Group 1-4 (8名) は, 気圧を1.25まで上昇させ, さらに, 酸素濃度を35.0%まで増大させた. 筋痛と疲労感は, 問診表を使用して, 1. まったくない, 2. ほとんどない, 3. あまりない, 4. まあまあ, 5. かなりあるの5段階で主観的に判断してもらった. 数値は平均と標準偏差で示してある. *印は酸素カプセルに滞在する前に対して有意に変化が認められたことを示す ($p < 0.05$).

ける血流量の上昇の割合よりも大きかった。

Group 2-1とGroup 2-2では、酸素カプセルに滞在する前後、さらに、酸素カプセルから出た1時間後で皮膚温に差がみられなかった。Group 2-3とGroup 2-4では、酸素カプセルに滞在した後で皮膚温の上昇が認められ、皮膚温の上昇は酸素カプセルから出た1時間後も継続していた。さらに、酸素カプセルに滞在した後と酸素カプセルから出た1時間後のGroup 2-4における皮膚温の上昇の割合は、Group 2-3における皮膚温の上昇の割合よりも大きかった。

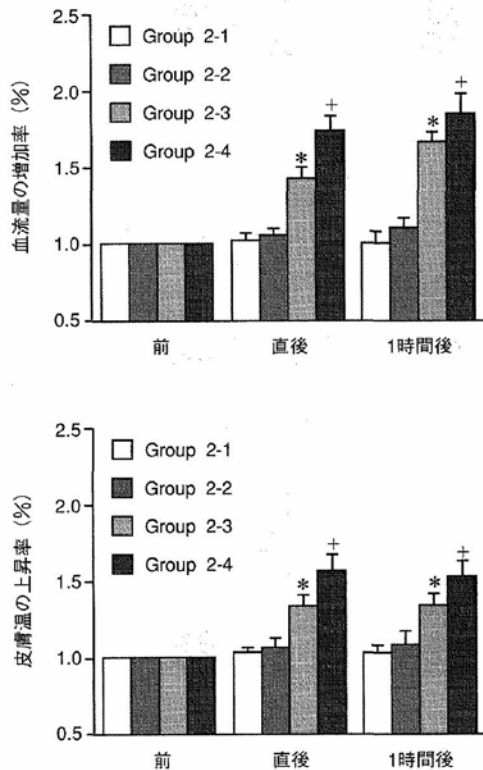


図3 酸素カプセルに滞在した時の血流量と皮膚温の変化。成人男子に1時間20分にわたり酸素カプセルに滞在してもらった。下腿の血流量と足の甲の皮膚温を測定した。Group 2-1 (6名)は、酸素カプセルに滞在するだけで、酸素濃度や気圧は変化させなかった。Group 2-2 (6名)は、酸素濃度だけを35.0%まで増大させた。Group 2-3 (6名)は、気圧だけを1.25まで上昇させた。Group 2-4 (6名)は、気圧を1.25まで上昇させて、さらに、酸素濃度を35.0%まで増大させた。数値は平均と標準偏差で示してある(酸素カプセルに滞在する前の値を1として相対値で示してある)。*印はGroup 2-1とGroup 2-2に対して有意に変化が認められたことを示す ($p < 0.05$)。+印はGroup 2-1, Group 2-2, Group 2-3に対して有意に変化が認められたことを示す ($p < 0.05$)。

2. 考 察

体内に蓄積できる酸素量や酸素の運搬・利用効率は、遺伝的に決定されていたり、筋活動の増減によって変化する。軽強度から中強度の運動では、血流量や血流速度が増大するために毛細血管の発達や血管径の拡大が生じる¹⁻³⁾。寝たきりや老化による骨格筋の萎縮では、血流量や血流速度が減少するために毛細血管の消失や血管径の縮小を伴う。ヘモグロビン (β サブユニット鎖) 遺伝子の108番目がアスパラギンからリジンに変換していると末梢での酸素の解離(ヘモグロビンからの酸素の離れやすさ)に優れ、細胞に効率よく酸素を運搬・供給できる^{4,5)}。このようなヘモグロビン遺伝子を持つ人が見つかっており、また、実験動物(マウス)のヘモグロビン遺伝子を改変することにも成功している。ヘモグロビン遺伝子の108番目をアスパラギンからリジンに変換させたマウスでは、酸素を運搬・供給する効率が良くなっただけでなく、骨格筋の有酸素能力も増大したことが明らかにされている^{4,5)}。酸素には、ヘモグロビンに結びつく結合型酸素と体液中にガス化して溶け込む溶解型酸素がある。高気圧・高濃度酸素への滞在は、ヘモグロビンに結びつく結合型酸素を増大させて、さらに、体液中にガス化して溶け込む溶解型酸素を増大させる。増大した結合型酸素や溶解型酸素は、乳酸の除去を促進したり、細胞の代謝を向上させるので、筋疲労や筋痛からの早期回復を期待できる。とくに、気圧を上昇させると溶解型酸素が増えると考えられている。

