

原著論文

5日間の低酸素トレーニングが日本トップレベル女子400m走者の
無酸素性及び有酸素性能力に及ぼす影響
Effects of a 5-day hypoxic training on anaerobic and aerobic
capacities of elite female 400-m runners

山中亮¹⁾, 丹治史弥^{2, 4)}, 大沼勇人^{3, 4)}, 安藤良介⁴⁾, 前村公彦⁵⁾, 鈴木康弘⁴⁾
Ryo Yamanaka¹⁾, Fumiya Tanji^{2, 4)}, Hayato Ohnuma^{3, 4)}, Ryosuke Ando⁴⁾, Hirohiko Maemura⁵⁾,
Yasuhiro Suzuki⁴⁾

Abstract : Anaerobic and aerobic capacities are needed to enhance the performance of 400-m runners. We previously demonstrated that a 7-day hypoxic training consisting of high-intensity interval training and endurance training at submaximal load improved the exercise performance (time to exhaustion) as well as anaerobic and aerobic capacities of female 400-m runners. Time to exhaustion and capacities in a shorter training period could be beneficial for several athletes, but this has not been examined. Therefore, the purpose of this study was to investigate whether a 5-day of hypoxic training would improve duration time (time to exhaustion) and the anaerobic and aerobic capacities of elite female 400-m runners. Seven elite female 400-m runners (Personal Best time: 53.9±1.2 s) were trained for 5 days (6 sessions). Anaerobic and aerobic capacity tests were performed on the treadmill before (Pre) and after (Post) the intervention. The indices of anaerobic capacity were maximal accumulated oxygen deficit (MAOD) and maximal blood lactate concentration ($L_{a_{max}}$). The index of aerobic capacity was the maximal oxygen uptake (VO_{2max}). All subjects were trained in a normobaric hypoxic room ($FIO_2=14.4\%$). The training consisted of high-intensity interval training (five 30-s all-out pedaling) and endurance training (30-min incremental running and 30-min steady pedaling). After the intervention, duration time significantly increased in both anaerobic (Pre: 131±11 sec, Post: 149±15 sec, $p = 0.02$) and aerobic (Pre: 5.2±1.2 min, Post: 6.0±1.2 min, $p < 0.01$) tests. MAOD tended to increase (Pre: 54.9±6.3 ml/kg, Post: 58.4±6.8 ml/kg, $p = 0.05$) while the $L_{a_{max}}$ significantly increased (Pre: 19.5±3.3 mmol/l, Post: 21.5±2.6 mmol/l, $p = 0.04$). On the other hand, the VO_{2max} (Pre: 51.4±5.3 ml/kg/min, Post: 53.1±5.0 ml/kg/min) did not significantly change. This study suggests that 5-days of hypoxic training was effective for enhancing duration time of anaerobic and aerobic tests, and also anaerobic capacity in well-trained female 400-m runners.

Key words : high-intensity interval training, hypoxic training, maximal accumulated oxygen deficit, maximal oxygen uptake, 400-m runners

キーワード : 高強度インターバルトレーニング, 低酸素トレーニング, 最大酸素借, 最大酸素摂取量, 400m走者

¹⁾新潟食料農業大学, ²⁾東海大学, ³⁾関西福祉大学, ⁴⁾国立スポーツ科学センター, ⁵⁾筑波大学

¹⁾Niigata Agro-Food University, ²⁾Tokai University, ³⁾Kansai University of Social Welfare, ⁴⁾Japan Institute of Sports Sciences,

⁵⁾University of Tsukuba

E-mail : ryo-yamanaka@nafu.ac.jp

受付日 : 2020年7月30日

受理日 : 2021年1月18日

I. 緒言

陸上競技 400 m 走の競技パフォーマンスを向上させるために、400 m 走の競技パフォーマンスと生理学的な指標の関係性が検討されてきた。エネルギー供給系に着目した先行研究では、陸上競技 400 m 走の競技パフォーマンスには、無酸素性能力と有酸素性能力の両方が重要となることが明らかにされている⁵⁾。このため、400 m 走の競技パフォーマンスを高めるためには、この二つの能力を高めることができるトレーニングを実施することが必要であると考えられる。この両能力を高めることができるトレーニングの手法の一つとして、低酸素トレーニングが行われている。低酸素環境下で高強度インターバルトレーニングを実施することにより、無酸素性能力が関連すると考えられる 60 m 走における最初の 10 m の区間タイムで評価された運動パフォーマンスの向上が認められている⁹⁾。さらに、我々の先行研究では陸上競技女子 400 m および 800 m 走者を対象に、低酸素環境下において、4 回の高強度インターバルトレーニングと 5 回の最大下強度での持続的トレーニングを、7 日間に計 9 回のセッションを実施した結果、無酸素性能力及び有酸素性能力テスト時における運動持続時間が常酸素トレーニング時よりもそれぞれ向上したことを報告している¹⁴⁾。この先行研究では、陸上競技 400 m および 800 m 走の競技パフォーマンスに関与すると考えられる有酸素性能力の指標の一つである血中乳酸濃度が 4 mmol/l 時の走速度、無酸素性能力の指標である最大ランニングパワーおよび運動時の最高血中乳酸濃度が向上したことを報告している¹⁴⁾。従って、低酸素環境下におけるトレーニングは、400 m 走者にとってパフォーマンスを高めるために、効果的な手法の一つであると考えられる。

先行研究¹⁴⁾では 7 日間という短いトレーニング期間で無酸素性能力及び有酸素性能力の向上が認められているが、この研究では大学レベルの選手を被験者として用いているため、競技力が高い日本トップレベルの選手においても同様の効果が認められるのか否かは明らかではない。また、日

本トップレベルの陸上競技短距離選手が国立スポーツ科学センターおよびナショナルトレーニングセンター等で強化合宿を行う場合、7 日間よりも短期間の合宿を実施することもあるが、競技レベルの高い選手を対象として 7 日間よりも短い期間で低酸素トレーニングの効果が認められるか否かについては検討された研究は見当たらない。さらに、これまで短期間の低酸素トレーニングによる無酸素性能力の変化に着目した研究では、エネルギー基質^{8),9)}やパフォーマンステストの結果から得られたパワーの結果^{8),9),14)}から無酸素性能力を評価しているが、無酸素性能力を評価する指標の一つである最大酸素借 (Maximal accumulated oxygen deficit: 以下 MAOD) を測定した研究は見当たらない。

そこで本研究では、陸上競技日本代表候補女子 400 m 走者を対象として、トレーニング期間を前述の先行研究よりも短縮した 5 日間で実施した場合においても、無酸素性能力および有酸素性能力が向上するの否かを検討することを目的とした。本研究では、無酸素性能力の指標として MAOD および最高血中乳酸濃度を用い、有酸素性能力の指標として最大酸素摂取量を用いた。また、無酸素性能力および有酸素性能力を評価する運動時の持続時間をそれぞれ測定し、低酸素トレーニングの前後で比較した。さらに、低酸素トレーニングによる能力の変化には個人差が見られることが先行研究で報告されているため³⁾、低酸素トレーニングによる個人の各測定項目の変化率を検討するとともに、各測定項目の変化率の関係についても検討することを目的とした。

II. 方法

1. 被験者

被験者は、陸上競技 400 m 走を専門とする高校生、大学生もしくは社会人で、日本陸上競技選手権大会で入賞するレベルの日本代表候補女子選手 7 名 (被験者 A-G) であった。被験者の年齢および身長は、22.2±3.2 歳および 164.3±3.6 cm (平均値±標準偏差) であった。被験者の 400 m 走の自

