Kobe University Repository : Kernel

PDF issue: 2025-06-21

Dorsal Anterior Cingulate Cortex Coordinates Contextual Mental Imagery for Single-Beat Manipulation during Rhythmic Sensorimotor Synchronization.

植村，真帆

(Degree)
博士（保健学）

(Date of Degree)
2025-03-25

(Resource Type)
doctoral thesis

(Report Number)
甲第9191号

(URL)
https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100496472

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。

（様式３）

論文内容の要旨

専攻領域　リハビリテーション科学領域

専攻分野　健康情報科学分野

氏　　名　植村真帆

論文題目（外国語の場合は，その和訳を（　）を付して併記すること。）

Dorsal Anterior Cingulate Cortex Coordinates Contextual Mental Imagery for Single-Beat Manipulation during Rhythmic Sensorimotor Synchronization
(背側前部帯状回はリズミカルな感覚運動同期中のsingle beat操作における文脈に関連したmental imageryを調整する)

論文内容の要旨（1,000字～2,000字でまとめること。）

【背景と目的】

感覚運動同期は、外部リズムに対して内部モデルを構築することにより外部刺激に調和した運動を表出する神経メカニズムである。しかし、音楽のリズム同期においては、マーチやワルツなどの定型的なリズムに対するイメージ形成による感覚運動同期の寄与が検証されてきたが、シンコペーションや意図的に逸脱したリズムへの同期は卓越した演奏に不可欠でありながら、その神経基盤において従来の神経振動理論を基盤とするリズム同期の理論では不十分である。

この問題を解決するため、内部モデルが音楽的ストリームの中で個々のパルスに対するイメージの形成に基づいて予測行動を表出させ、外部リズムとの予測誤差を評価し、イメージを更新することによって調和のとれた同期を可能にしているという仮説を立てた。

本研究の目的は、心的イメージの中核とされている背側前部帯状回（dACC)を中心とする脳の反応と行動の分析により、仮説を検証することである。

【方法】

本研究では、1秒毎の等間隔のパルス列からランダムにパ

ルスを間引いた欠落シーケンスを複雑な外部リズムとし、同期タッピング中の脳の反応と行動パフォーマンスを評価した。脳の反応は、心象と知覚の調和を実現する感覚運動同期に中心的役割を果たしていると考えられているdACCのダイナミクスにより評価することとした。dACCのダイナミクスは、後頭部α2（10-13Hz)の強度の速い（>0.1Hz)揺らぎ成分から求めた。このα同期／脱同期は、dACCがそれぞれ背外側前頭皮質及び内側前頭皮質と結合することを意味する。併せて、事象関連電位により心象と知覚に対する認知プロセスを推定した。行動評価では、パルス毎のタップタイミングを計測し、信号検出理論による分析から心象をパルス毎に評価した。これにより、脳波による神経生理学的評価とパフォーマンス評価を統合し、仮説検証を行った。

【結果と考察】

神戸大学大学院保健学研究科倫理委員会承認の下、健常若年者33名（年齢22歳±3.6)に対して試験を実施し、以下のとおり仮説を検証する科学的根拠を得た。

① 外部リズムに対応した内部モデルが形成され、それに基づいて運動が表出されたか？

欠落シーケンスの連続パルス領域では、タップは負の非同期優位であり、タップ直前のdACCの活動は脱賦活を示した。このdACCの特徴は、連続パルスイメージとして形成された内部モデルに基づいてタップが遂行されたことを示唆する。一方、シーケンスが欠落に近づくにつれ、タップは正の非同期に転換するとともにdACCは脱賦活から賦活に転じる結果となった。さらに信号検出理論による解析の結果、認知バイアスが欠落イメージの方向にシフトすることが明らかとなった。

これらの結果は、欠落の到来を予測してイメージをパルス毎に逐次更新することで対処可能な外発性随意運動へdACCが徐々に運動モードをシフトさせていることを示すものであった。

