

小脳への微弱な交流電気刺激が脳ネットワーク活動を調節し、運動の正確性を高める

1. 概要

埼玉県立大学作業療法学科の鈴木誠，鈴木貴子，浜松医科大学医学部の田中悟志，名古屋工業大学大学院工学研究科の平田晃正，井上大河，埼玉石心会病院の竹田浩明，高岡芳徳，西川順治，東京家政大学作業療法学専攻の斎藤和夫，湘南医療大学作業療法学専攻の松本卓也の研究グループは，小脳に有効な電界を誘導するための電極位置と刺激強度をシミュレーションにより特定した上で，ヒトを対象とした脳刺激実験を行いました．その結果，小脳への微弱な交流電気刺激が脳ネットワーク活動を調節し，運動の正確性を高めることを明らかにしました．

本研究の成果は，欧州神経科学学会（Federation of European Neuroscience Societies）の公式学術誌「European Journal of Neuroscience」に2026年5月13日に公表されました．

2. 研究の背景

脳の神経細胞を微弱な交流電流で刺激すると，自発的な神経発火の周期が交流電流の周期に同調することが動物実験で明らかになっていました．しかし，ヒトでは小脳が脳の深部に位置しているため，頭皮上から小脳を効果的に電気刺激することは難しいとされてきました．

小脳と大脳は，低周波帯（1～30 Hz）および高周波帯（60～200 Hz）の電氣的振動を介してネットワーク活動を形成しており，これらの活動は正確な運動の基盤となります．そのため，このネットワーク活動が障害されると，振戦，ジストニア，運動失調，ミオクローヌスなどの多様な運動障害が生じることが知られています．

交流電気刺激を用いて小脳と大脳の低周波帯および高周波帯のネットワーク活動を調節できれば，正確な運動を促進できる可能性があります．しかし，これまでの研究では，その効果について統一した見解は得られていませんでした．

そこで私たちは，小脳に有効な電界を誘導するために必要な電極位置と刺激強度をシミュレーションにより特定することで，小脳を効果的に交流電気刺激できるのではないかと考えました．さらに，シミュレーションで特定した電極配置と刺激強度を用いて低周波数および高周波数の交流電気刺激を行うことで，刺激周波数に応じたネットワーク活動の変化を誘導し，運動の正確性を向上させられるのではないかと考えました．

3. 研究の成果

3.1. 脳画像を用いたシミュレーション研究

小脳を効果的に交流電気刺激するための最適な電極位置と刺激強度を特定するため，健康成人22名（女性14名，平均年齢29.7歳）の頭部磁気共鳴画像を取得しました．まず，得られた各対象者の脳画像を，頭皮，頭蓋骨，脳脊髄液，灰白質，白質など14種類の組織に分割しました．次に，右前頭部と後頭部に5×5 cmの電極を配置し，2 mAの交流電流を流した場合に，小脳に生じる電界をシミュレートしました．

その結果，右前頭部と後頭部に5×5 cmの電極を設置し，2 mAの強度で刺激した場合に，小脳の活動を変化させることが可能なレベルの電界が生じることを明らかにしました（図1）．この結果から，小脳活動を効果的に変化させるための交流電気刺激の電極配置と刺激強度が特定されました．

