

低酸素環境における呼吸筋トレーニングによる 持久的パフォーマンスへの影響

名古屋大学 片山 敬章
(共同研究者) 同 石田 浩司
立命館大学 後藤 一成

Influence of Respiratory Muscle Training under Hypoxic Conditions on Endurance Performance

by

Keisho Katayama, Koji Ishida
Nagoya University
Kazushige Goto
Ritsumeikan University

ABSTRACT

The purpose of the present study was to clarify the effect of respiratory muscle training in hypoxia on whole-body endurance exercise performance. Eighteen collegiate endurance runners were assigned to control (n=6), normoxic (n=6), and hypoxic (n=6) groups. Before and after 6 weeks of respiratory muscle endurance training (RMET), incremental respiratory endurance test at rest and constant exercise test were performed. The constant exercise test carried out on a treadmill at 95% of the individual's peak oxygen uptake ($\dot{V}O_{2peak}$). The RMET was voluntary isocapnic hyperpnea under normoxic and hypoxic conditions (30 min/day, 4 or 5 days/week: 28 days total). During RMET, the initial target of minute ventilation was set to 50% of the individual maximal voluntary ventilation, and the target increased progressively during 6 weeks. Target arterial oxygen saturation (SpO_2) in the hypoxic group was set to 90%

in the first 2 weeks, and thereafter the target Spo_2 was set to 80%. Respiratory muscle endurance was increased following RMET in the normoxic and hypoxic groups, but not in the control group. The time to exhaustion during the constant exercise test also increased after RMET in the normoxic and hypoxic groups, while it was unchanged in the control group. The extent of these increases did not differ between the normoxic and hypoxic groups. These results suggest that the improvement of respiratory muscle endurance after RMET could contribute to improved whole-body endurance exercise performance in endurance-trained runners, and however there are no additional effects when the RMET is performed under hypoxic conditions.

要 旨

本研究では、低酸素環境における呼吸筋トレーニングによる持続的パフォーマンスに及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。大学生長距離ランナーを、コントロール群、常酸素群、低酸素群に振り分けた。6週間の呼吸筋の持久力トレーニング前後に、呼吸筋持久力テスト（安静時）および運動テストを実施した。運動テストにはトレッドミルによる高強度運動（95%最高酸素摂取量）を用いた。トレーニングには随意過換気法を用いた（30分/日、4～5日/週）：最大随意換気量の50%を初期値に設定し、その後は徐々に増加させた。低酸素群では、1～2週目はトレーニング時の動脈血酸素飽和度を90%に、3週目以降は80%に設定した。呼吸筋持久力および運動テストによる疲労困憊にいたるまでの時間は、いずれの群もトレーニング後に有意な増加が見られたが、それらの増加の程度には両群間で差は認められなかった。これらの結果から、呼吸筋の持続的トレーニングにより全身持続的パフォーマンスの向上が認められ、この向上には呼吸筋持久力の改善が貢献していることが示唆される。しかしながら、低酸素環境において呼吸筋トレーニングを実施しても、全身持続的運動パフォーマンスへのさらなる効果はないことが示された。

緒 言

呼吸の働きは、酸素の供給と二酸化炭素の排出（ガス交換）である。肺はそれ自体に収縮・弛緩する機能はなく、横隔膜や肋間筋といった呼吸筋の収縮・弛緩によって胸郭を拡大・縮小することによりガス交換が行われる。一般健常者の場合には、呼吸系は最大運動時においても十分余力を持っており、全身持続的パフォーマンスの制限要因とはならない。しかしながら、非常にトレーニングされた持久系アスリートでは、代謝要求が大きいため換気量が多く必要であり、そのため呼吸筋の活動が増大する。この呼吸筋活動の増加は、呼吸困難感の増加や呼吸筋疲労に由来する循環調節（血流再配分）に影響を及ぼす¹⁻³⁾。すなわち、持久系アスリートでは呼吸系が全身持続的運動パフォーマンスの制限要因となっている。運動時の呼吸困難感や呼吸筋の疲労を軽減する方法として、運動トレーニングとは別に安静状態で行う呼吸筋トレーニングが行われている^{4,5)}。この呼吸筋トレーニング法の1つに、運動時の呼吸動態を模擬した過換気（呼吸筋の持続的トレーニング）を行う方法がある。先行研究ではこの呼吸筋の持続的トレーニングにより、呼吸筋持久力の向上や運動時の呼吸筋疲労の軽減が報告されている⁶⁻⁸⁾。

