

令和 6 年 4 月 25 日現在

機関番号：33402

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20K11431

研究課題名(和文) 低換気トレーニングは、低酸素トレーニングの代替手段となりうるか？

研究課題名(英文) Can hypoventilation training be an alternative method to hypoxic training?

研究代表者

中垣 浩平 (NAKAGAKI, Kohei)

山梨学院大学・スポーツ科学部・教授

研究者番号：30549473

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、1) 常酸素環境下での随意的な呼吸制限運動時の生理的応答及び2) 常酸素環境下における随意的な呼吸制限トレーニングの効果を明らかにすることを目的とした。本研究の結果、先行研究とは異なり、随意的な呼吸制限によって運動時の酸素摂取量は低下しないことが明らかとなった。随意的な呼吸制限を伴う運動時の生理的応答は、低酸素環境(酸素濃度17.4%)での通常呼吸運動時の生理的応答と同等であることが示された。また、低換気トレーニングによって二酸化炭素の感受性が低下する可能性が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって、随意的な呼吸制限を伴う運動時の生理的応答(心拍数、酸素飽和度及び血中乳酸濃度)は、標高1500 m程度の準高地環境において通常呼吸で運動した際の生理的応答と同等であることが明らかとなった。また、随意的な呼吸制限を伴う低換気トレーニングは、二酸化炭素の呼吸感受性を低下させ、運動時の主観的運動強度を低下させる可能性が示唆された。これらの知見から、低換気トレーニングは、1) 準高地トレーニングの代替手段として、2) 二酸化炭素の感受性を低下させるためのトレーニングとして効果的になる可能性が示された。

研究成果の概要(英文)：The purposes of this study were to investigate 1) the physiological responses during voluntary respiratory restriction exercise under normoxic conditions and 2) the effects of voluntary respiratory restriction(hypoventilation) training under normoxic conditions. The results of this study showed that, in contrast to previous studies, voluntary respiratory restriction did not decrease oxygen uptake during exercise. Physiological responses during exercise with voluntary respiratory restriction were similar to during normal breathing exercise in a hypoxic environment (17.4 % oxygen concentration). It was also suggested that hypoventilation training may reduce carbon dioxide sensitivity.

研究分野：トレーニング科学

キーワード：低換気 止息 呼吸制限 低酸素

## 1. 研究開始当初の背景

随意的に呼吸を止めた際に生じる生理的応答は、フリーダイバーなどのアスリートや睡眠時無呼吸症候群などの疾病患者を対象に、数多く行われている。例えば、de Bruijn et al. (2008) は、健常な被験者を対象に、5回の息止めに2分のレストを挟み15回繰り返すだけで、血中エリスロポエチン (EPO) 濃度が24%増加したことを報告している。また、睡眠時無呼吸症候群の患者は、健常者と比較してヘモグロビンや EPO の濃度が高くなることが報告されている (Imagawa et al., 2001)。これらの呼吸制限に伴い生じる造血作用に関する生理的応答は、アスリートが低酸素 (高地) トレーニングを導入する目的の一部と共通している (Levine et al., 1991)。

近年、Woorons et al.の研究グループは、運動中の呼吸を制限 (随意的な息止め) した際の生理的応答やトレーニング効果に対する検討を精力的に実施している。彼らは、水泳選手を対象に、1)最大吸気した状態での息止め (図 1. A: VHH)、2)安静時呼気終末での息止め (図 2. B: VHL)、3)通常呼吸 (NB) の3条件で、50 m 泳を10回繰り返す実施した際の生理的応答を比較している (Woorons et al., 2014)。その結果、運動中の経皮的動脈血酸素飽和 ( $SpO_2$ ) は、NB > VHH > VHL の順で有意に低値を示し、VHL では90%を下回る値が報告されている。また、血中乳酸濃度 (La) や主観的運動強度 (RPE) は VHH 及び NB と比較して VHL にて有意に増加することが示されている。さらに彼らは、ラグビー選手を対象に、VHL 及び NB の2条件下にて、間欠的スプリントトレーニング (40 m オールアウト走を30秒毎に8回繰り返す×2~3セット) を4週間 (7セッション) 実施したところ、NB と比較して VHL にて有意に間欠的スプリントランニングパフォーマンスが増加したことを報告している (Fornaiser-Santos et al., 2018)。

