

到達運動学習過程における前頭前野の関与について

－機能的近赤外線スペクトロスコピーによる検討－

学位論文内容の要旨

注意制御やワーキングメモリなど高次の認知機能に関与するとされる前頭前野は、環境適応を必要とする状況において情報の収集・保持・取捨選択、そして適応行動のための適切な出力を行うことが、サル脳の機能解剖学的知見を基に提唱されている。この出力は運動という形で表現されるが、学習が進行することでより洗練された運動となっていく。運動並びに運動学習遂行時における前頭前野機能を解明するために、サルを対象とした電気生理学的アプローチやヒトを対象とした神経機能イメージングが試みられているが、ヒトでは計測技術の特性により遂行できる運動に制約があり、未だにその詳細は明らかされていない。しかし近年、神経機能イメージング技術の一つである近赤外線スペクトロスコピーの登場によって、様々な運動学習時における前頭前野の計測が可能となった。

本研究では実験1-4を通して、最も基本的な運動の一つとされる到達運動課題を用いて、到達運動並びに到達運動学習過程におけるヒトの前頭前野の役割について近赤外線スペクトロスコピーを用いて検討した。なお、本研究では前頭前野の各領域の中で、背・腹外側前頭前野(DLPFC/VLPFC)と前頭極に注目して計測を行った。実験対象者は右利きの健康成人であり、日常生活で頻繁に使用されている利き手(右手)による到達運動を行った。

実験1では、「通常の到達運動(一致課題)」と「指先位置の左右対称となる位置を示す視覚情報を提示することにより、指先位置情報を矛盾させた到達運動(矛盾課題)」を被験者に行わせ、課題遂行時のDLPFCの活動について検討した。矛盾課題では運動精度が顕著に低く、また、一致課題遂行時と比較して矛盾課題遂行時に左右DLPFCの顕著な活動が確認され、DLPFCは視覚情報と固有受容感覚の矛盾解決のために必要な高度な行動プランニングを行っていることが示唆された。

実験2では、矛盾課題を繰り返し行わせた時の到達運動適応過程におけるDLPFCの活動について検討した。その結果、左右DLPFCの活動は次第に低下することが示され、不慣れた状態に対する方略の形成にDLPFCが強く関与していることが示唆された。

実験3では、到達運動における前頭極の役割を明らかにするために、一致課題と矛盾課題遂行時の同部位の活動について検討した。その結果、左右前頭極共にいずれの課題遂行時においても到達運動に対応した活動は認められなかった。しかし、課題前の安静時に活動増加を示すケースが観察され、到達運動課題に対して生じる被験者の様々な思考が反映されていると考えられた。

実験4では、実験3と同様のパラダイムを用いて、一致課題と矛盾課題の到達運動の学習過程におけるDLPFC・VLPFCの関与について検討した。その結果、一致課題遂行時に左右VLPFCの活動が確認され、DLPFC・VLPFC共に、到達運動学習初期に最も活動が増大して学習の進行と共に両部位の活動が減少し、DLPFCでは安静時の活動レベルに戻った。しかし左右VLPFCでは、矛盾課題最終ブロック遂行時にも一致課題と同程度の活動が認められ、学習が進行している運動の行動プランニングに密接に関与することが示唆された。さらに、本研究の後に行なったパイロットスタディで、矛盾課題における到達運動学習が進行してもVLPFCの活動は認められ、一致課題のように速やかに学習が成立する運動に関しては、連続して同じ運動を繰り返すことにより自動化が進み、VLPFCの関与の度合いが小さくなるが関与し続けることが確認された。

関連先行研究より、DLPFCはVLPFCで保持された情報のモニタリングや操作を行うことが報告されており(Owen et al., 1996)、本実験においても矛盾状態における情報モニタリングにDLPFCが関与していると考えられる。また、DLPFCは注意の維持・葛藤への対処に関与することが報告されていることから、到達運動学習初期においては注意制御がより必要とされ、学習が進行するとその必要性が少なくなることを反映していると考えられた。

以上のことから、到達運動学習初期では課題遂行のために、より高度な行動プランニングを必要とするので、DLPFCとVLPFCの両方が関与するが、学習が進行するにつれてDLPFCは関与しなくなり、一方VLPFCは学習が進行すると活動の水準は低下しつつも関与し続け、運動のための行動プランニングに関わると思われる。また前頭極は、到達運動学習において、行動プランニングには直接的には関与せず、課題への対応準備と関連する活動など実験課題遂行中の被験者の内的に生成された情報の処理に関与しているものと考えられた。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 室 橋 春 光
副 査 准教授 高 橋 誠 (大学院情報科学研究科)
副 査 副専攻員 星 詳 子 (東京都精神医学総合
研究所)
副 査 助 教 河 西 哲 子

