

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 20 日現在

機関番号：82632

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2016

課題番号：25871205

研究課題名（和文）低酸素環境が運動神経適応に及ぼす影響

研究課題名（英文）Effect of hypoxia on human motor skill learning.

研究代表者

松林 武生（MATSUBAYASHI, Takeo）

独立行政法人日本スポーツ振興センター国立スポーツ科学センター・スポーツ科学部・研究員

研究者番号：20549464

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）：酸素が薄い環境（低酸素環境）では、神経系に様々な影響が生じることが報告されている。本研究は、運動学習（動作の習熟）に対しても低酸素環境は影響を及ぼすのかを検討した。自転車エルゴメータに乗り、提示されたターゲットにあわせて力発揮をしながらペダリングする課題を、通常酸素と低酸素（標高3,000m相当の酸素濃度）の環境下で行い、ターゲットにあわせた力発揮が上達していく過程を比較した。どちらの環境においても上達は見られたが、その程度に差は認められなかったことから、標高3,000m程度の低酸素環境であれば、運動学習には影響を及ぼさないことが明らかとなった。

研究成果の概要（英文）：Hypoxic environments can affect human nervous systems in several ways. In this study, it was examined whether hypoxia could also affect the process of motor skill learning. Participants challenged the tasks tracking the pedaling-torque targets on a bicycle ergometer under both normal and hypoxic environments (equivalent to the altitude of 3,000m), and their improvements in target-tracking ability were examined. The ability improved in both environments, although no statistical difference was found between two environmental conditions. The present results implied that, at least up to the altitude of 3,000m, the hypoxia would not affect the process of motor skill learning.

研究分野：運動生理学

キーワード：低酸素環境 運動学習

1. 研究開始当初の背景

低酸素環境下では、運動神経の興奮性の低下 (Szubski et al., 2006)、脳内酸化レベルの低下にともなう末梢筋活動低下と運動パフォーマンス低下 (Goodal et al., 2012; Smith and Billaut, 2010) などが生じると報告されている。これらは低酸素環境が運動神経系に及ぼす急性の影響であるが、このような環境下に長く滞在した際の長期的な影響に関しては情報が少ない。また、運動の種類や、運動神経適応の種類によっても、低酸素環境が及ぼす影響は異なるものとなる可能性がある。これらの詳細についてはさらに考察をすすめるためには、多様な実験条件のもとでの検討が多く必要である。

2. 研究の目的

本研究は、動作習熟 (運動学習) の過程に対して低酸素環境が及ぼす影響について検討することを目的とした。自転車ペダリング運動を用いた学習課題を作成し、この運動に習熟していく過程に低酸素環境が及ぼす影響を、実験的に検討した。

3. 研究の方法

(1) 自転車ペダリングは日常的に慣れ親しまれた運動であり、既学習の (学習の余地に乏しい) 動作である。本研究では運動学習過程を明確に検討するために、ペダリング時の発揮トルクをトルクターゲットに合わせる課題を作成し、これを学習課題とすることにした (図 1)。ただし、トルクターゲットが同一の条件下であっても、被験者によって学習課題の相対的難易度が異なり、発揮トルクとターゲットとの誤差 (トルク誤差) が減少していく過程 (運動学習) に差異が生じる可能性も考えられる。そこでまず、同一ターゲット課題に対するトルク誤差の大きさ、および運動学習の個人差を把握するための実験を行った。

