

低酸素環境を利用したトレーニングの 繰り返し効果とストレス応答

仙 台 大 学 内 丸 仁
(共同研究者) 同 竹 村 英 和
東 北 大 学 松 生 香 里
同 永 富 良 一

Effect of Repeated Intermittent Normobaric Hypoxia on Exercise Performance and Stress Response

by

Jin Uchimaru, Hidekazu Takamura
Sendai University
Kaori Matsuo, Ryoichi Nagatomi
Tohoku University

ABSTRACT

The purpose of this study was to examine the effect of repeated intermittent normobaric hypoxia on exercise performance and stress response. Twelve-male college long distance runners and triathletes were divided into a normoxic (N, n=6) or a hypoxic group [two 7-night blocks of hypoxia, interspersed with 7-nights of normoxia (H, n=6)]. H group subjects stayed in a normobaric hypoxic room (15.4% O₂; 2500m) in a for 10-12h a day at night. During the experimental period, subjects were undergone the submaximal treadmill running and hematological tests. Submaximal running efficiency was measured at the intensities of 50% and 80% of $\dot{V}_{O_{2max}}$ predetermined during baseline test. Also, resting erythrocyte parameters, white blood cell subsets and stress hormones were measured before (pre) and 1st, 3rd and 7th day at each series. Erythrocyte was stimulated by hypoxia. RBC, Hb and Hct were not significantly changed by hypoxia. After

experimental period, exercise efficiency of H group was not significantly improved by repeated LHTL, but blood lactate concentration at both intensities was tendency to decrease from the pre-values in H group. WBC subsets and epinephrine and norepinephrine as stress hormone were increased by hypoxia. From these results, it was concluded that repeated intermittent normobaric hypoxia was stimulate the erythrocyte, but did not enough to improve to the exercise efficiency. Also, Stress responses as WBC subsets and stress hormone may be relate the improvement of submaximal exercise efficiency in athletes.

要 旨

大学の陸上競技長距離選手およびトライアスロン選手の12名を対象に7日間の常圧低酸素環境への間欠的滞在(LHTL)の繰り返しが運動効率およびストレス応答に及ぼす影響について検討した。

被験者は高度2,500m相当(15.4% O_2)の低酸素室に1日10-12時間ずつ7日間にわたって滞在することを、1週間のインターバルを挟んで2回行い、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。実験期間中、血液性状、および50%および80% $\dot{V}_{O_{2max}}$ 強度での最大下負荷テストを実施した。

H群はLHTLによってエリスロポイエチン(EPO)および網状赤血球数(Ret)の有意な増加を認めたが、赤血球数(RBC)やヘモグロビン濃度(Hb)等の有意な増加は認められなかった。最大下負荷テストにおいてはLHTL後の運動効率に改善が見られなかったが、血中乳酸濃度(La)が低下する傾向となった。LHTL中の白血球分画およびストレスホルモンは有意ではないものの緩やかな増加傾向となった。

以上の結果から、LHTLの繰り返しは赤血球生成を刺激する。また、運動効率の有意な改善はみとめられなかったものの、LHTL後の運動パフォーマンスには、LHTL中の低酸素に対するストレ

ス応答と関連がある可能性が示された。

緒 言

高地トレーニングは主として持久的競技力向上をねらいとして多くの選手によって実践されている。近年では、高地トレーニングにおけるトレーニングの問題点を解消する方法として、Levine and Stray-Gundersen¹³⁾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 (LHTL)が、平地でのパフォーマンス改善のための最適な適応を与えるものとして推奨されている。さらに、高地トレーニングあるいはLHTLは地理的な問題から容易に実施できなかったが、Rusko²³⁾によって常圧下で窒素分圧を人工的に上げて酸素分圧を低下させる低酸素環境を実現する常圧低酸素室が開発され、従来の低圧室に比べて利用が容易で実用的であること、コストの面でも軽減できることから世界的に普及している。

これまで、我々は常圧低酸素室を利用した間欠的低酸素環境での滞在(LHTL)が持久的能力に及ぼす影響について検討し、LHTLは持久的能力を改善する効果的なトレーニングであることを示している^{28, 29)}。しかしながら、LHTLによるその効果の持続期間、およびその効果を維持するため、あるいはさらなる効果の獲得をねらいとして繰り返しLHTLを行うことによる効果についての

検討は研究の緒についたばかりである。

一方、LHTL中は低酸素というストレスが加わるために、選手の身体コンディションに大きく影響を与えることも確認している。我々は常圧低酸素室を利用したLHTL中の低酸素に対するストレスは、高地トレーニングと同様に血中コルチゾールおよびカテコールアミン濃度の変化等に特徴づけられるストレス応答と関連すると考えている^{3,5,8,25}。また、これらストレス応答の違いが運動パフォーマンスに影響する可能性も考えられる。

しかしながら、LHTLの運動パフォーマンスへの繰り返し効果、およびストレス応答についての報告は見あたらない。そこで、本研究においては、①繰り返し行うLHTLが運動パフォーマンスおよびストレス応答に及ぼす影響、②LHTL後の運動パフォーマンスとストレス応答との関連性について検討することを目的とする。

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。本実験研究は仙台大学倫理委員会の承諾を得て行われた。

本研究の被験者は大学の鍛錬された陸上競技長距離選手およびトライアスロン選手の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。