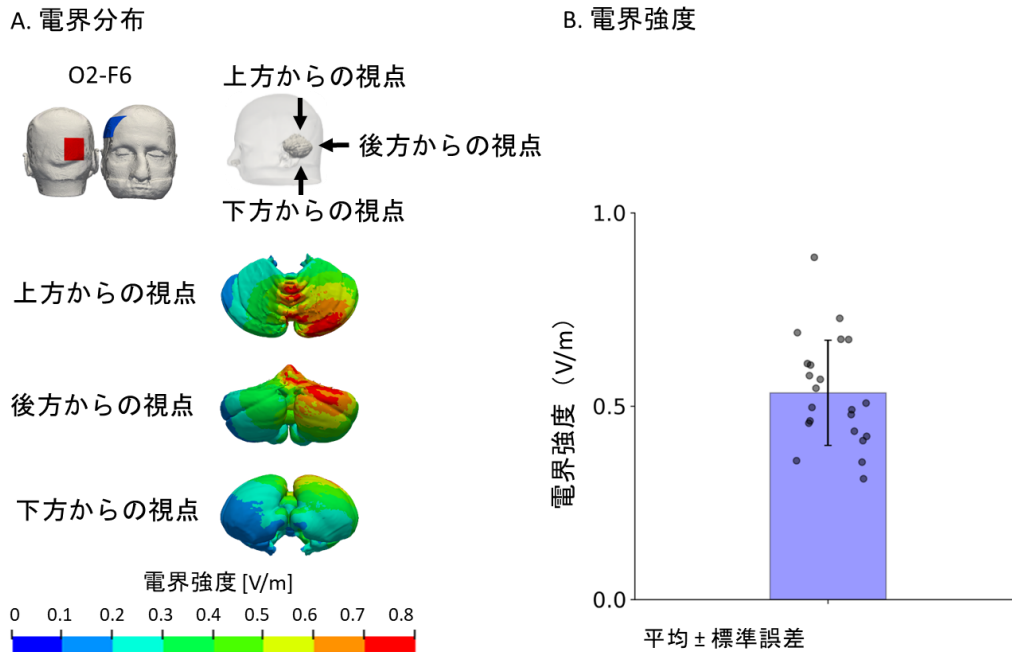


図1 シミュレーションにより推定された電界分布

3.2. 人を対象とした実証研究

シミュレーションによって明らかになった小脳を交流電気刺激するための最適な電極位置および刺激強度を用いて、健常成人 22 名の小脳に対して 10 Hz, 70 Hz, および擬似刺激を行いました。また、交流電気刺激の前後に運動課題を行い、脳波と身体運動を記録しました。

運動課題では、メトロノームのターゲット音に合わせて右手の人差し指をターゲット位置まで正確に移動する課題を実施しました。

3.2.1. 小脳信号源の同定と電流密度の変化

まず、磁気共鳴画像により取得した脳画像と脳波データを統合し、小脳活動の信号源を探索しました。次に、信号源における電流密度を抽出し、各刺激条件間（10 Hz, 70 Hz, 擬似刺激）で比較しました。

その結果、小脳の Lobule VI から Crus I と呼ばれる、運動に関連する領域に信号源が同定されました（図 2）。また、擬似刺激と比較して、10 Hz および 70 Hz の刺激条件では、小脳信号源における電流密度が増加しました（図 3）。

これらの結果から、交流電気刺激による小脳活動の変化は、近接脳部位や頸部筋に由来するアーチファクトではなく、小脳活動そのものの変化を反映している可能性が示されました。

