

呼吸筋トレーニングが運動パフォーマンスを 向上させるメカニズムの解明 ～近赤外線分光法を用いた検証～

順天堂大学	北田友治
(共同研究者) 同	河合祥雄
同	佐久間和彦
同	仲村明
同	内藤久士

Mechanism Underlying Performance Improvement Through Respiratory Muscle Training: A Near-infrared Spectroscopy-based Study

by

Tomoharu Kitada, Sachio Kawai, Kazuhiko Sakuma,
Akira Nakamura, Hisashi Naito
*Graduate School of Health and Sports Science,
Juntendo University*

ABSTRACT

Previous studies have reported that respiratory muscle training improves performance during prolonged high-intensity exercise; however, the mechanism remains unclear. With an aim to gain insights into the underlying mechanism, we simultaneously monitored respiratory and lower limb muscle oxygenation patterns using near-infrared spectroscopy (NIRS) during high-intensity cycling exercise before and after 6 weeks of inspiratory muscle training. Sixteen healthy young men were assigned to either experimental (inspiratory muscle training : IMT) or sham (SHAM) training groups and underwent inspiratory muscle training for more than 5 days per week for 6 weeks. The subjects underwent constant load test at 90% $\dot{V}O_{2\max}$ on a cycle ergometer until

exhaustion both before and after training. Oxygenation in both intercostal and vastus lateralis muscles were measured using NIRS during the test. In addition, maximal inspiratory pressure (MIP) was measured using spirometer every 2 weeks for the duration of the training. After inspiratory muscle training, MIP increased significantly in the IMT group but not in the SHAM group. Furthermore, time to the limit of exercise tolerance prolonged significantly in the IMT group but not in the SHAM group. However, no significant changes were found in oxygenation in both intercostal and vastus lateralis muscles in both the groups. These findings suggest that inspiratory muscle training improves high-intensity cycling exercise performance by factors other than enhanced oxygenation in both respiratory and lower limb muscles.

要 旨

これまでの研究において、呼吸筋トレーニングが長時間高強度運動のパフォーマンスを向上させることは報告されてきたが、そのメカニズムについては未だ明らかになっていない。我々は、そのメカニズムについての洞察を得るために、近赤外線分光法（NIRS）を用いて、高強度自転車運動中の呼吸筋および下肢骨格筋における酸素動態を6週間の呼吸筋トレーニング前後で同時にモニタリングした。16名の健康な若年男性が、これまでに効果が認められている負荷で実施する群（inspiratory muscle training : IMT）と効果が得られないとされる負荷で実施する群（SHAM群）のいずれかに分けられ、週5日以上、6週間に渡って呼吸筋トレーニングを実施した。被験者らは、90% $\dot{V}O_{2max}$ 強度で疲労困憊に至るまでの自転車固定負荷テストをトレーニング前後で実施した。テスト中には、NIRSを用いて肋間筋および外側広筋における酸素動態が測定された。さらに、トレーニング期間中には、スパイロメータを用いて2週間毎に最大吸気圧（MIP）が測定された。呼吸筋トレーニング後、IMT群においてはMIPが有意に増加したが、SHAM群においては有意な増加は認められなかった。また、疲労困憊に至る

までの運動時間は、IMT群において有意に延長したが、SHAM群においては有意な延長は認められなかった。しかしながら、両群の肋間筋および外側広筋における酸素動態には、有意な変化は認められなかった。これらの知見は、呼吸筋トレーニングは呼吸筋および下肢骨格筋における酸素動態の改善よりも他の因子によって、高強度自転車運動のパフォーマンスを向上させることを示唆する。

