

氏名	おおうちだ ゆたか 大内田 裕
学位(専攻分野)	博士(人間・環境学)
学位記番号	人博第381号
学位授与の日付	平成19年11月26日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科・専攻	人間・環境学研究科共生人間学専攻
学位論文題目	他者の視覚運動情報を利用した運動制御メカニズムの研究

論文調査委員	(主査)	教授 松村道一	教授 船橋新太郎	教授 小田伸午
		教授 石原昭彦	教授 森谷敏夫	

論文内容の要旨

本学位申請論文では、他者の運動を観察し同時に運動を行う場合、我々の脳がどのようにして他者の運動情報を自己の運動制御に利用しているのかを行動学的、さらに神経イメージング方法という2つのアプローチで解明を試みた論文である。

他者が行う運動・行動を観察し模倣することにより、その観察している運動を習得するという模倣学習は、運動学習にとって非常に有効な学習法の一つでありながら、その神経メカニズムはあまり研究されてこなかった。しかし、近年、サル電気生理学の研究で、ある運動を行うときに活動を示す運動関連領野のニューロンの中に、同様の運動を他者が行うのを観察するだけでも活動を示すニューロンがあることが報告された。このニューロンは、ミラーニューロンと呼ばれ、運動実行時のみならず運動観察時にも活動を示すという特性から、他者運動の視覚情報と自己運動の運動情報(運動プログラム)という異なる2つの情報を結びつける役割があると考えられ、模倣運動に重要な役割を担っていると考えられるようになった。また、ヒトの神経イメージング研究により、ヒトにも同様の特性を示す脳領域があることが報告され、特にミラーシステムと呼ばれている。

このミラーシステムは、他者の運動を観察することにより、自己の運動制御ネットワーク内に他者運動の運動表象を作り出すことはわかっているが、実際どのような視覚情報を利用して運動表象を作っているのかという点は不明である。先行研究では、ヒトが行う運動の模倣のほうが、ヒト以外の物体の運動模倣に比べて、より素早く正確に行えることが報告されている。このことは、ヒト運動の視覚情報には、ヒト以外の物体には含まれない固有の情報があり、このヒト固有の情報がミラーシステムにより処理され、模倣の運動制御に利用されていることが示唆される。そこで本論文では、他者の身体固有の視覚情報を利用しながら、運動制御を行うメカニズムを行動学的手法と神経イメージング手法を利用して検討を行った。

本論文は、3つの実験を中心に5章から構成されており、まず第1章では、本研究の背景となる事項、研究の目的、研究の意義を説明した。

第2章では、上述したようにヒトのミラーシステムでは、観察する運動の単なる空間的情報を脳内に表象しているだけでなく、身体固有の情報をも脳内に表象していることが考えられる。そこで、身体固有の情報である制御する筋の視覚情報が自己の運動制御に利用されているのかを行動学的実験により調べた。被験者は、視覚刺激の手または物体の上下周期運動を観察しながら、水平方向の屈曲・伸展周期運動を行った。このように運動軸を直交させることにより、空間的な情報の要因を排除し、屈曲・伸展という身体固有情報のみが同・逆関係となる状況を作り出すことが可能となり、その影響を測定することが出来る。その結果、屈曲・伸展という身体固有情報が観察する運動と逆となる運動は、同じとなる運動に比べ運動の周期に有意なばらつきを認めた。一方、身体固有情報を持たない図形の上下運動に対して運動を行った場合には、このような差は認められなかった。よって、他者運動の身体固有情報は、同時に行う運動制御に利用されていることが行動学的に示された。

第3章では、この屈曲・伸展という身体固有情報の処理にミラーシステムが関与しているのかを神経イメージング手法を用いて検討した。17名の被験者は、手運動観察条件と、身体固有の情報を含まない図形が同様に運動をするのを観察する図形運動観察条件を行い、手運動観察条件で有意に活動する領域を探した。その結果、手運動観察条件のみに、左高次体性感覚野である2野に有意な活動の上昇を認めた。この高次体性感覚野の2野は、自己の運動制御時に効果器からの運動感覚フィードバック情報を受け取っていることが先行研究により明らかにされている。そのため、この領域が運動実行時にも活動し、運動観察時にも活動するという特性からミラーシステムの一部であるといえる。以上より、他者運動の身体固有情報である屈曲・伸展情報というのは、ヒトのミラーシステムの一部である高次体性感覚野の2野で処理されていることが明らかとなった。

第4章では、他者運動の身体固有情報を利用した運動制御時に脳のどのようなネットワークが関与するかを神経イメージング手法を利用して調べた。課題は2章で行った行動学実験と同じ課題を用いた。その結果、観察している運動と身体固有情報の模倣運動を行う場合には、3章で同定したミラーシステムの一部である2野を含む前頭-頭頂-小脳ネットワークが賦活し、異なる運動を行うときには、その模倣運動ネットワークに加えて左上頭頂小葉の5野に賦活が見られた。また、模倣運動に特異的に賦活する脳領域は見られなかった。以上の結果は、ミラーシステムは模倣運動に特化したシステムでなく、他者運動の視覚情報からその運動表象を作り出す機能であることを示した。また、他者運動とは異なる運動制御をおこなう場合には、左上頭頂小葉5野が、外部（他者）の身体固有情報と内部（自己）の身体固有情報が異なるときに2つの情報の関連付けを行い、付加的に関与していたと考えられる。