己最高記録は、53.9±1.2 秒であった。被験者7名中2名においては、これまでに低酸素トレーニングを実施した経験があり、その他の5名においては、低酸素トレーニングの実施が初めてであった。実験に先立ち、全ての被験者に実験の趣旨、内容および危険性について十分な説明を行い、参加の同意を得た。また、被験者が未成年の場合、親の同意も得た。各被験者には、測定前の24時間において、激しい運動、アルコールおよびカフェインの摂取を避けるように指示した。本実験は、国立スポーツ科学センターにおける倫理審査委員会の承認を得て実施した。

2. 実験デザイン

被験者は、日本代表候補女子走者を対象とした強化合宿期間中に低酸素環境下でトレーニングを行い、その前後 (Pre: 2週間前、Post: 7日後) に、以下に記述する2つのテストの測定をそれぞれ実施した。Post テストの実施のタイミング (トレーニング期間終了の7日後) は、先行研究¹⁴⁾に倣い実施した。低酸素環境下でのトレーニングは、午前を高強度インターバルトレーニングを、午後には最大下強度での持久性トレーニングを、5日間にそれぞれのトレーニングを3回 (Day 1、Day 2、Day 3) ずつ、計6回のセッションを実施した (図1)。トレーニングの初日には午後のセッションのみを実施し、2日目及び4日目には午前及び

午後の両方にトレーニングセッションをそれぞれ実施し、5日目には午前のセッションのみを実施した。トレーニングの3日目には疲労回復の目的でトレーニングを実施しない完全休養日を設けた。全ての低酸素トレーニングは、先行研究^{14),15)}に倣い、酸素濃度を標高3,000 m相当 (吸気酸素濃度: 14.4%) に設定した常圧低酸素トレーニング室内で実施した。全被験者には、5日間のトレーニング期間において、本研究で実施する低酸素トレーニング以外のトレーニングを実施しないように指示した。なお、5日間のトレーニング期間において、被験者の宿泊は常酸素環境とした。また、5日間のトレーニング期間終了後から Post 測定までの7日間は、低酸素環境下でのトレーニングによる疲労から回復させる目的として、低強度のトレーニングのみ実施するように指示した。

3. トレーニング

高強度インターバルトレーニングは、午前自転車エルゴメータ (Power max V III, Konami, Japan) を用いて、30秒間の全力ペダリング運動を4分間の休息を挟んで5セット実施するものであった。運動負荷は、セット毎に体重の7.5、6.5、5.5、4.5および3.5%kpとした。ウォーミングアップ運動は、体重の3.5%kpの運動負荷で80 rpmの運動を5分間とし、その2分および4分の時点において約5秒間の全力ペダリング運動を行わせ

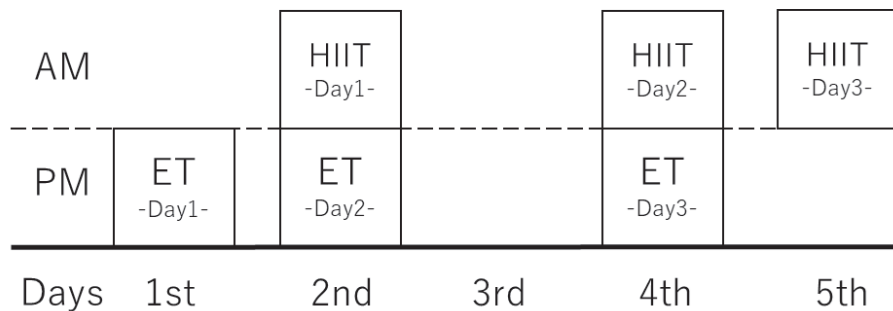


Figure 1. Schedule of hypoxic training. HIIT: High-intensity interval training (five 30-s all-out pedaling), ET: Endurance training consists of 30-min incremental running and 30-min steady pedaling.

た。ウォーミングアップ運動終了の約5分後にトレーニングを開始した。トレーニング中には、被験者に対して験者による口頭の励ましを行った。

持久性トレーニングには、午後にトレッドミルを用いた最大下強度での漸増負荷ランニング運動と自転車エルゴメータを用いた最大下強度での一定負荷運動を実施するものであった。最大下強度での漸増負荷ランニング運動は、トレーニング期間のPreにおいて測定した血中乳酸濃度が4 mmol/l時の走速度を用いて、5分毎に、血中乳酸濃度が4 mmol/l時の75、80、85、90、95および100%の走速度に漸増する計30分間の運動であった。ただし、30分が経過する前に被験者が疲労困憊で走れなくなった場合、その時点で終了させた。自転車エルゴメータを用いた最大下強度での一定負荷運動は、体重の2.5%kpの負荷で、80rpmを維持させる30分間の運動とした。

高強度インターバルトレーニング及び最大下強度での持久性トレーニングにおいて、血中乳酸濃度及び動脈血酸素飽和度を測定した。血中乳酸濃度は、高強度インターバルトレーニング時には全力ペダリング運動の各セットが終了した1分後に、最大下強度での持久性トレーニングではランニング運動及び自転車エルゴメータを用いた運動後のそれぞれの時点において、指尖から血液を採取し、血中乳酸濃度分析器(Lactate Pro2、Arkray, Japan)を用いて血中乳酸濃度を分析した。動脈血酸素飽和度は、指尖に動脈血酸素飽和度計測器(Wrist OX₂ Model 3150、Nonin Medical, USA)のセンサーを取り付けて連続測定し、30秒ごとに平均した値を用いた。トレーニング時における動脈血酸素飽和度の値として、最大下強度での持久性トレーニング時では運動時における最低値を用いた。高強度インターバルトレーニング(全力ペダリング運動)時における動脈血酸素飽和度は、運動時において被験者が自転車エルゴメータのハンドルを強く握ることに伴い、正確な値が得られないと考えられたため、分析には用いなかった。

午前の高強度インターバルトレーニング時に

は、全力ペダリング運動のセット毎に自転車エルゴメータ(Power max V III、Konami, Japan)の液晶部分に表示される平均パワー、最高パワー及び最高回転数を記録した。

被験者は、午前において、ウォーミングアップ運動開始の10分前に低酸素トレーニング室に入室した。また、午後においては、トレーニング開始の30分前に低酸素トレーニング室に入室し、各自で体操、ストレッチ、補強運動などを行った後にトレーニングを開始した。そして、トレーニング終了後は、午前および午後とも約20分間低酸素トレーニング室内に滞在した後、室外でクーリングダウンを行った。

4. 測定項目

被験者の体重および体脂肪率は、PreとPost時において、体成分分析装置(Inbody 730、Biospace, Korea)を用いて測定した。

本研究では、トレーニング前後に常酸素環境下において無酸素性能力テスト及び有酸素性能力テストを実施した。

(1) 無酸素性能力テスト

無酸素性能力の指標として、MAODを測定した。測定には、1%の傾斜をつけたトレッドミルを用いた。MAODの測定時の走速度は、測定の事前に2-3分間走行できると推測される走速度を被験者自身に選択させ決定した。全被験者において、Preで用いた走速度をPost時にも用いた。MAODの測定時において、被験者がその走速度で疲労困憊になるまで運動を実施し、疲労困憊までの運動持続時間を測定した。運動終了後の1、3、5および7分目において、指尖から採血を行い、血中乳酸濃度分析器(ラクテートPro2、Arkray, Japan)を用いて血中乳酸濃度を分析した。分析した血中乳酸濃度の値の中で一番高いものを無酸素性能力テストの最高血中乳酸濃度とした。MAODを求めるために必要な酸素摂取量は、事前に流量およびガス濃度の校正を実施した呼気ガス分析機(AE-310S、Minato, Japan)を用いてexpire法で5秒毎に連続測定した。MAODは、