このように、運動時の呼吸を随意的に制限し、安静時呼気終末での息止めを伴う低換気トレーニングは、従来の低酸素トレーニングや高地トレーニングと同等の生理的応答及びトレーニング効果をもたらす可能性がある。

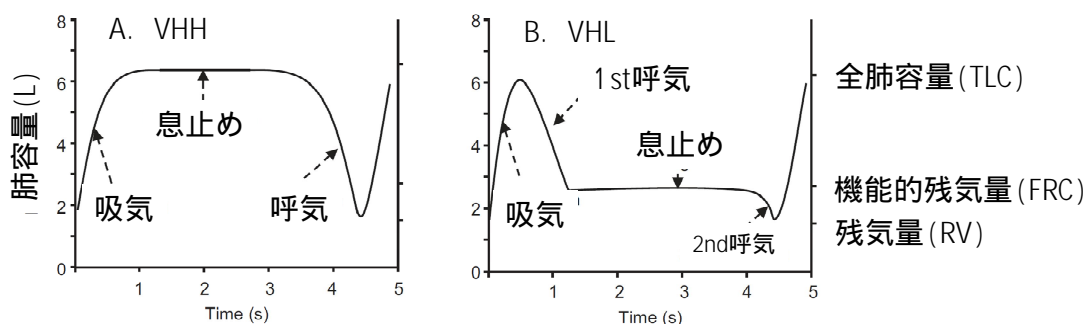


図 1. 運動時の呼吸制限方法

(A. 最大吸気状態での息止め, B. 安静呼気終末での息止め)。

## 2. 研究の目的

(1) 近年、呼気ガス分析法として、Breath by Breath (B by B) 法が広く普及している。しかし、B by B は、通常とは異なる呼吸リズムが生じた場合、その測定値の妥当性が著しく低下する事実はあまり知られていない。先行研究では、低換気運動時の呼気ガス分析を B by B 法にて実施し、NB と比較して VHL での酸素摂取量が有意に低下することを報告しているが、そのデータの妥当性は疑わしい。本研究では、呼吸リズムに測定値が影響されないダグラスバッグ法を用いて呼気ガス分析を実施し、低換気運動中の生理的応答を明らかにすることを目的とした。

(2) 低換気トレーニングの効果を精力的に研究している Woorons et al.の研究部グループは、高強度間欠的トレーニングを中心に、その効果を検討している。近年、低酸素 (高地) 環境下における高強度間欠的トレーニングが、無酸素性代謝及び高強度間欠的パフォーマンスに与える影響が注目されており、彼らの研究もこれに沿うものである。一方、エリートクロスカントリースキーヤーなどの持久系アスリートは、非常に多くの時間を高地環境での低強度 (<La 2mM) トレーニングに費やすことが報告されている (Tønnessen et al., 2014)。一過性の息止めに伴い EPO 濃度が増加する知見と合わせると、低強度長時間トレーニングに対する低換気トレーニングの導入が有酸素性代謝や持久系パフォーマンスの改善に効果的に働くことが予想される。本研究では、常酸素環境下での低換気・低強度長時間トレーニングの効果を明らかにすることを目的とした。

