

# 運動スキル学習を促進する経頭蓋交流電気刺激方法の設計のための 安静時脳波活動の周波数解析

○林 錦玥 (東京大学), 濱田 裕幸 (東京大学), 川崎 翼 (東京国際大学),  
菊地 謙 (東京大学), 安 琪 (東京大学), 山下 淳 (東京大学)

## Frequency Analysis of Resting-State EEG Activity for Designing Transcranial Alternating Current Stimulation to Enhance Motor Skill Learning

○Jinyue LIN (UTokyo), Hiroyuki HAMADA (UTokyo), Tsubasa KAWASAKI (Tokyo International Univ.),  
Ken KIKUCHI (UTokyo), Qi AN (UTokyo), Atsushi YAMASHITA (UTokyo)

**Abstract:** This study aims to elucidate the resting-state electroencephalographic (EEG) activity associated with motor skill learning and to establish the basis for designing transcranial alternating current stimulation (tACS) protocols to enhance learning efficacy. Resting-state EEG data were analyzed, focusing on specific frequency bands and their correlation with motor learning performance. The results revealed a trend toward a positive correlation between  $\alpha$ -band activity at the AFz electrode (prefrontal cortex), while trends toward negative correlations were observed for  $\beta$ -band activity at the P8 electrode (right parietal lobe) and low- $\gamma$  activity at the Oz electrode (occipital lobe). Although these trends did not reach statistical significance, they highlight the role of resting-state EEG activity in motor skill learning and suggest potential applications of tACS targeting specific EEG features to optimize learning outcomes. While the study provides promising insights, limitations such as the small sample size and the specificity of the experimental task necessitate further research to generalize the findings and validate the efficacy of tACS-based interventions.

**Keywords:** Electroencephalography, Motor learning, Transcranial alternating current stimulation

### 1 序論

運動学習は、訓練や練習を通じて獲得される運動行動の変化であり、状況に適した感覚・運動系の協調性が向上していく過程である[1]。運動スキル学習は運動学習の一種であり[2]、スポーツ科学やリハビリテーション分野で重要なテーマとして位置づけられており、身体機能の改善や生活の質の向上に寄与する。特に、リハビリテーション分野においては、運動スキル学習を促進する技術の確立が求められている。

近年、運動学習を促進するための手法として、経頭蓋交流電気刺激法 (transcranial alternating current stimulation, tACS) が注目されている。tACS は非侵襲的な方法で頭皮上に配置した電極を通じて交流電流を流し、特定の周波数で脳波活動を調節する技術である[3]。tACS は認知機能を向上させることが示されており[4]、近年では運動スキル学習への応用可能性も議論されている。例えば、Bologna[5]らの研究では、一次運動野および小脳に tACS を適用することで運動学習のパフォーマンスが向上することが示されている。しかし、Wessel[6]らの

研究では、同様の介入方法で効果を認めなかったことが報告されている。このように、運動スキル学習における tACS の介入効果に一貫した結果が得られておらず、確立された方法は明らかになっていない。

一貫した tACS の介入効果が得られていない1つの要因として、運動学習に関与する脳波活動に基づいた介入設計 (周波数や刺激強度) が行われていないことが挙げられる。先行研究では、運動学習過程における運動課題遂行中の脳波活動を明らかにした報告が存在する[7]が、運動課題中の計測は、運動実行に直接関与する神経活動が含まれるデメリットが存在する。一方で、運動スキル学習課題前における安静時の脳活動は、学習の効果や効率に関連があることがこれまでに示されている[8]。安静時脳波の特定の周波数帯域の活動が脳の準備状態を示し、この準備状態が運動スキル学習の効率や成否に影響を及ぼす可能性がある。そのため、学習前の安静時に tACS を与えることで、脳の準備状態を調整し、学習効率を向上させる手段として利用できる可能性が推察される。さらに、運動課題中に tACS を同時に与え

ることで生じる、内因的な神経活動と外部から変調される神経活動の折衝を回避できる点も安静時に tACS 介入を行う利点として挙げられる。しかし、これまで、運動スキル学習における安静時の脳波活動は明らかにされておらず、安静時に対する効果的な tACS 介入の設計はされていない。

本研究では、運動学習効果を高めるための tACS の設計の基盤を構築するために、運動スキル学習過程における安静時脳波の周波数特性を明らかにすることを目的とする。

## 2 研究方法

### 2.1 実験方法

運動スキル学習の研究において、運動制御の評価として球回し課題が用いられている[7]。球回し課題は、視覚と体性感覚がフィードバック情報として用いられ、学習の進行と共に感覚情報の重みづけが変化する課題である。リハビリテーションにおける運動学習との親和性を考慮した上で、本研究では、精緻な運動に不慣れである左手を用いた球回し課題を採用した。

