

氏 名 松茂良岳広

学位（専攻分野） 博士（理学）

学位記番号 総研大甲第 1174 号

学位授与の日付 平成 20 年 3 月 19 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 Relationships between the activity of color selective
neurons in the inferior temporal cortex of the monkey
and color discrimination behavior

論文審査委員 主 査 教授 伊佐 正
教授 小松 英彦
教授 南部 篤
教授 藤田 一郎(大阪大学)

論文内容の要旨

On the basis of lesion or electrophysiological studies, it is suggested that area TE (anterior part of IT) of the monkey, which is the highest stage in the ventral stream of cortical visual information processing pathway, plays an important role for information processing of color.

The relationships between the activity of a single cortical neuron and the discrimination behavior of the monkey have been previously studied for stereoscopic depth and motion perception. However, no study has been conducted to study the relationship between the neural activity and discrimination behavior for color vision.

To study whether there exists close link between color selective responses of TE neurons and color perception, he examined the correlation between monkey's color judgment and the response of single color-selective TE neuron. He trained a fine color judgment task in two monkeys and simultaneously recorded the color discrimination behavior and single neural activity from the color-sensitive sub-region in area TE. In this task, a sample color stimulus was presented at the center of the display, and the monkey had to make either the rightward or leftward saccade depending on the similarity of the sample color to the two target colors. Two target colors were determined based on the color selectivity of each neuron. One target color (preferred target color) evoked stronger response than the other color (anti-preferred target color). A sample color set consisted of seven isoluminant colors that include the target colors and are linearly aligned on the CIE-xy chromaticity diagram with equal intervals. The range of the sample colors was set slightly larger than the discrimination threshold of the monkey.

In each recording session, he quantified both the color discrimination threshold of the monkey and that of the single neuron and compared these two thresholds. Psychometric threshold was calculated from the psychometric function that indicates the proportion that the monkey made saccade toward the direction associated with the preferred target color (pref-choice) as a function of sample colors, and it was defined as the color distance on the CIE-xy chromaticity diagram where the monkey can discriminate colors at the accuracy level of 80% correct. To determine the neurometric threshold, he constructed a neurometric function from the neural responses to sample colors based on a 'neuron/anti-neuron' model. This model assumes that the ideal observer choose the preferred-target color if the spike count of the recorded neuron ('neuron') is larger than that of a hypothetical neuron with the opposite tuning ('anti-neuron') that is selective for the non-preferred target color. He applied ROC analysis to compute the probability that an ideal observer choose the preferred target color for each sample color using the frequency distributions of the spike counts of the 'neuron' and 'anti-neuron' to that color. Then he constructed 'neurometric function' that indicates the performance of a given 'neuron'/anti-neuron' pair to the entire set of sample colors. He computed neural threshold based on the neurometric function as the color separation that yielded 80% correct color judgments. When he compared psychometric threshold and neurometric threshold obtained simultaneously, he found that neurometric

threshold was on average slightly higher than the psychometric threshold although some neurons had the thresholds comparable to that of the monkey.

When he studied the color discrimination ability of the monkey and neuron at various positions across the chromaticity diagram, he found that both psychometric and neurometric thresholds systematically depended on the color used in each experiment. So, in the next analysis, he divided the CIE-xy chromaticity diagram into ten color areas and examined the relationships between the variations of psychometric threshold and neurometric threshold across the color areas. He found that there was strong positive correlation between these two thresholds. This result indicates that, if the discrimination of a given pair of colors is easy for neurons, it is easy for the monkey as well. These results strongly support the idea that there is association between the activity of TE color selective neurons and color perception of the monkey.

If the activity of TE color selective neuron affects the color perception of the monkey, he can expect that the monkey tends to make pref-choice in a trial when the recorded neuron responded more strongly because signals coding the preferred target should be stronger in such a trial. To examine whether this happens, he calculated the 'Choice Probability (CP)' that is a quantitative measure of correlation between trial-to-trial fluctuation of neural responses and the monkey's color judgment. He found that average of CP is significantly larger than 0.5 and this is consistent with the expectation that the activities of TE color-selective neurons positively correlate with the monkey's color judgment. This result suggests that the TE color selective neurons contribute to the color judgment of the monkey.