諸 言

呼吸筋の疲労は、運動パフォーマンスの制限因子であると考えられている¹⁾。このことから、呼吸筋をトレーニングすることは、特に呼吸筋が最初に制限を受けることで、運動を実施または継続することが困難となるような持久的競技者や慢性閉塞性肺疾患患者にとって重要である。現在では、設定した負荷を吸気時にかけることができる呼吸筋専用のトレーニング器具（呼吸筋トレーナー）を用いることで、通常の持久的運動では鍛えることが難しい呼吸筋のトレーニングが可能となり、近年、それによって運動パフォーマンスの向上が見られることが報告されている²⁾。したがって、今後はさらに呼吸筋トレーニングが普及していくことが予想される。

しかしながら、呼吸筋トレーニングが呼吸筋の

表 1 Physical characteristics of IMT and SHAM groups

Characteristics	IMT group (n = 8)	SHAM group (n = 8)	p value
Age, years	19.3 ± 1.0	19.5 ± 1.1	n.s.
Height, cm	172.5 ± 8.7	175.1 ± 5.5	n.s.
Weight, kg	64.4 ± 8.7	66.9 ± 5.9	n.s.
Lean body mass, kg	56.4 ± 7.6	59.6 ± 4.3	n.s.
Fat, %	12.4 ± 3.6	10.8 ± 3.7	n.s.
Skinfold thickness of intercostal, mm	4.3 ± 0.9	4.2 ± 1.1	n.s.
Skinfold thickness of vastus lateralis, mm	5.1 ± 1.8	4.8 ± 1.9	n.s.
$\dot{V}O_{2max}$, mL·kg ⁻¹ ·min ⁻¹	48.8 ± 6.0	49.5 ± 5.3	n.s.
Power at 90% $\dot{V}O_{2max}$, W	252 ± 48	257 ± 26	n.s.

Values are mean ± SD.

Abbreviation: $\dot{V}O_{2max}$, maximal oxygen uptake

疲労を遅延または軽減させ、運動パフォーマンスを向上させる効果があることが示唆されているものの、そのメカニズムについては、未だに不明な点が多い。呼吸筋トレーニングによって運動パフォーマンスが向上する可能性のあるメカニズムの一つとしては、呼吸筋および下肢骨格筋における酸素供給/消費連関の改善、すなわち、呼吸筋が適応することによって、呼吸筋から活動筋への血流再配分量が大きくなることが予想される³⁾。しかしながら、我々の知る限りでは、呼吸筋トレーニングによる呼吸筋の適応によって、呼吸筋および下肢骨格筋における酸素供給/消費連関が改善するかどうかを明らかにした研究はなく、仮説の域を出ない。

これまで、持久的トレーニングによる下肢骨格筋における酸素化レベルの改善について、近赤外線分光法 (near-infrared spectroscopy: NIRS) を用いて観察できることが報告されている⁴⁾。したがって、呼吸筋トレーニングによる呼吸筋適応時の変化についても NIRS を用いることで、明らかにできるかもしれない。そこで、本研究は NIRS を用いて、呼吸筋トレーニング前後に高強度固定負荷による自転車運動中の呼吸筋および下肢骨格筋における酸素動態をモニタリングすることで、呼吸筋の適応メカニズムを呼吸循環の側面から調べることを目的とした。

1. 研究方法

1. 1 被験者

本研究では、持久的な運動を実施していない健康な男子大学生 16 名を対象とした。なお、彼らの身体的特性を表 1 に示した。実験に先立ち、研究の目的、内容、方法および参加によって生じ得る不利益について説明を行い、彼らから口頭および書面にて同意を得た上で実験を実施した。本研究は、順天堂大学大学院スポーツ健康科学研究科等倫理委員会の承認を受けた (第 26-106 号)。

1. 2 実験デザイン

被験者らは、肺機能検査の測定に慣れるために、本実験前に研究室を訪れて練習を行った。また、予め最大酸素摂取量およびそれが得られる負荷を算出するために、最大漸増負荷テストを実施した。すべての被験者は、呼吸筋トレーナーを用いて呼吸筋トレーニングを実施した。トレーニング期間の前後には、漸増負荷テストによって予め算出した最大酸素摂取量に基づき、固定負荷テストを実施した。負荷テスト中には、NIRS を用いて、疲労困憊に至るまでの肋間筋および外側広筋における酸素動態を測定した。同時に、呼気からは、呼気ガス分析器を用いて換気量や呼吸数などの換気に関するパラメータを測定した。さらには、ボルグスケール (RPE) を用いて呼吸および下肢それぞれにおける疲労感を評価した。また、トレーニング