1.2 実験デザイン

H群は高度2,500m(酸素濃度; 15.4%O₂, O₂分圧; 117torr相当)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7日間にわたって滞在すること(LHTL)を、1週間のインターバルを挟み2度繰り返した。

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

2度の7日間のLHTL前(Pre), 1日目(1st), 3日目(3rd)および7日目(7th)にそれぞれ、血液学的(赤血球数(RBC), ヘモグロビン濃度(Hb), ヘマトクリット値(HCT), 網状赤血球数(Ret), 白血球(WBC), 好中球(NEUT), リンパ球(LYMPH)), および生化学的検査(エリスロポイエチン(EPO), コルチゾール, カテコールアミン分画)を行った。分析のための採血(18ml)は、各測定日の午前8時に医師あるいは看護師により橈側正中皮静脈より行われた。採取した18mlのうち2mlはRBC, Hb, HCT, Retおよび白血球分画の分析用として冷蔵保存し、分析

表1 Age, height, body weight and maximal oxygen uptake of subjects.

	Age (years)	Height (cm)	Body weight (kg)	Maximal oxygen uptake (ml/min)
Normoxic Group (N) (n=6)	21 ± 1	174 ± 5	65.3 ± 5.7	3716 ± 419
Hypoxic Group (H) (n=6)	20 ± 1	172 ± 7	62.8 ± 8.0	3805 ± 347

(mean ± SD)

は既知の手法により行われた。残りの16 mlは生化学的項目の定量のために、採血後に約10分間、3000rpmで遠心分離し、上清を既知の手法によって分析した。

1. 4. 2 運動テスト

すべての運動テストはトレッドミルを用いてランニングによって行った。最大運動テストは実験開始のおよそ10日前、また、最大下運動テストは、2度繰り返したLHTLの前後にそれぞれ実施した。

最大運動テストはトレッドミルの速度100m/minで角度0度から開始し、運動開始3分目で角度を1度上昇させ、その後は疲労困憊に至るまで1分ごとに速度を20m/minずつ漸増させた。

テスト中、胸部双極導出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較正用シリンダー(2L)を用いて較正し、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: O_2 15.00%, CO_2 5.00%)を用いて較正した。

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($\dot{V}_{O_{2max}}$)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。

- ① 酸素摂取量のleveling offが見られること^{6,11)}
- ② 心拍数が180拍/分以上に達している^{6,26)}
- ③ 呼吸交換比が1.0を超えている^{12,27)}

本研究の被験者は全員が2つ以上の基準を満たした。

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 $\dot{V}_{O_{2max}}$ の50%および80%に相当する強度(50%および80% $\dot{V}_{O_{2max}}$)で、そ

れぞれ6分間ランニング走行を行うものであった。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(5 μ l)は運動終了後に指先より行った。

1. 5 統計

すべてのデータは平均値±標準偏差で表した。低酸素室滞在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, およびHCTには、実験期間中に有意な変化は認められなかった(図1)。しかし、H群のRBC, HbおよびHCTは2回目の滞在7日目(RBC; $536 \pm 27 \cdot 10^4/\mu$ l, Hb; 16.5 ± 0.4 g/dl, HCT; $48.0 \pm 1.4\%$)で実験開始前(RBC; $521 \pm 19 \cdot 10^4/\mu$ l, Hb; 15.8 ± 0.4 g/dl, HCT; $46.9 \pm 1.3\%$)より増加する傾向が観察された。

H群のRetはLHTL前の 1.1 ± 0.5 からLHTL終了時で $1.4 \pm 0.2\%$ へと有意に増加した($p < 0.05$)。H群のEPOもまた、1回目および2回目のLHTLにおいてそれぞれ、Preから滞在1日目および3日目に有意に高値を示した(図2)。