参加者（男性 9 名、女性 5 名、平均  $22.8 \pm 3.0$  歳、全員右利き）は椅子に座りリラックスした姿勢で実験課題を行った（Fig. 1(a)）。実験は左手での球回し課題で、練習、事前テスト（Pre-test）、運動スキル学習課題（task1~task20）、事後テスト（Post-test）の順で実施した。

練習では、参加者は時計回り（CW）および反時計回り（CCW）にそれぞれ 10 回転ずつ球を回し、課題の遂行が可能であることを実験者が確認した。事前テストでは被験者は CW および CCW の球回し課題を各 60 秒間実施し、その順序はランダムに設定した。

本研究では、運動スキル学習課題の安静時の脳波活動を計測するために、運動課題前に 15 秒の準備時間を設定した。1 試行の順番として、15 秒の休憩、15 秒の準備、60 秒の課題実行を設計し、試行を 20 回繰り返した。実験参加者は、15 秒間の準備においては、2 つの球を持った状態で左手を注視し、課題実行の開始を準備するように指示された。休憩と準備、課題実行はビープ音によって切り替えるタイミングが教示された。事後テストでは再び CW および CCW の球回し課題を 60 秒

間実施し、その順序もランダムに設定した。

課題中に球を落とした場合、その試行は中断され、再度試行をやり直した。課題実行中、被験者にはできるだけ速く球を回すよう指示を与えた。試行中の回転数は、ビデオカメラ（Canon 製 iVIS HF R42）を用いて記録し、実験後球回しの回数を評価した。

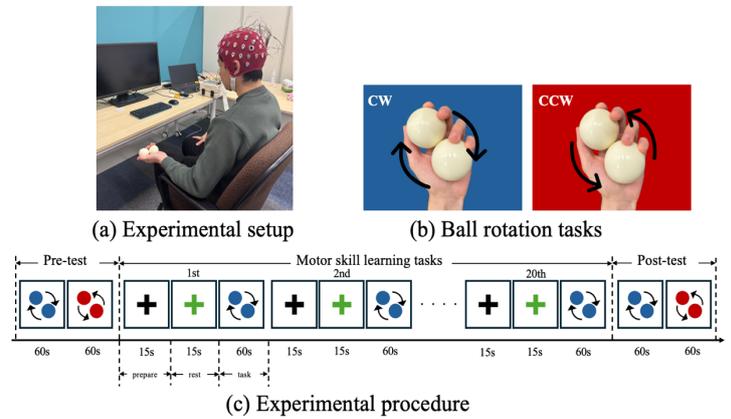


Fig. 1 Experimental process

### 2.2 解析方法

脳波解析には、脳波計（Biosemi 社製）を用いて 32 個の電極で記録された脳波データに対して行った。脳波データの前処理およびパワースペクトルの解析は EEGLAB v2024.0 を用いた。運動スキル学習課題各試行の 2 回目の準備フェーズに相当する 15 秒間のデータを安静時データとして抽出し、最初の 0.5 秒および最後の 0.5 秒を除外し、14 秒間のデータを解析対象として解析を行った。

具体的には、前処理では 1-80 Hz のバンドパスフィルタおよび 50 Hz のノッチフィルタを適用し、電源のノイズを除去した。各安静時のデータ 14 秒のデータを 2 秒間のエポックに分割し、各試行計 7 個のエポックを作成した。次に、視覚的および統計的手法を用いてノイズを含むエポックを除外した。さらに、独立成分分析を適用し、眼球運動や筋活動によるノイズを除去した。

次に、運動スキル学習過程の安静時におけるパワースペクトルの変化を観察するため、離散フーリエ変換を用いて、各エポックのパワースペクトルを計算した。解析対象とした周波数帯域は、 $\alpha$  (8-13 Hz)、 $\beta$  (13-30 Hz)、low- $\gamma$  (30-50 Hz)、high- $\gamma$  (50-80 Hz) の 4 つに分類した。この周波数帯域は先行研究[9]に基づいて決定した。

