

共同サイモン課題における共同運動主体感と脳活動同期

The sense of Joint Agency and brain activity synchronization during the joint Simon task

世良 菜那見[†], 嶋田 総太郎[‡]
Nanami Sera, Sotaro Shimada

[†] 明治大学大学院理工学研究科, [‡] 明治大学理工学部
[†] Graduate School of Science and Technology, Meiji University
[‡] School of Science and Technology, Meiji University
ce211035@meiji.ac.jp

概要

我々は他者と関わりながら生活を営む上で「この運動は我々が引き起こしている」という共同運動主体感を感じることもある。本研究では、協調課題の1種である共同サイモン課題における共同運動主体感と2者の脳波同期の関係から共同運動主体感に関わる脳領域を調査した。その結果、 δ 波帯域における行為者の前頭前野と観察者の前頭前野や運動野に関連する脳波同期が共同運動主体感の生起に関わることが示された。

キーワード: 共同運動主体感 (sense of joint agency)、二人同時脳活動計測 (hyperscanning)

1. はじめに

我々は他者と協調しながら生活を営む上で、「この運動は我々が引き起こしている」という共同運動主体感を感じる事がしばしばある。この感覚は集団でのパフォーマンスの向上に関わる重要な社会認知機能である[1]。一方で、共同運動主体感が引き起こされる脳メカニズムは未だ明らかになっていない。

共同サイモン課題は協調課題の一種であり、二人の被験者がモニターの注視点の左右どちらかに呈示される標的刺激に対してできるだけ速く反応する課題である。それぞれの被験者は反応すべき標的刺激が決まっており、標的刺激の呈示に対してボタンをタッピングすることによって反応する。刺激が呈示された方向とその刺激に対して反応する被験者の方向が一致しているとき、一致していないときに比べて反応時間が速くなる「共同サイモン効果」が生じるとされている。一方で、片方の被験者が課題に取り組まず観察するにとどめた場合、共同サイモン効果は生じない。このことから、共同サイモン課題は二人で協力して行った場合のみ他者との一体化が生じると考えられている[2]。

一方、自己と他者が交互にボタンを押して音を鳴らす交互タッピング課題においては、相互に協調するほど共同運動主体感が高まること[3]、そのときの脳活動の同期も高まること[4]も報告されている。これらの先

行研究より、共同サイモン課題を他者と共同で取り組むことによって共同運動主体感が高まり、それに伴って二者の脳活動の同期も高まると考えられる。しかしながら、共同サイモン課題を用いて共同運動主体感と脳波同期の関係を調査したものはない。

そこで本研究では、共同サイモン課題中の二者の脳活動を同時計測し、共同運動主体感と脳活動同期の関係を調査することによって、共同運動主体感の生起に関わる脳領域を検討する。

2. 実験

2.1 被験者

健康な同性ペア 24組 48名(21.7 \pm 0.7歳,平均 \pm 標準偏差)の被験者に実験に参加してもらった。

2.2 実験手順

2人ペアの被験者は1台の刺激呈示用モニターの前に左右に隣り合って座り、共同サイモン課題に取り組んでもらった。実験は観察セッションと共同セッションの二つに大別し、両セッションとも実験中は画面中央に呈示されている注視点に着目するように指示をした。標的刺激は白の正方形または円とし、画面中央に呈示されている注視点の左右どちらかにランダムに呈示した(図1)。

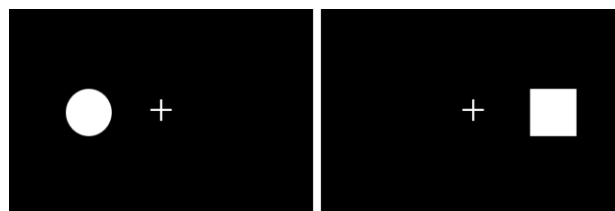


図1 刺激呈示の例

(左: ●が注視点の左側に呈示された場合
右: ■が注視点の右側に呈示された場合)

一方の被験者は円を、もう一方の被験者は正方形

を標的刺激とした。観察セッションでは、一方の被験者はキーボードの上に右手をのせ、標的刺激が呈示されたら「0」を押すように、もう一方の被験者は手を膝の上に置き、標的刺激が呈示されても反応をしないように指示をした。一方で共同セッションでは、両者ともにキーボードの上に右手をのせ、一方の被験者は標的刺激が呈示されたら「0」を押すように、もう一方の被験者は標的刺激が呈示されたら「1」を押すように指示をした。各セッションでは、注視点を2000 ms 呈示したあと、標的刺激を呈示しその刺激の形に基づき反応してもらうという一連の流れを1 試行とし、60 試行を行った。また、観察セッション時は一方の標的刺激には反応されないため、Stemzel らによる先行研究を踏襲し280、320、360 ms のいずれかの時間が経過したら自動的に次の試行に移るように設定をした。各セッションではそれぞれの標的刺激は同数ずつ表示した。また、刺激が呈示された方向とその刺激に対して反応する被験者の方向が一致しているときを一致条件、そうでないときを非一致条件とし、一致条件と非一致条件も同数ずつとした。