欠落直前ではタップは正の非同期優位であるにもかかわらず、欠落では負の非同期の誤タップが表出された。誤タップ率は反応時間と有意な負の相関を示したことから、欠落へのイメージ転換ができずにパルスイメージを保持した場合に誤タップとなることが示唆された。一方、誤タップ時の事象関連電位は、実パルスに対する後期聴覚誘発電位（外因性電位N100P200を含む）の反転を示したのに対し、誤タップ回避時では帯状回を電源とするP300の反転のみが観測された。これらの結果は、誤タップではパルスイメージが、誤タップ回避では欠落イメージがそれぞれ形成されたことの証拠を示すものであった。またdACCは誤タップで脱賦活、誤タップ回避で賦活であったことから、内部モデルによりdACCが運動を制御することが明らかとなった。

② 予測誤差が外れたとき、内部モデルの適切な更新と、それに基づいた運動が表出されたか？

欠落後の挙動を解析したところ、ポスト欠落（N=1)に対しては外発性による正の非同期が顕著に現れた。欠落で誤タップの場合には予測がはずれたため、イメージがパルスから欠落へ更新し正の非同期となる一方、誤タップ回避の場合、イメージは正しく欠落であったためイメージの更新は行われないまま同様に正の非同期が表出されたものと推察された。一方ポスト欠落のさらに後（N=2)では、強い負の非同期が表出され、dACCは脱賦活を示した。これは、ポスト欠落時の予測(欠落)が外れたため内部モデルをパルスイメージに変更したことを示すものであった。これらの結果から、予測誤差に応じて適切に内部イメージを切り替えて運動制御が行われることが確認された。

【結論】

dACCは内発性及び外発性運動制御モードを知覚から得られた証拠に基づき内部モデルを更新しながら巧に操作することにより、複雑なリズム運動の表出を可能とする。

指導教員氏名：古和　久朋

（別紙１）

論文審査の結果の要旨

氏　名	植村　真帆		
論文題目	Dorsal Anterior Cingulate Cortex Coordinates Contextual Mental Imagery for Single-Beat Manipulation during Rhythmic Sensorimotor Synchronization （背側前部帯状回はリズミカルな感覚運動同期中の single beat 操 作における文脈に関連した mental imagery を調整する） （外国語の場合は，その和訳を併記すること．）		
審査委員	区　分	職　　名	氏　　名
	主　査	教授	古和　久朋
	副　査	教授	石岡　俊之
	副　査	准教授	四本　かやの
	副　査		印

要　　旨

本研究は，リズミカルな感覚運動同期（rhythmic sensorimotor synchronization）におけるsingle-beat操作の調整機構に焦点を当て，背側前部帯状回（dorsal anterior cingulate cortex, dACC）の役割を明らかにすることを目的とした．33名の健康な若年成人を対象に，欠落オッドボール課題（missing-oddball task）を用いた指タッピング実験を実施し，事象関連深部脳活動（ER-DBA），事象関連電位（ERP），および信号検出理論に基づく行動評価を行った．その結果，dACCの活性化および抑制が，文脈に応じた運動制御戦略の選択を反映していることが示された．特に，プロアクティブ（予測的）制御による正確なオンパルスタッピングと，リアクティブ（反応的）制御による誤反応抑制が，状況に応じて柔軟に切り替えられることが明らかになった．本研究は，dACCが過去の経験に基づく文脈的メンタルイメージを活用し，新たなリズムを創出しながら感覚運動同期を調整する役割を果たすことを示し，リズム知覚と運動制御の神経基盤に関する理解を深化させるものである．

本研究で得られた知見は，音楽療法実施時の課題設定や効果の最大化を検討する際の理論的な根拠を与えるものでありその意義は非常に高い．よって，学位申請者の植村　真帆氏は，博士（保健学）の学位を得る資格があると認める．

掲載論文名・著者名・掲載（予定）誌名・巻（号），頁，発行（予定）年を記入してください．

Dorsal Anterior Cingulate Cortex Coordinates Contextual Mental Imagery for Single-Beat Manipulation during Rhythmic Sensorimotor Synchronization. Uemura M, Katagiri Y, Imai E, Kawahara Y, Otani Y, Ichinose T, Kondo K, Kowa H. Brain Sci.14(8):757, 2024.