Finally, he examined the relationship between the neural sensitivity for color and contribution of the same neuron to color judgment of the monkey. The neural sensitivity is defined as the slope of the neurometric function and the contribution corresponds to CP. He found that there is no significant correlation between the neural sensitivity for color discrimination and CP. This rejects the idea that a specific subset of neurons with particularly high color sensitivity make large contribution to the color discrimination performance. Rather, it suggests that a large population of color selective TE neurons having various color sensitivity contribute to the color judgment.

色の識別は物体認知を助ける重要な視覚機能である。色弁別に大脳皮質腹側領域が重要な役割を演じることは、ヒトの脳損傷による障害から知られているが、その仕組みは明らかではない。サルの下側頭皮質は、大脳の腹側視覚情報処理経路の最上位に位置する領域であるが、破壊実験により色弁別の障害が生じる。また電気生理的な研究により、多くの色選択性ニューロンが下側頭皮質の小領域に集まって存在することが明らかにされている。それらのニューロンが色識別に関係していることが考えられ、その性質を明らかにすることにより、色弁別の仕組みの解明につながるものが期待される。しかし、これまで下側頭皮質ニューロンの活動と色弁別の関係を直接調べた研究は行われていない。そこで本研究において申請者は、細かな色の差を識別する近似色選択課題をサルに行わせ、課題遂行中のサルの色判断とニューロン活動の関係について定量的に調べた。近似色選択課題では、サルは画面中央に500ms間呈示される一つのサンプル刺激色(直径 2°)が、あらかじめ定められた2つの標的色のどちらに近い色であるかを判断する。サンプル刺激セットは実験ごとにニューロンの選択性に合わせて作成され、CIE-xy色度座標上でサルの弁別閾値より少し幅の広い区間から直線上に等間隔でサンプリングされた等輝度7種類の色から成る。ただし、サンプル刺激セットの両端の色はそれぞれ強いニューロン応答を引き起こす色(選好色)と弱く引き起こす色(非選好色)であり、その間の色が引き起こすニューロン応答はほぼ単調な変化を示すように設定されている。標的色は、サンプル刺激セットの両端の色に設定される。サルはサンプル刺激を見て、次に画面の左右に呈示される2つの白色の選択刺激の内、標的色に関連付けられた方にサッケードをすることでその色判断を示すことになる。第一の解析として、サルの色弁別能力とニューロンの色弁別能力の定量的な比較を行った。まず各サンプル色刺激に対してサルが選好色側を選んだ確率を計測して心理測定関数を求め、80%の正答率でサルが正しい方向を選んだ色差をサルの色弁別閾値として求めた。ニューロンの色弁別閾値は、まずそれぞれのサンプル色に対するニューロンの応答にROC解析を行い、選好色側の標的色を選ぶ割合を求めてニューロン測定関数を作成し、80%の正答率で正しい方向を選んだ色差をニューロンの色弁別閾値として求めた。その結果、サルの色弁別能力に匹敵する高い色弁別能力を持つニューロンも存在するが、平均としてはニューロンの弁別能力はサルの色弁別能力に比べて低いことがわかった。一方、色度図上の場所ごとのニューロン活動から求めた色弁別閾値とサルの色弁別閾値の間には高い正の相関が見られ、下側頭皮質の色選択性ニューロンの活動とサルの色知覚の間に強い関係があることが確認された。さらに、試行ごとのニューロンの活動強度の揺らぎと、サルの色判断の揺らぎの間には有意な相関があり、下側頭皮質の色選択性ニューロンの活動がサルの色判断に貢献していることを支持する結果が得られた。ただし、ニューロンの色識別の感度とサルの色判断に対する貢献度との間には相関が見られなかった。これらの結果から、色に対して高い感度を持つ一部のニューロンのみではなく、さまざまな性質をもつ多くの色選択性ニューロン集団の活動がサルの色判断行動に寄与しているということが示唆された。

本研究は大変難易度の高い実験を見事にこなし、かつ精度の高いデータ解析法を用いて明快な結論を見出したことで、当該分野の発展に大きく貢献する研究成果である。これらのことから、申請者の論文は学位論文として十分にふさわしい内容であると審査委員会の委員全員一致で判定した。