

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 15 日現在

機関番号：82632

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K16479

研究課題名（和文）トレーニングによる運動パフォーマンス向上に対する中枢性機能の関与

研究課題名（英文）Involvement of the central nervous system in the improvement of exercise performance after training

研究代表者

山中 亮（Yamanaka, Ryo）

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・契約研究員

研究者番号：50632840

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、短期間の低酸素環境下における高強度インターバルトレーニング（HIT）が及ぼす運動パフォーマンスの向上に対して、末梢性機能の向上と共に中枢性機能の向上が関与するかどうかを検討することを目的とした。その結果、短期間の低酸素環境下におけるHITによるランニングの運動パフォーマンスの向上と共に、有酸素性能力の指標である最大酸素摂取量の増加と、無酸素性能力の指標である最高血中乳酸濃度の増加が確認された。一方、低酸素トレーニングの前後では、運動に対する中枢神経系の興奮性には変化が認められなかった。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study was to determine whether the elevated peripheral function and the elevated central nervous functions were involved in the improvement of exercise performance after short-term high intensity intermittent training (HIT) under hypoxia. As a result of the short-term HIT under hypoxia, exercise performance improved with an increase in maximal oxygen uptake, which is an index of aerobic capacity, and an increase in the peak value of blood lactate concentration during high intensity exercise, which is an index of anaerobic capacity. However, the excitability of the central nervous system was unchanged by the short-term HIT under hypoxia.

研究分野：トレーニング科学

キーワード：高強度インターバルトレーニング 最大酸素摂取量 血中乳酸濃度 低酸素トレーニング 経頭蓋磁気刺激法

## 1. 研究開始当初の背景

トップアスリートは、長期トレーニングによる筋内や血液中における生理学的な機能の改善が起きていると考えられる。しかし、そのような末梢での機能改善だけではなく、大脳皮質一次運動野などの中枢神経系においても機能の改善が起こることが報告されている<sup>6)</sup>。そこでは、長期間トレーニングを行っているエリートバドミントン選手を対象に中枢神経系の興奮性を、経頭蓋磁気刺激 (Transcranial magnetic stimulation: TMS) 装置を用いることよって評価している<sup>6)</sup>。その結果、非鍛練者と比較してエリート選手では、TMSによる低い刺激に対しても中枢神経系が興奮し、筋活動が生じることが明らかになっている<sup>6)</sup>。つまり、運動指令が筋へ伝達されるために、一般人よりも低い中枢神経系の興奮性でそれが可能となると考えられる。このように、力を最大限に発揮できる一流競技者は、非トレーニング者と比較して中枢性機能の改善が認められると考えられる。しかしながら、運動パフォーマンス向上に対する中枢神経系の機能改善の観点から検討されている研究が少ないため、不明な部分が多い。

一方、一流競技者のみならず一般人にとっても、運動パフォーマンス向上のためには、トレーニングの継続が重要である。運動パフォーマンス向上のためのトレーニング方法の一つとして、自転車エルゴメータやトレッドミルを用いた高強度インターバルトレーニング (High-intensity Interval Training: HIT) が広く知られている<sup>1), 9)</sup>。最近では、HITを用いることによって、トレーニングが短期間であっても運動パフォーマンスが向上したことが確認されている<sup>2), 5)</sup>。さらに、HITを低酸素環境下で行うことで、常酸素環境下よりもさらなるトレーニング効果が認められることが報告されている<sup>5)</sup>。このようなHITによって運動パフォーマンスが向上する背景には、同一運動負荷刺激に対する血中乳酸濃度の低下などの末梢性機能の改善が明らかになっている<sup>5)</sup>が、運動を実施させる中枢運動指令を発射する一次運動野や、一次運動野から放射される運動指令を脊髄・運動神経に伝える皮質脊髄路といった中枢神経系の機能も改善している可能性もある。実際、3時間の低酸素暴露後において、単発刺激 (single-pulse TMS) で評価される皮質脊髄路の興奮性<sup>7)</sup>及び運動野二連発磁気刺激法 (paired-pulse TMS) で評価される一次運動野内の興奮性<sup>3)</sup>が常酸素条件よりも増大したことが報告されている<sup>8)</sup>。しかしながら、一過性の曝露ではなく、数日間といった期間において、低酸素環境下でトレーニングを行った場合、一過性の低酸素曝露に対する応答と

は異なる中枢神経系の応答が起こるかという点に焦点を当てた研究が行われていない。

## 2. 研究の目的

本研究では、短期間の低酸素環境下におけるHITが及ぼす運動パフォーマンスの向上に対して、末梢性機能の向上と共に中枢性機能の向上が関与するのかどうかを検討することを目的とした。

