

氏 名 きた だ りょう
北 田 亮
学位(専攻分野) 博 士 (人間・環境学)
学位記番号 人 博 第 296 号
学位授与の日付 平成 17 年 5 月 23 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 人間・環境学専攻
学位論文題目 fMRI studies of the human cortical somatosensory system
(ヒトの大脳皮質における体性感覚システムの fMRI 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

論 文 内 容 の 要 旨

本論文では、ヒトの触覚の重要な特性である一体性知覚と物体表面の粗さ強度の推定に関する神経機構を明らかにするため、行動実験と機能的核磁気共鳴画像法 (fMRI) を用いた脳の活動部位の非侵襲的記録による実験を行った。一体性知覚とは、ヒトが閉眼状態で、ある物体を手で触れると、手の複数の皮膚部位に触刺激が加えられているにも関わらず、一つの物体として知覚する現象である (Gibson, 1962)。一体性知覚は触覚による物体の認知及び操作に重要な役割を果たすが、このような知覚を生じるメカニズムについては十分に検討がなされていない。特に一つの物体が手の上を運動するとき一体性知覚が生じるためには、運動の速度や物体の材質など刺激の物理的特徴に対する応答が、異なる皮膚部位間で相関していることが期待されるが、どの物理的要因が一体性知覚に重要であるかについては不明である。さらに脳のどの領域が異なる皮膚部位に与えられた刺激を統合し、一体性知覚を生じさせるのかについても明らかではない。

そこで第一実験では、単一の物体または複数の物体による運動刺激を人差し指と中指に加え、両部位に加えた運動刺激の方向の違いが一体性知覚に及ぼす影響を行動学的に調べた。また、同一の刺激条件を用いて一体性知覚に関与する脳部位の探索を行った。本実験では、先行研究から (Iwamura, 1998; Bodegard et al., 2001)、一次体性感覚野、頭頂弁蓋部、後頭頂葉を含む大脳皮質体性感覚領域が一体性知覚に関与しているという仮説を構築し、その検証を行った。5名の右利き被験者により実験を実施した。右人差し指と中指の掌上に、木材から成る円柱の周期的運動による触刺激を加えた。刺激条件は、1物体を同方向に動かす場合 (1物体同位相)、1物体を逆方向に動かす場合 (1物体逆位相)、2物体を同方向に動かす場合 (2物体同位相)、2物体を逆方向に動かす場合 (2物体逆位相) の4条件である。その結果、物体数に関係なく、同位相運動条件は逆位相条件より強い一体性知覚を被験者に引き起こした。fMRI により一体性知覚に関わる脳領域を調べるため1物体同位相条件と2物体逆位相条件における脳活動を比較したところ、左頭頂間溝と左下頭頂小葉において逆位相条件に比べ同位相条件でより大きな活動が観察された。以上の結果から、異なる皮膚部位に加えられる触刺激の運動方向の同一性が一体性知覚の生成に重要であること、さらに後頭頂葉が複数の指に加えられた触覚情報の時空間的な統合に重要な役割を果たしていることが示唆された。

触覚は形状弁別など空間的な知覚より、温度や粗さなど物体表面上の非空間的な材質特徴の知覚に優れていると考えられている (Lederman and Klatzky, 1997)。表面粗さに関する心理学的研究や末梢神経生理学の研究は多く行われてきているが、粗さ知覚に関する脳内基盤についてはあまり解明されていない。特に触覚による粗さの知覚は単一次元性 (unidimensionality) を持ち、粗さ強度を推定することができる。第二の研究では、粗さ強度の推定に関連する脳活動を調べた。

粗さ強度の推定を行うためには、被験者は感じている粗さを過去に感じた粗さと比べなくてはならない。そこで本研究では、粗さ強度の推定は、感覚と認知に基づいた二つの異なる情報処理段階を経ると考えた。本研究では、先行研究に基づき感覚的处理には体性感覚野皮質が関与し、認知的処理には外側前頭前野が関与しているという仮説を採用した。これら二つ

の処理段階に関連した脳領域を特定するために、粗さ強度を推定する課題条件と刺激全体に注意する統制条件を比較した。しかしこれら二条件による単純な比較では触覚に対する注意量が異なるため、粗さ強度に関連した脳領域から、注意に関連したそれらを分離することが困難であった。そこで本論文では、粗さ強度に応じた反応を持つ領域を調べることで、粗さ強度の推定に特異的に関与する脳領域を特定した。

14名の右利き閉眼被験者の右中指に、直線状の格子表面による刺激を与え、その粗さ強度の推定をしている時の脳賦活状態を測定した。課題条件では粗さ強度に関連した脳活動が、両側頭頂弁蓋部・左島部・右外側前頭前野で見られた。しかしながら、統制条件ではそのような強度関連性の脳活動は見られなかった。さらに、両側頭頂弁蓋部と左島は、安静時に比べ両条件で平均的に高い活動を示し、右外側前頭前野は課題条件でより大きく活動した。これらの結果から、頭頂弁蓋部と島部は表面粗さの強度に関する触覚情報を抽出するのに重要な役割を果たし、右外側前頭前野は粗さ強度の推定における認知的な役割を果たしているとは結論された。