ング期間中には、スパイロメータを用いて肺機能および呼吸筋力を測定した。

1. 3 自転車負荷テスト

漸増負荷テストは、酸素摂取量と負荷の直線関係から呼吸筋トレーニングによる運動パフォーマンス評価のための固定負荷テストに用いる負荷を決定するためと、最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_{2max}$) を測定するために、呼吸筋トレーニングを開始する期間前に実施させた。被験者は、サドル上で3分間の安静を保ち、空漕ぎで60回転/分のペダリングを3分間行った後、1分毎に0.5kpずつ負荷を漸増させて疲労困憊に至るまで運動した。別日には、呼吸筋トレーニングによる運動パフォーマンスを評価するために、予め漸増負荷テストによって算出した酸素摂取量と負荷の直線関係をもとに、90% $\dot{V}O_{2max}$ 強度に設定した固定負荷テストを実施した。被験者は、漸増負荷テストと同様にサドル上で3分間の安静を保ち、空漕ぎで60回転/分のペダリングを3分間行った後、50% $\dot{V}O_{2max}$ 強度で5分間のペダリングを行い、それに続けて90% $\dot{V}O_{2max}$ 強度で疲労困憊に至るまで運動した。なお、本研究では90% $\dot{V}O_{2max}$ 強度に設定した時点から疲労困憊に至るまでの運動時間 (time to the limit of exercise tolerance: Tlim) を運動パフォーマンスの指標とした。負荷テスト中、呼吸からはエアロモニタ (AE-300S, ミナト医科学, 日本) を用いて、酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$)、二酸化炭素排出量 ($\dot{V}CO_2$)、分時換気量 ($\dot{V}_E$)、酸素換気当量 ($\dot{V}_E / \dot{V}O_2$)、一回換気量 (T_V)、呼吸数 (RR) および呼吸交換比 (R) が測定された。また、心電図計 (DS-7210, フクダ電子, 日本) を用いて、心電図 (ECG) がモニターされた。

1. 4 肺機能および呼吸筋力

肺機能検査は、スパイロメータ (Autospiro AS-507, ミナト医科学, 日本) を用いて、吸気筋ト

レーニングを開始する前から6週間のトレーニング期間が終わるまで2週間毎に実施し、肺活量 (vital capacity: VC)、努力性肺活量 (forced vital capacity: FVC)、一秒量 (forced expiratory volume 1-second: FEV 1.0)、一秒率 (FEV 1.0/FVC ratio: FEV 1.0%) および最大換気量 (maximal voluntary ventilation: MVV) を測定した。また、最大吸気圧 (maximal inspiratory pressure: MIP) および最大呼気圧 (maximal expiratory pressure: MEP) は、肺機能の項目と同様に2週間毎に測定され、MIPの値はその都度個々に適した吸気筋トレーニングの負荷設定のためにも用いられた。なお、これらの測定値は、3回ずつ実施したときの最大値を採用した。