## 3. 研究の方法

### (1) 被験者

本研究では、7名の健康な男子大学生を対象に実験を実施した。年齢、身長、体重およびBMIの平均値及び標準偏差は、それぞれ、 $19.9 \pm 1.1$  year、 $171.8 \pm 5.8$  cm、 $59.1 \pm 3.4$  kg および  $20.0 \pm 0.9$  であった。対象者の競技会における5,000mの最高タイムの平均値は、 $15$ 分 $13$ 秒 $4 \pm 16$ 秒 $3$ であった。対象者には、予め本研究の趣旨および内容を説明し、実験参加の同意を得た。本研究は、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倫理審査委員会 (承認番号:025号)の承認を得て実施した。

### (2) 測定項目および測定方法

#### 実験デザイン

本研究では、5回の全力ペダリングトレーニング、5回の全力ランニングトレーニングの計10回を6日間で実施するトレーニングを用い、全てのトレーニングを低酸素環境下で実施した。低酸素環境の設定は、標高3,000m相当とした。トレーニング内容は、午前中に全力ペダリング運動、午後に全力ランニング運動を実施した。全力ペダリングトレーニングとして、固定式自転車エルゴメータ (POWERMAX VII, Combi) を用いて、30秒の全力ペダリング運動を、4分間の休息を挟みながら5回繰り返し実施した。ペダリング運動の負荷は、体重の7.5%Kpとした。ランニングトレーニングとして、負荷は事前に測定した最大酸素摂取量時の負荷に相当する走速度 ( $v\dot{V}O_{2max}$ ) の115-120%強度とし、10秒間の休息を挟みながら、20秒間のランニング運動を疲労困憊まで実施する方法を用いた。また、一日の低酸素暴露時間は、午前及び午後それぞれ2時間の計4時間とした。

パフォーマンステストとして、最大酸素摂取量テストと疲労困憊までの一定負荷運動テストを、トレーニング前 (pre)、最終トレーニングセッション終了の24時間後 (post1)、トレーニング終了の1週間後 (post2) にそれぞれ測定した。最大酸素摂取量テストは午後実施し、一定負荷運動テストは翌日の午前中に実施した。また、中枢神経系の興奮性のテストも、pre、post1及びpost2に測定した。

## 運動パフォーマンステスト

### a) 最大酸素摂取量テスト

最大酸素摂取量テストには、トレッドミルを用いて、乳酸カーブランニングテストと漸増負荷運動テストを実施した。乳酸カーブランニングテストは5ステージで構成され、3分走行、1分休息を1ステージとし、走速度を250、270、390、310、330m min<sup>-1</sup>とした。その後、1分の休息を設け、330m/minから1分ごとに10m/minずつ走速度を増加させていき、被験者が疲労困憊になるまで持続させる漸増負荷運動テストを連続で実施した。

### b) 疲労困憊までの一定負荷運動テスト

本テストは、事前に算出したv $\dot{V}O_{2max}$ 強度で疲労困憊まで実施するテストである。走速度は、pre、post1、post2とも同一とした。

### c) 測定項目

乳酸カーブランニングテスト時において、各ステージにおける酸素摂取量(Oxygen uptake:  $\dot{V}O_2$ )および換気量(Ventilation: VE)は、呼気ガス分析装置(AE310S、Minato)を用いてbreath-by-breathで連続測定した。呼気ガス分析器のガス校正および量の校正には、2種類の濃度の標準ガス(16% O<sub>2</sub>-4% CO<sub>2</sub> balance、26% O<sub>2</sub>)および2.46lのシリンジをそれぞれ用いて実施した。乳酸カーブランニングテスト時の各ステージにおける $\dot{V}O_2$ およびVEは、ステージ終了直前の1分間の平均値を用いた。各ステージの走速度に対する $\dot{V}O_2$ の値から最小二乗法を用いて回帰直線を導き出し、v $\dot{V}O_{2max}$ を算出した。また、最大酸素摂取量テストの $\dot{V}O_2$ の最高値( $\dot{V}O_{2max}$ )は、30秒毎に算出した平均値から抽出した。血中乳酸濃度は、1分の休息の間に、指先から微量の血液を採取し、血中乳酸濃度分析器(Lactate Pro 2、Arkray)を用いて測定した。また、乳酸カーブテストの各ステージの走速度に対する血中乳酸濃度および酸素摂取量から最小二乗法を用いてそれぞれ回帰直線の式を導き出し、その式から血中乳酸濃度が2、4及び6mmol l<sup>-1</sup>となる走速度を算出した。