### 3. 研究の方法

#### (1) 低換気運動中の呼気ガス応答

低換気運動中の呼気ガス応答を明らかにするために、通常呼吸 (NB) 条件と随意的に呼吸制限をした (VHL) 条件の 2 条件でトレッドミルランニングを実施し、その際の生理応答を比較した。被験者は大学運動部に所属する男子学生 10 名であった。トレッドミルの速度は、170 m/min, 190 m/min, 210 m/min 及び 230 m/min に設定し、各速度での運動時間は 6 分間 (休憩 2 分) とした。ダグラスバッグを用いて、各ステージ後半 2 分間 (運動開始後 4 - 6 分) の呼気ガスを採取し、換気量、酸素摂取量、二酸化炭素排出量及び呼吸交換比を算出した。運動中の心拍数 (Polar 社製, M400) は 1 拍毎に、SpO<sub>2</sub> (コニカミノルタ社, Pulsox-300i) は 1 秒毎にそれぞれ記録した。血中乳酸濃度 (EKF Diagnostics 社製, BIOSEN C-line) 及び RPE (全身・呼吸) は、各ステージ終了直後に測定した。VHL 条件では、吸気後に安静時呼気位まで息を吐いた後に極力息を止め、吸気の直前に残りの空気を吐ききり、再び吸気することを繰り返した。呼吸制限は、被験者自身が最大で止めることのできる歩数にあわせて設定した。走行中に息止めに辛くなった場合は、歩数を減らし、正しい呼吸方法を継続できるようにした。

#### (2) 低換気運動と低酸素環境下での通常呼吸運動の生理応答の違い

低換気運動中の生理応答 (特に SpO<sub>2</sub>) を明らかにするために、呼気位での随意的な呼吸制限条件 (VHL) 及び低酸素環境下 (酸素濃度 17.4%) での通常呼吸条件 (HypoNB) の 2 条件で自転車エルゴメータペダリングを実施し、その際の生理応答を比較した。被験者は、男子学生 6 名であった。自転車エルゴメータの負荷は、78W, 110W, 141W, 172W 及び 204W に設定し、回転数は 80 rpm に規定した。各負荷での運動時間は 6 分間 (休憩 2 分) とし、運動中の心拍数 (Polar 社製, M400) は 1 拍毎に、SpO<sub>2</sub> (コニカミノルタ社, Pulsox-300i) は 1 秒毎にそれぞれ記録した。血中乳酸濃度 (EKF Diagnostics 社製, BIOSEN C-line) 及び RPE は、各ステージ終了直後に測定した。

#### (3) 低換気・低強度有酸素性トレーニングの効果

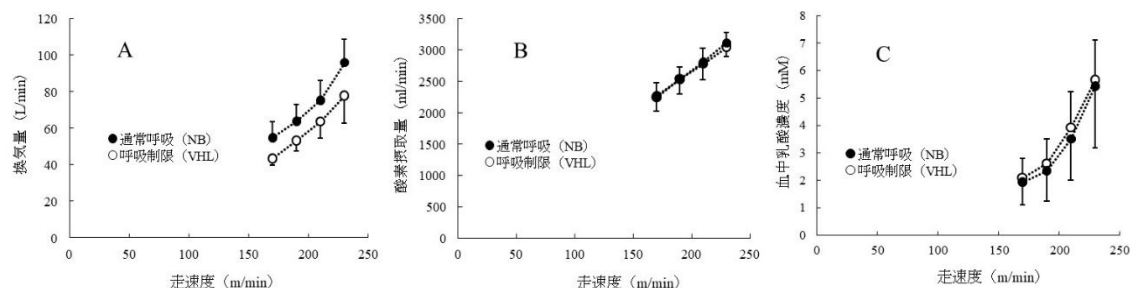
低換気・低強度有酸素性トレーニングの効果を事例的に検討した。被験者は、過去に陸上競技長距離種目に専門的に取り組んだ経験のある男子学生 1 名であった。被験者は、NB 条件にて 1 か月間のトレーニングを実施後に、VHL 条件にて 1 か月間のトレーニングを実施した。VHL 条件では、トレーニング中に連続して呼吸制限を実施することが困難であったため、4 分間の随意的な呼吸制限と 2 分間の通常呼吸を繰り返した。トレーニング内容は、両条件間で共通しており、10 km のランニング (同一コース) を、週 4 回の頻度で実施した。トレーニング中の心拍数及び距離は、心拍計 (Garmin 社, ForeAthlete 645 Music) に記録した。なお、VHL 条件時は、トレーニング中の SpO<sub>2</sub> (コニカミノルタ社, Pulsox-300i) を記録した。