低酸素環境における運動トレーニング（低酸素

トレーニング)は、赤血球数の増加や骨格筋の緩衝能向上などをねらいとして、多くのアスリートにより行われている。低酸素環境での運動では呼吸筋の疲労が大きくなること⁹⁻¹¹⁾、この低酸素環境における呼吸筋疲労の増大は、安静状態で呼吸筋のみの活動を増加させた場合にも発現することが報告されている¹²⁾。また、低酸素環境における随意過換気中の呼吸補助筋の脱酸素化が通常酸素環境と比較して大きいことや¹³⁾、乳酸産生も高いことも明らかにされている¹²⁾。さらに、動物実験では低酸素環境での運動トレーニングにより、横隔膜の酸化酵素活性の増加が確認されている¹⁴⁾。これらのことから、低酸素環境における呼吸筋の持久的トレーニングは、通常酸素環境におけるトレーニングと比較して、呼吸筋持久力および全身持久的運動パフォーマンスを向上させるかもしれない。

そこで本研究では、低酸素環境における呼吸筋の持久的トレーニングが呼吸筋持久力および全身持久的運動パフォーマンスに及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

1. 方法

本研究は名古屋大学総合保健体育科学センター・ヒトを対象とする研究審査委員会および立命館大学・人を対象とする研究倫理審査委員会にて承認され実施した。すべての対象者には本研究の目的、方法などを十分に説明し、研究参加の同意を得て実施した。

1.1 対象者

大学陸上部に所属する18名の長距離ランナー(男性)が本研究に参加した。18名の対象者を3群に振り分けた：コントロール群 [6名, 年齢 20.0 ± 0.3 歳, 身長 170.2 ± 2.1 cm, 体重 57.4 ± 1.8 kg, 最高酸素摂取量 ($\dot{V}O_{2peak}$) 68.0 ± 0.7 ml/kg/分], 常酸素群 [6名, 年齢 20.0 ± 0.3 歳, 身長 171.2 ± 2.2 cm,

体重 58.6 ± 2.7 kg, $\dot{V}O_{2peak}$ 68.6 ± 1.2 ml/kg/分], 低酸素群 [6名, 年齢 20.0 ± 0.3 歳, 身長 167.7 ± 3.1 cm, 体重 55.7 ± 2.5 kg, $\dot{V}O_{2peak}$ 69.2 ± 0.9 ml/kg/分]。

1.2 研究進行

すべての対象者にはまず測定装置に慣れさせ、3日間の測定を実施した(前・トレ前)：1日目・肺機能検査, 2日目・呼吸筋持久力テスト, 3日目・運動テスト。その後、常酸素群および低酸素群はトレーニングを30分/日, 4~5日/週, 6週間行った(トレーニング回数は合計で28回)。対象者には、常酸素および低酸素環境をブラインドとした。トレーニング後に3日間の測定を再度実施した(後・トレ後)。実験期間中はすべての対象者が通常の運動トレーニングを実施したが、すべての群においてトレーニング強度および量に差はなかった。

1.3 呼吸筋の持久的トレーニング

呼吸筋の持久的トレーニングには、isocapnic(等炭酸ガス) hyperpnea(過換気)が可能であるオープン・サーキット(開回路)設計の装置を用いた(図1)。トレーニングは座位にて行った。対象者はノーズクリップを装着し、流量計に接続されたマウスピースを通して呼吸を行った。流量計は2方向チューブにつながれ、一方は手動弁を介して再呼吸バック(約10ℓ)へ、他方は末端が開放されたチューブに接続した。低酸素群のトレーニングのため、二酸化炭素吸収剤入りのチューブおよび伸縮可能なチューブを接続した。流量計にはサンプリングチューブを挿入しガス分析機器(アルコシステム, GA-2CT)にて二酸化炭素濃度をモニターした。動脈血酸素飽和度(SpO_2)はパルスオキシメータ(Masimo, Radical-7)のプロブを左手指先に装着してモニターした。流量計、ガス分析機器およびパルスオキシメータからの信号はA/D変換器(Canopus, CSI-320416)を介して200Hzでサンプリングを行い、コンピュータ

