

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：32620

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2023

課題番号：18K10895

研究課題名(和文) 呼気終末二酸化炭素分圧動態に着目したハイポベンチレーショントレーニングの開発

研究課題名(英文) Time-course analysis of end-tidal partial pressure of CO₂ to predict endurance performance of elite athletes

研究代表者

坂本 彰宏 (Sakamoto, Akihiro)

順天堂大学・スポーツ健康科学部・准教授

研究者番号：70615434

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究により、競技レベルが高い箱根駅伝選手やオリンピック長距離選手は、高強度運動時の換気量(VE)が低く呼気終末PCO₂(PETCO₂)が高いことが示された。これにより、PETCO₂は持続的能力を推定する新たな指標になることや、運動中のPETCO₂が高い呼吸応答に適応させるトレーニング法を開発する必要性が示された。

また10週間の持続的ペダルトレーニングを、通常呼吸または意図的に呼吸頻度(RR)を低下させVEを制限しPETCO₂が高い状態を模倣した呼吸法にて実施すると、漸増負荷試験の運動時間はどちらも向上する、40kmタイムトライアルペダリングは呼吸制限のみ向上する、以上の事が示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

持続的運動選手の評価には漸増負荷試験中の運動時間、最大酸素摂取量、最大仕事率(または速度)などが従来用いられてきた。トレーニングの開発においてもこれらの指標が向上する事が重視されてきた。しかし競技レベルが高くなると、これら従来の指標と競技力との関連性が低下してくる。本研究では、体内でのO₂代謝に関わる指標ではなく、CO₂に関わる呼吸項目(VEとPETCO₂)に着目し、CO₂感受性の関与も踏まえてエリート競技者の競技力推定を試みたことが新たな知見といえる。また、実際にVEを低くしPETCO₂を増加させる呼吸法を用いて長期間に渡るトレーニングを実施し、その効果を検証したことは世界初の試みである。

研究成果の概要(英文)： This study demonstrated that minute ventilation (VE) was lower and end-tidal PCO₂ (PETCO₂) was higher during high-intensity exercise for elite long-distance runners (Tokyo-Hakone ekiden runners and Olympic athletes) than those of lower performance-level runners. Accordingly, PETCO₂ may represent an alternative measure to predict endurance performance levels. It was also suggested that new training modalities be developed to evoke lower VE and higher PETCO₂ responses.

It also examined the effects of 10-week pedaling training 1) with spontaneous breathing, or 2) with voluntarily slowed respiratory rate (RR) to restrict VE and elevate PETCO₂. After the training period, time to exhaustion during an incremental exercise test improved for both groups, but 40km time-trial pedaling improved only for the restricted VE group. The respiratory patterns of the restricted VE group during the post-training incremental exercise test became similar to those attempted throughout the training.

研究分野：運動生理学

キーワード：hypoventilation end-tidal PCO₂ minute ventilation respiratory responses endurance hypercapnia chemoreceptive function elite runners

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

VO₂max 数値は全身性持久的パフォーマンスを推定する指標として研究・指導現場などで広く活用されてきた。しかしタイムを争う競技者にとって、運動効率、疲労耐性、代謝副産物除去・再利用能力など様々な要因が競技パフォーマンスの決定因子となる。その為、VO₂max と競技力の相関性が失われる場合がある。そこで我々が考案したのが、呼気終末二酸化炭素分圧(end-tidal partial pressure of CO₂, 略 P_{ET}CO₂)の動態を用いて持久的パフォーマンスを推定することである。

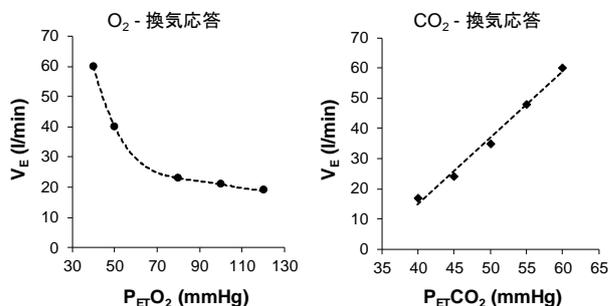


図1. 低酸素(左)および高二酸化炭素ガスに対する換気応答 (Masuda et al., 1982参照)

