

共同作業における運動主体感と脳波同期の関係 Relationship between the inter-brain synchronization during a joint action and the Sense of Joint Agency

白石 壮大[†], 嶋田 総太郎[‡]
Masahiro Shiraishi, 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
ce181037@meiji.ac.jp

概要

集団で運動したときに「この運動は我々が起こしている」と感じる感覚を共同運動主体感という。本研究では、共同作業中の2者の脳波を同時計測し、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の生起に関わる脳領域を調査した。実験の結果、相互に協調し合う共同作業課題において、共同運動主体感は高まり、リーダーの右前頭葉とフォロワーの右側頭頭頂接合部 (rTPJ) のθ波の活動同期も高まることが示された。また、共同運動主体感と上記の脳波同期には正の相関が見られた。これらの結果から、2者での協調運動による共同運動主体感は、運動中の役割によって生起に関わる脳領域に違いがあり、それらの脳活動の同期とともに高まることが明らかになった。

キーワード: 共同運動主体感 (the sense of joint agency), 脳間同期 (inter-brain synchronization), 脳活動同時計測 (hyperscanning)

1. はじめに

ある運動が自身によって引き起こされたと感じる感覚を運動主体感という。この運動主体感は、個人での運動によって感じられる自己運動主体感 (the sense of self-agency) と2人以上の集団で運動を起こしたときに感じられる共同運動主体感 (the sense of joint agency) に大別される[1]。共同運動主体感は、社会認知機能のひとつであり、「我々がこの運動を引き起こしている」と感じる感覚と定義される[2]。共同運動主体感が高まることで集団のパフォーマンスが向上することが示唆されているが、その生起メカニズムは明らかにされていない[3]。

先行研究[4]によって、共同作業を行う2者は互いに協調しあうことで共同運動主体感は高まることが示されたが、脳活動計測を行ったものはまだない。一方で、

協調作業を行う2者の脳活動についての先行研究[5]において、協調課題中の脳活動は2者間で同期し、相互に協調しあうほど脳活動の同期が高まることが示されている。これらの先行研究から、脳活動の同期が高いときには共同運動主体感も高いという仮説が立てられる。そこで本研究では、2者による共同作業中の脳波を同時計測し、運動主体感と脳活動の同期の関係性について調査した。

2. 実験

2.1. 被験者

健康で右利きの知り合い同士の男性18ペアの36名が実験に参加した (21.6 ± 1.3 歳、平均 ± 標準偏差)。

2.2. 実験手順

横に並んで椅子に座った2人ペアの被験者に共同作業課題を行わせた。2者の協調度が運動主体感に与える影響を検討するために、共同作業課題は交互課題と連続課題の2条件を用意した (図1)。

交互課題	リーダー	
	フォロワー	
連続課題	リーダー	
	フォロワー	

図1 共同作業課題

交互課題では被験者たちは交互にマウスクリックをした。連続課題では片方が4回連続でマウスクリックをした後にもう片方が4回連続でマウスクリックをした。またマウスクリックを先行して始める人をリーダー、もう一方をフォロワーとした。

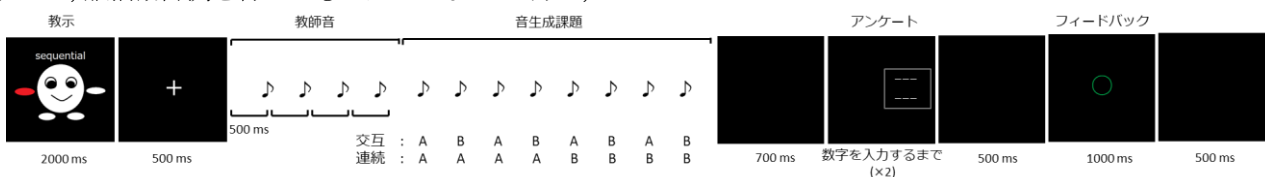


図2 実験パラダイム

実験パラダイムを図2に示した。まず試行の最初に共同作業課題と役割を教示する視覚刺激を2000 ms間呈示した。固視十字を500 ms間表示したのち、500 ms間隔で音を4回呈示した(教師音)。被験者らに教師音のペースを維持するように、教示された課題・役割に従いマウスクリックによって音を8回生成させた。課題終了後、700 msの間隔を挟んで運動主体感を主観的に評価させるアンケートに移った。『音生成のタイミングをコントロールしていたのは自分1人か、自分とパートナーの2人か』を1~9の点数をつけさせた。1に近いほど自己運動主体感を、9に近いほど共同運動主体感を感じていたことを表す。被験者にできるだけ正確に課題を行わせるために、アンケート終了から500 ms後、被験者たちが500 ms間隔でマウスクリックをできていたかを「○」または「×」を呈示することでフィードバックした。1試行における音と音の平均間隔が 500 ± 25 ms以内に収まっていたなら「○」とした。フィードバック後、500 msのインターバルを設けた。以上の一連の流れを1試行とした。

