

しば
柴

た
田

ひろし
寛

学位の種類	博士(文学)
学位記番号	文博第 277 号
学位授与年月日	平成20年3月25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	東北大学大学院文学研究科(博士課程後期3年の課程) 人間科学専攻
学位論文題目	受け渡し動作の表出と適切さの認識に関する心理学的・脳科学的 研究
論文審査委員	(主査) 教授 行場 次朗 教授 仁平 義明 教授 大淵 憲一 准教授 阿部 恒之 准教授 小泉 政利

論文内容の要旨

目次

第1章 二者間の協同動作における適切な動作選択—受け渡し動作場面の位置づけ—

- 1.1 受け渡し動作を扱った先行研究
- 1.2 生態心理学との関連
- 1.3 コミュニケーション理論との関連
- 1.4 社会的認知研究との関連
- 1.5 本論文の目的

第2章 他者から手渡された物体を受け取る動作の行動分析

- 2.1 把握動作を規定する諸要因を調べた先行研究
- 2.2 他者から手渡された物体を受け取る動作の行動分析(研究1)

第3章 受け取り動作の適切さ評価時の脳活動—NIRSによる検討—

- 3.1 ミラーニューロンシステムの概説
- 3.2 受け取り動作の適切さ判断時のミラーニューロンシステム(研究2)

第4章 受け取り動作の適切さ評価時の脳活動—ERPによる検討—

- 4.1 不適切さ処理に関連するERP研究の概説
- 4.2 受け取り動作の適切さ判断時のERP計測(研究3)

第5章 総合考察

- 5.1 他者から手渡された物体を受け取る動作の選択
- 5.2 受け取り側の動作読み取り過程
- 5.3 情報処理過程
- 5.4 応用可能性と今後の展望

我々は日常的に複数の人間と触れ合っており、複数の他者が動作を通じて相互作用を行っている場面に日々遭遇している。例えば人間二者間で物体を受け渡すときのように、二人の人間が動作を介してインタラクションする場面において、他者の動きに合わせて自分の動作を適切に選択・調整することは、その協同動作を円滑に遂行するために非常に重要となる。そのため、二者間で行われる動作の適切さを認識する処理過程を明らかにすることは非常に意義深い課題であると考えられる。そこで本論文では、二者間の受け渡し動作を観察して、手渡し側に対して表出される受け取り側の動作の適切さを認識しているときの情報処理過程を明らかにすることを目的とした。まずは、二者間の受け渡し動作場面が先行研究の中でどのように位置づけられるかを概説した。次に、二者間で物体を受け渡す動作場面の行動観察を行い、手渡し側に対して受け取り側がどのような動作選択を行うかを調べた(研究1)。その後、脳機能を計測する実験(研究2、研究3)を行い、他者に対する適切な動作を認識するときの脳内の情報処理過程を調べた。そして最後に他者に対して表出される動作の適切さ認識処理に関する総合考察を行った。

第1章 二者間の協同動作における適切な動作選択—受け渡し動作場面の位置づけ—

人間二者間の受け渡し動作は日常的に観察される基本的な動作インタラクション場面であるものの、アプローチの仕方によっては運動制御学、生態心理学、非言語コミュニケーション、社会的認知、人間工学などの様々な領域と関連する。そこで本章では、受け渡し動作のような二者間の協同動作場面がこれらの領域においてどのように位置づけられるかを概説した。また、その中でこれまでの研究での問題点および本論文の意義を言及した。

物体の受け渡し動作はもともと発達心理学の領域で研究対象とされてきた(Bruner, 1977など)。これらの研究では、乳児の前言語期のコミュニケーション能力を探ることを主な目的として、大人と乳児の間で行われる物体の受け渡し動作が観察されている。これらの研究を通して、物体を受け取ってほしいという「提示」動作に対して物体を受け取る動作で応えることができるか、物体を手渡してほしいという「要求」動作に対して物体を手渡す動作で応えることができるか、という乳児の他者理解能力が調べられている。その結果、提示された物体を受け取る行動は生後6ヶ月で観察され、他者の物体が欲しいという要求に応じて物体を手渡す行動は生後14ヶ月ころから観察されることがわかっている。

