

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 4 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23500777

研究課題名(和文) 有酸素性運動時の効果的呼吸法とそのメカニズムの解明

研究課題名(英文) Clarification of the effective way of breathing and its mechanism during aerobic exercise

研究代表者

石田 浩司 (ISHIDA, Koji)

名古屋大学・総合保健体育科学センター・教授

研究者番号：50193321

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、(1)胸郭制限や低酸素吸入により運動時の換気を通常より増加させて短期間トレーニングすると、その後の通常の運動時の換気量が増強されることから、運動時の呼吸調節に「学習」が関与すること、(2)高強度の自転車漕ぎ運動では、呼吸リズムと運動のテンポの「同調」が起こりやすく、運動が楽になる場合もあるが、有酸素性運動でよく用いられる中強度では、同調と非同調で差は見られず、運動は楽にならないことが明らかとなった。これらのことから、有酸素性運動では、同調よりもゆっくりした呼吸を意識することと、繰り返しの学習により、運動に適した呼吸法を習得できる可能性が示唆された。

研究成果の概要(英文)：This study revealed that (1) repeated and exaggerated ventilation during exercise produced by short term aerobic training combined with chest wall restriction or inhalation of hypoxic gas, reinforced subsequent ventilatory response to normal exercise, indicating that learning should be involved in the respiratory control during exercise, and that (2) high intensity cycle exercise often induced a locomotor-respiratory coupling and resultant easiness during exercise, while during moderate intensity cycle exercise which was often used in aerobic exercise, there was no difference in cardio-respiratory responses between coupling and non-coupling so that the locomotor-respiratory coupling should have no beneficial effect on moderate intensity exercise. These results suggest that during aerobic exercise, we should keep in mind to breathe slowly rather than to synchronize respiration to locomotion, and that appropriate breathing way during exercise could be obtained from repetitive learning.

研究分野：運動生理学

科研費の分科・細目：健康・スポーツ科学，スポーツ科学

キーワード：運動時換気亢進 運動-呼吸同調 胸郭制限 低酸素 学習効果 呼吸循環応答 呼吸法

1. 研究開始当初の背景

有酸素性運動時の呼吸について、「運動開始時に換気が増加するのはなぜか」ということと、「運動テンポに合わせて呼吸するのは効果的か」は古くからの命題である。

(1) 運動時の換気亢進については、従来はセントラルコマンドと末梢神経反射の2つの神経性のメカニズムで説明されてきたが、2000年以降、「学習・記憶」が関与しているという新しい仮説(以下、「学習効果」)が提唱され、生理学的常識を覆すものとして注目を浴びている。この学習効果が確かめられれば、効率的な呼吸法を「学習」させることに繋がる。この仮説を検証するには、通常と異なる換気を学習させる必要があること、換気増大の時間相別に詳しく分析することが必要であるが、これまでそのような研究は見当たらない。

(2) ランニング中に運動のテンポと呼吸のリズムが一致することはよく経験される。リズムカルな運動中に、呼吸リズムが運動テンポの影響を受け、互いの位相が同期化していく現象は「運動-呼吸同調」(以下「同調」と呼ばれている。先行研究では同調により運動が楽になるという研究と効果はないとする研究に意見が分かれており、はっきりしていない。これらの研究は同一被検者を用いた研究がほとんどであるが、この同調発生には個人差があり、個人差を考慮して同調の効果を明らかにする必要がある。

健康増進や生活習慣病の予防や改善、最近では認知症の予防や改善にも有酸素性運動が有用であることは広く知られているが、その運動時に随意に変えられる「呼吸」について、効率的な呼吸法と、それを獲得するための「学習」について明らかにできれば、社会に還元できる非常に有意義な研究であると言えることができる。

2. 研究の目的

有酸素性運動時の呼吸について、

(1) 吸入する酸素濃度を変化させる、または呼吸制限を加えることにより人為的に換気を増減させて短期間トレーニングさせ、実際に呼吸の学習が起こるか否かを時間相別に検討し、「学習・記憶」が運動時換気増大のメカニズムの一つであることを明らかにする。