先行研究¹⁸⁾に倣い、推測された酸素摂取量（需要量）から実測の酸素摂取量を引いた値の積算値とした。MAOD の算出時に用いる酸素摂取量（需要量）の推測値は、先行研究¹⁸⁾に倣い、後述の有酸素性能力テストとして実施したステップ負荷運動の各ステージにおける酸素摂取量と y 片に 5.1 ml/kg/min を追加した値から最小二乗法で求められた一次関数を用い、その一次関数の式に無酸素性能力テスト時に用いた走速度を代入して算出した。

無酸素性能力テストで得られた全てのデータは、Pre の値を基準とし、Pre の値から Post の値への変化率 [(Post の値 - Pre の値) / Pre の値 * 100] を算出した。

(2) 有酸素性能力テスト

有酸素性能力の測定として、ステップ負荷運動と漸増負荷運動を用いた。両運動は、1% の傾斜をつけたトレッドミルを用いて実施した。

ステップ負荷運動は、3 分間の運動を 1 分間の休息を挟みながら 5 ステージ実施した。走速度は、150 m/min からステージごとに 20 m/min ずつ漸増させた。Pre の測定時において、各ステージの運動終了直後に指尖から採血を行い、無酸素性能力テスト時と同様の方法を用いて血中乳酸濃度を分析した。ステップ負荷運動時における各ステージの走速度と血中乳酸濃度の結果をもとに、最小二乗法を用いて近似曲線を算出し、血中乳酸濃度が 4 mmol/l 時の走速度を求め、その走速度を最大下強度での持久性トレーニングの運動負荷として用いた。漸増負荷運動は、ステップ負荷運動が終了した 3 分後に実施した。漸増負荷運動時には、走速度を 230 m/min から始め、その後 1 分ごとに 10 m/min ずつ増加し、被験者が疲労困憊に至るまで実施した。漸増負荷運動時において、被験者が疲労困憊に至るまでの運動持続時間を測定した。

有酸素性能力テスト時の酸素摂取量は、事前に流量およびガス濃度の校正を実施した呼気ガス分析機 (AE-310S, Minato, Japan) を用いて expire 法で連続測定し、30 秒ごとに平均した値を用い

た。ステップ負荷運動の各ステージの酸素摂取量は、各ステージにおける最後の 30 秒間の値を用いた。また、両運動時における酸素摂取量の最大値を最大酸素摂取量とした。

有酸素性能力テストで得られた全てのデータは、無酸素性能力テストと同様に Pre の値から Post の値への変化率を算出した。

5. 統計

全ての測定値は、平均値±標準偏差で示した。統計処理には、統計処理ソフトウェア (SPSS 22.0.0 for Windows, IBM, USA) を用いた。トレーニングの前後 (Pre および Post) の値を比較するために、対応のある student' s t-test を用いた。なお、被験者 1 名が低酸素トレーニング前の無酸素性能力テスト時の最高血中乳酸濃度を測定できなかったため、無酸素性能力テスト時の最高血中乳酸濃度に関わる分析の際には、その被験者を除いた 6 名で実施した。また、低酸素トレーニング前後の被験者個々における各測定項目の変化量の関係について検討するために、ピアソンの積率相関係数を用いた。P 値 (危険率) が 0.05 未満であった時、統計的有意とした。

低酸素トレーニングによる各測定項目の変化の程度を検討するために、Cohen' s effect size (d) を用いて効果量を求めた。効果量 (d) が 0.2 以上 0.5 未満を効果量小、0.5 以上 0.8 未満を効果量中、0.8 以上を効果量大とした。さらに、無酸素性および有酸素性能力テスト時の各測定項目における測定精度 (Coefficient of Variation : CV) を算出した。

Ⅲ. 結果

被験者の体重 (Pre: 57.0±3.8 kg, Post: 56.7±3.0 kg ; d = 0.09) および体脂肪率 (Pre: 15.5±2.2%, Post: 15.4±2.6% ; d = 0.04) は、低酸素トレーニングの前後で有意な変化が認められなかった。

1. 無酸素性能力

表 1 には、低酸素トレーニングの前後に実施した無酸素性能力テストの各測定項目の数値および

Table 1. Values at pre and post tests and the rate of change by hypoxic training in anaerobic capacity test.

Subjects	Duration time			Maximal accumulated oxygen deficit			Maximal accumulated oxygen deficit pre body weight			Maximal blood lactate concentration		
	pre [sec]	post [sec]	rate of change [%]	pre [l]	post [l]	rate of change [%]	pre [ml/kg]	post [ml/kg]	rate of change [%]	pre [mmol/l]	post [mmol/l]	rate of change [%]
A	127	156	22.8	3.82	3.96	3.7	63.3	69.1	9.2	16.6	17.4	4.8
B	127	170	33.9	2.72	3.25	19.3	44.0	52.9	20.2	14.9	18.8	26.2
C	147	154	4.8	2.79	3.03	8.5	55.3	59.3	7.2	18.2	21.3	17.0
D	148	156	5.4	2.92	2.77	-5.3	53.0	50.3	-5.1	22.4	25.0	11.6
E	120	128	6.7	2.80	3.04	8.8	49.5	53.4	7.9	20.5	22.9	11.7
F	122	126	3.3	3.47	3.36	-3.0	57.1	56.6	-0.9	24.3	23.3	-4.1
G	127	154	21.3	3.35	3.77	12.5	61.8	67.4	9.1	-	21.9	-
Average	131	149	14.0	3.12	3.31	6.4	54.9	58.4	6.8	19.5	21.5	11.2
Standard deviation	11	15	11.0	0.39	0.39	8.0	6.3	6.8	7.5	3.3	2.6	9.4
Coefficient of Variation	0.08	0.10	0.79	0.12	0.12	1.25	0.11	0.12	1.10	0.17	0.12	0.84
p values (pre vs. post)		0.02			n.s. (0.09)			n.s. (0.05)			0.04 (n = 6)	
Cohen's effect size (d)		1.37			0.49			0.53			0.67	