各セッション終了後、実験中どの程度共同運動主体感を感じたのかを1「私が引き起こした」から7「我々が引き起こした」までの7段階のリッカート尺度で評価してもらった。実験パラダイムを図1に示す。

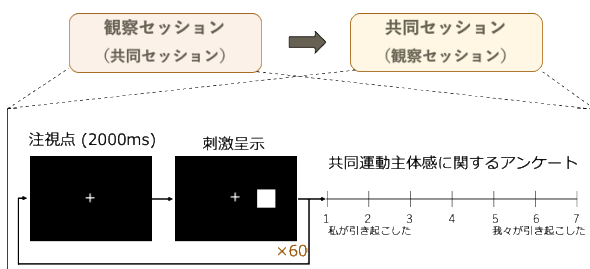


図1 実験パラダイム

2.3 脳波計測

実験中は両者ともに g.tec 社製の脳波測定システム (g.USBamp, g.tec Inc, Schiedlberg, Austria) を用いて、拡張国際 10/20 法に従った14チャンネル(Fp1, Fp2, F5, Fz, F6, T7, C3, Cz, C4, T8, P5, Pz, P6, Oz)を測定した。また、AFzに接地電極、左耳朶に参照電極を設置し計測した。さらに、瞬目成分を脳波から除去するため、左目の上下に電極を貼付し垂直眼電位も測定した。サンプリング周波数は256 [Hz]とした。

2.4 解析

異なる標的刺激で反応してしまった場合や、標的刺激が呈示されてから1000 ms 経過しても反応しなかった場合には失敗試行として解析から除外した。また、測定中の機器によるエラーや脳波以外のアーティファクトによる影響により24ペアのうち5ペアを解析から除外した。

脳波解析は数値計算ソフトウェアである MATLAB R2020a (The Math Works, Massachusetts, USA) を用いた。

また、MATLAB のツールボックスである EEGLAB version 14.1.2b (Delorme & Makeig, 2004) を用いて遮断周波数48Hzのローパスフィルタを適用した。その後、試行ごとにエポックを分割し、体動などのアーティファクトを含むエポックを除去した。アーティファクトの閾値は $\pm 100 \mu V$ とした。さらに、独立成分分析 (independent component analysis, ICA) を行い、瞬目成分由来のアーティファクトを除去した。

ペア間の脳活動の同期を調査するために PSI (phase synchronization index) を用いた。PSI は位相同期解析手法の一種で、指定した時間窓内の二つの波の位相同期度を以下のように評価するものである。 t を時間窓、 N を時間窓に含まれるデータの数、 f を周波数、 $\Delta\theta_{jk}(i, f)$ を信号 j と k の時間窓内の i 番目の f 成分の位相差とすると、PSI は以下の式で算出できる。

$$PSI_{jk}(t, f) = \sqrt{\left(\frac{\sum_{i=1}^N \cos(\Delta\theta_{jk}(i, f))}{N}\right)^2 + \left(\frac{\sum_{i=1}^N \sin(\Delta\theta_{jk}(i, f))}{N}\right)^2}$$

$PSI_{jk}(t, f)$ は周波数 f 、時間窓 t 内の2つの信号の位相差の変動を見ており、位相差の変動が小さいほど PSI の値は1に近づく。本研究では、刺激呈示を0 msとしたとき、-300~700 ms の解析区間とし、1 試行ごとに PSI 値を算出した。また、周波数は5つの周波数帯域 (δ 波帯域: 1-4 Hz, θ 波帯域: 4-8 Hz, α 波帯域: 8-13 Hz, β 波帯域: 13-30 Hz, γ 波帯域: 30-45 Hz) に分けた。各試行でタッピングを行った人を行為者、タッピングを行わなかった人を観察者とし、観察セッションと共同セッション間の PSI 値に有意な差があるかを調査した。

3. 実験結果

3.1 アンケート結果

観察セッション時および共同セッション時における共同運動主体感に関するアンケートの平均スコアを図3に示す。シャピロウィルク検定を行ったところ、観察セッション、共同セッションともにデータの非正規性が見られた (共同セッション: $p < 0.05$, 観察セッ

オン: $p < 0.05$)。そこで、ウィルコクソンの符号順位検定を用いて、共同セッションと観察セッションの間に共同運動主体感スコアに差があるかを調査した。その結果、共同セッションでは、観察セッションよりも有意に共同運動主体感のスコアが大きくなることが示された ($Z = 5.52, p < 0.001$)。