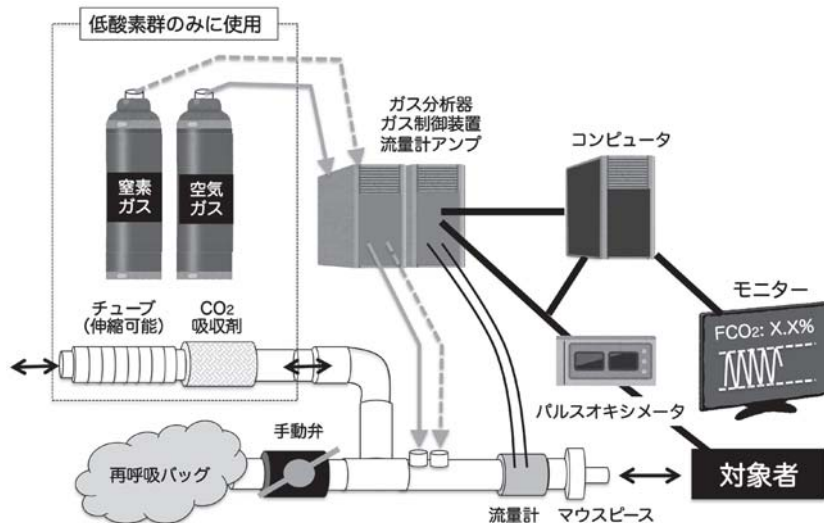


図1 呼吸筋の持久的トレーニング装置

(Hewlett Packard, HSTNN-105C)にて連続的に記録した。モニターには設定された1回換気量(肺活量の60%に固定)が水平線で表示され、対象者は呼吸流量カーブを水平線に合わせることで呼吸の深さを調節した。吸気・呼気のリズムは1:1とし、メトロノームにて呼吸の速さ(呼吸数:f)を調整した。低酸素群における過換気中の SpO_2 の調節には独自のコンピュータソフトウェアによるフィードバック制御を用いた。設定した SpO_2 値より高くなった場合には窒素ガス(100% N_2)が、低くなった場合には空気ガス(20.9% O_2 , 0.03% CO_2 , 79.1% N_2)がそれぞれ回路内に添加された。呼気終末二酸化炭素濃度は、検者による回路内のバルブ調節により5.5~6.0%に維持した。

呼吸筋の持久的トレーニングのプロトコルは、先行研究で用いられているものを参考にした^{15,16)}。6週間のトレーニング期間中、1回換気量は肺活量の60%に固定(常酸素群: 2.7 ± 0.3 l, 低酸素群: 2.6 ± 0.2 l)し、呼吸数にて毎分換気量を調整した。トレーニング1週目は毎分換気量を最大随意換気量の50%に、2週目は60%に設定した。3週目以降はトレーニング中の呼吸困難感の変化に応じて徐々に増加させた。低酸素群にお

ける SpO_2 の目標値は1~2週目を90%に、それ以降は80%に設定した。

1. 4 肺機能検査

肺活量、努力性肺活量、1秒量、1秒率、最大随意換気量の測定にはオートスパイロメータ(ミナト医科学, AS-507)を使用した。

1. 5 呼吸筋持久力テスト

呼吸筋持久力測定には、呼吸筋の持久力トレーニング装置を用い、プロトコルはATS/ERS推奨¹⁷⁾によるisocapnic(等炭酸ガス)hyperpnea(過換気)を用いた^{18,19)}。テスト開始時の毎分換気量は最大随意換気量の30%に設定し、3分ごとに10%ずつ増加させた。1回換気量は肺活量の60%に固定し、呼吸数にて毎分換気量を調整した。呼気終末二酸化炭素分圧が安静時の ± 5 mmHgになるように回路内のバルブにて調整した。双極誘導法により心電図を測定し、心拍数を算出した。対象者には1分ごとに呼吸困難感(0-10スケール)をたずね記録した。設定された1回換気量および呼吸数が維持できなくなった時点でテスト終了とした。流量計、ガス分析機器、心電図からの

信号はA/D変換器(Canopus, CSI-320416)を介して200Hzでサンプリングを行い、コンピュータ(Panasonic, CF-F8)に記録した。

1. 6 運動テスト

運動テストにはトレッドミルを用いた。対象者は、まず事前に測定した $\dot{V}O_{2peak}$ の65%の速度で5分間ウォーミングアップを行った。その後95% $\dot{V}O_{2peak}$ 強度で疲労困憊に至るまで運動を行った。疲労困憊に至るまでの走時間を全身持久的運動パフォーマンスの指標とした。運動中の酸素摂取量、毎分換気量(ミナト医科学, AE-300S)および心拍数を連続的に測定した。テスト開始から5分後およびテスト終了直後の呼吸困難感(0-10スケール)と主観的運動強度(RPE, 0-10スケール)を対象者にたずね記録した。

1. 7 統計処理

各変数の測定結果を平均値±標準誤差で示した。実験期間中(トレーニング期間 x 群)の群間の比較には二元配置分散分析-反復測定を用いた。トレーニングによる変化の低下の群間比較には一元配置分散分析を、多重比較にはBonferroni法を用いた。危険率5%未満を有意水準とした。