トレーニング前後の変化率を示した。MAOD 測定時の運動持続時間は、Pre (131±11 sec) よりも Post (149±15 sec) において有意に増加し、効果量大であった (p = 0.02, d = 1.37)。MAOD 測定時の運動持続時間の変化率は 14.0±11.0% であった。無酸素性能力テストに対する最高血中乳酸濃度は、6 名中 5 名が Pre よりも Post において増加し、平均値では Pre (19.5±3.3 mmol/l) よりも Post (21.5±2.6 mmol/l) において有意に高い値を示し、効果量中であった (p = 0.04, d = 0.67)。低酸素トレーニングによる最高血中乳酸濃度の変化率は、11.2±9.4% であった。MAOD は、7 名中 5 名が Pre よりも Post において向上し、絶対値の平均値では、Pre (3.12±0.39 l) よりも Post (3.31±0.39 l) において増加傾向および効果量小 (p = 0.09, d = 0.49) を示し、体重当たりの平均値では Pre (54.9±6.3 ml/kg) よりも Post (58.4±6.8 ml/kg) において増加傾向および効果量中 (p = 0.05, d = 0.53) を示した。低酸素トレーニングによる MAOD の変化率は、絶対値および体重割値でそれぞれ 6.4±8.0% および 6.8±7.5% であった。トレーニングによる無酸素性能力テストの運動持続時間の変化率は、MAOD の変化率との間に有意な正の相関関係 (r = 0.823, p = 0.02) を示したが (図 2)、血中乳酸濃度の変化率との間には有意な相関関係が認められなかった (r = 0.529, p = 0.28)。また、MAOD と血中乳酸濃度の変化率の間にも有意な相関関係が認められなかった (r = 0.664、

p = 0.15)。

2. 有酸素性能力

表 2 には、低酸素トレーニングの前後に実施した有酸素性能力テストの各測定項目の数値およびトレーニング前後の変化率を示した。有酸素性能力の測定として実施した漸増負荷運動における運動持続時間は、Pre (5.2±1.2 min) よりも、Post (6.0±1.2 min) において有意に増加し、効果量中であった (p < 0.01, d = 0.67)。漸増負荷運動における運動持続時間の変化率は、16.4±8.7% であった。最大酸素摂取量は 7 名中 6 名において低酸素トレーニングによって向上を示したが、平均値では Pre (2.92±0.31 l/min) と Post (3.01±0.32 l/min) では有意な変化が認められなかった。また、体重当たりの最大酸素摂取量は、7 名中 6 名において低酸素トレーニングによって向上を示したが、平均値では Pre (51.4±5.3 ml/kg/min) と Post (53.1±5.0 ml/kg/min) では有意な変化が認められなかった。低酸素トレーニングによる最大酸素摂取量の変化率は、3.1±4.1% (体重当たりの最大酸素摂取量: 3.6±5.4%) であった。漸増負荷運動の運動持続時間の変化率は、体重当たりの最大酸素摂取量の変化率との間に有意な正の相関関係 (r = 0.804, p = 0.03) が認められた (図 3)。

3. 低酸素トレーニング時における各測定項目の

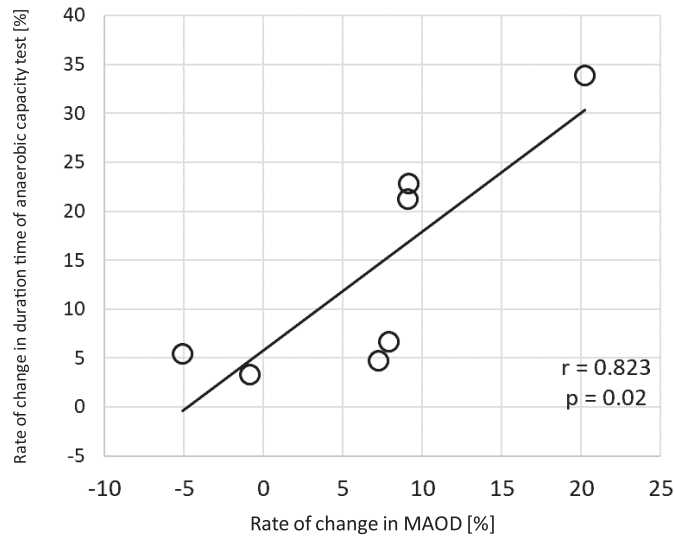


Figure 2. Relationship between the rate of change from the value at pre to post training in duration time during anaerobic capacity test and maximal accumulated oxygen deficit (MAOD).

Table 2. Values at pre and post tests and the rate of change by hypoxic training in aerobic capacity test.

Subjects	Duration time (incremental exercise)			Maximal oxygen uptake			Maximal oxygen uptake per body weight		
	pre [min]	post [min]	rate of change [%]	pre [l/min]	post [l/min]	rate of change [%]	pre [ml/kg/min]	post [ml/kg/min]	rate of change [%]
A	6.0	7.5	25.0	3.56	3.63	2.0	59.0	63.4	7.5
B	4.0	5.0	25.0	3.04	3.16	3.9	49.1	51.4	4.7
C	7.0	7.5	7.1	2.81	2.67	-5.0	55.7	52.3	-6.1
D	4.5	5.0	11.1	2.55	2.71	6.3	46.3	49.3	6.5
E	5.0	5.5	10.0	2.69	2.73	1.5	47.6	47.9	0.6
F	3.5	4.5	28.6	2.73	2.98	9.2	44.9	50.2	11.8
G	6.5	7.0	7.7	3.09	3.20	3.6	57.1	57.3	0.4
Average	5.2	6.0	16.4	2.92	3.01	3.1	51.4	53.1	3.6
Standard deviation	1.2	1.2	8.7	0.31	0.32	4.1	5.3	5.0	5.4
Coefficient of Variation	0.23	0.20	0.53	0.11	0.11	1.34	0.10	0.09	1.50
p values (pre vs. post)		< 0.01			n.s.			n.s.	
Cohen's effect size (d)		0.67			0.30			0.33	

値

図 4 には、自転車エルゴメータを用いた高強度インターバルトレーニングにおける各被験者の平均パワー、最高パワー、最高回転数及び血中乳酸濃度の値を示した。平均パワー及び最高パワーは、3 日間とも 1 セット目が一番高く、セット数の経過に伴い低下する傾向を示した。最高回転数は、セットの経過に伴う変化には被験者間で一貫性が認められなかったが、全体的に日数の経過とともに増加していく傾向を示した。Day 1 の 3 セット目において、被験者 A は途中でペダルから足が

外れてしまったため、その際の平均パワー、最高パワー及び最高回転数が低値を示した。血中乳酸濃度は、Day 1 と Day 2 では、1 名の被験者（被験者 A）を除いた 6 名の被験者において、1 セット目から 5 セット目まで 20 mmol/l 前後もしくはそれ以上の高い値で推移し、Day 3 では、全ての被験者において、1 セット目が一番低く、それ以降、セットの経過に伴い増加する傾向であった。

図 5 には、トレッドミルを用いた最大下強度での持続性トレーニングにおける各被験者の血中乳酸濃度および動脈血酸素飽和度の値を示した。被

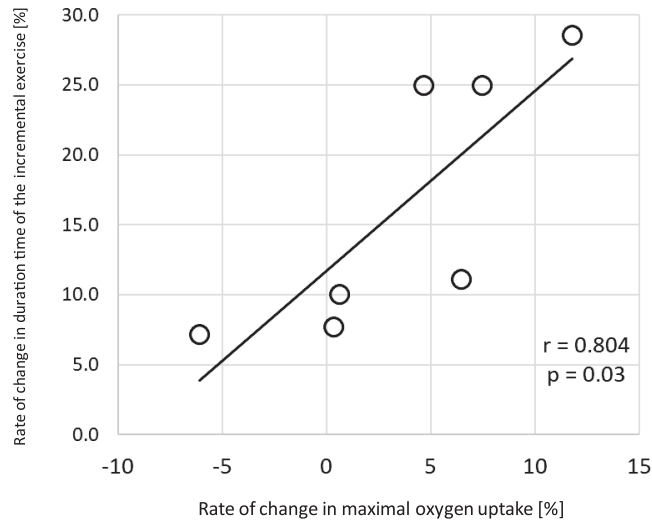


Figure 3. Relationship between the rate of change from the value at pre to post training in duration time during aerobic capacity test (incremental exercise) and maximal oxygen uptake.