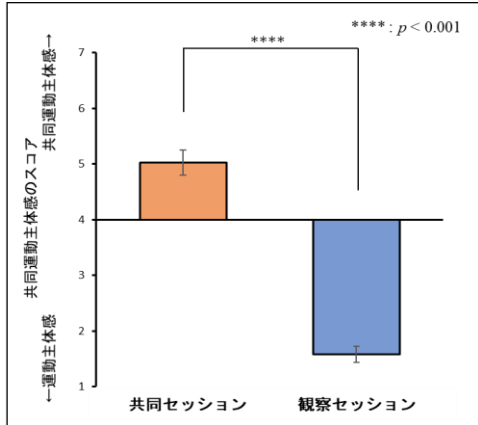


図3 共同運動主体感に関するアンケート結果

3.2 反応時間結果

共同セッション、観察セッションそれぞれにおける一致・非一致条件の反応時間を図4に示す。シャピロウィルク検定を行ったところ、データの非正規性が見られた(共同 - 一致条件, $p < 0.05$)。そこで、ウィルコクソンの符号順位検定を用いて共同セッション、観察セッションにおいて一致・非一致条件間で反応時間に差があるかを調べた。その結果、共同セッションにおいて、一致条件の反応時間は非一致条件の反応時間よりも有意に小さかった ($Z = -3.35, p < 0.005$)。一方で、観察セッションにおいては一致・非一致条件間で反応時間に有意な差は見られなかった ($Z = -1.37, p > 0.05$)。

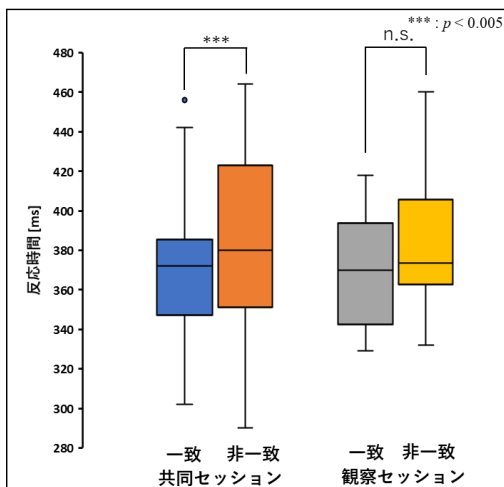


図4 各条件における反応時間

3.3 脳間位相同期

各周波数帯域において、共同セッションが観察セッションに比べて有意に PSI の値が大きかった脳間結合 ($p < 0.05$)を図5に示す。δ, α, β, γ波帯域において、共同セッションの方が観察セッションよりも PSI の値が大きかった脳間結合が見られた。特に、δ波帯域において結合が多く見られた。また、これらの結合における実験値と対照値を t 検定により比較したところ、すべての結合において実験値は対照値よりも有意に大きかった ($p < 0.05$)。

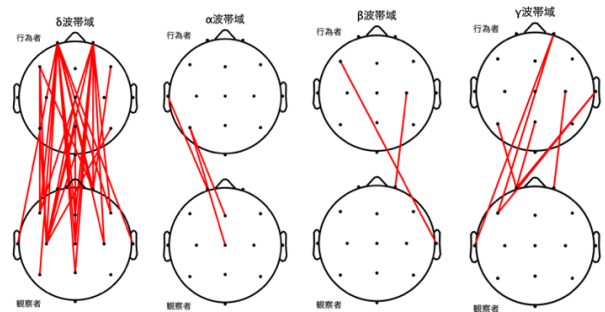
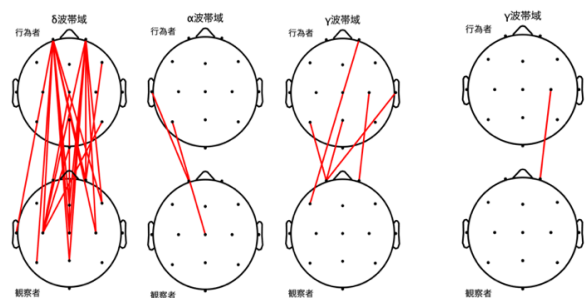


図5 各周波数帯域において共同セッションと観察セッションの間に有意な差を示した脳間結合

3.4 脳間位相同期と行動指標の相関

共同運動主体感のアンケートスコアと PSI 値に対してスピアマンの順位相関解析を行った。その結果、正の有意な相関を示した結合を図6(a)に示す ($p < 0.05$)。δ, α, γ波帯域において、共同運動主体感と PSI 値の間に有意な相関がある脳間結合が見られた。特にδ波帯域の行為者の前頭前野および観察者の運動前野や運動野に関わる結合が多く見られた。