2. 結果

2. 1 呼吸筋の持久的トレーニング

1~2週はトレーニング中の換気量は設定どおり一定であり、3週目以降は常酸素群および低酸素群それぞれ徐々に増加した(図2A)。換気量の

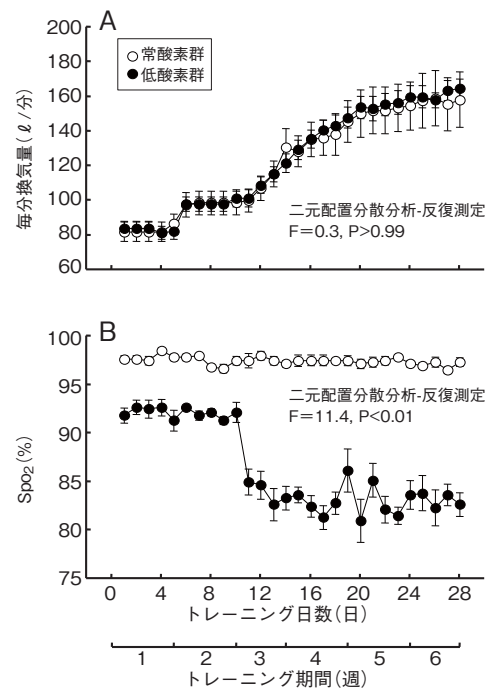


図2 呼吸筋の持久的トレーニング時の毎分換気量(A)および動脈血酸素飽和度(B)の変化

変化に両群間で差は見られなかった。トレーニング中のSpO₂は常酸素群では変化がなかったが、低酸素群では設定どおり有意な低下が認められた(図2B)。

2. 2 肺機能検査

表1にトレーニング前後における肺機能検査の結果を示した。肺活量、努力性肺活量、1秒量、1秒率はすべての群で変化が認められなかった。最大随意換気量は常酸素群および低酸素群で有意な増加が見られたが、その増加の程度に両群間で差は認められなかった。

表1 肺機能の変化

	コントロール群			トレ前	常酸素群			低酸素群		
	前	後	Δ		トレ前	トレ後	Δ	トレ前	トレ後	Δ
VC(ℓ)	4.4±0.2	4.5±0.2	+0.1±0.2	4.5±0.3	4.6±0.3	+0.1±0.1	4.3±0.2	4.3±0.1	-0.1±0.1	
FVC(ℓ)	4.2±0.1	4.3±0.2	+0.1±0.1	4.2±0.3	4.4±0.3	+0.1±0.1	4.2±0.1	4.1±0.1	-0.1±0.1	
FEV1.0(ℓ)	3.8±0.2	3.9±0.1	+0.1±0.1	4.0±0.3	4.1±0.3	+0.1±0.2	3.9±0.1	3.9±0.1	+0.0±0.0	
FEV1.0(%)	91.8±1.5	92.2±1.8	+0.4±1.9	93.8±1.9	93.1±1.4	-0.8±1.7	93.2±1.7	93.1±1.3	-0.7±1.0	
MVV12(ℓ/分)	165.3±13.9	167.7±11.2	+2.3±6.6	166.5±11.6	175.2±8.0	+8.7±3.7*	171.4±10.7	179.4±8.9	+9.7±3.7*	

平均値±標準誤差。トレ前:トレーニング前,トレ後:トレーニング後,VC:肺活量,FVC:努力性肺活量,FEV:1秒量,1秒率,MVV12:最大随意換気量.*P<0.05 vs. コントロール群。

表2 呼吸筋持久力テスト時の、毎分換気量、心拍数、呼吸困難感の変化

測定項目	群	測定時期	3分	6分	9分	Δ9分	二元配置分散分析-反復測定交互作用
			前	後	トレ前		
V _E (ℓ/分)	コントロール	前	50.1±4.9	69.2±6.5	87.6±8.2	0.8±1.5	P=0.36
		後	49.2±3.3	69.4±6.1	87.8±6.2		
	常酸素群	トレ前	48.0±4.3	68.7±7.2	86.1±7.9	-0.1±0.7	P=0.35
		トレ後	49.7±4.3	67.2±5.6	86.0±7.6		
	低酸素群	トレ前	50.1±3.4	68.4±5.9	90.1±4.0	0.2±0.9	P=0.57
		トレ後	50.8±2.4	69.5±3.0	90.2±5.1		
HR (拍/分)	コントロール	前	77.5±2.6	88.9±2.4	93.7±2.7	1.1±2.4	P=0.58
		後	76.7±0.9	89.9±1.9	94.8±2.6		
	常酸素群	トレ前	78.4±3.9	86.4±4.6	95.4±5.5	-5.4±2.9*	P=0.18
		トレ後	77.5±3.9	82.8±3.2	90.0±4.1		
	低酸素群	トレ前	74.6±2.4	88.1±3.1	93.0±2.4	-6.1±2.4*	P=0.13
		トレ後	73.3±2.8	83.1±2.5	87.0±2.4		
呼吸困難感	コントロール	前	2.2±0.3	3.3±0.4	5.2±0.6	0.2±0.4	P=0.60
		後	2.2±0.4	3.8±0.5	5.3±0.3		
	常酸素群	トレ前	2.2±0.2	3.5±0.2	5.0±0.4	-1.0±0.4*	P<0.05
		トレ後	1.7±0.2	2.9±0.4	4.0±0.4		
	低酸素群	トレ前	2.2±0.2	3.8±0.3	5.5±0.3	-1.5±0.2*	P<0.05
		トレ後	1.5±0.3	2.8±0.4	4.0±0.4		