験者 B の Day 2 における血中乳酸濃度は、被験者 B がトレーニング後に吐き気を催すといった体調不良になったため測定しなかった。被験者 A の Day 1 における動脈血酸素飽和度は、測定機器の不調により測定することが出来なかった。

図 6 には、自転車エルゴメータを用いた最大下強度での持久性トレーニングにおける各被験者の血中乳酸濃度及び動脈血酸素飽和度の値を示した。被験者 B は、Day 2 においてトレッドミルを用いたトレーニング後の体調不良によりエルゴメータを用いた持久性トレーニングを実施しなかった。

IV. 考察

本研究では、5 日間で 6 回の低酸素トレーニングによって、陸上競技日本代表候補女子 400 m 走者の無酸素性能力、有酸素性能力が向上するの否かを検討した。さらに、低酸素トレーニングによる個人の能力の変化率および各測定項目の変化率の関係についても検討した。その結果、400 m 走者の競技パフォーマンスに重要となる無酸素性能力および有酸素性能力を評価したテストの運動

持続時間が、低酸素トレーニングによってそれぞれ有意に延長し、その効果量がそれぞれ大および中であった。また、無酸素性能力テストでは、低酸素トレーニングによって、最高血中乳酸濃度の有意な向上と効果量中を示し、MAOD（体重当たりの相対値）が増加する傾向と効果量中を示した。被験者個々の低酸素トレーニングによる各測定項目の変化を検討した結果、無酸素性能力テストの運動持続時間の変化率は MAOD の変化率との間に有意な正の相関関係を示したが、MAOD の変化率と血中乳酸濃度の変化率との間には有意な相関関係が認められなかった。有酸素性能力テストでは、低酸素トレーニングによって、最大酸素摂取量は有意な変化が認められなかった。被験者個々の応答を検討した結果、低酸素トレーニングによる有酸素性テスト時の運動持続時間の変化率と最大酸素摂取量の変化率との間には有意な正の相関関係が認められた。

本研究で用いた 5 日間に 6 回という短期間の低酸素トレーニングによって、MAOD を測定した無酸素性能力テスト時の運動持続時間および最大酸素摂取量を測定した有酸素性能力テスト時の

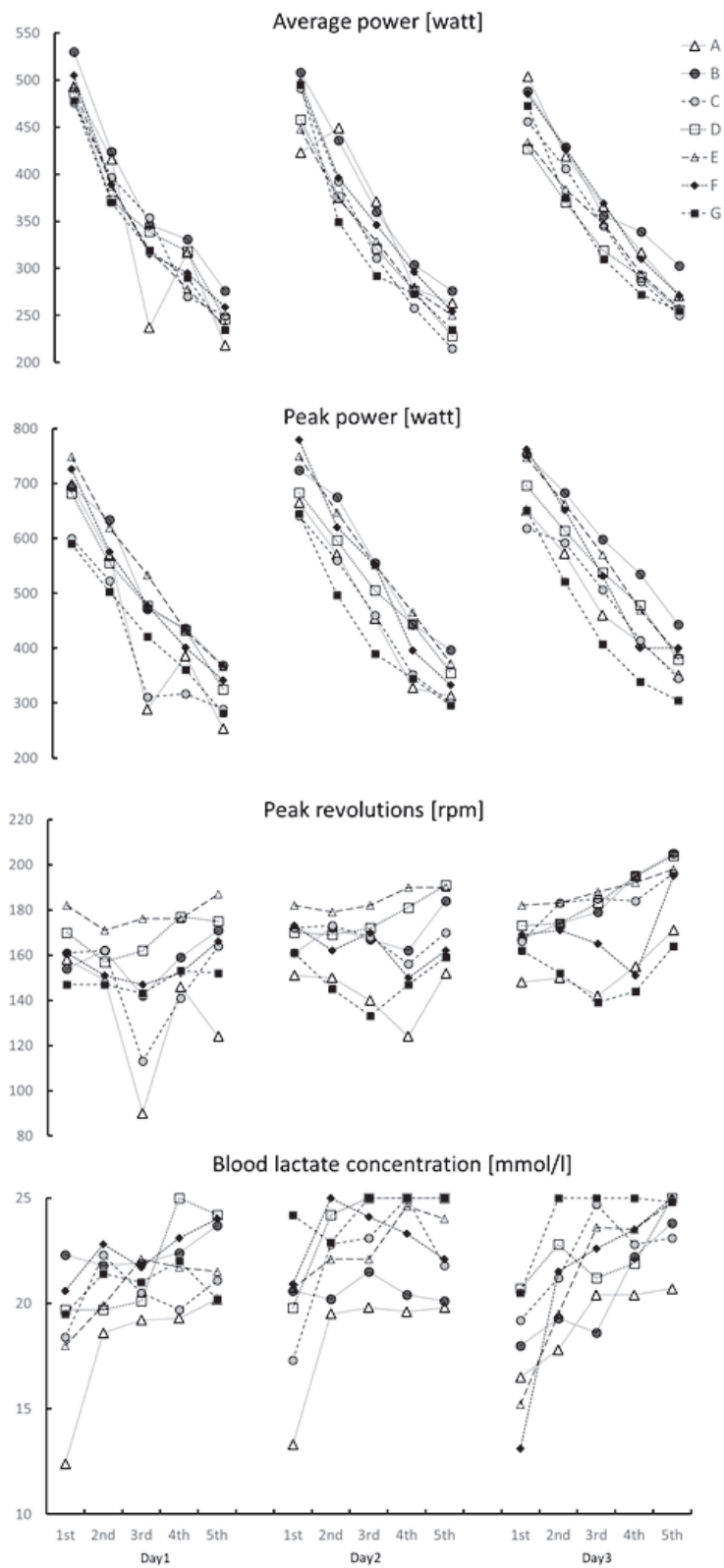


Figure 4. Changes in average power, peak power, peak revolutions and blood lactate concentration during hypoxic high-intensity training (five 30-s all-out pedaling) over three days.

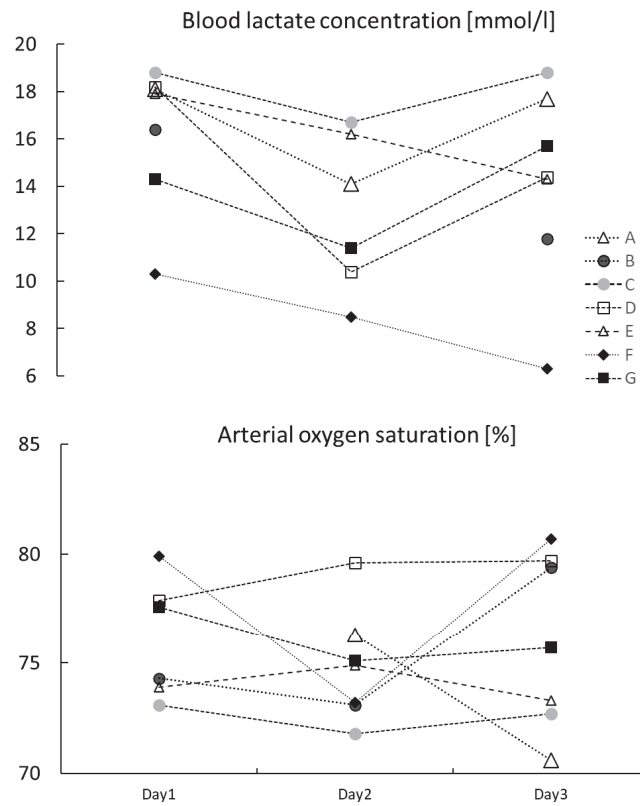


Figure 5. Changes in blood lactate concentration and arterial oxygen saturation during incremental running with hypoxia over three days.