一定負荷運動テスト時においては、運動終了時、運動終了3及び5分後に指先から微量の血液を採取し、血中乳酸濃度分析器(Lactate Pro 2、Arkray)を用いて測定した。その際の血中乳酸濃度の最高値を、一定負荷運動テスト時の最高血中乳酸濃度とした。

### 中枢神経系の興奮性の評価

TMSには、中心直径が110mmのダブルコイルをYケーブルで接続した二台の磁気刺激装置(Magstim-200スクエア、Magstim)を使用した。刺激部位の特定には、ポラリスカ

メラ、コイル及び被験者の頭部に巻くバンドに取り付けたトラッカー、そして、被験者の脳MRI画像を用いた脳マッピング装置(Brainsight2 Vet、Rouge Research Inc)を使用した。このシステムを用いることにより、解剖学的な機能局在位置に正確に刺激を行うことが可能となる。本研究では、TMSによるターゲットとする筋として大腿四頭筋を用いた。安静時閾値(resting motor threshold: RMT)は、10試行のうち少なくとも5試行で50 $\mu$ V以上、そして、活動時閾値(active motor threshold: AMT)は、約5%MVCの弱い随意収縮時において200 $\mu$ V以上のMEP発現に必要な刺激強度として決定された。RMTおよびAMTの刺激強度は、磁気刺激装置の最大出力を100%として表した。

TMSによる運動性誘発電位(Motor Evoked Potentiation: MEP)は、筋放電波形における上下の最高点(peak-to-peak)の電位差の振幅値とした。本研究では、大脳皮質内の促進および抑制を検討するために、テスト刺激に先行して安静時閾値強度以下の条件刺激を行うpaired-pulse TMSを用いた。本研究では、皮質内抑制の刺激間隔を3msec、皮質内促進の刺激間隔を1.5msecとした。本研究では、1回の測定において、single-plus TMS、2種類のpaired-plus TMSをそれぞれ12回、計36回の刺激を実施し、それぞれの刺激のMEPの振幅値を加算平均し、それぞれの値とした。計算上での運動皮質内の興奮性の評価には、paired-pulse TMSにより誘発されたMEP振幅値を、テスト刺激であるsingle-pulse TMSから誘発されたMEP振幅値で除した相対値を用いた。また、本研究では、paired-plus TMS時においてtest刺激に先行して刺激する条件刺激強度として、80%RMTを用いた。

安静時及び活動時閾値の測定及び運動前の測定終了後に、固定式自転車エルゴメータ(Monark 828 E、Monark)を用いて、体重の7.5%の負荷(Kp)で30秒間の全力ペダリング運動を実施し、運動終了直後、5、10、15、20、30分後において、中枢神経系の興奮性の評価を実施した。自転車エルゴメータを用いたパフォーマンスの評価として、30秒間の全力ペダリング運動時における最高パワー(W)及び平均パワー(W)をそれぞれ採用した。

電極は表面筋電図電極(BlueSensor NF-50K/W、Ambu)を用いた。電極の装着に先立ち、電極設置部位は生体電流に対する電気的抵抗値を最小限にするため、研磨剤(スキンプューア、日本光電)により皮膚と電極間のインピーダンスを減少させ、エチルアルコールを染み込ませた脱脂綿で十分に拭いた。記録電極は大腿四頭筋(大腿直筋もしくは内側広筋)の筋腹、基準電極は筋腹の遠部位(電極間: 4cm)、アース電極は内側上顆部分に取

り付け、電極上やコードが動かないようサージカルテープで固定した。筋放電活動は、生体電気用アンプ (AB-601G、日本光電) によって筋放電の波形が1mVとなるよう増幅した。増幅された筋電信号はA/D変換器 (Micro1401、Cambridge Electronic Limited、Cambridge Electric Design) によってデジタル変換処理をした後、パーソナルコンピュータ内のハードディスクに保存した。

### (3)統計処理

全ての測定値は、平均 ± 標準偏差で示した。統計処理には、統計処理ソフトウェア (SPSS19.0.0 for Windows) を用いた。変数と時間経過で二要因の反復分散分析 (repeated measures analysis of variance: ANOVA) を行い、各変数で主効果と変数と時間経過の有意な相互作用が認められた場合、主要要因として時間経過のみで一要因の反復ANOVAを行った。危険値 ( $P$ ) が0.05未満を有意検定の基準とした。