平均値±標準誤差。トレ前:トレーニング前,トレ後:トレーニング後,V_E:毎分換気量,HR:心拍数.*P<0.05 vs. コントロール群

2.3 呼吸筋持久力テスト

安静状態で測定した呼吸筋持久力テスト中の呼吸心拍応答を表2に示した。テスト時間が最も短い対象者が9分であったため、統計処理は9分までとした。呼吸筋持久力テストの時間は、コントロール群では変化が見られなかった(前:15.4±1.4分,後:14.7±1.3分,Δ-0.7±0.8分)。常酸素群(トレ前:15.2±1.4分,トレ後:19.1±0.9分,Δ+5.1±1.4分)および低酸素群(トレ前:14.2±1.4分,トレ後:19.2±1.4分,Δ+5.3±1.3分)で有意な向上が認められたが、増加の程度(Δ)に両群間で差は見られなかった。過換気中の呼吸困難感には常酸素群および低酸素群で有意な低下が認

められ、トレーニングによる9分目の呼吸困難感の変化は常酸素群および低酸素群でコントロール群より有意に低い値を示した。コントロール群はすべての項目において変化は見られなかった。

2.4 運動テスト

運動テストに使用したトレッドミルスピードは、コントロール群が19.0±0.4km/h,常酸素群が18.9±0.3km/h,低酸素群が19.4±0.2km/hであった。運動テスト時の呼吸心拍応答、呼吸困難感、主観的運動強度を表3に示した。常酸素群および低酸素群では、トレーニング後の5分時の呼吸困難感に有意な低下が見られた。しかしながら、低

表3 運動テスト中の呼吸心拍応答、呼吸困難感、RPEの変化

測定項目	コントロール群			常酸素群			低酸素群		
	前	後	Δ	トレ前	トレ後	Δ	トレ前	トレ後	Δ
5分時									
V _E (ℓ/分)	138.2±6.9	140.2±7.2	+2.1±3.1	130.4±3.6	133.8±5.4	+3.4±2.4	140.2±5.9	139.8±4.7	-0.4±1.6
V _{O₂} (ℓ/分)	3.9±0.2	3.9±0.2	+0.0±0.1	3.7±0.1	3.7±0.1	+0.0±0.1	3.6±0.2	3.7±0.2	-0.0±0.1
HR (拍/分)	180.5±3.0	178.3±4.6	-2.2±2.8	177.8±2.1	180.0±0.7	+2.2±2.0	179.3±2.8	181.5±3.2	+2.2±1.2
呼吸困難感	5.2±0.7	5.3±0.4	+0.2±0.5	5.0±0.6	4.5±0.5	-0.5±0.2*	5.2±0.6	4.5±0.3	-0.7±0.3*
RPE (脚)	8.0±0.3	8.2±0.4	+0.2±0.5	8.0±0.4	7.2±0.4	-0.8±0.2	7.5±0.4	6.8±0.3	-0.7±0.2*
運動終了時									
V _E (ℓ/分)	143.1±8.1	146.5±9.8	+3.3±6.6	143.6±5.2	142.4±3.2	-1.2±4.5	147.9±5.7	153.2±8.9	+5.3±4.5
V _{O₂} (ℓ/分)	4.0±0.2	4.0±2.0	+0.1±0.1	4.0±0.2	4.0±0.2	+0.1±0.1	3.9±0.2	3.9±0.2	+0.0±0.1
HR (拍/分)	196.3±2.7	198.0±2.5	+1.6±1.1	194.3±2.8	195.0±2.3	+0.7±4.2	193.3±3.5	196.5±1.9	+3.2±4.7

平均値±標準誤差。トレ前:トレーニング前,トレ後:トレーニング後,V_E:毎分換気量,V_{O₂}:酸素摂取量,HR:心拍数,RPE:主観的運動強度。

*P<0.05 vs. コントロール群

下の程度に両群間に差はなかった。疲労困憊に至るまでの走時間は、常酸素群および低酸素群においてトレーニング後に有意に増加し、コントロール群では変化は見られなかった(図3)。しかしながら、増加の程度は常酸素群($\Delta+0.9\pm 0.3$ 分)と低酸素群($\Delta+0.9\pm 0.3$ 分)で差はなかった。