人間工学の領域においては、人間らしい物体の受け渡し行動を可能にする人間共存型ロボットを開発するという目的のもと、大人を対象とした人間二者間の受け渡し動作が調べられている。これらの研究では手渡し動作と受け取り動作の運動制御(軌跡、速度、加速度などのキネマティクス)が主に調べられ

ており、動作速度のピークが運動前半に来ることなどが明らかになっている。

また、一人の動作場面を扱った研究を参考にすると、人間は質的に異なる動作を選択することによっても環境や状況に適応していることがわかっている。例えば環境と身体とのかかわり合いから人間や生物の動作をとらえるアプローチを取る生態心理学では、アフォーダンスという概念から行動を説明する。アフォーダンスとはGibson (1979) の造語であり、環境中に存在する動作の可能性のことを指す。人間が「立つ」動作を行うことができるのは、人間だけの問題でなく、人間の体重を支える硬い地面があって可能になると説明される。つまり、身体の性質(例えば重さ)と環境の性質(例えば地面の硬さ)との関係からある動作が可能かどうかが規定される。三嶋(1994)はある高さに水平に設定された棒を避けて通過するときの知覚を調べており、足の長さや棒の高さとの関係から、「またぐ」と「くぐる」という性質の異なる動作の選択が説明できることを明らかにしている。つまり、動作の軌跡や速度といった運動制御の側面だけでなく、質的に異なる動作を様々に選択する側面も、環境に適応した動作を記述する上で重要になる。人間やサルなどが物体を把持する場面では、細かく見るとその把持動作は、精緻把持、力把持、両手把持など様々あり、物体の形状に合わせて選択され、動作時の脳活動も異なることがわかっている。しかしながら、受け渡し動作のような二者間の協同動作場面では、一方の動きに合わせてもう一方の人間がどのように動作選択を行っているかはこれまであまり明らかになっておらず、この点を行動実験などによって調べる必要性がある。

先述したように、受け渡し動作場面は、もともとは他者の意図の理解などコミュニケーションの枠組みから調べられてきた。それでは、他者に合わせて動作を選択する場面はコミュニケーションとしてはどのように位置づけることができるだろうか。コミュニケーションはShannon & Weaver (1949) が典型的理論を提出しており、メッセージの記号化、解読化によって情報が一方からもう一方へ伝達されると考えられる。また、記号化されるチャンネルに従って言語コミュニケーションと非言語コミュニケーションに大別され、動作を介したコミュニケーションは非言語に分類される。

しかしながら、二者間の協同動作場面では、必ずしも相手の動作が完了するのを待ってから自分の動作を実行するわけではないことがわかっている。また、言語と動作ではその知識体系も異なっており、言語としては表現できないが、運動としては表現できることがあることもわかっている。そのため、動作を介して初めてあらわれる解読化の思考があると考えられている。そこで本論文ではこれまでのコミュニケーション理論を参考にしながら、二者間の協同動作場面では、他者の動作(例えば手渡し動作)に対して応答する動作(例えば受け取り動作)の中に、他者の動作をどのように理解しているかの解読過程が表現されていると考える。

また、他者の動作理解は近年、社会的認知の観点からも盛んに議論されている。この要因の一つとして、サルの脳活動計測から明らかにされたミラーニューロンの発見があげられる(Rizzolatti, et al., 1996など)。ミラーニューロンとは、他者の動作観察と自己の動作実行のどちらにおいても発火するニューロンである。また、他者の動作観察と自己の動作実行に共通して作用する脳機能はミラーニューロンシステムと呼ばれている。このシステムにより、他者の動作が自己の脳内で運動表象として再現され、他者の動作を内的にシミュレートすることが可能になると想定されている。また、この働きにより、他者と自己を同一の運動表象でつなぎ、他者の動作理解などに重要な役割を果たすと考えられてきている。自閉症患者などのコミュニケーション障害の問題や心の理論(他者の心や思考を読み取るシステム)をミラーニューロンシステムの働きに帰属する知見も提出されてきている。また、この機能はIQなどの言語を基本とした知能とは異なる能力を反映していると考えられており、他者の意図や感情理解といった社会的認知能力とかかわりが深いと考えられている。

しかしながら、他者の動作を内的にシミュレートする観点から社会的認知を扱った研究のほとんどが、一人の人間が行う動作場面を扱っている。そのため、受け渡し動作のように、対人場面における動作インタラクションがどのような処理過程によって理解されているかはほとんどわかっていない。社会的認知やコミュニケーションを扱う重要な意義のひとつは、対人場面の中での適切な振る舞いを理解することであり、二者間の協同動作をどのような脳内処理過程によって理解しているかを調べることは重要な観点であると思われる。