1. 5 肋間筋および外側広筋における酸素動態

自転車固定負荷テスト中、携帯型 NIRS (Pocket NIRS Duo, ダイナセンズ, 日本) を用いて、左の肋間筋および外側広筋における酸素動態を酸素化ヘモグロビン・ミオグロビン (oxyHb/Mb)、脱酸素化ヘモグロビン・ミオグロビン (deoxyHb/Mb) および総ヘモグロビン・ミオグロビン (totalHb/Mb) の変化量として任意の単位 (AU) で測定した。本器は、本体と2つのプローブから構成されており、プローブの送光部と受光部間の距離は3cmであった。この距離における測定範囲は、 ~ 1.5 cm程度であるとされている⁵⁾。プローブは、専用の両面シールで皮膚に固定され、その上から外乱光の影響を防ぐためにゴム素材の板を貼りつける工夫を施し、さらに動作範囲および血流の制限を生じさせることなく、それらがずれないように伸縮テーピング (マルチポア, 住友3M, 日本) が貼られた。外側広筋における測定部位は、膝蓋骨上縁から大腿骨上15cm、さらにそこから外側へ3-5cmとし、肋間筋における測定部位は先行研究^{6,7)}に従って第7肋間とした。これらの箇所は、画像診断装置 (SSD-900, 日立

アロカメディカル, 日本) を用いて, 筋腹の隆起を確認した上で決定され, 同時に皮下脂肪厚が測定された. なお, NIRS シグナルから直接得られる値は, 皮下脂肪厚の影響を受けることから, そのままでは筋酸素化レベルを被験者間で比較することができない. そのため, 我々は, Niwayama et al.⁸⁾ の式を用いて彼らの皮下脂肪厚分を補正することで, 筋酸素化レベルを定量化した. 被験者は, NIRS のプローブを左の肋間筋および外側広筋に張り付けられた状態で, 仰臥位による安静を 30 分程度保った. NIRS シグナルは, 安静の間, 定常状態となるまで PC を通してモニタリングされ, このときの値を基準とした. なお, NIRS シグナルのサンプリングは, 10Hz で行った.

1. 6 呼吸筋トレーニング

呼吸筋トレーニングには, 圧力閾値による呼吸筋トレーナー (POWERbreathe Plus; International Ltd., UK) を用いた. 被験者は, 効果が認められている負荷 (MIP の 50% 強度) でトレーニングを実施する群 ([inspiratory muscle training : IMT]) と, 効果が得られないほどの負荷 (MIP の 15% 強度) でトレーニングを実施する群 (SHAM 群) に最大酸素摂取量のレベルを考慮した上で分けられ²⁾, 1 日 30 回 × 2 セット, 週に 5 日以上の吸気筋トレーニングを 6 週間続けて実施した.

1. 7 統計処理

すべての統計処理には, 統計解析ソフトウェア SPSS (Ver.17.0; SPSS Inc, USA) を用い, データは, 平均値 ± 標準偏差で示した. 群間におけるベースラインの値は, 対応のない t 検定を用いて比較検定した. また, 吸気筋トレーニング前後および期間中による群間の比較には, 二元配置の分散分析を用い, これらの結果に有意差が認められた場合には, Bonferroni の多重比較により検定した. なお, RPE, NIRS および換気パラメータは, 疲労困憊時において比較検定した. 有意水準は 5% 未満とした.

2. 研究結果

2. 1 肺機能および呼吸筋力の変化

吸気筋トレーニング介入による両群それぞれの肺機能および呼吸筋力を表 2 に示した. 吸気筋トレーニング介入前の肺機能および呼吸筋力における値には, 群間において有意な違いは認められなかった. また, 測定した肺機能の項目 (VC, FVC, FEV 1.0, FEV 1.0%, MVV) のうち, VC, FEV 1.0% および MVV においては, 両群とも吸気筋トレーニング介入による有意な変化は認められなかった. FVC および FEV 1.0 は, 吸気筋トレーニング介入前と比較して有意な低下が認められた. MEP は, 吸気筋トレーニング介入前と比較して, 有意な増加が認められた. さらに,

