

氏 名 安田 正治

学位 (専攻分野) 博士 (理学)

学位記番号 総研大甲第 1069 号

学位授与の日付 平成 19 年 3 月 23 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 The color selectivity of neurons in posterior inferior
temporal cortex of macaque monkey

論文審査委員 主 査 教授 南部 篤
教授 小松 英彦
教授 定藤 規弘
教授 三上 章允 (京都大学)

論文内容の要旨

Inferior temporal (IT) cortex of the monkey is the final stage of the ventral stream that is concerned with the processing of color and shape information. Lesion studies indicated that IT cortex plays an important role in color perception. Previous recording studies showed that there were many color selective neurons in the anterior two-thirds of IT cortex (area TE). As for the posterior IT (PIT) cortex, although some imaging studies reported that this area is activated by color stimuli, no neural recording experiments have been conducted to systematically study color selectivity of PIT neurons. In the present study, they recorded neuron activities from PIT cortex and examined color and shape selectivity using a set of color stimuli that systematically distributed in the color space and a set of geometrical patterns. Neurons were recorded from three hemisphere of two macaque monkeys while each animal performed a visual fixation task. Recording chambers were placed to cover the lateral surface of the PIT cortex anterior to the inferior occipital sulcus.

They found that many color-selective neurons distributed throughout the PIT cortex examined. However, the color selective properties were not homogeneous across the PIT cortex. They found that neurons in the ventral part of PIT cortex tended to have sharper color tuning than those in the dorsal part of PIT cortex. They also found that many PIT neurons exhibit shape selectivity, and that color selective neurons with and without shape selectivity were intermingled in either the dorsal and ventral region of PIT cortex. This suggests that the processing of color information and shape information takes place in close relationship in PIT.

They quantitatively tested the color and shape selectivity in 161 single neurons. In these neurons, they quantified the selectivity to color and shape stimuli of each neuron using two indices. First, selectivity index was calculated for each neuron to quantify how well a cell discriminated the most-preferred stimulus from the least-preferred stimulus in each set of stimuli. The value of selectivity index and the statistical significance of the variation in the responses to the stimulus sets were used to classify a neuron as selective or not. Secondly, they calculated sparseness index to quantify the sharpness of stimulus selectivity. This index indicates the degree to which responses evenly distributed across the set of stimuli. They mapped the distribution of these indices across the PIT cortex, and found that color selective neurons with sharp color tuning (color sparseness index ≤ 0.7) were concentrated in the ventral part of PIT cortex examined and they named this region as PIT color area (PITC). In PITC, each neuron had sharp color tuning and represented only a restricted area of the color space, but the population of such sharply color-tuned neurons in PITC as a whole represented the entire color space. Neurons located out of PITC also had color selectivity but they tended to have

broader color tuning than those in PITC. With regard to the strength and sharpness of shape selectivity, there was no clear difference between neurons located in and out of PITC.

They mapped the RFs in PIT and found that there was crude retinotopic organization in PITC. Neurons in the dorsal part of PITC had RFs containing the foveal center. In the ventral part, the eccentricity of RFs increased and the RFs in the anterior and posterior part represented the lower and upper visual field, respectively. This retinotopy corresponded well to what Boussaoud et al. (1991) previously reported in PIT. One important difference between their previous result and our present result is that, although these authors reported that the retinotopic map covered the entire region of the lateral surface of PIT cortex ventral to STS, they found that clear retinotopic organization was restricted within a part of PIT and this area corresponded to the region where neurons having sharp color selectivity were concentrated, namely PITC. Moreover, the position of the retinotopic map differed between individual hemispheres, and the positional shift seemed to be in coincident with the variation of the position of PMTS. The present results strongly suggest that there is a circumscribed region in and around PMTS that has crude retinotopic organization and that is involved in the processing of color information.