第2章 他者から手渡された物体を受け取る動作の行動分析

本章では、実際に二者間で物体を受け渡し動作場面の行動観察(研究1)を行い、手渡し側の動作に合わせて受け取り側が適切な動作を選択する過程を明らかにすることを目的とした。まずは、一人の人間が物体を把握する場面において、どのような特性が動作選択を規定する要因となっているかを調べた先行研究を概説する。

把持動作は細かくは力把持、精緻把持などに分類されている。静止した物体やコンピュータディスプレイ上に提示される物体画像などを刺激とした実験により、大きくて接触できる面積が広い物体や丸みをおびた形状をしている物体は力把持が選択されやすく、小さくて接触できる面積が狭い物体や平らな形状をしている物体は精緻把持が選択されやすいことが報告されてきている。また、物体が大きくなるにつれ、片手での把持から両手での把持に切り替わることも報告されている。

しかしながら、二者間で物体の受け渡し動作が行われるときに、受け取り側がどのようにして受け取り動作を選択しているかについてはほとんど調べられていない。先述したように、受け渡し動作を分析した先行研究から受け取り動作の軌道や速度の分析は行われているが、質的に異なる把持動作をどのように選択しているかという観点からは研究が行われていないのが現状である。そこで、物体を手渡す他者の要因が、物体の受け取り動作の選択にどのような影響を及ぼしているかを調べる研究を行った。

研究1では、実験者が様々な手渡し条件で物体を手渡したときに、実験参加者がどのような受け取り動作を表出するかを分析した。実験者が様々な条件で物体を手渡し、実験参加者はその物体を受け取った。実験には20人が参加した。また、なるべく自然な動作を観察するため、受け取り動作の観察実験という本来の目的は実験参加者にはふせておいた。手渡す物体の形状は円筒(紙粘土製、直径5.5cm)とした。手渡し条件は円筒の長さ(2:「長(17.4cm)」「短(11.6cm)」)、円筒を持つ位置(3:「上」「中」「下」)、手渡し動作の軌道(2:「直線」「曲線」とした。

実験参加者が受け取る動作をビデオで撮影して、受け取る動作のパターンを分析した結果、受け取り動作は主に「握る(手の平を円筒に接触させて片手で受け取る動作)」、「摘む(手の平は円筒に接触させずに指先を使って片手で受け取る動作)」、「のせる—そえる(一方の手の平に円筒をのせて、もう一方の手で円筒を支えることにより両手で受け取る動作)」に分類できることがわかった。手渡し条件によって選択される受け取り動作は異なったが、受け取り動作の選択は特に「物体の大きさ」「接触領域の面積」「接触領域の形状」「手渡し動作の軌道」の要因の影響を受けると考えられた。また、「①安定して受け取る」「②手渡し側の手に触れない」「③手渡し側の動きに合わせる」という三つの制約を仮定すると受け取り動作の適切な選択過程が的確に説明できることが見出された。例えば、把持可能なスペースが大きく空いていると安定した受け取り動作である「握る」動作が選択されやすかった。反対に把持可能なスペースが狭いと「摘む」といった他者の手を避ける動作が選択されやすかった。また、直線軌道条件のように水平軌道で円筒が接近してくる手渡し条件では「握る」といった受け取り動作が選択されやすく、曲線軌道条件のように斜め上から円筒が降りてくる手渡し条件では「のせる—そえる」といった受け取り動作

が選択されやすかった。

次に撮影したビデオ映像の各フレームを分析して、動作の時間的側面を測定することによって各受け取り動作の運動制御過程を調べた。その結果、「握る」は到達時間が短く、弾道運動による運動制御傾向が強いことが示唆された。一方で「摘む」は到達時間が長く、修正運動による運動制御傾向が強いことが示唆された。「のせる—そえる」は動作を開始するまでの時間が短く、また曲線軌道条件では受け渡し位置に到達するまでの時間が手渡し動作の完了時間よりも短かった。この結果から、曲線を描いてゆっくり手渡す動作では、受け取り側は先に「のせる—そえる」動作で円筒の接近を待っており、その位置へ手渡し側が円筒を渡す制御過程が推測された。