トレーニング効果を評価するために、漸増負荷テストをトレーニング前、NB 条件でのトレーニング後及び VHL 条件でのトレーニング後の計 3 回実施した。漸増負荷テストは、1 ステージ 4 分間 (休憩 1 分間) とし、9 km/h から 14 km/h まで 6 ステージ繰り返した。6 ステージ終了後は 5 分間の休息をはさみ、14 km/h で再び走り始め、3 分経過後から疲労困憊に至るまで毎分 1% ずつ傾斜を増加させた。漸増負荷テスト中の換気量及び呼気ガスは呼気ガス分析装置 (ミナト医科学社, エアロモニタ AE-310s) を用いて分析した。テスト中の心拍数は、心拍計 (Polar 社, M400) を用いて記録した。また、各ステージ終了後に血中乳酸濃度 (EKF Diagnostics 社, Biosen-Cline) を測定した。

### 4. 研究成果

#### (1) 低換気運動中の呼気ガス応答

NB 条件と VHL 条件の 2 条件でトレッドミルランニングを実施した際の生理応答を図 2 (A 換気量, B 酸素摂取量, C 血中乳酸濃度, D 心拍数, E 酸素飽和度, F 主観的運動強度) に示した。換気量及び SpO<sub>2</sub> は、NB 条件と比較して VHL 条件において有意に低下した。心拍数及び RPE は、NB 条件と比較して VHL 条件において有意に高値を示した。先行研究とは異なり、VHL 条件の酸素摂取量は、NB と有意な差は認められなかった。また、血中乳酸濃度にも条件間に有意な差は認められなかった。VHL 条件で酸素摂取量が有意に低下するという先行研究の見解は、測定機材・測定方法に起因する測定誤差である可能性が示唆された。



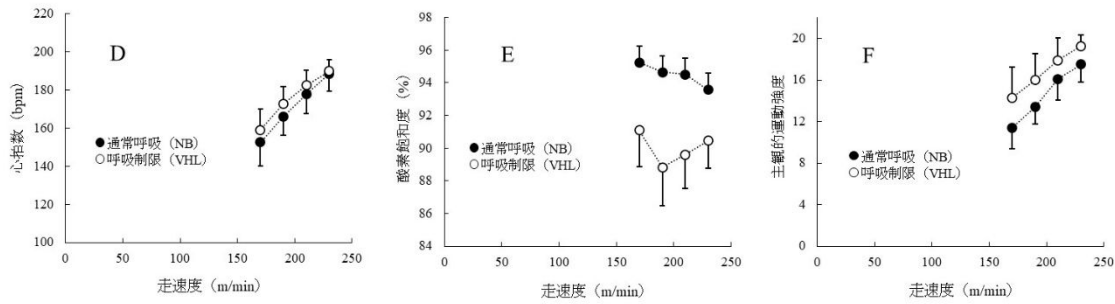


図2. 通常呼吸条件 (NB) と随意的に呼吸制限をした条件 (VHL) の生理応答の違い

(2) 低換気運動と低酸素環境下での通常呼吸運動の生理応答の違い

平地での VHL 条件と低酸素環境 (酸素濃度 17.4%, 標高 1500 m 程度) での通常呼吸条件 (HypoNB) の 2 条件で自転車ペダリングを実施した際の生理応答を図 3 (A 心拍数, B 酸素飽和度, C 血中乳酸濃度, D 主観的運動強度) に示した. 運動時の心拍数, SpO<sub>2</sub> 及び血中乳酸濃度には, 条件間に差は認められなかった. RPE は, HypoNB 条件と比較して VHL 条件において 110W, 141W 及び 172W 時に有意に高くなった.