(2) 運動-呼吸同調が起こりやすい条件と、同調が有酸素性運動に効果的か否か明らかにし、さらにそのメカニズムとして、同調が運動時の呼吸・循環応答にどのような影響を与えるか、同調発生率の低いグループと高いグループに分けて個人差の観点から明らかにする。

以上の2つの研究から、有酸素性運動時の効果的な呼吸法を提示するとともに、それを学習することが可能であることを明らかにすることが最終目的である。

3. 研究の方法

(1) 胸郭制限による学習効果実験

胸部をベルトで締めて胸郭制限下で運動すると、最高酸素摂取量(VO_{2peak})の60%以下の強度では、胸郭制限しない通常の運動時に比べ、毎分換気量や努力感が増加することを先行研究で明らかにした。そこで、健康な大学生男子14名に対し、まず VO_{2peak} の50%の負荷で6分間×5セットの自転車漕ぎ運動を、胸郭制限のない通常状態で実施した(Pre)。毎分換気量、酸素摂取量(VO_2)、心拍数などについて、1秒値変換後に加算平均し、運動開始20秒以内のPhase I、指数関数的増加部分のPhase II、定常状態のPhase IIIに分けて分析した。次に被検者7名については、ベルトで胸部を締め、肺活量が30%程度低下する胸郭制限条件で、50% VO_{2peak} の負荷で5分間の運動を1日4セット、週5日2週間計

40 回実施した (CR 群). トレーニング終了後 (Post), 胸郭制限なしで Pre と同様の測定を実施し, 胸郭制限せずに同様にトレーニングした群 (NR 群) と比較した.

(2) 低酸素による学習効果実験

低酸素を吸入しながら運動すると, 常酸素吸入時に比べ毎分換気量は増加する. 健康な大学生男女 16 名に対し, まず, 酸素濃度 21% の常酸素条件下で 50%VO₂peak の負荷で 5 分間の自転車漕ぎ運動を十分な休憩をはさんで 5 セット実施し, 呼吸循環応答を (1) と同様に測定した (Pre). 4 週間以上経過した後, 被検者 8 名については, 常酸素で安静の後, 運動開始時に吸入酸素濃度を 13% に切り替え, 50%VO₂peak の負荷で 5 分間の自転車漕ぎ運動を, 7 分の休憩をはさんで 6 セット繰り返すトレーニングを 3 日間連続で実施した (Hypo 群). 4 日目に Pre 測定と同様に常酸素条件下での運動に対する呼吸循環応答を測定し (Post), 同様のトレーニングを常酸素で実施した群 (Norm 群) と比較した. なお, 被検者にはどの測定においても吸入ガス組成についての情報を与えなかった.

(3) 同調発生に関する実験

14 名の健康な男子大学生を対象とし, VO₂peak の 40%, 60%, 80% の負荷の自転車漕ぎ運動を 15 分間, 胸郭制限条件と非制限条件で実施した. 回転数は約 60 回転とした. その時の VO₂ や換気量, 心拍数等の呼吸循環パラメータを測定した. また, 呼吸開始点と関節角度の差異などをもとに同調発生率を算出した.

(4) 強制的同調・非同調実験

12 名の健康な男子大学生を対象に, 被検者の好みの回転数と呼吸数で 60%VO₂peak の負荷で 15 分間の自転車漕ぎ運動を行わせ (自由条件), 呼吸と運動の同調発生率および呼吸循環応答を測定し, 同調発生率の低い群 (非同調群) と高い群 (同調群) で

比較した. 次に各被検者に 60%VO₂peak の負荷を用い, 自由条件での平均回転数で 15 分間運動させながら, ①呼吸を運動と同調させるように (同調条件), または, ②呼吸の速さ (呼吸数) を正弦波状に変動させるように (非同調条件), 音刺激と画面に指示を出し, 同様の測定を行った. さらに学習効果を検討するため, 非同調群を同調条件で, また, 同調群を非同調条件で 15 分×2 セット×5 日間 (計 10 回) の自転車漕ぎトレーニングを行わせ, トレーニング前後で自由条件での運動中の同調発生率と呼吸循環応答を比較した.