表 2 Changes in pulmonary function and respiratory muscle strength

	IMT group (n = 8)				SHAM group (n = 8)				Two-way ANOVA (p-value)		
	0wk	2wk	4wk	6wk	0wk	2wk	4wk	6wk	Time	Group	Interaction
VC, L	4.80±0.72	4.72±0.65	4.72±0.69	4.71±0.70	4.74±0.54	4.69±0.51	4.70±0.61	4.64±0.63	n.s.	n.s.	n.s.
FVC, L	4.65±0.58	4.53±0.58	4.42±0.59	4.46±0.67	4.59±0.54	4.43±0.50	4.38±0.54	4.43±0.63	<0.01	n.s.	n.s.
FEV1.0, L	4.13±0.46	4.06±0.54	4.00±0.48	3.96±0.61	4.11±0.54	3.95±0.54	3.93±0.55	3.94±0.62	<0.01	n.s.	n.s.
FEV1.0%, %	89.74±6.76	89.91±8.55	91.25±9.08	89.28±9.58	90.96±4.64	89.06±5.20	89.74±4.72	89.14±5.89	n.s.	n.s.	n.s.
MVV, L	167.8±22.4	172.3±24.8	170.2±24.2	170.2±27.3	167.9±25.2	171.1±31.5	164.4±31.8	171.6±24.0	n.s.	n.s.	n.s.
MIP, cmH ₂ O	142.7±8.5	164.0±19.9 [†]	171.3±15.9 ^{††}	181.9±18.1 ^{†††}	144.2±24.1	143.4±17.6	142.7±18.4	142.0±15.7	<0.05	<0.01	<0.05
MEP, cmH ₂ O	158.5±37.6	156.2±29.0	159.0±25.5	166.1±25.1	144.6±22.8	160.6±25.7	164.1±27.3	171.6±24.0	<0.05	n.s.	n.s.

Values are mean ± SD.

[†] Significant difference between IMT group and SHAM group ($p < 0.05$). ^{††} Significant difference between IMT group and SHAM group ($p < 0.01$). ^{†††} Significant difference from before training ($p < 0.01$). VC, vital capacity; FVC, forced vital capacity; FEV 1.0, forced expiratory volume 1-second; FEV 1.0%, FEV 1.0/FVC; MVV, maximal voluntary ventilation; MIP, maximal inspiratory pressure; MEP, maximal expiratory pressure.

MIP においては、呼吸筋トレーニング介入前と比較して、IMT 群にのみ吸気筋トレーニング介入後に有意な増加が認められた。

2. 2 自転車固定負荷テストにおける運動パフォーマンスの変化

吸気筋トレーニング介入前の Tlim には、群間において有意な違いは認められなかった。6 週間の吸気筋トレーニング介入後、SHAM 群においては Tlim に変化が認められなかった一方で、IMT 群において Tlim が有意に延長することが認められた (図 1)。

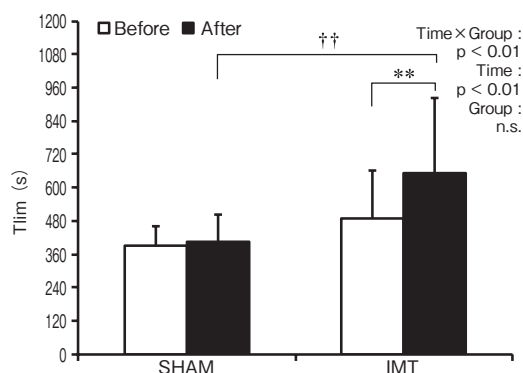


図 1 Changes in time to the limit of exercise tolerance (Tlim) before and after inspiratory muscle training.

Data are presented as the mean $\pm$ SD.

**Significant difference from before the training ($p < 0.01$).

††Significant difference between groups after training ($p < 0.01$).

