

右 TPJ に対する二者同時脳刺激は「共に行為をしている」感覚を形成する: 脳間同期と共同運動主体感の因果関係

Dual-Brain Stimulation of rTPJ Shapes The Sense of ‘we are acting’: The Causal Relationship Between Inter-brain Synchrony and The Sense of Joint Agency

栗原 勇人^{†,*,}, 土屋 彩茜[‡], デュマ ギヨーム[‡], 大須 理英子[‡]

Yuto Kurihara, Ayaka Tsuchiya, Guillaume Dumas, Rieko Osu

[†]モントリオール大学, [‡]早稲田大学, *日本学術振興会

Université de Montréal, Waseda University

kurihara.yuto@umontreal.ca

概要

「共に行為している」という主観的感覚 (共同運動主体感)は、脳間同期と関連することが示唆されている。しかし、両者の因果関係は明らかになっていない。本研究では、交互タッピングを行う二者の右側頭頭頂接合部 (rTPJ)に、同位相または逆位相の交流電気刺激をシータ (6 Hz), アルファ (10 Hz), ベータ (20 Hz)で与えた。その結果、シータ帯では、同位相刺激の方が逆位相刺激よりも共同運動主体感が有意に高かった。これらの結果は、rTPJ を標的としたシータ帯域 tACS が、協調行動および共同運動主体感に影響しうることを示唆する。

キーワード: 社会的インタラクション, 共同運動主体感, 経頭蓋交流電気刺激, 脳間同期, 右側頭頭頂接合部

1. はじめに

共同運動主体感 (the sense of joint agency)とは、他者と「共に行為している」と感じる主観的経験 (Pacherie, 2012)であり、社会的インタラクションを支える重要な要素である。共同運動主体感を支える神経基盤として、二者間の脳間同期が関係していることが示唆されている。例えば、Shiraishi and Shimada (2021)は、お互い協力してリズムを生成する指タッピング課題において、シータ帯域における脳間脳波同期の程度と共同運動主体感の程度が有意に相関していることを明らかにしている。しかし、脳間同期と共同運動主体感との因果関係はいまだ明らかではない。つまり、脳間同期は、各個人が共通の外的刺激を独立に処理した結果として生じる単なる随伴現象 (epiphenomenon)にすぎないのか、あるいは相互の協調を因果的に支える創発的な特性なのか未解明の問題である。

本研究では、交互タッピング課題中の二者の rTPJ に同位相または逆位相の tACS を同時に適用し、刺激位相の操作が共同運動主体感および協調行動に及ぼす影

響を検討した。脳刺激には経頭蓋交流電気刺激 (transcranial alternating current stimulation: tACS) を使用した。tACS は、刺激周波数および位相を制御しながら神経振動を同調させることが可能な非侵襲的脳刺激手法であり、tACS を二者に適用することで、理論上お互いの脳活動を同期させることが可能である。実際、Novembre et al. (2017)は一次運動野に 20 Hz (ベータ帯)の同位相 tACS を二者に適用することで、対人運動同期が促進されることを示している。加えて、Pan et al. (2021)は、下前頭回を含む前頭領域を標的とした 6 Hz (シータ帯)または 20 Hz (ベータ帯)の tACS が、対人運動を伴う歌唱訓練の学習パフォーマンスを促進することを報告している。このように、二者同時 tACS は、対人協調における行動成績を変調しうることを示されている。

本研究では、各ペアの両参加者の右側頭頭頂接合部 (right temporo-parietal junction: rTPJ)を標的とし、6 Hz, 10 Hz, 20 Hz のいずれかの周波数で、二者同時に tACS を適用した。刺激位相は、同位相または逆位相とした。TPJ は、他者の心的状態を推論し表象する能力を支える心の理論の中核的ハブとして広く知られている。加えて、社会的インタラクション時に二者の rTPJ 間で同期現象も報告されている。これらを踏まえ、本研究では tACS の刺激部位として rTPJ を選定した。Shiraishi and Shimada (2021)は、シータ帯における脳間同期が共同運動主体感と関連することを示した。この知見に基づき、本研究では、シータ帯に相当する 6 Hz 刺激が共同運動主体感を変調すると予測した。加えて、Pan et al. (2021)は媒介分析により、対人運動同期が tACS に対する社会的アウトカムへの効果を媒介することを示している。したがって、本研究では、タッピングに関する行動指標が刺激位相と共同運動主体感の関係を説明しうるかについても探索的に検討した。