以上の結果から、本論文では、触覚一体性や粗さ強度の推定には、後頭頂葉や頭頂弁蓋部および島部が重要な働きをしており、前頭前野は粗さ強度の推定における認知的役割を果たしていることが明らかになった。

論文審査の結果の要旨

本学位申請論文は、人間の触覚メカニズムの解明を目指して行われた研究の成果をまとめたものである。触覚は視覚より低次の感覚であると考えられていたため、相対的に触覚に関与する神経メカニズムの解明が遅れている。しかし最近の研究は触覚が発育における愛着行動や日常生活における外界の認識において欠かせないことを実証しており、独自の重要性が再認識されつつある。本研究は、機能的核磁気共鳴画像法（fMRI）を用いて触覚の情報処理に関する脳内基盤の検討を行うことを目的としている。本論文では、2つの研究が行われている。触覚一体性は1960年代に初めて紹介された現象で、ヒトの触認識にとって重要な問題であるにもかかわらず、これまでほとんど取り組まれてこなかったテーマである。第一の研究では、この触覚一体性の知覚を引き起こす刺激の物理的要因を検討し、その情報処理に関わる脳部位の同定を行っている。第二の研究では、表面粗さの強度推定に関わる脳部位の同定を行っている。

本研究ではまず行動学実験を行うことで触知覚が有する特徴を定量化し、その後、触知覚に関わる脳部位の特定に適したfMRI実験のパラダイムを策定している。第一の研究では、物体運動における位相性が触覚一体性の知覚に与える影響を行動学的に検討した。被験者は触刺激が単一物体の運動に由来するかどうかを判断し、その判断に要した反応時間と被験者が知覚した一体性の明瞭度が測定された。その結果、同位相運動条件と逆位相条件では判断に要する時間が同程度であるが、触覚一体性の知覚は同位相運動条件で強く見られることが分かった。さらにこの二つの条件をfMRIで比較すると、同位相運動条件では逆位相運動条件に比べて、左頭頂間溝と左下頭頂小葉がより大きく活動した。この結果から、後頭頂葉が複数の指における触覚情報の時空間的な統合に重要な役割を果たしている可能性が示唆された。本研究は一体性に関与する物理的要因を特定しようとするユニークな試みであり、物体表面の均一性や圧力など、他の物理的要因による影響を検討する研究が今後にわたって期待される。また従来の脳研究から、複数の指からの情報が一次体性感覚野に限らず様々な脳領域のニューロンで収束していることが明らかになっている。本研究では新たに、後頭頂葉が複数の指からの触覚情報を収束させるだけでなく、その情報の時空間的統合に関わっている可能性を示した。

第二の研究では直線状の格子表面の粗さ強度を推定する条件を課題条件とし、同じ刺激だが強度の推定を課さない条件を統制条件とし、表面粗さの強度推定に関わる脳部位の特定を行っている。課題条件は統制条件に比べ難易度が高く、課題条件と統制条件の比較は注意メカニズムの違いも反映する可能性がある。本研究は粗さ強度の推定に関与する脳部位を正確に特定するため、粗さ強度に関連した脳活動を示す領域の描出を試みている。その結果、頭頂弁蓋部・島では課題条件と統制条件で同等の活動が見られたが、課題条件のみで粗さ強度に関連した脳活動が見られた。外側前頭前野では課題条件のみで活動が見られさらに、粗さ強度に関連した脳活動が見られた。この結果は頭頂弁蓋部・島が触覚の処理に関与するという従来の結果を支持するだけでなく、外側前頭前野が粗さ強度の推定における認知的な役割を担っていることを実証している。特筆すべきことに、粗さ強度に関連した活動は課題条件のみで見られ、推定を課さない統制条件では粗さ強度に関連した活動は見られなかった。これは頭頂弁蓋部・島・外側前頭前野が同じ刺激条件下であっても課題に依存して情報処理をダイナ

ミックに変化させていることを示唆している。粗さ強度推定に関する先行研究では、粗さ強度の推定条件と刺激を伴わない安静状態を比較したものであった。これらの研究では触覚刺激の物理量が統制されていないため、粗さの情報処理に関する神経機構の統一的な見解は得られていなかった。本研究では同一刺激条件で、粗さ強度に関連した活動を検討することによって、上記の点を克服したものである。

以上のように、本学位申請論文は、2つの触覚に特有な現象を用いることで、触覚に関与する脳領域を明らかにしたものである。ヒト脳における触覚研究が少ない中、認知行動学と脳機能イメージング法を活用した本論文はこれからの脳研究の発展に大きな貢献をするだろう。また本論文の結果は、触知覚が外界からの刺激とヒトの内的な状態の相互作用によって成り立つことを示しており、人間と環境の関わりの諸相についての実証的研究を目指して創設された人間・環境学専攻にふさわしい内容を備えた研究といえる。

よって、

本論文は、博士（人間・環境学）の学位論文として価値あるものと認められた。論文内容とそれに関連した事項について平成17年2月16日に試問を行った結果、申請論文が学位論文として価値あるものとして認められた。