

低酸素環境を利用したトレーニングが運動効率および ヘモグロビン酸素親和性に及ぼす影響

東 北 大 学 内 丸 仁
(共同研究者) 日 本 競 輪 学 校 田 畑 昭 秀
順 天 堂 大 学 内 藤 久 士
同 形 本 静 夫

Effect of Short-Term Intermittent Normobaric Hypoxia on the Cycling Efficiency and Hemoglobin O₂ Affinity

by

Jin Uchimaru

Tohoku University

Akihide Tabata

Nippon Keirin School

Hisashi Naito, Shizuo Katamoto

Juntendo University

ABSTRACT

The purpose of this study was to examine the effect of short-term intermittent normobaric hypoxia on the submaximal cycling efficiency and hemoglobin O₂ affinity in endurance cyclist. Twelve-male elite endurance cyclists were divided into a normoxic (N, n=6) or a hypoxic group (H, n=6). H group cyclists stayed in a normobaric hypoxic room (15.4% O₂; 2500m) for 10-12h a day at night over 5 days, with training sessions at sea-level. Before and after the experimental period, subjects were undergone the submaximal treadmill cycling and hematological tests. Submaximal cycling efficiency was measured at the intensities of 50% and 80% of $\dot{V}O_{2max}$ predetermined during baseline test. Also, resting RBC, Hb, Hct, Ret, 2·3-DPG and oxyhemoglobin dissociation curve (ODC)

were measured before (pre) and 5th day (after) of the experiment period. ODC was shift to the right by hypoxia. P_{50} value of H group was significantly increased ($p<0.05$) on the 5th day (29.83mmHg) compared with the pre-value (28.19mmHg). RBC, Hb and Hct were not changed by hypoxia. After experimental period, $\dot{V}O_2$ at 50% and 80% of $\dot{V}O_{2max}$ of H group were significantly decreased ($p<0.05$) by 15% and 18% compared with pre-values, respectively. HR and Blood lactate concentration at both intensities were also significantly decreased from the pre-values ($p<0.05$) in H group. There were no different in $\dot{V}E$, $\dot{V}O_2$, HR and blood lactate concentration of N group at both intensities. From these results, it was concluded that short-term intermittent normobaric hypoxia shifts ODC to the right and could contribute to the improvement of submaximal cycling efficiency in endurance cyclist.

要 旨

自転車競技選手を対象に5日間の常圧低酸素環境への間欠的滞在が運動効率およびヘモグロビン酸素親和性に及ぼす影響について検討した。

12名の選手は高度2,500m (15.4% O_2) にシミュレートした低酸素室に主として睡眠のために1日10-12時間ずつ5日間にわたって滞在し、トレーニングは平地で行う低酸素 (Hypoxia; H) 群とコントロール (Normoxia; N) 群とに等分した。実験期間前後で血液性状および50%および80% $\dot{V}O_{2max}$ 強度での最大下一定負荷運動テストを実施した。

H群は酸素運搬を担うRBCやHb等の改善は認められなかったが、ODCの右方シフトおよび P_{50} 値の有意な増加が認められた。最大下一定負荷運動においては低酸素滞後に $\dot{V}E$, $\dot{V}O_2$, HRおよびLaが有意に低下することが認められた。

以上の結果から、短期間の間欠的常圧低酸素環境への滞在はODCを右方シフトし末梢組織での酸素利用能を高め、また、最大下運動時の $\dot{V}O_2$ を減少させることから、運動効率を改善する可能性が示唆された。

緒 言

持久的な競技能力を向上させるために、生体を低酸素環境にさらし、酸素運搬に関連する血液学的変量や代謝能力あるいは呼吸循環機能に改善を引き起こさせることを目的として、高地トレーニングあるいは低圧室トレーニングが行われてきた(6, 10, 19, 24, 27)。しかしながら、現在ではLevineら²³⁾によって提唱された高地に滞在し低地でトレーニングする方法 (Live high, Train Low ; LH TL) つまりは間欠的低酸素環境へ滞在 (Intermittent hypoxia; IH) することが注目され、その後、この方法を発展させるものとしてRusko³⁰⁾によって開発された常圧低酸素環境いわゆる低酸素室に居住し平地でトレーニングすることが提案・実践されている。わが国においても、国立スポーツ科学センターを筆頭に多くの大学、研究機関、およびクラブチーム等にこの常圧低酸素室が設置されている。

この低酸素室を利用する方法は、高地トレーニング施設や高価な低圧室を必要としないこと、自在に酸素濃度を設定することができること、移動に伴う経済的・時間的負担が少ないこと、さらには、平地でトレーニングが行われるため、高地ト

レーニングで問題とされるトレーニングの質的・量的低下も起こらない等, 多くのメリットを有していると考えられている^{1, 15, 30, 33}).

先行研究の結果から, LHTLあるいはIHでは約3週間, 標高2,000~2,500m相当の低酸素環境に滞在することが一般的なガイドラインとして示されている^{11, 33}). しかしながら, その効果は必ずしも一致しておらず, 滞在時間, 酸素濃度, あるいは選手のコンディショニング等の影響を受け^{2, 3, 4, 8, 12, 13, 21}), 加えて大きな個人差がみられることも指摘されており⁵), 今後の研究にこれらの問題点の解決が望まれている^{11, 33}).