第3章 受け取り動作の適切さ評価時の脳活動—NIRSによる検討—

本章では、二者間で行われる受け渡し動作を観察して、受け取り動作の適切さを評定しているときのミラーニューロンシステムの働きを調べることを目的とした(研究2)。研究2では、研究1の結果にもとづいて、二者間の受け取り動作の適切さを操作した映像刺激を用いた。まずはミラーニューロンシステムの機能を調べた先行研究を概説する。

●ミラーニューロンシステムは、もともとはサルの腹側運動前野(F5領域)にある単一ニューロンの発火パターンを調べた研究の知見にもとづいている(Rizzolatti, et al., 1996など)。これらの研究では、サルが様々な動作を行っているとき、ならびに人(実験者)が行う様々な動作をサルが観察しているときのニューロン活動を調べている。その結果、物体を把握したり、物を置いたり、保持したり、ちぎったり、両手で物体を操作したりと、動作の種類(目的)に応じて活動するニューロンがあり、この中のいくつかのニューロンはサルが自分で動作を実行する場合と、実験者が行う動作を観察する場合のどちらにおいても発火することが発見された。つまり、ミラーニューロンシステムは目的志向的に働くシステムであると考えられている。

●サルのミラーニューロンはF5以外からも見つかっている。例えばサルの頭頂連合野(PF領域)でも動作の観察と実行のどちらにおいても発火するミラーニューロンが発見されている。また、ミラーニューロンとは異なるが、サルの上側頭溝(superior temporal sulcus: STS)では、生物学的な運動の観察によって発火するニューロンが見つかっている。F5とSTSはPFを介してつながっていることもわかっており、これらの知見からSTSの生物学的運動の視覚処理を通してPFやF5でのミラーニューロンシステムが実行され、また動作の観察と実行をつなぐ機能はF5、PF、STSのニューラルサーキットによって担われていると考えられている。また、人間の脳では、F5は下前頭回(inferior frontal gyrus: IFG)、PFは下頭頂小葉(inferior parietal lobule: IPL)に相当して、IFG、IPL、STSをつなぐニューラルサーキットによって人間のミラーニューロンシステムが担われていると考えられている(Rizzolatti, et al., 2001)。

●動作を観察するときに、動作実行者に対してどのような動作の意図を読み取るか、どのような運動予測を行っているか、観察者がどのような運動経験をしているか、などによってもミラーニューロンシステムの働きが異なることがわかっている。つまり、動作観察からボトムアップ的にミラーニューロンシステムが作用するのではなく、動作理解や意図の読み取りなどの社会的認知と関連してトップダウン的にも作用することがわかっている。また、自閉症患者においては表情などの動作模倣時にミラーニューロンシステムの賦活が小さいことがfMRI(functional magnetic resonance imaging)を用いた実験などから明らかにされており、社会的認知能力にミラーニューロンシステムが重要な役割を果たすと考えられてきている。

●研究2では、これまでほとんど調べられてこなかった二者間の動作を観察しているときのミラー

ニューロンシステムの作用を調べる実験を行った。脳機能計測装置として24チャンネルNIRS (near-infrared spectroscopy) を使用して、IFG付近の脳血流量の変化を測定した。実験には10人が参加した。実験参加者は二人の人間が物体を受け渡す動作を映したビデオ映像を観察して、受け取る動作が適切かどうかの判断を行った。映像刺激として、研究1で仮定した3つの制約にもとづき受け取り動作の適切さが異なる映像を用意した。

実験の結果、適切な受け取り動作を観察する方が、不適切な受け取り動作を観察するよりもIFG付近の脳血流量が有意に上昇することがわかった。これらの結果は、受け取るという目的は同一であっても、その適切さが異なるとミラーニューロンシステムの作用が異なることを示している。また、これらの結果は、他者に対して適切な動作を観察しているときは、実際に自分が受け取っているような運動表象が作られている可能性を示唆するものである。これらのことは、他者に対する動作の適切さの認識にミラーニューロンシステムが関与することを示唆している。