### 3 結果

#### 3.1 運動スキル学習課題

運動スキル学習課題の有効性を検証するため、被験者の球回しの回転数の変化を観察した。Fig. 2 は Pre-test および Post-test における回転回数の値を示している。二元配置分散分析の結果、条件 (Pre-/Post-test) に主効果を認めた ( $F(1, 13) = 25.87, p < 0.01$ ) が、回転方向 (CW/CCW) による主効果は認めなかった ( $F(1, 13) = 0.60, p < .81$ )。また、有意な交互作用を認めたため ( $F(1, 13) = 32.81, p < .01$ )、単純主効果の検定を行い、CW では Post-test の回転回数が Pre-test よりも有意に増加していることが確認されたが ( $t = 6.30, p < 0.01$ )、CCW では有意差は認められなかった ( $t = 1.61, p = 0.13$ )。

さらに、Fig. 3 に示す学習課題全試行における回転回数の平均値の推移からも、試行の増加に伴って、運動成績が向上していることが確認された。

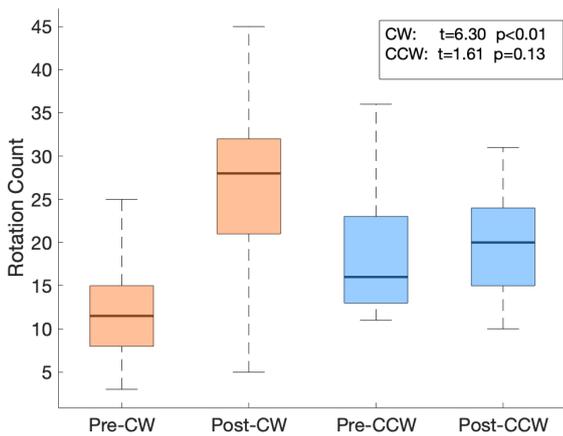


Fig. 2 Number of rotations in Pre-test and Post-test

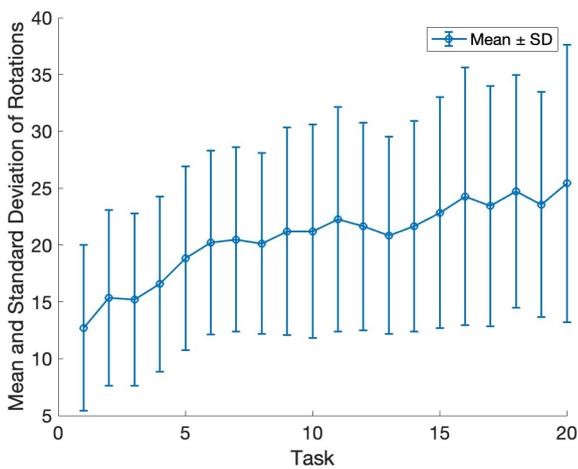


Fig. 3 Learning curve across motor skill learning trials

#### 3.2 脳波周波数の変化

各被験者のデータを task1~task5 に対応する学習課題初期と task16~task20 に対応する学習課題後期に分けて、統計的比較を行った。統計解析には Permutation test を採用した。有意水準は5%に設定した。

解析の結果、 $\alpha$ 帯で AFz, C5,  $\beta$ 帯で Fz, FC1, F8, Pz, P8, low- $\gamma$ 帯で Oz の電極において有意な増加を認めた。high- $\gamma$ 帯では有意差は認められなかった (Fig. 4)。

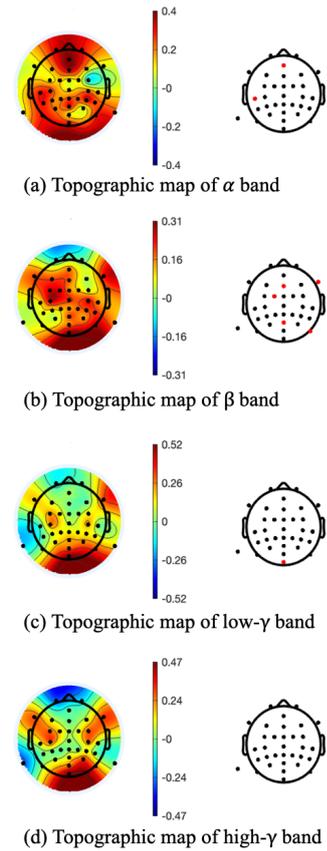


Fig. 4 Topographic maps of EEG power changes for each band between early and late learning phases

Left row indicates spectral change across specific frequency bands. Red regions indicate increased power, while blue regions represent decreased power relative to the baseline. Right row indicates electrode locations with significant differences identified through statistical analysis

#### 3.3 回転回数と絶対パワーの相関

3.2 節で有意な変化が認められた各電極を対象に、絶対パワー変化率と回転回数変化率の相関解析を行って、関連性を検討した。相関解析には Spearman の順位相関係数を用いた。

その結果,  $\alpha$ 帯 AFz 電極において正の相関傾向を認め ( $r_s = 0.31, p = 0.27$ ),  $\beta$ 帯の P8 電極と low- $\gamma$ 帯の Oz 電極において負の相関傾向を認めた (それぞれ  $r_s = -0.23, p = 0.44$  および  $r = -0.21, p = 0.46$ ). いずれの相関も有意水準は達しなかった (Fig. 5).