さらには, これまでLHTLおよびIHはRBCやHbの増加といった血液性状の改善による運動パフォーマンスの向上を主たるねらいとして取り組まれてきた^{2, 3, 8, 12, 13, 32}). しかし, RBCやHbの改善が認められなくてもパフォーマンスには改善が認められること^{4, 12, 13}), および1週間未満の高地・低酸素トレーニングや低酸素環境への馴化でも運動能力改善の可能性があること^{20, 27, 29}) から, 短期間のLHTLあるいはIHにおける生理・生化学的応答や運動パフォーマンスへの影響について検討することは非常に興味深いものであると考えられる. しかしながら, 短期間のLHTLやIHにおける効果についての報告は少なく, 低酸素室滞在が実際のパフォーマンスを向上するか否かについては一定の見解は得られていない^{4, 8, 27, 25, 27, 29, 32}).

一方, 高地環境への順応課程においてヘモグロビン酸素解離曲線 (Oxyhemoglobin dissociation curve; ODC) が右方シフトおよび P_{50} の増加が生じることが報告されている^{23, 31}). このことは末梢組織でのヘモグロビンの酸素解離を促進する意味で, きわめて合目的な応答と考えることができる. したがって, このような低酸素環境への馴化過程において生じるODCの右方シフトつまりは P_{50} 値の増加は, 運動時における末梢組織いわゆ

る筋組織でのヘモグロビンの酸素解離促進にともない酸素利用能を効果的にし, 運動効率を改善する可能性が考えられる. さらに, これらの変化は高地環境への馴化の初期段階でも確認されていることから, もし, 常圧低酸素環境への間欠的な滞在によっても, 高地環境への馴化過程と同様の変化が生じるならば, これまで明らかにされていなかった比較的短期間でのLHTLあるいはIHによるRBCおよびHbの増加以外での運動パフォーマンス改善のメカニズムの一部を説明することが可能となると考えられる.

そこで, 本研究においては, 5日間という短期間の常圧低酸素環境への間欠的な滞在が運動効率およびヘモグロビン酸素親和性に及ぼす影響について検討することを目的とした.

1. 研究方法

1.1 被験者

実験に先立ち被験者に対して十分に実験内容を説明したのち, 被験者として本実験の参加に対する同意書を得た. 本実験研究は順天堂大学倫理委員会の承諾を得て行われた.

本研究の被験者は国内トップレベルおよび大学トップレベルの競技力を有する鍛錬された自転車競技選手12名であった. 被験者は常圧低酸素室に滞在し, トレーニングは平地で行う実験 (H; hypoxia) 群と滞在およびトレーニングとも平地で行うコントロール (N; Normoxia) 群とに等分した. 実験期間中, 各選手は通常のトレーニング内容を実施した. 被験者の身体特性は表1に示した.

表1 Age, height and body weight of subjects.

	Age (years)	Height (cm)	Body weight (kg)
Normoxic Group (N) (n=6)	20 ± 1	173 ± 4	69.0 ± 6.2
Hypoxic Group (H) (n=6)	23 ± 3	175 ± 5	75.7 ± 7.7
			(mean ± SD)

1.2 実験デザイン

H群は高度2,500m (15.4%O₂) にシミュレートした低酸素室に、主として睡眠のために1日10-12時間ずつ5日間にわたって滞在した。低酸素室には快適な生活を送るために必要な生活用品 (テレビ, ビデオ, ラジオ, 電子レンジ, 洗濯機, 乾燥機, 電気ポット, 冷蔵庫, 食器, コップ等) が用意されていた。なお, 被験者が低酸素室の環境に慣れることおよび実践的側面を考慮して, 低酸素滞在前と滞在終了後に同室に通常大気環境下で1日ずつ滞在させた (図1)。

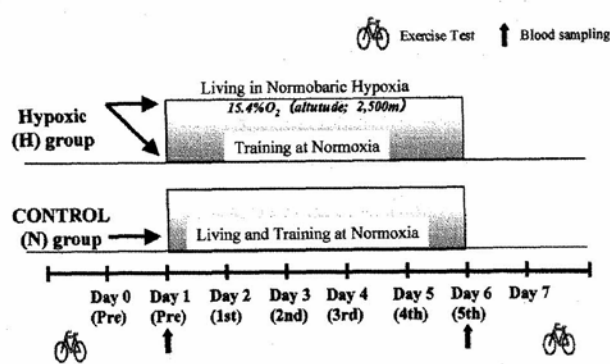


図1 Experimental design of the present study

1. 3 常圧低酸素室の制御

常圧低酸素ハウスにおける低酸素発生と酸素濃度の制御は常圧低酸素発生装置 (YHC-415, YKS 社製) によって行った。本装置は通常大気を特殊な分離膜を介して低酸素気と高酸素気に分け, その後低酸素気を通常大気と再混合することによって設定した酸素濃度にするものであった。なお, 低酸素ハウス内の酸素濃度はユニバーサルレコーダー TEU-10 (タバイエスペック社製) にて記録・監視した。

1. 4 測定項目

1. 4. 1 血液学および生化学的測定

実験期間前 (Pre) および後 (5日間の低酸素室滞在后; Post) に血液学的 (赤血球数 (Red blood cell; RBC), ヘモグロビン濃度 (Hemoglobin; Hb), ヘマトクリット値 (Hematocrit; HCT) および網