第4章 受け取り動作の適切さ評価時の脳活動—ERPによる検討—

本章では、受け取り動作の適切さを評定しているときの処理過程を事象関連電位 (event-related potential: ERP) を指標として調べた(研究3)。ERPは時間分解能に優れており、情報処理過程における時間的側面を調べることができる。また、先行研究において意味的な逸脱処理やエラー検出時の処理過程などがERPを指標として調べられてきている。動作を介した社会的なインタラクションを想定した場合、他者に対する動作の適切さを認識する機構に加え、ある動作が不適切であること認識する機構を調べることも重要である。そこで本章では、特に受け取り動作の不適切さ認識処理の時間的側面を調べることを目的とした。まずは動作の不適切さ認識と関連が深いと思われる意味逸脱処理を調べたこれまでのERP研究を概説する。

意味逸脱処理を調べたERP研究では言語刺激が用いられることが多く、意味的に逸脱した誤文(例えば「冬は暑い」など)と正文を処理しているときのERPが比較される。正文に比べて誤文では陰性電位のERP成分が生起することが知られている(Kutas, 1980)。この陰性成分は通常、刺激提示後およそ250-500msの間に引き起こされる。そのピークは400msであり、このような陰性電位はN400と呼ばれる。言語的な刺激によって引き起こされるN400は通常中心・頭頂付近を中心として比較的幅広い領域に分布する。また、N400の大きさは刺激の意味情報を統合するプロセスの複雑さを反映していると示唆されている。

N400に類似した効果は非言語的な視覚刺激を用いても引き起こされ、刺激の種類や課題に応じて引き起こされる陰性成分の頭皮分布が異なることがわかっている。例えば、意味的に逸脱したジェスチャーによって引き起こされるN400効果は中心・頭頂付近に分布する。一方で文脈から逸脱したストーリー(一人の人間が行う動作を表した絵の連続)や文脈に不適切な物体の使用(剃刀の代わりにのし棒でヒゲを剃る映像など)によって引き起こされるN400効果は前頭付近に分布する。前頭に分布する陰性成分はイメージにもとづく情報処理を反映しており、一方で比較的幅広い範囲に分布が広がり、また中心・頭頂付近で最大となる陰性成分は抽象的な意味処理を反映していると考えられている。

また、意味的に逸脱した視覚刺激では、N400に加えて刺激提示から約300ms後にピークを向かえる陰性電位(N300)が生じることが報告されている。N300は通常前頭領域で生じ、視覚的な刺激のカテゴリ化の難しさを反映していると考えられている。また、視覚的なイメージを形成しやすい具体語(例えば「傘」など)と抽象的な概念を表した抽象語(例えば「平和」など)の処理を比較した研究では、具体語ではN400に加えてN700が前頭を中心として生起することが知られている。これらの研究から、視覚的なイ

メージ処理によって、前頭での陰性電位が生じると考えられている。また、刺激提示から700ms後など比較的遅い時間帯でのERP成分は高次の処理過程を反映していると考えられている。

研究3では、適切さの異なる受け取り動作を判断しているときのERPを調べる実験を行った。N400は視覚刺激を用いた意味逸脱によっても生じることがわかっているため、これらの研究を参考にすると、二者間の協同動作の不適切さ処理においても陰性電位のERP成分が生じる可能性が予測される。実験には11人が参加した。実験参加者には、様々な形状の物体を手渡ししている写真とその物体を受け取るために手を形作っている写真を提示した。手渡し動作画像と受け取り動作画像の組合せを変えることにより受け取り動作の適切さを操作した。実験参加者は手渡し動作画像に対する受け取り動作画像の適切さを判断した。

両条件のERP波形の平均値を分析したところ、受け取り画像刺激の提示後約300ms-500msの区間および700ms以後の区間において、不適切条件の陰性電位が適切条件よりも大きくなった。特に刺激提示後約330ms後(N330)と850ms後(N850)に両条件の電位差が大きかった。N330は頭頂付近を中心として幅広い範囲で観察された。また、N850は前頭付近で最大であり前頭を中心として観察された。N330は潜時帯や頭皮分布から意味逸脱処理で生じられるN400と類似したERP成分であると想定される。そのため、これらの結果は二者間の動作の不適切さという文脈においてもN400効果が観察されることを示している。また、比較的遅い潜時帯に前頭付近で生じする陰性成分は高次のイメージ処理を反映する可能性があげられている。そのため、本研究で観察されたN850は、不適切な受け取り動作イメージを心的に操作した処理が推測される。不適切な形状で物体を取ろうとする動作の観察は、動作の修正などを含むイメージ操作処理を喚起させるのかもしれない。これらの結果をまとめると、手渡し動作に対して不適切な受け取り動作が提示された場合、まずは抽象的な水準で受け取り動作の不適切さが処理され、その後不適切な動作の視覚的イメージを操作する処理が行われると考えられる。