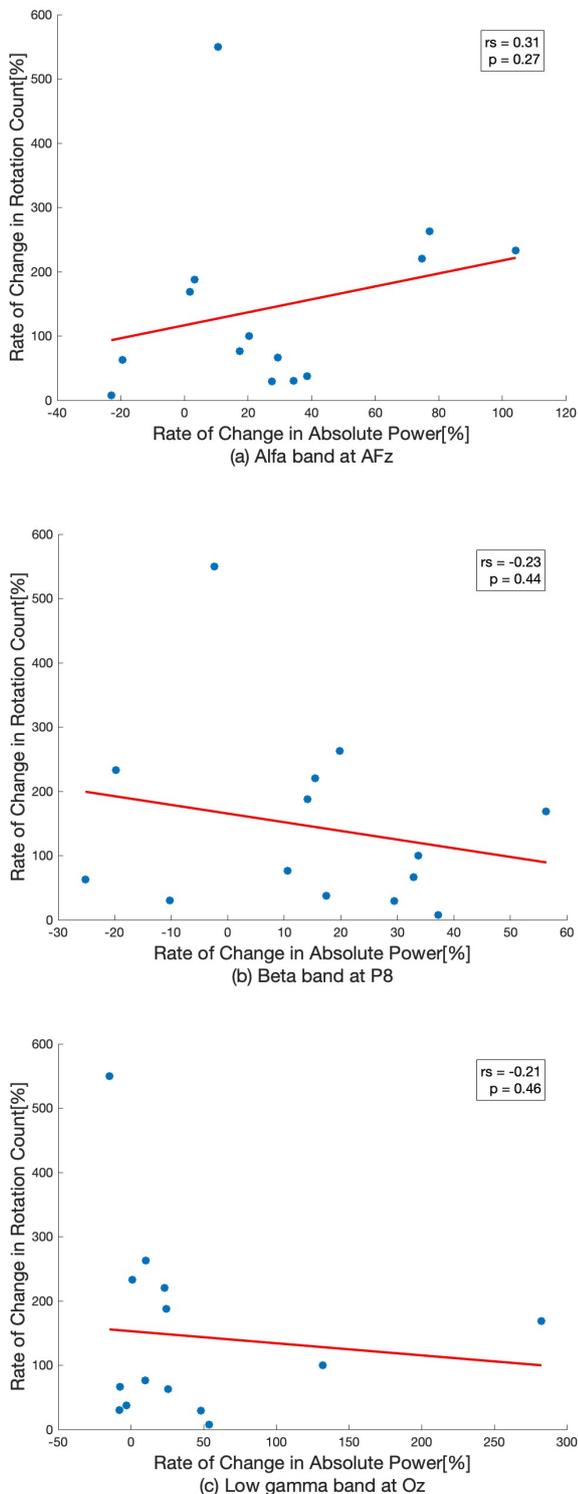


Fig. 5 Correlation analysis between the rate of change in absolute power and the rate of change in rotation count

#### 4 考察

本研究では, 運動スキル学習課題中の安静時脳波活動を計測し, 学習課題の初期と後期のパワー値を比較した結果,  $\alpha$ 帯や $\beta$ 帯, low- $\gamma$ 帯の複数の領域において学習後期に有意な増加が認められた. 各電極の絶対パワー変化率と回転回数変化率の相関について解析した結果, いずれの相関も統計的に有意ではなかったものの,  $\alpha$ 帯の AFz 電極および $\beta$ 帯の P8 電極, low- $\gamma$ 帯の Oz 電極の相関係数において弱い相関関係を示した.

AFz 電極は前頭前野に対応し, 前頭前野は, 思考や行動の高次の認知制御を行う脳領域とされている[10]. 今回の結果により, 運動スキル学習中に前頭前野の $\alpha$ 帯活動が増加することには, 運動制御や学習効率の最適化に寄与していると考えられる.

P8 電極は右頭頂葉に対応し, 空間注意や感覚運動統合において重要な役割を果たし[11],  $\beta$ 帯は認知活動の活発や運動準備と関連している. 本研究では, P8 電極における $\beta$ 帯の活動が運動学習効果の向上と負の相関を示した. これは, 学習の進行に伴い, 右頭頂葉の活動依存性が低下し, 運動スキルの熟練化が進んでいることが推察される.