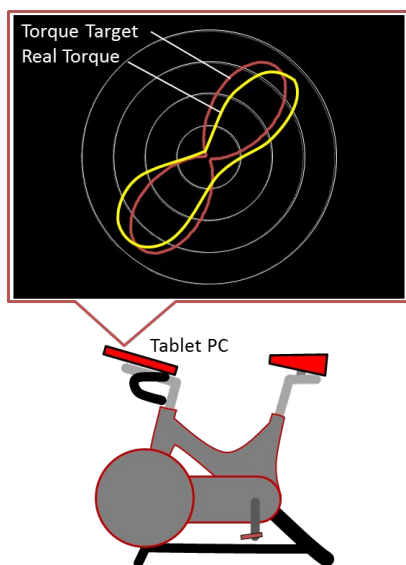


図1 本研究で用いた運動機器セッティング

3種類のトルクターゲット (A、B、C) を用いた学習課題を、それぞれ5名の成人男性被験者 (A ; 30.8±2.9 歳、173.3±5.6cm、75.0±3.8kg、B ; 31.0±3.5 歳、175.7±7.6cm、70.2±9.9kg、C ; 30.6±3.2 歳、173.9±7.2cm、75.4±9.5kg) に行わせた。トルクターゲットは、ペダリング速度 50rpm にて運動負荷が 120W となる条件のもとで形状のみが異なるものを事前に 25 種類準備し (図 2)、ここからランダムに 3 つを選択した。運動にはリアルタイムにペダリングトルクをモニタすることが可能な自転車エルゴメータ (Wattbike, Wattbike 社製) を用い、上記ペダリング速度と運動強度を満たすように負荷を設定して利用した。エルゴメータから得られるペダリングトルクおよびクランク角度の情報 (クランク角度 - トルクのレーダー図) を、エルゴメータと接続したタブレット PC 上に 1 サイクル毎に表示させ (図 1)、この上にターゲットトルク曲線が描かれクリアシートを重ねることで、学習課題を提示した。ペダリング運動時間は 2 分間とし、この間の発揮トルクとクランク角度を 100Hz にて記録した。発揮トルクとターゲットとの誤差 (絶対値) について、30 秒時間窓での移動平均を算出し、その時系列推移を検討した。運動開始直後の 10 秒間は、ペダリングの負荷や動作が安定しないため分析から除外し、運動開始 10 秒後から 40 秒後までの 30 秒間におけるトルク誤差平均値を、学習前の初期値とした。運動終了までにトルク誤差 30 秒移動平均は減少していったが、これの最小値を学習後のトルク誤差とし、学習前後のトルク誤差比 (= 学習後 / 学習前) を学習率として算出した。被験者ごとに算出したトルク誤差の初期値、最小値、学習率から、被験者間の変動係数を算出することで、個人差の程度を検討した。

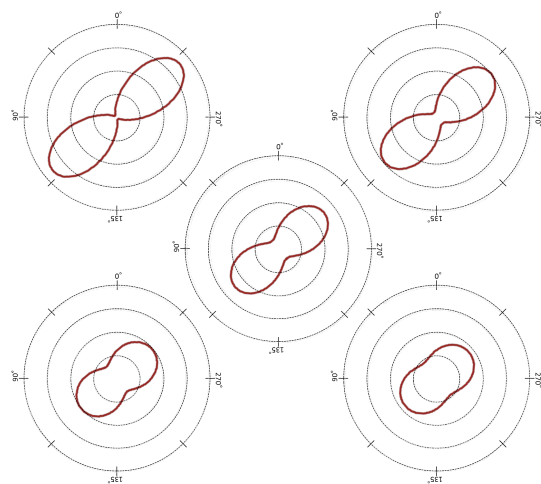


図2 事前準備したトルクターゲットの一例

クランク角度 (左足ペダルが真上に位置するとき 0°) とトルクとの関係をレーダー図として表現している。ここに示した 5 つを基本形状とし、それぞれについてターゲットの楕円の傾きが異なるものを 5 種類ずつ作成することで、合計 25 種類の形状を準備した。

また、同一被験者に対して同一ターゲット課題を繰り返し行わせた場合の、学習率の再現性（変動性）についても検討し、上記検討結果を考察する際に利用した。5名の成人男性被験者（30.0±3.1歳、177.4±7.8cm、73.7±5.8kg）に対して、同一トルクターゲット（ターゲット形状は被験者毎にランダムに決定）を用いた学習課題を2回行わせ、トルク誤差の初期値、最小値、学習率に関する変動係数を被験者毎に算出した。トルクターゲットの提示方法や、ペダリング運動の回転数、負荷設定、運動時間などは、すべて前述の実験の通りとした。1回目の課題実施時に生じる学習効果が2回目を持ち越される可能性が懸念されたが、学習効果の消失に必要な期間についての見当が無かったため、本実験ではランダムに7~40日の間隔を挟むこととした。