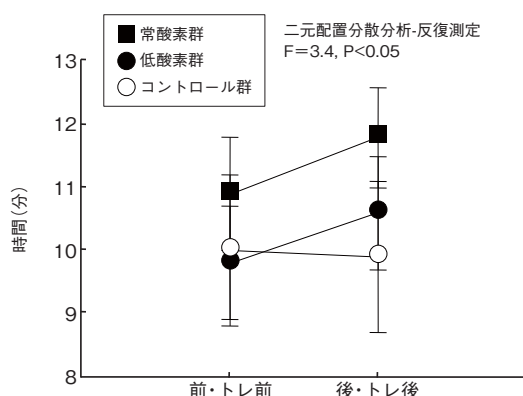


図3 呼吸筋の持久的トレーニング前後における走時間(運動テスト)の変化

3. 考察

本研究で明らかになったことは、1) 6週間の常酸素および低酸素環境における呼吸筋の持久的トレーニングにより呼吸筋持久力が有意に増加した、2) 95% $\dot{V}O_{2peak}$ 運動強度での疲労困憊に至るまでの走時間は、呼吸筋の持久的トレーニングによって有意に増加した、3) 呼吸筋トレーニングによるそれらの増加の程度は、常酸素群と低酸素群で差が認められなかった、であった。これらの結果から、呼吸筋の持久的トレーニングは、全身持久性運動パフォーマンスを向上させることが明らかになった。また、このパフォーマンスの向上には呼吸筋の持久力向上が関係していることが示唆される。しかしながら、呼吸筋の持久力トレーニングを低酸素環境で実施しても、パフォーマンス向上にさらなる効果は得られないことが示された。

3. 1 呼吸筋の持久力トレーニングによる呼吸筋持久力への影響

6週間の常酸素環境での呼吸筋の持久的トレーニングによって、安静状態で測定する呼吸筋持久力の有意な向上が認められた。さらに、呼吸筋持久力テスト中の呼吸困難感がトレーニング後に有意に低下した(表2)。我々の先行研究において、日常的にトレーニングを行っている長距離ランナーは、一般健常者と比較して呼吸筋持久力が高いことや呼吸困難感が低いことをすでに報告している¹⁸⁾。本研究の結果から、長距離ランナーにおいても呼吸筋の持久的トレーニングにより呼吸筋持久力および過換気中の呼吸困難感がさらに改善することが明らかとなった。

先行研究では、低酸素環境では呼吸筋の疲労が増大すること、過換気中の乳酸産生が常酸素環境と比較して大きい傾向にあることが報告されている¹²⁾。さらに、低酸素環境は呼吸補助筋の活動増加や脱酸素化に影響を及ぼすことを我々の先行研究において明らかにしている¹³⁾。脱酸素化と代謝産物の増大は、呼吸筋での緩衝能力をより向上させるかもしれない。したがって、我々は低酸素環境での呼吸筋の持久的トレーニングが常酸素環境でのそれより呼吸筋持久力をより改善すると推測した。しかしながら、呼吸筋持久力の増加の程度は常酸素環境での呼吸筋トレーニングと同程度であった。この結果から、本研究で用いた低酸素レベル(1週目: 目標 $SpO_2=90\%$, 2週目以降: 目標 $SpO_2=80\%$)では呼吸筋の持久力向上に対して付加的な効果は得られないことが明らかとなった。

3. 2 呼吸筋の持久的トレーニングにより全身持久性運動パフォーマンスへの影響について

常酸素環境における呼吸筋の持久的トレーニングにおいて、95% $\dot{V}O_{2peak}$ での走運動による疲労困憊に至るまでの時間の有意な増加が認められた

(図3). この結果は、先行研究で報告されているアスリートおよび一般健常者において呼吸筋の持久的トレーニングにより自転車およびランニングパフォーマンスが向上した結果と一致する^{7,20)}. 同様に、低酸素群においても有意な走時間の増加が見られた(図3). しかしながら、走時間の増加の程度は常酸素群と低酸素群で差が認められなかった. これらの結果から、全身持久的パフォーマンスは呼吸筋の持久的トレーニングにより改善するが、低酸素環境で呼吸筋トレーニングを行ってもさらなる向上はないことが示唆される.

全身持久的運動パフォーマンスが向上した要因には、呼吸筋持久力の増加による影響が考えられる. 近年では、呼吸筋の活動増加や疲労が運動時の循環調節や血流配分に影響することが次第に明らかにされている(呼吸筋由来の代謝受容器反射)^{1,3,21,22)}. 呼吸筋持久力の向上は、運動時により引き起こされる呼吸筋の疲労および呼吸筋由来の代謝受容器反射の発現を遅延させるため、これらが全身持久的パフォーマンスの向上に貢献しているかもしれない. また、呼吸困難感の低下もパフォーマンスの向上に関係していることが考えられる^{2,23)}. Harmsら²⁴⁾は、自転車競技者を対象に、高強度運動時(90%最大酸素摂取量)に呼吸の仕事量を変化させた際の呼吸困難感と脚の疲労の程度(主観的運動強度)への影響を調査している. 呼吸筋の仕事量を軽減させた場合には、呼吸困難感および脚の疲労感が軽減し、運動パフォーマンスの向上が認められている本研究においても、運動テスト開始から5分時の呼吸困難感の有意な低下が常酸素群および低酸素群において認められている(表3). これらのデータは、呼吸筋の持久的トレーニングが運動時の呼吸困難感を軽減し、これがパフォーマンス向上に寄与していることを示唆している.