視覚情報の処理において重要な役割を果たす後頭葉の Oz 電極では, low- $\gamma$ 帯の活動の変化と運動スキル学習の変化に負の相関関係が観察された. この現象は運動スキルの学習過程における脳内の情報処理が初期段階では, 視覚処理に関連する領域の活動が生じる一方で, 学習が進むことで, 視覚処理に関連する領域の活動低下が生じることが明らかになっている[12]. 本研究においても, 運動スキル学習が進んだ実験参加者では, 視覚系以外の領域が情報処理の主要な役割を担うように変化した可能性がある.

本研究結果より,  $\alpha$ 帯や $\beta$ 帯, low- $\gamma$ 帯の活動を修飾する tACS 介入が, 手の運動スキル学習の促進に寄与する可能性がある. 特に, 前頭前野の $\alpha$ 帯の活動においては, 運動スキルの学習率と正の相関であったことから, tACS 介入によって $\alpha$ 帯のパワー値を高めることで, 運動スキル学習を促進できることが推察される.

一方で, 本研究の限界点として, サンプルサイズの小ささが挙げられる. 今後はより大規模な実験設計を通

じて、検証を進める必要がある。今後、安静時の脳波調節を目的とした tACS 介入を行い、運動学習に対する促進効果を検証し、運動学習と脳波活動の因果関係を解明していく必要がある。

## 5 結論

本研究では、運動スキル学習課題における安静時の脳波活動を明らかにすることを目的として、脳波データを解析した。その結果、前頭葉の脳波活動と運動スキル学習効果の間に正の相関を認め、一方で外側頭頂葉および後頭葉脳波活動は負の相関を認めた。これらの結果は、安静時脳波活動が運動スキル学習に関連する脳波活動を反映しており、それぞれの周波数帯域が重要な役割を果たしていることが推察された。今後、本研究で得られた知見に基づき、リハビリテーションや学習支援に対する介入方略を構築していく必要がある。

## 謝辞

本研究は、JSPS 科研費 JP23K16535 の助成を受けたものです。

## 参考文献

- [1] 中村隆一, 齊藤宏: 基礎運動学, 第 5 版, 医歯薬出版 (2000)
- [2] Krakauer JW, Hadjiosif AM, Xu J, Wong AL, Haith AM: Motor Learning, *Compr Physiol*, 14, 9(2), pp.613-663 (2019)
- [3] Herrmann Christoph S., Rach Stefan, Neuling Toralf, Strüber Daniel: Transcranial alternating current stimulation: a review of the underlying mechanisms and modulation of cognitive processes, *Frontiers in Human Neuroscience*, 7 (2013)
- [4] 島田裕之: 運動および電気刺激による認知症予防の可能性, *日本老年療法学会誌*, 3 巻, pp.1-10 (2024)
- [5] Bologna, M., Guerra, A., Paparella, G., Colella, D., Borrelli, A., & Suppa, A: Transcranial alternating current stimulation has frequency-dependent effects on

motor learning in healthy humans, *Neuroscience*, 411, pp.130-139 (2019)

- [6] Wessel, M. J., Draaisma, L. R., de Boer, A. F. W., Park, C.-H., Maceira-Elvira, P., & Durand-Ruel, M: Cerebellar transcranial alternating current stimulation in the gamma range applied during the acquisition of a novel motor skill, *Sci. Rep.*, 10, 11217 (2020)
- [7] Hamada H, Wen W, Kawasaki T, Yamashita A, Asama H: Characteristics of EEG power spectra involved in the proficiency of motor learning, *Front Neurosci* (2023)
- [8] 山本浩人, 中野英樹, 石垣智也, 森岡周: 適応的運動学習における安静時脳活動は時間・空間的制御に関連する, *理学療法学 Supplement*, 44 Suppl. No.2, pp.1-10 (2017)
- [9] Johannes S, Jair S, Christoph A, Valentin R, Daniel J: Increased EEG power and slowed dominant frequency in patients with neurogenic pain, *Brain*, 129, 1, pp.55-64 (2006)
- [10] 荻阪直行: 前頭前野とワーキングメモリ, *高次脳機能研究*, 32 巻, 1 号, pp.7-14 (2012)
- [11] 永井知代子: 脳の中の巨大な接合領域: 頭頂葉, *神経心理学*, 38 巻, 1 号, pp.18-27 (2022)
- [12] Floyer-Lea A, Matthews PM: Changing brain networks for visuomotor control with increased movement automaticity, *J Neurophysiol*, 92(4):2405-12 (2004)