2. 3 吸気筋トレーニング前後における自転車固定負荷テスト中の各パラメータの変化

疲労困憊時の呼吸および下肢における RPE は、吸気筋トレーニング介入前で IMT 群が 19 ± 2 および 20 ± 1 , SHAM 群が 19 ± 2 および 20 ± 1 であり、介入後で IMT 群が 19 ± 2 および 20 ± 0 , SHAM 群が 19 ± 1 および 20 ± 1 であった。吸気筋トレーニングによる変化は、疲労困憊時点の RPE において両群ともに認められなかった。また、疲労困憊時の肋間筋および外側広筋における酸素動態 (oxyHb/Mb, deoxyHb/Mb, totalHb/Mb), それらに加えて換気パラメータ ($\dot{V}O_2$, $\dot{V}_E$, $\dot{V}_E/\dot{V}O_2$, T_v , RR, R) においても、吸気筋トレーニングによる変化は両群ともに認められなかった (表 3)。

3. 考 察

本研究の主な知見は、90% $\dot{V}O_{2max}$ 強度で固定した自転車運動による Tlim が、効果的な吸気筋トレーニングを実施した IMT 群のみで有意に延長したにもかかわらず、疲労困憊時の肋間筋および外側広筋における酸素動態には有意な変化を示さなかったことである。

これまでには、85% $\dot{V}O_{2max}$ 強度以上の運動において呼吸筋疲労が生じることが示唆されてい

表 3 Changes in NIRS and pulmonary gas exchange parameters at exhaustion during constant load cycling exercise at 90% $\dot{V}O_{2max}$

	IMT group (n = 8)		SHAM group (n = 8)	
	Before (0wk)	After (6wk)	Before (0wk)	After (6wk)
$\dot{V}O_2$, mL $\cdot$ kg $^{-1}$ $\cdot$ min $^{-1}$	49.3 $\pm$ 3.3	48.7 $\pm$ 4.5	47.9 $\pm$ 6.5	49.1 $\pm$ 6.6
$\dot{V}_E$, L	131.6 $\pm$ 23.7	131.4 $\pm$ 25.6	125.6 $\pm$ 25.3	136.0 $\pm$ 30.6
$\dot{V}_E/\dot{V}O_2$, L	41.1 $\pm$ 5.5	42.3 $\pm$ 4.6	39.3 $\pm$ 4.4	41.6 $\pm$ 8.2
Tidal volume, mL	2,108 $\pm$ 154	2,106 $\pm$ 186	2,089 $\pm$ 297	2,144 $\pm$ 396
Respiratory rate, breaths/min	62.8 $\pm$ 11.5	62.2 $\pm$ 9.5	60.1 $\pm$ 5.5	64.2 $\pm$ 11.8
Respiratory quotient	1.12 $\pm$ 0.05	1.11 $\pm$ 0.06	1.11 $\pm$ 0.07	1.14 $\pm$ 0.09
Δ oxyHb/Mb of intercostal, AU	-0.23 $\pm$ 0.12	-0.17 $\pm$ 0.10	-0.19 $\pm$ 0.06	-0.18 $\pm$ 0.08
Δ deoxyHb/Mb of intercostal, AU	0.44 $\pm$ 0.18	0.36 $\pm$ 0.15	0.30 $\pm$ 0.09	0.34 $\pm$ 0.15
Δ totalHb/Mb of intercostal, AU	0.21 $\pm$ 0.19	0.18 $\pm$ 0.14	0.11 $\pm$ 0.12	0.17 $\pm$ 0.14
Δ oxyHb/Mb of vastus lateralis, AU	-0.23 $\pm$ 0.19	-0.24 $\pm$ 0.13	-0.24 $\pm$ 0.09	-0.14 $\pm$ 0.09
Δ deoxyHb/Mb of vastus lateralis, AU	0.49 $\pm$ 0.17	0.49 $\pm$ 0.17	0.49 $\pm$ 0.11	0.46 $\pm$ 0.11
Δ totalHb/Mb of vastus lateralis, AU	0.26 $\pm$ 0.08	0.25 $\pm$ 0.10	0.25 $\pm$ 0.10	0.32 $\pm$ 0.09

Values are mean $\pm$ SD.

Abbreviation: oxyHb/Mb, oxygenated hemoglobin and myoglobin; deoxyHb/Mb, deoxygenated hemoglobin and myoglobin; total Hb/Mb, the sum of oxyHb/Mb and deoxyHb/Mb.