## 4. 研究成果

### (1)結果

乳酸カーブランニングテスト時の血中乳酸濃度の変化には、pre と post1 及び post2 において有意な差異が認められなかった。また、血中乳酸濃度が 2、4、6mmol l<sup>-1</sup> に相当する走速度は、pre、post1 及び post2 において有意な差異が認められなかった。一方、 $\dot{V}O_{2max}$  は、pre 及び post1 よりも post2 において有意 ( $P < 0.05$ ) に高い値を示した (図.1)。

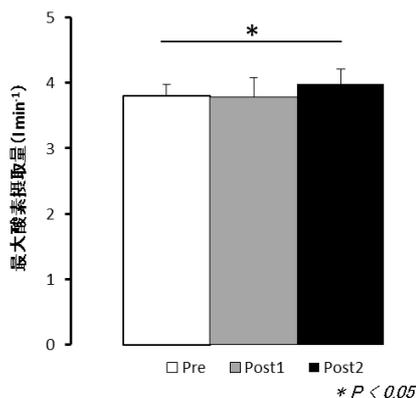


図1:  $\dot{V}O_{2max}$  の変化

$\dot{V}O_{2max}$  強度における運動持続時間は、pre よりも post1 及び post2 において有意 ( $P < 0.05$ ) に向上した (pre: 384 ± 63, post1: 453 ± 86, post2: 467 ± 100 sec)。また、その際の血中乳酸濃度のピーク値は、pre 及び post1 よりも post2 において有意 ( $P < 0.05$ ) に高くなった (pre: 13.6 ± 2.2, post1: 12.6 ± 1.9, post2: 15.2 ± 2.4 mmol l<sup>-1</sup>)。

30 秒間の全力ペダリング運動時における平均パワーは、pre よりも post1 及び post2 において有意 ( $P < 0.05$ ) に高い値を示した

(pre: 486 ± 44, post1: 530 ± 26, post2: 536 ± 27 W)。一方、30 秒間の全力ペダリング運動時における最高パワーには、pre、post1 及び post2 において有意な差異が認められなかった (pre: 596 ± 82, post1: 650 ± 38, post2: 656 ± 39 W)。

pre、post1、post2 における RMT (pre: 54.0 ± 4.6, post1: 51.4 ± 5.2, post2: 50.2 ± 6.4%) 及び AMT (pre: 38.0 ± 2.0, post1: 36.6 ± 3.4, post2: 36.6 ± 3.0%) には、有意な差異が認められなかった。single-plus TMS による MEP には、pre、post1、post2 では有意な差異が認められなかった (図.2)。また、paired-plus TMS の MEP の動的変化は、pre、post1、post2 では有意な差異が認められなかった。

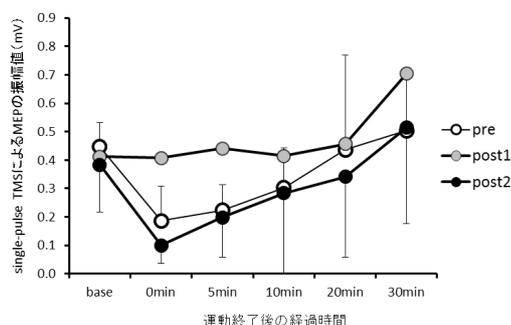


図2: single-pulse TMSによるMEPの経時的変化

### (2)考察

#### 末梢機能能

先行研究では、陸上競技 400m 及び 800m 選手を対象として低酸素環境下における HIT を実施した結果、運動パフォーマンスがトレーニング前よりも向上したことが報告されている<sup>5)</sup>。本研究においても、前述の先行研究と同様の日程で陸上競技長距離選手を対象に低酸素環境下において HIT を実施した結果、 $\dot{V}O_{2max}$  強度での運動持続時間が HIT 前よりも有意に向上した。陸上競技長距離選手の運動パフォーマンスを決定する要因の一つとして  $\dot{V}O_{2max}$  が考えられており<sup>4), 10)</sup>、本研究でも  $\dot{V}O_{2max}$  の向上と共に運動パフォーマンスが向上したため、先行研究の結果を支持する結果となった。また、運動パフォーマンスの向上と共に改善された要素として、低酸素環境下での HIT 後において、無酸素性能力の指標である高強度の一定負荷ランニング運動に対する最高血中乳酸濃度が HIT 前よりも高値を示し、また、30 秒間の全力自転車ペダリング運動時の平均パワーも向上した。このような無酸素性能力の向上も長距離走の運動パフォーマンスが高まった一つの要因となると考えられる。一方、本研究では、血中乳酸濃度が 2、4 及び 6mmol l<sup>-1</sup> 時の走速度といった最大運動強度下における有酸素性能力の向

