

令和 6 年 5 月 14 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H00958

研究課題名（和文）経頭蓋電気刺激による安静時脳活動の操作と運動学習能力の制御

研究課題名（英文）Manipulation of resting brain activity and motor learning by transcranial direct electrical stimulation.

研究代表者

小川 健二（Ogawa, Kenji）

北海道大学・文学研究院・准教授

研究者番号：50586021

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 11,500,000円

研究成果の概要（和文）：運動学習や記憶形成において、学習後に休憩を置くことが運動成績の向上や運動記憶の固定化を助ける現象（オフライン学習）が行動実験から示されているが、休息中の安静時脳活動が学習に及ぼす影響は不明である。そこで本研究は、安静時脳活動が運動学習に果たす役割を、安静時の脳活動に対して経頭蓋直流電気刺激（tDCS）による操作、および機能的磁気共鳴画像法（fMRI）による計測の両方を用いて直接的に検討した。実験結果からtDCSを用いた群では、安静時に一次感覚運動野において課題実行時と類似した活動パターンがより多く見られた。このことはtDCSで課題に関連した安静時脳活動を変調できることを示す。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでの運動学習に関する多くの行動実験から、学習後の覚醒休息期間が学習効果の定着や促進に役立つことが示唆されてきたが、具体的に休憩期間中の安静時脳活動との関連については明らかではなかった。本研究は、安静時における課題時に類似した脳活動パターンの再活性化を、非侵襲的脳刺激法（tDCS）によってより頻繁に誘導することが可能であることを、fMRIによる脳機能計測と組み合わせた実験によって明らかにした。本研究から、課題遂行後の安静時脳活動を操作することによって記憶や学習に関わるオフライン活動を制御できる可能性を示すことができた。

研究成果の概要（英文）：In motor learning and memory formation, behavioural experiments have shown that resting after learning helps to improve motor performance and fixate motor memories (offline learning), but the effects of resting-state brain activity during rest on learning are unknown. The present study therefore directly examined the role of resting brain activity in motor learning, using both transcranial direct current electrical stimulation (tDCS) manipulations and functional magnetic resonance imaging (fMRI) measurements on resting brain activity. Experimental results showed that the group using tDCS showed more activity patterns in the primary sensorimotor cortex at rest, similar to those observed during task execution. This indicates that tDCS can modulate task-related resting-state brain activity.

研究分野：認知神経科学

キーワード：運動学習 安静時脳活動 脳機能イメージング

1. 研究開始当初の背景

ヒトは学習によって様々な運動技能を柔軟に習得することができ、そのような運動記憶は中枢神経系に内部モデルとして保存される(Imamizu et al., 2000; Wolpert and Ghahramani, 2000)。視覚運動学習においては、学習後の睡眠だけでなく覚醒時の休息も、行動能力の向上や記憶の定着に役立つことが、これまでの研究で示唆されている (Brashers-Krug ら、1996 ; Shadmehr and Brashers-Krug, 1997 ; Robertson ら、2004)。例えば、新しい技能をすぐに訓練するよりも、休息期間を設けた方が運動能力は向上し、運動記憶はより統合され、新しい運動技能からの干渉に弱くなる(Robertson et al., 2004, 2005; Cohen et al., 2005; Press et al., 2005)。また、学習セッションの間に覚醒休息期間を導入することで、スペーシング効果として知られる運動記憶の保持にプラスの効果があることも報告されている(Cepeda et al., 2006; Kornmeier and Sasic-Vasic, 2012; Gerbier et al., 2015)。これらの研究は、運動記憶のオフライン学習において、学習後の覚醒休息期間が重要な役割を果たしていることを示唆している。一方、先行研究から何も課題を行っていない期間でも脳は自発的に活動していることが多くの先行研究から示されている (Raichle et al., 2001; Fox and Raichle, 2007) が、休息中の安静時脳活動が学習に及ぼす影響は不明である。