状赤血球数 (Reticulocyte; Ret) および生化学的検査 (2・3-diphosphoglycerate; 2・3-DPG) を行った。分析のための採血 (4ml) は, 各測定日の午前7時に医師あるいは看護師により肘前静脈より行われた。採取した4mlのうち2mlはRBC, Hb, HCTおよびRet分析用として冷蔵保存し, 分析は既知の手法により行われた。残りの2mlは2・3-DPG定量のために, 採血後にただちに除蛋白液と血液を5:1の割合で混和したのち, 5分間, 3000rpmで遠心分離し, 上清を分光高度法によって分析した。

ヘモグロビン酸素解離曲線 (oxyhemoglobin dissociation curve; ODC) およびP₅₀値はHemox-Analyzer (TCS, Medical Products Division, PA) によって定量した。ODCは2mlの生理食塩水 (37℃) に10 μlの血液を混合したサンプル溶液を, 窒素ガスによって脱酸素化させながら記録した。つまりは, 酸素化ヘモグロビン分画は2波長の分光高度法によって記録し, 酸素分圧はClark電極によって検出した。P₅₀値はヘモグロビン酸素飽和度が50%の時の酸素分圧を記録した。

1. 4. 2 運動テスト

すべての運動テストは各選手の自転車を用いてトレッドミル上にて行った。最大運動テストはトレッドミル分速400m/minで角度1%から開始し, 疲労困憊に至るまで2分ごとに角度を1%ずつ漸増させた。このときの, ギア比は2:1とした。

テスト中, 胸部双極誘導による心電図を監視するとともに, 呼吸代謝測定装置 (AE 300S:ミナト医科学社製) を用いて換気量 (\dot{V}_E) および酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$) を1分ごとに連続して測定した。 \dot{V}_E 測定のための熱線流量計はテストの前に校正用シリンダー (2L) を用いて校正し, 酸素および二酸化炭素濃度分析のためのジルコニア素子式および赤外線式呼気ガス分析器は, 既知濃度の商用ガス (日本酸素: O₂ 15.00%, CO₂ 5.00%) を用い

表2 Hematological parameters before (Pre) and after (Post) experimental period.

	Normoxic Group		Hypoxic Group	
	Pre	Post	Pre	Post
RBC count ($10^4 \cdot \mu\text{l}^{-1}$)	512 \pm 30	509 \pm 44	509 \pm 20	510 \pm 35
Hemoglobin ($\text{g} \cdot \text{dL}^{-1}$)	15.8 \pm 0.7	15.5 \pm 1.1	15.5 \pm 0.8	15.6 \pm 1.1
Hematocrit (%)	47.4 \pm 2.2	46.3 \pm 3.3	47.0 \pm 1.9	47.2 \pm 2.9
Reticulocytes (%)	13 \pm 2	13 \pm 3	12 \pm 2	13 \pm 3
2·3-DPG (mol/ml)	2.5 \pm 0.1	2.3 \pm 0.1*	1.8 \pm 0.1	2.1 \pm 0.2*

Values are means \pm SD. RBC count; Red blood Cell Count. 2·3-DPG; 2·3- diphosphoglycerate.*; $p < 0.05$

て校正した。

本研究では、運動中に得られた $\dot{V}O_2$ の最大値を最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_{2\max}$) としたが、判定に際してはつぎに示す3つの基準のうち2つ以上を満たすことを条件とした(7, 9, 17, 18, 26, 34)。

- ①酸素摂取量の leveling off が見られること(7, 17)
- ②心拍数が180拍/分以上に達している(7, 34)
- ③呼吸交換比が1.0を越えている(18, 26)

本研究の被験者は全員が2つ以上の基準を満足した。なお、最高心拍数 ($f_{H\max}$) および最大換気量 ($\dot{V}E_{\max}$) は、それぞれ $\dot{V}O_{2\max}$ が出現した時の値とした。

最大下運動テストは、先に行った最大運動テストの結果から求めた $\dot{V}O_{2\max}$ の50%および80%に相当する強度(50%および80% $\dot{V}O_{2\max}$) で、それぞれ6分間自転車走行を行う者であった。運動中の $\dot{V}E$ 、酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$) および心拍数 (HR) の測定は最大運動テストと同様にして行った。血中乳酸濃度 (La) 評価のための採血 (20 μl) は運動終了後1分に指先より行った。

なお、ギア比は最大運動テストと同様に2:1とした。

1. 5 統計

すべてのデータは平均値 \pm 標準偏差で表した。低酸素室滞前後における測定値の変化は、2要因の分散分析 (two-way ANOVA) を用いて有意性を検討し、有意な F 値が認められた場合は、post-hoc test (Fisher の PLSD) を用いて各測定値間の有意差の検定を行った。

2. 結果

2. 1 血液および生化学的パラメータ

両群の RBC, Hb, HCT および Ret には、実験期間前後で有意な変化は認められなかった (表2)。しかし、2·3-DPG は、H 群は Pre 値に比べて Post 値は9%に有意に増加した ($p < 0.05$)。一方、N 群は Pre 値に対して Post 値が10%有意に低下することを示した ($p < 0.05$)。