5試行を1ブロックとし、課題(交互、連続)と役割(リーダー、フォロワー)のカウンターバランスを取り、各条件(課題×役割)を4ブロックずつ、合計16ブロックの80試行を行った。

2.3. 脳波計測

脳波測定にはg.tec社製の脳波計(g.USBamp, g.tec Inc., Schiedlberg, Austria)を用いた。脳波(EEG)はAg-AgClアクティブ電極を拡張10-20法に則り、Fp1, Fp2, F5, Fz, F6, T7, C3, Cz, C4, T8, P5, Pz, P6, Ozの計14ヶ所に貼付し、基準電極を左耳朶、接地電極をAFzに貼付し計測した。また、左目の上下に取り付けられた電極から垂直眼電図(vertical EOG)が、EEGと同じ生体アンプにより計測された。0.5~100 Hzのバンドパスフィルタをかけ、サンプリング周波数1200 Hzで記録した。

2.4. 解析

各試行における音と音の平均間隔が 500 ± 25 ms以内に収まっていなかった試行を失敗試行とし、失敗試行を解析から除外した。また、実験機器のエラーにより、18ペアの被験者のうち2ペアを解析から除外した。

脳波解析には数値解析ソフト(MATLAB, The MathWorks, Massachusetts, USA)を使用した。MATLAB上で動作する脳波解析ソフト(EEGLAB 14.1.1b, San Diego, USA)により遮断周波数48 Hzの

ローパスフィルタ(low pass filter; LPF)を適用し、1200 Hzから200 Hzにダウンサンプリングしたのち、EEG・EOGデータを課題のオンセットから5000 ms間のエポックに分割した。体動などのアーティファクトを含むエポックを除外し、EEGデータから瞬目によるアーティファクトを除去するために、Infomaxアルゴリズムによって独立成分分析(ICA)を行った。ICAにより再構成されたEEGデータに離散ウェーブレット変換を適用し、1~45 Hzの各周波数における位相成分を算出した。

ペア間の脳活動の同期を調査するためにPhase Synchronization Index (PSI)を用いた。PSIは位相同期解析手法のひとつで、時間窓を設定し、ずらしていくことでふたつの波形の位相の同期度を求めることができる。

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

上式における t は時間窓、 N は時間窓に含まれるデータの数、 f は解析する周波数を示し、時間窓に含まれる i 番目の位相差 $\Delta\phi_{jk}(i, f)$ を用いて算出する。PSI値が高いほどふたつの波形の位相が同期していることを示す。本研究では時間窓を5000 msとし、1試行ごとにPSI値を算出した。

位相データを5つの周波数帯域(δ 波帯域:1-3 Hz, θ 波帯域:4-7 Hz, α 波帯域:8-13 Hz, β 波帯域:14-30 Hz, γ 波帯域:31-45 Hz)に分けたのち、ペアでない被験者同士のPSI値を基準値として、ペア間PSI値と基準値の有意差をt検定により検討した。有意なPSI値が見られた2者のチャンネル間のPSI値を課題交互と連続課題の2条件間でt検定を行った。

3. 実験結果

3.1. 主観的報告

各条件における全被験者の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に示した。なお、エラー

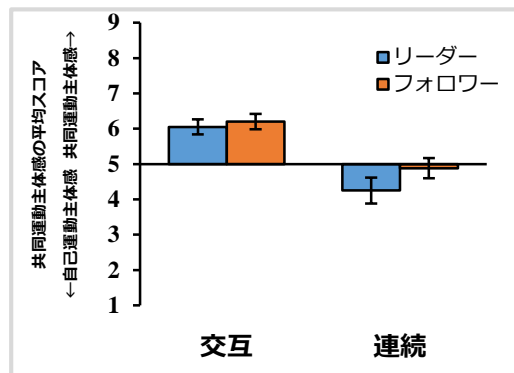


図3 共同運動主体感の平均アンケートスコア

ーバーは標準誤差を表している。2要因の分散分析(課題×役割)を行ったところ、課題による主効果がみられた ($F(1, 31) = 18.9, p < 0.001$; $F(1, 31) = 4.4, p < 0.05$)。しかし、役割による主効果および交互作用はみられなかった ($F(1, 31) = 1.5, p = 0.24$)。