呼吸を止めると, 動脈血酸素分圧 (PaO<sub>2</sub>) は低下し, 二酸化炭素分圧 (PaCO<sub>2</sub>) は上昇する. PaO<sub>2</sub> の低下及び PaCO<sub>2</sub> の増加は, 呼吸中枢を刺激する. PaO<sub>2</sub> の低下及び PaCO<sub>2</sub> の増加に対して, 身体では換気量を増加させるように調整されるのに対し, VHL 条件では, それに反して呼吸を止める必要がある. そのため, HypoNB 条件と比較して VHL 条件では息苦しさが強くなり, RPE が高くなったものと推察される.

本研究の結果から, 平地での随意的な呼吸制限を伴う運動時の生理応答は, PaCO<sub>2</sub> の増加によって中強度運動時の RPE が高くなることを除き, 標高 1500 m 程度の準高地環境で運動した際の生理応答と差がないことが明らかになった.

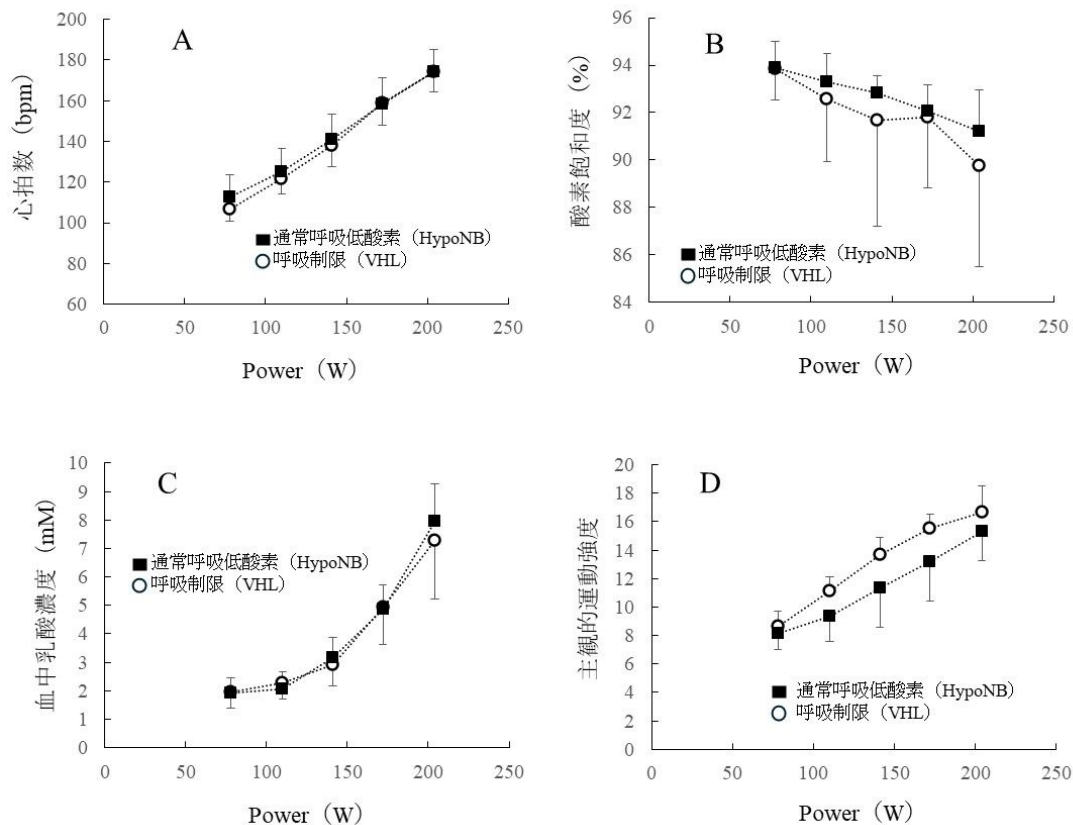


図3. 平地での呼吸制限条件 (VHL) と低酸素環境下での通常呼吸条件 (HypoNB) の生理応答の違い

### (3) 低換気・低強度有酸素性トレーニングの効果

トレーニング中の平均走速度は、NB 条件及び VHL 条件でそれぞれ  $206.6 \pm 4.8$  m/min 及び  $187.5 \pm 2.0$  m/min となり、NB 条件と比較して VHL 条件で有意に低下した。トレーニング中の平均心拍数は、NB 条件では  $160.3 \pm 2.8$  bpm 及び VHL 条件では、 $158.8 \pm 4.9$  bpm であり、両者に有意な差は認められなかった。血中乳酸濃にも、条件間に有意差は認められなかった（約 2 mM）。なお、VHL 条件におけるトレーニング中の  $SpO_2$  は、86 - 92 %であった。

漸増負荷テスト中の換気量、酸素摂取量、二酸化炭素排出量、心拍数及び血中乳酸濃度には、トレーニングに伴う継時変化はみられなかった。漸増負荷テスト中の相対運動強度 ( $\% \dot{V}O_2\max$ ) に対する RPE は、継時的に低下する傾向にあった（図 4）。