高濃度の酸素(35.0%)を含んだ空気を吸入した実験1のGroup 1-2では、酸素飽和度や血中乳酸値の変化は認められず、したがって、高濃度の酸素だけでは血中乳酸を効率よく除去できないことが解った。一方、高気圧(1.25気圧)に滞在したGroup 1-3とGroup 1-4では、酸素飽和度の上昇と血中乳酸値の減少が認められた。高気圧への滞

在では、体内にガス化した酸素が増大すると考えられている。液体に圧力を加えると気体が溶け込み、圧力の大きさに比例して溶け込む気体が増える（これをヘンリーの法則という）。生体も圧力を加えることにより、ガス化した溶解型酸素が体液中に溶け込むと考えられている。結合型酸素はヘモグロビンと結合して全体として大きな構造を持つために細い毛細血管を通ることが難しい。一方、溶解型酸素は体内で遊離して存在するので毛細血管を通りやすい。これは、末梢の細胞まで十分に酸素を運搬・供給できることを意味している。また、高気圧に滞在することにより酸素分圧が上昇して血流量が増大すると考えられる。血流量が増大すれば運搬できる酸素量が増大する。したがって、高気圧への滞在によって溶解型酸素が増大したり、血流量が増大して、その結果、末梢における細胞の代謝が向上すると考えられる。それを検証するために実験2を行った。

実験2では、高濃度酸素や高気圧への滞在により血流量が増大したり、皮膚温が上昇するかどうかを検討している。35.0%濃度の酸素を含んだ空気を吸入したGroup 2-2では、血流量、皮膚温ともに変化はみられなかった。酸素濃度を増大しただけでは細胞の代謝は変化しないことが解り、これは実験1の結果を支持するものとなった。一方、Group 2-3とGroup 2-4では血流量が増大して、さらに、皮膚温が上昇しており、気圧の上昇が血流量を上昇させて酸素の運搬・供給を良くしたと考えられ、それらの変化が細胞の代謝を向上（皮膚温を上昇）させたと考えられる。さらに、酸素カプセルから出た1時間後にも血流量は増大して、皮膚温は上昇していた。これらの結果から高気圧への滞在によってその後の増大した血流量や上昇した皮膚温を長時間にわたり維持できることが解った。

以上の結果より、高気圧に滞在することによって血流量が増大して、酸素を取り込む効率が良く
デサントスポーツ科学 Vol.26

なり、それに伴って代謝が向上すると結論される。Group 1-3とGroup 1-4では酸素をより多く取り込むことができたために酸素飽和度が上昇して、さらに、それらの酸素で乳酸の除去が効率良く行われたことになる。

Group 1-3とGroup 1-4の違いは、Group 1-4では筋の硬さが低下して、さらに、筋痛と疲労感が軽減したことである。Group 1-3のように高気圧への滞在だけでも酸素カプセル内の酸素濃度を数パーセント増大させることができる。しかし、Group 1-3では、酸素濃度は30%に達することはできない。Group 1-4では、高気圧と高濃度酸素を併用しているが、これは酸素カプセル内の圧力の上昇に加えて酸素濃度を35.0%に維持するためである。圧力の上昇に加えて酸素濃度を増大させたことが、筋の硬さを低下させて、筋痛と疲労感を軽減させたと考えられる。したがって、筋疲労や筋痛を軽減するには、高気圧と高濃度酸素を併用することが必要であると結論される。すなわち、高気圧に滞在することにより酸素飽和度を上昇させて血中乳酸値を減少させても、それは体全体の変化であり、筋が硬くなったり、痛みを生じている部分を改善することにはならないことが解った。筋の硬化や痛みは筋が腫れ上がることによる血流障害が大きな要因と考えられる。高気圧と高濃度酸素への滞在により酸素分圧を上昇させて、さらに、酸素濃度を増大させることで細胞の代謝を素早く効率良く向上できると考えられる。また、高気圧と高濃度酸素への滞在は溶解型酸素を増大すると考えられており、筋に圧迫されて細くなった毛細血管でも溶解型酸素は容易に流れていくことができる。