第5章 総合考察

研究1では、物体を手渡す動作と受け取る動作から成立する受け渡し動作を分析した。手渡し動作と物体を操作したときに、受け取り側が動作選択を行う過程が観察されるかどうかを調べた。その結果、受け取り側は「握る」「摘む」「のせる-そえる」という受け取り動作の中から動作選択を行っていることが示された。また、環境中のどのような要因が受け取り動作の選択を規定しているかを考察したところ、「物体の大きさ」「接触領域の面積」「接触領域の形状」「手渡し動作の軌道」の要因によつて的確に記述できることがわかった。これらの結果は、手渡し動作や物体の変化に応じて、受け取り側が柔軟に動作を選択することによって、物体の受け渡し動作を成立させている過程を示していると考えられる。

上述したように、複数の動作群の中からある動作を選択する要因を調べた先行研究のほとんどは一人の行為者における動作選択場面を扱っており、物体の大きさなどの他者が存在しない環境の特性へ動作の規定要因を還元している。社会的アフォーダンスとして複数の人間が関与することによって初めて可能となる動作が存在することも理論的には提示されてきているが、二者間における動作選択場面は実験的にはほとんど検証されてこなかった。しかしながら、研究1において人間二者が協同して遂行される受け渡し場面を詳細に分析した結果、受け取り動作の選択を規定する要因を、手渡される物体と手渡す人間との関係の中から明らかとなる特性に還元することによって、ある受け取り動作が創出される過程を的確に説明できることが示された。これまでの研究からは、動作選択が環境の特性(物体の大きさなど)から説明されることが多かったが、本研究の結果は、行為者の動作選択を、他者の特性(他者の手や身体的位置・動作軌道などを変数とした属性)に還元することも重要な観点になることを示している。

本論文では、従来のコミュニケーション理論の枠組みを修正して、協同動作場面の適切さを説明することを試みた。特に表出される受け取り動作の中に相手(手渡し側)の動作の読み取り(解読)過程が現れると想定した。研究1での動作観察実験によって、受け取り側は、手渡し側の「受け取って」という要求に応じて物体を受け取るだけでなく、適切な受け取り動作を選択して応じる過程が明らかになった。手渡し側が物体を動かし始めてから受け取り側がその物体に到着するまではわずか1秒前後であり、おそらくは無自覚に、しかも自動的にかなり高次の動作読み取り過程が行われている可能性が推測される。

また、「のせる—そえる」動作の選択時においては、手渡し側よりも先に受け取り側が受け渡し位置へ到着する過程も明らかになった。これは、受け取り側は「受け取って」という要求に応じるだけでなく、「この位置へ物体を手渡して」という要求を返している過程として分析することも可能である。つまり、二者間の受け取り動作場面において、受け取り側は受動的に動作を読み取るだけでなく、適切な動作を選択したり、ときには相手をリードするような要求を行うなど、かなり能動的な動作応答を行っている

と推測される。

研究2、研究3ではそれぞれNIRSとERPを指標として、受け取り動作の適切さを認識しているときの情報処理過程を調べた。その結果、手渡し側に対して適切な受け取り動作を観察しているときの方が不適切な受け取り動作を観察しているときよりもミラーニューロンシステムが強く働くことが示された(研究2)。これまでの研究では、ミラーニューロンシステムを使って内的に他者の動作をシミュレートすることによって他者の動作を理解していると想定されてきている。しかしながら、本研究の結果は不適切な動作観察ではミラーニューロンシステムの働きが弱くなることを示しており、不適切な動作観察では内的なシミュレートが行われにくいことを示唆する。そのため、もしかするとミラーニューロンシステムを発動させるための前段階システムが存在する可能性もある。ERPを用いた実験(研究3)もこの考え方と一致する結果となった。つまり、まず受け取り動作画像の提示から約330ms後に視覚などのモダリティによらない抽象的な水準での適切さ(不適切さ)処理が行われ、その後(約850ms後)に視覚イメージを操作する処理過程を示した。そのため、適切さ判断は最初に感覚モダリティに依存しない水準で行われ、その後視覚や運動感覚を操作することによって深く理解される可能性も想定される。