以上、本学位申請論文において、他者運動を参照して異なる運動制御を行うときの行動特性と、運動実行に必要な脳内神経基盤を明らかにした。

論文審査の結果の要旨

本学位申請論文は、観察している他者運動を参照し同時に運動制御を行うとき、どのようにその視覚情報を運動制御に利用しているかという脳内メカニズムを解明するために行われた行動学的・神経イメージング研究である。他者の運動を観察しその情報を利用して運動を行う場合、我々は様々な情報を観察している運動から得なければならない。中でもどのような筋を制御して運動を行っているかという身体固有の情報というのは運動制御に特に重要な情報である。なぜならば、我々が運動を行うとき脳から運動の対象となる効果器（筋）へと伝えられる情報（運動指令）は、どの筋をどの程度活動させるかという筋の活動パターンだからである。そのため、このような身体固有の情報を観察している運動から利用することが出来れば、非常に効率的である。

そこで、申請者は、他者の運動を観察し同時に運動制御を行う場合に、他者運動の身体固有情報を利用して運動制御を行っているのかを調べるために刺激・反応一致性を利用した行動学実験を考案し行った。具体的には、観察している運動と実行する運動で身体固有情報のみが一致または不一致となる運動を比較すれば、観察している身体固有情報が運動制御に利用されているかを知ることが出来る。また、さらに身体固有情報を持たない図形の視覚運動に対して、同様の運動を行う統制群を設け比較を行うことにより、身体固有情報の有無そのものが運動制御にどのような影響を与えるかも検証をした。その結果、観察する手首運動と屈曲・伸展という身体固有情報が不一致となる運動を行う場合には、運動の周期性に有意なばらつきを認めた。また、身体固有情報を持たない図形の運動に対して同様の運動を行うときには、上記のような差は認められなかった。よって、他者の運動を利用して運動制御を行う場合、屈曲・伸展という身体固有情報が利用されていることが示された。このことは、観察する運動が同じであっても、ヒトが運動をしているのか、または物体の運動なのかで異なるシステムが関与している可能性を示唆し、ヒトの運動の方が利用できる情報をより多く有していることを示す。

そこで次に、この異なるシステムの関与が脳内ではどのような差として現れるのかを調べるために、身体部位と図形という2種類の運動を観察しているときの脳活動をfMRIを用いて測定をした。その結果、右手の観察を行うときのみ、高次体性感覚野である2野に活動が見られた。この領域は、先行研究から右手の運動時に運動感覚フィードバック情報を受け取る領域であることが明らかにされており、運動観察のみならず運動実行中にも活動することが示唆される。よって、ミラーシステムの定義より、この2野がミラーシステムの一部であるといえる。そして、この2野の活動は観察している運動の身体

固有情報から作られる他者運動の表象を反映する活動と考えられる。

次に申請者は、実際の運動制御中に観察する他者運動と身体固有情報が、どのような脳内メカニズムにより運動制御に利用されているのかを行動学実験で行った課題を用いてfMRIにより検証した。その結果、身体固有の視覚情報を直接利用する同運動実行時には、ミラーシステムの一部である2野を含む前頭-頭頂-小脳ネットワークが賦活した。視覚情報を間接的に利用する異なる運動制御時には、同運動ネットワークに加えて、上頭頂小葉に賦活を認めた。次に、それぞれの運動時に特異的に関与する脳領域の同定を行った結果、同運動特異領域は存在せず、異運動特異領域は、左上頭頂小葉前方部5野のみであった。異なる運動を行うためには、単純運動を用いた本課題の特性上運動生成というより異なる2つの身体固有情報の関連づけを行うことが重要となるだろう。そのため左上頭頂小葉5野の活動は、観察から作られる他者運動の感覚表象と自己運動の感覚表象の関連づけの機能を反映していたと考えられる。以上より、他者運動の身体固有情報を利用した運動制御時には、ミラーシステムの頭頂葉領域2野が身体固有情報から他者運動表象を作るという機能的関与を行い、また、身体固有情報が不一致となる場合には、同運動時と同様に2野の関与に加えて、5野が不一致の2つの情報間の関連づけという機能を担っていたと考えられる。

以上のように、本学位申請論文は、行動学的特性とその脳内メカニズムという2つのアプローチにより、視覚から得られる他者運動情報を利用した運動制御メカニズムに関して新たな知見を与えたものである。特に、複数の領域にまたがるミラーシステムの頭頂葉前方部領域の運動制御に貢献する役割を明確に示しており、ミラーシステムの理解に大きな知見を与えたものである。さらに本研究の成果は、脳損傷などによる片麻痺へのリハビリテーションに対しても貢献することが期待される。したがって、本申請論文は共生人間学専攻認知・行動科学講座の理念にふさわしい内容を備えたものといえる。

よって、本論文は博士（人間・環境学）の学位論文として価値のあるものと認める。また、平成19年10月16日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。