(2) 運動学習に対する低酸素環境の影響を検討するために、成人男性被験者9名（30.7±2.8歳、174.9±7.1cm、73.7±10.5kg）を対象として、常酸素条件および低酸素条件（酸素濃度14.5%、標高3,000m相当）において学習課題を行わせ、条件による学習の差異を検討した。それぞれの被験者に対して、条件ごとに5種類の異なるターゲットをランダムに準備し、各ターゲット課題を2分間ずつ行わせた。異なる条件下での課題実施の間には、少なくとも1日の間隔を挟んだが、各条件における5種類のターゲット課題の間には休息を挟まず、連続的に実施した。低酸素条件では、窒素補填法によって酸素濃度を人工的に低下させた実験室内にて課題を実施した。この際、被験者は運動前に同実験室内にて20分以上の安静をとり、動脈血酸素飽和度（SpO₂、コニカミノルタ社製PULSOX-300iを用いて測定）が安定した状態を確認してから運動を開始した。トルクターゲットの提示方法や、ペダリング運動の回転数、負荷設定などは、すべて前述の実験の通りとした。トルク誤差の初期値、最小値、学習率（トルク誤差学習率）を、各ターゲット課題について計算したのち、トルク誤差学習率が最大および最小となった2つのターゲット課題を除く中間位3課題での平均値を、最終的なトルク誤差学習率とした。

また本実験では、運動学習を筋電図からも検討した。ペダリング運動中の左右外側広筋の表面筋電図を記録したのち（1000Hz、多チャンネルテレメータシステムWEB-7000、日本光電社製）1サイクル毎の筋放電量（筋電図積分値、iEMG）に対して、そのサイクルを20°ずつ分割した各クランク角度域における筋放電量比率を算出し、この比率がサイクル毎に見せる変動性（30秒時間窓における移動標準偏差、各クランク角度域にて移動標準偏差をまず算出した後に全クランク角度域で移動標準偏差の平均値を算出）に関して、トルク誤差の場合と同様に、初期値、最小値、学習率（筋電図学習率）を算出した。なお筋

電図の分析は、トルク誤差学習率の中間位3課題を対象として行った。

トルク誤差学習率、筋電図学習率ともに、条件間の差異の検定には、対応のあるt検定を用いた。有意水準はp<0.05とした。

4. 研究成果

(1) 3種類のトルクターゲットを用いた学習課題に対して、トルク誤差の初期値、最小値、学習率の個人差は表1のようになった。トルク誤差の初期値および最小値の変動係数は最大41.8%であり、大きな個人差が存在した。このことは、同一のトルクターゲットを用いた課題であっても、被験者によってその相対的な難易度が異なる可能性を示唆している。学習率における変動係数は、これに比較すると小さかったものの、トルクターゲットの種類によっては18.8%と大きな値であった。

表1 3種類のトルクターゲットを用いた課題におけるトルク誤差の初期値、最小値、学習率の被験者間差（変動係数、単位；%）

	トルクターゲット		
	A	B	C
初期値	13.4	34.1	26.4
最小値	14.6	41.8	23.8
学習率	8.9	7.8	18.8

同一被験者に同一ターゲット課題を繰り返し行わせたところ、トルク誤差初期値の変動係数は7.4 - 33.5%、最小値については7.4 - 25.4%、学習率については0.0 - 16.6%の範囲であった。学習率の変動係数が0.0%となった被験者が存在したが、これは2回繰り返した学習課題のどちらにおいてもトルク誤差の初期値が非常に小さく、その後の学習が皆無（最小値と初期値が等しいため、学習率が1.00と算出される）の場合であった。この事例を除くと、学習率の変動係数は6.4 - 16.6%の範囲であった。これらの値は、先述の被験者間差を表す変動係数と比較して、僅かに小さい傾向にあった。

学習効果の持ち越しが生じたかを確認するために、トルク誤差（初期値および最小値）を1回目と2回目と比較したところ、2回目のほうが1回目よりも小さい傾向にあった（図3A）。学習率に関しても2回目のほうが大きい（学習していない）傾向にあった（図3B）。これらの結果は、2回目の課題実施時には学習効果の持ち越しが少なからず存在したことを示唆している。同じターゲット課題を同一被験者に繰り返し行わせた場合、2回目には初期値からトルク誤差が少なくなり、学習率に劣る評価となり易くなることが推察される。これは、同一被験者、同一ターゲット課題における再現性を下げる（学習率等の変動係数を大きくする）一因にもなった