最後に研究1～3で明らかにされた知見の応用可能性と今後の展開について概説する。受け取り動作の行動観察(研究1)から明らかにされた知見はヒューマノイドロボティクスへの応用が期待される。受け渡し動作は日常的に頻繁に観察される行動であり、人間の動作に反応して受け渡し動作を可能にするロボットハンド開発はこれまで多数行われてきている。しかしながらこれらの研究では、動作の速度や軌跡などに注目して分析が行われてきた。本研究では複数の動作群の中から適切な動作を選択するという観点から受け渡し動作にアプローチしており、この過程を動作選択に働く制約としてまとめている。これらの制約は、質的に異なる動作を選択するという水準から人間の動作に対応可能なロボットハンドを開発するときに役立つ知見になると想定される。

また、複数の人間が動作を介してインタラクションを行う場面は、養育・介護場面(患者—介護者間、母—乳児間など)やスポーツ場面など日常場面の中に様々に存在する。このような場面では、言語コミュニケーションで主となる聴覚情報ではなく、動作観察にもとづく視覚情報の処理が重要であると考えられている(齋藤・白石, 2002)。しかしながら、このような複数の人間の動作インタラクション場面をどのように理解しているか、その情報処理過程はこれまであまりよくわかっていなかった。本論文では、二者間の受け取り動作を観察しているときの脳内での処理過程を調べた結果、手渡し動作と受け取り動作の組合せの適切さによってミラーニューロンシステムの作用が異なることを明らかにした。これらの結果は、例えば「のせる—そえる」という受け取り動作の観察であっても、この動作がどのような文脈(例

例えば手渡し動作が「直線」か「曲線」か、など）で行われるかによって、脳内でのシミュレーションに違いが生じることを示唆している。つまり、ある人間の動作が別の人間の動作に適切に対応しているかどうかの理解がミラーニューロンシステムの賦活に反映されていることになる。複数の動作インタラクション場面の学習においては、単に動作レパートリーを学ぶだけでなく、相手に応じた自己の動作の選択・調整を学ぶことも重要であろう。本研究の結果は、観察による二者間の動作の理解や模倣において、ミラーニューロンシステムによる情報処理（動作の内的なシミュレーションなど）がかかわることを示している。これらのことは、二者間の動作理解における視覚情報入力的重要性が脳内の情報処理の側面からも支持された結果であると考えられる。

他者の動作理解は社会的認知との関連から多くの研究が行われており、言語や知識を中心とした知能とは性質の異なる能力を反映していると想定されている。このような観点からコミュニケーションに障害のある自閉症者のミラーニューロンシステムなどの脳機能が測定されてきている。また、研究数は少ないものの、自閉症児では意味逸脱処理においてN400成分は生じるが、健常児に比べるとその電位差が小さいことを示す知見も提出されている。本論文では、研究2の結果、一方の人間に対する適切な動作観察でミラーニューロンシステムが働くことが示唆された。また、研究3の結果、二者間の動作の不適切さ認識処理がN400としてあらわれることが示された。つまりこれらの結果は、ミラーニューロンシステムの働きやN400の有無や電位差の大きさなどを指標とすれば、複数の人間が関与する場面での動作理解過程を測定できる可能性を示している。他者の動作理解などの社会的認知能力は、言語を介しては表現や測定が難しい特性を持っていると考えられる。そのため、本論文で示したミラーニューロンシステムやN400の機能は、対人場面での動作選択（もう少し広くとらえれば、他者が存在する中での動作の振る舞い）に関連する社会的知能を測定する上で重要なポイントとなると考えられる。

本論文ではNIRSとERPを指標として脳機能計測を行った。そのため、他者に対する動作の適切さ認識処理で脳全体がシステムとしてどのように働いているかを解明する課題が残されている。先行研究においては、他者の表情などの感情理解においてミラーニューロンサーキットの活動が島（insula）を介して扁桃核（amygdala）につながる経路も仮定されている。本研究の結果からはミラーニューロンシステムの作用に先立って適切さ判断が行われる処理過程も仮定された。本論文で明らかになった知見を拡張して脳全体のシステムの解明へとつなげていけば、適切さなどの価値判断を含んだ動作インタラクション場面の心理・脳科学的过程をよりいっそう詳細に解明できるはずであり、この点は今後の課題としたい。