4. 研究成果

(1) 胸郭制限による学習効果実験

全体的傾向として, NR 群ではトレーニングの初期効果 (呼吸数の安定・低下) により, 毎分換気量がトレーニング後に低下するのに対し, CR 群では逆にトレーニング後にやや増加する傾向が見られた (図 1).

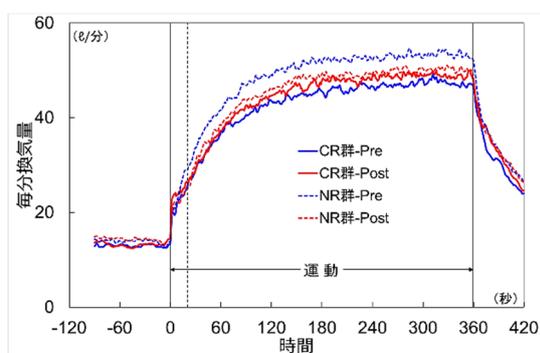


図 1. 胸郭制限トレーニング前後の毎分換気量の変化

時間相別に見ると, 毎分換気量と呼吸数の運動開始 20 秒以内 (Phase I) のゲイン (増加分) は, NR 群では Pre と比べ Post で低下するが, CR 群では増加傾向を示し, 毎分換気量の NR 群と CR 群で有意な交互作用が認められた. また, 毎分換気量の Phase II の時定数, Phase III のゲインに両群で差は認められなかった. このことから, 運動開始直後 (Phase I) の換気急増に学習効

果が関与することが明らかとなり、それには努力感などの上位中枢が影響していることが示唆された。

(2) 低酸素による学習効果実験

図 2 に示すように、Hypo 群ではトレーニング中 (Tr) は低酸素吸入により、通常空気条件のトレーニング前 (Pre) に比べ換気が増大し、トレーニング後 (Post) に常酸素で運動すると、同条件の Pre に比べやや換気が増加していた。一方、Norm 群ではトレーニングにより毎分換気量は減少する方向に向かった。時間相別に詳しく検討

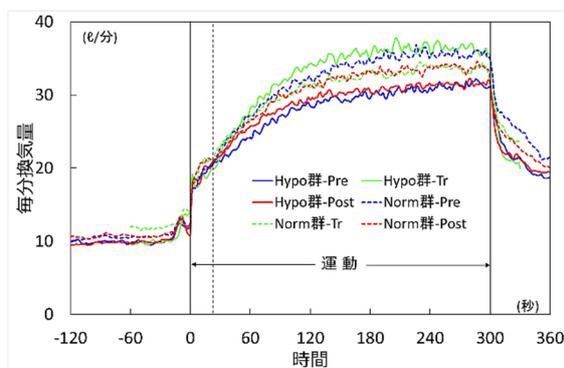


図 2. 低酸素トレーニング前後の毎分換気量の変化

すると、Norm 群では、トレーニング期間中 (Tr), Pre に比べ毎分換気量の安静値からの変化分 (ΔVE) が、運動開始 30 秒から 2 分 30 秒までの Phase II 及び 3 分 50 秒から 4 分 50 秒までの定常状態 (Phase III) で 10% 程度有意に低下しており、それは主に呼吸数の低下によって引き起こされていた。一方、Hypo 群ではトレーニング期間中は Pre に比べ Phase II, Phase III で ΔVE が 20~30% 有意に増加しており、それは主に一回換気量の増大によって引き起こされていた。Pre と Post の比較では、Phase II は Norm 群で 6% 減少、Hypo 群で 6% 増加し、Phase III では Norm 群が 8% 減少に対し Hypo 群は 1% 増加と、両群で反対の変化を示すが、各群とも Pre-Post で有意な変化ではなかった。しかし、Phase II, III の ΔVE について両群の Pre-Post で

交互作用が認められた。Phase I で差は認められなかったが、これはガス切替え直後は徐々に酸素濃度が低下するために、開始 20 秒では低酸素の影響がまだ少ないことが原因と推察された。このように被検者に気付かれずに運動時の換気を通常より増大させて短期間トレーニングすると、換気が過度に上がらない通常の条件 (常酸素) に戻しても、換気を上げようとする「学習」が起こっていることが確認された。すなわち、運動時の換気亢進に「学習効果」が関与することが明らかとなった。