2. 2 ODC および P_{50} 値

低酸素室滞によって H 群の ODC は右方にシフトすることが認められた (図2)。

N 群の P_{50} 値は Pre および Post 値に変化は認め

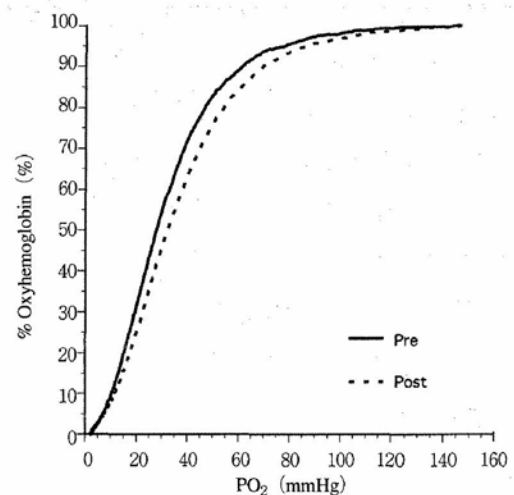


図2 Change of the oxyhemoglobin dissociation curves of H group subject during experimental period.

られなかったものの (Pre 値; 27.02mmHg, Post 値; 27.68mmHg), H 群においては Pre が 28.19mmHg であったのに対して, Post 値は 29.83mmHg と有意に増加した (図3)。

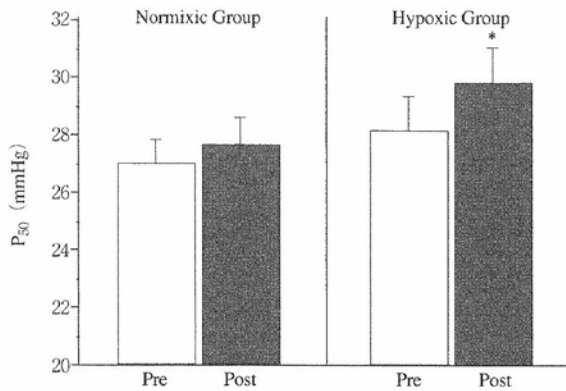


図3 P₅₀ values before (Pre) and after (Post) experimental period. Values are mean ± SD. *p<0.05

2. 3 運動テスト

低酸素室滞在期間前後におけるN群およびH群の50および80% $\dot{V}O_{2max}$ 強度での6分間の自転車走行時の $\dot{V}E$, $\dot{V}O_2$, HR, およびLaを図4および5に示した。

N群においては、50および80% $\dot{V}O_{2max}$ での最大下運動時のパラメータに変化は認められなかった。一方、H群の50および80% $\dot{V}O_{2max}$ 強度時の $\dot{V}E$, $\dot{V}O_2$ およびHRは、低酸素室滞在後にいずれも有

意に低下した(それぞれ $\dot{V}E$: $56.0 \pm 7.9 \rightarrow 49.6 \pm 5.4$ l · 分⁻¹, $101.3 \pm 15.0 \rightarrow 83.1 \pm 10.0$ l · 分⁻¹; $\dot{V}O_2$: $33.3 \pm 2.2 \rightarrow 28.3 \pm 1.2$ ml · kg⁻¹ · 分⁻¹, $54.3 \pm 8.0 \rightarrow 47.1 \pm 8.3$ ml · kg⁻¹ · 分⁻¹; HR: $134 \pm 12 \rightarrow 117 \pm 10$ 拍 · 分⁻¹, $166 \pm 6 \rightarrow 154 \pm 10$ 拍 · 分⁻¹)。Laは80% $\dot{V}O_{2max}$ 時のみ有意な低下を示した。

3. 考 察

本研究における主要な知見は、① 1日10-12時間の5日間にわたる間欠的な低酸素室滞在は酸素運搬能に寄与する血液学的変量(RBCやHbなど)に変化をもたらさなかったが、ODCを右方にシフトし、P₅₀値を有意に増加したこと、末梢組織での酸素解離を高めたこと、② 2種類の強度による最大下運動時の $\dot{V}O_2$ に有意な減少がもたらされたことであった。