2. 2 白血球、好中球およびリンパ球の変化

図3に実験期間中のWBC, 好中球(NEUT)およびリンパ球(LYMPH)の変化を示した。WBCおよびLYMPHにおいて有意ではないものの増加傾向が認められた。

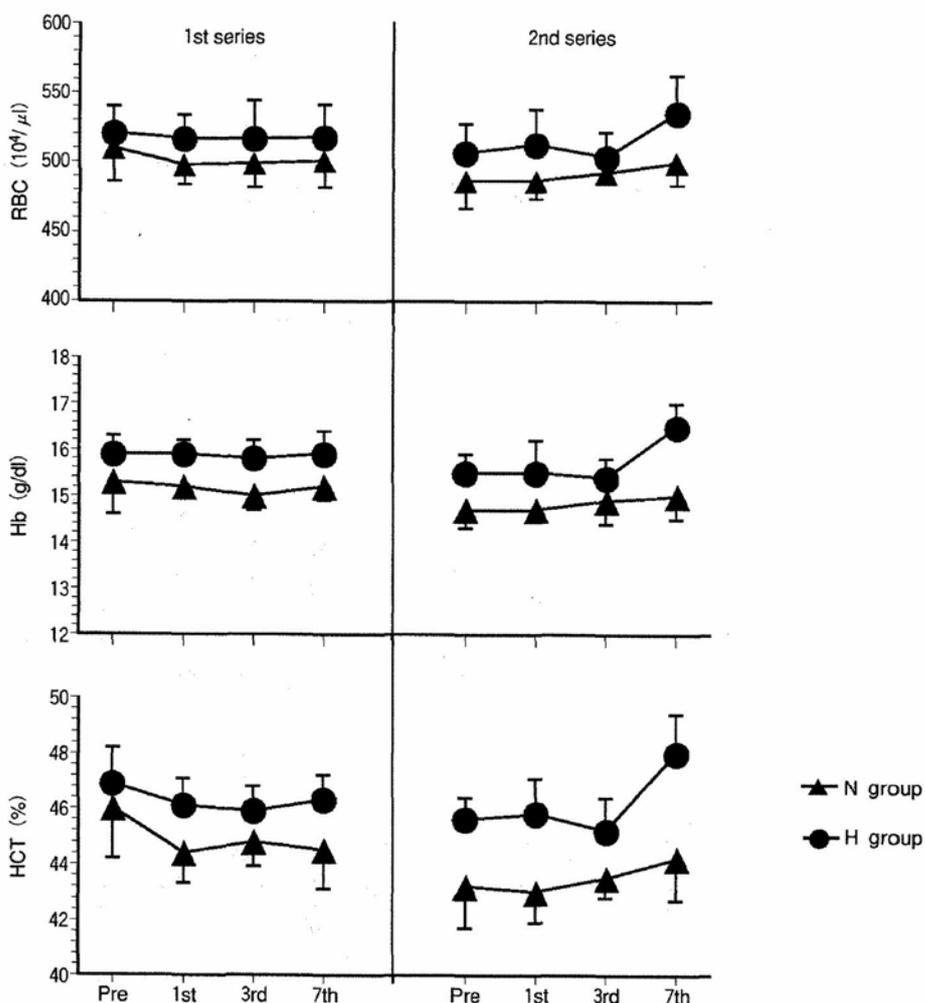


図1 Changes in red blood cell (RBC), hemoglobin (Hb), and hematocrit (HCT) of N group (▲) and H group (●) over experimental period. Values are Mean \pm SD.

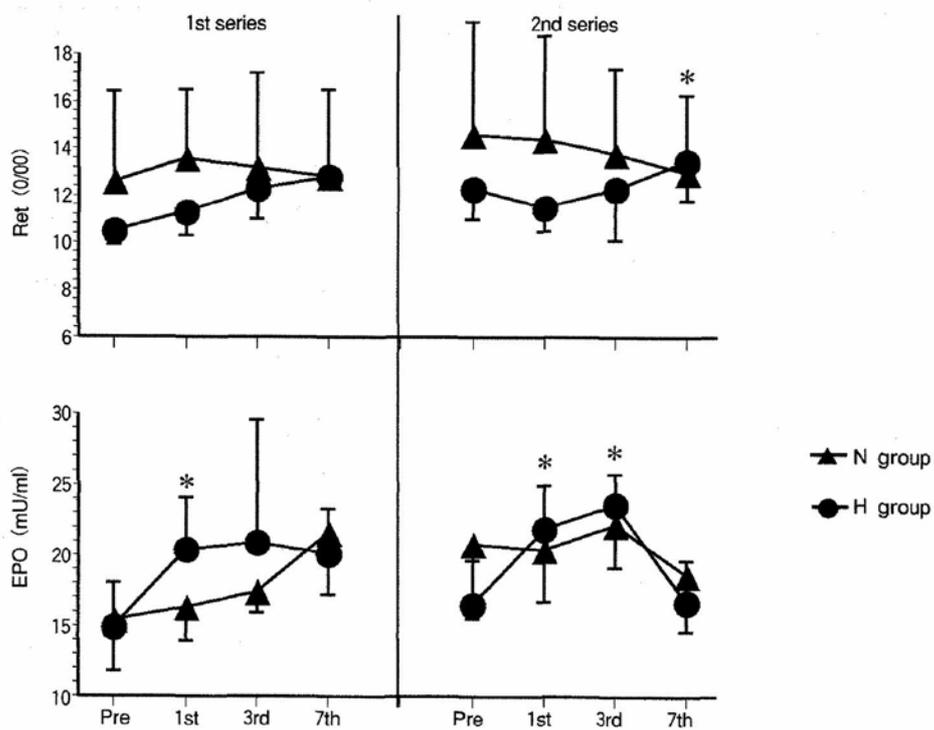


図2 Changes in reticulocyte (Ret) and erythropoietin (EPO) of N group (▲) and H group (●) over experimental period. Values are Mean \pm SD. * $p < 0.05$; Significant different from Pre value of 1st series.

