

学位論文の要約

論文題目：質感の視覚性ワーキングメモリを支える神経基盤の解明

申請者：藤道 宗人

ヒトと物体は密接に関係しているため、ヒトがどのように物体を認知するかという観点から視覚システムについて検討が行われてきた。しかしこれらの研究の多くは物体の形状や色などの視覚特徴に焦点を当てており、物体表面の性質、すなわち質感に関する知見は限定的であった。その原因として質感が複雑な視覚特徴であり、刺激として統制することが技術的に困難であることが考えられた。しかしながらコンピュータグラフィックスの進展により質感を統制することができるようになると、知覚の側面から質感認知の理解を目指す研究が行われるようになった。さらに近年になると認知の一側面である視覚性ワーキングメモリの観点から質感認知を検証する研究が行われるようになった。本研究は質感の視覚性ワーキングメモリ (Visual Working Memory: VWM) を支える神経基盤を明らかにすることを目的としたものである。

質感の VWM について得られている知見は限定的である。例えば、物体の周囲の照明環境が異なっていたとしてもヒトは 2 つの物体の質感を正確に知覚できることが知られているが、このような照明変化に対する頑健性が光沢感や粗さ、金属やガラス、そして半透明感のような質感の VWM においても見られることが示されている程度である。近年の研究により、金属やガラス、石のような質感カテゴリの VWM を支える神経基盤が腹側高次視覚野であることが示されているが、物体の光沢感や粗さの程度がどれくらいであるのかという質感の特性の VWM を神経科学的に検討した研究はない。本研究では質感の特性の VWM を支える神経基盤を検討することで質感認知研究に新たな知見を提供することを目指す。

以上の目的を達成するために、本研究では機能的磁気共鳴画像法 (functional Magnetic Resonance Imaging: fMRI) とマルチボクセルパターン解析 (Multi-Voxel Pattern Analysis: MVPA) を併用した実験を行った。MVPA は脳活動の賦活量に着目した単一変量解析と異なり、脳活動のパターンに着目した解析手法である。本研究を通して着目する質感の特性は形状や照明環境、輝度ヒストグラムの歪度や色など、多次元の視覚特徴の影響を受けることが知られている。単一変量解析を適用するとボクセル間の相殺の問題や、賦活の原因の特定が困難になるという問題が生じると考えられた。MVPA は脳の基本単位であるボクセル間の脳活動のパターンの規則性を抽出する手法であるため、これらの問題を解決することができる。ゆえに本研究では fMRI と MVPA を併用した実験を用いて質感の VWM メカニズムを検証した。

研究 1 では照明変化に対して頑健な粗さの VWM を支える神経基盤を検討した。近年の研究により知覚だけでなく VWM においても照明変化に対して頑健な性質があることが明

らかになっている。さらにこれらの認知機能の間には共通の神経基盤がある可能性も指摘されている。研究 1 ではこのような照明変化に対して頑健な性質を支える神経基盤を検討するために、粗さ遅延弁別課題を実施している際の参加者の脳活動を計測した。保持期間中の脳活動に対して MVPA を適用した結果、腹側高次視覚野と頭頂間溝が照明変化に対して頑健な粗さの VWM を支える神経基盤として特定された。腹側高次視覚野は従来の研究により質感知覚に関与することが指摘されている領域であり、頭頂間溝は VWM の枠組みで関連性が議論されてきた領域である。したがって照明変化に対して頑健な粗さの VWM 表象はこれらの領域で表現されていることが明らかになった。また、先行研究によって知覚と共通の神経基盤であると推測されている領域は腹側高次視覚野である可能性も示唆された。さらに質感知覚には輝度ヒストグラムの歪度や色のような低次の視覚特徴も関与すると考えられているが、研究 1 では低次の視覚特徴を表現する初期視覚野の関与は見られなかった。この結果は、照明変化が生じるシーンにおいて、質感が抽出されると低次の視覚情報は失われることを示している。

研究 2 では、研究 1 で示された腹側高次視覚野と頭頂間溝にどのような機能差があるのかを検討した。これらの脳領域は先行研究において異なる文脈でその機能について議論されてきた。つまり、腹側高次視覚野は質感知覚の文脈で、頭頂間溝は VWM の文脈で関連性が指摘されてきた。したがって、質感の VWM におけるこれらの領域の機能には違いがある可能性がある。この点を検証するために研究 2 では質感を選択的に符号化して保持する過程に着目した。我々は物体の特定の質感を記憶するとき、その物体に含まれる様々な質感の中から選択的に抽出しているはずである。この処理過程を検討することにより腹側高次視覚野と頭頂間溝の機能差を検討した。刺激の光沢感あるいは粗さに着目させる遅延弁別課題を行い、その保持期間中の脳活動に対して MVPA を適用した結果、腹側高次視覚野と頭頂間溝の間には異なる脳活動の時系列パターンがあることが明らかになった。つまり、腹側高次視覚野は選択的符号化フェイズに、頭頂間溝は保持フェイズに特に寄与することが示された。これらの結果は、質感知覚に腹側高次視覚野が、VWM に頭頂間溝が関与するという先行研究と整合する結果であると考えられる。

研究 3 では保持期間中に呈示される視覚的干渉が腹側高次視覚野と頭頂間溝に及ぼす影響について検討した。我々が物体の質感を記憶するとき、照明変化が生じるだけでなく、記憶している際にも何らかの視覚的入力を処理していると考えられる。日常生活の視環境を再現することにより、これらの脳領域が質感の VWM においてどのように機能するかを明らかにすることができる。そこで研究 3 では視覚的干渉がランダムな試行で呈示される粗さ遅延弁別課題を実施した。行動パフォーマンスを解析した結果、視覚的干渉の有無にかかわらず高い成績で課題を遂行できていることが明らかになった。一方で腹側高次視覚野と頭頂間溝の保持期間中の脳活動に対して MVPA を適用した結果、視覚的干渉なし条件ではどちらの脳領域の関与も見られず、視覚的干渉あり条件では腹側高次視覚野の関与が見られるにとどまった。このことから、腹側高次視覚野と頭頂間溝以外の脳領域が機能していた

可能性が考えられたので、サーチライト MVPA を実施した。この解析手法は特定の脳領域を設定せずに、全脳に対して解析を行う方法である。これにより、データ駆動的に関連領域を探ることができる。サーチライト MVPA の結果、視覚的干渉なし条件では視触覚処理など多感覚処理が行われる領域が関与することが新たに判明した。一方で視覚的干渉あり条件では腹側高次視覚野の関与が示された。視覚的干渉あり条件において多感覚処理が見られなかったのは、視覚的干渉が呈示されたことによるボトムアップの注意あるいは記憶した刺激への干渉を防ぐ機能が生じたことによると推察された。これらの結果から、日常生活において我々は多感覚処理に基づいて質感を記憶している可能性が新たに提起された。

以上の研究結果から、質感の VWM を支える神経基盤について、本研究は新たに 3 つの知見を提供した。第一に、質感の VWM が腹側高次視覚野と頭頂間溝によって支えられているということである。また、照明変化を伴う視環境下では低次の視覚特徴を処理する初期視覚野の関与は限定的であることも明らかになった。第二に、腹側高次視覚野と頭頂間溝の間には機能的差異があることである。腹側高次視覚野において質感は選択的に符号化され、その情報は主に頭頂間溝によって保持されている可能性がある。最後に、視覚的干渉が生じる日常的な場面において、ヒトは多感覚処理に基づいて質感を記憶しているということである。本研究は、質感の VWM を支える神経基盤を明らかにすることにより、ヒトの質感認知メカニズムの理解に寄与するものである。