2. 方法

2.1. 実験参加者

26 名 (13 組) が本実験に参加した (うち女性 16 名, mean age = 22.48, SD = 3.05, range = 18–30). 全参加者から文書によるインフォームド・コンセントを取得した. また, 本研究の実験手続はヘルシンキ宣言の倫理原則に準拠し, 早稲田大学倫理審査委員会の承認を得て実施した (承認番号: 2021-023).

2.2. 交互タッピング課題

参加者 2 人は横に並んで座り, コンピュータマウスを使って交互にタッピングを行った (図 1A). 人差し指でマウスをタップすると, 440 Hz の聴覚フィードバックが提示された. 参加者はまず基準テンポ (タッピング間隔 = 0.5 s) を聴取し, 8 音が提示された後, メトロノームは停止された. その後, 参加者らは記憶した基準テンポにできるだけ近いテンポでタッピングを行った. 各セッションは 300 回のタップで終了した.

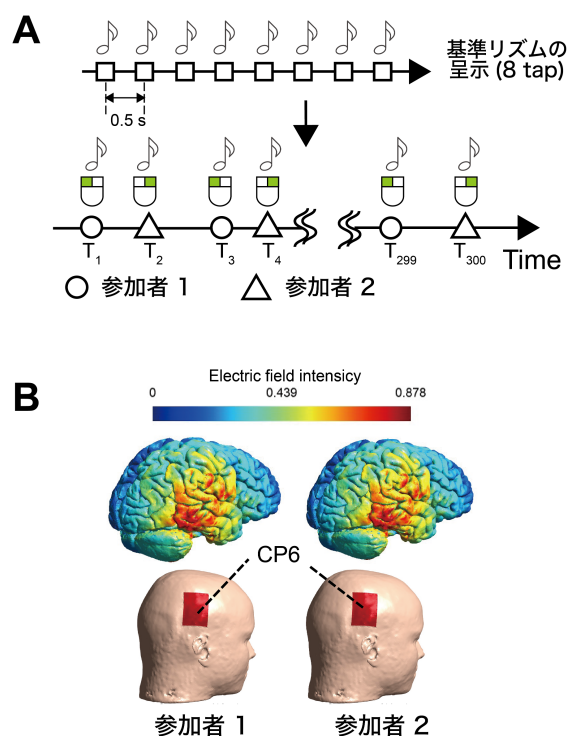
2.3. 経頭蓋交流電気刺激 (tACS)

2 台の Nurostym tACS 装置 (Neuro Device Group S.A., Warszawa, Poland) を用いて, 参加者 2 名の脳に対して正弦波の電流刺激を与えた (図 1B). 正弦波電流は, 生理食塩水に浸した 2 枚のスポンジ電極 (刺激電極: 3 × 4 cm, リターン電極: 5 × 7 cm) を介して印加した. 刺激電極は CP6 上に配置し, リターン電極は対側 (左) の前腕に配置した. tACS の電流強度は 3.0 mA に設定した.

2.4. 実験手順

実験は tACS の刺激周波数 3 水準 (6, 10, 20 Hz) と位相 2 水準 (同位相, 逆位相) を組み合わせた計 6 条件から構成され, 各条件につき 1 セッションを実施した. 6 条件の実施順序は, 順序効果を統制するため, 各ペア内でランダム化した. 各セッション終了後, 参加者は visual analog scale (VAS) を用いて, 相手とともにリズムおよびテンポをどの程度共同で制御していたと感じたか, すなわち共同運動主体感を評定した.