まず、今回の短期間のIHにおいて、赤血球生成に関連した血液性状値には変化が認められな

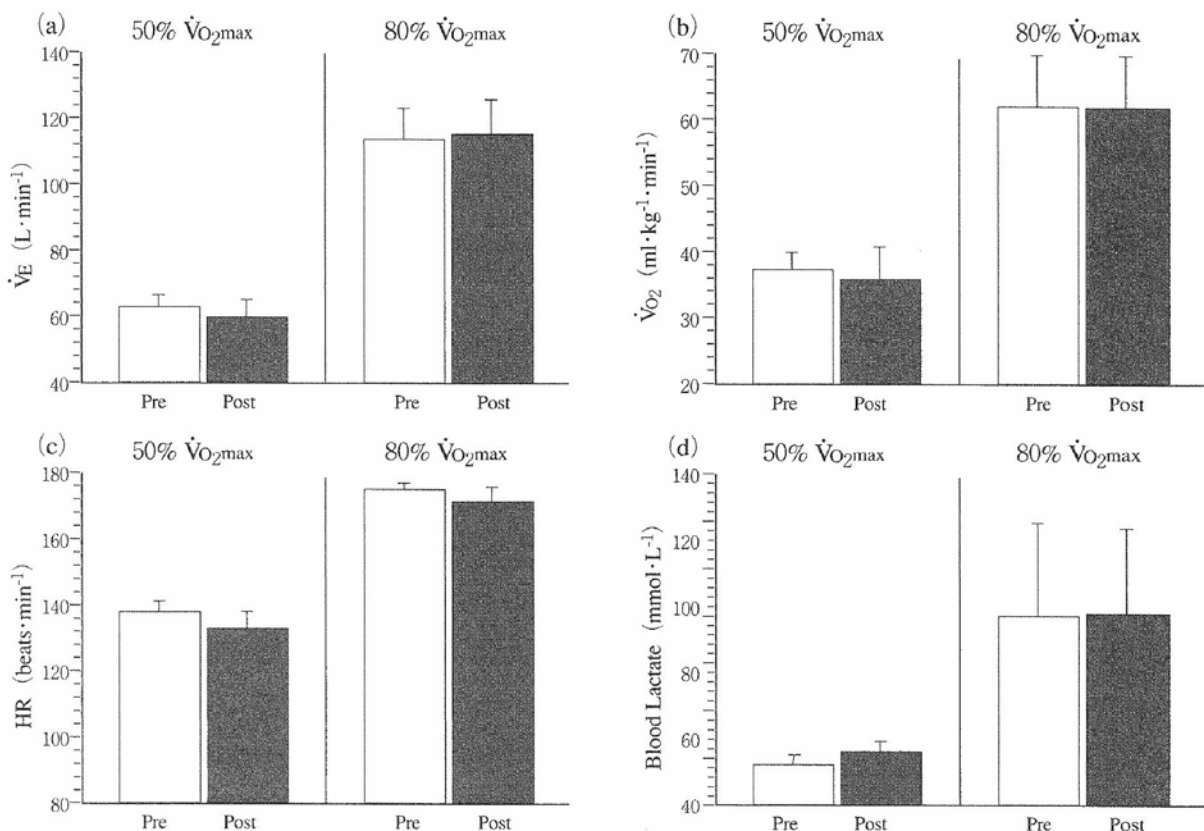


図4 $\dot{V}E$, $\dot{V}O_2$, HR and blood lactate concentration of Normoxic group during submaxmum exercise at 50% and 80% $\dot{V}O_{2max}$

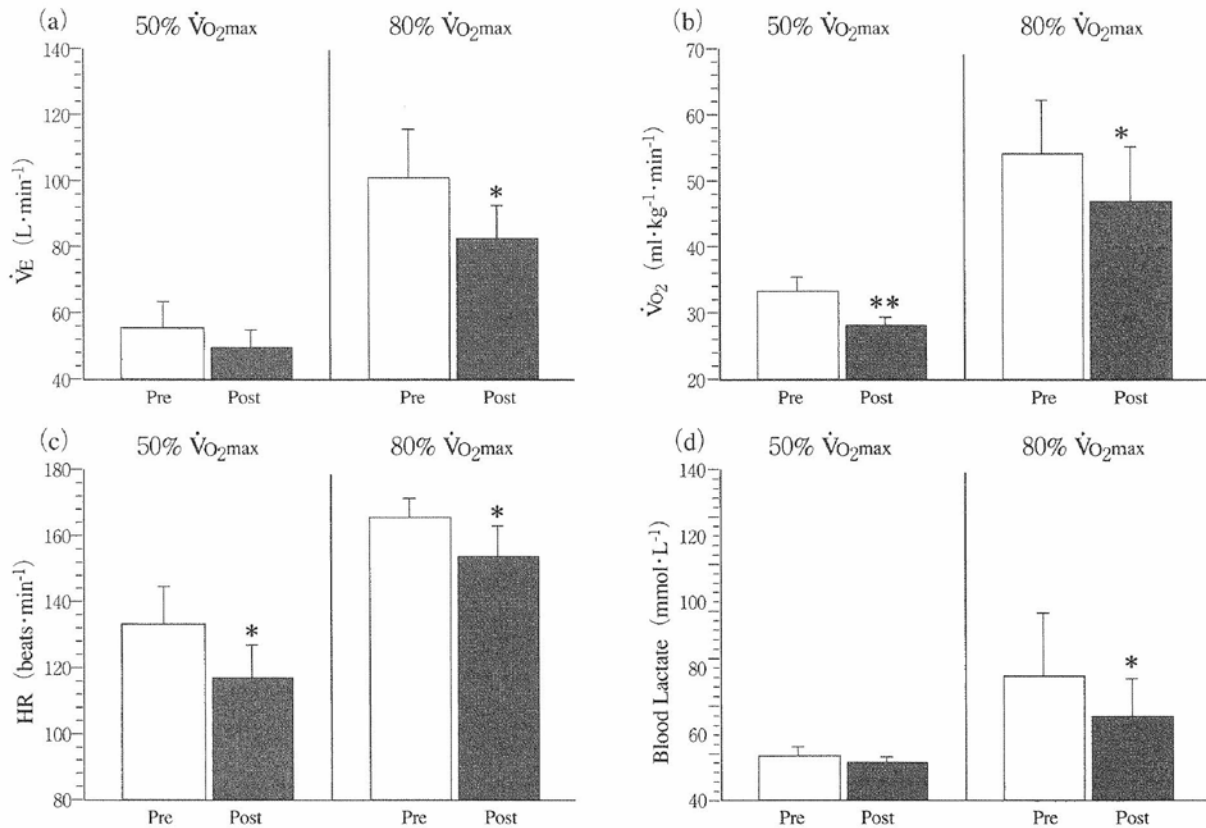


図5 \dot{V}_E , $\dot{V}O_2$, HR and blood lactate concentration of Hypoxic group during submaximum exercise at 50% and 80% $\dot{V}O_{2max}$
* $p < 0.05$; compare to pre vale.