上は認められなかった。このことから、先行研究<sup>5)</sup>で報告されている最大運動強度下における乳酸代謝能には、本研究で用いたトレーニングでは変化が見られなかったと考えられる。

以上のことから、本研究における運動パフォーマンス向上の背景として、 $\dot{V}O_{2max}$  で評価される有酸素能力の向上、そして、最大血中乳酸濃度で評価される無酸素能力の向上が関与していると考えられる。

#### 中枢性機能

3時間の低酸素暴露した研究では、単発刺激(single-plus TMS)で評価される皮質脊髄路の興奮性<sup>7)</sup>及び運動野二連発磁気刺激法(paired-pulse TMS)で評価される一次運動野内の興奮性<sup>3)</sup>が常酸素条件よりも増大したことが報告されている。本研究では、1日4時間の低酸素暴露を6日間連続して実施したが、single-plus TMSのMEP及びpaired-pulse TMSの興奮性には、トレーニングの前後において有意な差異が認められなかった。運動パフォーマンスと中枢性機能に関する研究として、Weier et al. (2012)<sup>11)</sup>は、4週間に及び高強度スクワットトレーニングと皮質脊髄興奮性の関係性を検討した結果、トレーニング後において、1RMが87%増大し、それと共に、皮質脊髄路の興奮性が増加したこと、さらに、大脳皮質運動野の皮質内抑制が低下したことが報告された。従って、高出力のトレーニングは筋力発揮に対する皮質脊髄路興奮性の賦活や、大脳運動野の皮質内興奮性も変化させることが考えられる。本研究では、体重の7.5%kpの負荷を全力で回転させるトレーニング及び全力で20秒間走る運動強度のトレーニングを用いた。先行研究のような超高強度運動ではないが、本研究では高出力のトレーニングに加えて低酸素暴露を処方したが、皮質脊髄路興奮性及び大脳運動野の皮質内興奮性にトレーニングの前後で変化が認められなかった。これらのことから、本研究で用いた短期間の低酸素環境下におけるHITによっては、運動に対する中枢神経系の興奮性には変化が生じなかったかと考えられる。

#### <引用文献>

- 1)Gibala et al. Physiological adaptations to low-volume, high-intensity interval training in health and disease. J Physiol. 590: 1077-1084, 2012
- 2)Kasai et al. Impact of 6 consecutive days of sprint training in hypoxia on performance in competitive sprint runners. J Strength Cond Res. doi: 10.1519/JSC.0000000000001954, 2017
- 3)Kujirai et al. Corticocortical

inhibition in human motor cortex. J Physiol (Lond). 471: 501-519, 1993

4)Levine and Stray-Gundersen."Living high-training low": effect of moderate-altitude acclimatization with low-altitude training on performance.J Appl Physiol (1985). 83:102-12. 1987

5)Oriishi et al. Short-term hypoxic exposure and training improve maximal anaerobic running test performance. J Strength Cond Res. doi:10.1519/JSC.0000000000001791, 2017

6)Pearce et al. Functional reorganisation of the corticomotor projection to the hand in skilled racquet players. Exp Brain Res. 130: 238-243, 2000

7)Pascual-Leone et al. Transcranial magnetic stimulation: studying the brain-behaviour relationship by induction of 'virtual lesions'. Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci. 29; 354: 1229-1238, 1999

8)Rupp et al. Time-dependent effect of acute hypoxia on corticospinal excitability in healthy humans. J Neurophysiol. 108: 1270-1277, 2012

9)Tabata et al. Metabolic profile of high intensity intermittent exercises. Med Sci Sports Exer. 29: 390-5, 1997

10) 山地啓司ら．最大酸素摂取量から陸上中長距離走，マラソンレースの競技記録を占うことが可能か．ランニング学研究．1: 7-14, 1990

11) Weire and KidgeII. Strength training reduces intracortical inhibition. Acta Physiol.206 : 109-119, 2012

#### 5 . 主な発表論文等

〔学会発表〕(計1件)

山中亮、ニッポン長距離・トラックでの挑戦に向けて、平成28年12月18日、岡山県・岡山市

#### 6 . 研究組織

(1)研究代表者

山中 亮 (YAMANAKA Ryo)

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・研究員

研究者番号：50632840

(3)連携研究者

丸山 敦夫 (MARUYAMA Atsuo)

新潟医療福祉大学・健康科学部・特任教授

研究者番号：80117548