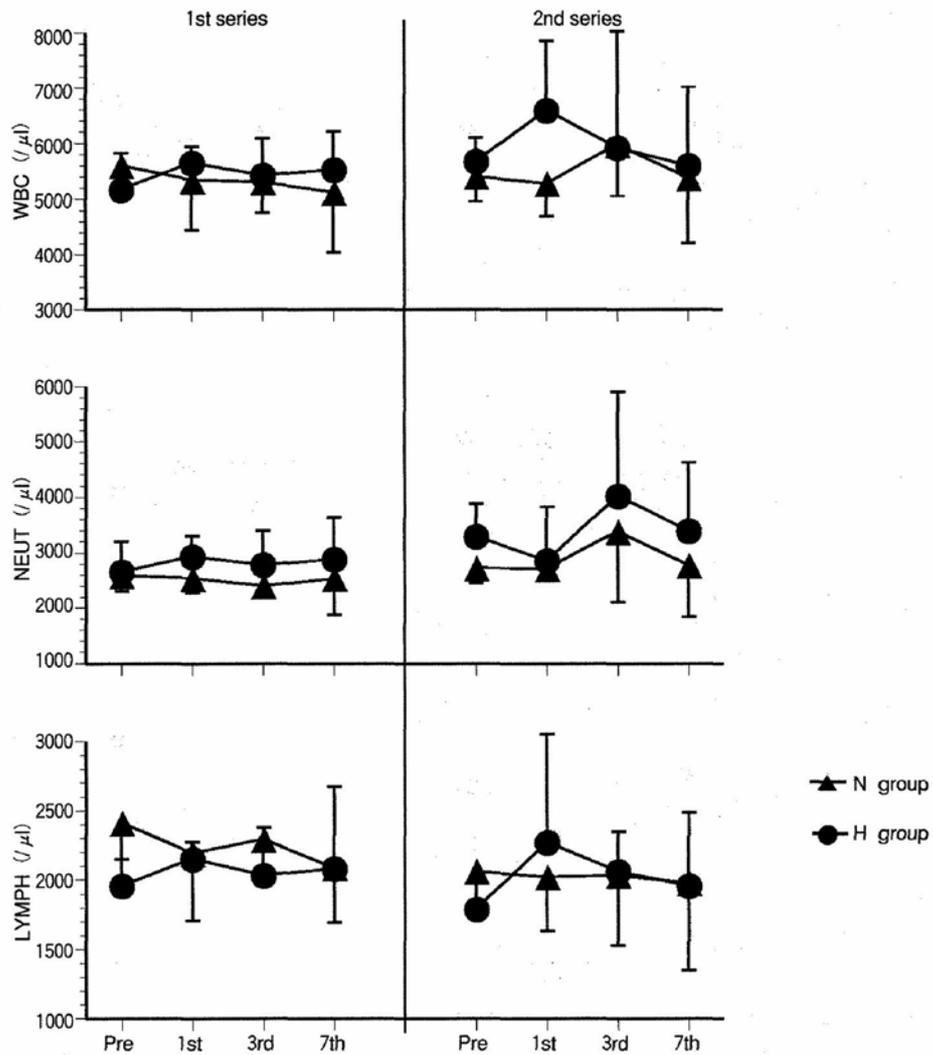


図3 Changes in white blood cell (WBC), neutrophil counts (NEUT), and lymphocyte counts (LYMPH) of N group (▲) and H group (●) over experimental period. Values are Mean \pm SD.

2. 3 コルチゾール, エピネフリンおよびノルエピネフリンの変化

白血球分画と同様に有意な変化は観測されなかったが, H群はLHTL中にエピネフリンおよびノルエピネフリンが高まる傾向にあった(図4).

2. 4 運動テスト

LHTL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分間のトレッドミル走時の \dot{V}_E , \dot{V}_{O_2} , HR, およびLaをそれぞれ図5および6に示した.

両群において, 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. しかしながら, LaがH群はN群と比べて

LHTL後に80% $\dot{V}_{O_{2max}}$ で低下する傾向にあった(N群, LHTL前; 5.0 ± 1.0 mmol/L, LHTL後; 5.7 ± 1.9 mmol/L, H群, LHTL前; 5.0 ± 1.7 mmol/L, LHTL後; 4.7 ± 1.3 mmol/L).

考 察

本研究においては, 低酸素室を利用した7日間のLHTLの繰り返しによって赤血球生成は刺激されるが, 酸素運搬を担うRBCおよびHbの有意な増加は認められなかった. しかしながら, H群においてはLHTL後のRBC, HbおよびHCTがLHTL前に比べて, 増加する傾向にあった.