運動持続時間が有意に延長した。無酸素性能力の指標として本研究で用いた MAOD の測定では約 2 分間という運動時間であることから、低酸素トレーニングによって MAOD 測定時の運動持続時間が延長した要因として、無酸素性能力と有酸素性能力の両方が総合的に向上したことが考えられる。従って、5 日間で 6 回という短期間の低酸素トレーニングは、無酸素性能力と有酸素性能力の両方が必要となる陸上競技 400 m 走の競技パフォーマンスを高めるために有用であり、7 日間で 9 回のセッションを用いた先行研究¹⁴⁾よりトレーニング期間およびセッションの回数を少なくした場合においても、その効果が認められたということが明らかとなった。さらに、日本代表候補選手のような、日頃から高負荷のトレーニングを

実施しているアスリートに対しても、この研究で用いた短期間の低酸素トレーニングは効果的であることが明らかとなった。以下に、本研究で測定した無酸素性能力および有酸素性能力に対する低酸素トレーニングの効果をそれぞれ述べていく。

1. 無酸素性能力

本研究では、低酸素トレーニングによって、運動に対する最高血中乳酸濃度が有意に増加した。運動に対する最高血中乳酸濃度は、400 m 走時の最高走速度と正の相関関係を示したことが報告されている¹⁰⁾。また、400 m レース時の最高走速度と 400 m 走のタイムが負の相関関係を示すことが報告されていることから²²⁾、本研究で得られた低酸素トレーニングによる運動に対する最高血中乳

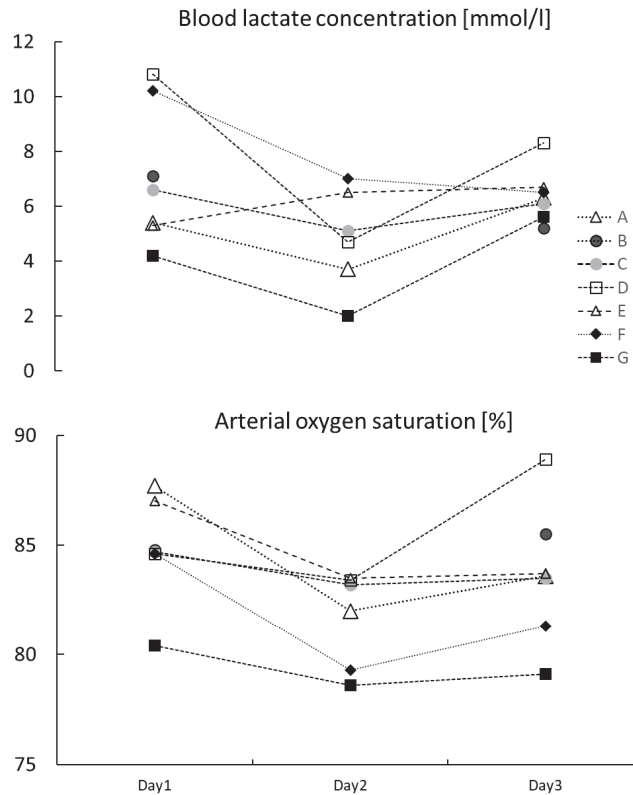


Figure 6. Changes in blood lactate concentration and arterial oxygen saturation during 30-min steady pedaling with hypoxia over three days.

酸濃度の増加は、400 m 走者の競技パフォーマンス向上に寄与することが示唆される。運動に対する血中乳酸濃度が増加した要因としては、低酸素環境下における筋内糖代謝の亢進がその一つとして考えられる。本研究では明らかにすることはできないが、高負荷運動での低酸素トレーニングにより、解糖系律速酵素活性が高まったことで、運動に対する血中乳酸濃度が低酸素トレーニングにより向上した可能性が考えられる。実際に、生体外で実験を実施した先行研究では、筋細胞を低酸素環境（酸素分圧：10-25 torr）下で 96 時間暴露した結果、常酸素（酸素分圧：100-120 torr）暴露と比較して、解糖系律速酵素であるヘキソキナーゼやフォスホフルクトキナーゼ等の活性が高まったことが報告されている¹⁷⁾。また、運動に

対する速筋線維の動員数の増加も一つの要因として考えられる。先行研究では、低酸素環境下で運動を実施した場合、常酸素環境下よりも、表面筋電図の周波数帯域が高まることが報告されている¹⁹⁾。運動に対する表面筋電図の周波数帯域が高まるとは、速筋線維の動員数が増加することを反映していると考えられている⁶⁾。本研究においても、低酸素トレーニング時には速筋線維の動員数が高まっていたと考えられるため、トレーニング期間後においては、無酸素性能力テストに対して速筋線維が動員されやすくなっていた可能性が考えられる。さらに、午前と午後に低酸素環境下における高強度間欠的トレーニングを 5 日間連続で実施した先行研究では、低酸素トレーニング後において、トレーニング前よりも筋グリコーゲンの

量が高まったことが報告されている⁸⁾。本研究においても、低酸素トレーニングによって筋内のグリコーゲン量が高まっていた可能性が考えられ、このことが運動に対する最高血中乳酸濃度を増加させた可能性も考えられる。以上のことから、本研究では、これらの機能が低酸素トレーニングによって向上したことにより、糖の利用が高まった結果、運動に対する最高血中乳酸濃度が向上したと推測される。

本研究で得られた MAOD は、Pre では 54.9 ± 6.3 ml/kg (3.12 ± 0.39 l)、Post では 58.4 ± 6.8 ml/kg (3.31 ± 0.39 l) であった。本研究の MAOD の値は、活動的な一般男性を対象とした走運動時の値 (51.5 ± 5.7 ml/kg)²⁰⁾ や非鍛錬者の女性を対象にした自転車運動時の値 (2.75 ± 0.17 l)²⁾ よりも高い値を示したが、大学レベルの男子水泳選手 (体重平均: 66.5 ± 4.1 kg) を対象にした水泳運動時の値 (3.93 ± 0.58 l)¹³⁾ や男子エリート 400 m 走者 (前年度の自己最高記録: 46.8 ± 0.5 秒) を対象にした走運動時の値 (64.9 ± 10.8 ml/kg)⁷⁾ よりも低い値となった。本研究では、MAOD は低酸素トレーニングによって 7 名中 5 名が増加を示し、統計的に増加傾向 ($p = 0.05$) と効果量中 ($d = 0.53$) を示した。先行研究では、1 日 2 回の低圧低酸素環境下でのトレーニングを週 5 日の頻度で 3 週間実施した結果、MAOD がトレーニング前よりも 29% 増加したことを報告している¹³⁾。計 30 回のトレーニングセッションを実施したこの先行研究¹³⁾ の変化率には劣るが、本研究では、計 6 回というトレーニングセッションでさえも、MAOD が約 7% 増加した。また、MAOD は、400 m 走の記録 (競技パフォーマンス) と相関関係を示すことが報告されており¹⁶⁾、本研究の結果においても低酸素トレーニングによって MAOD が増加傾向を示したことから、400 m 走者の競技パフォーマンスも向上していた可能性が考えられる。MAOD が増加傾向を示した要因の一つとして筋活動量の増加が考えられているため²¹⁾、運動に動員される筋線維数が増加した場合によっても、MAOD が増加する可能性が考えられる。さらに、筋の活動レ

