

氏 名 岡澤 剛起

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 1611 号

学位授与の日付 平成25年3月22日

学位授与の要件 生命科学研究科 生理科学専攻  
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Localization of regions activated by surface gloss in macaque  
visual cortex using fMRI

論文審査委員 主 査 教授 定藤 規弘  
教授 小松 英彦  
教授 南部 篤  
教授 長谷川 功 新潟大学

## 論文内容の要旨

The surface properties of objects, such as gloss, transparency, and texture, provide important information about the material characteristics of objects in our visual environment. Previous psychophysical studies have revealed that humans can correctly estimate surface properties under various environments. Some recent studies also suggest that humans may utilize simple image statistics to extract the information regarding surface properties. Recently, to uncover neural mechanisms underlying perception of surface properties, some researchers have started to examine brain regions processing surface properties in humans using functional magnetic resonance imaging (fMRI) and have found that higher order visual areas in the ventral visual pathway are responsive to surface properties. To fully understand the neuronal processing, physiological studies using non-human primates are indispensable. Previous imaging and electrophysiological studies have shown that there are cortical regions selectively responding to object shapes, colors, faces etc. in the macaque visual cortex. However, because there have been few reports on the neuronal responses to surface properties in the macaque, we still lack information about where and how surface properties are processed. Thus, in this study, the author used functional magnetic resonance imaging (fMRI) to examine the cortical responses to surface properties in the macaque visual cortex. Among various surface properties observed in the real world, he focused on surface gloss which is one of the basic surface properties that can be defined by surface reflectances. To find brain regions responsive to surface gloss, he generated images of glossy and matte objects using computer graphics. He also prepared scrambled images for controls of local spatial patterns by locally randomizing the luminance phases of the images with glossy and matte objects. In total, four conditions, i.e. gloss (G), matte (M), scrambled gloss (SG), and scrambled matte (SM), were prepared. Two awake macaque monkeys, whose heads were rigidly fixed by headpost, were trained to fixate on a central fixation spot on the screen in the MRI scanner while the images for each condition were presented. In experiment 1, the author contrasted the responses to glossy images with those to matte and scrambled images by using a conjunction analysis ( $G > M$  &  $G > SG$  &  $G > SM$ ). Activation was observed along the ventral visual pathway, including V1, V2, V3, V4, and posterior and central regions in the inferior temporal (IT) cortex. In experiment 2, to dissociate the responses to contrasts and gloss, the author manipulated the contrasts of images to generate high (H) and low (L) contrast images in both the gloss (G) and scrambled gloss (S) conditions. By computing the effect of gloss on the cortical responses irrelevant to the contrast levels ( $HG + LG > HS + LS$ ), he found that the responses of these regions were actually modulated by surface gloss and could not be explained by the global contrasts. In the IT cortex, it has been shown that there are regions specialized for individual categories such as faces and objects. Because multiple gloss responsive regions were found in the IT cortex, in experiment 3, the author examined the spatial relationships between the face/object responsive regions and the gloss responsive regions observed in the IT cortex. To

this end, he conducted a face/object localizer experiment with the same monkeys used in experiment 1 and 2. He found that, although there were partial overlaps, the responses to gloss were distinct from those to faces and objects in the IT cortex. He also confirmed that responses to glossy images were not observed in higher order areas in the dorsal visual pathway (MT+ and intraparietal sulcus), suggesting that the surface gloss is predominantly processed in the ventral visual pathway at least in the passive viewing condition. In summary, these results suggest that image features related to glossy surface are processed along the ventral visual pathway from V1 to specific regions in the IT cortex. This is consistent with previous human fMRI experiments that showed surface properties are processed in the ventral visual pathway. Because the responses to glossy images could not be explained by the contrasts of images, other image features specifically related to surface gloss would be processed in these areas. In the IT cortex, because the gloss responsive regions were distinct from the face and object responsive regions, specialized neural substrates may exist to process surface properties of objects.

光沢や透明、テクスチャなどの表面特性は、物体の素材や状態を知る上で重要な手掛かりとなる。表面特性知覚についての生理学的研究は最近になって行われており、ヒトで機能的核磁気共鳴画像法 (fMRI) を用いた研究により腹側高次視覚野が表面特性知覚にかかわっていることが示されている。一方、ヒト視知覚のモデル動物であるマカクザルについては、腹側高次視覚野に物体や顔、色に応答する領域があることが知られているが、表面特性への応答を記録した研究は多くないため、どの視覚領域が表面特性の知覚に重要であるか十分に明らかとなっていない。岡澤氏は、fMRI を用いてサル視覚野において物体表面特性に応答する領域を探索した。様々な表面特性の中でも表面反射率により定義できる最も基本的な属性である光沢に着目して以下の3つの実験を行った。

実験1では、表面光沢に応答する脳領域を同定するために、コンピュータグラフィックスを用いて光沢のある物体、光沢のない(マット)物体の画像を作成した。光沢のある物体画像は光沢のない物体画像に比べて高空間周波数成分が多いといった画像の基本的な空間特徴に違いがあるため、この違いによる活動の差を統制する目的で光沢画像、マット画像それぞれについてウェーブレットフィルタを用いて局所的に輝度の位相をランダム化することにより作成した、位相スクランブル画像を用意した。位相スクランブル画像は元画像と空間周波数のパワースペクトルは類似しているが、位相のずれのために光沢は知覚されない画像である。実験にはヘッドポストで頭部を固定された二頭のサルを用い、MRI スキャナの中で注視課題を行わせている際に各条件の画像を呈示した。光沢画像を見ている際の脳活動と、それ以外(マット画像、光沢スクランブル画像、マットスクランブル画像)での活動を比較したところ、腹側視覚経路に沿ってV1, V2, V3, V4 そして下側頭皮質(IT野)の後部と中心部において有意な活動が見られた。

実験2では、光沢への応答とコントラストへの応答とを分離するために、画像のコントラストを調整することで光沢画像、光沢スクランブル画像それぞれについて高コントラスト条件と低コントラスト条件を用意した。コントラストの高低に依存せず光沢に応答する成分(高・低コントラスト光沢画像－高・低コントラストスクランブル画像)を計算したところ、実験1で見られた領域での光沢への応答は画像コントラストへの応答では説明できない成分があることが明らかとなった。

今回、活動が見つかったIT野では従来、物体や顔に応答する領域があることが知られている。そこで実験3では物体や顔への応答領域と光沢への応答領域との空間的な関係を検討するために、顔、物体画像を呈示中の脳活動を記録した。この結果、これらの領域の間では重複はあるものの、光沢への応答は物体や顔への応答とは異なる応答中心を持っているということが明らかとなった。

以上の結果は、光沢や光沢にかかわる画像特徴はV1からIT野に至るまでの腹側視覚野で処理されており、特にIT野では顔・物体処理領域とは異なる場所に位置する特定の小領域が光沢処理にかかわっていることを示唆するものである。この結果は、物体表面特性が腹側経路で処理されているとする過去のヒトfMRI研究の結果とも一致している。また初期視覚野で今回見つかった光沢への応答も画像コントラストでは説明できなかったため、これらの領域ではコントラストや空間周波数以外に光沢の知覚にかかわる画像特徴量が表現されている可能性が示唆される。

上記の成果は、表面特性知覚の神経基盤という新しい研究領域に先進的に取り組み、その基盤となる知見を与えるものである。ヒト以外の霊長類に機能的MRIを適用することにより、動物実験とヒトでの所見を直接的に比較出来る途を開いた点で新規性が高く、研究としての完成度も高い。従って本論文は学位に値すると認める。