図 1 実験の概要. (A) タッピング課題, (B) tACS の二者同時刺激のシミュレーションには COMETS2 (ver 2.0) を使用. CP6 は国際 10-10 法に基づく.



2.5. 解析

タッピングの行動成績を評価するために, 平均 inter-tap interval (mean ITI), 平均 relative phase (mean RP), および RP の標準偏差 (SD ϕ) を算出した. mean ITI はタッピング速度を反映し, ITI が短いほどタッピングは速いことを示す. mean RP は 2 つのタップ列間の平均的な位相関係を表す. SD ϕ は RP のばらつきを定量化する指標であり, タッピングの不安定性を示す. つまり, SD ϕ が大きいほど協調は不安定であることを示す.

基準テンポ (0.50 s) への追従の程度を評価するために, mean ITI について, 各条件に対して $\mu = 0.50$ s を基準とする 1 標本 t 検定を実施し, 6 回の検定に対して p 値を FDR 補正した. 同様に, タッピングが目標相対位相である 180° で行われていたことを確認するために, mean RP について, 各条件に対して $\mu = 180^\circ$ を基準とする 1 標本 t 検定を実施し, 6 回の検定に対して p 値を FDR 補正した. さらに, mean ITI, mean RP, および SD ϕ のそれぞれについて, 周波数 (6, 10, 20 Hz) および位相 (同位相, 逆位相) を参加者内要因とする 2 要因反復測定分散分析を実施した. 主観指標については, 共同運動主体感を従属変数とし, 周波数 (6, 10, 20 Hz) および位相 (同位相, 逆位相) を参加

者内要因とする 2 要因反復測定分散分析を行った。

さらに、異なる従属変数間の潜在的関係を検討するために、ITI と共同運動主体感を対象として相関分析および媒介分析を実施した。先行するタッピング成績および主観評定の解析結果を踏まえ、刺激モードを独立変数、ITI を媒介変数、共同運動主体感を従属変数として媒介モデルを定義した。媒介効果が 0 と有意に異なるかどうかは、ブートストラップ法により、95%信頼区間に基づいて検定した。ブートストラップ標本数は 5000 に設定した。

3. 結果

3.1. 交互タッピング課題

行動指標の解析は、ペア単位 (13 ペア) で行った。まず、mean ITI が基準 ITI (0.50 s) と異なるか検討するため、各条件について 0.50 s を基準とする 1 標本 t 検定を実施した。その結果、シータ逆位相条件における mean ITI は、基準 ITI より有意に長かった ($t(12) = 4.65, p_{adj} = 0.0034, d = 1.29$, 図 2A)。一方、残り 5 条件では、いずれも 0.50 s との差は有意ではなかった。次に、mean ITI に対して、周波数および位相を要因とする 2 要因反復測定分散分析を行った。その結果、周波数×位相の交互作用は有意ではなく、周波数および位相の主効果もいずれも有意ではなかった (交互作用, $F(2, 24) = 2.703, p = 0.088, \eta_g^2 = 0.0221$; 周波数, $F(2, 24) = 0.030, p = 0.970, \eta_g^2 = 0.0003$; 位相, $F(1, 12) = 1.243, p = 0.287, \eta_g^2 = 0.0147$)。

mean RP については、各条件について 180° を基準とする 1 標本 t 検定を行ったが、いずれの条件でも有意な差は認められなかった。また、mean RP および SD ϕ に対する 2 要因反復測定分散分析においても、有意な効果は認められなかった。

3.2. 共同運動主体感

共同運動主体感に関しては、個人参加者単位 (26 名) で解析した。共同運動主体感について、周波数と位相を要因とする 2 要因反復測定分散分析を実施した。その結果、周波数×位相の交互作用が有意であった ($F(2, 50) = 4.052, p = 0.023, \eta_g^2 = 0.027$, 図 2B)。一方、周波数および位相の主効果はいずれも有意ではなかった (周波数, $F(2, 50) = 2.910, p = 0.063, \eta_g^2 = 0.014$; 位相, $F(1, 25) = 0.154, p = 0.698, \eta_g^2 = 0.00058$)。