2. 研究の目的

本研究は、安静時脳活動が運動の学習や記憶形成に果たす役割を、安静時の脳活動に対して経頭蓋直流電気刺激 (transcranial Direct-Current Stimulation: tDCS) による操作、および機能的磁気共鳴画像法 (functional Magnetic Resonance Imaging: fMRI) による計測の両方を用いて直接的に検討する。これにより、運動学習後の安静時脳活動が学習・記憶に与える影響を因果的に検証するとともに、tDCS によるニューロモジュレーションを使った効果的な学習方法の開発を目指す。実験では、被験者を MRI スキャナー内で連続的に手動視覚運動追跡を行い、学習期間とその前後の休息期間の脳活動を fMRI で測定した。多ボクセルパターン解析 (MVPA) を用いて、まず、安静期における脳活動パターンが、前回の運動課題時の脳活動パターン (再活性化) と類似しているかどうかの検証を試みた。さらに、このような再活性化が学習後の行動パフォーマンスに促進効果をもたらすかどうかを検証した。

3. 研究の方法

まず、fMRI スキャナーに入った前に tDCS 刺激を行った。実験には、健常成人 50 名 (平均年齢 22.7 歳) が参加し、二重盲検操作で半数の 25 名は 1mA の直流電流を左一次運動野付近に 10 分間刺激し、残りの 25 名は同じ脳部位同時間の Sham 刺激 (最初と最後のみ刺激を行う) を受けた。そして被験者全員が運動学習課題として視覚追従運動を fMRI スキャナーの中で行った。脳活動解析の結果、5 名の参加者 (tDCS 群 1 人, Sham 群 4 人) は頭の動きが大きいいため、その後の分析からは外した。

fMRI 実験では、運動課題前後の安静時脳活動の計測と解析を行った。被験者は、スクリーン上をランダムに動き回るターゲットを、右手でジョイスティックを使ってトラッキングする課題 (12 秒間) を行った。その際、カーソルの運動方向と実際の手の運動方向との間に 30 度の回転変換を導入することで、新規な視覚運動環境での学習とした。またコントロール課題として、直前に被験者本人の行った運動学習試行の視覚的なりプレイが呈示され、それを受動的に眺める試行 (12 秒間) を実施した。その実際の運動学習後に、再度安静にした状態での脳活動を計測した。最後に、事後テストとして同じ運動課題を実施した (図 1)。最後に事後アンケートとして、被験者に tDCS で受けた主観的な強さについて 5 件法で答えてもらった。

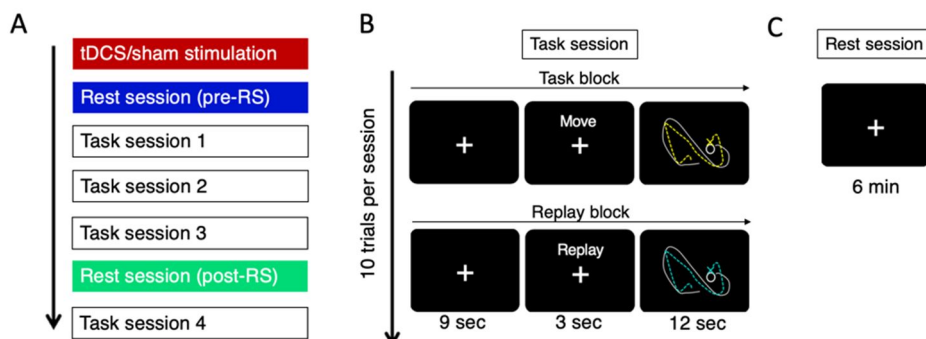


図 1 : 課題の流れ

分析時では、運動に用いた手を対側の左半球の一次運動野 (precentral) および左半球の一次体性感覚野 (postcentral) を関心部位 (region of interest) とし、fMRI で計測したボクセルパターン活動を抽出した。そしてまず、運動学習セッションでの脳活動パターンを用いて、課題セッション中の運動学習試行とリプレイ試行を識別できるデコーダーをトレーニングした。訓練した識別器を、学習前後の安静時脳活動パターンに対して適用することで、運動学習前後での安静時活動パターンの変化を検討した (図 2)。また、上記の識別分析に加えて、ボクセルパターンの同士の空間パターンの類似度を分析する表象類似度分析 (representational similarity analysis: RSA) も実施し、安静時脳活動と運動学習時の脳活動との類似性についてさらに検証を加えた。