我々の実験デザインでは7日間のLHTLを1週間のインターバルを挟んで繰り返しているものの,

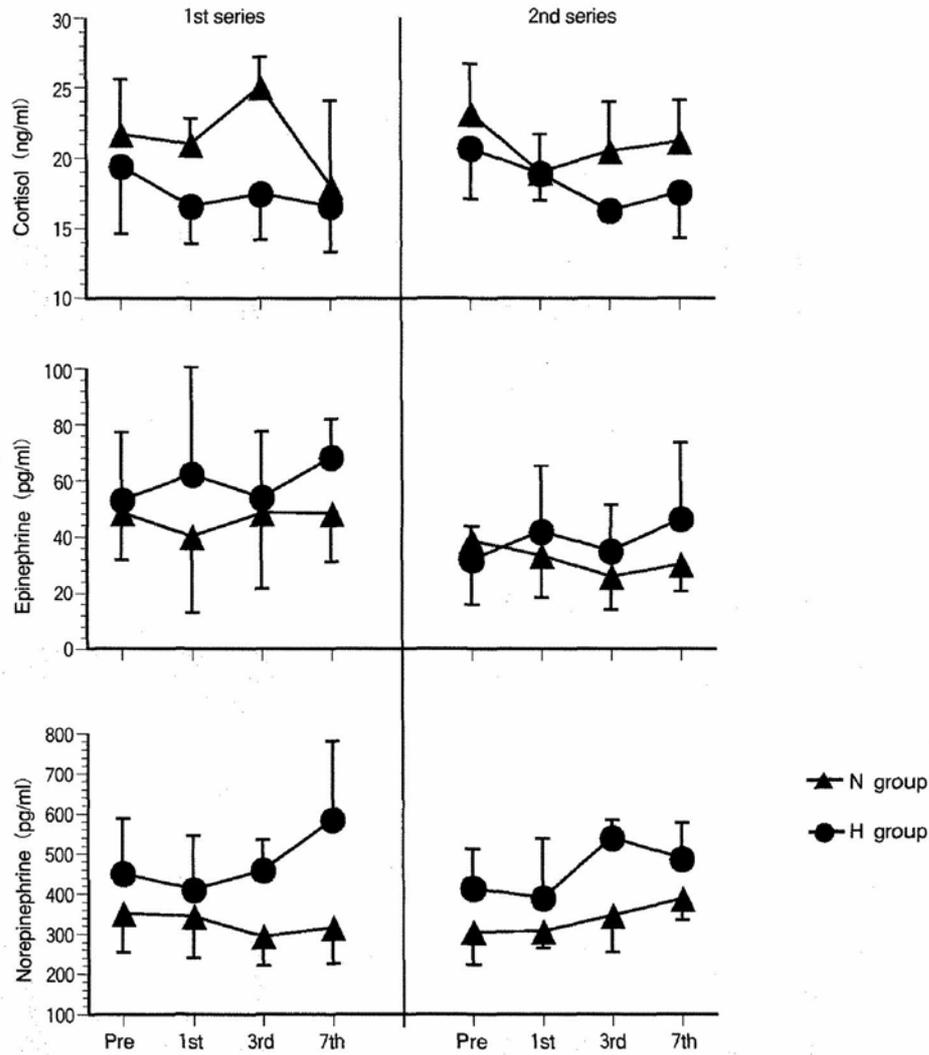


図4 Changes in cortisol, epinephrine, and norepinephrine of N group (▲) and H group (●) over experimental period. Values are Mean ± SD.

低酸素室への滞在は合計で14日間となる。これまでの先行研究において、このような短期間のLHTLを繰り返し行った報告は見られないが、滞在日数が同様な先行研究についてみると、女性自転車ロード選手を対象に標高2650 m相当 (15.2% O₂) の常圧低酸素室に12日間にわたってLHTL (1日8-10時間滞在) を行う²⁾、あるいは男性の持久的競技選手を標高3000m相当の常圧低酸素室 (14.5% O₂) に23日間のLHTL (1日8-10時間滞在) を実施した実験¹⁾において、それぞれRetは有意に増加するものの、Hbやその他の血液パラメータに有意な変化が認められなかったという報告と一致する。中等度高地を常圧低酸素環境でシミュレートした他のLHTL実験においても、同様

デサントスポーツ科学 Vol. 29

の結果を示している^{14,21)}。

我々の結果も、RBC、HbおよびHCTに有意な変化は観測されなかったが、これらのパラメータは増加する傾向にあった。この要因について考えると、まず、脱水の影響が考えられるが、各パラメータにおいて、N群では増加傾向が認められないことから、トレーニングによる脱水等の影響はないものと考えられる。次に、これまでの先行研究においては、我々の行った繰り返しのLHTLではなく、連続して行うLHTLであることが大きく異なる点としてあげられる。EPOの応答に着目すると、我々の結果では、LHTL中にEPOは2度ピークが認められており、このことが従来のLHTLよりも赤血球生成をより促進した可能性がある