った。この結果は先行研究と一致する(2, 3, 12, 13, 25, 27, 32)。しかしながら、本研究においては常圧低酸素環境への滞在はODCを右方にシフトさせ、 P_{50} 値を有意に増加することが認められ、高地環境での滞在における応答と同様の結果となることを示した。低酸素環境への滞在に伴うODCの右方シフトおよび P_{50} 値の増加のメカニズムは、2・3-DPGの上昇が大きく影響することが報告されている(22, 31)。今回われわれの結果においても、H群の2・3-DPGはPre値に対してPost値が有意に高値を示しており、ODCの右方シフトを裏付ける結果となった。

この現象は、末梢組織においてヘモグロビンの酸素解離が促進され、筋組織における酸素の取り込みに有利に作用すると考えられることから、運動時の酸素摂取量の変化に影響を与えているかも知れない。

次に、低酸素環境への滞在が最大下運動時の

$\dot{V}O_2$ の減少をもたらすことは先行研究においても報告されているが(4, 8, 12, 14, 24, 27, 29)、いずれも2, 3週間以上にわたって連続的あるいは間欠的に低酸素環境へ滞在させたときのもので、本研究のように短い期間のものではない。また本研究の結果は、一流の選手が低酸素室滞在と通常の練習計画を併用する中で得られたものであり、その意味でも実用的な価値が高いと判断される。

Greenら¹⁴⁾は、一定負荷運動に対する $\dot{V}O_2$ 減少のメカニズムとして、1) ATP生産に対する解糖系寄与の増大、2) 酸化的付リン酸化における糖質代謝の亢進、3) 筋収縮のために興奮収縮連関能の増大、4) 呼吸筋のような非作業筋による酸素消費の低下、の4つの因子をあげている。

このうち、順化により無氣的解糖が亢進し、これが結果的に最大下運動における $\dot{V}O_2$ の減少をもたらしている可能性はないと考えられる。なぜなら、本研究において80および50% $\dot{V}O_{2max}$ 強度に

よる最大下運動後に観察されたLaは、低酸素室滞在後低下するか同じであったからである。低酸素環境への順化後に運動中のLaが低下することは多くの研究によって報告されており、本研究の結果もこれらと一致するものであった。

また、運動中の $\dot{V}O_2$ の低下が、順化の結果として運動の燃料源がより糖質に依存する方向にシフトし、酸素1モルあたりのATP生産量が増加することによってもたらされた可能性が考えられる。しかし、低酸素室滞前後における運動テスト時の呼吸交換比は変化していないことから(80% $\dot{V}O_{2max}$ で前値:0.95 ± 0.03, 後値:0.93 ± 0.03, データは示していない), このメカニズムの可能性も否定されよう。

一方、筋収縮における主要なエネルギー消費過程は、筋鞘とT管における Na^+/K^+ の交換, Ca^{2+} の筋小胞体(SR)への輸送, およびアクトオシンサイクリングであることが知られている。これらの過程に必要とされるATPの供給は、それぞれ酵素 $Na^+-K^+-ATPase$, $SR Ca^{2+}-ATPase$ および $ATPase$ の作用によって行われることから、低酸素室滞在後における最大下運動中の $\dot{V}O_2$ 減少は、筋の興奮収縮連関を損なわない範囲で陽イオンやアクトミオシンサイクリングの減少が起こったことに起因しているのかも知れない。また、順化に伴いADP, 無機リン酸, 水素イオンのような代謝産物の蓄積が減少し、それがATPの分解による自由エネルギーの放出を増加させ、一定運動強度の維持に必要なエネルギー消費量の低下を導いたことも考えられる。Hochachkaら¹⁶⁾は、長期間高地(4,200m)に滞在した者は平地に居住している鍛錬者よりも平地における機械的効率が高いことを観察し、それには興奮収縮連関に関与する1つ以上の過程が寄与していることを示唆している。本研究における $\dot{V}O_2$ の低下にもこれらの因子が関与した可能性があるが、関連した変量の測定が行われていないため、あくまでも推測の域を出

デサントスポーツ科学 Vol. 27

ない。

第4番目の因子としては、直接作業に関与した筋以外の筋におけるエネルギー消費の低下したことが考えられる。本研究では、 $\dot{V}O_2$ 減少とともに $\dot{V}E$ やHRの減少が観察された。 $\dot{V}E$ の減少は呼吸運動に機械的仕事量の低下を、HRの減少は心臓血管系に対する負荷の低下を示すと考えられることから、これが一定運動時の $\dot{V}O_2$ の減少をもたらしたことは十分に考えられる。しかし、観察された $\dot{V}O_2$ の減少は比較的大きく(5~7.2ml · kg⁻¹ · 分⁻¹), $\dot{V}E$ とHRの減少だけでは説明できないように思われる。おそらくは、可能性のある複数の因子が関与しているものと思われる。