ベルの向上に伴い MAOD が増加したことが報告されている²³⁾。これらのことから、本研究では、無酸素性能力テスト時の活動筋の量もしくは運動に動員される筋線維数、筋の活動レベルを測定していないため明らかにすることはできないが、無酸素性能力テスト時に動員された筋線維数、特に速筋線維数が、トレーニング後に増加したこと、そして、筋活動レベルが向上した結果、MAOD が増加した可能性が考えられる。また、酸素借は血中乳酸濃度と関係を示すことが報告されている⁴⁾。本研究では、低酸素トレーニングによって、MAOD 測定時の運動に対する最高血中乳酸濃度が有意に増加したことから、低酸素トレーニングによって MAOD が増加傾向を示した背景には、運動に対する最高血中乳酸濃度の増加が関係している可能性も考えられる。しかしながら、本研究では低酸素トレーニングによる MAOD の変化率と血中乳酸濃度の変化率の間には有意な相関関係が認められなかった。これは、低酸素環境下において、高強度インターバルトレーニングに加えて、有酸素性能力を刺激する持久性トレーニングを組み合わせ実施した結果、筋内における乳酸産生能力が向上していたが、乳酸除去能力も向上していたため、測定値という見た目では最高血中乳酸濃度にトレーニングの前後で有意な変化が認められなかったという可能性もある。さらに、両変量に有意な相関関係が認められなかった要因として、被験者数が少ないことが考えられるため、今後さらに検討する必要がある。本研究では、低酸素トレーニングによって MAOD が増加傾向を示した背景として以上のような要因が考えられるが、無酸素性能力テスト時の運動持続時間と MAOD との間に有意な正の相関関係が認められたことから、純粋に、運動持続時間の増加に伴い MAOD が増加した可能性も否めない。

本研究において、低酸素トレーニングによって MAOD が増加しなかった被験者が 2 名 (被験者 D、F) いた。この 2 人の被験者における高強度インターバルトレーニングと持久性トレーニングの内容は、他の被験者と比較しても大きな差異がみ

られなかった。トレーニングによって MAOD が増加しなかったこの 2 名の被験者の特徴として、有酸素性能力の指標である最大酸素摂取量が、低酸素トレーニング前において、他の被験者よりも低いこと、そして、低酸素トレーニングによる最大酸素摂取量の変化率が他の被験者よりも高い値を示したことがあげられる。一般的に、有酸素性能力が高いほど、その対となる無酸素性能力の指標である MAOD が低くなることが知られている。また、この 2 名の被験者は、無酸素性代謝能力の指標である高強度運動に対する血中乳酸濃度が低酸素トレーニング前において、他の被験者よりも高い傾向にあった。この 2 名のうちの 1 名の被験者は、低酸素トレーニングにより、無酸素性能力テストの最高血中乳酸濃度が増加したが MAOD は増加しなかった。MAOD が低酸素トレーニングによって増加しなかった要因の一つとして、酸素借と相関関係を示すと考えられている血中乳酸濃度⁴⁾が低酸素トレーニングによって増加したにもかかわらず、それ以上に有酸素性能力の向上が高かったことが考えられる。従って、この 2 名の被験者は、本研究で用いた短期間の低酸素トレーニングでは、無酸素性能力よりもむしろ最大酸素摂取量で評価されるような有酸素性能力が優先的に向上した結果、低酸素トレーニング後において MAOD が増加しなかった可能性が考えられる。

2. 有酸素性能力

本研究では、日本代表候補女子 400 m 走者を対象として低酸素トレーニングを実施した結果、有酸素性能力テストの運動持続時間はトレーニングによって有意に増加した。5 日間という本研究と同様の期間で低酸素トレーニングを実施した先行研究⁸⁾においても、自転車エルゴメータを用いた漸増負荷運動時の運動持続時間が向上したことを報告している。一方、本研究において、有酸素性能力の指標である最大酸素摂取量は、7 名中 6 名において増加を示したが、平均値では有意な変化が認められなかった。有酸素性能力テストの運動持続時間が向上した一方で最大酸素摂取量が

向上しなかったという結果は、短期間の低酸素トレーニングを実施した先行研究^{8),14),15)}と同様の結果となった。低酸素トレーニングによって最大酸素摂取量が増大することを報告している先行研究^{1),12),13)}では、本研究で用いたトレーニングセッション数よりも長いトレーニング期間及び多くのセッション数を用いている。従って、本研究で用いた 5 日間で 6 回のセッションという低酸素トレーニングでは、最大酸素摂取量を向上させるためのセッション数としては不十分であったと考えられる。一方、被験者個々の低酸素トレーニングによる変化を検討した結果、有酸素能力テスト時の運動持続時間の変化率と最大酸素摂取量の変化率との間には、有意な相関関係が認められた。従って、被験者個々において、最大酸素摂取量の向上の程度に伴い、有酸素性能力テストにおける運動持続時間が延長された可能性が考えられる。低酸素トレーニングによる有酸素性能力の効果には個人差があることが先行研究で報告されていることから³⁾、本研究で用いた短期間の低酸素トレーニングによっても、その効果に個人差が生じた可能性が考えられる。

3. 現場への応用と本研究の限界

本研究を実施した時期がオフシーズン期であったため、本実験の直後に競技会や記録会がなく、400 m 走の競技パフォーマンスを直接的に評価することはできなかった。一方、本実験後のトレーニング時において、「力を出し切ることができるようになった」と感想を述べた被験者が多くいた。実際に、低酸素トレーニング期間中の高強度インターバルトレーニング時においても、最高パワー、平均パワーおよび最高回転数がトレーニングの日数の経過とともに増加傾向を示していた。特に、被験者 A に関しては、トレーニングの日数の経過とともに、他の被験者と比較しても、各数値が増加していく傾向にあった。被験者 A は、数年前まで日本選手権競技大会を連覇し将来を期待されていたが、その後の 3 年間、競技成績および記録が低迷していた状況にあったが、本実験後

のシーズンにおいて、日本選手権競技大会で優勝するなどの復活を成し遂げた。この復活劇のきっかけとして、本実験で用いた低酸素トレーニングが一つの要因にあることを被験者 A 本人が述べていた。従って、低酸素環境下で高強度のトレーニングを実施するメリットの一つとして、トレーニングに対して力を出し切ることができるようになり、そのトレーニングによる効果が増大することが考えられる。また、本研究のような低酸素トレーニングをオフシーズン期に実施することによって、オフシーズン期で一般的に用いられる低強度のトレーニングでは刺激することができない無酸素性能力を高めることができるとともに、有酸素性能力が高められる可能性が考えられる。前者の無酸素性能力に関して、日本トップレベルの選手が通常行っているトレーニングでは得られない刺激が、本実験で用いたような低酸素トレーニングにはあると考えられる。実際に、普段から高強度のトレーニングを実施しているトップアスリートでさえも、本研究で用いた5日間の低酸素トレーニングによってその効果が認められた。後者に関して、有酸素性能力が高まったことによって、普段のトレーニングからの回復が早まり、次のトレーニングをより効果的に実施できると考えられる。実際に、普段のトレーニングによって生じる疲労に関して、本実験前と比較して、強く感じなくなったといった被験者も多くいた。最後に、5日間という短期間のトレーニングでこのような能力の向上が見られることは、エネルギー代謝的な要素だけではなく技術トレーニングやその他のトレーニングにも時間をかける必要がある現場の観点からも、有益な方法の一つであると考えられる。