と考えられる。ただし、そのようにして生じた同一被験者内における変動性も、先に検討した同一ターゲット課題に対する被験者間差（学習率に関して変動係数が最大 18.8%）より小さい傾向にあった。つまり、被験者間差は個人内変動よりも大きいということが示唆される。

なお、2 回の課題実施の間隔と学習率等に関する変動係数には、明確な関係性は認められなかった。40 日の間隔を挟んだ被験者においても学習効果の持ち越しは認められ、学習効果の消失には少なくともこれより長い期間が必要になると推察された。

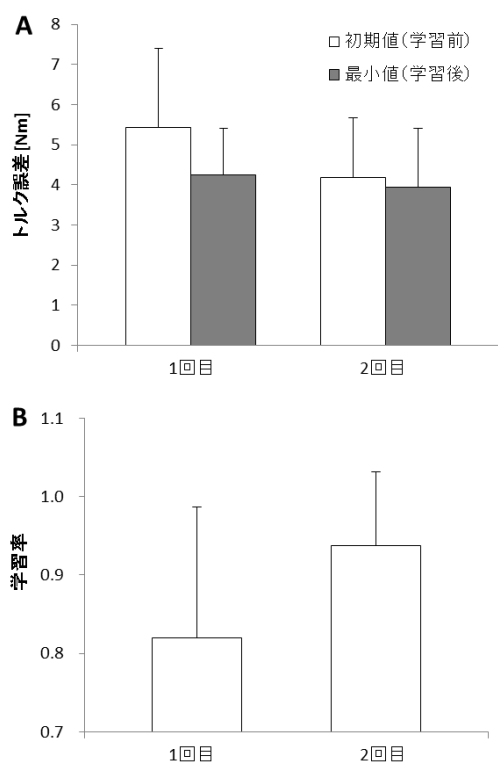


図 3 同一ターゲット課題を同一被験者に繰り返し行われた際のトルク誤差 (A) と学習率 (B)。

本研究は、低酸素環境が運動学習に及ぼす影響を検討することを目的としており、常酸素条件と低酸素条件との間で、運動学習を比較することが必要となる。上記の結果は、同一ターゲット課題を用いた場合でも、被験者ごとに相対的な難易度が異なることを示唆し、その差異は被験者内に現れる変動性よりも大きいことを示唆している。このことから、条件間で学習課題の難易度を統一するためには、同一被験者が 2 条件の双方にて課題を行い比較する、クロスオーバーデザインでの実験が望ましいことが推察される。ただし、同デザインの実験においては、先行条件課題で生じた学習効果が、後行条件に持ち越されることが避けられない。そこで本研究では、運動学習の条件間での比較に対して、クロスオーバーではあるが異なるターゲット課題

を用いるデザインを考案した。異なるターゲット課題を用いることで、学習の持ち越し効果を小さく抑えることができると期待される。一方で、学習課題の難易度を統一できない可能性が生じるが、これをできる限り統一するために、各条件について複数ターゲットを準備し、これらを用いる学習課題を実施した後、学習率順位が中央付近となった課題のみを分析に利用することとした。このように分析を行うことで、難易度が高い、もしくは低い学習課題を排除し、難易度の均一化を図ることができると考えられる。

なお、この方法では多くのターゲット課題を実施する必要があるため、学習期間を長期に設定することが難しくなる。運動学習は長期の学習期間を経て達成される例が現実には多いため、本研究においても当初は学習期間を長期に設定することを検討していた。しかしながら、方法論的に困難性が高いことから、短期（2 分間）に生じる運動学習のみを対象とすることにした。

(2) 運動学習に対する低酸素環境の影響を検討したところ、トルク誤差学習率と筋電図学習率の双方において、常酸素条件と低酸素条件での有意な差異は認められなかった(図 4)。このことから、少なくとも本実験で設定した条件においては、運動学習に対して低酸素環境は影響しないことが示唆された。