学位論文題名

到達運動学習過程における前頭前野の関与について

－機能的近赤外線スペクトロスコピーによる検討－

本論文では、到達運動の遂行に関わる前頭前野の脳活動が、行動指標ならびに近赤外線スペクトロスコピー(NIRS)によって検討された。前頭前野は、ワーキングメモリなどの高次認知機能に強く関与するものとして近年注目されている。本論文における一連の研究は、到達運動中の指先位置を不可視として実際とは異なる位置に視覚提示し、矛盾を生じさせた場合の運動学習過程として分析することにより、学習の進行に応ずる脳活動の変化として検討された。

本論文は、序論(第1～4章)、実験による検証(第5～8章)、総合考察(第9章)の3部で構成されている。

序論においては、前頭前野の構造と機能について運動学習に関する最近の知見、到達運動に関する先行研究の成果、知覚—行為サイクルにおける脳活動モデル、脳活動の指標として用いられるNIRS信号の特性などが概観されている。

実験による検証では、行動指標として、運動開始時点での運動方向(初期運動角)や、出発点から目標点までの移動に要した時間(運動時間)を用い、実験開始時点を基準としたNIRSによる酸素化ヘモグロビン相対濃度変化との関連性が検討された。第5章では、通常の到達運動課題と矛盾状態での到達運動課題下における背外側前頭前野の活動が検討された。その結果、矛盾状態では一致状態よりも初期運動角が大きく、より多くの運動時間を要した。また背外側前頭前野の活動を反映する部位において、酸素化ヘモグロビンの相対濃度は、矛盾状態で一致状態よりも明確に増加した。このことから背外側前頭前野は、軌道の大幅な修正を要し情報処理が増加するような場合には、より強く関与することが示唆された。

第6章では、矛盾した状態における到達運動課題において学習の進行に伴う背外側前頭前野における活動変化が分析・検討された。その結果、初期運動角と運動時間の改善に対応して当該領域の活動は減少することが示唆された。第7章では、運動学習時における役割がまだ不明確である前頭

極の活動が、到達運動課題との関連で検討された。その結果、酸素化ヘモグロビン相対濃度について、被験者によって異なる3つの変動パターンが見出された。運動課題間の安静中における変動も見出されたことなどから、これらの変動パターンは前頭極における到達運動課題に応ずる準備状態を反映することが示唆された。第8章では、到達運動学習過程における背外側並びに腹外側前頭前野の活動が分析・検討された。その結果、腹外側前頭前野の活動は背外側前頭前野の活動と異なり、矛盾、一致両方の課題で増加が認められ、学習進行に伴ってその活動は減少したが、完全に安静時のレベルまで低下することはなかった。このことは、腹外側前頭前野が到達運動遂行のための行動プランニングに関与することを反映するものと考えられた。

総合考察では、学習初期においては腹外側ならびに背外側前頭前野がともに活動して運動遂行のための統合的情報処理を担うが、学習後期においては背外側前頭前野の参与は低下する一方で腹外側前頭前野は行動プラン策定のため一定の参与を続けること、前頭極は課題遂行中の被験者の内的情報の処理に関与する可能性のあることが、先行研究の知見と合わせて検討された。最後に今後の課題として、本研究の臨床応用に向けた提言が示され、いわゆる不器用さをもつ子どもなどについて検討する必要性が指摘されている。

以上のように本論文では、矛盾状態下の到達運動において、前頭前野は運動方略の調整に関わる高度な情報処理をその部位に応じて担うことが推定された。NIRS は近年開発された測定技術であり、測定方法やデータ処理についてさらなる検討も必要とされる。しかし、臨床応用性の高い測定手段の適用にいち早く取り組み、行動的指標とNIRS信号との関係を実験的に明示し、さらに到達運動における学習過程と前頭前野領域の諸機能との関連性を明らかにした点で高く評価される。本論文における一連の研究は、発達障害等における不器用さのメカニズム解明につながるものであり、その支援方法の開発にも資すると期待される。

よって著者は、北海道大学博士(教育学)の学位を授与される資格があるものと認める。