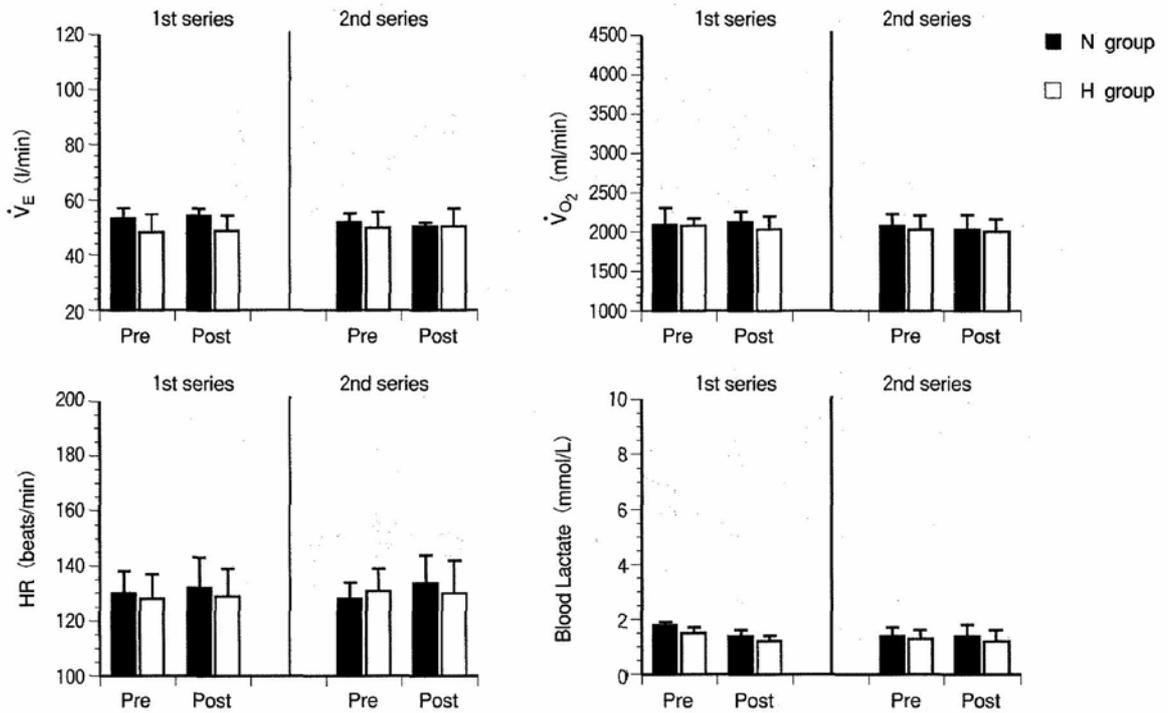


図5 Ventilation (\dot{V}_E), oxygen uptake (\dot{V}_{O_2}), heart rate (HR) and blood lactate concentration of N (■) and H group (□) during submaximum exercise at 50% \dot{V}_{O_2max} .

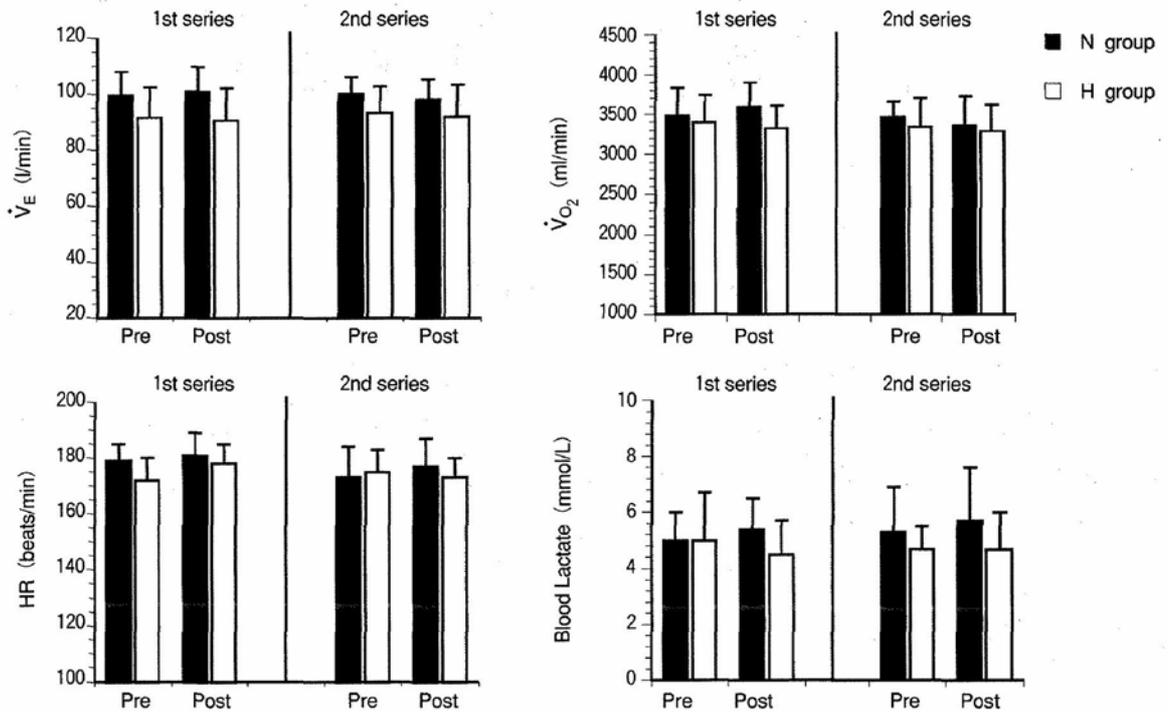


図6 Ventilation (\dot{V}_E), oxygen uptake (\dot{V}_{O_2}), heart rate (HR) and blood lactate concentration of N (■) and H group (□) during submaximum exercise at 80% \dot{V}_{O_2max} .

も推測される。

次に、LHTL中は低酸素というストレスが加わるために、選手の身体コンディションに大きく影響を与えることが予想される。今回の実験では、

WBC、NEUTおよびLYMPHとストレスホルモンとされるコルチゾール、カテコールアミンについて検討したところ、顕著な変化は観察されなかったものの、いくつか興味深い変化が観察された。

まず、WBC、NEUTおよびLYMPHについては、個人差が大きく統計的な差は認められないものの、H群は2度のLHTLのいずれも1日目で高まる傾向にあった。また、H群のエピネフリンおよびノルエピネフリンもLHTL中に徐々に高まる傾向にあった。

低酸素曝露は組織への酸素供給量を制限し、生体への負担を増大することから、交感神経系などのストレス系内分泌応答がまず刺激される。Mazzeoらは、低酸素への急性および慢性曝露ともにエピネフリンおよびノルエピネフリンを増加させることを報告している。結果としてこの増加は、組織や器官への血流や酸素供給を保護するためであると考えられている^{8, 16, 17, 18}。今回の実験においては先行研究に比べて、酸素濃度は15.4%と厳しい環境ではないために、エピネフリンおよびノルエピネフリンの応答が緩やかであった可能性が考えられる。しかしながら、低酸素に対するこれらストレス応答は高地トレーニングと同様にLHTL中は血中コルチゾール、カテコールアミンの変化等で特徴づけられるものと推測される^{3, 5, 8, 25}。