本研究の対象者は男性ランナーのみである. 呼吸筋の活動増加による循環調節への影響には性差

があることが報告されている^{19,25,26)}. したがって、呼吸筋の持久的トレーニングに対する適応は男女間で異なるかもしれない. 呼吸筋のトレーニングには、本研究で用いた持久的トレーニングとは異なり、吸気に抵抗をかけて横隔膜を代表とする吸息筋の筋力増加を目的としたものがある⁴⁾. この抵抗負荷型の呼吸筋トレーニングを低酸素環境で行った研究は我々の知る限り報告されていない. 呼吸筋の持久的トレーニングとは異なったパフォーマンスへの影響があるかもしれない. また、トレーニング中の低酸素のレベルおよびトレーニング時間・期間も呼吸筋持久力および全身持久性パフォーマンスに影響すると思われる. 異なる低酸素レベルでの呼吸筋トレーニングによる影響を明らかにすることも今後の検討課題の一つである.

4. まとめ

長距離ランナーを対象とした6週間の常酸素および低酸素環境における呼吸筋の持久的トレーニングにより、呼吸筋の持久力の向上が見られた. また、高強度での走運動の疲労困憊に至るまでの時間(パフォーマンス)の増加も認められた. しかしながら、呼吸筋持久力およびパフォーマンスの向上の程度は常酸素群と低酸素群で差が見られなかった. これらの結果から、呼吸筋の持久的トレーニングによって全身持久性運動パフォーマンスの向上が見られること、この向上には呼吸筋持久力の改善が関係していることが示唆される. しかしながら、低酸素環境にて呼吸筋の持久的トレーニングを実施しても、さらなる向上は期待できないことも示された.

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、鈴木康弘先生(国立スポーツ科学センター)、大家利之先生(中京大学)、岩本えりか先生(札幌医科大学)、高尾憲

司先生（立命館大学），笠井信一先生（国立スポーツ科学センター），角大地先生（立命館大学），森寿仁先生（兵庫県立大学），清水香先生（名古屋大学），塩澤華奈先生（名古屋大学），立命館大学陸上部の皆様，有限会社 アルコシステム・石井様に多大な協力を得た。記して謝意を表す。最後に，本研究に助成いただいた，財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に心からの感謝を申し上げます。