本研究の目的は、随意的な呼吸制限を伴う低強度有酸素性トレーニングの効果を、事例的に検討することであった。トレーニング前と比較して、NB 条件でのトレーニング後及び VHL 条件でのトレーニング後の生理的能力には、ほとんど変化はみられなかった。トレーニング効果が認められなかった理由の一つは、トレーニング内容を低強度有酸素性トレーニングに限定したことにあると推察される。被験者は、過去に陸上競技長距離種目に取り組んだ経験があることから、低強度有酸素性トレーニングだけでは、生理的能力の改善を誘発するためのトレーニング刺激として不十分だった可能性がある。

本研究において、トレーニング効果が認められたのは、相対運動強度に対する RPE のみであった。特に、トレーニング時の心拍数（約  $60\% \dot{V}O_2\max$ 、約 160 bpm）と同水準で運動している際の RPE は、VHL 条件でのトレーニング後に低下した。VHL 条件でのトレーニングは、 $PaCO_2$  の上昇に対する息苦しさを抑制する可能性が示唆された。

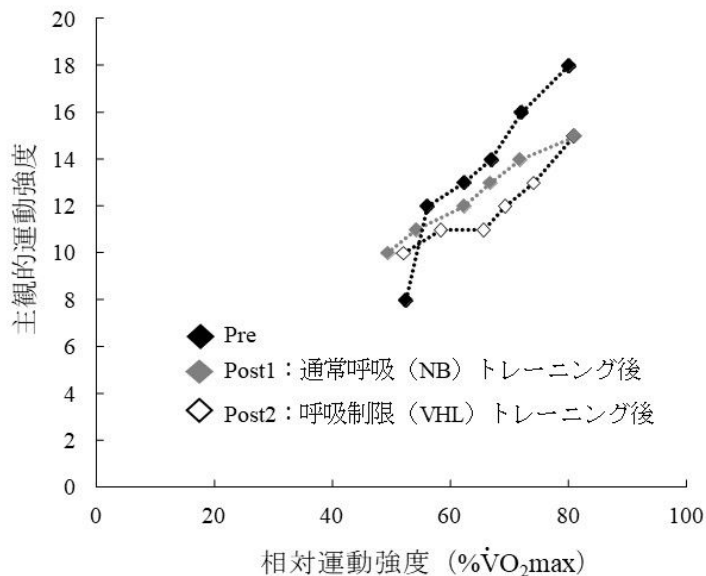


図 4 . 相対運動強度に対する主観的運動強度の変化

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 中垣, 浩平	4. 巻 7
2. 論文標題 Wattbike AtomXの信頼性及び妥当性	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 山梨学院大学スポーツ科学研究	6. 最初と最後の頁 21-24
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究分担者	今 有礼  (KON Michihiro)  (00455445)	東洋大学・ライフデザイン学部・教授    (32663)	

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