

運動課題遂行時の経頭蓋直流電気刺激が運動学習と脳活動に与える影響

1275113 宮崎 龍哉 【身体情報サイエンス研究室】

Effects of Transcranial Direct Current Stimulation During Motor Task Performance on Motor Learning and Brain Activity

1275113 Tatsuya, Miyazaki 【Brain-Muscle Coordination Lab.】

1 背景

ヒトは日常生活において、新しい運動スキルの獲得や既存の運動パターンの改善など、様々な運動学習を行っている。運動学習は、スポーツ活動から日常的な動作に至るまで、あらゆる身体活動の基盤となる能力である。このため、運動学習の促進は、リハビリテーションや競技力向上などの面で重要な意義を持つ。

運動学習を調節する方法の1つとして、経頭蓋直流電気刺激 (transcranial Direct Current Stimulation: tDCS) がある [1][2]。tDCS は、頭皮上から微弱な直流電流を流すことで、標的とする脳領域の興奮性を一時的に調節する非侵襲的脳刺激法である。これまでの研究により、tDCS が運動学習を促進する効果を持つことが報告されているが、その詳細な神経機序については未だ十分な理解が得られていない。

特に、tDCS が運動学習中の脳活動にどのような影響を与えるのかについては、さらなる検討が必要である。この課題に対して、機能的磁気共鳴画像法 (functional Magnetic Resonance Imaging: fMRI) と tDCS を組み合わせたアプローチは、脳活動の観点から tDCS の効果を直接的に評価することを可能にする。このアプローチにより、tDCS による運動学習促進効果の神経基盤を明らかにすることが期待される。

本研究では、fMRI と tDCS を組み合わせた同時計測により、運動学習中の tDCS 介入が脳活動動態に及ぼす即時的影響を検討する。さらに、tDCS 介入後の脱適応過程および想起過程における脳活動変化を縦断的に評価することで、tDCS 介入の持続効果とその神経基盤を明らかにする。

2 方法

2.1 参加者

健康者 54 名 (平均年齢 20.87 ± 1.76 歳、女性 18 名) を対象とし、すべての参加者は利き手テストに基づいて右利きであった。参加者は tDCS の刺激条件によって tDCS 群と sham 群の 2 群に分けられた。実験の中断や撮像時の頭部移動が大きな参加者 (8 名) を除外し、解析対象者は tDCS 群 23 名、sham 群 23 名の計 46 名とした。

2.2 実験手続き

運動学習として、MRI 室内で使用可能な特殊なマニピュランダムを使用して、時計回り方向の速度依存性の力場環境下での到達運動課題が実施された。到達運動課題は、参加者がマニピュランダムを操作すると、その動きに連動してカーソルが画面上を移動する仕組みとし、表示された開始地点から目標地点までカーソルを到達させる課題とした。

1 試行は、“試行間のインターバル”、“ターゲットが表示後、開始地点にカーソルを静止させ運動開始の合図を待つ準備段階”、“ターゲットの色を合図とした運動の実行段階”の 3 段階で構成された。

60 試行を 1 セットとした。最初の 60 試行は力場無し (Base)、次の 180 試行は力場あり (Learning)、次の 180 試行は力場無し (Washout)、最後の 180 試行は力場あり (Recall) の 4 つのセグメントからなる 600 試行 (60 試行 $\times$ 10 セット) が実施された。マニピュランダムは右手首で操作するよう事前に教示した。すべての試行で脳活動が計測された。

2.3 経頭蓋直流電気刺激:tDCS

直流電流 (2mA) は、1 対の長方形ゴム電極 ($7 \times 5 \text{ cm}^2$) を介して供給された。導電性のペーストを使用して、左半球一次運動野 (M1) 領域に陽極、右眼窩の上に参照電極を設置した。刺激は Learning セグメントにて実施された。tDCS 群では継続して刺激 (428 秒 $\times$ 3) し、sham 群では各セットの開始 15 秒のみ刺激した。

2.4 解析

すべての統計解析は MATLAB と Python を使用して実施された。

2.4.1 解析: 運動課題

各試行の開始時に開始地点にカーソルがセットされていない試行は解析から除外された。各試行において、運動速度がピークに達した時点でのカーソル座標を算出し、開始地点とターゲットを結ぶ直線からの垂直方向の軌道誤差を学習状態として評価した。Base を除くセグメントの軌道誤差を対象にした t 検定による群間比較 ($p < 0.05$) を実施した。

また、軌道誤差ブロックの値 (10 試行平均値) を y , ブロックを x として、学習セグメントの 18 ブロックをベキ乗関数 $y = a * x^{-b}$ で近似した。各参加者の結果として得られた指標 b を学習中の脳活動解析に使用した。なお、近似における決定係数が低値を示した参加者は本解析から除外した。