酸素カプセルに滞在して「体が軽くなった」、「視野が明るくなった」、「持久力がついた」という選手がGroup 1-4で多くみられた。この傾向は、合宿が進んで酸素カプセルに滞在する回数が増えるほど顕著になった。酸素カプセルに入る時間を

長くしたり、回数を増やすことによりさらに顕著な変化が得られる可能性がある。さらに、筋や骨に傷害のある選手を高気圧・高濃度酸素へ滞在させて、傷害からの回復の程度や速さについても検討したい。

高気圧・高濃度酸素への滞在は、血流量や酸素量を増大させて代謝を向上させることから筋疲労や筋痛からの早期回復の効果だけではなく、様々な生体への影響が認められると考えられる。糖尿病を発症する肥満型のOLETF (Otsuka Long-Evans Tokushima fatty) ラットや非肥満型のGK (Goto-Kakizaki) ラットの骨格筋では、有酸素的な代謝に優れた筋線維の割合が少ないことが明らかにされている^{6,7)}。研究室では、これらのラットを生後5週齢から1ヵ月間にわたり酸素カプセルに入れたところ (1日に1回、6時間にわたり1.25気圧・35.0%の酸素濃度で飼育)、発育に伴う血糖値の上昇を完全に抑制できた (未発表資料)。また、有酸素的な代謝に優れた筋線維の割合が増大して、対照群のラットの骨格筋と同様な筋線維組成を示すようになった。今後は、高気圧・高濃度酸素への滞在による高血圧や低血圧、虚血への影響を検討していく予定である。

3. 結論

高気圧への滞在は、酸素分圧を上昇させて血流量を増大させるとともに溶解型酸素を増大させる。高濃度の酸素を含んだ空気の吸入はヘモグロビンに結合する結合型酸素を増大させる。高気圧・高濃度酸素への曝露によって疲労した筋や硬くなった筋に効率よく酸素を運搬・供給することができ、筋疲労や筋痛から素早く回復できると結論される。

謝 辞

本研究に対して助成を頂きました (財) 石本記念デサントスポーツ科学振興財団に深謝致します。

文 献

- 1) Ishihara, A., Inoue, N., and Katsuta, S.: The relationship of voluntary running to fibre type composition, fibre area and capillary supply in rat soleus and plantaris muscles. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 62, 211-215 (1991)
- 2) Mathieu-Costello, O. and Hepple, R. T.: Muscle structural capacity for oxygen flux from capillary to fiber mitochondria. *Exerc. Sport Sci. Rev.*, 30, 80-84 (2002)
- 3) Prior, B. M., Lloyd, P. G., Yang, H. T., and Terjung, R. L.: Exercise-induced vascular remodeling. *Exerc. Sport Sci. Rev.*, 31, 26-33 (2003)
- 4) Shirasawa, T., Izumizaki, M., Suzuki, Y., Ishihara, A., Shimizu, T., Tamaki, M., Huang, F., Koizumi, K., Iwase, M., Sakai, H., Tsuchida, E., Ueshima, K., Inoue, H., Koseki, H., Senda, T., Kuriyama, T., and Homma, I.: Oxygen affinity of hemoglobin regulates O₂ consumption, metabolism, and physical activity. *J. Biol. Chem.*, 278, 5035-5043 (2003)
- 5) 黄 菲, 玉置正勝, 清水孝彦, 泉崎雅彦, 本間生夫, 石原昭彦, 酒井宏水, 土田英俊, 井上洋西, 上嶋健治, 白澤卓二: 呼吸不全の遺伝子治療—変異ヘモグロビンの研究を通じて—。呼吸, 22, 101-110 (2003)
- 6) Yasuda, K., Ishihara, A., Adachi, T., Shihara, N., Seino, Y., and Tsuda, K.: Growth-related changes in skeletal muscle fiber type and insulin resistance in diabetic Otsuka Long-Evans Tokushima fatty rats. *Acta Histochem. Cytochem.*, 34, 371-382 (2001)
- 7) Yasuda, K., Nishikawa, W., Iwanaka, N., Nakamura, E., Seino, Y., Tsuda, K., and Ishihara, A.: Abnormality in fibre type distribution of soleus and plantaris muscles in non-obese diabetic Goto-Kakizaki rats. *Clin. Exp. Pharmacol. Physiol.*, 29, 1001-1008 (2002)