

共同作業における運動主体感の脳波計測

An EEG study for the sense of agency during joint action

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、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、互いに協調し合うほど、共同運動主体感は高まり、β波帯域において頭頂葉の同期が高まった。このことから、共同運動主体感の生起には頭頂葉のβ波帯域の活動が関わると考えられる。

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ため、共同運動主体感は重要な認知機能であるといえるが、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が高まることが示されたが、脳活動計測の観点から生起メカニズムは明らかにされなかった。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]では、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、脳活動の同期が高まることで共同運動主体感が高まる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、協調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)。

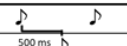
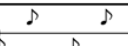
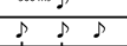
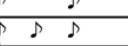
交互課題	リーダー	
	フォロワー	
連続課題	リーダー	
	フォロワー	

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。

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2000ms間呈示した。固視十字を500ms間表示したのち、500ms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

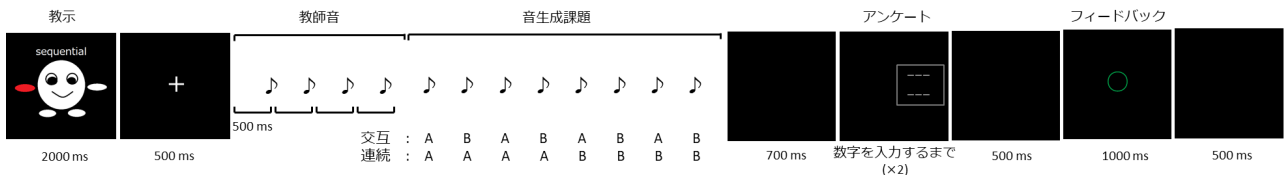


図2 実験パラダイム

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、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。ブロックの順番については交互課題と連続課題を交互に行った。また最初のブロックは Sub1 がリーダーで Sub2 がフォロワー、次のブロックでは逆になり、3 ブロック目は Sub2 がリーダーで Sub1 がフォロワー、4 ブロック目ではその逆という 4 つの組み合わせを 4 回繰り返して 16 ブロックとした。

2.3. 脳波計測

脳波測定には g.tec 社製の脳波測定用システム (BCIResearch System) を用いた。脳波 (Electroencephalogram; 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 electrooculography; 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

フィードバックが「×」となった試行は失敗試行とし解析から除外した。また、測定中の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。同時計測した EEG・EOG データを分離したのち、遮断周波数 48 Hz のローパスフィルタ (low pass filter; LPF) を適用した。処理時間短縮のため、MATLAB の downsample 関数を使用し、1200 Hz から 200 Hz に

ダウンサンプリングした。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、Jade アルゴリズムによって ICA (独立成分分析) を行った。その後 EEG データを離散ウェーブレット変換にかけ、リーダーが最初に生成した音のオンセットから 4000 ms のエポックに分けた。

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 4000 ms とし、1 試行ごとに PSI 値を算出した。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) に分けたのち、課題 (交互, 連続) の 2 条件間の PSI 値の有意差を調査した。

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、課題による主効果および役割による主効果がみられた ($F(1, 31) = 18.9, p < 0.001$; $F(1, 31) = 4.4, p < 0.05$) が、交互作用はみられなかった ($F(1, 31) = 1.5, p = 0.24$)。

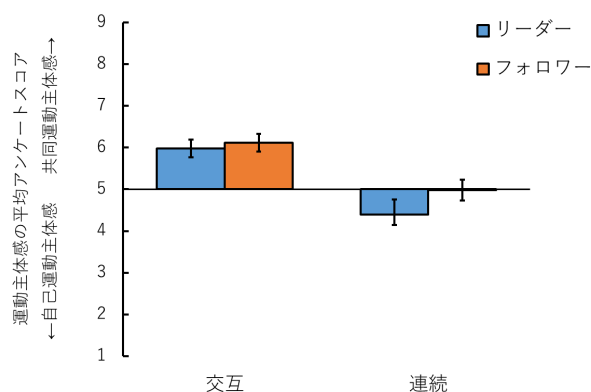


図3 運動主体感のアンケートスコア

3.2. 脳波同期

各周波数帯域において、全被験者の交互課題の平均 PSI 値が連続課題の平均 PSI 値よりも有意に大きくなったチャンネルの結合を図 4 に示した。β 波帯域において、連続課題よりも交互課題でリーダーの頭頂葉とフォロワーの頭頂葉の同期度が高いことが分かる。

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い。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、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。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が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が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頭頂葉とフォロワーの頭頂葉の同期度が高いことが示された。これは共同作業において互いに協調しあうことにより頭頂葉のβ波帯域の活動の同期度が高まるということを示している。以上の運動主体感の主観的報告と脳波同期解析の結果から、頭頂葉のβ波帯域の活動が共同運動主体感の生起に関わっており、2 者の脳間同期が共同運動主体感を高めると考えられる。

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.

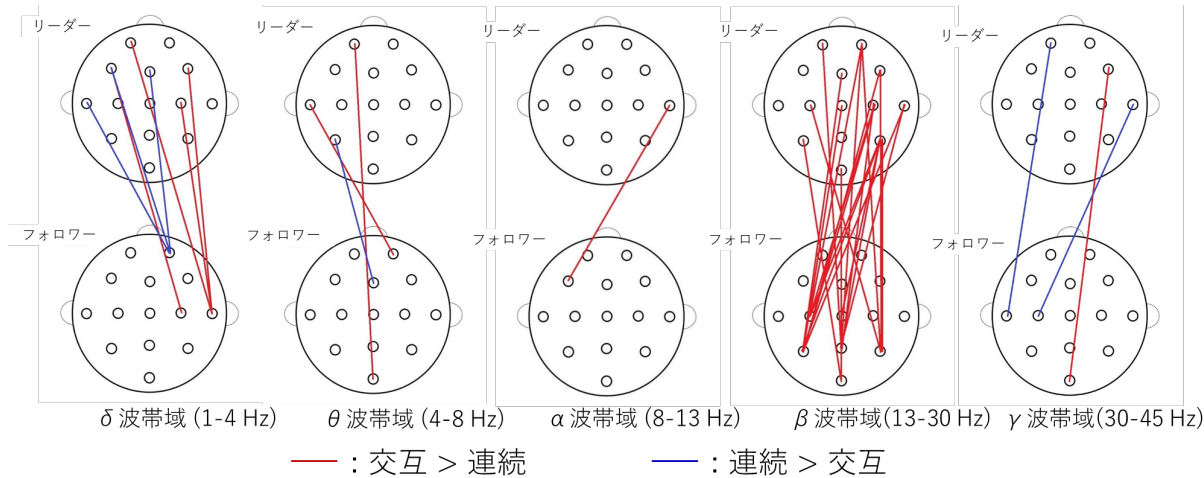


図 4 各周波数帯域において同期したチャンネルの結合