リーダーの共同運動主体感スコアとフォロワーの共同運動主体感スコアの関係を図4に示した。図4の共同運動主体感スコアに対して主成分分析を行ったところ、第一主成分の寄与率が91.1%となったため、第一主成分をペアの共同運動主体感の指標とした(図5)

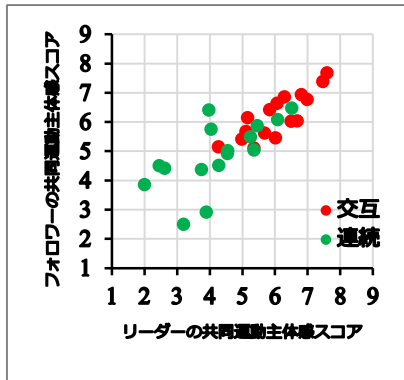


図4 リーダーとフォロワーの共同運動主体感の関係

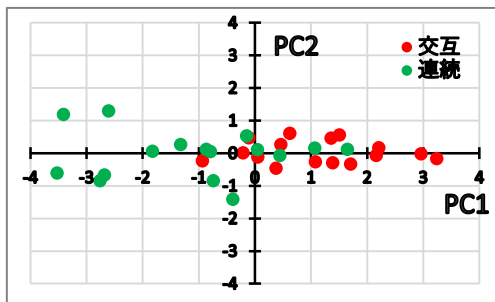


図5 共同運動主体感の主成分

3.2. 脳波同期

各周波数帯域において有意なPSIを示し、交互課題と連続課題間でPSIに有意差があったチャンネル間の結合を図6に示した。θ波帯域において、連続課題よりも交互課題でリーダーのF6(右前頭部)とフォロ

ーのT8(右側頭部)およびP6(右頭頂部)の同期度が高かった。また、α波帯域において、交互課題よりも連続課題でリーダーのFp1(左前頭極部)とフォロワーのT7(左側頭部)の同期度が高かった。

3.3. 共同運動主体感と脳波同期の関係

運動主体感の第一主成分と有意なPSI(図6)に対してピアソンの相関解析を行った。θ波帯域におけるリーダーのF6とフォロワーのT8およびP6間において有意な正の相関を示した ($r = 0.40, p < 0.05$; $r = 0.37, p < 0.05$) (図7,8)。α波帯域におけるリーダーのFp1とフォロワーのT7間においては有意な相関は見られなかった。