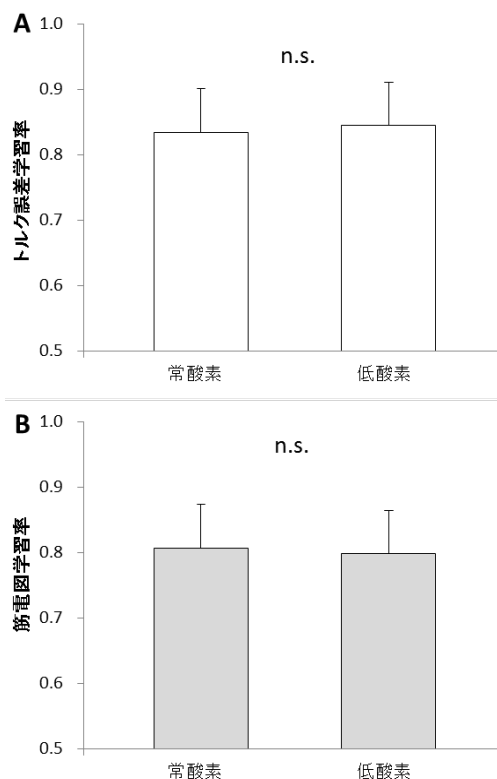


図 4 常酸素、および低酸素（常圧、酸素濃度 14.5%）条件下における学習率。A；トルク誤差学習率、B；筋電図学習率

低酸素環境下において、神経系の機能が低下する要因のひとつとして、脳内酸素化レベルの低下が挙げられている (Goodal et al., 2012)。脳内酸素化レベルを推察することができる指標のひとつとして、本実験では運動開始前の安静時動脈血酸素飽和度 (SpO₂) を計測した。全ての被験者において、低酸素条件における SpO₂ は常酸素条件よりも低値であった (常酸素条件 ; 97.7±0.5%、低酸素条件 ; 86.8±3.8%)。しかしながら、低酸素条件における安静時 SpO₂ と、トルク誤差学習率の変化比率 (= 低酸素条件における学習率 / 常酸素条件における学習率) との間には、明確な相関性は認められなかった (r=0.462、p=0.211; SpO₂ 低下が運動学習を妨げるのであれば負相関が現れるはずだが、算出された相関係数は正の値であった)。SpO₂ は脳内酸素化レベルを十分に反映するとは言い難いものの、この結果もまた、低酸素環境が運動学習に影響を及ぼさないことを支持している。

本実験における低酸素環境の条件は、先行研究において脳内酸素化レベル低下や末梢筋活動低下が生じた条件 (酸素濃度 13%、標高 3,800m 相当 ; Goodal et al., 2012) ほどに厳しい条件でなかったため、その影響が現れなかった可能性も考えられる。また、低酸素環境に高強度運動が組み合わさることで、身体の酸素化レベルが一時的に大きく低下することもあるが、そのような条件下であれば運動学習に影響が生じた可能性も考えられる。本実験において用いた低酸素環境 (酸素濃度 14.5%、標高 3,000m 相当) は、高地トレーニング等、運動を行ううえでは比較的厳しい条件設定であったが、運動負荷 (120W) はそれほど高いものではなかった。より高強度な運動を用いた場合に学習過程に影響が生じるかは、今後さらなる検討の余地がある。

< 引用文献 >

Szubuski et al.(2006) The effects of short-term hypoxia on motor cortex excitability and neuromuscular activation. *Journal of Applied Physiology*, 101, 1673-1677.

Smith and Billaut (2010) Influence of cerebral and muscle oxygenation on repeated-sprint ability. *European Journal of Applied Physiology*, 109, 989-999.

Goodal et al.(2012) Supraspinal fatigue after normoxic and hypoxic exercise in humans. *Journal of Physiology*, 590, 2767-2782.

松林ら(2010) 低酸素環境下でのレジスタンストレーニングが筋の収縮特性に及ぼす影響-JISS 低酸素研究プロジェクト 2009-. 第 65 回日本体力医学会大会. 千葉.

5 . 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 1 件)

松林武生 . 運動学習に対する低酸素環境の影響 - 自転車エルゴメータを用いた学習課題での検討 - .日本体育学会第 68 回大会 . 2017 年 9 月 8-10 日 . 静岡大学 (静岡県静岡市).

6 . 研究組織

(1)研究代表者

松林 武生 (MATSUBAYASHI, Takeo)
独立行政法人日本スポーツ振興センター
国立スポーツ科学センター・スポーツ科学部・研究員

研究者番号 : 20549464