同様に、反応時間と PSI 値に対してスピアマンの順位相関解析を行った結果、負の有意な相関を示した結合を図6(b)に示す。γ波帯域における行為者 C4 と観察者 Fp2 間で反応時間と PSI の間に有意な負の相関が見られた ($r = -0.31, p < 0.05$)。



(a) PSI とアンケート結果 (b) PSI と反応時間

図6 PSI と行動指標間に相関が見られた結合

4. 考察

Stenzel らによる先行研究[2]では共同サイモン課題を他者と共同で取り組むと共同運動主体感が高まることが示されたが、共同運動主体感の生起に関わる脳領域は明らかになっていなかった。本研究では、共同運動主体感の生起に関わる脳領域を共同サイモン課題における共同運動主体感のアンケート結果と脳波同期の関係から検討を行った。

共同運動主体感のアンケート結果から、一方のみ課題に取り組むときよりも、他者と共に課題に取り組むときの方が、共同運動主体感が感じられやすいことが確かめられた。この結果から、他者と共に課題に取り組んだときは、一方のみ課題に取り組むときよりも二者が一体化し、共同運動主体感が生起されたと考えられる。また、反応時間の結果から、共同セッションでは共同サイモン効果が生じ、観察セッションでは共同サイモン効果が生じなかったことが確かめられた。この結果から、Stenzel らによる先行研究[2]と同様、共同サイモン課題を二人で協力して行った場合のみ他者との一体化が生じたと考えられる。

次に、脳波位相同期の結果から、共同セッションでは観察セッションよりも δ 波帯域の脳波同期が高いことが示された。また、共同運動主体感とPSIの相関解析により、特に δ 波帯域の行為者の前頭前野および観察者の前頭前野や運動野に関連する脳波同期が共同運動主体感の生起に関わっていることが示された。

前頭前野はアイコンタクトを行っているとき[5]や、二人で同時にボタンを押す課題[6]など二者で課題を行っているときの脳間同期に関わることが多く報告されており、タイミング制御などに関わっていると考えられている。本研究では、呈示された刺激に対してタイミングよく運動を行う必要があり、タッピングをするタイミングに注意を払っていたと考えられる。

また、運動野はミラーニューロンシステムと呼ばれ、他者が運動するのを観察したときにあたかも自分が運動したかのように活動する脳領域である。このミラーニューロンシステムは他者運動の理解の機能を担っていると考えられている。本研究では、観察者は他者の行為を観察し、他者の運動を理解したことによって観察者のミラーニューロンシステムに関連する脳波同期が共同運動主体感の生起に関わったと考えられる。

以上のことから、共同サイモン課題において二者が一体化しているとき、両者はともにタッピングするタイミングに意識をむけ、さらに、観察者が行為者の行為

を理解することによって共同運動主体感が生起したのではないかと考えられる。

参考文献

- [1] Dewey, J. A., Pacherie, E., & Knoblich, G. (2014). The phenomenology of controlling a moving object with another person. *Cognition*, 132(3), 383-397.
- [2] Stenzel, A., Dolk, T., Colzato, L. S., Sellaro, R., Hommel, B., & Liepelt, R. (2014). The joint Simon effect depends on perceived agency, but not intentionality, of the alternative action. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8.
- [3] Nicole K. Bolt, et al., (2016). Mutual coordination strengthens the sense of joint agency in cooperative joint action. *Consciousness and Cognition*, 46, 173-187.
- [4] Kawasaki, M., Yamada, Y., Ushiku, Y., Miyauchi, E., & Yamaguchi, Y. (2013). Inter-brain synchronization during coordination of speech rhythm in human-to-human social interaction. *Scientific Reports*, 3.
- [5] Hirsch, J., Zhang, X., Noah, J. A., & Ono, Y. (2017). Frontal temporal and parietal systems synchronize within and across brains during live eye-to-eye contact. *Neuroimage*, 157, 314-330.
- [6] Cui, X., Bryant, D. M., & Reiss, A. L. (2012). NIRS-based hyperscanning reveals increased interpersonal coherence in superior frontal cortex during cooperation. *Neuroimage*, 59(3), 2430-2437.
- [7] Dumas, G., Nadel, J., Soussignan, R., Martinerie, J., Gamero, L. (2010). Inter-brain synchronization during social interaction. *PLoS ONE*, 5, e12166.
- [8] Okamoto, M., Dan, H., Sakamoto, K., Takeo, K., Shimizu, K., Kohno, S., et al. (2004). Three-dimensional probabilistic anatomical cranio-cerebral correlation via the international 10-20 system oriented for transcranial functional brain mapping. *Neuroimage*, 21(1), 99-111.