る¹⁾。そこで、本研究ではまず、吸気筋トレーニングの効果を確認するために90% $\dot{V}O_{2max}$ 強度での固定負荷による自転車運動によって運動パフォーマンスを評価した。その結果、IMT群においてのみ運動パフォーマンスに有意な向上が認められた。これは、MIPの増加が示唆するように吸気筋トレーニングによって横隔膜が肥大し、呼吸筋疲労が遅延したことによる可能性が考えられる⁹⁾。呼吸筋の疲労は、筋交感神経活動 (muscle sympathetic nerve activity: MSNA) を亢進させ、それによって生じる血管収縮により、下肢への酸素供給量の低下を引き起こすことが報告されている^{10, 11)}。また、一過性に呼吸に対して負荷抵抗を加えて運動させたとき、下肢の血流量が低下し、運動パフォーマンスが制限されることも観察されている^{12, 13)}。実際、呼吸筋トレーニングによってMSNAが軽減したことが報告されている¹⁴⁾ことから、呼吸筋トレーニングが下肢骨格筋への酸素供給量を確保しやすい状態を可能にしていることが予想される。しかしながら、NIRSを用いて観察した本研究からは、運動パフォーマンスが有意に向上したにもかかわらず、外側広筋における酸素動態の有意な変化は認められなかった。また、それだけでなく、これまでに呼吸筋トレーニングによる改善が報告されている呼吸に対する各生理パラメータおよびRPE¹⁵⁾においても吸気筋トレーニング介入後の有意な変化は認められなかった。これらの結果は、吸気筋トレーニングによる運動パフォーマンスの向上には他の因子が大きく寄与する可能性を示唆している。Kowalchukら¹⁶⁾は、コントロール条件とは別に呼吸抵抗を加えた条件を設定した自転車固定負荷テストを実施させ、そのときの呼気および外側広筋における酸素動態応答を一過性にNIRSを用いてモニタリングしたが、呼吸へ負荷を加えた場合でも酸素動態に有意な変化は認められなかったことから、活動筋よりも他の部位から血流が再配分された可能性

を示唆した。呼吸筋のトレーニング適応時の応答を観察した本研究においても、それを支持する結果を得た。しかしながら、我々が用いた方法では、酸素供給/消費のバランスを測定できるものの、局所的かつ絶対的な酸素供給量および酸素消費量を測定することができないため、今後はいくつかの部位で絶対的な評価と合わせて検証することが必要であろう。

加えて、本研究成果をまとめるにあたっては、いくつかのリミテーションがあった。我々は、呼吸筋トレーニングによる運動パフォーマンスの向上が、呼吸筋および下肢骨格筋における酸素供給/消費連関の改善によって引き起こされているかどうかを明らかにするために研究を実施した。また、呼吸筋トレーニングの効果に $\dot{V}O_{2max}$ が影響する²⁾ことから、それが影響しないよう被験者をカウンターバランスで各群に振り分けるよう配慮した。しかしながら、 $\dot{V}O_{2max}$ が同程度でも、対象とした被験者における元々の運動パフォーマンスレベルに大きな差があった。そこで今回、本研究成果をまとめるにあたっては、運動中の生理パラメータを観察するポイントとして、疲労困憊時に狙いを定めて検討した。そのため、疲労困憊に至るまでの時点で生理応答が変化しているかどうかについては現時点では不明であり、 T_{lim} が延長していることからすると、疲労困憊に至るまでの時点で変化が生じている可能性があることは言及しておくべきポイントであろう。したがって、観察するポイントを変えた分析を行う必要性がまだ残されており、これについては今後検討していく予定である。