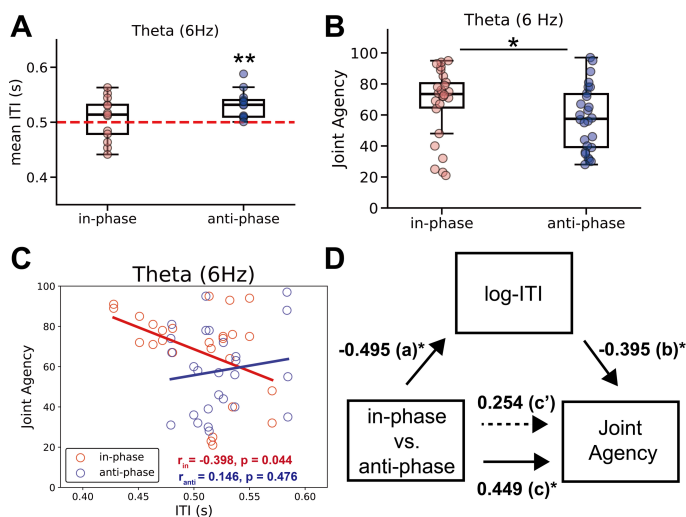
次に、各周波数における位相の効果に対する単純主効果解析を行った。その結果、6 Hz では位相の効果は有意であり ($F(1, 25) = 5.23, p = 0.031, \eta_g^2 = 0.052$)、同位相条件の方が逆位相条件よりも共同運動主体感が高かった。これに対し、10 Hz では位相の効果は有意ではなかった ($F(1, 25) = 0.05, p = 0.83, \eta_g^2 = 0.001$)。同様に、20 Hz でも有意ではなかった ($F(1, 25) = 3.54, p = 0.072, \eta_g^2 = 0.027$)。

3.3. 相関分析および媒介分析

6 Hz 条件において、ITI の基準テンポからの逸脱および共同運動主体感の位相差が観察されたため、以降の解析では 6 Hz 条件に焦点を当てた。同位相では、ITI と共同運動主体感の間に有意な負の相関が認められた ($r = -0.398, p = 0.044$, 図 2C)。一方、逆位相では有意な相関は認められなかった ($r = 0.146, p = 0.476$, 図 2C)。

タッピング速度が刺激位相と共同運動主体感の関係を説明しうるかを探索的に検討するため、媒介分析を実施した。媒介分析では、歪度を低減するために ITI を対数変換した。その結果、「同位相 vs. 逆位相」は共同運動主体感を予測しうることを示され (path c = 0.449, $p = 0.031$)、ITI を媒介変数としてモデルに組み入ると、「同位相 vs. 逆位相」と共同運動主体感の関係は有意ではなくなった (path c' = 0.254, $p = 0.208$, 図 2D)。推定された間接効果は正の値を示し ($\beta = 0.196$)、95% 信頼区間はわずかに 0 をまたいでいた ($[-0.001, 0.670]$)。

図 2 本実験の結果。(A) 6 Hz における mean ITI の同位相と逆位相。(B) 6 Hz における共同運動主体感の同位相と逆位相。(C) 同位相および逆位相における ITI と共同運動主体感との散布図。(D) 媒介モデルの概要。



4. 考察

本研究では、交互タッピング課題中の二者に対する tACS の刺激位相操作が、共同運動主体感および協調行動に及ぼす影響を検討した。その結果、6 Hz 逆位相刺激ではタッピングが基準テンポより有意に遅くなり、シータ条件では共同運動主体感が逆位相条件で同位相条件より低かった。さらに、シータ刺激下の同位相条件でのみ、短い ITI がより強い共同運動主体感を予測した。媒介分析では、ITI が脳刺激の効果を部分的に説明しうる可能性が示唆された。これらの結果は、rTPJ 間のシータ逆位相が対人協調の効率を低下させることで、共同運動主体感を弱める可能性を示している。