換気量(V_E)の増・減調節(換気応答)は主に動脈血液中の酸素分圧(P_aO₂)、二酸化炭素分圧(P_aCO₂)、水素イオン濃度(H⁺または pH)が関与している。特に換気応答は P_aO₂ よりも P_aCO₂ 変化に敏感で、換気量の著しい増加は P_aO₂ 数値が 60 mmHg 以下でようやく発生する一方、P_aCO₂ 数値は僅かな変化(2-3 mmHg)でも換気量を直線的かつ劇的に変化させる(Masuda et al., 1982)(図1)。P_{ET}O₂や P_{ET}CO₂は呼気ガスから計測され、かつ動脈内や肺胞内のガス分圧に近い値を示す為、採血をせずに体内のガス分圧状態を知ることが可能となる。

通常、運動強度が高くなると、生成された CO₂ が呼吸中枢を刺激し、運動誘発性過換気を引き起こす。これにより CO₂ 排出が亢進し P_{ET}CO₂ は徐々に低下し始め、V_E は最大値に到達する。しかし持久的鍛錬者は CO₂ の感受性が低下することで換気応答が低下するとの報告がある為、特に高強度運動時の V_E 応答が鈍ってしまい、CO₂ が体外へ排出されず分圧が高まり、その結果 P_{ET}CO₂ も高値を示すと予想される。少ない V_E で運動が可能になると、呼吸筋活動を抑え“呼吸筋疲労の発生や最大換気量の到達を遅らせる”といった利点から優れたパフォーマンスが発揮できると推察する。

この特殊な V_E・P_{ET}CO₂ 応答と持久的パフォーマンスとの関係について検証した先行研究は数例程度存在するものの、対象者は持久的競技者ではない。エリート競技者を対象とした研究は我々が知る限り、プロフェッショナルサイクリストを対象とした Lucia et al. (1999) の 1 例のみである。したがって V_E・P_{ET}CO₂ 動態を他の持久的競技種目を対象に調査することで、エリート競技者への応用性を向上できると考えた。また、意図的に V_E を制限し P_{ET}CO₂ を上昇させる呼吸法にて長期的なトレーニングを行うことで、i) 特殊な V_E・P_{ET}CO₂ 動態への適応は可能か、ii) 持久的パフォーマンスは劇的に向上するか、という疑問も生じ新たな研究の発展が期待できる。

2. 研究の目的

(1) 漸増負荷試験中に呼気ガスを計測し、V_E・P_{ET}CO₂ を含めた呼吸パラメーターを競技力別に比較した。ハイパフォーマンス群は箱根駅伝選手とオリンピックアスリートから構成され、他の長距離ランナーや中距離ランナーと比較された。

(2) 血中乳酸濃度([La⁻])が 4mM となる仕事率(OBLA)でのペダリング運動時に、低 V_E・高 P_{ET}CO₂ を模倣した呼吸を行うと、通常呼吸と比べて運動時間、疲労感、呼吸循環器応答はどのような影響を受けるかについて検証をした(一過性の効果について)。これにより、意図的に低 V_E・高 P_{ET}CO₂ を模倣して運動することの安全性や実現性を検証した。

(3) 上記の運動を 10 週間に渡り 20 セッション行うトレーニングを通常呼吸、または低 V_E・高 P_{ET}CO₂ を模倣した呼吸で遂行し、トレーニング前後におけるペダリングパフォーマンスや呼吸パターンの変化について群間比較をした(長期的な介入効果について)。

3. 研究の方法

(1) 長距離ハイパフォーマンス群(Long-High, 23 名)、長距離ローパフォーマンス群(Long-Low, 18 名)、中距離群(Middle, 10 名)のいずれかに陸上選手を振り分け、トレッドミル走を用いた漸増負荷試験中の呼気ガス応答、心拍数、最高走速度、運動時間を群間で比較した。漸増負荷試験は 160m/min から開始し、速度を 1 分ごとに 20m/min 増加させ、疲労困憊まで継続した。Long-High 群は箱根駅伝ランナー、リザーブランナー、オリンピック選手(5000m, 3000mSC)から構成された。