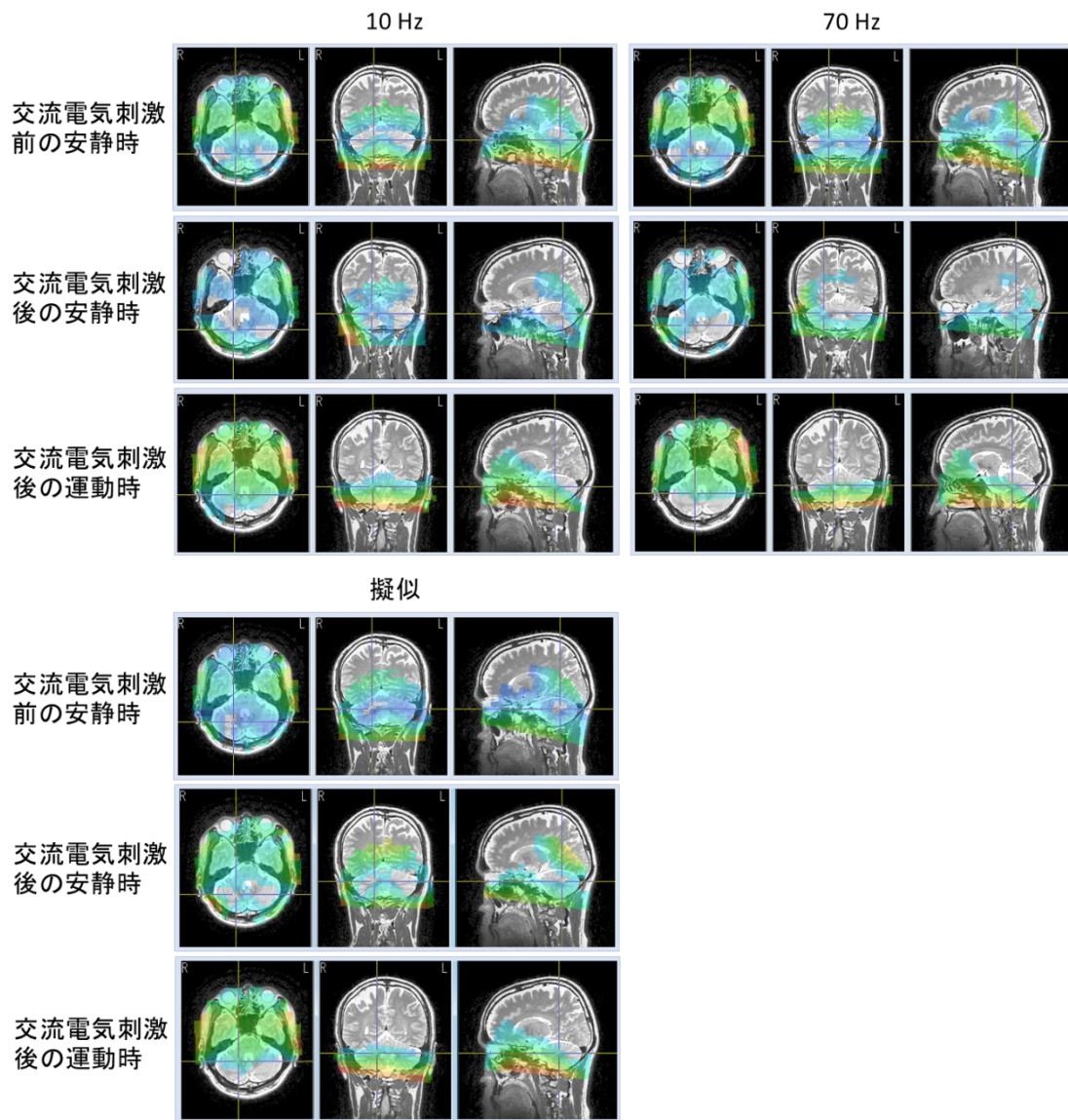


図2 代表対象者における小脳活動の信号源
十字は信号源を示しています。

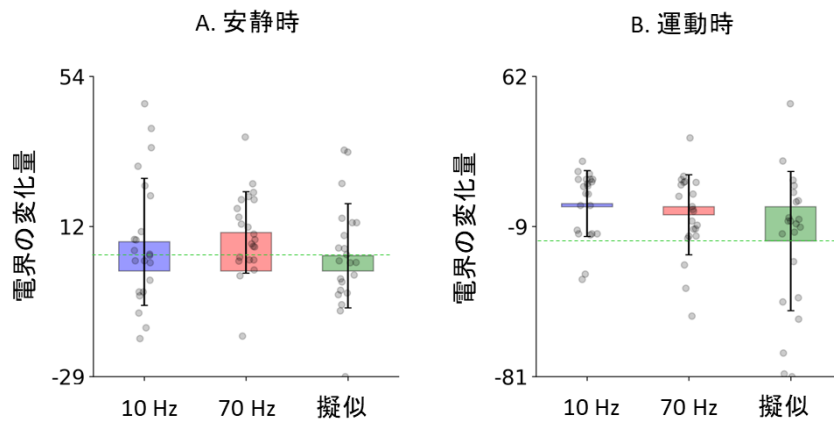


図3 小脳信号源における電界の変化
平均 ± 標準偏差

3.2.2. 小脳, 頭頂連合野, 運動野間のネットワーク活動の変化

10 Hz, 70 Hz, および擬似刺激によって, 小脳, 頭頂連合野, 運動野のネットワーク活動がどのように変化するかを解析しました.

その結果, 擬似刺激と比較して, 10 Hz の刺激条件では小脳, 頭頂連合野, 運動野間のネットワーク活動が増加しました (図 4). 