Task session

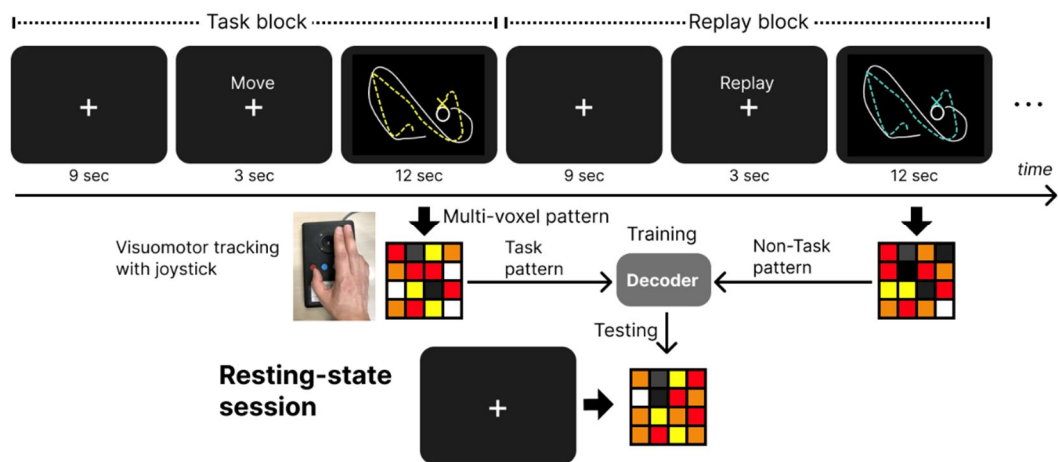


図 2：マルチボクセルパターン分析を使った識別分析

4. 研究成果

まず、二重盲検の操作について検証するため、tDCS 群と Sham 群で tDCS を受けた時の主観的な刺激の強さの自己報告結果を比較した結果、2 群で有意な違いは見られなかった ($BF_{10} = .405$) (図 3)。

次に、学習前後の安静時脳活動パターンに対して識別器を適用したところ、運動学習前と比べて運動学習後で、学習時と類似した脳活動パターンの増加が観察された。さらに、この結果はシャム群では生じず、tDCS 群だけであった (図 4A)。RSA では、同じく学習後の脳活動パターンの増加が観察されたが、シャム群の増加も見られた (図 4B)。このことは、運動学習後の安静時においても学習時と同じ脳活動パターンが再現されていることを示唆する結果であり、tDCS によってその脳活動パターンの再現をさらに促進できたことを明らかにした。

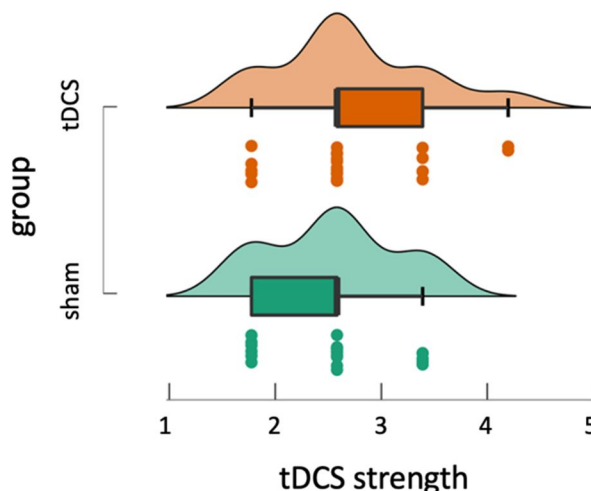


図 3：tDCS 強度の自己報告の結果 (上が tDCS 群、下が Sham 群)