本研究は、rTPJ を標的としたシータ帯域の二者同時 tACS が、協調テンポおよび共同運動主体感を変調しうることを示した。実際、先行する脳間脳波研究でも、共同注意や行為協調に伴って前頭・頭頂ネットワークの脳間シータ結合が高まることが報告されており (Léné et al., 2021), 本研究の結果はこれらの知見と整合する。また、rTPJ は行為や意図の帰属に関与することから (Saxe and Kanwisher, 2003), rTPJ を標的とした tACS は、共同運動主体感を変調しうる可能性がある。

媒介分析の結果から、共同運動主体感に及ぼす効果が、協調効率の変化を介して部分的に伝達されている可能性がある。実際、Pan et al. (2021) は、歌唱訓練を行う教師と生徒の前頭領域に 6 Hz の同位相 tACS を与えたところ、対人運動同期の増加を部分的に介して、学習を改善することを示しており、本研究の媒介効果モデルと類似している。ただし、この間接経路は、媒介効果推定値の信頼区間が 0 を跨いでいたことから、媒介分析の結果に関して慎重に解釈する必要がある。

本研究の限界として、対象は 13 組と少ない。それでも、脳刺激条件間でタッピングテンポおよび共同運動主体感に差が観察された。ただし、サンプルサイズが小さいため、効果量推定の精度が低く、微妙なパターンの検出が困難であった可能性がある。今後は、より大規模で多様なサンプルにおいて再現を行い、本研究の知見の頑健性と適用範囲を検証することが重要である。さらに、本研究では sham 条件を含めていない。結果が周波数特異的かつ位相特異的であったことは、末梢感覚や覚醒水準の変化といった非特異的な要因だけでは説明しにくい、それらの寄与を完全には排除できない。今後は、二重盲検 sham 条件およびモンタージュ統制条件を組み込む必要がある。

本研究は、rTPJ を標的とするシータ帯域の二者同時 tACS が、協調行動を介して共同運動主体感に関与する可能性を示唆した。とくに、シータ逆位相刺激は、交互タッピングの構造的安定性を保ったまま対人協調の効率を低下させ、そのことを通じて共同運動主体感を弱める可能性が示唆された。これらの知見は、共同運動主体感が rTPJ を含むシータ帯域の対人神経ダイナミクスによって支えられている可能性を示す。

文献

- Feurra, M., Bianco, G., Santamocchi, E., Del Testa, M., Rossi, A., & Rossi, S. (2011). Frequency-dependent tuning of the human motor system induced by transcranial oscillatory potentials. *Journal of Neuroscience*, 31, 12165–12170. doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0978-11.2011
- Léné, P., Karran, A. J., Labonté-Lemoyne, E., Sénécal, S., Fredette, M., Johnson, K. J., & Léger, P.-M. (2021). Is there collaboration specific neurophysiological activation during collaborative task activity? An analysis of brain responses using electroencephalography and hyperscanning. *Brain and Behavior*, 11, e2270. doi.org/10.1002/brb3.2270
- Novembre, G., Knoblich, G., Dunne, L., & Keller, P. E. (2017). Interpersonal synchrony enhanced through 20 Hz phase-coupled dual brain stimulation. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 12, 662–670. doi.org/10.1093/scan/nsw172
- Pacherie, E. (2012). The phenomenology of joint action: Self-agency vs. joint-agency. In A. Seemann (Ed.), *Joint attention: New developments* (pp. 343–389). MIT Press.
- Pan, Y., Novembre, G., Song, B., Zhu, Y., & Hu, Y. (2021). Dual brain stimulation enhances interpersonal learning through spontaneous movement synchrony. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 16, 210–221. doi.org/10.1093/scan/nsaa080
- Saxe, R., & Kanwisher, N. (2003). People thinking about thinking people: The role of the temporo-parietal junction in “theory of mind.” *NeuroImage*, 19, 1835–1842. doi.org/10.1016/S1053-8119(03)00230-1
- Shiraishi, M., & Shimada, S. (2021). Inter-brain synchronization during a cooperative task reflects the sense of joint agency. *Neuropsychologia*, 154, 107770. doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2021.107770