一方, 70 Hz の刺激条件では, これらの領域間のネットワーク活動が減少しました.

これらの結果から, 小脳に対する 10 Hz と 70 Hz の交流電気刺激は, 神経ネットワークに相反する変化を誘導する可能性が示されました.

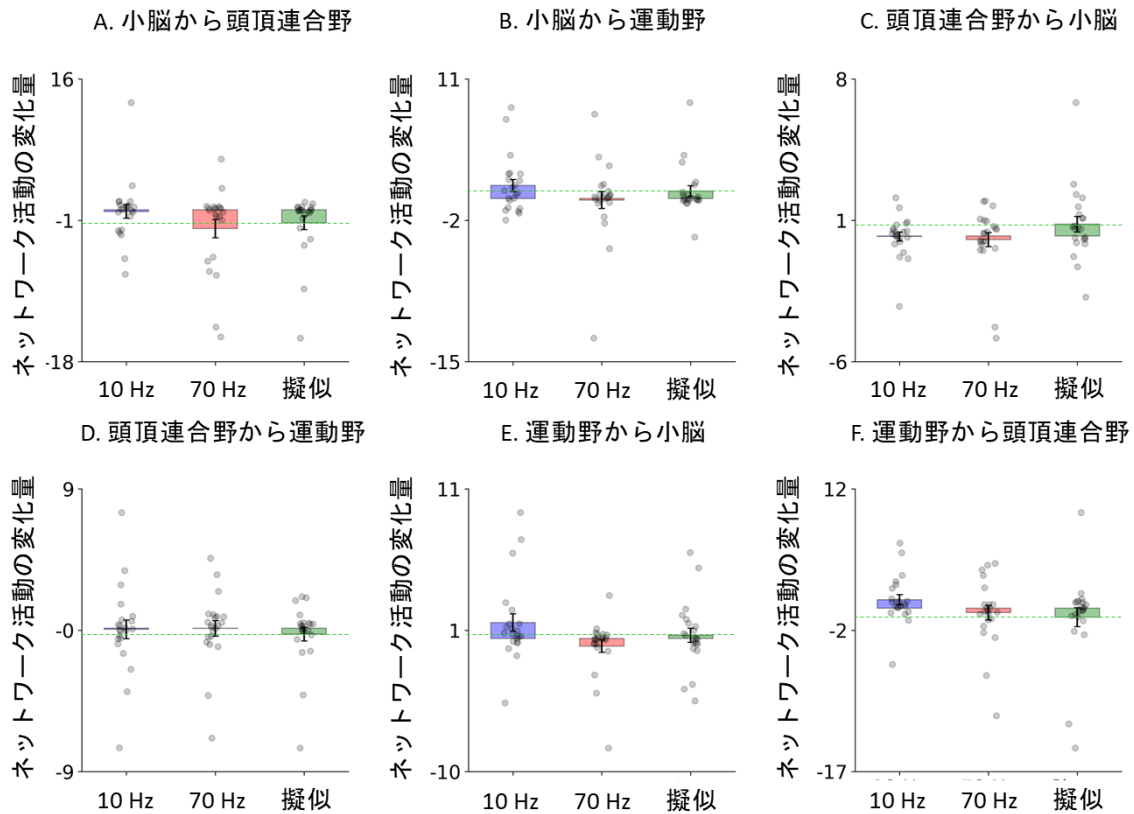


図4 小脳, 頭頂連合野, 運動野間のネットワーク活動の変化
平均 ± 標準誤差

3.2.3. 運動正確性の変化

運動の正確性を評価するために, ターゲット位置からのずれ (振幅逸脱度) とターゲット音からのずれ (時間逸脱度) を計測しました.