また、本研究では5日間の低酸素室への滞在が、呼吸循環応答の改善とともに、運動後(80% $\dot{V}O_{2max}$)のLaに有意な低下を引き起こすことが観察された。一定運動強度におけるLa水準の高低は $\dot{V}O_2$ 水準とともに、運動の持久性パフォーマンスの改善と深く関係することが知られていることから、その低下がわずか5日間の間欠的低酸素滞在によってもたらされたことは、興味ある事実である。このLaの低下には $\dot{V}O_2$ により示されるエネルギー消費量の低下に伴いLaの生産が抑制されたことが強く関係しているものと思われるが、最近指摘されている筋の緩衝能の増加¹²⁾の関与も否定できない。また、今回われわれの研究において観察された低酸素環境への滞在によるヘモグロビン酸素解離曲線の右方シフトおよび P_{50} 値の増加が組織における酸素利用性を向上させ、これがLaの低下に影響を与えたとも推測される。

このように、本研究では5日間の間欠的な常圧低酸素室滞在と平地での通常トレーニングの反復によって、よく鍛錬されている一流自転車競技選手(中距離)の一定負荷運動時の呼吸循環応答が改善され、Laが低下することが観察された。本研究の被験者はいずれも競技力が国内トップレベルにある選手であった。したがって、一般的に言

えば、これらの競技者がIH以外のわずか5日間の通常のトレーニングで有意な生理的機能の改善を得ることは考えにくく、今回の結果を低酸素室滞在の影響であると考えても大きな間違いはないと思われる。

まとめ

2,500mに相当する低酸素室を利用した短期間の間欠的な常圧低酸素環境への滞在は、酸素運搬にかかわる血液学的変量(RBCやHb等)を変化させないが、ODCの右方シフトおよび P_{50} 値を高め、また、最大下運動時の $\dot{V}O_2$ を減少させることから、パフォーマンスの向上につながる運動効率改善をもたらすことが示唆された。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、研究助成を賜りました財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚くお礼を申し上げます。また、研究に参加して頂きました被験者の皆様、研究を行うに当たり多大な貢献をいただいた、順天堂大学大学院の白石裕一氏にも心からお礼を申し上げます。

文 献

- 1) 青木純一郎, 小倉裕司. 低酸素トレーニングの歴史. 臨床スポーツ医学 第21巻, 1-6 (2004)
- 2) Ashenden, M. J., C. J. Gore, D. T. Martin, G. P. Dobson and A. G. Hahn. Effects of a 12-day "live high, train low" camp on reticulocyte production and haemoglobin mass in elite female road cyclists. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 80, 472-478 (1999a)
- 3) Ashenden, M. J., C. J. Gore, G. P. Dobson and A. G. Hahn. "Live high, train low" does not change the total haemoglobin mass of male endurance athletes sleeping at a simulated altitude of 3000m for 23 nights. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 80, 479-484 (1999b)
- 4) Casas, M., H. Casas, T. Pages, R. Rama, A. Ricart, J. L. Ventura and G. Viscor. Intermittent hypobaric hypoxia induces altitude acclimation and improves the lactate threshold. *Aviat. Space Environ. Med.*, 71, 125-130 (2000)
- 5) Chapman, R. F., J. Stray-Gundersen and B. D. Levine. Individual variation in response to altitude training. *J. Appl. Physiol.*, 85, 1448-1456 (1998)
- 6) Daniels, D. and N. Oldridge. The effects of alternate to exposure to altitude and sea level on world-class middle distance runners. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 2, 107-112 (1970)
- 7) Davies, C. T. M. Limitations to the prediction of maximum oxygen intake from cardiac frequency measurements. *J. Appl. Physiol.*, 24, 700-706 (1968)
- 8) Dehnert, C., M. Hutler, Y. Liu, E. Menold, C. Netzer, R. Schick, B. Kubanek, M. Lehmann, D. Bonling and J. M. Steinacker. Erythropoiesis and performance after two weeks on living high and training low in well trained triathletes. *Int. J. Sports Med.*, 23, 561-566 (2002)
- 9) Ekblom, B. Effect of physical training on oxygen transport system in man. *Acta Physiol. Scand.*, Suppl.328, 9-45 (1969)
- 10) Faulkner, J. A., J. T. Daniels and B. Balke. Effects of training at moderate altitude on physical performance capacity. *J. Appl. Physiol.*, 23, 85-89 (1967)
- 11) Fulco, C. S., P. B. Rock and A. Cymerman. Improving athletic performance : Is altitude residence or altitude training helpful ? *Aviat. Space Environ. Med.*, 71, 162-171 (2000)
- 12) Gore, C. J., A. G. Hahn, R. J. Aughey, D. T. Martin, M. J. Ashenden, S. A. Clark, A. P. Garnham, A. D. Roberts, G. J. Slater and M. J. Mckenna. Live high: train low increases muscle buffer capacity and submaximal cycling efficiency. *Acta Physiol. Scand.*, 173, 275-286 (2001)
- 13) Gore, C. J., N. Creig, A. Hahn, A. Rice, P. Bourdon, S. Lawrence, C. Walsh, T. Stanef, P. Barnes, R. Parisotto, D. Martin and D. Pyne. Altitude training at 2690m does not increase total haemoglobin mass or sea level $\dot{V}O_{2max}$ in world champion track cyclists. *J. Sci. Med. Sport*, 1, 156-170 (1998)
- 14) Green, J.H., B. Roy, S. Grant, R. Houghson, M. Burnett, C. Otto, A. Pipe, D. Mckenzie, and M. Johnson. Increases in submaximal cycling efficiency mediated by altitude acclimatization. *J. Appl. Physiol.*, 89, 1189-1197 (2000)
- 15) Hahn, A. G., C. J. Gore, D. T. Martin, M. J. Ashenden, A. D. Roberts and P. A. Logan. An