4. 結 論

呼吸筋トレーニングによる運動パフォーマンスの向上には、呼吸筋および下肢骨格筋における酸素供給/消費連関の改善よりもその他の因子が関与している可能性を示唆する。

謝 辞

本研究に対して助成を賜りました、公益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御礼申し上げます。

文 献

- 1) Dempsey J.A., Romer L., Rodman J., et al., Consequences of exercise-induced respiratory muscle work. *Respir. physiol. neurobiol.*, **151** (2-3) :242-50 (2006)
- 2) Illi S.K., Held U., Frank I., et al., Effect of respiratory muscle training on exercise performance in healthy individuals: a systematic review and meta-analysis. *Sports Med.*, **42** (8) :707-24 (2012)
- 3) McConnell A.K., Romer L.M., Respiratory muscle training in healthy humans: resolving the controversy. *Int. J. Sports Med.*, **25** (4) :284-93 (2004)
- 4) Costes F., Prieur F., Feasson L., et al., Influence of training on NIRS muscle oxygen saturation during submaximal exercise. *Med. Sci. Sports Exerc.*, **33** (9) :1484-9 (2001)
- 5) Chance B., Dait M.T., Zhang C., et al., Recovery from exercise-induced desaturation in the quadriceps muscles of elite competitive rowers. *Am. J. Physiol.*, **262** (3 Pt 1) :C766-75 (1992)
- 6) Vogiatzis I., Athanasopoulos D., Habazettl H., et al., Intercostal muscle blood flow limitation in athletes during maximal exercise. *J. physiol.*, **587** (Pt 14) :3665-77 (2009)
- 7) Guenette J.A., Vogiatzis I., Zakynthinos S., et al., Human respiratory muscle blood flow measured by near-infrared spectroscopy and indocyanine green. *J. Appl. Physiol.* (1985), **104** (4) :1202-10 (2008)
- 8) Niwayama M., Lin L., Shao J., et al., Quantitative measurement of muscle hemoglobin oxygenation using near-infrared spectroscopy with correction for the influence of a subcutaneous fat layer. *Rev. Sci. Instr.*, **71** :4571-75 (2000)
- 9) Enright S.J., Unnithan V.B., Heward C., et al., Effect of high-intensity inspiratory muscle training on lung volumes, diaphragm thickness, and exercise capacity in subjects who are healthy. *Phys. Ther.*, **86** (3) :345-54 (2006)
- 10) St Croix C.M., Morgan B.J., Wetter T.J., et al., Fatiguing inspiratory muscle work causes reflex sympathetic activation in humans. *J. physiol.*, **529** (Pt 2) :493-504 (2000)
- 11) Sheel A.W., Derchak P.A., Morgan B.J., et al., Fatiguing inspiratory muscle work causes reflex reduction in resting leg blood flow in humans. *J. physiol.*, **537** (Pt 1) :277-89 (2001)
- 12) Harms C.A., Babcock M.A., McClaran S.R., et al., Respiratory muscle work compromises leg blood flow during maximal exercise. *J. Appl. Physiol.* (1985), **82** (5) :1573-83 (1997)
- 13) Harms C.A., Wetter T.J., St Croix C.M., et al., Effects of respiratory muscle work on exercise performance. *J. Appl. Physiol.* (1985), **89** (1) :131-8 (2000)
- 14) Mello P.R., Guerra G.M., Borile S., et al., Inspiratory muscle training reduces sympathetic nervous activity and improves inspiratory muscle weakness and quality of life in patients with chronic heart failure: a clinical trial. *J. Cardiopulm. Rehabil. prev.*, **32** (5) :255-61 (2012)
- 15) Gething A.D., Williams M., Davies B., Inspiratory resistive loading improves cycling capacity: a placebo controlled trial. *Br. J. Sports Med.*, **38** (6) :730-6 (2004)
- 16) Kowalchuk J.M., Rossiter H.B., Ward S.A., et al. The effect of resistive breathing on leg muscle oxygenation using near-infrared spectroscopy during exercise in men. *Exp. Physiol.*, **87** (5) :601-11 (2002)