As the luminance contrast is an important factor influencing the perceived color, they used two color stimulus sets at two different luminance contrasts; one is darker and the other is brighter than the background. Many PITC neurons changed their responses to color stimuli depending on their luminance contrast. When they considered the color representation with the activities of the entire population of neurons, they found that the responses to red and blue were stable across two luminance contrasts while the responses to un-saturated colors such as white, gray, and black were variable with the change in luminance contrast. This seems consistent with the fact that the perceived color of un-saturated colors significantly change depending on the luminance contrast whereas that of blue and red do not change by the change in the luminance contrast. These results suggests that activities of color selective neurons in PIT cortex is strongly related to color perception.

私たちが外界を如何に認識しているのか、なかでも外界の対象物の色、形を如何に知覚・認知しているのかというのは、認知科学あるいは脳科学にとって大きな問題である。これまでの研究によれば一次視覚野に入った情報は、主に運動視に関する情報を処理する背側経路と、形や色に関する情報を処理する腹側経路とに分かれて進むとされ、それぞれにおける情報処理過程が詳細に調べられてきた。

サルの視覚皮質では、V1、V2、V4、下側頭皮質を通る腹側経路に沿って色情報が処理されると考えられている。破壊実験によれば、この腹側経路の最終段階にあたる下側頭皮質が、色弁別に重要な働きをしている。下側頭皮質の前部約 2/3 の領域である TE 野に、色選択的なニューロンが多数存在していることが報告されている。一方、下側頭皮質の後部にあたる PIT 野では、幾つかのイメージングの研究がなされているが、細胞レベルで色選択性を系統的に調べた研究はない。そこで我々は、ニホンザルの PIT 野において細胞外記録を行い、色選択性の性質、分布、視野表現を調べた。

モニタによって表現される色空間に均等に分布する 15 色の色を色刺激として、また 11 種類の単純な幾何学図形を形刺激として用い、PIT ニューロンの色選択性、形選択性を調べた。その結果、多くの PIT ニューロンが色選択性を持つことが明らかとなった。そして、色にも形にも選択性を持つニューロンと、色には選択性を持つが形には選択性を持たないニューロンが入り混じって分布していることがわかった。また、記録部位の腹側約 2/3 には、鋭い色選択性を持つニューロンが多く存在する傾向があり、我々はこの領域を暫定的に PIT color area (PITC) と名付けた。PIT 野の受容野については過去に Boussaoud らが詳細なマッピングを行っており、彼らによると PIT 野に相当する領域に大雑把な視野表現が存在し、彼らはこの領域を TEO 野と名付けた。本研究においても PIT 野の受容野マッピングを行ったところ、記録部位に大雑把な視野表現があることが明らかになった。すなわち PITC の背側では中心窩が表現されており、腹側の後部では上視野が、前部では下視野が表現される傾向があった。この視野表現パターンは、Boussaoud らが報告したものと同様のものであった。しかしながら、こうした視野表現パターンは PITC 内においてのみ見られ、PITC の外側の領域でははっきりとした視野表現は得られなかった。以上の結果は、PITC が色情報処理に深くかかわった領域であることを強く示唆している。

本研究ではさらに、背景よりも明るい色刺激と、背景よりも暗い色刺激の、2 種類の輝度を持つ色刺激を用いて色選択性を調べた。その結果、多くの PITC ニューロンが背景と色刺激の輝度コントラストの変化に応じて、その色選択性を変化させた。また、ニューロン全体の各色に対する反応が、背景との輝度コントラストを変化させた場合にどの程度変化するかを調べた結果、赤や青に対する反応にあまり変化が見られなかったのに対し、灰色や白といった彩度の低い色に対する反応では大きな変化が見られた。この結果は、彩度の低い色に対する色知覚は背景とのコントラストの変化によって大きく変化するが、彩度の高い色に対する色知覚は背景とのコントラストの影響を受けにくいという心理物理学の知見と一致する。

このように本論文は、色の知覚・認知の中枢メカニズムに関して重要かつ新しい知見を与えている。実験方法は適切に考えられ、導かれている結論も妥当であり、それらは明快かつ平易な英語で記載されている。これらのことから申請者の本論文は、学位論文として十分にふさわしい内容であるものと結論された。