さらには、ストレスホルモンは白血球およびリンパ球の分布を変化させることが報告されている²⁰。このことは今回の我々のカテコールアミン応答とWBCおよびLYMPHの結果を反映しているかもしれない。したがって、白血球およびその分画は低酸素に対するストレス応答として簡易的で実践的な指標としても有効な手段となる可能性があることを示唆している。しかしながら、今回の我々の結果からこれらの関連性について明確にすることは困難であり、今後の課題としたい。

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^{7, 9, 10, 21, 22, 24}。我々の先行研究においても同様の結果を確認しているが、今回は最大下運動時の呼吸循環系のパラメータに有意な変化は認め

られなかった。この矛盾する結果となった原因について考えると、まずLHTLにおける低酸素に対するストレスがコルチゾールやカテコールアミン、特に自律神経系に大きく影響するカテコールアミンの変化が影響していた可能性があるように思われる。したがって、LHTLにおけるストレス応答の違いが運動パフォーマンスに影響する可能性も考えられる。

しかしながら、有意ではないもののLaが低値を示す傾向にあり、このことは今回の我々の結果が、必ずしも繰り返しのLHTLが最大下運動時の運動効率等には影響しないということではないと考える。

この最大下運動時におけるLaの低下傾向の可能性のあるメカニズムは、低酸素環境に滞在することによるRBCおよびHbの酸素運搬に関わる血液学的変量の増大以外の要因が考えられる。つまりは低酸素環境への馴化に伴う骨格筋での代謝能の改善である。興味深い研究として、Clarkら⁴)は20日間のLHTL後に最大下運動時の乳酸産生を有意に減少させ、筋でのエネルギー供給がより酸化的代謝にシフトしたことが要因と推測している。

また、高地トレーニングあるいはLHTL後に筋緩衝能が改善することも要因としてあげられるであろう。つまりは、Mizunoら¹⁹)は2週間の高地トレーニング(LHTH)後に筋緩衝能が有意に高まることを報告し、Goreら⁹)も23日間のLHTL後に同様に筋緩衝能が改善する結果を示している。今回、我々は骨格筋代謝能および筋緩衝能を測定していないが、LHTL後にLaが減少する傾向となったことは、これらが要因となっていることが推測できよう。

まとめ

2,500mに相当する常圧低酸素環境への短期間のLHTLの繰り返しは、赤血球生成を刺激する。

LHTLの繰り返しはまた、最大下運動時の運動効率の改善を引き起こさなかったが、LHTL中のWBCおよびLYMPH応答、さらにはストレスホルモンとしてのカテコールアミン応答においては増加傾向が観測され、これらは運動パフォーマンスと関連し、同時にLHTL中のストレス応答の把握および選手のコンディション管理に有用となる可能性があると考えられる。

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、実験期間中のトレーニング管理および血液性状の分析に関してご指導いただきました仙台大学・横川和幸教授および仙台大学・山野英伯講師、そして研究に参加して頂きました被験者の皆様に心からお礼を申し上げます。

文 献

- 1) Ashenden M.J., Gore C.J., Dobson G.P., and Hahn A.G., "Live high, train low" does not change the total haemoglobin mass of male endurance athletes sleeping at a simulated altitude of 3000 m for 23 nights. *European journal of applied physiology and occupational physiology*, 80: 479-484 (1999)
- 2) Ashenden M.J., Gore C.J., Martin D.T., Dobson G.P., and Hahn A.G., Effects of a 12-day "live high, train low" camp on reticulocyte production and haemoglobin mass in elite female road cyclists. *European journal of applied physiology and occupational physiology*, 80: 472-478 (1999)
- 3) Benschop R.J., Rodriguez-Feuerhahn M., and Schedlowski M., Catecholamine-induced leukocytosis: early observations, current research, and future directions. *Brain, behavior, and immunity*, 10: 77-91 (1996)
- 4) Clark S.A., Aughey R.J., Gore C.J., Hahn A.G., Townsend N.E., Kinsman T.A., Chow C.M., McKenna M.J., and Hawley J.A., Effects of live high, train low hypoxic exposure on lactate metabolism in trained humans. *J. Appl. Physiol.*, 96: 517-525 (2004)
- 5) Cupps T.R., and Fauci A.S., Corticosteroid-mediated immunoregulation in man. *Immunological reviews*, 65: 133-155 (1982)
- 6) Davies C.T., Limitations to the prediction of maximum oxygen intake from cardiac frequency measurements. *J. Appl. Physiol.*, 24: 700-706 (1968)
- 7) Dehnert C., Hutler M., Liu Y., Menold E., Netzer C., Schick R., Kubanek B., Lehmann M., Boning D., and Steinacker J.M., Erythropoiesis and performance after two weeks of living high and training low in well trained triathletes. *International journal of sports medicine*, 23: 561-566 (2002)
- 8) Dhabhar F.S., Miller A.H., McEwen B.S., and Spencer R.L., Stress-induced changes in blood leukocyte distribution. Role of adrenal steroid hormones. *J. Immunol*, 157: 1638-1644 (1996)
- 9) Gore C.J., Hahn A.G., Aughey R.J., Martin D.T., Ashenden M.J., Clark S.A., Garnham A.P., Roberts A.D., Slater G.J., and McKenna M.J., Live high:train low increases muscle buffer capacity and submaximal cycling efficiency. *Acta Physiol Scand*, 173: 275-286 (2001)
- 10) Green H.J., Roy B., Grant S., Hughson R., Burnett M., Otto C., Pipe A., McKenzie D., and Johnson M., Increases in submaximal cycling efficiency mediated by altitude acclimatization. *J. Appl. Physiol.*, 89: 1189-1197 (2000)
- 11) Howley E.T., Bassett D.R., Jr., and Welch H.G., Criteria for maximal oxygen uptake: review and commentary. *Medicine and science in sports and exercise*, 27: 1292-1301 (1995)
- 12) Issekutz B., Jr., Birkhead N., and Rodahl K., Use of respiratory quotients in assessment of aerobic work capacity. *J. Appl. Physiol.*, 17: 47-50 (1962)
- 13) Levine B.D., and Stray-Gundersen J., "Living high-training low": effect of moderate-altitude acclimatization with low-altitude training on performance. *J. Appl. Physiol.*, 83: 102-112 (1997)
- 14) Mattila V., and Rusko H., Effects of living high and training low on sea level performance in cyclists (Abstract). *Medicine and science in sports and exercise*, 28: S156 (1996)
- 15) Mazzeo R.S., Carroll J.D., Butterfield G.E., Braun B., Rock P.B., Wolfel E.E., Zamudio S., and Moore