その結果, 10 Hz および 70 Hz の刺激条件では, いずれも振幅逸脱度と時間逸脱度が減少しました (図 5).

これらの結果から, 10 Hz および 70 Hz の交流電気刺激はいずれも, 運動の正確性を向上させる可能性が示されました.

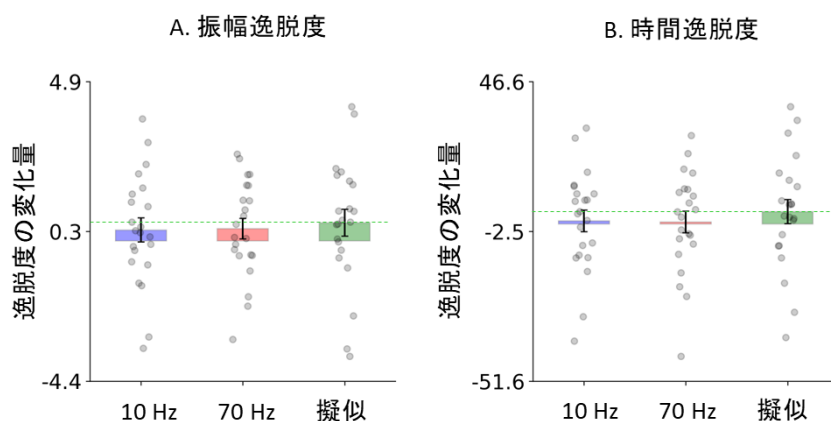


図5 振幅逸脱度と時間逸脱度の変化
平均 ± 標準誤差

4. 研究の意義

本研究の結果は、小脳に対する交流電気刺激の周波数に応じて脳ネットワーク活動が変化し、運動の正確性が向上することを初めて示したものです。本研究の知見は、小脳への交流電気刺激によって、運動障害に対する作業療法の効果を促進できる可能性を示唆しています。

5. 今後の展開

今後の研究では、運動障害を有する対象者に交流電気刺激を適用し、運動機能の改善効果を検証します。

6. 発表雑誌

雑誌名：European Journal of Neuroscience

論文タイトル：Frequency-Dependent Effects of Transcranial Alternating Current Stimulation on Cerebro-Cerebellar Connectivity and Sensorimotor Performance

著者：鈴木誠，田中悟志，井上大河，斎藤和夫，竹田浩明，高岡芳徳，松本卓也，鈴木貴子，西川順治，平田晃正

研究グループ：埼玉県立大学保健医療福祉学部作業療法学科
 浜松医科大学医学部総合人間科学講座（心理学）
 名古屋工業大学 電気・機械工学専攻 電気電子分野
 名古屋工業大学 先端医用物理・情報工学研究センター
 東京家政大学 健康科学部 リハビリテーション学科
 埼玉石心会病院リハビリテーション科
 湘南医療大学保健医療学部リハビリテーション学科作業療法学専攻

DOI：https://doi.org/10.1111/ejn.70535

研究助成：本研究は、日本学術振興会科学研究費助成事業（23K27945）の支援により実施されました。

7. 本件に関するお問い合わせ先

鈴木誠

埼玉県立大学大学院保健医療福祉学研究科

埼玉県立大学保健医療福祉学部作業療法学科

住所：〒343-8540 埼玉県越谷市三野宮 820 番地

電話：048-971-0500

E-mail：suzuki-makoto "at" spu.ac.jp

※ "at"を@に置き換えて下さい