本研究では、日本代表候補女子 400 m 走者を実験の対象としたため、コントロール(常酸素トレーニング)条件を実施できなかったことが限界としてある。また、本研究では、低酸素トレーニング前後における最高血中乳酸濃度の変化率と運動持続時間の変化率との間には有意な相関関係は認められなかったが、低酸素トレーニングによって最

高血中乳酸濃度が向上したとともに無酸素性テストの運動持続時間が延長されたため、運動持続間の延長に伴い解糖系の利用が高まった結果、最高血中乳酸濃度が増加した可能性も、コントロール条件を実施していないため、否定することができない。

V. まとめ

本研究では、陸上競技日本代表候補女子 400 m 走者を対象に、5日間で6回のセッションという短期間の低酸素トレーニングを実施した結果、無酸素性能力テスト及び有酸素性能力テスト時の運動持続時間が有意に延長した。さらに、無酸素性能力の指標である最高血中乳酸濃度が有意に増加し、MAODが増加傾向を示したことから、わずか5日間という短期間の低酸素トレーニングでも最大無酸素性能力が向上する可能性が示唆された。一方、有酸素性能力の指標である最大酸素摂取量は有意に増加しなかったため、わずか5日間という短期間の低酸素トレーニングでは最大有酸素性能力の向上は難しいが、有酸素性能力テストの運動持続時間の変化率と最大酸素摂取量の変化率との間に有意な相関関係が認められたことから、有酸素性能力に対する低酸素トレーニングの効果には個人差があることが示唆された。

文献

- 1) Aleksandra Z, Dariusz J, Ewa SK, Marcin S, Camillo G. Comparison of the effectiveness of high-intensity interval training in hypoxia and normoxia in healthy male volunteers: A pilot study. *BioMed Research Int*, Article ID 7315714, 2019.
- 2) Brisola GM, Muyagi WE, da Silva HS, Zagatto AM. Sodium bicarbonate supplementation improved MAOD but is not correlated with 200- and 400-m running performances: a double-blind, crossover, and placebo-controlled study. *Appl Physiol Nutr Metab*, 40: 931-937, 2015.
- 3) Chapman RF, Stray-Gundersen J, Levine BD.

- Individual variation in response to altitude training. *J Appl Physiol*, 85: 1448–1456, 1998.
- 4) di Prampero PE, Ferretti G. The energetics of anaerobic muscle metabolism: a reappraisal of older and recent concepts. *Respir Physiol*, 118: 103–115, 1999.
 - 5) Duffield R, Dawson B. Energy system contribution in track running. *New Studies in Athletics*, 18: 47–56, 2003.
 - 6) Gardle B, Henriksson-LK, Lorentzon R, Wretling ML. Dependence of the mean power frequency of the electromyogram on muscle force and fibre type. *Acta Physiol Scand*, 142: 457–465, 1991.
 - 7) Heugas AM, Brisswalter J, Vallier JM. Effect of a three month training period on the maximal oxygen deficiency in high level performance sprinters. *Can J Appl Physiol*, 22: 171–181, 1997.
 - 8) Kasai N, Kojima C, Sumi D, Takahashi H, Goto K, Suzuki Y. Impact of 5 days of sprint training in hypoxia on performance and muscle energy substances. *Int J Sports Med*, 38: 983–991, 2017.
 - 9) Kasai N, Mizuno S, Ishimoto S, Sakamoto E, Maruta M, Kurihara T, Kurosawa Y, Goto K. Impact of six consecutive days of sprint training in hypoxia on performance in competitive sprint runners. *J Strength Cond Res*, 33: 36–43, 2019.
 - 10) Lacour JR, Bouvat E, Barthelemy JC. Post-competition blood lactate concentration as indicators of anaerobic energy expenditure during 400-m and 800-m races. *Eur J Appl Physiol*, 61: 172–176, 1990.
 - 11) Mizuno M, Juel C, Bro-Rasmussen T, Mygind Erik, Schibye Bente, Rasmussen B, Saltin B. Limb skeletal muscle adaptation in athletes after training at altitude. *J Appl Physiol*, 68: 496–502, 1990.
 - 12) Morton JP, Cable NT. Effects of intermittent hypoxic training on aerobic and anaerobic performance. *Ergonomics*, 48: 1535–46, 2005.
 - 13) 荻田太, 小夫直孝, 田中孝夫. 間欠の低圧低酸素トレーニングの効果とその持続期間 – 最大酸素摂取量、最大酸素借、泳記録、血液性状の変化より –. *Japan J Sci Swimming Water Exerc*, 4: 30–36, 2001.
 - 14) Oriishi M, Hagiwara M, Yamanaka R, Ohya T, Ohnuma H, Kawahara T, Suzuki Y. Short-term hypoxic training improves maximal anaerobic power after a week of recovery. *Gazzeta Med Italiana*, in press.
 - 15) Oriishi M, Matsubayashi T, Kawahara T, Suzuki Y. Short-term hypoxic exposure and training improve maximal anaerobic running test performance. *J Strength Cond Res*, 32: 181–188, 2018.
 - 16) Ramsbottom R, Nevill ME, Nevil AM, Newport S, Williams C. Accumulated oxygen deficit and short-distance running performance. *J Sports Sci*, 12: 447–453, 1994.
 - 17) Robin ED, Murphy BJ, Theodore J. Coordinate regulation of glycolysis by hypoxia in mammalian cells. *J Cell Physiol*, 118: 287–290, 1984.
 - 18) Rusell AP, Le Rossignol PF, Lo SK. The precision of estimating the total energy demand: Implications for the determination of the accumulated oxygen deficit. *J Exer Physiol online*, 3: 55–63, 2000.
 - 19) Torres-Peralta R, Lose-Reyna J, Gonzalez-Izal M, Perez-Suarez I, Calle-Herrero J, Izquierdo M, Calbet JA. Muscle activation during exercise in severe acute hypoxia: role of absolute and relative intensity. *High Alt Med Biol*, 15: 472–482, 2014.
 - 20) Weber CL, Schneider DA. Increase in maximal accumulated oxygen deficit after high-intensity interval training are not gender dependent. *J Appl Physiol*, 92: 1795–1801, 2002.
 - 21) Weyand PG, Cureton KJ, Conley DS, Higbie EJ. Peak oxygen deficit during one- and two-legged cycling in men and women. *Med Sci Sports Exerc*, 25: 584–591, 1993.
 - 22) 山中亮, 高橋恭平, 小林海, 渡辺圭佑, 広川龍

- 太郎, 松林武生, 松尾彰文. 2018 年度競技会における男女 400 m のレース分析. *Bulletin of Studies in Athletics of JAAF*, 14: 110-122, 2018.
- 23) 吉岡利貢, 中垣浩平, 鍋倉賢治. 異なる運動様式における筋活動レベルの違いが最大酸素借に及ぼす影響. *Bull Inst Health Sport Sci, Univ of Tsukuba*, 33: 211-214, 2010.