(3) 小括

(1), (2) の結果は、運動時の呼吸が従来の神経性要因だけで決定されるのではなく、繰り返しの「学習」によっても影響を受けることを示唆している。また、面白いことに、コントロール群では Pre に対し Post で換気量が低下し、効率のよい呼吸が可能となっていることも一種の「学習」といえるかもしれない。本研究は、運動時換気亢進の「学習仮説」を支持する有力な証拠となるとともに、運動時の呼吸が学習によって変容しうることを明らかにした点で、非常に有意義であると言える。今後の展望として、換気を人為的に減少させた場合や、認知 (学習) を妨げた場合についても明らかにする必要がある。

(4) 同調発生に関する実験

同調発生率は呼吸制限の影響は受けず、負荷に依存し、負荷が重いほど同調発生率が高値を示した。さらに同調発生率と運動時の呼吸・循環応答の関係を検討した結果、80%VO₂peak での運動時に同調発生率が高い人ほどその時の体重当たりの酸素摂取量が低いことが明らかとなった。このことから、高強度において同調があれば運動の効率がよくなる可能性が示唆された。ただし、呼吸数を上げて同調させると、死腔量の関係で逆に効率が悪くなることが影

響する可能性も示唆された。

(5) 強制的同調・非同調実験

自由条件では同調群と非同調群の2群間で、酸素摂取量、心拍数、換気当量（換気効率の指標）などの呼吸循環応答の差は認められず、全員の強制的同調条件と非同調条件でも平均すると差は見られなかった（図3）。

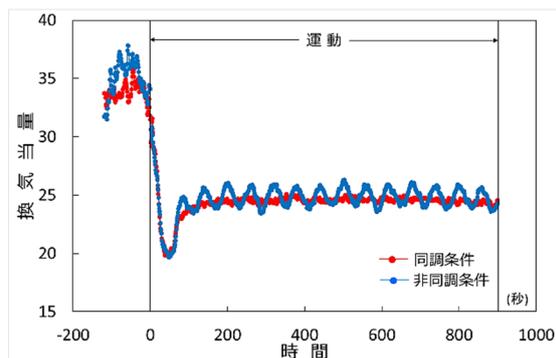


図3. 同調・非同調による運動時の換気効率の変化

すなわち、中強度（60%VO_{2peak}）での自転車漕ぎ運動では、呼吸と運動を同調させても呼吸循環系には影響はなく、運動は楽にならないことが明らかとなった。一方、同調群に非同調で、また、非同調群に同調させようとして逆方向にトレーニングさせると、その後の自由条件での運動に対し、同調群で非同調化など同調発生率がトレーニングと同方向の変化を示し、(1)、(2)と同様に呼吸法の学習効果が示唆された。

(6) 小括

(4)、(5)の結果から、自転車漕ぎ運動の場合、負荷が高いほど同調が起こりやすく、かつ高強度(80%VO_{2peak})で同調した場合に、酸素摂取量の低下が認められることから、高強度運動時の同調は、呼吸の効率がよくなる可能性が示唆された。しかし、一般的な有酸素性運動に用いられている60%VO_{2peak}の強度では、同調による効果は認められないことが明らかとなった。また、呼吸数を下げることが換気の効率をよくする要因であることも示唆された。今後の課題として、有酸素性運動によく用いら

れている走運動でも、同様のことが起こるかを明らかにすることが挙げられる。

(7) 総括

運動時の効果的な呼吸法として、運動と呼吸を同調させることは、高強度の運動では多少の効果はあるが、有酸素性運動でよく用いられる中程度以下の強度では効果はなく、それよりも呼吸数をなるべく抑える呼吸法が効率をよくすることが示唆された。また、運動時の呼吸を決定する要因として、学習効果が関与することが明らかとなり、繰り返して運動と呼吸の関係を学習させることにより、運動に適した呼吸に変容できるという呼吸の可塑性が示唆された。以上のことから、有酸素性運動では、ゆっくりめの呼吸を意識し、運動がきつい時は呼吸と運動のリズムを合わせるような呼吸法が望ましく、これらの呼吸法を繰り返すこと（学習）により、運動が楽になる呼吸法が習得されることが示唆された。