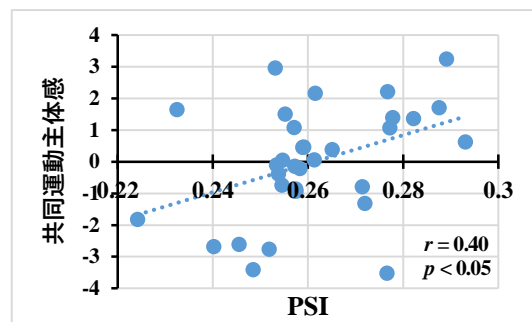


図7 共同運動主体感とθ波帯域におけるリーダーF6、フォロワーT8間のPSIの相関

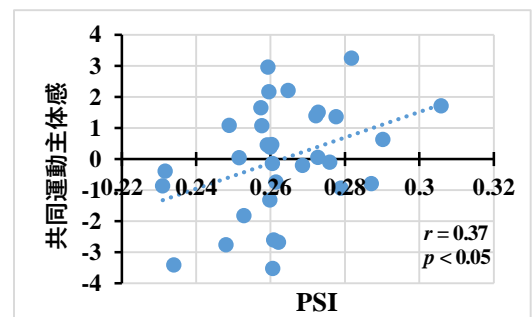


図8 共同運動主体感とθ波帯域におけるリーダーF6、フォロワーP6間のPSI値の相関

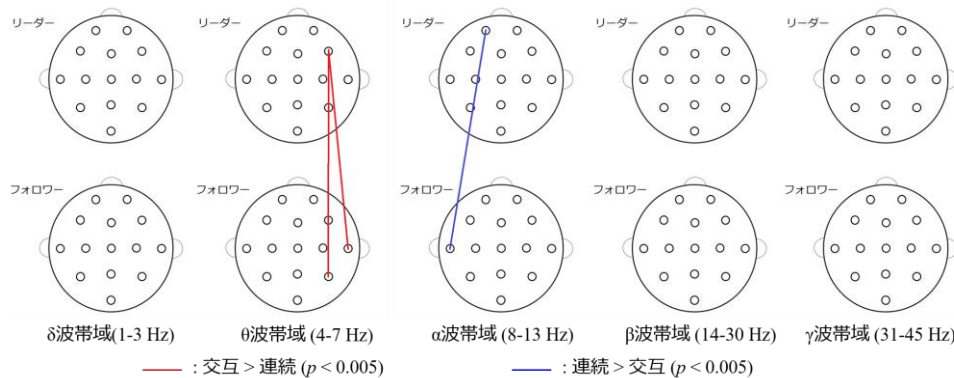


図6 各周波数帯域における有意なPSI

4. 考察

先行研究[1]において、共同運動主体感は互いに協調しあうことで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については明らかにされていなかった。本研究では、共同運動主体感の生起に関わる脳領域に関して、共同作業中の2者の脳波を同時計測し、共同運動主体感の主観的報告と脳波同期との関係から検討を行った。共同運動主体感の主観的報告の解析結果から、1者が他者に一方的に協調する課題よりも、2者が互いに協調し合う課題のほうが共同運動主体感は高かったことが示された。これは、互いに協調しあうことで共同運動主体感は高まるという先行研究[1]の結果を支持している。一方で、脳波の同期解析の結果から、連続課題よりも交互課題でリーダーの右前頭葉とフォロワーのrTPJの θ 波の活動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、リーダーの右前頭前野の脳活動とフォロワーのrTPJの θ 波の活動が同期するほど、ペア間の共同運動主体感が高まることが示された。これらの結果より、2者での共同作業において、互いに協調することでリーダーの前頭前野の θ 波の活動とフォロワーのrTPJの θ 波の活動が同期し、共同運動主体感が高まることが示唆された。

2者による一定リズムでのタッピング課題中のハイパースキャニング研究[5]や、ギターを複数人で同時に弾いているときのハイパースキャニング研究[6]により、協調課題中の前頭葉の θ 波の活動同期が報告されている。また、前頭葉の θ 波の活動は意思決定や行動制御を担うエグゼクティブ機能に関わるとされている[7]。これらのことから、前頭葉は2者での運動のタイミングの調整などの高次の運動に関わると考えられる。一方で、rTPJ領域は「心の理論」に深く関わっており[8]、相手の心理状態を読む社会的ゲーム中にTPJ領域の脳間同期が起こることが報告されている[9]。このことから、他者の心的状態を互いに読み合わなければならない課題においてはTPJ領域の活動同期が起こると考えられる。また、運動主体感は運動予測と運動結果の整合性により生起するとされている[10]。上記のことから、本研究においては、リーダーが2者での運動計画を立て、フォロワーがリーダーの運動計画を理解し、共同作業を成功させたことで共同運動主体感が高まったと考えられる。

参考文献

- [1] Pacherie, E. (2012). The phenomenology of joint action: Self-agency vs. joint-agency. In A. Seemann (Ed.), *Joint attention: New developments* (pp. 343–389). Cambridge, MA: MIT Press.
- [2] Dokic, J. (2010). Affordances and the sense of joint agency. In M. Balconi (Ed.), *Neuropsychology of the sense of agency* (pp. 23–43). Milan, Italy: Springer-Verlag Italia.
- [3] Dewey, J. A., Pacherie, E., & Knoblich, G. (2014). The phenomenology of controlling a moving object with another person. *Cognition*, 132, 383–397.
- [4] Nicole K. Bolt, *et al.*, (2016). Mutual coordination strengthens the sense of joint agency in cooperative joint action. *Consciousness and Cognition*, 46, 173–187.
- [5] 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, 1692.
- [6] Müller, V., Sängler, J., & Lindenberger, U. (2018). Hyperbrain network properties of guitarists playing in quartet. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1423(1), 198–210.
- [7] Mizuhara, H., & Yamaguchi, Y. (2007). Human cortical circuits for central executive function emerge by theta phase synchronization. *Neuroimage*, 36(1), 232–244.
- [8] Saxe, R., & Wexler, A. (2005). Making sense of another mind: the role of the right temporo-parietal junction. *Neuropsychologia*, 43(10), 1391–1399.
- [9] Tang, H., Mai, X., Wang, S., Zhu, C., Krueger, F., & Liu, C. (2015). Interpersonal brain synchronization in the right temporo-parietal junction during face-to-face economic exchange. *Social cognitive and affective neuroscience*, 11(1), 23–32.
- [10] Sato, A., & Yasuda, A. (2005). Illusion of sense of self-agency: discrepancy between the predicted and actual sensory consequences of actions modulates the sense of self-agency, but not the sense of self-ownership. *Cognition*, 94(3), 241–255.