- evaluation of the concept of living at moderate altitude and training at sea level. *Comp. Biochem. Physiol.*, 128, 777-789 (2001)
- 16) Hochachka, P. W., C. Stanley, G. O. Matheson, D. C. McKenzie, P. S. Allen, and W. S. Parkhouse. Metabolic and work efficiencies during exercise in Andean natives. *J. Appl. Physiol.*, 70, 1720-1730 (1991)
- 17) Howley, E. T., D. R. Bassott. Jr, and H. G. Welch. Criteria for maximal oxygen uptake: review and commentary. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 27, 1292-1301 (1995)
- 18) Issekutz, B., Jr., N. C. Birkhead and K. Rodahl. Use of respiratory quotients in assessment of aerobic work capacity. *J. Appl. Physiol.*, 17, 47-50 (1962)
- 19) Klausen, T., T. Mohr, U. Ghisler and O. J. Nielsen. Maximal oxygen uptake and erythropoietic responses after training at moderate altitude. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 62, 376-379 (1991)
- 20) 小林寛道, 杉田正明, 山地啓司, 榎屋光男, 二上敏博. 陸上競技の高所トレーニング医・科学サポート 平成9年度日本オリンピック委員会スポーツ医・科学研究報告 JOC 高地トレーニング医・科学サポート, 第7報, 76-90 (1998)
- 21) Koistinen, P. O., H. Rusko, K. Irjala, A. Rajamalki, K. Penttinen, V-P. Sarparanta, J. Karpakka and J. Leppaluoto. EPO, red cell, and serum transferrin receptor in continuous and intermittent hypoxia. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 32, 800-804 (2000)
- 22) Lenfant, C., J. D. Torrance and C. Reynafarje. Shift of the O₂-Hb dissociation curve at altitude: mechanism and effect. *J. Appl. Physiol.*, 30, 625-631 (1971)
- 23) Levine, B. D. and J. Stray-Gundersen. Living high-training low : effect of moderate-altitude acclimatization with low-altitude training on performance. *J. Appl. Physiol.*, 83, 102-112 (1997)
- 24) Mairbaurl, H., W. Schobersberger, E. Humpeler, W. Hasibeder, W. Fischer and E. Raas. Beneficial effects of exercising at moderate altitude on red cell oxygen transport and on exercise performance. *Pflugers Arch.*, 406, 594-599 (1986)
- 25) 村岡 功, 矢澤 誠, 青木純一郎, 前嶋 孝, 植木眞琴, 内丸 仁, 青野 博, 河原弥生, 岩川孝志. 1日10時間の6日連続あるいは3日反復の低酸素室滞在が生理・生化学的応答に及ぼす影響 平成12年度日本オリンピック委員会スポーツ医・科学研究報告 JOC 高地トレーニング医・科学サポート, 第10報, 55-65 (2000)
- 26) 大柿哲朗. $\dot{V}O_{2max}$ の判定基準 (criteria). *体育の科学* 27: 360-364 (1977)
- 27) Piehl Aulin, K., J. Svedenhag, L. Wide, B. Berglund and B. Saltin. Short-term intermittent normobaric hypoxia-haematological, physiological and mental effects. *Scand. J. Med. Sci. Sports.*, 8, 132-137 (1998)
- 28) Rodriguez. F. A., J. L. Ventura, M. Casas, H. Casas, T. Pages, R. Rama, A. Ricart, L. Palacios and G. Viscor. Erythropoietin acute reaction and haematological adaptations to short, intermittent hypobaric hypoxia. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 82, 170-177 (2000)
- 29) Rodriguez. F. A., M. Casas, H. Casas, T. Pages, R. Rama, A. Ricart, J. L. Ventura, J. Ibanez and G. Viscor. Intermittent hypobaric hypoxia stimulates erythropoiesis and improves aerobic capacity. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 31, 264-268 (1999)
- 30) Rusko, H. R. New aspects of altitude training. *Am. J. Sports Med.*, 24, S48-S52 (1996)
- 31) Samaja. M., P. E. Di Prampero and P. Cerretelli. The role of 2, 3-DPG in the oxygen transport at altitude. *Respir. Physiol.*, 64, 191-202 (1986)
- 32) 内丸 仁, 土居 進, 石原啓次, 形本静夫, 青木純一郎. 常圧低酸素ハウスを利用した Living High, Training Low 法の有効性. *デサントスポーツ科学*, 第23巻, 125-133 (2001)
- 33) Wilber, R. L. Altitude training and athletic performance. 139-231, *Human Kinetics* (2004)
- 34) Wyndham, C. H., N. B. Strydom, J. S. Maritz, J. F. Morison, J. Peter and Z. U. Potgieter. Maximum oxygen intake and maximum heart rate during work. *J. Appl. Physiol.*, 14, 927-936 (1959)