- L.G., Catecholamine responses to alpha-adrenergic blockade during exercise in women acutely exposed to altitude. *J. Appl. Physiol.*, 90: 121-126 (2001)
- 16) Mazzeo R.S., Child A., Butterfield G.E., Mawson J.T., Zamudio S., and Moore L.G., Catecholamine response during 12 days of high-altitude exposure (4,300 m) in women. *J. Appl. Physiol.*, 84: 1151-1157 (1998)
- 17) Mazzeo R.S., and Reeves J.T., Adrenergic contribution during acclimatization to high altitude: perspectives from Pikes Peak. *Exercise and sport sciences reviews*, 31: 13-18 (2003)
- 18) Mazzeo R.S., Wolfel E.E., Butterfield G.E., and Reeves J.T., Sympathetic response during 21 days at high altitude (4,300 m) as determined by urinary and arterial catecholamines. *Metabolism: clinical and experimental*, 43: 1226-1232 (1994)
- 19) Mizuno M., Juel C., Bro-Rasmussen T., Mygind E., Schibye B., Rasmussen B., and Saltin B., Limb skeletal muscle adaptation in athletes after training at altitude. *J. Appl. Physiol.*, 68: 496-502 (1990)
- 20) Okutsu M., Ishii K., Niu K.J., and Nagatomi R., Cortisol-induced CXCR4 augmentation mobilizes T lymphocytes after acute physical stress. *American journal of physiology*, 288: R591-599 (2005)
- 21) Piehl Aulin K., Svedenhag J., Wide L., Berglund B., and Saltin B., Short-term intermittent normobaric hypoxia-haematological, physiological and mental effects. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 8: 132-137 (1998)
- 22) Rodriguez F.A., Casas H., Casas M., Pages T., Rama R., Ricart A., Ventura J.L., Ibanez J., and Viscor G., Intermittent hypobaric hypoxia stimulates erythropoiesis and improves aerobic capacity. *Medicine and science in sports and exercise*, 31: 264-268 (1999)
- 23) Rusko H.R., New aspects of altitude training. *The American journal of sports medicine*, 24: S48-52 (1996)
- 24) Saunders P.U., Telford R.D., Pyne D.B., Cunningham R.B., Gore C.J., Hahn A.G., and Hawley J.A., Improved running economy in elite runners after 20 days of simulated moderate-altitude exposure. *J. Appl. Physiol.*, 96: 931-937 (2004)
- 25) Wilber R.L., Drake S.D., Hesson J.L., Nelson J.A., Kearney J.T., Dallam G.M., and Williams L.L., Effect of altitude training on serum creatine kinase activity and serum cortisol concentration in triathletes. *European journal of applied physiology*, 81: 140-147 (2000)
- 26) Wyndham C.H., Strydom N.B., Maritz J.S., Morrison J.F., Peter J., and Potgieter Z.U., Maximum oxygen intake and maximum heart rate during strenuous work. *J. Appl. Physiol.*, 14: 927-936 (1959)
- 27) 大柿哲朗. $\dot{V}_{O_{2max}}$ の判定基準 (criteria). *体育の科学*, 27: 360-364 (1977)
- 28) 内丸 仁, 田畑昭秀, 内藤久士, 形本静夫. 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. *デサントスポーツ科学*, 27: 154-163 (2006)
- 29) 内丸 仁, 内藤久士, 形本静夫, 青木純一郎. 14日間の常圧低酸素室を利用したLive high, train lowが血液性状および平地での持久的運動能に及ぼす影響. *日本人類生理学雑誌* 第11巻3号: 97-103 (2006)