2.4.2 解析: 脳活動

前処理では fMRIPrep を使用した。個人レベルの単変量解析およびグループレベルの単変量解析では SPM12 を使用した。有意水準は $p < 0.001$ uncorrected at voxel level and $p < 0.05$ corrected with FWE at cluster level. とした。また、集団解析では一次運動野 (M1), 小脳, 線条体を関心領域 (ROI) とした Small Volume Correction (SVC) を実施した。

■**群間解析 1** Base を除く各セグメントにおける運動実行時において、運動学習の進行に伴い、増加および減少する脳活動について群間解析を実施した。

■**群間解析 2** Base を除く各セグメント全体における運動準備時の脳活動について群間比較を実施した。

■**指標 b との解析** 群間比較とは別に、両群参加者における脳活動と運動課題成績との関連を検討するため、指標 b を用いた脳活動解析を実施した。

3 結果

3.1 運動課題

運動課題の結果を図 1 に示す。図中の各プロットは 10 試行の平均値を表し、エラーバーは標準誤差 (SE) を示している。また、灰色の垂直破線はセット間の区分を表している。

群間比較の結果、Learning 中期 (block 17) において tDCS 群は sham 群と比較して有意に小さい軌道誤差を示し、Learning 中期 (block 15, 16) および Recall 中後期 (block 54, 55, 57) において軌道誤差が小さい傾向が認められた。また、セット単位の分析では、Learning セグメント 2 セット目において tDCS 群の軌道誤差が小さい傾向を示した。

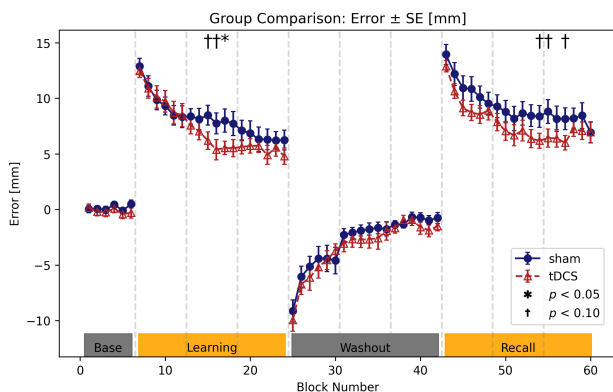


図 1: 運動課題の結果

3.2 脳活動

■**学習中の実行時の脳活動** Learning セグメントの運動実行時において、運動学習の進行に伴い、tDCS 群の左 M1 は sham 群と比較して有意な活動増加を示した (図 2)。

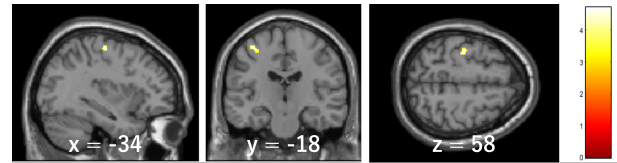


図 2: Learning セグメントの運動実行時において tDCS 群で sham 群より活動がみられた領域

■**学習中の準備時の脳活動** Learning セグメントの運動準備時において、tDCS 群の右小脳は sham 群と比較して有意に高い活動を示した (図 3)。

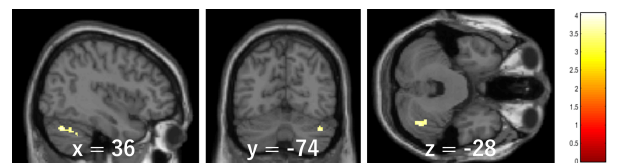


図 3: Learning セグメントの運動準備時において tDCS 群で sham 群より活動がみられた領域

■**運動学習進度の指標 b と脳活動** Learning セグメントにおいて、評価指標 b と両側体性感覚野の活動との間に正の相関が認められた。

4 考察

軌道誤差に差がみられたことから、運動学習中の tDCS 介入は、運動学習の促進とその後の想起において一定の効果がある可能性が示唆された。

Learning セグメントにおいて群間で脳活動の差がみられたことから、運動学習の進行に伴う左 M1 の活動増加が tDCS による運動学習の促進効果に関連している可能性が示唆された。加えて、運動準備中における右小脳の活動も運動学習の促進に寄与することが示された。

また、運動学習の進度には両側体性感覚野の活動の大きさが関与していることが示唆された。

5 まとめ

本研究では、運動学習中の M1 への陽極 tDCS 介入が運動学習と脳活動に与える影響を検討した。本研究により、tDCS は運動学習時および想起時のパフォーマンスを変化させることが明らかとなった。また、tDCS 介入による運動学習の促進には、運動準備段階と実行段階で異なる脳領域の活動が関与していることが示唆された。

参考文献

- [1] Byczynski et al. (2023). *Prog. Neuro-Psychopharmacol. Biol. Psychiatry*
- [2] Giordano et al. (2017). *Dose-Response*