(2) 16 名の持久的スポーツ競技者を対象に、自転車エルゴメーターによる漸増負荷試験から OBLA 仕事率を算出した。その後、OBLA 仕事率によるペダリング運動を通常呼吸にて疲労困憊まで行い(最長 50 分)、運動時間、呼吸パターン、心拍数、疲労感、血中[La⁻]を記録した。後日、V_E を制限し P_{ET}CO₂ が高い状態にて同運動を再度実施した。V_E の制限は呼吸頻度(RR)を通常の 60% に低下させることで達成した(メトロノームでコントロール)。低 V_E・高 P_{ET}CO₂ にて運動をすることで上記の測定項目に与える影響を検証した。

(3) 自転車競技者とトライアスリートを対象に、OBLA 仕事率でのトレーニング(疲労困憊まで、または最長 60 分)を 10 週間(20 セッション)実施させた。この際、自身のトレーニングのみを継続するコントロール群(7 名)、通常呼吸にて実験トレーニングに介入するノーマル群(7 名)、RR を 60%に低下させて低 V_E ・高 $P_{ET}CO_2$ 状態で実験トレーニングに介入する V_E 制限群(9 名)の 3 群を設け、10 週間前後におけるパフォーマンス変化と呼吸変化の有無(漸増負荷試験時と 40km タイムトライアルペダリング時)を群ごとに検証した。

4. 研究成果

(1) 漸増負荷試験で計測された VO_{2max} 、最大走速度、運動時間といった従来の持久的パフォーマンス指標は、中距離群(Middle)と長距離群(Long-High と Long-Low)を区別することが出来たが、Long-High と Long-Low 群を区別することは出来なかった。一方で、 V_E と $P_{ET}CO_2$ の動態は、Long-High と Long-Low 群で異なり、Long-High 群では V_E が最も低く、高速度域での $P_{ET}CO_2$ が最も高かった(図 2)。これにより、運動中の V_E ・ $P_{ET}CO_2$ 動態はエリート競技者の競技力と関連がある為、i) 新たなパフォーマンス指標として着目すべきである、ii) 低 V_E ・高 $P_{ET}CO_2$ 応答へ適応するトレーニング開発が重要である、以上が示唆された。

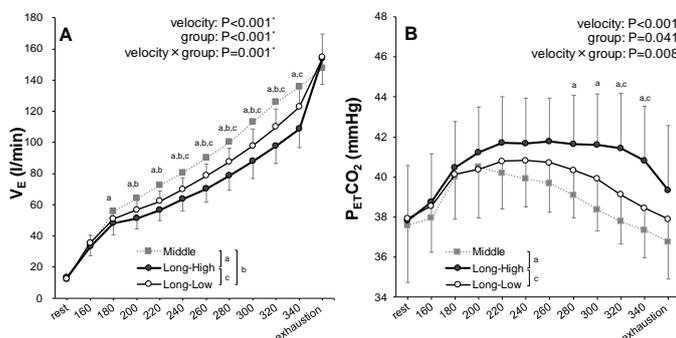


図2. 漸増負荷試験中の V_E と $P_{ET}CO_2$ の群間比較

(2) OBLA 仕事率にてペダリング運動を低 V_E ・高 $P_{ET}CO_2$ 状態(RR を 60%に低下)で実施しても、通常呼吸と比較して運動時間、 VO_2 、 VCO_2 、心拍数、疲労感、血中 $[La^-]$ に有意な影響は観られなかった。これにより、低 V_E ・高 $P_{ET}CO_2$ を模倣することに対して対象者は速やかな順応が可能であることや、低 V_E ・高 $P_{ET}CO_2$ 呼吸にてトレーニングを実施することの安全性や実現性が示された。

(3) ①漸増負荷試験の変化
 漸増負荷試験で記録されたパフォーマンス項目を 10 週間前後で比較すると、ノーマル群(通常呼吸で 20 セッションのトレーニング)では OBLA 仕事率と運動時間が向上した。 V_E 制限群(RR を 60%に低下させ低 V_E ・高 $P_{ET}CO_2$ 状態で 20 セッションのトレーニング)では運動時間のみが向上した。 VO_{2max} はノーマルと V_E 制限群どちらにも向上が観られなかった。コントロール群(自身のトレーニングのみを継続)では上記全ての項目において変化は観られなかった。