文 献

- 1) Harms C.A., Wetter T.J., McClaran S.R., Pegelow D.F., Nickle G.A., Nelson W.B., et al., Effects of respiratory muscle work on cardiac output and its distribution during maximal exercise, *J. Appl. Physiol.*, **85**:609-618 (1998)
- 2) Sheel A.W., Respiratory muscle training in healthy individuals: physiological rationale and implications for exercise performance, *Sports Med.*, **32**:567-581 (2002)
- 3) Dempsey J.A., Romer L., Rodman J., Miller J., and Smith C., Consequences of exercise-induced respiratory muscle work, *Respir. Physiol. Neurobiol.*, **151**:242-250 (2006)
- 4) HajGhanbari B., Yamabayashi C., Buna T.R., Coelho J.D., Freedman K.D., Morton T.A., et al., Effects of respiratory muscle training on performance in athletes: a systematic review with meta-analyses, *J. Strength. Cond. Res.*, **27**:1643-1663 (2013)
- 5) Illi S.K., Held U., Frank I., Spengler C.M., Effect of respiratory muscle training on exercise performance in healthy individuals: a systematic review and meta-analysis, *Sports Med.*, **42**:707-724 (2012)
- 6) Morgan D.W., Kohrt W.M., Bates B.J., Skinner J.S., Effects of respiratory muscle endurance training on ventilatory and endurance performance of moderately trained cyclists, *Int. J. Sports Med.*, **8**:88-93 (1987)
- 7) Leddy J.J., Limprasertkul A., Patel S., Modlich F., Buyea C., Pendergast D.R., et al., Isocapnic hyperpnea training improves performance in competitive male runners, *Eur. J. Appl. Physiol.*, **99**:665-676 (2007)
- 8) Fairbairn M.S., Coutts K.C., and McKenzie D.C., Improved respiratory muscle endurance of highly trained cyclists and the effects on maximal exercise performance, *Int. J. Sports Med.*, **12**:66-70 (1991)
- 9) Vogiatzis I., Georgiadou O., Koskolou M., Athanasopoulos D., Kostikas K., Golemati S., et al., Effects of hypoxia on diaphragmatic fatigue in highly trained athletes, *J. Physiol.*, **581**:299-308 (2007)
- 10) Babcock M.A., Johnson B.D., Pegelow D.F., Suman O.E., Griffin D., Dempsey J.A., Hypoxic effects on exercise-induced diaphragmatic fatigue in normal healthy humans, *J. Appl. Physiol.*, **78**:82-92 (1995)
- 11) Gudjonsdottir M., Appendini L., Baderna P., Purro A., Patessio A., Vilianis G., et al., Diaphragm fatigue during exercise at high altitude: the role of hypoxia and workload, *Eur. Respir. J.*, **17**:674-680 (2001)
- 12) Verges S., Bachasson D., Wuyam B., Effect of acute hypoxia on respiratory muscle fatigue in healthy humans, *Respir. Res.*, **11**:109-117 (2010)
- 13) Katayama K., Suzuki Y., Hoshikawa M., Ohya T., Oriishi M., Itoh Y., et al., Hypoxia exaggerates inspiratory accessory muscle deoxygenation during hyperpnoea, *Respir. Physiol. Neurobiol.*, **211**:1-8 (2015)
- 14) Ogura Y., Naito H., Aoki J., Uchimarui J., Sugiura T., Katamoto S., Sprint-interval training-induced alterations of Myosin heavy chain isoforms and enzyme activities in rat diaphragm: effect of normobaric hypoxia, *Jpn. J. Physiol.*, **55**:309-316 (2005)
- 15) Verges S., Lenherr O., Haner A.C., Schulz C., Spengler C.M., Increased fatigue resistance of respiratory muscles during exercise after respiratory muscle endurance training, *Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.*, **292**:R1246-1253 (2007)
- 16) Walker D.J., Ertl T., Walterspacher S., Schlager D., Roecker K., Windisch W., et al., Respiratory muscle function during a six-week period of normocapnic hyperpnoea training, *Respir. Physiol. Neurobiol.*, **188**:208-213 (2013)
- 17) ATS/ERS. ATS/ERS Statement on respiratory muscle testing, *Am. J. Respir. Crit. Care Med.*, **166**:518-624 (2002)
- 18) Itoh Y., Katayama K., Iwamoto E., Goto K., Suzuki Y., Ohya T., et al., Blunted blood pressure response during hyperpnoea in endurance runners, *Respir. Physiol. Neurobiol.*, **230**:22-28 (2016)

- 19) Shimizu K., Goto K., Ishida K., Saito M., Akima H., Katayama K., Blood pressure response during normocapnic hyperpnoea is blunted in young women compared to men, *Respir. Physiol. Neurobiol.*, **247**:52-56(2017)
- 20) Fairbairn M.S., Coutts K.C., Pardy R.L., McKenzie D.C., Improved respiratory muscle endurance of highly trained cyclists and the effects on maximal exercise performance, *Int. J. Sports Med.*, **12**:66-70 (1991)
- 21) Dominelli P.B., Katayama K., Vermeulen T.D., Stuckless T.J.R., Brown C.V., Foster G.E., et al., Work of breathing influences muscle sympathetic nerve activity during semi-recumbent cycle exercise, *Acta Physiol. (Oxf.)*, **225**:e13212(2019)
- 22) Katayama K., Iwamoto E., Ishida K., Koike T., Saito M., Inspiratory muscle fatigue increases sympathetic vasomotor outflow and blood pressure during submaximal exercise, *Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.*, **302**:R1167-R1175(2012)
- 23) Markov G., Spengler C.M., Knopfli-Lenzin C., Boutellier C.S.U., Respiratory muscle training increases cycling endurance without affecting cardiovascular responses to exercise, *Eur. J. Appl. Physiol.*, **85**:233-239(2001)
- 24) Harms C.A., Wetter T.J., Croix C.M.S., Pegelow D.F., Dempsey J.A., Effects of respiratory muscle work on exercise performance, *J. Appl. Physiol.*, **89**:131-138(2000)
- 25) Katayama K., Smith J.R., Goto K., Shimizu K., Saito M., Ishida K., et al., Elevated sympathetic vasomotor outflow in response to increased inspiratory muscle activity during exercise is less in young women compared with men, *Exp. Physiol.*, **103**:570-580(2018)
- 26) Smith J.R., Broxterman R.M., Hammer S.M., Alexander A.M., Didier K.D., Kurti S.P., et al., Sex differences in the cardiovascular consequences of the inspiratory muscle metaboreflex, *Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.*, **311**:R574-581(2016)