有酸素性運動時の呼吸法について、このように総合的に検討した研究は少なく、得られた成果は、これまでの運動時の呼吸に関する内外の研究では明らかにされていないもので、この分野において新しい知見を提供するインパクトのある研究であると言える。さらに、一般人の健康増進の手段である、有酸素性運動を継続するために非常に有用な情報であるという点で、社会に還元され、役立つ研究であると言える。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計4件)

- ① [Iwamoto E.](#), [Katayama K.](#), Yamashita S., Oshida Y. and [Ishida K.](#): Retrograde blood flow in the inactive limb is enhanced during constant-load leg cycling in hypoxia. *Eur J Appl Physiol.* 査読有, 113: 2565-2575, 2013
DOI: 10.1007/s00421-013-2694-8

②石田浩司: 運動生理学を応用した運動時の呼吸法 - 特集・呼吸の重要性を知る - . コーチング・クリニック, 査読なし, 27: 4-8, 2013

③Ishida K. and Miyamura M.: Neural regulation of respiration during exercise -Beyond the conventional central command and afferent feedback mechanisms-. J Phys Fitness Sports Med. 査読なし, 1(2): 235-245, 2012

DOI: 10.7600/jpfsm.1.235

④石田浩司, 片山敬章, 岩本えりか, 堀田典生, 杉浦弘通: 胸部圧迫が運動時の呼吸・循環応答, 筋酸素動態およびパフォーマンスに及ぼす影響. デサントスポーツ科学. 査読なし, 33: 33-42, 2012

[学会発表] (計 4 件)

①石田浩司: 運動時の換気応答 -生理学的基礎と理学療法への応用- 札幌医科大学公開講座「スポーツ理学療法とスポーツ科学の融合」(招待講演). 2014, 2, 札幌

②石田浩司, 片山敬章, 山下晋, 岩本えりか, 堀田典生: 胸郭制限トレーニングによる運動時換気亢進の学習効果. 第 68 回日本体力医学会大会. 2013, 9, 東京

③石田浩司, 片山敬章, 岩本えりか, 堀田典生, 杉浦弘通: 胸郭制限が定常負荷運動時の呼吸循環応答に及ぼす影響. 第 67 回日本体力医学会大会. 2012, 9, 岐阜

④Ishida K., Katayama K., Iwamoto E., Sugiura H. and Hotta N.: The Effects of Chest Wall Restriction on Cardio-respiratory Responses, Muscle Deoxygenation and Performance during Maximal Exercise. 17th Annual Meeting of the European College of Sports Science. 2012, 7, Belgium

[図書] (計 2 件)

①石田浩司: 呼吸の神経調節. 宮村實晴編「身体運動と呼吸・循環機能」, 真興交易医書出版部, 33-40, 2012

②石田浩司: 運動と呼吸. 田口貞善監修「健康・運動の科学」, 講談社, 133-139, 2012

[その他]

ホームページ等

石田浩司のホームページ

<http://www.htc.nagoya-u.ac.jp/~ishida/Personal/Investigation/content.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石田 浩司 (ISHIDA, Koji)

名古屋大学・総合保健体育科学センター・教授

研究者番号: 5 0 1 9 3 3 2 1

(2) 研究分担者

片山 敬章 (KATAYAMA, Keisho)

名古屋大学・総合保健体育科学センター・准教授

研究者番号: 4 0 3 4 3 2 1 4

小池晃彦 (KOIKE, Teruhiko)

名古屋大学・総合保健体育科学センター・准教授

研究者番号: 9 0 2 6 2 9 0 6

堀田 典生 (HOTTA, Norio)

中部大学・生命健康科学部・講師

研究者番号: 6 0 5 4 8 5 7 7

岩本えりか (IWAMOTO, Erika)

札幌医科大学・保健医療学部・助教

研究者番号: 4 0 6 3 2 7 8 2