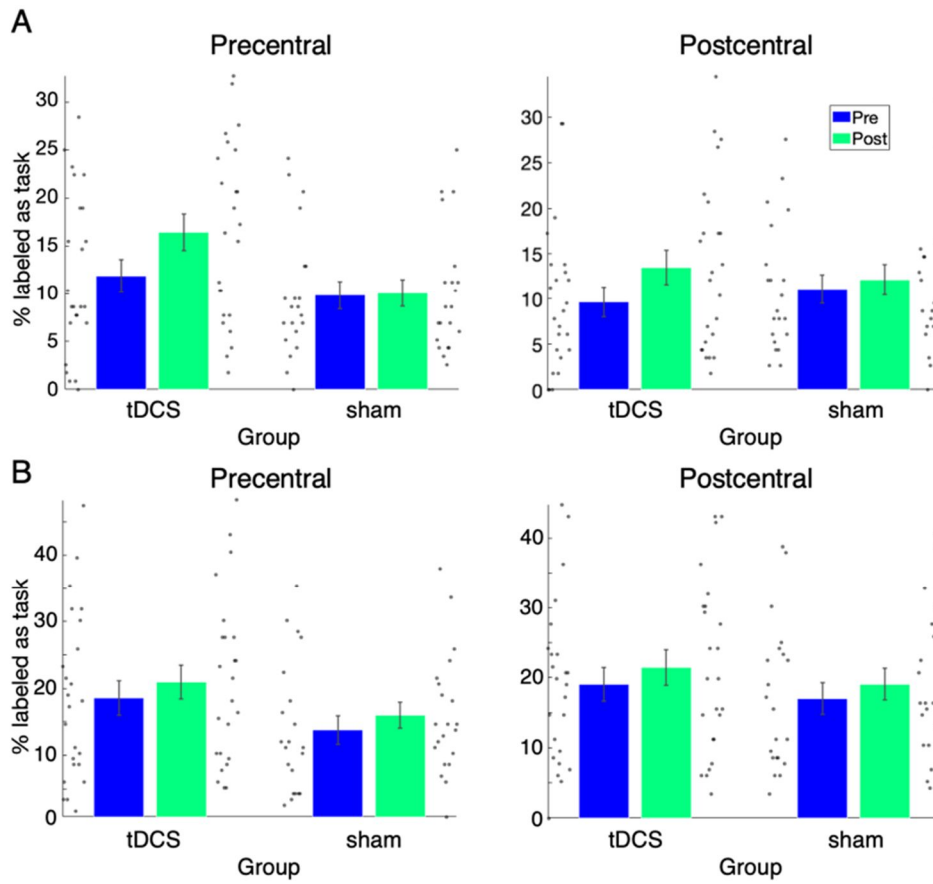


図 4 : 運動学習前後で課題に関連した脳活動再活性化パターンの頻度の変化 (A : Decoding ; B : RSA)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Yang Huixiang, Ogawa Kenji	4. 巻 501
2. 論文標題 Decoding of Motor Imagery Involving Whole-body Coordination	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Neuroscience	6. 最初と最後の頁 131 ~ 142
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.neuroscience.2022.07.029	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sonobe Yusuke, Yamagata Toyoki, Yang Huixiang, Haruki Yusuke, Ogawa Kenji	4. 巻 10
2. 論文標題 Supramodal Representation of the Sense of Body Ownership in the Human Parieto-Premotor and Extrastriate Cortices	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 eneuro	6. 最初と最後の頁 NA
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1523/ENEURO.0332-22.2023	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 -

1. 著者名 Yamagata Toyoki, Ichikawa Kaito, Mizutori Shogo, Haruki Yusuke, Ogawa Kenji	4. 巻 13
2. 論文標題 Revisiting the relationship between illusory hand ownership induced by visuotactile synchrony and cardiac interoceptive accuracy	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 NA
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-023-43990-2	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6件（うち招待講演 3件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 小川健二
2. 発表標題 ヒトの運動や身体意識に関わる神経表象の解読
3. 学会等名 第20回北海道大学脳科学研究教育センターシンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小川健二
2. 発表標題 運動や身体意識に関わる神経表象
3. 学会等名 東京大学心理学研究室セミナー（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ogawa K.
2. 発表標題 Decoding of neural representations involved in subjective bodily awareness
3. 学会等名 International Symposium on Predictive Brain and Cognitive Feelings（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yang Y., Yang H., Imai F., & Ogawa K.
2. 発表標題 Plasticity of the premotor cortex for fMRI neurofeedback using motor execution.
3. 学会等名 27th annual meeting of The Organization for Human Brain Mapping.（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yang Y., Haruki Y., Niida M., Yamagata T., & Ogawa K.
2. 発表標題 Transcranial direct current stimulation improves the awake reactivation in the primary motor cortex
3. 学会等名 第7回ヒト脳イメージング研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山縣豊樹, 水鳥翔伍, 小川健二
2. 発表標題 手に対する所有感の神経基盤を再考する：因果構造の整理と先行研究データの二次分析
3. 学会等名 日本生理心理学会第41回大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 小川健二 (分担執筆)	4. 発行年 2021年
2. 出版社 有斐閣	5. 総ページ数 1002
3. 書名 有斐閣 現代心理学辞典	

〔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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------