漸増負荷試験中の呼吸パターンも 10 週間前後で変化が観られ、ノーマル群では同仕事率に対する VO_2 と VCO_2 に低下が観られた。これはペダリング効率が向上したことを示唆する。 V_E 制限群では同仕事率に対する RR が低下し、一回換気量(V_T)の増加が観られた。 V_E は低下する傾向であったが、その変化は有意水準に達しなかった($P=0.053$)。しかし、高仕事率での $P_{ET}CO_2$ が増加した。これらの結果から低 V_E ・高 $P_{ET}CO_2$ を模倣して長期的にトレーニングをすると、i) 自発呼吸状況においても、模倣した呼吸パターンが引き継がれること、ii) しかし明確な低 V_E ・高 $P_{ET}CO_2$ への変化に至るには 10 週間(20 セッション)のトレーニングでは不十分であること、以上の 2 点が示された。尚、コントロール群においては、全ての呼吸項目に変化は観られなかった。

②40km タイムトライアルペダリング

40km タイムトライアルペダリングの記録は V_E 制限群のみで向上が観られた。トレーニング後のタイムトライアルでは速度の増加にも関わらず V_E 、 $P_{ET}CO_2$ 、RR がトレーニング前と同様の数値であり、 V_T においては低下が観られた。これらから、 V_E 制限群では換気予備能(ventilatory reserve)や死腔換気率(dead-space/tidal-volume ratio)の向上が 40km タイムトライアルの向上に関与したことが示唆された。

参考文献

Lucia, A., Carvajal, A., Calderon, F. J., Alfonso, A., Chicharro, J. L., 1999. Breathing pattern in highly competitive cyclists during incremental exercise. Eur J Appl Physiol Occup Physiol 79, 512-521.
 Masuda, Y., Yoshida, A., Hayashi, F., Sasaki, K., Honda, Y., 1982. Attenuated ventilatory responses to hypercapnia and hypoxia in assisted breath-hold divers (Funado). Jpn J Physiol 32, 327-336.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 0件）

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 稲川翔太、坂本彰宏、青木和浩、内藤久士
2. 発表標題 Voluntary hypoventilationが持久的運動の継続時間と生理学的応答に与える影響
3. 学会等名 第77回日本体力医学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Sakamoto A, Inagawa S, Aoki K and Naito H.
2. 発表標題 Effects of voluntary hypoventilation on exercise duration and physiological responses during continuous exercise
3. 学会等名 Sports Medicine Australia Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Sakamoto A, Naito H and Chow CM.
2. 発表標題 End-tidal partial pressure of CO2 and minute ventilation: new measures to distinguish elite long-distance runners
3. 学会等名 Sports Medicine Australia Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 坂本彰宏、松本陽平、内藤久士
2. 発表標題 呼吸終末二酸化炭素分圧を用いて持久的ランナーの競技力を推定できるか: a preliminary study
3. 学会等名 第73回日本体力医学会大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

学校法人順天堂 研究者情報データベース
<https://kenkyudb.juntendo.ac.jp/search/researcher.php?MID=6020>
Researchmap マイポータル
<https://researchmap.jp/a-sakamo/?lang=japanese>
ResearchGate
<https://www.researchgate.net/profile/Akihiro-Sakamoto>
学校法人順天堂 研究者情報データベース
<https://www.juntendo.ac.jp/graduate/kenkyudb/search/researcher.php?MID=6020>
坂本彰宏 マイポータル researchmap
<https://researchmap.jp/a-sakamo/?lang=ja>
学校法人順天堂 研究者情報データベース
<https://www.juntendo.ac.jp/graduate/kenkyudb/search/researcher.php?MID=6020>
順天堂大学 研究者情報データベース
<https://www.juntendo.ac.jp/graduate/kenkyudb/search/researcher.php?MID=6020>
順天堂大学 研究者情報データベース
<https://www.juntendo.ac.jp/graduate/kenkyudb/search/researcher.php?MID=6020>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	ちやお ちんもい (Chow Chin Moi)	シドニー大学・Faculty of Medicine and Health・Associate Professor	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------