論文審査結果の要旨

本論文では、二人の人間が行う物体の受け渡し動作を取り上げ、手渡された物体を受け取る動作の表出過程、および物体を受け取る動作の適切さの認識過程が心理学的・脳科学的に分析された。本論文は全5章から構成される。

第1章では、受け渡し動作を調べる意義を、ヒューマノイドロボティクス開発、コミュニケーション理論、アフォーダンス理論、運動制御研究、社会的認知研究など種々の研究領域と関連づけて論述がなされた。特に他者の動きに合わせて受け取る動作を巧みに選択・調整する人間の能力が、日常生活における円滑なコミュニケーションの下地になっており、人間らしいロボットハンド開発や社会認知能力の解明につながる観点が論じられた。

第2章(研究1)では、二者間で物体を受け渡す動作場面の行動観察実験を行い、適切な受け取り動作を選択する表出過程が調べられた。その結果、物体を受け取る動作は「握る」、「摘む」、「のせる—そえる」に分類された。また、どの動作が選択されるかは「安定して受け取る」「手渡し側の手に触れない」「手渡し側の動きに合わせる」という制約を設定することによって説明できることが見出された。各受け取り動作の運動制御を分析した結果からは、「握る」動作は弾道運動、「摘む」動作は修正運動によって制御される傾向が示された。「のせる—そえる」動作では、手渡し側よりも先に手を差して物体が到着するのを待つ傾向があることがわかった。

第3章(研究2)では、近赤外光スペクトロスコピー(NIRS; near-infrared spectroscopy)を用いて、受け取り動作の適切さを判断しているときの脳活動が調べられた。その結果、手渡し側に対して適切な受け取り動作を表出している映像を観察しているときは、ミラーニューロンシステム(mirror neuron system)の一部である下前頭回(inferior frontal gyrus)の賦活量が上昇することが示された。ミラーニューロンシステムは、他者の動作を観察したときに、その動作を自分が行っているように脳内でシミュレーションする機能があると想定されている。本研究の結果は、手渡し側に対して適切な受け取り動作で応答している映像を観察しているときは、観察者は自分が実際に物体を受け取っているような運動表象を脳内で形成している可能性を示唆している。

第4章(研究3)では、受け取り動作の適切さを判断しているときの処理過程が事象関連電位(ERP; event-related potential)によって調べられた。先行研究により、意味的に逸脱した文を処理したときは刺激提示から約400ms後に陰性のERP成分(N400)が生じることが報告されている。これらの知見にもとづいて、本研究では二者間の動作の不適切さ処理に特異的なERP成分が調べられた。その結果、受け取り動作の選択が不適切な場合はN400に類似したERP成分などが生じることがわかった。

第5章では、研究1、2、3を通じて明らかにされたこと、ならびに本研究の応用性についての総合考察が行われた。研究1では、手渡し側の動作の要因によって適切な受け取り動作が柔軟に選択されることがわかった。これらのことは物体の要因だけでなく、手渡し側(他者)の要因が受け取り側(自己)の動作選択に影響を与えることを示しており、従来のアフォーダンス理論を拡張する見解が提示された。その他にも、手渡し側の動作に合わせて質的に異なる受け取り動作で応答したり、時には礼儀正しい動作や能動的な応答を行えば、これまで以上に人間らしさを兼ね備えた機械動作系の開発が可能になることが論じられた。研究2、3からは、受け取り動作の適切さに応じてミラーニューロンシステムや意味逸脱処理(N400)の作用が異なることが示された。これらは、対人場面での動作選択(他者が存在する中での動作の振る舞い)にかかわる社会的認知能力は、ミラーニューロンシステムやN400と関連することを示しており、社会的認知能力の一端が、表出された受け渡し動作パターンによって、およびそれらの表出・観察時における脳機能計測を行うことによって分析・検査できる可能性が論じられた。

以上のように、本論文は、受け取り動作の適切な表出と認識について、行動分析や脳機能計測の手法を用いて、心理学的・脳科学的に検討したものである。二者間における動作選択を検討する観点は新しく、理論的にも応用的にも様々な研究分野の発展に寄与するところが大きい。よって、本論文の提出者は博士(文学)の学位を授与されるに十分な資格を有するものと認められる。